

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE  
Fakulta tělesné výchovy a sportu  
*Katedra anatomie a biomechaniky*

DISERTAČNÍ PRÁCE

**Počítačová animace a anatomicky realistický model  
ramenního kloubu**

Autor: ing. Vladimír Štěpán  
Školitel: prof. ing. Stanislav Otáhal, CSc.

Praha 2009

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat všem, kteří mi pomohli tuhle práci začít a dokončit. Především děkuji svému školiteli, prof. ing. Stanislavu Otahalovi, CSc, za směr práce a užitečné poznámky, připomínky a otázky. Dále patří můj dík ing. Petru Kubovému za pomoc při měření systémem Qualisys. Děkuji všem kolegům i kamarádům, kteří dokázali poslouchat mé zmatené úvahy a umožnili mi tak utřídit myšlenky.

Děkuji také své rodině za trpělivost, toleranci a péči, díky níž jsem při práci neshnil.

Poslední, ale rozhodně ne nejmenší dík patří personálu internetové čajovny V Síti, především Lence. Díky za dobrou senchu a moudrá slova povzbuzení...

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci zpracoval samostatně a použil jen literaturu uvedenou v seznamu použité literatury.

V Praze, dne 9. března 2009

.....  
Vladimír Štěpán



*Někdo musel světu ukázat, že vyfukováním tabákového dýmu do vody zlato nevznikne.*

## Anotace

Existují animační úlohy, jejichž řešení je omezeno nedostatkem vstupní informace. Tuto informaci by mohla doplnit sama animovaná struktura virtuálního humanoida, pokud by její klouby byly modelovány s ohledem na jejich anatomickou realitu. S použitím animační metody řešení úlohy inverzní kinematiky CCD a vstupními daty získanými optickým systémem snímání pohybu Qualisys byly provedeny experimenty zaměřené na modelování komplexu ramene. Kombinace použité animační metody a optického snímání pohybu vedla na nutnost adaptace metody CCD pro práci s více koncovými efekty určenými pouze prostorovými souřadnicemi polohy (orientace k dispozici není). Tato adaptace uspokojivě funguje. Navržený model kloubu je založen na dynamickém použití běžného animačního parametru stiffness. Tato dynamická stiffness je vyhodnocována fuzzy logickými operacemi z většího počtu vlivů. Myšlenka dynamického vytváření parametru stiffness je funkční, ale chování modelu ramene nebylo uspokojivé. Tento negativní výsledek může být způsoben nevhodně zvolenou animační metodou nebo konkrétním nastavením parametrů jednotlivých složek dynamické stiffness.

## Abstract

There are animation tasks that are limited by insufficient input information. This input could be complemented by the structure of virtual humanoid if its joints were modelled with respect to the anatomical reality. Using an inverse kinematics animation method CCD and input data motion-captured with an optical system Qualisys, several experiments aimed at the modelling of shoulder complex were performed. The combination of animation method and optical motion-capture lead to the need to adapt the CCD method to use more end-effectors defined by their spatial position coordinates (the orientation is not available). This adaptation works sufficiently well. Proposed joint model has been based on the dynamic use of common animation parameter of stiffness. This dynamic stiffness has been composed from any number of influences using the fuzzy-logic operators. This idea is functional, but the behavior of the shoulder model was not satisfactory. This negative result could have been caused by unsuitable animation method or the particular setting of stiffness component parameters.

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>10</b>
1.1 Formulace hypotéz . . . . .	10
1.1.1 Hlavní hypotéza . . . . .	11
1.1.2 Vedlejší hypotéza . . . . .	11
1.2 Struktura dokumentu . . . . .	12
1.2.1 Úvodní kapitoly . . . . .	12
1.2.2 Teorie a metodické prostředky . . . . .	12
1.2.3 Výsledky a diskuse . . . . .	13
<b>2 Biomechanika pro virtuální realitu</b>	<b>14</b>
2.1 Virtuální realita . . . . .	15
2.1.1 Typy aplikací VR . . . . .	16
2.1.2 3D aplikace a film . . . . .	17
2.1.3 Standard VRML . . . . .	18
2.2 Virtuální humanoid . . . . .	18
2.2.1 Aplikace . . . . .	19
2.2.2 Modelování . . . . .	23
2.2.3 Norma H-Anim . . . . .	27
2.2.4 Animační techniky . . . . .	29
2.2.5 Snímání pohybu . . . . .	33
2.2.6 Shrnutí . . . . .	37
2.3 Přínos biomechaniky . . . . .	38
2.3.1 Méně vstupních dat . . . . .	38
2.3.2 Nové animace . . . . .	39
2.3.3 Počítačové vidění . . . . .	40
2.3.4 Pohybově realistický model . . . . .	40
<b>3 Matematika rotací ve 3D</b>	<b>41</b>
3.1 Geometrické transformace . . . . .	41
3.2 Eulerovy úhly . . . . .	43
3.3 Reprezentace osa-úhel . . . . .	45
3.4 Kvaternion . . . . .	46
3.4.1 Kvaternion jako rotace . . . . .	47

3.5	Interpolace rotací . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Animace inverzní kinematikou</b>	<b>50</b>
4.1	Popis segmentové struktury . . . . .	51
4.1.1	DH notace . . . . .	51
4.1.2	AP reprezentace . . . . .	52
4.2	Dopředná a inverzní kinematika . . . . .	52
4.3	Metody využívající Jakobián . . . . .	54
4.3.1	Konstrukce Jakobiánu . . . . .	55
4.3.2	Inverze Jakobiánu . . . . .	57
4.3.3	Využití redundance . . . . .	58
4.3.4	Transpozice Jakobiánu . . . . .	59
4.4	Metoda CCD . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Inverzní kinematika a omezení kloubů</b>	<b>61</b>
5.1	Terminologie . . . . .	62
5.2	Model kloubu . . . . .	62
5.3	Parametr omezení rotace kloubu . . . . .	63
5.4	Omezení v prostoru Eulerových úhlů . . . . .	63
5.4.1	Prosté limity . . . . .	64
5.4.2	Obálka . . . . .	64
5.5	Omezení v prostoru quaternionu . . . . .	65
5.6	Směr a krut . . . . .	66
5.6.1	Sférické polygony a kužely . . . . .	67
5.7	Shrnutí problematiky mezi rotace . . . . .	68
5.8	Priorita řešení – parametr stiffness . . . . .	69
5.9	Omezující parametry a H-Anim . . . . .	70
<b>6</b>	<b>Systém ramenního kloubu</b>	<b>72</b>
6.1	Funkce a stavba ramene . . . . .	73
6.1.1	Anatomie . . . . .	74
6.2	Kinematika . . . . .	75
6.2.1	Náhradní kinematická struktura ramene . . . . .	76
6.2.2	Model pro animaci . . . . .	78
6.3	Dynamika . . . . .	79
6.4	Problém lopatky . . . . .	79
6.4.1	Modelování jako omezení . . . . .	80
6.4.2	Animace lopatky . . . . .	81
6.4.3	Pohyblivost lopatky . . . . .	83
6.5	Meze rotací kloubů ramene . . . . .	84
6.5.1	Meze kloubu ramenního . . . . .	84
6.5.2	Meze kloubu akromioklavikulárního . . . . .	85
6.5.3	Meze kloubu sternoklavikulárního . . . . .	85
6.6	Závěr . . . . .	85

<b>7</b>	<b>O implementaci testovací platformy</b>	<b>87</b>
7.1	Virtuální humanoid . . . . .	88
7.1.1	Tvorba modelu . . . . .	89
7.2	Systém Qualisys . . . . .	90
7.2.1	Použité markery . . . . .	92
7.2.2	TSV soubor . . . . .	93
7.2.3	Zjednodušení trajektorie . . . . .	94
7.3	Implementace IK solveru . . . . .	95
7.3.1	Inicializace . . . . .	95
7.3.2	Umístění humanoida do scény . . . . .	96
7.3.3	Řešení kinematického řetězce . . . . .	97
7.3.4	Více koncových efektorů . . . . .	98
7.3.5	Hierarchie kinematických řetězců . . . . .	99
7.4	Tvorba animace . . . . .	101
7.5	Závěr . . . . .	101
<b>8</b>	<b>Model ramenního kloubu</b>	<b>103</b>
8.1	Souřadné systémy kloubů . . . . .	103
8.1.1	Hierarchické řazení stupňů volnosti . . . . .	104
8.1.2	Popis souřadných systémů . . . . .	105
8.2	Meze rotace . . . . .	106
8.3	Omezení pohyblivosti - parametr stiffness . . . . .	107
8.3.1	Skládání složek omezení a fuzzy logika . . . . .	108
8.3.2	Vyhodnocení jednotlivých vlivů . . . . .	108
8.3.3	Ramenní rytmus . . . . .	109
8.3.4	Vliv lokte . . . . .	110
8.3.5	Addukce ramene . . . . .	110
8.3.6	Blízkost mezní rotaci . . . . .	110
8.3.7	Vlivy dané animační metodou . . . . .	111
8.3.8	Pohyblivost jednotlivých kloubů . . . . .	111
8.4	Popis kloubů . . . . .	115
<b>9</b>	<b>Experimenty</b>	<b>118</b>
9.1	Testovací data . . . . .	118
9.2	Pokusy s IK solverem . . . . .	120
9.2.1	Více koncových efektorů . . . . .	121
9.2.2	Hierarchie kinematických řetězců . . . . .	124
9.3	Pokusy s modelem ramene . . . . .	125
9.3.1	Omezení rotace . . . . .	126
9.3.2	Parametr stiffness . . . . .	128



<b>10 Závěr</b>	<b>132</b>
10.1 Vedlejší hypotéza a obecné animační aspekty . . . . .	132
10.1.1 Virtuální humanoid . . . . .	132
10.1.2 Snímání pohybu . . . . .	133
10.1.3 IK metoda . . . . .	133
10.1.4 Zhodnocení . . . . .	134
10.2 Hlavní hypotéza . . . . .	135
10.2.1 Geometrie modelu ramene . . . . .	135
10.2.2 Omezení rotace . . . . .	135
10.2.3 Dynamické pojetí parametru stiffness . . . . .	136
10.2.4 Testy modelu ramene . . . . .	136
10.2.5 Zhodnocení modelu ramene . . . . .	136
10.3 Shrnutí . . . . .	137
10.3.1 Animační metoda . . . . .	137
10.3.2 Model ramene . . . . .	138

# Kapitola 1

## Úvod

Ve světě počítačového softwaru existuje velké množství aplikací, které zobrazují nebo analyzují člověka v pohybu, jinými slovy, řeší nějaký druh animační úlohy. Pro tento účel se používají různé modely s různou úrovní anatomického realismu. Velká část modelů je zaměřená na vizuální věrohodnost a vnitřní strukturu modelu tak diktují spíše vlastnosti použitých animačních metod, než skutečná anatomie. Pro určitou třídu animačních úloh je anatomicky realistická struktura modelu důležitá. Tento anatomický realismus se nemusí omezovat jen na rozměry a prostorové rozmístění kloubů, ale i na pohybové vlastnosti.

Obecně vzato, v některých animačních úlohách je možné, že by vhodně vytvořený model byl schopen doplňovat chybějící informaci pro nalezení realistického řešení. Blíže se tímto tématem zabývá sekce 2.3.

Není také bez zajímavosti možné využití animačních technik v biomedicínských aplikacích při různých vyšetřeních pohyblivosti. V takových případech není možné spokojit se s iluzorním vizuálním realismem animace, ale zajímalo by nás konkrétní chování konkrétních kloubů. Jak uvidíme dále, taková úloha se od běžné animace dost liší jak použitou artikulovanou strukturou, tak požadavky na výslednou animaci.

Tato práce si klade za cíl prozkoumat možnosti tvorby modelu člověka s pohybově realistickými klouby.

### 1.1 Formulace hypotéz

Základní hypotéza vyjadřující střed zájmu práce by mohla znít: *Lze vytvořit obecný model kloubu použitelný pro jakýkoliv kloub v těle a pro jakýkoliv pohyb.* Obecným modelem rozumíme zobecnění pohybových možností kloubu. Je zřejmé, že takto formulovanou hypotézu nelze plně ověřit. Proto se práci zaměřuje na modelování systému ramenního kloubu, který je složen hned ze tří kloubních spojení modelovatelných nějakým "obecným modelem".

Rameno svou složitostí ve stavbě i pohyblivosti představuje lákavý cíl pro

experimentování s anatomicky realistickým modelem kloubu. Vytvoříme-li obecný model kloubu, kterým bude možno vyjádřit klouby v systému ramene, pak je pravděpodobné, že takový model bude vyhovovat i pro ostatní klouby na těle. Hypotézu tak můžeme mírně konkretizovat: *Lze vytvořit obecný model kloubu použitelný pro všechny klouby a jakýkoliv pohyb ramenního systému.* Vyvrácením této hypotézy vyvrátíme i tu obecnou, jejím potvrzením můžeme dále konstatovat, že s vysokou pravděpodobností platí i obecná hypotéza.

Z hlediska modelování ramenního kloubu je důležitý pohyb lopatky v rámci pohybu celého komplexu. Tento pohyb je na skutečném člověku velmi těžko měřitelný, ale je dobrým indikátorem realistického nastavení kloubů ramene na modelu.

Naším záměrem nejlépe odpovídá animační úloha inverzní kinematiky (IK), tedy nalezení úhlů v kloubech při znalosti polohy konce řetězce kloubů. Tato úloha bývá obecně nelineární s počtem hledaných proměnných vyšším, než počtem známých hodnot. K vyřešení se používají různé lokální linealizace a podobné triky a nalezená řešení mají sklon lišit se podle použité metody. V případě ideálního modelu kloubu by zřejmě měly všechny metody vést na shodný výsledek. Pro naše potřeby však bude vhodné omezit se na použití jedné metody. Protože o teoreticky čistých metodách založených na inverzi Jakobiánu bylo mnoho napsáno, my se pokusíme použít heuristickou metodu postupného přibližování nazývanou Cyclic Coordinate Descent (CCD).

### 1.1.1 Hlavní hypotéza

Vezmeme-li v úvahu vše výše řečené, naše hlavní hypotéza zní: *Lze vytvořit takový model kloubu, který bude možné použít při modelování ramenního komplexu tak, aby umožnil animační metodě CCD najít řešení vyhýbající se nerealistickým polohám lopatky.*

Tuto hypotézu je možné testovat rozborem vybraných snímků ze záznamů několika pohybů horní končetiny snímaných optickým systémem snímání pohybu, což je aspekt důležitý pro celou práci.

### 1.1.2 Vedlejší hypotéza

Při řešení animační úlohy s použitím dat z optického snímače pohybu je zřejmé, že nelze použít metodu CCD v plné formě, ale bude třeba spokojit se pouze se znalostí prostorových souřadnic sledovaného bodu (bez jeho prostorové orientace). Nabízí se otázka, zda nelze metodu CCD adaptovat pro použití více sledovaných bodů jako koncových efektorů.

Naše vedlejší hypotéza se dotýká právě tohoto tématu: *Animační metodu inverzní kinematiky CCD lze upravit pro použití více koncových efektorů ke zpřesnění výsledné animace.*

## 1.2 Struktura dokumentu

Následující text je členěn do kapitol podle diskutovaného tématu. Přibližme nejprve, co je možné od jednotlivých částí očekávat.

### 1.2.1 Úvodní kapitoly

Kromě kapitoly 1, která zhruba vymezuje rozsah problému a formuluje hypotézy, se k úvodu dá zařadit i kapitola 2, zadefinuje virtuální realitu a virtuálního humanoida a ostatní základní pojmy. Následuje popis, jak se člověk ve virtuální realitě modeluje a jak se animuje, aby bylo možno přiblížit rozsah celého úkolu a možné problémy i čtenáři z oboru vzdálenějšího virtuální realitě. Tato kapitola je úvodem do širší problematiky animace člověka a je založena na přednášce na dané téma pro doktorandský předmět Virtuální realita na katedře výpočetní techniky FEL ČVUT (2003, 2005, 2007). Původ této kapitoly sahá do roku 2003, proto některé z uvedených příkladů (např. herní aplikace) nejsou aktuální. Aktualizovány nebyly, protože stále dobře ilustrují diskutovanou problematiku, mnohdy lépe díky své jednoduchosti.

Na konci této kapitoly (sekce 2.3) bude vhodný okamžik představit oblasti, které by realistický model využily, a přiblížit, koncept pohybové realistického modelu kloubu, což znamená pohybové parametry - omezení stavového prostoru pomocí limitů a zavedení priorit usnadňujících výběr řešení.

### 1.2.2 Teorie a metodické prostředky

Pohybové animační parametry ale nejsou novou myšlenkou, dávno je používají animátoři. Jakékoliv parametry ovlivňující rotaci kloubu mají těsný vztah ke konkrétní reprezentaci rotace použité při popisu kloubu, proto je vhodné podat základy matematiky 3D rotací. O to se postará kapitola 3.

Pro pochopení role pohybových parametrů v animačních úlohách bude užitečné detailně představit postupy animace inverzní kinematikou (kapitola 4).

V kapitole 5, budou popsány různé pokusy o implementaci pohybových omezení. Současný výzkum se zabývá hlavně vyjádřením rozsahu pohyblivosti, tedy limity rotace, v různých matematických reprezentacích. Priorita nazývaná *stiffness*, ve výzkumu neoslovovaná, bývá nastavitelným parametrem, jímž si animátor pomáhá. Je možné, aby byla něčím víc? Rozhodně ji částečně ovlivňuje vlastní stavba kloubu, okolních svalů, dokonce i aktuální poloha (hodnota rotace) kloubu a někdy kloubů sousedních.

Překážkou tvorbě jednoduchého modelu lidské postavy je systém ramenního kloubu, který se nedá jednoduše vyjádřit jako hierarchie transformací. Z mechanického hlediska jeho struktura obsahuje uzavřenou smyčku

hrudníku, lopatky a klíční kosti. Tento fenomén a dosavadní přístupy k jeho modelování popíšeme podrobněji v kapitole 6.

### 1.2.3 Výsledky a diskuse

Kapitolou o rameni ukončíme teoretický úvod. Následuj popis implementace testovací platformy (kapitola 7), která realizuje CCD algoritmus inverzní kinematiky pracující s daty snímanými optickým snímačem pohybu Qualisys. Uvedeme také některé pokusy, které mohou vést k zobecnění tohoto propojení snímače pohybu s algoritmem inverzní kinematiky na systém pro tvorbu komplexních celotělových animací. Tato kapitola tedy sdružuje všechny vytvořené výsledky, které jsou obecnějšího charakteru a souvisí spíše s vedlejší hypotézou (1.1.2), než výlučně s modelem ramene.

Vlastnímu popisu vytvořeného modelu ramene je věnována samostatná kapitola 8.

Popis a výsledky jednotlivých experimentů je v kapitole 9. Tato kapitola je dále členěná tak na sekci 9.1 věnující se popisu testovacích dat, sekci 9.2 pro experimenty zaměřené na animační techniku a konečně sekci 9.3 věnovanou testům vlastní hlavní hypotézy (1.1.1).

Diskuse jednotlivých aspektů práce je roztroušená po všech kapitolách, zejména těch, které se věnují výsledkům. Její souhrn a zhodnocení celé práce pak přinese kapitola 10.

## Kapitola 2

# Biomechanika pro virtuální realitu

Pojmem *virtuální realita* se označuje úplně nebo jen částečně neexistující prostředí vytvářené pomocí počítačového systému. V dalším textu budeme pro virtuální realitu používat zkratku VR. Systémy pro virtuální realitu prezentují uživateli (skupině uživatelů) iluzi přítomnosti v umělém prostředí nazývaném virtuální svět, virtuální scéna nebo virtuální prostředí. Vyvolání pocitu přítomnosti se dociluje ovlivňováním uživatelských smyslů, nejčastěji zraku a sluchu, někdy hmatu a v simulátorech často i rovnováhy.

Úkol vytváření pocitu přítomnosti má svá specifika zejména co se týče časových nároků. Takto se dostáváme k jiné, užší definici VR, která mluví o 3D prostředí vytvářeném v paměti počítače v reálném čase a interaktivně. Reálným časem je zde míněna doba, kterou uživatel nebude vnímat jako zpoždění.

*Virtuální realita* je navíc v přeneseném významu také pojem specifikující vědní disciplínu, která se tvorbou výše definované VR zabývá. Tato vědní disciplína je odvozená od počítačové vědy, jmenovitě počítačové grafiky, odkud čerpá techniky pro modelování a hlavně zobrazování modelovaných objektů pomocí počítače. S rozvojem možností použití výpočetní techniky pro modelování a simulace však do vědy o VR stále více pronikají jiné vědní obory, které se zabývají modelovanými jevy. A samozřejmě je třeba uvést studium lidského vnímání, které určuje, jaké nuance realismu jsou pro člověka důležité.

Nejčastěji se vytvářejí virtuální prostředí modelující skutečný svět a taková prostředí by byla velmi neúplná bez přítomnosti virtuálních lidí. Existuje podobor VR, který se modelováním a animací lidí zabývá (*human animation*). Vědou, jejíž poznatků lze při modelování lidí využít je *biomechanika*.

V tomto textu chceme podat stručný úvod do problematiky modelování a animace člověka ve VR a dále poukázat na možnost využití biomechaniky

pohybového systému v tomto oboru. Nejprve, v části 2.1 přiblížíme vlastní pojem virtuální realita (VR). V další, rozsáhlejší části (2.2) se zaměříme na virtuální modely člověka, od příkladů různých aplikací (2.2.1), přes techniky modelování (2.2.3), až po možnosti animace modelu (2.2.4) se zvláštním zaměřením na technologii snímání pohybu (2.2.5). Nakonec v části 2.3 specifikujeme možný přínos biomechaniky pohybového systému pro tvorbu pohybově realistického modelu a naznačíme využití takového modelu.

## 2.1 Virtuální realita

Základem VR [50] jsou postupy počítačové grafiky – tvorba a manipulace s 3D objekty, pohyb ve scéně, detekce kolizí, zobrazování (rendering) v reálném čase apod. Efekt těchto technik bývá umocněn použitím speciálních periferních zařízení, které zajišťují obrazovou, zvukovou a hmatovou interakci. Jde hlavně o helmy s displeji, stereoskopické projekční plochy, snímače polohy v prostoru, hmatová zařízení, simulační kabiny a jiné (obrázek 2.1). Na opačném konci spektra je VR realizovaná bez speciálních zařízení, s pomocí běžných vstupně výstupních komponent osobního počítače (monitor, zvukový výstup, klávesnice, myš).



Obrázek 2.1: Příklady speciálních zařízení pro VR.

Aplikací z oblasti VR je obvykle nazýván takový program, u něhož převládají následující vlastnosti.

- *Reálný čas* Zobrazování a interakce se provádějí s takovou rychlostí, při níž se pohyb na zobrazovacím zařízení jeví jako plynulý, reakci systému uživatel nevnímá jako zpoždění. Za minimální rychlost se považuje 25 snímků za sekundu (*fps*, *frames per second*)
- *3D prostor* Scéna a objekty mají trojrozměrný charakter.
- *Navigace* Uživatel může vstoupit do scény. Způsoby navigace se liší od přeskakování mezi předdefinovanými body (viewpointy) až po plynulé procházení po libovolných drahách. Objekty ve scéně mohou uživatelův pohyb realisticky omezovat (kolize).

- *Interaktivita* Uživatel může manipulovat s objekty. Scéna též může obsahovat objekty animované podle předem daných scénářů, nebo s ohledem na uživatelskou aktivitu.
- *Multimédia* Vedle obrazu jsou využita další informační média, nejčastěji zvuk. Ten může doplňovat atmosféru scény, doplňovat interakce s objekty, nebo přinášet další konkrétní informace o objektech ve scéně. Videosekvence jako textury jsou dalším příkladem použití multimédií ve VR.

Nejdůležitější z požadavků na VR systémy je ten první. Lidský vizuální systém dobře vnímá pohyb a proto je pro něj plynulost pohybů důležitější, než vlastní kvalita obrazu.

Z výše uvedených požadavků na VR systém je zřejmé, že dobrým příkladem virtuální reality je kterákoliv 3D počítačová hra. Ať už je obecně rozšířený názor na převládající kvalitu a úroveň počítačových her jakýkoliv, nelze popřít, že právě tahle část zábavního průmyslu je velkým motorem výzkumu v oboru VR.

Hry jsou možná nejrozšířenějším příkladem VR systémů vůbec, ale rozhodně nejsou jediným využitím. VR je v první řadě vyjadřovací a prezentační prostředek, nástroj k sofistikované vizualizaci. Záleží jen na konkrétní aplikaci, co bude tento nástroj prezentovat. V tomto textu již byl naznačen vzdělávací potenciál VR aplikací, který zdaleka ještě nebyl plně rozvinut.

### 2.1.1 Typy aplikací VR

*Pohlčující virtuální realita (immersive VR).* Vždy je spjata se speciálními technickými zařízeními, které mají uživatele v co největší míře oprostit od vjemů skutečného světa a dodat mu zdání, že je zcela ponořen do světa virtuálního. Mezi typická periferní zařízení patří helma se stereoskopickými brýlemi a sluchátky, snímače detekující prostorovou polohu uživatele nebo datová rukavice nahrazující jednodušší vstupní zařízení. Mezi zajímavé technické součásti patří dotyková (*tactile, force feedback*) zařízení, která jsou schopna měnit odpor či tlak vyvíjený proti ruce (jiným částem těla) uživatele a tak vyvolávat pocit mechanických vlastností materiálu. Periferní zařízení systémů pohlčující VR mohou být i velmi rozsáhlá, uživatel je často uzavřen v kabině, která působí vjemy jeho centru rovnováhy.

Takovéto systémy nachází uplatnění nejen jako různé trenažery či zábavní simulátory, ale používají se i jako terapeutický prostředek. Známé je úspěšné použití při léčbě různých fobií.

*Rozšiřující virtuální realita (augmented VR).* Informace ze skutečného, okolního světa jsou kombinovány s doplňujícími prvky virtuální reality. Nutnou a klíčovou součástí systému jsou senzory snímající scénu a uživatelskou aktivitu. Nezbytností je kamera, jejíž pozice a orientace je synchronizována



s pohybem uživatele. Často je tato oblast považována za jeden ze styčných bodů VR a počítačového vidění.

Příkladem použití mohou být vojenské aplikace v bojových strojích, kde je obraz venkovní scény doplňován symboly pro nepřátelské a spřátelené objekty. V civilním sektoru byl vyvinut systém použití rozšiřující VR při montáži elektrických rozvodů v letadlech Boeing – dělníkům jsou do brýlí promítány dodatečné informace o montážních bodech, na které se dívají. Zajímavé projekty se objevují v oblasti kulturního dědictví, návštěvníci historicky zajímavých míst (Pompeje) mohou dostat speciální brýle, v nichž vidí současnou scénu doplněnou o objekty i postavy, které se tam mohly vyskytovat v minulosti.

*Jednoduchá virtuální realita (desktop VR, low-end VR).* Toto je kategorie aplikací, které nepoužívají žádné speciální zařízení a proto je lze provozovat na většině běžných počítačů. Škála použití je rozmanitá od zábavních, přes vzdělávací až po profesionální výzkumné a simulační aplikace. Zmíněné počítačové hry ve velké většině patří do této kategorie.

Tato klasifikace se zabývá hlavně použitými technickými prostředky. Existují však i jiná členění jako například *kontinuum RV (reality-virtuality continuum)*, které používá stupnici reálné prostředí  $\Rightarrow$  rozšířená realita  $\Rightarrow$  rozšířená virtualita  $\Rightarrow$  virtuální prostředí. Rozšířenou *virtualitou* je zde chápán počítačový svět obohacený o prvky světa reálného (fotografie). Toto členění se však odchyluje od technického chápání a odvíjí se spíše od filosofických úvah o vnímání světa.

Na VR aplikace je také možno pohlížet z hlediska počtu uživatelů najednou přítomných ve scéně. Aplikace pro jediného skutečně aktivního uživatele se z technického hlediska značně liší od aplikací, kde může být přítomen větší počet uživatelů najednou interagujících se scénou. Přitom zrovna takovéto aplikace jsou velmi užitečné například pro zprostředkování setkání odborníků ze vzdálených míst a umožnění jejich kolaborativní spolupráce na řešení problému. Společným rysem těchto systémů, pro něž se také používá označení *distribuovaná VR*, je potřeba synchronizace aktivit uživatelů bez omezení uživatelů samotných.

### 2.1.2 3D aplikace a film

V posledních letech se příprava žádného většího a konkurenceschopného filmu neobejde bez spolupráce s nějakým animačním studiem, které vytváří velkou část speciálních efektů. Vzniklo už mnoho filmů natočených výlučně ve virtuálním prostředí. Tato filmařská práce řeší mnoho podobných problémů jako systémy VR a v dalším textu budou občas použity příklady z tohoto oboru. Je ale třeba zdůraznit, že práce s 3D prostředím je zde značně odlišná a tento rozdíl je velmi zásadní.

Při přípravě vysoce realistických filmových efektů totiž odpadá požadavek na zobrazování v reálném čase, na navigaci a na interaktivitu. Každý snímek je možno zvlášť dodatečně editovat, pokud použitý algoritmus výpočtu zrovna nepřinese přesně požadovaný výsledek. Také na výpočet (rendering) konečného vzhledu je nesrovnatelně více času. Výsledkem je film, kde divák nemá svobodu volby úhlu pohledu na scénu.

Vysoce realistická VR tedy představuje mnohem větší výzvu, než rozšířené a používané techniky výroby pohyblivých obrázků. Toto je při posuzování VR systémů třeba mít na paměti.

### 2.1.3 Standard VRML

Na závěr sekce o VR je vhodné zmínit, že skupina Web3D vyvinula standard pro popis 3D scén. Tento standard je obecně znám pod názvem VRML 97. Jedná se o textový formát doplněný o mechanismus interpretace, který je implementován několika prohlížeči. Ačkoliv je VRML s úspěchem použitelné pro definici scény v mnoha aplikacích VR, jeho hlavním smyslem jsou VR aplikace na Internetu.

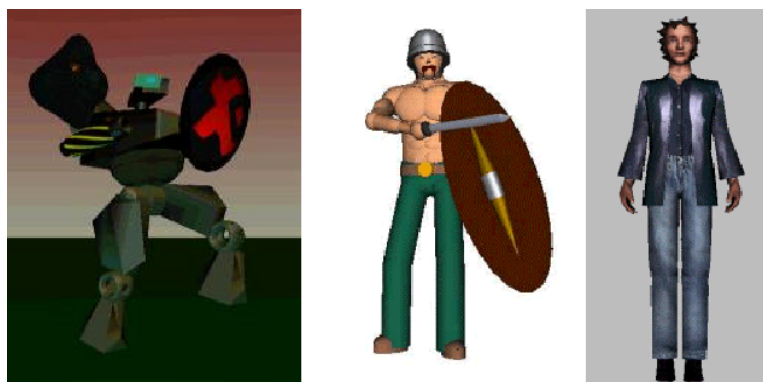
Jazyk VRML definuje nejen geometrické a vzhledové parametry scény, ale i dynamické aspekty, různé interpolátory a časovače a je vybaven skriptovacím mechanismem. Jazyk je jednoduchý a intuitivní, pro editaci scény definované ve VRML není třeba dlouhého a hlubokého studia.

Dobry přehled standardu VRML poskytuje například kniha [49].

## 2.2 Virtuální humanoid

S rozvojem virtuálních prostředí se zcela přirozeně rozvíjí i snaha modelovat a zobrazovat v tomto prostředí člověka. Počítačové modely člověka se liší v mnoha aspektech podle svého zamýšleného použití. Na jednom konci spektra stojí prosté projekce uživatele do víceuživatelského virtuálního prostředí (MUVR - Multi User Virtual Reality), jejichž jediným účelem je dát uživateli pozorovatelnou podobu a jejich úroveň realismu vizuálního i funkčního je tak často velmi nízká. Opačný konec tvoří modely funkčně i vizuálně velmi sofistikované sloužící k nejrůznějším simulacím.

Model (jakkoliv realistický) sloužící ke zviditelnění návštěvníka virtuálního prostředí se nazývá *avatar*. Toto slovo pochází ze sanskrtu a původně označovalo hmotné vtělení boha. Pojem avatar se často používá obecně pro jakoukoliv virtuální postavu včetně samostatně fungujících agentů, správně by však měl označovat jen uživatelem řízený model. Avatar ve VR je v podstatě komunikačním nástrojem a pro svou funkci vlastně nemusí mít ani humanoidní tvar. Obrázek 2.2 ukazuje několik příkladů různých avatarů. Zleva nepříliš humanoidní avatar převzatý z knihy [45], stylizovaná lidská podoba vytvořená pro víceuživatelské světy firmy Blaxxun [54] a nakonec poměrně realistický avatar vytvořený v programu Avatar Studio [53].



Obrázek 2.2: Příklady avatarů.

Naproti tomu pojmem *virtuální humanoid* označujeme modely, které mají skutečně lidský tvar. Využití virtuálních humanoidů přesahuje oblast víceuživatelské VR, mnohem větší význam mají ve filmovém a herním průmyslu, v různých simulacích fyzických možností i chování, při ověřování průmyslových návrhů a pracovních postupů a v dalších oblastech.

### 2.2.1 Aplikace

Počítačové modely lidí mají stále širší rozsah použití. Můžeme začít u animačních studií pracujících ve filmovém průmyslu. Tato tematika byla již zmíněna v 2.1.2. Zde se k filmu vracíme jako k rozsáhlému poli využití virtuálních lidí. Nejedná se o typickou aplikaci VR, ale pro obor modelování a animace člověka je tato oblast důležitá, neboť se zde řeší problémy týkající se vysokých úrovní realismu. Vizualní realismus je to, co je středem zájmu, modely jsou tedy komplexnější a výpočetně náročnější, než v jiných oblastech. Pro animaci modelu se používají zaznamenané pohyby skutečných lidí. Uvedme film *Shrek* jako příklad zpracovaných efektů (obrázek 2.3).

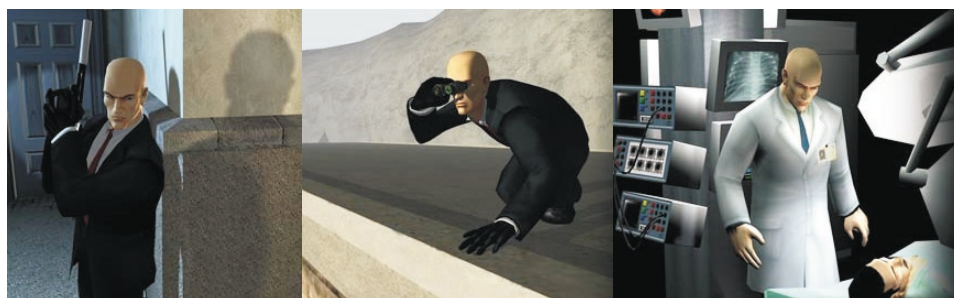
Další rozšířenou aplikací jsou samozřejmě hry. A ty kladou již ze svého principu důraz na interaktivitu. Modely používané ve hrách jsou různé a závisí na druhu hry.

Hry, kde se ve scéně najednou vyskytuje menší množství postav, již používají vizuálně velmi realistické modely. Příkladem takové hry může být *Hitman 2* (Eidos interactive 2002) [57], která už není na špici technického pokroku, ale stále vede myšlenkou snížení bodového ohodnocení hráče za zbytečné zabíjení. Obrázek 2.4 ilustruje virtuální postavy z této hry. Animace modelů v těchto hrách bývají opět předpřipravené, využívá se sady nahraných pohybů, které se vybírají podle situace. V této oblasti probíhá vývoj technik adaptace animačních dat na menší změny situace.

Na opačném konci spektra použitých modelů jsou hry, které zobrazují ve



Obrázek 2.3: Ilustrace z filmu Shrek, kde byla použita široká škála virtuálních postav od velmi lidských až po ne úplně humanoidní.



Obrázek 2.4: Hra Hitman 2 (Eidos Interactive 2002)

scéně velké množství postav. Uveďme Rome: Total War (Activision 2004) [63], strategickou hru, která simuluje bitvy v 3D prostředí. Scéna může obsahovat až 10000 nezávisle animovaných postav. Software této hry byl dokonce použit pro dokumentární seriál o bitvách starověku. Obrázek 2.5 ilustruje prostředí hry. Úkol zobrazit a animovat takové množství postav musel nutně přinést velká zjednodušení modelů i animací. S úspěchem je zde využít trik známý ve VR jako *LOD* (*level of detail - úroveň detailu*). Vzdálené objekty nemusí být detailně propracovány, aby vypadaly realisticky. Totéž platí i pro animace [5].

Techniky modelování a animace člověka pronikají spolu s VR obecně i do oblasti umění. Taneční performance, za jejichž vznikem stojí Centrum pro interaktivní umění a nové technologie (CIANT) [56], spojují živý tanec s VR prostřednictvím technologie snímání pohybu (motion capture). Pohybová data snímaná z tanečníka jsou interaktivně přenášena do virtuální scény, na virtuálního humanoida nebo na jiné objekty, mohou být i různě transformována. Možnosti jsou omezené jen fantazií umělce (a komunikací s technikem), viz obrázek 2.6.

Další oblastí rozvíjejícího se využití VR, potažmo modelů člověka, je



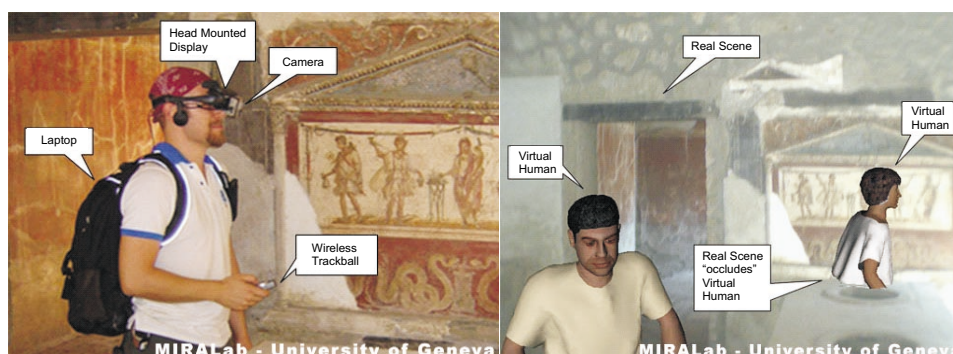
Obrázek 2.5: Hra Rome: Total War (Activision 2004). Obrázek vlevo ukazuje snížený realismus při pohledu zblízka, což je cena za množství postav. Vpravo je vidět, že z odstupu je realismus dostatečný.



Obrázek 2.6: Záběry z performancí spojujících tanec a VR (CIANT)

kulturní dědictví (*cultural heritage*). Ve VR se rekonstruují historické lokality, které jsou často oživeny virtuálními lidmi [55]. V takových případech se virtuální postavy pohybují většinou podle definovaných scénářů. Jinde však mohou fungovat i jako interaktivní agenti poskytující návštěvníkovi scény různé informace [64]. Mezi nejzajímavější projekty v této oblasti patří EU IST Lifeplus (VRlab, MIRALab) [59], jehož cílem je oživení historických Pompejí systémem rozšířené reality (augmented reality) s virtuálními obyvateli z dávné minulosti (obrázek 2.7).

Virtuální lidé také slouží k ověřování průmyslových designů. K tomuto účelu vzniklo několik systémů založených na software JACK [31] vyvinutém Pennsylvánskou universitou. Mezi první úspěchy patřilo přepracování návrhu nového traktoru firmy John Deere poté, co JACK odhalil nedostatky ve výhledu z kabiny aniž by bylo třeba stavět prototyp. Boeing Human Mo-



Obrázek 2.7: Projekt LIFEPLUS, vlevo vybavení návštěvníka historických Pompejí, vpravo ukázka zobrazované doplněné reality

deling System (BHMS) je jeden z těchto systémů, který se používá při ověřování přístupnosti vnitřních prostor letadel pro mechaniky. A v neposlední řadě konstrukce a montáž orbitální stanice ISS byla také ověřována ve VR s virtuálními astronauty v systému BHMS (obrázek 2.8).



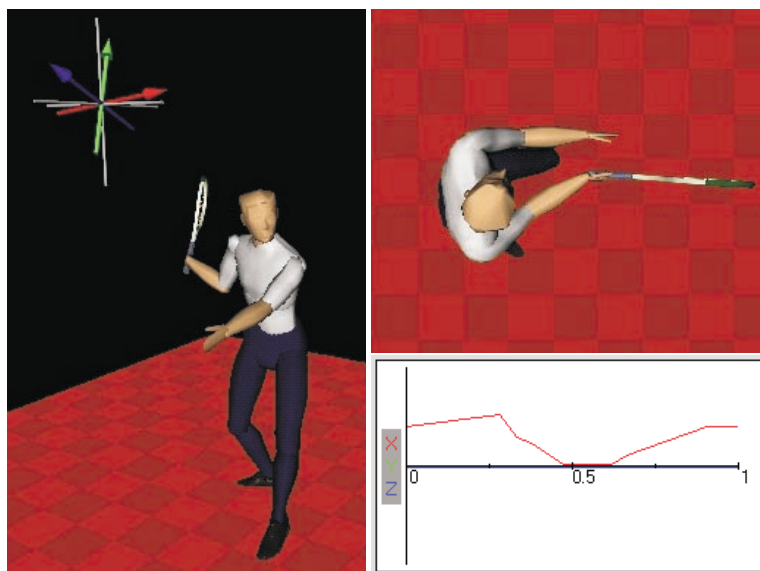
Obrázek 2.8: Ukázky systému BHMS.

Bezpečnostní instruktáž na palubě letadel švýcarských aerolinek již není prováděna stewardkami, ale na obrazovce ji předvádí virtuální postavičky. To je jednoduchý a do praxe zavedený příklad výukového využití VR a virtuálních lidí. Výukový potenciál VR je však mnohem větší. Je možno použít virtuální postavičky k výuce sportovních technik - tam, kde by trenér sáhl po videozáznamu, poskytne 3D rekonstrukce navíc svobodu úhlu pohledu [35]. Citovaná práce se zabývá výukou tenisu, viz obrázek 2.9.

Systém pro výuku hry na bicí [25] je zase příkladem úspěšného použití animačních technik (inverzní kinematiky) na podporu výuky dovedností, kde spíše než přesnost techniky je důležité plánování. Systém se dovede přizpůsobit uživatelem definované sadě bicích a jeho síla je v plánovači, který přiřazuje ruce k jednotlivým cílům. Modul IK potom pro vybranou

ruku odvodí trajektorii pomocí níž ruku animuje.

Také se objevují první kroky k inteligentním systémům schopným rozpoznávat semantiku lidské činnosti a tak asistovat při výuce složitějších aktivit (např. montážních úkolů) [51]. VR a hlavně virtuální lidé mohou být těmto systémům silným vizualizačním nástrojem.



Obrázek 2.9: Ukázka experimentálního systému pro podporu výuky tenisu (různé úhly pohledu na animovanou postavu a okénko pro vizualizaci rozboru aktivity kloubu)

Realistické modely lidských těl jsou napojovány na výsledky výzkumu lidského chování a tak vznikají VR systémy pro simulaci chování jednotlivců i skupin a davu. Takové systémy používají bezpečnostní složky pro simulace taktických situací, odhalování rizik a řešení při pouličních nepokojích a pod.

### 2.2.2 Modelování

V předchozím textu byly popsány vybrané příklady aplikací virtuálních modelů lidí. Na několika místech bylo naznačeno, že tyto modely mohou být různé technické konstrukce. Přibližme si nyní problematiku vytváření takového modelu, čímž ozřejmíme i ony rozdíly v konstrukci.

Je zřejmé, že člověk je z hlediska 3D modelování velmi komplexní struktura a vytváří hned několik okruhů problémů. Základní oblasti modelování jsou tyto:

- *Tělo a pohyby.* Základem každého animovatelného modelu je hierarchická struktura transformací – kloubů. Tyto klouby jsou propojeny

segmenty – kostmi. Nejjednodušší modely implementují jen tuto hierarchickou strukturu a jejich segmenty jsou vizualizované simplistickým způsobem. V aplikacích zaměřených na tvorbu animací se často používá jako animovaný humanoid pouhý kostlivec, který vypadá svým způsobem realisticky a nemusí řešit problémy pohybových deformací měkkých tkání.

- *Měkké tkáně.* Povrch lidského těla je z hlediska modelování problematický pro svojí schopnost deformace v pohybu a při interakci s okolím. Model, který má vypadat realističtěji, než kostlivec se musí s tímto problémem vypořádat. Příklady řešení zmíníme později.
- *Obličej.* Obličej je velmi pohyblivá část těla, kterou nelze snadno animovat pomocí mechanismu hierarchie transformací. Většinou se celý obličej modeluje souvislou polygonální mřížkou, u níž lze měnit relativní pozice jednotlivých bodů nebo skupin bodů. Modelování a animace obličeje je poměrně samostatná disciplína. Často je problém animace obličeje řešen také v souvislosti s vývojem syntezátorů řeči. Modelovaný obličej “vyslovuje” syntetizovanou řeč, pro každý *foném* (stavební jednotku řeči) má definovaný tzv. *vizém* (mimickou konfiguraci) související s vyslovovaným zvukem.
- *Doplňky.* Tato oblast již přímo nesouvisí s vlastním modelováním člověka, pro tvorbu realistických modelů je však důležitá. Doplnky je zde míněno hlavně oblečení, ale i součásti těla jako třeba vlasy. Modelování a animace takových materiálů je věda sama o sobě, ale s biomechanikou a vlastní animací člověka má společného málo.
- *Chování.* Uvádíme jen pro úplnost, na rozdíl od ostatních aspektů spadá spíš do oblasti umělé inteligence, než počítačové grafiky nebo dokonce biomechaniky.

Toto rozdělení lze chápat jako úroveň realismu, ale do jisté míry také jako vrstvy vlastního modelu. Hierarchii transformací (kostře) je podřízen celý model. Deformace měkkých tkání jsou na stavu hierarchie závislé a udávají vzhled povrchu modelu, který zase ovlivňuje vzhled doplňků.

### Struktura modelu

Přiblížme si nyní základní konstrukční přístupy používané u běžných virtuálních humanoidů.

Typicky je model tvořen aspoň dvěma navzájem se ovlivňujícími vrstvami, *kostrou a pokožkou*.

Pojem *kostra* zde označuje jistý druh náhradní antropomorfní struktury, která popisuje hierarchii transformací potřebných pro animaci modelu. Tyto



transformace do značné míry odpovídají skutečným kloubům. Graf popisující vzájemnou závislost těchto transformací má tvar stromu. Je to graf minimální, pro který je v teorii grafů také vžit termín *kostra*. Transformace – klouby – jsou v uzlech grafu, hrany odpovídají spojnicím mezi klouby, kterým se říká *kosti*. Vzniká tak zdání, že pojem *kostra* je smysluplný i z hlediska anatomického. Není tomu tak, některé modelovací a animační techniky zavádějí ve vrstvě kostry velké množství kostí a kloubů, které anatomický význam nemají, jen umožňují dosáhnout požadovaného vizuálního efektu.

Kloub je chápán jako geometrická transformace, ne však obecná, popis kloubu je obvykle omezen na rotaci okolo pevného středu otáčení. Stromový graf definuje hierarchii uzlů, kloubů, model virtuálního humanoida je tedy založen na hierarchii rotačních transformací.

*Pokožka* je vrstva, která zahrnuje tu část modelu, která je skutečně zobrazena. Podstatou implementace pokožky je polygonální mřížka, která je ve výsledku zobrazována. Tato mřížka je získávána různými způsoby podle náročnosti modelu. Může být jediná pro celý model, a naopak jich může být víc pro různé segmenty nebo skupiny segmentů.

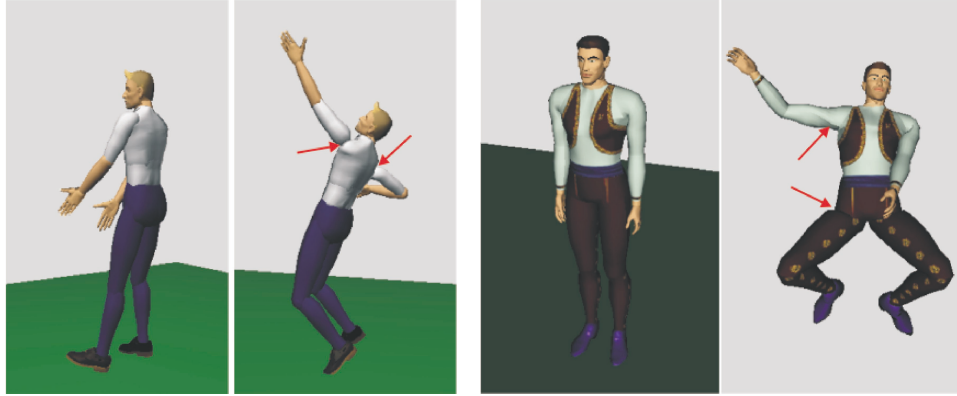
Model by v podstatě mohl mít jen vrstvu pokožky. Animace by pak pro každý snímek musela obsahovat pozice všech vrcholů (animace per vertex), což je neefektivní. Proto se zavádí další vrstvy, počínaje kostrou, která umožní uchovávat pro každý snímek animace jen informace o transformacích, jimž jsou podrobeny obecně značně velké skupiny vrcholů definované modelem (skeletální animace).

### Pevné segmenty

Nejjednodušší implementace pokožky pro skeletální animaci je implementace pevnými segmenty. Každý zobrazovaný segment těla je tvořen vlastní mřížkou, jejíž všechny body jsou podřízené stejné transformaci (té nejbližší nadřízené). Takto se nemění vzájemná poloha bodů mřížky při pohybu a výpočetní náročnost jakýchkoliv animací modelu závisí jen na počtu bodů v mřížce. Toto umožňuje použití hustší mřížky, která může mít realističtější vzhled. Bohužel při animaci takovéto struktury dochází často k vzniku deformačních artefaktů způsobených nespojitostí modelu, “vykloubení”. Příkladem budiž obrázek 2.10 (vlevo).

### Deformovatelná mřížka

Výpočetně náročnější, ale vizuálně kvalitnější modely používají pokožku implementovanou některou z variant deformovatelné mřížky. Základní myšlenkou je spojená mřížka, jejíž jednotlivé body jsou přiřazené různým transformacím z hierarchie kostry. Předpokládejme, že vrchol o referenční poloze  $v$  je přiřazen kloubu  $j$ . Výsledná poloha  $v'$  se spočítá jako



Obrázek 2.10: Vlevo: Příklad humanoida tvořeného pevnými segmenty. Šipky indikují artefakty “vykloubení”. Vpravo: Humanoid tvořený deformovatelnou mřížkou. Šipky též indikují artefakty, které jsou zdemně zřetelné.

$$v' = A_0 F_j v \quad (2.1)$$

kde  $A_0$  je globální transformace kořene a  $F_j$  je transformace příslušející  $j$ -tému kloubu.

Tato základní varianta sice eliminuje artefakty vzniklé nespojitostí, ale generuje jiné - různá přestípnutí v místech ohybu. Proto se používá technika známá jako *míchání vrcholů* (*vertex blending*) [15], případně její adaptace [21, 20], která takovým artefaktům je schopná do značné míry zabránit. Podstata míchání vrcholů spočívá v tom, že každý bod mřížky je přiřazen více transformacím v hierarchii. Výsledná poloha vrcholu se spočítá jako konvexní kombinace transformací tohoto vrcholu příslušnými klouby. Předpokládejme, že vrchol o referenční poloze  $v$  je přiřazen kloubům  $j_0, \dots, j_n$ . Potom výsledná poloha  $v'$  se spočítá jako

$$v' = A_0 \sum_{i=0}^n w_i F(j_i) v \quad (2.2)$$

kde  $w_i$  jsou váhy splňující podmínku

$$\sum_{i=0}^n w_i = 1, \quad w_i \geq 0 \quad \forall i \in \{0, \dots, n\} \quad (2.3)$$

Váhy  $w_i$  lze interpretovat jako míru vlivu kloubu  $j_i$  na transformaci vrcholu  $v$ . Nastavují se buď ručně v animačním programu, nebo se počítají podle nějakého pravidla (typicky vzdálenost od kosti). Množina kloubů, k nimž je vrchol přiřazen, bývá malá – dva až čtyři klouby. Mnoho vrcholů vystačí jen s jedním, protože míchání vrcholů má význam jen v okolí kloubů.

Pokožka implementována spojitou deformovatelnou mřížkou s využitím míchání vrcholů netrpí artefakty nespojitosti, vznikají na ní však jiná zkreslení. Při velkých úhlech rotace dochází k jevům známému jako *problém papíru od bonbónů* (*candy-wrapper artifact*), kdy se pokožka zkroutí jako z papíru. Řešením tohoto problému se zabývají práce [21, 20].

Míchání vrcholů není jedinou technikou řešící deformace pokožky při zachování spojitosti, pro vytvoření představy o problémech a řešeních nám však stačí. Jiné metody [2] jsou v hlubší podstatě podobné, podrobuji různé body mřížky různým transformacím. Avatar na obrázku 2.10 (vpravo) byl vytvořen výše citovanou metodou.

Jiná skupina metod přistupuje k problému realistických deformací přes dynamické fyzikální simulace, jako příklad uveďme práci [23]

### Jiné reprezentace

Zajímavým způsobem modelování realisticky deformovatelného humanoida je technika publikovaná laboratoří Vrlab [11]. Tato reprezentace obsahuje vrstvu kostry, která normálně definuje hierarchii transformací. Těmito transformacím je podřízena vrstva, která vytváří objem těla pomocí elipsoidů (*metaballs*) ale není zobrazována. Povrch této struktury je během animace pravidelně vzorkován a výsledné body jsou použity jako kontrolní body spline plochy, která je zobrazována jako vrstva pokožky.

Virtuální humanoid používaný profesionálními systémy jako je Maya [52] umožňuje dosáhnout až fotorealistické věrohodnosti použitím různých objektů vsazených do hierarchie kostry a dodatečně deformujících pokožku. Zde se ale nejedná o animaci v reálném čase, takové modely se používají ve filmu, kde se realistický efekt dosahuje za cenu dlouhých výpočetních časů.

### 2.2.3 Norma H-Anim

V sekci 2.2.1 jsou uvedeny příklady použití virtuálních humanoidů. Softwaru pro vytváření a animování 3D lidské postavy vzniká stále větší množství. Rozvíjí se také systémy pro sledování a záznam pohybů skutečných lidí ve skutečném světě (Motion Capture). Možnost kombinace SW modulů a spojení technik animace s postupy snímání pohybu je výrazně snížena nedostatkem standardizovaného modelu lidské postavy.

Reakcí na tento problém bylo koncem devadesátých let vytvoření specifikace **H-Anim** [58]. Tato specifikace se stala základem pro standard **ISO/IEC FCD 19774:200x, Humanoid animation (H-Anim)**.

Standard definuje hierarchickou strukturu virtuálního humanoida založenou na studiu lidské anatomie, systém názvosloví a datové struktury pro konstrukci modelu (kloub, segment a jiné). Pamatuje se též na to, že různé aplikace mají různé nároky na realismus, a hierarchická struktura je popsána v několika úrovních artikulace, které se liší počtem zastoupených

kloubů. Dalším přínosem standardu je souhrn rozměrů jednotlivých segmentů (částí těla) průměrného jedince.

### Struktura H-Anim

H-Anim postavy jsou popsány pomocí pěti typů H-Anim objektů:

- Objekt *Humanoid* je jakousi obálkou H-Anim postavy. Obsahuje autorské údaje o modelu, vytváří rozhraní pro přístup k vlastnímu modelu a umísťuje model v globálním souřadném systému. Rozhraní uzlu humanoid umožňuje použít oba zmíněné způsoby reprezentace geometrie modelu.

- Objekt *Joint* (kloub) je základní stavební jednotkou hierarchie humanoida. Každý kloub rotačně transformuje část hierarchie, nese tedy data popisující tuto transformaci. Také uchovává odkazy na ostatní klouby, které jsou této transformaci podřízené, čímž plní svou roli stavební jednotky hierarchie.

Pro použití v animačních aplikacích má kloub speciální parametry určující možnosti jeho pohyblivosti (rozsahy, tuhost).

Středy otáčení jednotlivých kloubů jsou definovány v jednotné souřadné soustavě. Délky kosti (segmentů) tak lze určit jako vzdálenost středů kloubů, které s kostí incidují.

- *Segment* je objekt popisující segment lidského těla. Obsahuje převážně informace o geometrii. Z hlediska animace je segment na rozdíl od kloubu hmotný, proto obsahuje tento objekt informace o hmotnosti, těžišti a setrvačných momentech příslušné tělesné části.

V H-Anim hierarchii jsou objekty typu Segment ukládány na pozici potomka objektu typu Joint.

- Různé významné body mohou být v H-Anim modelu definovány pomocí objektu *Site*. Tyto body mohou být koncovými efekty pro potřeby inverzní kinematiky, mohou to být body pro připojení oblečení, šperků, nesených předmětů, či jiných objektů nějak podřízených hierarchii modelu. Objekt tohoto typu je potomkem objektu typu Segment.

- Poslední z H-Anim stavebních kamenů se nazývá *Displacer*. Smyslem tohoto objektu je definovat podmnožinu bodů v geometrii Segmentu, které mohou být podrobeny samostatné transformaci. Případně může tuto transformaci definovat jako relativní změnu pozice vybraných bodů. Typické použití Displaceru je animace pohyblivých částí těla, které nejsou snadno popsatelné hierarchií transformací (pohyby v obličejí, např. zdvižení obočí).

Standard H-Anim také předepisuje nulovou polohu modelovaného humanoida, tj. polohu při níž mají všechny klouby nulovou rotaci. Tato poloha je vzpřímená, tváří ve směru kladné poloosy Z+, směr Y+ je nahoru a X+ po levici humanoida. Počátek (bod  $[0, 0, 0]$ ) je v úrovni země mezi chodidly humanoida, která jsou položena na rovině  $Y = 0$ . Paže spočívají rovně dolů podél boků s dlaněmi obrácenými ke stehnům.

#### 2.2.4 Animační techniky

Počítačová animace je postup zobrazování dynamické scény, jehož výsledkem je posloupnost obrazů. Objekty ve scéně se mohou pohybovat stejně jako kamera, která scénu snímá. V diskretních časových okamžicích sestavíme model scény, umístíme kameru a model zobrazíme. Ve své podstatě je tento postup podobný klasické animaci. Výhodou animace počítačové je možnost použití algoritmů simulujících fyzikální jevy, díky nimž může být velká část snímků vytvořena automaticky.

Hovoříme-li o počítačové animaci, máme na mysli pohyb. Pohyb však může mít mnoho forem od přemístění objektu, přes změnu jeho tvaru (třepetání praporu, tekoucí voda) až po změny dalších vizuálních charakteristik, například barvy. V dalším textu široký pojem animace omezíme na pojem animace virtuálního humanoida. Ten je, jak bylo popsáno v 2.2.2, tvořen hierarchií rotačních transformací, proto pro nás animace bude většinou znamenat práci s klouby jejich rotacemi.

Nejprve však přiblížíme důležité pojmy nízkourovňové a vysokoúrovňové animace. *Nízkourovňová animace* má blízko k teorii křivek, zabývá se přímo reprezentací pohybu objektu po dráze. *Vysokoúrovňová animace* pracuje s pojmy jako kolize, “jde po”, “jde směrem”, apod. Animátor nepracuje přímo s animačními daty, ta jsou generována na základě specifikovaných podmínek a omezení.

#### Klíčování a animační křivky

Pojem *klíčování* (*keyframing*) pochází z dílen Walta Disneye. Označoval pracovní postup vytváření filmů, kdy hlavní animátor tvořil důležité snímky a zbytek sekvence, mezisnímky, které se jen málo lišily, malovali pomocní animátoři. Odstranění ručního generování mezisnímků tak bylo přirozeně jedním z prvních cílů při zavádění počítačového zpracování.

Postup, kdy animátor zadává klíčové snímky a program dodělává zbývající práci, pronikl i do 3D počítačové animace. Zadávané klíčové pozice se mohou týkat v podstatě čehokoliv, poloh objektů, úhlů, barev, textur, průhlednosti, apod. Program generuje mezisnímky pro každý takt zobrazovací frekvence.

Úkolem klíčování z hlediska počítačové grafiky je nalézt interpolační křivku, propojující klíčové snímky. V našem případě, kdy je animací chápána

animace virtuálního humanoida, jsou interpolovanými hodnotami rotace, nebo pozice ve 3D prostoru. Více k teorii animačních křivek v [50].

Z praktického hlediska je důležité, že animační data mají v důsledku formu diskrétně popsané křivky  $\theta(t)$  parametrizované časem. Skládají se z vektoru klíčových hodnot  $\mathbf{S} = (\theta_1, \dots, \theta_n)$  a z vektoru klíčových okamžiků  $\mathbf{T} = (t_1, \dots, t_n)$ .

V případě animace segmentové struktury člověka je typicky animováno více veličin (kloubů) a proto je potřeba více křivek  $\theta^{(1)}(t), \dots, \theta^{(k)}(t)$ , kde symbol  $k$  indikuje počet animačních křivek tvořících animaci. Každá animační křivka  $\theta^{(i)}(t)$  bývá interpolována zvlášť a proto může mít jiný počet klíčových snímků. Animační data mají tedy obecnou podobu:

$$S = ((\theta_1^{(1)}, \dots, \theta_{n_1}^{(1)}), \dots, (\theta_1^{(k)}, \dots, \theta_{n_k}^{(k)})) \quad (2.4)$$

$$T = ((t_1^{(1)}, \dots, t_{n_1}^{(1)}), \dots, (t_1^{(k)}, \dots, t_{n_k}^{(k)})) \quad (2.5)$$

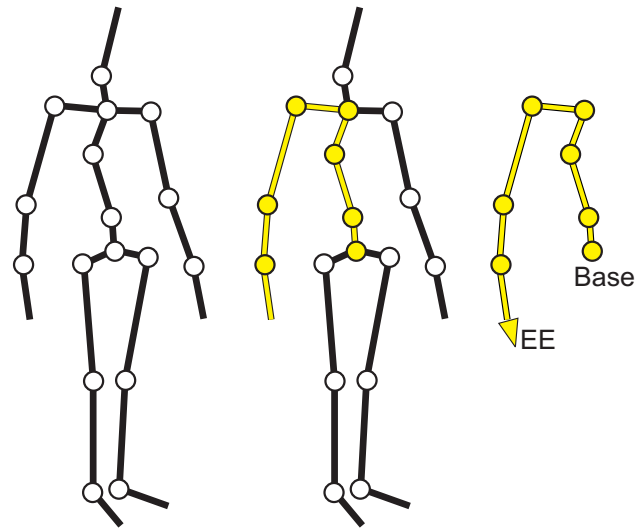
### Segmentová struktura a stavový prostor

Lidská postava je dobrým příkladem toho, čemu se v počítačové animaci říká *segmentová struktura* (*articulated structure*). Takovéto objekty se skládají z posloupnosti pevných částí, které jsou mezi sebou otočně spojeny kloubem. V robotice, kde se též operuje s podobnými pojmy jako v oblasti animace člověka, se uvažují i spojení posuvná (prismatická), což při animaci člověka odpadá.

Segmentová struktura může mít charakter stromu, má jeden kořen a aspoň jeden volný konec. Toto tvrzení představuje značnou újmu na obecnosti, ale v rámci animace člověka si ji můžeme dovolit.

Zavedeme pojem *kinematický řetězec* jako posloupnost kloubů, podmnožinu celé segmentové struktury. Kinematický řetězec bývá pro potřeby animace na jednom konci pevně ukotven v souřadném systému, tento konec se nazývá *báze*. Opačnému, volnému konci se říká *koncový efektor* (*end effector*). V tomto případě efektor neznámá sval, ani žádný jiný prvek těla schopný aktivně vytvářet pohyb. Tyto pojmy ilustruje obrázek 2.11.

Chceme-li jednoznačně určit polohu tuhého tělesa v prostoru, potřebujeme zvolený souřadný systém a celkem šest čísel. Tři hodnoty určují souřadnice v prostoru, tři jeho natočení vzhledem k souřadnicovým osám. Tyto veličiny se jmenují *stupně volnosti* (*DOF - degree of freedom*) a jednoznačně charakterizují libovolný systém. Počet stupňů volnosti systému udává, kolik ze stavových veličin lze libovolně měnit. Přidá-li se těleso do systému, zvýší se počet stupňů volnosti. Naopak, budeme-li tělesa svazovat omezeními a vytvářet segmentovou strukturu, bude se počet stupňů volnosti snižovat.



Obrázek 2.11: Segmentová struktura humanoida a kinematický řetězec. Koncovým efektem (EE) je ruka, kinematický řetězec pro animaci v tomto případě zahrnuje klouby mezi rukou a kořenem celé struktury (Base).

Všechny možné stavy, v nichž se segmentová struktura může nacházet, tvoří její *stavový prostor*. Okamžitý stav může být popsán *stavovým vektorem*, jehož délka je rovná počtu stupňů volnosti systému a tedy i dimenzi stavového prostoru. Stavový vektor budeme značit

$$\Theta = (\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n) \quad (2.6)$$

kde  $\theta_i$  jsou jednotlivé parametry struktury. Často se v případě animace člověka stavový vektor vnímá jako vektor rotací v jednotlivých kloubech kinematického řetězce.

### Přímá a inverzní kinematika

Pro dosažení požadovaného efektu animace je nutné v každém snímku definovat hodnoty stavového vektoru, tedy úhly v kloubech, případně pozici báze (kořene hierarchie). Počítačová animace k tomu využívá dvě metody, *přímou kinematiku* a dnes častěji *inverzní kinematiku*.

Z předchozího textu je zřejmé, že stavový vektor jednoznačně definuje polohu koncového efektoru ( $\mathbf{X}$ ). Formálně lze zapsat jako

$$\mathbf{X} = f(\Theta) \quad (2.7)$$

Na tomto principu je založen animační postup *přímé kinematiky*, kdy jsou postupně nastavovány úhly v kloubech. Tento postup je využíván spíše

tehdy, když máme k dispozici nějaký vnější popis pohybu, známe posloupnosti úhlů v jednotlivých kloubech.

Pro interaktivní vytváření pohybů je vhodnější tzv. *inverzní kinematika*. Úloha inverzní kinematiky je doslova inverzí úlohy popsané rovnicí 2.7 v tom smyslu, že cílem je na základě znalosti polohy koncového efektoru nalézt stavový vektor. Formálně zapsáno

$$\Theta = f^{-1}(X) \quad (2.8)$$

Je zřejmé, že tato úloha není jednoznačně řešitelná. Pro některé polohy koncového efektoru  $\mathbf{X}$  nemusí vůbec existovat inverzní funkce  $f^{-1}$ , řešení prostě může ležet mimo stavový prostor.

Pro jiné polohy může zase existovat obecně nekonečné množství řešení. Množství přípustných řešení lze snížit zavedením omezení (*constraints*), jimiž se limitují pohyblivosti kloubů, v důsledku čehož je stavový prostor menší. Omezení mohou též fungovat jako priority a některá řešení upřednostnit - parametr *tuhost* (*stiffness*).

Analytické řešení úlohy IK, jakožto soustavy nelineárních rovnic, je známo pro manipulátory s nízkým počtem stupňů volnosti (7 DOF [41]). Numericky je však možno řešit manipulátory libovolné délky skládající se z rotačních a posuvných kloubů [43]. Iterativní numerické metody řešení úlohy IK bývají často založeny na lokální linearizaci. Na tomto místě je rozebírat nebudeme, pro jejich důležitost je jim věnována samostatná kapitola (Kapitola 4).

### Jiné techniky

Kromě inverzní kinematiky existuje řada dalších technik, jimiž lze získávat animační data často velmi realistická. Většinou se jedná o fyzikální simulace působících sil. Animovaný model je rozšířen o parametry týkající se hmotnosti, momentů setrvačnosti a působišť sil (těžiště) a o mechanismus vyhodnocení účinků sil. Vyhodnocením sil působících v systému na základě znalosti síly, kterou působí koncový efektor na okolí se zabývá inverzní dynamika. Dopředná dynamika na druhou stranu tyto síly aplikuje na systém za účelem získání pohybového efektu - animace. O variantách těchto technik se také zmiňuje kniha [48].

Článek [6] popisuje metodu inverzní kinetiky (*inverse kinetics*), která zohledňuje polohu těžiště celé struktury jako další podmínku pro výslednou animaci. Kromě dovedení koncového efektoru do cíle je navíc těžiště struktury udržováno v takové poloze, aby nedošlo k převážení. Ačkoliv žádné skutečné síly simulovány nejsou (a k převážení tedy nedojde), lze tímto způsobem získat značný nárůst věrohodnosti celé animace.

Zajímavá animační technika je popsána v [30]. Virtuální postava je ovládána lidským operátorem, ale ne klasickým snímáním pohybu. Operátor místo toho ovládá dvojici prostorových snímačů polohy a orientace, jejichž



data jsou interpretována různě, podle toho, která část těla je zrovna animována. Jedná se v podstatě o techniku převzatou z loutkářství.

### 2.2.5 Snímání pohybu

Technologie Motion Capture umožňuje sledovat v čase pozice (a/nebo orientace) senzorů strategicky rozmístěných na objektech ve skutečném světě. Tyto objekty mohou být jakéhokoliv typu, nejčastěji však je technologie Motion Capture spojována s aplikacemi pro snímání pohybů člověka. Záznam pohybu skutečného člověka je v některých případech nejsnazší a nejrychlejší cestou, jak získat věrohodnou animaci. Lidské tělo je natolik složitá struktura, že vytváření animací jinou cestou, bez použití živého herce, by bylo neúměrně náročné na čas nebo na realističnost animovaného modelu.

Další aplikací technologií pro snímání pohybu je přímý přenos - rozhýbání virtuální postavy v reálném čase. Nejčastější použití je v různých zábavných televizních pořadech, ale zvláště v poslední době jsou tyto efekty stále častěji využívány i umělci v nejrůznějších performancích.

Potřeba realistických animací vychází nejčastěji z oblasti zábavního průmyslu (hry, film, apod.), velká část vývoje probíhá v tomto silně konkurenčním prostředí. Výsledkem je značná variabilita v přístupech k technologii snímání pohybu. Existuje velké množství výstupních datových formátů a také velké množství různých implementací snímacích systémů na různých fyzikálních principech. Datovým formátům věnujeme samostatnou sekci (viz 2.2.5), v následujících odstavcích přiblížíme základní kategorie snímacích systémů.

Zařízení pro snímání pohybu (Motion capture) můžeme dělit podle určení na zařízení pracující v reálném čase (*on-line devices*) a zařízení, která v reálném čase nepracují (*off-line devices*). Jiná možnost kategorizace je rozdělení podle použitého fyzikálního principu na zařízení

- Mechanická (elektromechanická)
- Magnetická
- Optická

Pohybová data jsou získávána pomocí všech tří metod. Každá z nich má své výhody a nevýhody, žádnou nelze označit za dokonalou. Popíšme je blíže se zaměřením na jejich silné a slabé stránky.

Mechanická zařízení získávají data rychle, ale tuto výhodu značně zastihují výrazným omezením herce (osoby jejíž pohyby jsou snímány) nesnými senzory. Tyto senzory jsou totiž tvořeny jakýmsi pohyblivým exoskeletem. Důvod, proč se mechanická zařízení používají tkví patrně v jejich další výhodě - jsou použitelná i ve venkovním prostředí, kde magnetické a

optické systémy selhávají. Také netrpí problémy s vnějším rušením a zákryty senzorů.

Magnetická zařízení využívají senzorů umístěných na těle herce, které měří nízkofrekvenční magnetické pole generované vnějším zdrojem. Sensory a emitory musí být propojeny stíněnými (poměrně tlustými) kabely s kontrolní jednotkou, která koreluje jejich data a vyhodnocuje polohu senzorů v poli, což výrazně omezuje herce. Senzorů bývá typicky použito 6 až 11, což znamená stejný počet kabelů vedoucích k herci. Také to ovšem znamená nutnost dopočítávat rotace kloubů algoritmy inverzní kinematiky. V tomto případě jsou některé sledované body používány jako báze dílčích kinematických řetězců, zatímco jiné představují koncové efekторы a jsou dopočítávány rotace v kloubech mezi nimi. Další velkou nevýhodou magnetických systémů je citlivost na kovy v okolí. Na druhou stranu tyto systémy nejsou citlivé vůči zákrytům. Moderní systémy jsou také poměrně rychlé i přes nutnost odfiltrování šumu, které výrazně snižuje potenciálně velmi vysokou rychlost vzorkování.

V současné době se nejrychleji rozvíjí optické snímací systémy. Tyto systémy zaznamenávají pohyb herce větším počtem kamer rozmístěných na přesně určených místech okolo scény. Technikami počítačového vidění se potom v záznamech jednotlivých kamer sledují (*tracking*) vybrané body, většinou kontrastní značky (*marker*) rozmístěné na těle herce (nebo jiných sledovaných objektech). Dalším krokem bývá nalezení korespondencí mezi sledovanými body na záznamech různých kamer a výpočet 3D souřadnic sledovaných bodů. Nakonec se provede výpočet rotací v kloubech.

Optické snímání pohybu se zatím nepoužívá pro tvorbu animací v reálném čase, kvůli náročnému zpracování sekvencí z jednotlivých kamer. Má však jiné výhody. Především nevyžaduje žádný drahý speciální hardware, vystačí si s několika kalibrovanými kamerami. Herce také v podstatě neomezuje v pohybu, jediné požadavky na něj se omezují na přiléhavé jednobarevné oblečení (tmavé, matné) na němž vyniknou kontrastní (světlé, lesklé) značky. Možnost zákrytu značek při pohybu je jistou nevýhodou, kterou lze omezit použitím většího počtu kamer nebo predikcí při sledování bodu v záznamu kamery.

Do kategorie Optického snímání pohybu patří řada metod v současné době zkoumaných v oboru počítačového vidění. Zaměřují se převážně na rekonstrukci bez použití značek (*markerless*) a na odstranění jiných omezení, například požadavku na speciální oblečení. Zrovna oblečení je schopné do značné míry měnit tvar lidské postavy, což ztěžuje detekci jednotlivých tělesných částí potřebných pro rekonstrukci pohybu. Tento výzkum se ale již vymyká z rámce Motion Capture jakožto nástroje pro vytváření animací. Zamýšlené aplikace míří spíše do oblasti rozpoznávání pohybových aktivit například automatickými sledovacími systémy.

Rozvíjejí se také metody 3D rekonstrukce pohybu ze záznamu jedné kamery *monocular motion reconstruction*, jejichž aplikace mohou stále sloužit účelům tvorby animací. Pohled jedné kamery neposkytuje dostatek informace o hloubce, data jsou jen dvojrozměrná. Tento nedostatek se kompenzuje použitím realistického modelu člověka a jeho lícováním s detekovaným průmětem do roviny (*skeleton fitting*).

### Formáty dat

Systémy Motion Capture používají různé formáty dat. Prakticky každý komerčně vyráběný systém má svůj vlastní datový formát. Tyto formáty jsou však většinou textové (ASCII) a tedy poměrně snadno interpretovatelné. Tématem datových formátů pro systémy snímání pohybu se zabývá článek [29].

Společným rysem všech formátů pro popis nasnímaných pohybových dat je jejich rozdělení na sekce popisující animovaný model (kostru) s jednotlivými stupni volnosti a vlastní pohybová data příslušející těmto stupňům volnosti. Pohybová data jsou pak uspořádána do skupin (snímků) příslušejících jednotlivým okamžikům vzorkování. Číslo snímku spolu s údajem o frekvenci vzorkování nahrazuje informaci o čase.

Pohybová data pro jednotlivé stupně volnosti jsou většinou hodnoty rotace okolo příslušné souřadné osy. Jedná se tedy o Eulerovy úhly.

**Eulerovy úhly** jsou vyjádřením rotace ve třírozměrném prostoru, které je založeno na Eulerově teorému, podle nějž lze každou rotaci ve 3D vyjádřit třemi rotacemi kolem jednotlivých souřadných os. Tato reprezentace je vhodná pro popis stavu kloubu, ale pro účely zobrazení je nutno ji převést do tvaru transformační matice, což se děje vynásobením matic rotací kolem jednotlivých souřadných os, vytvořených z Eulerových úhlů.

Transformačním maticím včetně matice obecné rotace je v literatuře věnováno dost pozornosti [50][60], zde se jim nebudeme blíže věnovat. Za zmínku stojí pouze význam pořadí násobení jednotlivých matic. Rozklad obecné rotace na Eulerovy úhly může být více, záleží na použité konvenci, interpretaci Eulerových úhlů.

Rotace složená podle konvence *NASA standard aerospace*:  $\mathbf{R} = R_x R_y R_z$

A podle *NASA standard aerospace*:  $\mathbf{R} = R_z^1 R_y R_z^2$

Symbol  $\mathbf{R}$  značí obecnou matici rotace,  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$  matice rotací kolem os x, y a z.

V dalším textu uvedeme jako příklad popis dvou různých formátů používaných systémy Motion Capture a zakončíme ukázkou, jak animaci popisuje jazyk VRML.

### Biovision

Se jménem BioVision bývají spojovány formáty BVA a BVH. Formát BVH je novější, jedná se vlastně o nástupce staršího BVA výrazně rozšířeného o data popisující hierarchickou strukturu kostry.

Protože BVH je v současné době jedním z nejrozšířenějších formátů pro nasnímaná animační data, uvedeme zde jeho stručný popis.

Jak již bylo zmíněno výše, animační formáty jsou v podstatě textové (ASCII). Formát BVH není výjimkou a proto je snadné jej pochopit z příkladu. Datová struktura formátu BVH se skládá ze dvou základních funkčních částí, hierarchické a pohybové.

Hierarchická část popisuje kostru jako hierarchii kloubů. Tato část začíná klíčovým slovem HIERARCHY a pokračuje hierarchicky uspořádaným výčtem kloubů (klíčové slovo JOINT, nebo ROOT v případě kořenu hierarchie). Pro každý kloub následuje údaj o jeho pozici vzhledem k rodičovskému kloubu uvedený v palcích (OFFSET) a položka CHANNELS, která udává počet stupňů volnosti a jejich význam.

```
HIERARCHY ROOT Hips {
  OFFSET 0.00 0.00 0.00
  CHANNELS 6 Xposition Yposition Zposition Zrotation Xrotation Yrotation
  JOINT Chest
  {
    OFFSET 0.00 4.21 0.00
    CHANNELS 3 Zrotation Xrotation Yrotation
    JOINT Neck
    { ... }
    ...
  }
}
```

Příklad ukazuje začátek popisu BVH hierarchie. Je vidět, že kořen hierarchie má 6 stupňů volnosti, tři pro posunutí podél jednotlivých souřadných os v pořadí x, y, z a tři pro rotace kolem nich v pořadí z, x a y. Složená transformační matice rotace tohoto kloubu se tedy získá násobením  $\mathbf{R} = R_z R_x R_y$ .

Pohybová část je uvedena klíčovým slovem MOTION. Následují údaje o počtu snímků animace a časovém intervalu mezi nimi. Vlastní pohybová data jsou uspořádána do bloku v němž na každém řádku jsou hodnoty posuvu kořenového kloubu a rotací všech kloubů v pořadí určeném atributem CHANNELS a pořadím jednotlivých kloubů v hierarchické části (viz následující příklad).

```
MOTION Frames: 181 Frame Time: 0.033333 -79.45 32.90 -54.32 ...
...
```

Datový formát BVH nám posloužil jako příklad jednoduchého formátu pro nasnímaná animační data.

### Acclaim

Datový formát firmy Acclaim patří také mezi používané formáty a je o něco bohatší. Data popisující hierarchii a pohyb jsou ve dvou oddělených souborech (ASF resp. AMC). Oddělením definice kostry od pohybových dat odpadá zbytečná redundance hierarchických dat v případě, že vytváříme více animací stejného člověka (k jednomu ASF souboru může existovat více AMC souborů).

Popis kostry v souboru ASF obsahuje k jednotlivým kloubům více údajů, než tomu bylo v případě BVH. Navíc je zde délka kosti, její orientace, meze rotace. Vše je textově přehledně formátováno a pochopitelné. ACM soubor se oproti pohybové sekci BVH vyznačuje mnohem lepší přehledností.

### VRML

Jazyk VRML (viz 2.1.3) je standard pro popis 3D scén a virtuální reality obecně. Obsahuje též prvky popisující dynamické jevy - animace. Veškeré dynamické jevy jsou ve VRML řešeny interpolátory, které lineárně interpolují mezi různými hodnotami. VRML prohlížeče implementují funkci interpolátorů, časovače, který je řídí a vzájemného propojení mezi nimi a animovanou strukturou. Díky existenci mechanismu interpolátorů a časovače je možné výrazně redukovat objem dat popisujících pohyb. Postup je podobný jako při aproximaci křivky lomenou čarou.

Záznam animace segmentové struktury virtuálního humanoida pomocí jazyka VRML bude obsahovat jeden interpolátor polohy připojený ke kořenu hierarchie modelu a několik interpolátorů rotace, jeden pro každý pohybující se kloub.

Informace o čase se zde skládá z relativních časů (hodnoty z intervalu od 0 do 1) jednotlivých klíčových snímků v datech interpolátorů a z údaje o délce celé animace, kterým je řízen časovač ovládající chod interpolátorů.

## 2.2.6 Shrnutí

Tato sekce poněkud zešíroka přibližuje tematiku modelování a animace virtuálních humanoidů. Shrňme zde na závěr nejdůležitější body.

V části 2.2.1 jsou popsány příklady různých typů aplikace modelů virtuálních humanoidů. Tyto aplikace často přerůstají omezení daná definicí aplikací VR. Poměrně jasně zde vyplývá, že problémy řešené VR aplikacemi se točí kolem rychlosti výpočtu a zobrazení. Byl zde zmíněn trik *LOD* (*level of detail*) používaný pro urychlení zobrazení částí scény vzdálených od pozorovatele a jeho animační ekvivalent *LOmD* (*level of motion detail*) [5].

O modelování virtuálních lidí pojednává část 2.2.2. Z této problematiky nás nejvíc zajímá modelování hierarchické segmentové struktury těla, která velmi souvisí s animací modelu. Zajímavý obor modelování pohybových deformací povrchu s animací sice významně souvisí, ale není středem zájmu naší další práce. Kromě popsané techniky míchání vrcholů, která je stále živým tématem [21], uveďme jako příklady jiných cest práce [23][2].

Z hlediska použitelnosti a přenositelnosti modelů je důležitý standard H-Anim. Byla mu věnována zvláštní pozornost pro jeho význam pro naši práci, která je založená na modelech odpovídajících této normě.

Část 2.2.4 je věnována technikám animace segmentové struktury virtuálního humanoida se zvláštní pozorností věnovanou problematice *inverzní kinematiky* [44]. Realistická animace inverzní kinematikou vyžaduje omezující podmínky v kloubech pro usnadnění výběru vhodného řešení ze stavového prostoru animované struktury.

S předchozí částí poměrně úzce souvisí další (2.2.5), která se zabývá získáváním pohybových dat snímáním skutečného pohybu. Snímání pohybu je často aplikací animačních technik nižší úrovně, hlavně inverzní kinematiky. Existuje mnoho systémů pro snímání pohybu, ale chybí standard pro zápis výsledné animace.

V oblasti počítačového vidění probíhá výzkum nových technik, které jsou mnohdy na hranici mezi rekonstrukcí a rozpoznáváním pohybu. Zmiňovali jsme snímání bez odrazek (*markerless*) a 3D rekonstrukci z pohledu jedné kamery.

## 2.3 Přínos biomechaniky

Různé modely člověka hojně využívají rozsáhlých antropometrických měření, jejichž data jsou použita k určení rozměrů těla a jeho částí a pozic kloubů a jiných důležitých bodů. Tyto údaje jsou důležité pro vizuální realismus nepohybujícího se modelu.

Pro účely animace mívají však modely ještě další parametry kloubů, které slouží pro omezení stavového prostoru segmentové struktury těla. Norma H-Anim (2.2.3) [58] na základě zkušeností z předchozích aplikací definuje parametry *rozmezí pohyblivosti* kloubu (horní a dolní limit) a prioritu - *tuhost* (*stiffness*). Tyto pohybové parametry jsou však často nastavovány s ohledem na realistické výsledky konkrétní aplikace a míra jejich obecnosti není zřejmá.

Existují animační úlohy, pro jejichž řešení je třeba nějak doplnit nedostatek vstupní informace. Biomechanicky realistický model, jehož hodnoty pohybových parametrů a metodika jejich interpretace by vhodně postihovaly skutečnost v dostatečné míře obecnosti by mohl výrazně přispět k jejich řešení.

### 2.3.1 Méně vstupních dat

Nejzřejmější takovou úlohou je zobrazení pohybu s minimem vstupních dat. Typickým příkladem může být vizualizace animované scény v systému, který se přímo popisem lidských pohybů nezabývá.

Uveďme projekt IST-2001-32184 ActIPret [51], jehož cílem bylo vytvoření metodiky pochopení, naučení a rozpoznání lidské aktivity (např.

montážní). Jinými slovy, systém měl pozorovat aktivitu a vytvořit její abstraktní koncept, sloužící k příštím rozpoznání. Jelikož se počítalo s výukovou aplikací systému, měl být vybaven modulem pro prezentaci výsledků v 3D virtuálním prostředí [36][38][39][37][40].

Tento VR prezentační modul musel animovat virtuální postavu, přestože veškerá data, jimiž celý systém na jakékoli úrovni disponoval, byla pro realistickou animaci značně nedostačující. Obvyklá metoda “ladění parametrů” aplikovaná na pohybové parametry animovaného modelu by selhala, pokud by se přešlo k rozboru výrazně odlišného scénáře.

Příklad dobře identifikuje úlohu pohybově realistického modelu člověka, který může doplnit chybějící informaci při řešení animačních úloh s nedostatečnými vstupními daty.

### 2.3.2 Nové animace

Nejrealističtější animace se v současné době získávají snímáním pohybů skutečného herce. Pokud aplikace používá takovéto animace, naráží na problém v okamžiku, kdy potřebuje animaci použít za mírně pozměněných podmínek. Chůze postavy bývá složena opakováním nasnímaného kroku, ale co když je potřeba jeden krok jiné délky, nebo jiné výšky? Zrovna na tomto příkladě je vidět, že použití většího množství nasnímaných kroků prostě není řešením, neboť krok může být vždy jinak dlouhý.

V této situaci se nabízí myšlenka parametrizace dané animace. Většina metod [32][42][24][14] toto řeší nějakou formou interpolace mezi několika příklady téhož pohybu. Jeden z nich může být brán jako “průměrný” a ostatní jako příklady určitých atributů (dlouhý krok, vysoký krok). Interpolací po křivce mezi “průměrným” a dlouhým krokem získáme kroky různé délky. Schematicky lze interpolaci animace  $C$  z vzorových animací  $A$  a  $B$  pomocí parametru  $s$  znázornit takto:

$$C = (1 - s)A + sB \quad (2.9)$$

Většinou, zvláště pokud je interpolovaná animace mezi oběma nasnímanými vzory ( $0 < s < 1$ ), je výsledek též značně realistický. Někdy, zejména pokud parametr  $s > 1$  nebo  $s < 0$ , je však možné, že výsledná karikatura pohybu nebude pro člověka proveditelná. Takovýto nově vytvořený pohyb je tedy vhodné podrobit kontrole pohybově realistickým modelem člověka, případně upravit podle možností takového modelu.

Práce [35] nastiňuje možnosti využití VR ve výuce tenisu. Podobně ji lze zobecnit i na jiné sportovní techniky náročné na přesnost. Vstup dat v práci není příliš rozebírán. Při zachování požadavku na technologickou nenáročnost aplikace by se dal vyřešit právě editací interaktivní nové animace na základě interpolace mezi typickými příklady z předem nasnímané databáze. Skutečný pohyb žáka by tak rozebírán nebyl, ale zase by žák nebyl rušen náročným snímáním stávajícími metodami. Bylo by

ovšem zvláště důležité kontrolovat proveditelnost nově vygenerovaného pohybu realistickým modelem.

### 2.3.3 Počítačové vidění

Problém vstupu dat pro aplikaci na podporu sportovního výcviku, která byla použita jako příklad v minulé sekci (2.3.2) by, při zachování požadavků na technologickou nenáročnost a neomezování žáka, teoreticky mohl být řešen 3D rekonstrukcí pohybu ze záznamu jedné běžné videokamery. Jakkoliv zní taková monokulární rekonstrukce jako science-fiction, je to živé, byť nepříliš rozvinuté, téma v počítačovém vidění [26][46].

Záběr jedné kamery poskytne pouze dvourozměrnou informaci o průmětu objektu do projekční roviny kamery. Chybějící informaci o hloubce by bylo třeba nějak nahradit. Pohybově realistický model by bylo možno nastavit do pozice, která by měla stejný průmět a přitom by byla proveditelná. Bylo by tedy značně pravděpodobné, že taková pozice by byla stejná jako ta, jíž zaujímala vzorová postava.

### 2.3.4 Pohybově realistický model

Na třech příkladech použití jsme identifikovali význam pohybově realistického modelu. Shrňme nyní, co vlastně takovým modelem míníme.

Pohybově realistický model je taková artikulovaná struktura, jejíž stavový prostor je dostatečně podobný stavovému prostoru skutečného člověka. Navíc je takový model vybaven mechanismem, který umožňuje ze stavového prostoru vybrat v každém případě takové řešení, které vizuálně působí nejpřirozeněji.

Vytvoření takového modelu je tedy úkol převeditelný na vytvoření modelu kloubu vybaveného vhodně zvolenými omezujícími parametry. V zásadě jsou pohybové parametry kloubů dvojího druhu - rozmezí, která omezují stavový prostor, a priority, které usnadňují výběr řešení. Těmto parametrům je třeba najít vhodné počáteční hodnoty. Dále je nutné prozkoumat možné vztahy mezi klouby, potažmo mezi jejich parametry, a vytvořit mechanismy interpretace parametrů a určení jejich momentálních hodnot.



## Kapitola 3

# Matematika rotací ve 3D

Veličina důležitá pro animaci segmentových struktur (člověka) je rotace. Rotace ve 2D prostoru je veličina snadno představitelná a reprezentovatelná. Předpokládáme-li rotaci kolem známého středu, stačí nám jedna hodnota k jednoznačnému popsání rotace - úhel otočení. Ve 3D prostoru je již situace mnohem komplikovanější. Jak uvidíme dále, k jednoznačnému popisu obecné rotace ve 3D potřebujeme tři parametry. Takovýto popis ale většinou nevyhovuje, chceme-li rotaci použít k dalším výpočtům, například nalezení nových souřadnic otočeného bodu. Seznamme se zde s matematickým aparátem, který se při práci s 3D rotacemi používá, neboť nerozlučně patří k animačním technikám a každý, kdo se jimi chce zabývat brzo narazí na nutnost potřebnou matematiku nastudovat.

Nejprve nastíníme základní myšlenku geometrických transformací se zaměřením na konkrétní transformaci rotace (sekce 3.1). Dalším krokem bude v sekci 3.2 parametrizace 3D rotace pomocí Eulerových úhlů a jejich vztah k transformačním maticím. Trojice Eulerových úhlů je minimální reprezentace 3D rotace. Další reprezentace jsou založeny na čtveřici parametrů. Popíšeme reprezentaci osa-úhel 3.3 a samozřejmě kvaternion 3.4. Kvaternionová reprezentace poskytuje mechanismus interpolace, která je pro animaci nezbytná. Popíšeme ho v sekci 3.5.

### 3.1 Geometrické transformace

Rotace je zde míněna ve smyslu geometrické transformace. Geometrická transformace je jednou z nejčastějších operací počítačové grafiky. Rozlišujeme lineární a nelineární transformace. Mezi ty první patří právě rotace, nebo posunutí, změna měřítka, zkosení a operace vzniklé jejich skládáním. S nelineární transformací se lze setkat při různých složitějších změnách tvaru grafických objektů (warping) a pro nás v tomto textu nemají význam.

Dále budeme hovořit o transformaci *bodu*  $P$ , který má souřadnice

$[X, Y, Z]$ , jsme-li ve třírozměrném prostoru. Transformací získáme bod  $P'$  o souřadnicích  $[X', Y', Z']$ . Transformujeme-li *objekt*, aplikujeme transformaci na všechny jeho body, případně na parametry, které objekt určují.

Pro zjednodušení výpočtů transformací počítačová grafika využívá tzv. *homogenních souřadnic* bodů. Bod  $P$  o kartézských souřadnicích  $[X, Y, Z]$  můžeme zapsat také  $[x, y, z, w]$ . Tyto druhé souřadnice nazveme homogenními, pokud platí:

$$X = \frac{x}{w}, Y = \frac{y}{w}, Z = \frac{z}{w}, w \neq 0 \quad (3.1)$$

Používáme-li homogenní souřadnice, můžeme snadno zobecnit práci s různými transformacemi. Transformaci lze vyjádřit maticí a skládání transformací se pak realizuje maticovým násobením. Transformaci tedy zapíšeme:

$$P' = \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ w' \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot P = \begin{bmatrix} a_{0,0} & a_{0,1} & a_{0,2} & a_{0,3} \\ a_{1,0} & a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ a_{2,0} & a_{2,1} & a_{2,2} & a_{2,3} \\ a_{3,0} & a_{3,1} & a_{3,2} & a_{3,3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Obecná matice  $3 \times 3$  popisuje transformaci rotace, pokud je její inverze rovná transpozici ( $R^{-1} = R^T$ ) a tedy ( $RR^T = R^T R = I$ ). Pro rotaci o úhel  $\theta$  okolo osy  $\mathbf{a} = (a_0, a_1, a_2)$  platí následující užitečný vztah 3.4. Mějme matici  $M_A$  určenou vektorem  $\mathbf{a}$ :

$$M_a = \begin{bmatrix} 0 & a_2 & -a_1 \\ -a_2 & 0 & a_0 \\ a_1 & -a_0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Potom matici odpovídající rotaci o úhel  $\theta$  kolem osy  $\mathbf{a}$  získáme:

$$R = I + (\sin \theta)M_a + (1 - \cos \theta)M_a^2 \quad (3.4)$$

Vztah 3.2 popisující homogenní transformaci doplníme o informaci, že matice  $4 \times 4$  popisuje homogenní transformaci právě tehdy, když se její prvek  $a_{3,3}$  rovná 1. Vztah mezi transformační maticí  $3 \times 3$  a homogenní transformační maticí je následující:

$$H = \left[ \begin{array}{c|c} \mathbf{M} & \mathbf{T} \\ \hline \mathbf{S} & 1 \end{array} \right] \quad (3.5)$$

Prvek  $\mathbf{M}$  má rozměr  $3 \times 3$ ,  $\mathbf{T}$   $3 \times 1$  a  $\mathbf{S}$   $1 \times 3$ .  $\mathbf{S}$  bývá nulový ve všech pro nás důležitých geometrických transformacích. Význam má například pro perspektivní projekci.  $\mathbf{T}$  je v podstatě vektor posunutí. Homogenní matice translace tedy bude vypadat takto:

$$H = \left[ \begin{array}{c|c} I & \mathbf{T} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \quad (3.6)$$

zatímco rotace:

$$H = \left[ \begin{array}{c|c} M & \mathbf{0} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \quad (3.7)$$

Rotaci a translaci lze kombinovat takto:

$$H = \left[ \begin{array}{c|c} M & \mathbf{T} \\ \hline \mathbf{0} & 1 \end{array} \right] \quad (3.8)$$

Problematika geometrických transformací je v literatuře bohatě popsána, pěkný přehled je například v [50], stručný, výstižný a postačující úvod obsahuje též [10]. Zde byly základy této teorie uvedeny pouze pro navození správného kontextu a dále se budeme blíže věnovat jen rotacím. Jakýkoliv bod transformovaný maticí bude v homogenních souřadnicích pokud nebude uvedeno jinak.

## 3.2 Eulerovy úhly

Podle Eulerova rotačního teorému *každou rotaci ve 3D prostoru lze vyjádřit pomocí tří parametrů*. Tyto parametry je možno interpretovat jako úhly otočení kolem souřadných os. Výsledná rotace pak vznikne složením těchto dílčích rotací. Hodnota výsledné rotace tak závisí na pořadí skládání. Tento fakt je dobře ilustrován pokud jsou rotace reprezentovány transformačními maticemi. Skládání rotací v tom případě odpovídá maticovému násobení, které není komutativní. Je tedy zřejmé, že výsledek na pořadí násobení/skládání závisí. Jsou-li dílčí rotace popsány maticemi B, C a D, pak výsledná rotace A může být např.

$$A = B \cdot C \cdot D \quad (3.9)$$

Závislost výsledku na pořadí skládání rotací vedla k zavedení několika používaných konvencí, které pořadí specifikují. Jako nejběžnější bývá uváděna [60] konvence “x” (někdy nazývaná NASA Standard Aerospace). Tato konvence interpretuje Eulerovy úhly  $(\phi, \theta, \psi)$  jako rotaci o úhel  $\phi$  kolem osy  $z$ , následovanou rotací o úhel  $\theta$  kolem osy  $x$  a nakonec rotace o úhel  $\psi$  opět kolem osy  $z$ . Matice B, C a D z rovnice 3.9 by vypadaly takto:

$$D \equiv \left[ \begin{array}{cccc} \cos \phi & \sin \phi & 0 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (3.10)$$

$$C \equiv \left[ \begin{array}{cccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (3.11)$$

$$B \equiv \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

Vynásobením těchto matic snadno vyjádříme prvky výsledné matice A pomocí Eulerových úhlů. Vynechme čtvrtý řádek a sloupec, které v matici popisující rotaci nemají význam, a rovnice pro jednotlivé prvky budou:

$$\begin{aligned} a_{1,1} &= \cos \psi \cos \phi & - & \cos \theta \sin \phi \sin \psi \\ a_{1,2} &= \cos \psi \sin \phi & - & \cos \theta \cos \phi \sin \psi \\ a_{1,3} &= \sin \psi \sin \theta \\ a_{2,1} &= -\sin \psi \cos \phi & - & \cos \theta \sin \phi \cos \psi \\ a_{2,2} &= -\sin \psi \sin \phi & - & \cos \theta \cos \phi \cos \psi \\ a_{2,3} &= \cos \psi \sin \theta \\ a_{3,1} &= \sin \theta \sin \phi \\ a_{3,2} &= -\sin \theta \cos \phi \\ a_{3,3} &= \cos \theta \end{aligned} \quad (3.13)$$

Další často používanou konvencí je konvence “xyz” (někdy označovaná jako NASA Standard Aeroplane). Úhel  $\phi$  odpovídá vybočení,  $\theta$  stoupání a  $\psi$  náklonu. Matice B, C a D z rovnice 3.9 by vypadaly takto:

$$D \equiv \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$C \equiv \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$B \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Vztah mezi prvky výsledné matice A a Eulerovými úhly je v tomto případě jiný.

$$\begin{aligned}
a_{1,1} &= \cos \theta \cos \phi \\
a_{1,2} &= \cos \theta \sin \phi \\
a_{1,3} &= -\sin \theta \\
a_{2,1} &= \sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi \\
a_{2,2} &= \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \cos \phi \\
a_{2,3} &= \cos \theta \sin \psi \\
a_{3,1} &= \cos \psi \sin \theta \cos \phi + \sin \psi \sin \phi \\
a_{3,2} &= \cos \psi \sin \theta \sin \phi - \sin \psi \cos \phi \\
a_{3,3} &= \cos \theta \cos \psi
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Vyjádření Eulerovými úhly rotaci plně popisuje, není však vhodné pro některé operace, které jsou pro počítačovou animaci důležité. Touto trojicí parametrů nelze například snadno zjistit pozici otočeného bodu.

Reprezentace transformační maticí, která je s Eulerovými úhly úzce spjata, sice přináší jednoduchý mechanismus výpočtu nových pozic bodů, není však možné smyslupně mezi dvěma rotacemi interpolovat, což je v animaci skutečně základní.

### 3.3 Reprezentace osa-úhel

Popisujeme-li rotaci v 2D rovině, stačí nám, omezíme-li se na rotaci kolem počátku souřadného systému, jediná hodnota - úhel. V případě třírozměrného prostoru lze (pro rotaci v počátku souřadného systému) použít hodnotu úhlu, pokud specifikujeme osu, kolem níž rotace probíhá. Tato úvaha vede k reprezentaci rotace čtyřprvkovým vektorem. Tato reprezentace je známa pod názvem *osa-úhel*. První tři hodnoty specifikují osu rotace jako vektor v 3D prostoru, čtvrtá hodnota je úhel otočení kolem této osy.

Rotace okolo osy  $\mathbf{a} = (a_0, a_1, a_2)$  o úhel  $\theta$  je psána prostě jako čtveřice  $(a_0, a_1, a_2, \theta)$ .

Vztah 3.4 jasně ukazuje, jak lze převést rotaci popsanou osou a úhlem na transformační matici. Ke zpětnému převodu se lze dostat vyřešením soustavy rovnic popisujících jednotlivé prvky vzniklé transformační matice.

Reprezentace osa-úhel je poměrně snadno pochopitelná a je použita ve standardu VRML. Má velmi blízko k tzv. Eulerovým parametrům specifikovaným takto:

$$\begin{aligned}
e_0 &= \cos \frac{\theta}{2} \\
e &\equiv \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \mathbf{a} \sin \frac{\theta}{2}
\end{aligned} \tag{3.18}$$

kde  $\mathbf{n}$  je jednotkový třírozměrný vektor. Není to totéž, jako osa-úhel, ta by byla vyjádřena zápisem  $(\phi, \mathbf{n})$ .

Rotace reprezentovaná Eulerovými parametry je *kvaternion* ve formě skalár-vektor.

### 3.4 Kvaternion

V minulém odstavci jsme popsali reprezentaci rotace čtyřmi parametry. Taková reprezentace za určitých podmínek patří do skupiny tzv. *hyperkomplexních čísel*, jinak také nazývaných *kvaternion* (*quaternion*).

Fundamentální vztah tohoto zobecnění komplexních čísel objevil matematik William Rowan Hamilton a vypadá takto:

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1 \quad (3.19)$$

Jak název napovídá, kvaternion je čtveřice čísel. Reprezentován bývá různě, pro nás je zajímavý zápis

$$\mathbf{q} = a + bi + cj + dk \quad (3.20)$$

Tento zápis je analogický s komplexními čísly a lze jej chápat i jako kombinaci skalár-vektor

$$\mathbf{q} = a + bi + cj + dk \equiv (a, \mathbf{v}) \quad (3.21)$$

Platí  $\mathbf{v} \equiv [b, c, d] \equiv bi + cj + dk$ , kde  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$  a  $\mathbf{k}$  jsou vektory tvořící ortonormální bázi 3D prostoru. V této formě je již zřejmý vztah k Eulerovým parametrům definovaným rovnicí 3.18.

Na prostoru kvaternionů je definován doplňkový kvaternion, a operace sčítání, násobení a dělení. Kvaternion a operace násobení tvoří *neabelovskou grupu*, tedy násobení kvaternionů obecně není komutativní. Mějme kvaterniony  $\mathbf{a} = a_1 + a_2i + a_3j + a_4k$  a  $\mathbf{b} = b_1 + b_2i + b_3j + b_4k$ .

Doplňkový kvaternion je definován takto:

$$\bar{\mathbf{a}} = a_1 - a_2i - a_3j - a_4k \quad (3.22)$$

Pro aplikace kvaternionů na reprezentaci rotace je důležité také násobení:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \cdot \mathbf{b} &= (a_1b_1 - a_2b_2 - a_3b_3 - a_4b_4) \\ &+ (a_1b_2 - a_2b_1 - a_3b_4 - a_4b_3)i \\ &+ (a_1b_3 - a_2b_4 - a_3b_1 - a_4b_2)j \\ &+ (a_1b_4 - a_2b_3 - a_3b_2 - a_4b_1)k \end{aligned} \quad (3.23)$$

Ve formě skalár-vektor je zápis násobení jednodušší:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_1 \cdot \mathbf{q}_2 &= (s_1, \mathbf{v}_1) \cdot (s_2, \mathbf{v}_2) \\ &= (s_1s_2 - \mathbf{v}_1 \cdot \mathbf{v}_2, s_1\mathbf{v}_2 + s_2\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Norma kvaternionu je definována

$$n(\mathbf{a}) = \sqrt{\mathbf{a}\bar{\mathbf{a}}} = \sqrt{\bar{\mathbf{a}}\mathbf{a}} = \sqrt{a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 + a_4^2} \quad (3.25)$$

Inverzní kvaternion je také jednoduše definován:

$$\mathbf{a}^{-1} = \frac{\bar{\mathbf{a}}}{a\bar{a}} \quad (3.26)$$

Jednotkový kvaternion  $n(\mathbf{a}) = 1$  lze zapsat podobně jako komplexní číslo v goniometrickém a exponenciálním tvaru.

$$\mathbf{q} = (\cos \theta, \mathbf{n} \sin \theta) = e^{\mathbf{n}\theta} \quad (3.27)$$

Na této reprezentaci lze snadno definovat mocninu jednotkového kvaternionu:

$$\mathbf{q}^t = (\cos \theta + \mathbf{n} \sin \theta)^t = e^{\mathbf{n}t\theta} = (\cos t\theta + \mathbf{n} \sin t\theta) \quad (3.28)$$

Funkce mocniny bude důležitá pro interpolaci rotace reprezentované kvaternionem, jíž popíšeme později (3.5). Více k tématu kvaternionů lze nalézt v knize [10] nebo v encyklopedii [60].

### 3.4.1 Kvaternion jako rotace

Půvab použití kvaternionů pro popis rotace spočívá v jejich matematických vlastnostech, jichž lze využít pro snadnou implementaci důležitých operací. Ukažme si, jak lze aplikovat výše popsané operace na reprezentaci rotace.

Jednotkový kvaternion popisuje rotaci o úhel  $\phi$  kolem osy popsané jednotkovým vektorem  $\mathbf{n}$  takto:

$$\mathbf{q} = (a, \mathbf{v}) = \left(\cos \frac{\phi}{2}, \mathbf{n} \sin \frac{\phi}{2}\right) \quad (3.29)$$

Jednotkovým kvaternionem lze transformovat bod podobně jako maticí. Pro účely transformace je bod  $p$  brán jako kvaternion  $\mathbf{p} \equiv (0, p)$ , který je transformován jednotkovým kvaternionem  $\mathbf{q}$  takto:

$$\mathbf{p}' = R(\mathbf{p}) = \mathbf{q}\mathbf{p}\mathbf{q}^{-1} = \mathbf{q}\mathbf{p}\bar{\mathbf{q}} \quad (3.30)$$

Druhá část rovnosti 3.30 platí právě proto, že  $\mathbf{q}$  je jednotkový, tedy  $n(\mathbf{a}) = 1$ .

Knih [10] podává důkaz, že transformovaný vektor  $\mathbf{p}'$  je také 3D vektor a zachovává délku vektoru  $\mathbf{p}$ , transformace  $R(\mathbf{p})$  je lineární a není reflexe, musí se tedy jednat o transformaci otočení.

Nedostatkem je, že kvaternion vždy popisuje jen rotaci a to jen v počátku souřadné soustavy. Chceme-li bod otáčet okolo jiného středu, potřebná posunutí je třeba provést zvlášť.

Skládání dvou rotací reprezentovaných jednotkovými kvaterniony  $\mathbf{q}_1$  a  $\mathbf{q}_2$  je realizováno takto:

$$\mathbf{q}_2(\mathbf{q}_1\mathbf{p}\bar{\mathbf{q}}_1)\bar{\mathbf{q}}_2 = (\mathbf{q}_2\mathbf{q}_1)\mathbf{p}(\bar{\mathbf{q}}_1\bar{\mathbf{q}}_2) = (\mathbf{q}_2\mathbf{q}_1)\mathbf{p}\overline{\mathbf{q}_2\mathbf{q}_1} \quad (3.31)$$

Výše uvedené vztahy jsou převzaty z encyklopedie [60], kde lze o problematice kvaternionů nalézt více informací. Jelikož jsou citované vztahy základem běžně používaných metod, jsou v této práci převzaty a uvedeny bez důkazu.

Kvaternion umožňuje s jistými omezeními snadnou realizaci stejných operací jako transformační matice. Pro použití v počítačové animaci má však oproti matici jednu velkou výhodu - snadno realizovatelný interpolační mechanismus.

### 3.5 Interpolace rotací

V předchozím textu byl několikrát zmíněn problém interpolace rotací. Interpolovat mezi dvěma rotacemi je pro počítačovou animaci velmi důležité, není to však vždy snadno proveditelné. Zaměříme se na toto téma blíže.

Dvě rotace si lze představit jako body na povrchu koule. Rotace, která vznikne interpolací mezi nimi, leží na trajektorii, která je spojuje. Důležitým požadavkem je, aby tato trajektorie byla nejkratší možná, což není úplně snadné zajistit.

Interpolaci mezi dvěma rotacemi, která bude splňovat výše uvedenou podmínku, lze vyjádřit bez konkrétní reprezentace následujícím vztahem:

$$R^t = R_0(R_0^{-1}R_1)^t \quad (3.32)$$

Je-li rotace reprezentovaná maticí, je problém v operaci umocněním reálným číslem  $t$ . Matice  $R_0^{-1}R_1$  se převádí na reprezentaci osa-úhel, která umocnění umožňuje, a výsledek je pak převeden zpět na matici.

Reprezentujeme-li rotaci kvaternionem, je postup interpolace jednodušší. Využijeme zápisu jednotkového kvaternionu popisujícího rotaci (3.29) v exponenciálním tvaru.

$$\mathbf{q} = e^{\mathbf{n}\theta} \quad (3.33)$$

Interpolaci pomocí kvaternionu zapišme analogicky s 3.32 ve tvaru  $q_0(q_0^{-1}q_1)^t$ . Definujeme-li  $p = q_0^{-1}q_1$ , pak můžeme interpolaci vyjádřit jako

$$q_t = q_0p^t = q_0e^{\mathbf{n}t\theta} = q_0(\cos t\theta + \mathbf{n}\sin t\theta) \quad (3.34)$$

Tento výraz můžeme dále upravit

$$q_t = q_0 \frac{\sin(1-t)\theta + p \sin t\theta}{\sin \theta} \quad (3.35)$$

Nakonec dosazením za  $p$  dostaneme výsledný vzorec *sférické lineární interpolace* (SLERP).



$$q_t = q_0 \frac{\sin(1-t)\theta}{\sin\theta} + q_1 \frac{\sin t\theta}{\sin\theta} \quad (3.36)$$

Při interpolaci SLERP hraje roli, s jakými kvaterniony budeme počítat. Volbou  $\mathbf{q}_0$  a  $\mathbf{q}_1$  je jednoznačně určen úhel  $\theta$ , který svírají. Jestliže  $\cos\theta < 0$ , pak je rotace kolem osy určené kvaternionem, interpolována po delším oblouku. Protože platí, že jedna rotace je reprezentována dvěma kvaterniony  $\mathbf{q}$  a  $-\mathbf{q}$ , stačí v popsaném případě nahradit  $\mathbf{q}_1$  kvaternionem  $-\mathbf{q}_1$ .

Interpolace SLERP je silný nástroj pro animaci založenou převážně na změnách rotací, což je případ animace virtuálního člověka. Možná nejen pro snadnou čitelnost, ale hlavně kvůli mechanismu SLERP byla pro standard VRML zvolena reprezentace osa-úhel blízká kvaternionům.

Popis interpolace SLERP byl přejat z práce [15].

## Kapitola 4

# Animace inverzní kinematikou

*Kinematika* studuje pohyb bez uvažování sil, které jej způsobují a ovlivňují. Kinematické animační techniky vytvářejí pohyb bez uvážení působících sil. Veličiny, které kinematika zahrnuje jsou hlavně poloha, rychlost, zrychlení a obecně geometrické a časově závislé vlastnosti pohybu.

Člověk bývá modelován *segmentovou strukturou* (*articulated structure*), což je soustava tuhých těles propojených klouby. Robotika, z níž byly mnohé animační techniky přejaté, používá klouby rotační a posuvné, jejich pohybové parametry jsou tedy rotace, resp. posunutí. Počítačová animace člověka je ze zřejmých důvodů omezena na klouby rotační.

Pro segmentovou strukturu je důležitý pojem *stupně volnosti* (*degree of freedom - DOF*), který udává počet volných pohybových parametrů systému. Například o manipulátoru složeném ze tří kloubů, z nichž každý se může otáčet kolem jedné osy (má 1 DOF), řekneme, že má dohromady 3 DOF.

Pojmem *kinematický řetězec* budeme rozumět podmnožinu segmentové struktury, podgraf, který je cestou. Jinými slovy kinematický řetězec je posloupnost kloubů. Pro potřeby animace uvažujeme kinematický řetězec otevřený a na jednom konci ukotvený, tento konec označujeme jako *bázi*. Volný konec kinematického řetězce nazýváme *koncový efektor* (*end-effector*). Koncept kinematického řetězce je ilustrován v úvodní kapitole obrázkem 2.11.

Stav segmentové struktury (kinematický řetězec) lze popsat *stavovým vektorem* ( $\theta$ ), který udává hodnoty pohybových parametrů kloubů. Obecně stavový vektor udává všechny volné parametry, tedy stavový vektor jednoho neomezeného tuhého tělesa bude obsahovat šest hodnot, tři pro rotace kolem souřadných os a tři pro posunutí. V oblasti animace člověka se jedná o převážně o posloupnost rotací (doplněnou o globální posunutí), neboť jednotlivé segmenty jsou vázány rotačními klouby a tedy nejsou schopné nezávislého posunutí.

*Stavový prostor* segmentové struktury je prostor všech možných stavů,

jichž může segmentová struktura nabýt. Stavový vektor je tedy prvkem stavového prostoru. Je zřejmé, že dimenze stavového prostoru je rovná délce stavového vektoru a tedy počtu DOF segmentové struktury.

## 4.1 Popis segmentové struktury

Prvním problémem animace segmentové struktury obecně je potřeba samotnou segmentovou strukturu vhodně matematicky formalizovat. Můžeme také říci, že je potřeba určit, jakou bázi bude mít náš stavový prostor. Je třeba této formalizaci věnovat značnou pozornost, abychom už v začátku nezabředli do nešikovných notací. Představme zde dvě používané konvence.

### 4.1.1 DH notace

Jednou z možností, jak reprezentovat stav segmentové struktury je DH (Denavit - Hartenberg) notace vyvinutá původně v roce 1955 pro popis robotických manipulátorů. V této notaci je každý kloub reprezentován souřadným systémem a čtyřmi parametry, které popisují transformaci, kterou se přechází do následujícího segmentu. Souřadný systém prvního segmentu odpovídá světovému souřadnému systému, každý další je vyjádřen relativně k souřadnému systému segmentu předchozího.

Význam jednotlivých parametrů používaných DH notací je následující. Segmenty jsou číslovány v přirozeném pořadí, index  $i+1$  označuje následníka a  $i-1$  zase předchůdce  $i$ -tého kloubu.

- $a_i$  označuje vzdálenost mezi osami  $z_i$  a  $z_{i+1}$  sousedních segmentů měřenou v ose  $x_i$  - délka segmentu.
- $d_i$  označuje vzdálenost mezi osami  $x_{i-1}$  a  $x_i$  sousedních segmentů měřenou v ose  $z_i$  - vzdálenost mezi segmenty.
- $\alpha_i$  je úhel mezi osami  $z_i$  a  $z_{i+1}$  sousedních segmentů okolo osy  $x_i$  - zkroucení segmentu.
- $\theta_i$  je úhel mezi osami  $x_{i-1}$  a  $x_i$  sousedních segmentů okolo osy  $z_i$ .

Z těchto parametrů lze sestavit transformační matici určující přechod od souřadnicového systému jednoho segmentu k systému článku následujícího. Bývá zvykem značit tyto matice  ${}^{(i-1)}\mathbf{T}_i$ , kde indexy označují od kterého segmentu ke kterému přecházíme.

Celková mezičláňková transformace vznikne složením čtyř matic vyjadřujících postupně rotaci  $\mathbf{R}_{z\theta}$  o úhel  $\theta_i$  okolo osy  $z_i$ , dále posun  $\mathbf{T}_{zd}$  o  $d_i$  podél  $z_i$ , posun  $\mathbf{T}_{xa}$  o  $a_{i-1}$  podél  $x_{i-1}$ , a nakonec rotaci  $\mathbf{R}_{x\alpha}$  o úhel  $\alpha_{i-1}$  okolo osy  $x_{i-1}$ .

Výsledná matice  ${}^{(i-1)}\mathbf{T}_i$  má tvar:

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & a_{i-1} \\ \sin(\theta_i) \cos(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i) \cos(\alpha_{i-1}) & -\sin(\alpha_{i-1}) & -d_i \sin(\alpha_{i-1}) \\ \sin(\theta_i) \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\theta_i) \sin(\alpha_{i-1}) & \cos(\alpha_{i-1}) & d_i \cos(\alpha_{i-1}) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Transformace  ${}^0\mathbf{T}_n$  přechodu od světového souřadného systému k lokálnímu souřadnému systému segmentu koncového efektoru se získá vynásobením matic pro dílčí transformace mezi sousedními segmenty.

$${}^0\mathbf{T}_n = {}^{(n-1)}\mathbf{T}_n \cdot {}^{(n-2)}\mathbf{T}_{n-1} \dots {}^0\mathbf{T}_1 \quad (4.1)$$

Podrobněji se DH notaci věnují například kapitoly o animaci v knihách [50] a [43].

#### 4.1.2 AP reprezentace

DH notace popisuje manipulátor minimálním množstvím parametrů, hodí se však nejlépe právě pro robotické manipulátory, které se skládají z jednoho řetězce, jehož jeden konec je pevný. Nedokáže zahrnout větvení kloubů a segmentů. To bylo motivací pro vznik reprezentace kloubu nazývané AP (*axis-position*), která sice není tak ekonomická, zato je obecnější a podstatně intuitivnější. Tato reprezentace uchovává

- Pozici kloubu.
- Rotaci kloubu ve formě osa-úhel
- ukazatele na segment(y), na něž je kloub napojen.

Oproti čtyřem parametrům DH notace je jich zde sedm (tři pro pozici a čtyři pro rotaci). Transformační matice  ${}^0\mathbf{T}_n$  je tak vlastně maticí rotace kolem daného středu. K transformaci pro aktuální souřadnice koncového efektoru se opět dostaneme skládáním matic, podobně jako v případě DH notace.

Principu AP reprezentace kloubu využívá standard H-Anim.

## 4.2 Dopředná a inverzní kinematika

V předchozím textu jsme popsali segmentovou strukturu virtuálního humanoida, která umožňuje jeho animaci. Zavedli jsme pojem *kinematický řetězec* jako posloupnost kloubů mezi *bází* a *koncovým efektořem*. Často se též používá termín *manipulátor*, který pochází z robotiky, odkud počítačová animace převzala a adaptovala některé techniky.

Báze je první kloub kinematického řetězce (kloub  $J_0$ ), každý další kloub v řetězci je v hierarchii níže. Pro klouby v řetězci platí, že každý kloub  $J_i$  je podřízen svému předchůdci  $J_{i-1}$ ,  $n$  má hodnoty od 1 do  $n-1$ , kde  $n$  je délka kinematického řetězce.

Dále jsme zavedli *stavový vektor*  $\Theta$  kinematického řetězce výrazem:

$$\Theta = (\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n) \quad (4.2)$$

Jednotlivé prvky  $\theta_i$  jsou hodnoty pohybového parametru kloubu  $J_i$ . V případě segmentové struktury virtuálního humanoida je pohybovým parametrem kloubu rotace okolo zadaného středu otáčení.

Stavový vektor jednoznačně definuje polohu koncového efektoru ( $\mathbf{X}$ ). Animační úloha dopředné kinematiky je tak definována rovnicí 2.7, kterou zde zopakujeme.

$$X = f(\Theta) \quad (4.3)$$

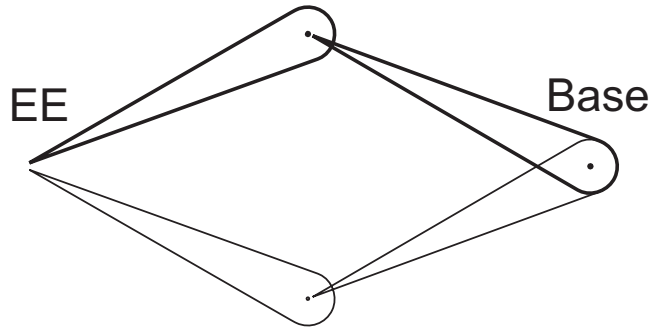
Tento vztah vystihuje princip animačního postupu *dopředné* nebo *přímé kinematiky*, kdy jsou postupně nastavovány úhly v kloubech. Tento postup je využíván tehdy, když máme k dispozici nějaký vnější popis pohybu, známe posloupnosti úhlů v jednotlivých kloubech a animaci jen potřebujeme zobrazit.

Jako přístup k tvorbě nízkourovňových animačních dat se však dopředná kinematika nehodí. Takto se dostáváme k definici úlohy *inverzní kinematiky* (*IK*), která je jako animační postup rozhodně výhodnější a pochopitelnější z hlediska vstupních dat. Zopakujeme zde rovnici 2.8.

$$\Theta = f^{-1}(X) \quad (4.4)$$

Stavový vektor manipulátoru / kinematického řetězce je tak popsán jako funkce polohy koncového efektoru. Je zřejmé, že tato úloha není jednoznačně řešitelná. Pro některé polohy koncového efektoru  $X$  neexistuje inverze  $f^{-1}$ , řešení prostě může ležet mimo stavový prostor. Pro jiné případy zas může existovat až nekonečně mnoho řešení, jak naznačuje zjednodušené schéma 4.1. Kdyby situace na obrázku byla třírozměrná, řešení by nebyla dvě, bylo by jich skutečně nekonečné množství.

Výběr řešení bývá realizován zavedením různých omezujících parametrů. Z čistě kinematického hlediska se jedná o omezení stavového prostoru zavedením limitů rotace kloubu, případně o zavedení priority jednotlivým kloubům parametrem tradičně nazývaným *tuhost* (z anglického *stiffness*). Těmto parametrům se bude věnovat další část práce (kapitola 5).



Obrázek 4.1: Nejednoznačnost IK. Dvousegmentový manipulátor ve 2D prostoru má v tomto případě dvě možnosti, jak dosáhnout pozice koncového efektoru (EE) při dané poloze báze (Base).

### 4.3 Metody využívající Jakobián

Největší problém inverzní kinematiky je fakt, že funkce  $f$  je obecně nelineární a analytický výpočet její inverze je pro jen trošku složitější hierarchie prakticky nemožný. Všeobecně používaným řešením je proto linearizace problému, kdy provádíme výpočet pouze v okolí aktuální pozice. K tomuto účelu se používá *Jakobián*, matice, která je rozšířením diference jedné proměnné.

V rovnici 4.3 má  $X$  dimenzi  $m$  (ve 3D prostoru obvykle  $m = 3$  nebo  $m = 6$ , pokud uvažujeme i orientaci koncového efektoru) a  $\Theta$  má dimenzi  $n$  (počet stupňů volnosti řetězce). Jakobián je matice  $m \times n$ , která mapuje změny  $\Delta\Theta$  na změny  $\Delta\mathbf{X}$ .

$$\Delta\mathbf{X} = J(\Theta)\Delta\Theta \quad (4.5)$$

Přitom platí:

$$J_{m \times n} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \theta_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial \theta_1} & \cdots & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial \theta_n} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Je třeba připomenout, že Jakobián, stejně jako funkce  $f$  závisí na konkrétním stavu hierarchie těles, což je ve vzorci 4.5 zohledněno zápisem  $J(\Theta)$  místo prostě  $\mathbf{J}$ .

Rovnice 4.5 je linearizovaná a teoreticky lze invertovat. Bohužel je matice  $J(\Theta)$  v typickém případě obdélníková a její inverze neexistuje. Existují však techniky takzvané pseudoinverze obdélníkové matice, dokonce se místo

invertované matice  $J(\Theta)^{-1}$  dá s úspěchem použít i transponovaná matice  $J(\Theta)^T$ .

Metody pracující s Jakobiánem jsou metody iterativní, k cílovému řešení se dostáváme postupnými kroky. Dokud koncový efektor nedosáhne cíle, řešíme opakovaně rovnici:

$$\Delta\Theta = J(\Theta)^{-1}\Delta\mathbf{X} \quad (4.7)$$

Jako  $\Delta\mathbf{X}$  použijeme malý krok ve směru od aktuální pozice koncového efektoru k cíli, vypočtenými změnami úhlů aktualizujeme stavový vektor a vypočítáme nový Jakobián a jeho inverzi.

### 4.3.1 Konstrukce Jakobiánu

Rovnice 4.5 vyjadřuje pomocí Jakobiánu rychlost (změnu polohy) koncového efektoru z rychlostí (změn) ve stavovém prostoru kinematického řetězce. Tyto rychlosti ve stavovém prostoru jsou prostě kolekce lineárních nebo úhlových rychlostí jednotlivých souřadných rámců řetězce. Jakobián tedy vyjadřuje rychlost souřadného rámce  $\{n\}$  pomocí lokálních rychlostí mezi-  
lehlých rámců  $\{1\}$  až  $\{n-1\}$ . Je zřejmé, že Jakobián musí být vyhodnocován v jediném souřadném rámci. Konstrukce Jakobiánu se tedy redukuje na dva problémy

1. Jak vyjádřit rychlost souřadného rámce vztaženou k danému referenčnímu souřadnému rámci v jiném referenčním rámci?
2. Jak jsou tyto rychlosti počínaje  $\{n\}$  propagovány do  $\{0\}$ ?

V nejdůležitějších rysech zde uvedeme myšlenku konstrukce Jakobiánu, která je detailně popsána v knize [43].

Mějme souřadné rámce se shodným počátkem  $\{i\}$  a  $\{j\}$ , kde  $\{j\}$  se otáčí s úhlovou rychlostí  $\Omega_{ji}$  vůči  $\{i\}$ . Dále mějme bod  $\mathbf{P}$  nehybný v  $\{j\}$  a popsáný vektorem  $\mathbf{P}_j$ . Lze odvodit, že rychlost bodu  $\mathbf{P}$  vzhledem k  $\{i\}$  značená  $\mathbf{V}_{pi}$  bude dána vztahem:

$$\mathbf{V}_{pi} = \Omega_{ji} \times \mathbf{P}_j \quad (4.8)$$

V obecném případě se pohybuje soustava  $\{j\}$  vzhledem k  $\{i\}$  s lineární rychlostí  $\mathbf{V}_{ji}$  a bod  $\mathbf{P}$  navíc ještě s lineární rychlostí  $\mathbf{V}_{pj}$  vzhledem k  $\{j\}$ . Vztah 4.8 pak bude vypadat takto:

$$\mathbf{V}_{pi} = \mathbf{V}_{ji} + \Omega_{ji} \times \mathbf{P}_j + \mathbf{V}_{pj} \quad (4.9)$$

Tato rovnice je základem pro výpočet Jakobiánu a v literatuře se často nazývá rovnicí pohyblivých os (*moving axis formula*).

Segmentová struktura modelu člověka obsahuje pouze rotační klouby, všechny lineární rychlosti mezi jednotlivými souřadnými rámci tedy budou nulové. Pak lze ukázat, že rychlost koncového efektoru v rámci  $\{0\}$  bude:

$$\mathbf{V}_{n0} = \sum_{i=1}^{n-1} \Omega_{i,i-1} \times \mathbf{P}_{ni} \quad (4.10)$$

Oba parametry, úhlovou rychlost i pozici bodu, můžeme získat z transformačních matic příslušejících jednotlivým kloubům, které jsou dané animovaným modelem a v průběhu výpočtu jsou aktualizované, lze je tedy považovat vždy za známé. Připomeňme že transformační matice  ${}^0T_i$  transformující souřadný systém  $\{i\}$  do globálních souřadnic je dána vztahem:

$${}^0T_i = \prod_{j=1}^i {}^{j-1}T_j \quad (4.11)$$

Polohový vektor  $\mathbf{P}_i$  tedy získáme vynásobením počátku soustavy  $\{i\}$  (označme  $\mathbf{Q}_i$ ) globální maticí  ${}^0T_i$ .

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{Q}_i {}^0T_i \quad (4.12)$$

Odvození úhlové rychlosti  $\Omega_{i,i-1}$  je o něco komplikovanější, ale výsledek je podobně jednoduchý. Základem úvahy je rozklad inkrementální rotace  $\Omega_{i,i-1} dt$  na tři složky rotace kolem souřadných os. Píšeme  $\Omega_{i,i-1} = (\dot{\theta}_{xi}, \dot{\theta}_{yi}, \dot{\theta}_{zi})$ . Tyto hodnoty jsou časové derivace Eulerových úhlů okolo souřadných os.

Jakobián potřebuje vyjádření  $\Omega_{i,i-1}$  v globálním souřadném systému, což znamená transformovat osu rotace do globálního systému. S využitím naší dekompozice na Eulerovy úhly, prostě musíme transformovat tři souřadné osy rámce  $\{i\}$  do  $\{0\}$ . Označme transformované osy  $\mathbf{a}_{xi}, \mathbf{a}_{yi}, \mathbf{a}_{zi}$ . Například:

$$\mathbf{a}_{xi} = (1, 0, 0, 1) {}^0T_i \quad (4.13)$$

Mějme segmentovou strukturu o  $n + 1$  rotačních kloubech, lineární rychlost koncového efektoru  $\mathbf{V}_{n0}$  a jeho úhlová rychlost  $\Omega_{n0}$  je vyjádřená z lokálních úhlových rychlostí  $\Omega_{i,i-1} = (\dot{\theta}_{xi}, \dot{\theta}_{yi}, \dot{\theta}_{zi})$  pomocí matice Jakobiánu takto:



$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{n0} \\ \Omega_{n0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_{x1}, \mathbf{b}_{y1}, \mathbf{b}_{z1}, & \dots & \mathbf{b}_{xi}, \mathbf{b}_{yi}, \mathbf{b}_{zi}, & \dots & \mathbf{b}_{xn-1}, \mathbf{b}_{yn-1}, \mathbf{b}_{zn-1}, \\ \mathbf{a}_{x1}, \mathbf{a}_{y1}, \mathbf{a}_{z1}, & \dots & \mathbf{a}_{xi}, \mathbf{a}_{yi}, \mathbf{a}_{zi}, & \dots & \mathbf{a}_{xn-1}, \mathbf{a}_{yn-1}, \mathbf{a}_{zn-1}, \\ \dot{\theta}_{x1} \\ \dot{\theta}_{y1} \\ \dot{\theta}_{z1} \\ \vdots \\ \dot{\theta}_{xi} \\ \dot{\theta}_{yi} \\ \dot{\theta}_{zi} \\ \vdots \\ \dot{\theta}_{xn-1} \\ \dot{\theta}_{yn-1} \\ \dot{\theta}_{zn-1} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Význam členů  $\mathbf{a}$  byl popsán. Členy  $\mathbf{b}$  jsou vektorové součiny os  $\mathbf{a}$  s vektory  $\mathbf{P}_n - \mathbf{P}_i$ , kde  $\mathbf{P}_n$  je poloha koncového efektoru a  $\mathbf{P}_i$  poloha počátku rámce  $\{i\}$ :

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_{xi} &= \mathbf{a}_{xi} \times (\mathbf{P}_n - \mathbf{P}_i) \\ \mathbf{b}_{yi} &= \mathbf{a}_{yi} \times (\mathbf{P}_n - \mathbf{P}_i) \\ \mathbf{b}_{zi} &= \mathbf{a}_{zi} \times (\mathbf{P}_n - \mathbf{P}_i) \end{aligned} \quad (4.15)$$

Jako shrnutí předchozího textu uvedme, že členy  $\mathbf{a}$  a  $\mathbf{P}_i$  lze získat z příslušné transformační matice  ${}^0T_i$  která má tvar:

$${}^0T_i = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{xi} & 0 \\ \mathbf{a}_{yi} & 0 \\ \mathbf{a}_{zi} & 0 \\ \mathbf{P}_i & 1 \end{bmatrix}^T \quad (4.16)$$

Jakobián, jak je uveden rovnicí 4.14 má tolik sloupců, kolik stupňů volnosti má kinematický řetězec, v případě modelu člověka, který má pouze rotační klouby, to obecně je trojnásobek počtu kloubů. Předpoklad našeho modelu člověka tedy způsobuje, že sloupcová matice reprezentující stupně volnosti na pravé straně rovnice obsahuje pouze časové derivace Eulerových úhlů.

### 4.3.2 Inverze Jakobiánu

Poslední fáze řešení úlohy IK pomocí Jakobiánu jsou nalezení inverze  $\mathbf{J}^{-1}$  a nakonec implementace iterativního procesu, který opakovaním v předchozích

kroků dojde k řešení. Výpočet inverze je nejproblematictější, protože jakobián téměř nikdy nebývá čtvercová matice, kterou je možno invertovat. Používá se proto takzvaná pseudoinverze (Moore-Penrosova zobecněná maticová inverze) [60] definovaná takto:

$$A^+ = A^T(AA^T)^{-1} \quad (4.17)$$

Takto spočtená pseudoinverze bývá citlivá na singularitu  $AA^T$ , v jejichž okolí vycházejí výsledné pseudoinverzní matice extrémně vysoké hodnoty jednotlivých prvků. kapitola 8 knihy [48] uvádí takzvanou SR pseudoinverzi robustní vůči singularitám (*singularity robust*) definovanou takto:

$$A^* = A^T(AA^T + kE)^{-1} \quad (4.18)$$

Matice E je jednotková, parametr  $k$  definuje vztah mezi normou řešení a velikostí chyby. Malé  $k$  vede k malým chybám, ale k zvýšené velikosti řešení okolo singularit a naopak.

### 4.3.3 Využití redundance

V souvislosti s metodou inverze Jakobiánu je často v literatuře též přednášena myšlenka využití redundance kinematického řetězce. Pojem *kinematické redundance* souvisí s počtem stupňů volnosti řetězce. K umístění objektu v 3D kartézském souřadném systému je potřeba 6 parametrů (3 ve 2D). Má-li kinematický řetězec více stupňů volnosti, říkáme, že je redundantní. Obrázek 4.1 je vhodnou ilustrací problému.

Tuto redundanci je možno využít k výběru řešení splňujícího sekundární podmínku. Rozšíříme rovnici 4.7 o další člen:

$$\Delta\Theta = J^+\Delta X + (E - J^+J)y \quad (4.19)$$

V této formě rovnice [48] je  $y$  obecný vektor představující sekundární podmínku. Rozměr tohoto vektoru je stejný jako rozměr stavového vektoru. Práce [12] aplikuje tento vztah na situaci, kdy koncový efektor vykonává periodický pohyb. Řešení ve stavovém prostoru získaná rovnicí 4.7 však periodická nejsou. Vektor  $y$  je vypočítáván tak, aby minimalizoval odchylku od nějaké žádané pozice.

Vztah 4.19 tedy představuje mechanismus, jak metoda řešení úlohy IK založená na inverzi Jakobiánu může upřednostňovat některá řešení ze stavového prostoru. Obecně vzato, první sčítanec rovnice je zodpovědný za výběr vektoru úhlových rychlostí, které vyústí v požadovanou rychlost koncového efektoru. Druhý sčítanec potom upravuje tento vektor tak, aby při zachování rychlosti koncového efektoru bylo vyhověno dalším podmínkám.

### 4.3.4 Transpozice Jakobiánu

Metoda využívající transponovaného Jakobiánu místo invertovaného je založená na myšlence tzv. *virtuální práce*. Práce je rovna součinu síly ( $\mathbf{F}$ ) a vzdálenosti, ale také součinu momentu síly ( $\tau$ ) a úhlu.

$$F^T \cdot \Delta X = \tau^T \cdot \Delta \Theta$$

Dosadíme-li za  $\Delta X$  výraz 4.5, dostaneme

$$F^T \cdot J \cdot \Delta \Theta = \tau^T \cdot \Delta \Theta$$

z čehož pak krácením a transpozicí

$$F \cdot J^T = \tau \tag{4.20}$$

Sílu  $\mathbf{F}$  zde představuje míra chyby daná rozdílem aktuální a požadované polohy koncového efektoru. Vektor  $\tau$  může být považován za vektor zrychlení pohybových parametrů kloubů (stavového prostoru). Protože se nezajímáme o přesnou dynamiku, můžeme jej zjednodusit na prostá přemístění, čímž opět získáváme naše hledané  $\Delta \Theta$ . Vektor  $\mathbf{F}$  pak můžeme pro klid duše považovat za vektor hybností.

Tato metoda se nevyznačuje velkou přesností, zato je však rychlá a tedy vhodná pro aplikace v reálném čase. Velkou nevýhodou je citlivost na singulární stavy řetězce.

## 4.4 Metoda CCD

Existuje iterativní metoda, která s Jakobiánem nepracuje. Nazývá se *CCD* (*Cyclic Coordinate Descent*) a spočívá v procházení kloubů kinematického řetězce a jejich nastavování tak, aby se minimalizovala chyba koncového efektoru. Jedná se tedy o postupné přibližování.

Mějme body  $\mathbf{P}_d$  a  $\mathbf{P}_c$  označující cílovou a aktuální pozici koncového efektoru a ortonormální matice  $O_d = (\mathbf{u}_{1d}, \mathbf{u}_{2d}, \mathbf{u}_{3d})$  a  $O_c = (\mathbf{u}_{1c}, \mathbf{u}_{2c}, \mathbf{u}_{3c})$  označující cílovou a aktuální orientaci koncového efektoru. V každé iteraci CCD výpočtu se postupně projdou všechny klouby od konce vzhůru k bázi a změní se jejich pohybový parametr (rotace) tak, aby byla minimalizována chyba daná výrazem

$$E(\Theta) = \|\mathbf{P}_d - \mathbf{P}_c\|^2 + \sum_{j=1}^3 (\mathbf{u}_{jd} \cdot \mathbf{u}_{jc} - 1)^2 \tag{4.21}$$

Je zřejmé, že tato chyba je složena z chyby polohy a chyby orientace. Za předpokladu, že v každém kloubu se může měnit jen jedna hodnota (rotace), jedná se o jednoduchý jednorozměrný optimalizační problém.

Označme  $\mathbf{P}_{id}$  a  $\mathbf{P}_{ic}$  vektory spojující střed  $i$ -tého kloubu s cílovou a s aktuální polohou koncového efektoru. Dále  $\mathbf{P}'_{ic}(\phi)$  je vektor  $\mathbf{P}_{ic}$  otočený kolem osy ( $\mathbf{osa}_i$ ) kloubu o úhel  $\phi$ . Hledáme takový úhel, pro který bude *maximální* výraz

$$g_p(\phi) = \mathbf{P}_{id} \cdot \mathbf{P}'_{ic}(\phi) \quad (4.22)$$

Analogicky také můžeme korigovat chybu orientace *maximalizací* výrazu

$$g_o(\phi) = \sum_{j=1}^3 \mathbf{u}_{jd} \cdot \mathbf{u}'_{jc}(\phi) \quad (4.23)$$

Kombinací těchto výrazů dostáváme

$$g(\phi) = w_p g_p(\phi) + w_o g_o(\phi) \quad (4.24)$$

Parametry  $w_p$  a  $w_o$  nejsou principiálně důležité a hrají ve výpočtu roli vah, práce [44] uvádí jejich možné hodnoty vypočtené z aktuální situace řešené úlohy. Tatáž práce uvádí bez výpisu celého výpočtu, že výraz 4.24 je maximální pro hodnotu

$$\phi = \arctan \frac{k_3}{k_2 - k_1} \quad (4.25)$$

kde  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_3$  jsou konstanty:

$$\begin{aligned} k_1 &= w_p (\mathbf{P}_{id} \cdot \mathbf{osa}_i) (\mathbf{P}_{ic} \cdot \mathbf{osa}_i) + w_o \sum_{j=1}^3 (\mathbf{u}_{jd} \cdot \mathbf{osa}_i) (\mathbf{u}_{jc} \cdot \mathbf{osa}_i) \\ k_2 &= w_p \mathbf{P}_{id} \cdot \mathbf{P}_{ic} + w_o \sum_{j=1}^3 \mathbf{u}_{jd} \cdot \mathbf{u}_{jc} \\ k_3 &= \mathbf{osa}_i \left[ w_p (\mathbf{P}_{ic} \times \mathbf{P}_{id}) + w_o \sum_{j=1}^3 (\mathbf{u}_{jc} \times \mathbf{u}_{jd}) \right] \end{aligned}$$

Vypočtenou hodnotu  $\phi$  potom přičteme k aktuální hodnotě  $\theta_i$  rotace  $i$ -tého kloubu. V tomto okamžiku je možno také využít omezující parametry kloubu, upravit hodnotu  $\phi$  parametrem "stiffness" a porovnat, případně omezit, novou hodnotu  $\theta_i$  mezemi rotace kloubu.

Metoda CCD je výpočetně méně náročná než techniky pseudoinverze Jakobiánu, což jí dává jistou výhodu zejména v aplikacích kde je důležitá rychlost, i když ke konvergenci potřebuje typicky více iterací. Mnoho aplikací se však za cenu vyšší rychlosti spokojí s menší přesností, která je dosažitelná v menším množství iteračních cyklů. Navíc je CCD robustní vůči singularitám, které mohou výrazně znesnadnit výpočet pomocí pseudoinverze.

## Kapitola 5

# Inverzní kinematika a omezení kloubů

V kapitole 4 jsme popsali problematiku animace inverzní kinematikou. Připomeňme základní vztah mezi stavovým vektorem segmentové struktury  $\Theta$  a polohou koncového efektoru  $X$ :

$$X = f(\Theta)$$

Inverzí tohoto vztahu získáme naopak popis stavového vektoru pomocí polohy koncového efektoru prostřednictvím funkce  $f^{-1}$ .

$$\Theta = f^{-1}(X)$$

Tento vztah je definicí úlohy inverzní kinematiky (IK) popsané detailněji jinde. V této kapitole je důležité připomenout fakt, že úloha IK není jednoznačně řešitelná. Pro některé polohy koncového efektoru  $X$  nemusí vůbec existovat inverze  $f^{-1}$ , řešení prostě může ležet mimo stavový prostor. Pro jiné případy zas může existovat až nekonečně mnoho řešení, z nichž zobrazeno může být jen jedno.

K problému výběru řešení se obvykle přistupuje pomocí parametrů, které omezují stavový prostor kinematického řetězce, nebo zavádějí prioritu, pomocí níž se volí nejvhodnější řešení. Těmito parametry kloubů modelu se budeme v následujícím textu zabývat. Stavový prostor se omezuje mezemi rotace kloubu. Priorita se zavádí parametrem, jemuž se v animátorské hantýrce říká *tuhost* (z anglického *stiffness*).

Nejprve vyjasníme rozdíly mezi terminologií animátorskou a mechanickou (5.1). V sekci 5.2 vysvětlíme, co je pro nás modelem kloubu. Koncept parametru omezení rotace kloubu bude uveden v sekci 5.3. Problematika limitů rotace je úzce spjatá s matematickou teorií vyloženou v kapitole 3. Jednotlivé možnosti implementace závislé na konkrétní matematické reprezentaci budou probrány v sekcích 5.4, 5.5 a 5.6 a stručně celé téma shrneme

v sekci 5.7. Dále sekce 5.8 se bude zabývat prioritou kloubu implementovanou parametrem nazývaným *stiffness*. Nakonec popíšeme, jaké omezující parametry jsou podporovány standardem H-Anim (5.9).

## 5.1 Terminologie

Na úvod problematiky omezujících parametrů kloubů je vhodné ujasnit terminologii, která bude v dalším textu použita. Některé pojmy, které v mechanice mají pevný význam, jsou v animaci volnější nebo jinak používané.

Pojem **pohyblivost**, který v mechanice běžně značí přirozené číslo udávající počet stupňů volnosti systému, nemá tak přesně definovaný význam. V animaci v tomto kontextu běžně používáme právě spojení **počet stupňů volnosti**, eventuelně počet DOF (*degree of freedom*).

V kontextu, kde mechanika používá pojem **rozsah pohybu**, budeme používat označení meze nebo omezení rotace.

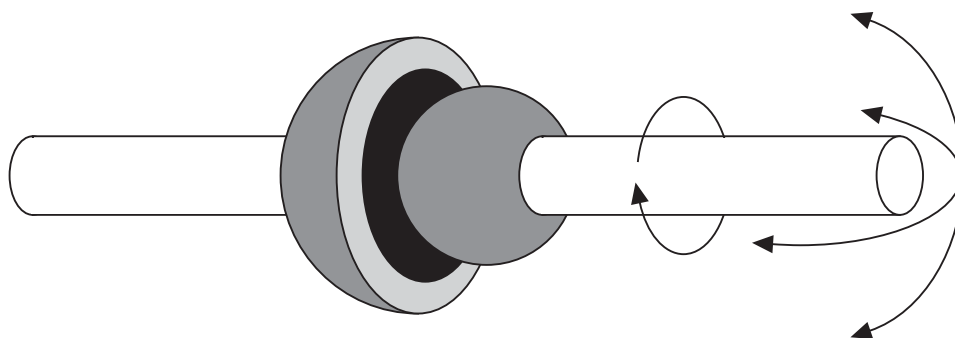
A tam, kde se v této práci bude objevovat slovo **pohyblivost**, budeme mít na mysli obecné pohybové parametry neurčitelné přímo rozsahem pohybu. Protože tyto vlastnosti bývají shrnuty do animačního parametru *stiffness*, bylo by patrně správné používat spíše slovo **tuhost**. V kontextu této práce má však *stiffness* širší význam jakéhokoliv vlivu na schopnost pohybu, odtud použití slova pohyblivost. Vzhledem k úloze tohoto parametru v animační metodě, lze také chápat jako priorita složek celkového řešení.

## 5.2 Model kloubu

Nejjednodušším modelem kloubu je kloub válcový (*cylindrical, revolute joint*), který dovoluje rotaci kolem pevné osy, tedy má pouze jeden stupeň volnosti. Takový kloub má význam při popisu robotických manipulátorů, ale při modelování člověka ho lze použít jen v některých případech, jako jsou klouby mezi články prstů.

Pro modelování pohyblivějších kloubních spojení, jako je kyčel, nebo rameno, je třeba obecnějšího modelu s více stupni volnosti. Zavedeme zde model kloubu kulového (*ball-and-socket joint*, obrázek 5.1), který umožňuje jak pohyb axiální (krut, *twist*), tak sférický (směr, *swing*) a má tedy tři stupně volnosti.

Kulový kloub je zobecněním kloubu válcového. Při vhodném modelu omezení rozsahu pohyblivosti lze obecným kulovým kloubem popsat i kloub válcový. Prostor pohyblivosti kulového kloubu je množina 3D rotací, jimž se budeme věnovat v dalším textu.



Obrázek 5.1: Schéma kulového kloubu s vyznačenými stupni volnosti.

### 5.3 Parametr omezení rotace kloubu

Posali jsme problematiku vyjádření rotace ve 3D, tedy popisu aktuálního stavu kloubu. V tomto okamžiku se můžeme zabývat pohybovými parametry kloubů, začneme mezemi rotace. Jako hlavní motivace pro zavedení tohoto parametru do modelu kloubu, bylo uvedeno omezení stavového prostoru segmentové struktury při výpočtech animace algoritmy inverzní kinematiky. Použití tohoto parametru je ale obecnější, existuje více aplikací, kdy je třeba ověřit, zda spočtená, či naměřená rotace odpovídá pohyblivosti skutečného kloubu.

Než se začneme zabývat jednotlivými možnostmi, jak meze rotace implementovat, definujme si, co od mechanismu omezení budeme očekávat.

V první řadě potřebujeme popsat rozsahy pohyblivosti daného kloubu, abychom mohli zjistit, zda jim vypočtená či jinak získaná rotace odpovídá. Pokud neodpovídá, musí být možné odvodit nejbližší možnou rotaci, která se použije místo původně navržené.

### 5.4 Omezení v prostoru Eulerových úhlů

Rotace vyjádřená Eulerovými úhly může být znázorněna jako bod ve 3D prostoru, kde na jednotlivých osách jsou rotace kolem os souřadného systému kloubu. Rotace, kterých je kloub schopen vyplňují určitý objem v tomto prostoru. Nazvěme jej *objem pohyblivosti*. Úkol popisu mezí rotace kloubu se pak dá převést na popis objemu pohyblivosti. Rotace, které spadají do objemu jsou použitelné, ostatní ne.

Protože je před testováním třeba rotaci převést na Eulerovy úhly, je třeba zajistit, aby převod vždy odpovídal použité konvenci skládání (viz 3.2). Pokud by různé klouby používaly různé konvence, je na místě tuto informaci zahrnout do popisu kloubu.

### 5.4.1 Prosté limity

Nejčastějším popisem mezí je jednoduché a intuitivní omezení jednotlivých Eulerových úhlů shora a zdola. Rotace kolem každé osy je omezena, ale pokud si tato omezení znázorníme objemem pohyblivosti, dostaneme kvádr.

Je zřejmé, že takovéto omezení lidského kloubu lze považovat za realistické pouze pokud je možno kloub modelovat jako kloub o jednom stupni volnosti. V takovém případě objem pohyblivosti degeneruje na úsečku.

Jednotlivé složky rozložené rotace se porovnají s příslušnými limity. Pokud se hodnota nenachází mezi svými limity, je nahrazena bližším z limitů (přesune se kolmým promítáním na stěnu kvádrů, který zde představuje objem pohyblivosti).

Obecně je velmi obtížné měřit jednotlivé Eulerovy úhly jakožto rotace kolem os globálního souřadného systému. Pro každý kloub lze s přijatelnou měrou abstrakce definovat ortogonální systém souřadných os odpovídající jeho stavbě a možnostem pohybu a dokonce se objevuje snaha tyto lokální souřadné systémy standardizovat [47]. Každá datová struktura popisující kloub tak potřebuje navíc evidovat otočení lokálního systému oproti globálnímu (posun je dán středem otáčení kloubu). V důsledku tak získáme objem pohyblivosti, který je sice stále kvádrový (není definována závislost mezi složkami rotace), ale je schopen mnohem lépe postihnout skutečnou situaci.

### 5.4.2 Obálka

Předchozí řešení je vhodné pro robotické manipulátory, které se též algoritmy IK řídí. Strojové klouby skutečně lze tímto způsobem popsat, mívají vlastně vždy jen jeden stupeň volnosti. Pokud mají stupňů volnosti více, jedná se o složení více jednoduchých kloubů na sobě navzájem nezávislých. Lidský kloub je ale mnohem složitější. I když jej pro potřeby počítačové animace zjednodušíme na střed otáčení a rotaci, většinou jej nelze bez příliš velké ztráty realismu modelovat jako složení navzájem nezávislých rotací kolem souřadných os.

Nabízí se myšlenka použití přesnějšiho popisu objemu pohyblivosti. Pohyblivost kloubu s jedním stupněm volnosti je dostatečně vyjádřena úsečkou, v případě dvou stupňů volnosti potřebujeme již obecný rovinný obrazec a naprosto obecný případ – plně pohyblivý kloub je popsán prostorovým útvarům.

Pro potřeby určení mezí rotace je potřeba popsat povrch objemu pohyblivosti. Podle způsobu, jakým je povrch popsán, pak lze definovat postup určení, zda bod leží vně, či uvnitř objemu, eventuálně postup výběru nejbližšího přijatelného bodu.

Obecnou plochu lze v počítačové grafice vyjádřit více způsoby. Pro bližší výklad této tematiky lze doporučit například knihu [50], nebo jiný obecný



přehled. V praxi nejpoužívanější reprezentací polygonální popis. Nevýhodou takové reprezentace pro implementaci limitů rotace by bylo nesnadné vyhodnocení vztahu uvnitř/vně mezi bodem a povrchem a následná projekce vně ležícího bodu na povrch. V tomto ohledu zajímavější by mohl být popis implicitně zadanou plochou složenou z grafických primitiv. Grafická primitiva se dají popsat malým množstvím parametrů, lze poměrně snadno určit, jestli leží uvnitř či vně tělesa, a projekce na povrch je také jednodušší. Aplikaci této techniky popíšeme v následující sekci.

## 5.5 Omezení v prostoru kvaternionu

Myšlenka vymezení objemu pohyblivosti v prostoru daném reprezentací rotace byla poměrně snadno představitelná pro rotace vyjádřené Eulerovými úhly. Práce [13] popisuje model rozsahu pohybu kloubu založený na reprezentaci rotace jednotkovým kvaternionem.

Jednotkové kvaterniony samozřejmě všechny leží na povrchu koule ve čtyřrozměrném prostoru. Objem pohyblivosti zde tedy nemá takový smysl jako v předchozím případě. Neplatí, že by některá rotace mohla být uvnitř objemu a jiná vně, protože jsou všechny na povrchu. Zmíněná práce [13] ale ukazuje, že lze využít průmět kvaternionu do 3D podprostoru, v němž se již objem pohyblivosti zavést dá. Měřením rotací skutečného kloubu lze ukázat, že kvaterniony reprezentující naměřené rotace jsou na povrchu 4D koule soustředěny do oblasti, která vyjadřuje rozsah pohyblivosti. V tom spočívá myšlenka průmětu kvaternionů do podprostoru o nižší dimenzi.

Průmětem do 3D podprostoru dokonce ani neztrácíme informaci. Přesně v souladu s Eulerovým teorémem 3.2 můžeme rotaci popsat třemi parametry i v prostoru kvaternionů. Čtvrtá souřadnice kvaternionu je totiž závislá veličina a lze ji dopočítat z podmínky jednotkové velikosti.

Limit rotace tak lze získat měřením rotace kloubu během dostatečně dlouhého a komplexního pohybu. Naměřená data se následně zpracují převedením na jednotkové kvaterniony  $q = [q_1, q_2, q_3, q_4]$ . Ty jsou pak promítnuty do 3D nadroviny  $q_4 = 0$ , v níž jsou naměřené rotace soustředěny do objemu, kterému opět můžeme říkat objem pohyblivosti. Povrch tohoto objemu je limit rotace.

Práce [13] uvádí i proces, kterým se z naměřených dat vyberou hodnoty na povrchu objemu. Ten je pak aproximován implicitně zadavým povrchem složeným z elipsoidů. Použití implicitních povrchů má několik výhod. Lze je popsat malým množstvím parametrů a snadno se určí poloha bodu vzhledem k povrchu. Také bod ležící vně (rotace mimo rozsah pohyblivosti) lze snadno promítnout na povrch.

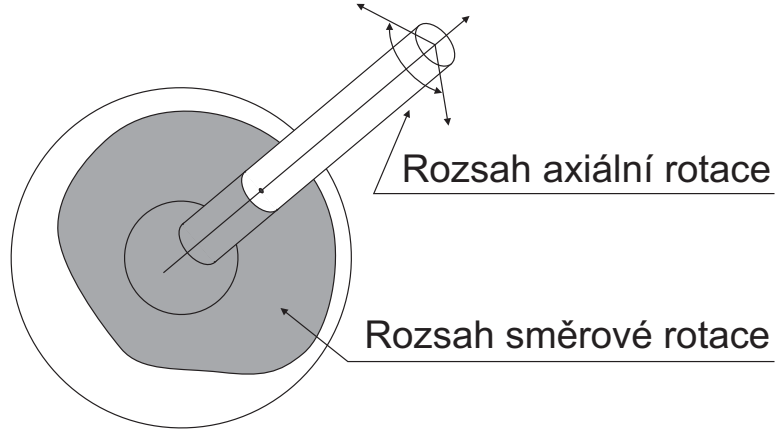
## 5.6 Směr a krut

Několik dalších způsobů modelování limitů kloubů je založeno na rozložení rotace kloubu na složku směru (*swing*) a krutu (*twist*).

Intuitivně lze pohlížet na orientaci článku segmentové struktury jako by se skládala ze složky směru článku (*swing*) a složky otočení kolem osy článku (*twist*).

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}^{TWIST} \mathbf{R}^{SWING} \quad (5.1)$$

Ačkoliv  $\mathbf{R}^{SWING}$  je v podstatě nastavením osy rotace a  $\mathbf{R}^{TWIST}$  otočení kolem této osy (viz obrázek 5.2), nelze chápat tuto reprezentaci stejně jako reprezentaci osa-úhel. Jedná se spíše o možnou interpretaci Eulerových úhlů, k popisu rotace je třeba tří parametrů.



Obrázek 5.2: Rozdělení rotace kloubu nasložku směřovou a axiální se znázorněnými rozsahy pohyblivosti.

Představme si, že klidový směr článku segmentové struktury je totožný s osou  $x$  souřadného systému, tedy s vektorem  $\mathbf{x} = [1, 0, 0]$ . Aktuální směr článku lze získat otočením kolem osy  $\mathbf{a}$  o úhel  $\gamma$ . Vzhledem k původní orientaci článku bude osa  $\mathbf{a}$  ležet vždy v rovině  $yz$ , k popisu osy tedy stačí dva parametry  $\mathbf{a} = [0, a_y, a_z]$ . Nechť velikost této osy není 1, ale  $\sin(\gamma/2)$ . Potom dva parametry stačí pro popis směru s tím, že v singulárním případě nulové velikosti osy nemá smysl uvažovat o rotaci, protože  $\gamma = 0$  a směr se nemění. Třetí parametr, nazvěme ho  $\alpha$ , zbývá pro úhel krutu.

Takto se všechny konfigurace kloubu vejdou do válce orientovaného v klidovém směru článku (osa  $x$  v našem příkladě) o poloměru 1 a výšce  $2\pi$  [48].

Tvar ploch vymezujících v tomto válci objem pohyblivosti odráží závislost mezi  $\mathbf{R}^{SWING}$  a  $\mathbf{R}^{TWIST}$ . Kapitola 8 citované knihy [48] uvádí implementaci objemu pohyblivosti množinou trojbokých hranolů, jejichž pod-

stavy odpovídají polygonům triangulovaných hraničních ploch. Spočtená rotace v reprezentaci směr-krut  $(\alpha, a_z, a_z)$  je testována takto. Pokud není nalezen hranol, který by obsahoval  $(0, a_z, a_z)$ , je rotace mimo limit. V opačném případě se pokračuje testem, zda  $(\alpha, a_z, a_z)$  je mezi horním a dolním limitem hranolu.

### 5.6.1 Sférické polygony a kužely

Další způsob vyjádření limitů rotace kloubu, do značné míry podobný předchozímu, popisuje článek [3]. Opět se počítá s rozkladem rotace na dvě složky, axiální (*twist*) a směrovou (*swing*), jejichž omezení jsou na sobě nezávislá.

Limit směrové složky může být vyjádřen jako křivka na povrchu koule, která může tvořit základnu obecné konické struktury s vrcholem ve středu otáčení kloubu.

Analyticky vyjádříme limity funkcí  $f(S_x, S_y)$ , která je záporná jen pro platné hodnoty směrové rotace  $S_x$  a  $S_y$ . Ukážeme si příklad takové funkce.

$$f(S_x, S_y) = \frac{S_x^2}{r_x} + \frac{S_y^2}{r_y} - 1 \quad (5.2)$$

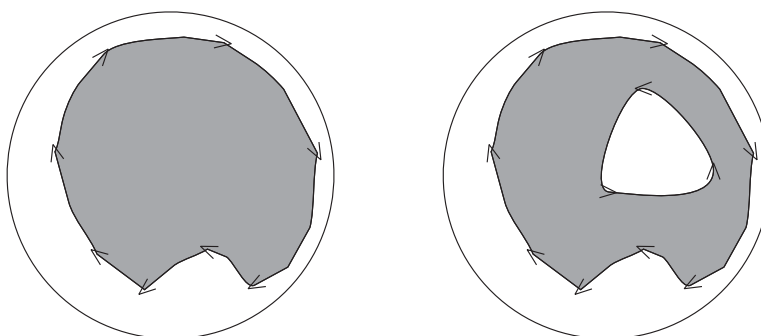
Hodnoty  $r_x$  a  $r_y$  představují mezní rotace kolem příslušných souřadných os a nabývají hodnot menších než  $\pi$ . Celý výraz vlastně poposuje sférickou elipsu v kartézském prostoru. Platné rotace jsou tak vymezeny obrazcem na povrchu koule.

Obecnější a realističtější popis je tzv. sférický polygon, libovolný obrazec na povrchu koule, který je opět základnou kuželového útvaru s vrcholem ve středu otáčení kloubu. Takový polygon je reprezentován jako sekvence bodů popsanych trojicí kartézských souřadnic. Hrany polygonu jsou nejkratší oblouky, které lze mezi nimi na povrchu koule vytyčit (zjevně takto lze vymežit pouze úhly menší než  $\pi$ ). Pořadí vrcholů je důležité, neboť určuje vnitřní a vnější oblasti polygonu. Obrácením pořadí lze zaměnit vnitřek za vnějšek, což může mít význam při popisu neplatné oblasti uvnitř polygonu (což ovšem při popisu lidských kloubů nebývá potřeba). Sférický polygon jako omezení rotace ilustruje obrázek 5.3.

Zmínili jsme, že polygon na povrchu koule vymezuje kuželový útvar. Těchto kuželů (*sinus cone*) využívají různé další adaptace popsané metody.

Práce [28] používá kuželů k vyjádření mezí rotace kloubů ramenního komplexu. Polygon definující základnu je však planární, ne sférický, což umožňuje snazší test platnosti (vyhodnocení vztahu uvnitř/vně mezi bodem a polygonem je v planárním obrazci jednodušší).

Zajímavý přístup prezentuje článek [18]. Plocha polygonu je diskretizována v prostoru Eulerových úhlů směrové rotace ("ThetaPhi") a uložena do tabulky. Po úvodní přípravě, která může být výpočetně náročnější, se pak velmi snadno a rychle provádí testy. Pokud data pro spočtenou rotaci



Obrázek 5.3: Meze rotace popsané sférickým polygonem. Šipky určují pořadí vrcholů polygonu. Na pravém obrázku obsahuje prostor pohyblivosti díru popsanou polygonem s opačným pořadím vrcholů.

v tabulce existují, je platná. Paměťová náročnost tabulek pro každý kloub se zdá být slabinou této metody, zřejmě se však vyplatí v aplikacích, které animují více postav, pokud připustíme, že tyto mohou používat stejné limity kloubů.

Složka axiální rotace bývá zpracovávána nezávisle a v tom případě je implementace omezení triviální. Stačí definovat dolní a horní mez,  $\tau_{min}$  a  $\tau_{max}$ .

Obecně však axiální složka může být závislá na směru. Limity proto mohou být definovány jako funkce složky směrové:  $\tau_{min} = f(S_x, S_y)$  a  $\tau_{max} = f(S_x, S_y)$ , při zachování podmínky  $\tau_{min} < \tau_{max}$  pro všechny platné  $S_x, S_y$ .

## 5.7 Shrnutí problematiky mezí rotace

Z předchozího textu je zřejmé, že problematika modelování rozsahu pohyblivosti kloubů byla oslovena v mnoha vědeckých pracích. Bylo publikováno významné množství různých modelů na různém stupni komplexity.

Z dosavadního výzkumu je zřejmé, že žádný z modelů se neobejde bez použití dat naměřených na skutečných kloubech. V podstatě vždy se jedná o nějakou formu toho, čemu jsme zde začali říkat objem pohyblivosti, a hlavní problém je tvar tohoto objemu. Zajímavým polem výzkumu mohou být metody měření tohoto tvaru a statistické zpracování naměřených dat za účelem vytvoření realistického modelu.

## 5.8 Priorita řešení – parametr stiffness

V úvodu této kapitoly jsme popsali problém algoritmů inverzní kinematiky s nejednoznačností řešení a uvedli jsme obecnou snahu o řešení tohoto problému zavedením omezujících parametrů pro klouby animované segmentové struktury. V dalších sekcích jsme pak přinesli stručný přehled technik, jejichž účelem je zmenšit stavový prostor struktury, tedy počet řešení připadajících v úvahu, pomocí modelování rozsahu pohyblivosti kloubu.

V animátorské praxi se používá ještě další omezující parametr, jehož účel je jiný. Tento parametr existuje ve dvou variantách, ale obě slouží k zavedení priority pro jednotlivá řešení. Jedna z jeho forem se nazývá “*stiffness*”, tedy tuhost, druhá “*springiness*”, pružnost. V obojím případě jde o jakousi míru ochoty kloubu se pohnout. Bývá vyjádřena koeficientem z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ , pro *stiffness* platí, čím vyšší hodnota, tím menší priorita, pro *springiness* je tomu naopak. Vzhledem k tomu je v podstatě jedno, kterou variantou se budeme dále zabývat. V dalším textu budeme pracovat s pojmem *stiffness*, protože je použit standardem H-Anim.

Zatímco výzkumu limitů rotace je věnována značná pozornost a jsou dobře teoreticky popsány, *stiffness* je parametrem pro ladění výsledné animace. Vazba na reálné vlastnosti kloubu není zřejmá, určitě však nebude jednoduchá.

Co všechno může vyjadřovat reálné číslo, které je hodnotou parametru? Čím je u skutečného kloubu ovlivněna jeho tuhost? Velký vliv má samotná stavba kloubu, tvar spojení, vazivové a svalové tkáně okolo. Různé patologie samozřejmě také ovlivňují pohyblivost kloubu. Pokud chceme zohlednit pouze toto, může být *stiffness* statickým parametrem.

Situace je ale komplikovanější. Pohyblivost kloubu by se měla menit i v závislosti na aktuální rotaci. Pokud se kloub blíží k mezím své pohyblivosti, měl by přispívat k celkovému pohybu méně. Naopak v situaci, kdy se vzdaluje od meze, měl by přispívat tím více, čím blíže k mezi je. *Stiffness* by tedy docela dobře mohla být parametrem dynamickým.

Vlivů na dynamickou tuhost bude více. Klouby lidského těla také nejsou na sobě nezávislé. Aktuální rotace jednoho kloubu může významně ovlivnit pohyblivost druhého.

A samozřejmě naše klouby jsou při většině činností tak pohyblivé, jak chceme, jinými slovy, člověk má značný vliv na to, který kloub k celkovému pohybu přispěje více, eventuálně v které fázi pohybu bude přispívat. Určitá nezávislá složka tuhosti by tedy měla být i vstupním parametrem animačního procesu.

Otázkou je, jak zmíněné vlivy zobecnit, jak na jejich základě vypracovat realistický model. Jaké zlepšení tyto jednotlivé faktory mohou přinést a za jakou výpočetní cenu? Je také zřejmé, že jakákoliv implementace parametru *stiffness* bude záviset na reprezentaci rotace pouřité modelem kloubu.

Naše zkušenosti s použitím inverzní kinematiky pro automatické ge-

nerování pohybů ([40][25]) ukazují, že výzkum parametru *stiffness* není zbytečný. Práce [25] byla zajímavá tím, že problém nerealistických pohybů byl vyřešen jinými triky při výpočtu animace. Naproti tomu VR prezentační modul systému ActIPret [51][40] zacházel s parametrem *stiffness* podle běžné animátorské praxe. *Stiffness* byla v modelu nastavena pro každý kloub zvlášť tak, aby pro animovaný pohyb bylo dosaženo nejlepšího výsledku. Toto bylo možné pouze proto, že projekt byl velmi průkopnický v oblasti svého hlavního zájmu (rozpoznávání a interpretace lidských aktivit) a kvůli velkému množství řešených problémů nikdy nepoužil jiný testovací scénář. Jeden z výsledků tohoto projektu je právě odhalení významu realistických omezujících parametrů kloubů při animaci inverzní kinematikou s malým množstvím vstupních dat.

## 5.9 Omezující parametry a H-Anim

Standard H-Anim definuje datovou strukturu popisující kloub. Zápis této definice v jazyce VRML vypadá takto:

```
PROTO Joint [
    exposedField SFVec3f center 0 0 0
    exposedField MFNode children []
    exposedField MFFloat llimit []
    exposedField SFRotation limitOrientation 0 0 1 0
    exposedField SFString name ""
    exposedField SFRotation rotation 0 0 1 0
    exposedField SFVec3f scale 1 1 1
    exposedField SFRotation scaleOrientation 0 0 1 0
    exposedField MFFloat stiffness [ 0 0 0 ]
    exposedField SFVec3f translation 0 0 0
    exposedField MFFloat ulimit []
]
```

Z hlediska modelování pohyblivosti kloubu jsou důležité parametry *ulimit*, *llimit*, *limitOrientation* a *stiffness*. Jejich význam je ve specifikaci [58] také popsán.

Pole *ulimit* a *llimit* datové struktury *Joint* specifikují horní a dolní limit rotace kloubu. Oba parametry jsou tříprvková pole reálných čísel obsahující oddělené hodnoty pro meze rotace kolem os X, Y, Z (*ulimit* obsahuje maxima a *llimit* minima). Závorky [] na konci příslušných zápisů definují přednastavenou hodnotu jako prázdné pole, čili kloub je neomezený, dokud mu nejsou meze definovány.

Pole *limitOrientation* udává orientaci souřadného systému v němž mají být limity interpretovány (viz 5.4.1). Tato orientace je vztažena vzhledem k středu otáčení kloubu (parametr *center*).

Parametr “stiffness”, pokud je uveden, obsahuje hodnoty z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$  s tím, že čím vyšší hodnota, tím méně by kloub měl přispívat k celkovému pohybu. Hodnotou tohoto parametru je opět tříprvkové pole, jehož prvky se vztahují k rotacím okolo souřadných os podobně, jako tomu je u limitů.

Standardem určená interpretace limitů rotace není nejšťastnější, neboť popisuje pevná omezení jednotlivých Eulerových úhlů, bez ohledu na případné závislosti. Objem pohyblivosti kloubu v prostoru Eulerových úhlů je kvádr. Zavedením orientace souřadného systému, v němž jsou limity interpretovány se tento kvádr otáčí, ale pořád zůstává nerealistickým kvádrem.

Data, jimiž jsou limity popsány, však teoreticky umožňují i jiné, nestandardní implementace. Standard specifikuje trojici reálných čísel, pro každý limit, ale VRML zápis datové struktury Joint používá pro příslušná pole datový typ MFFloat, což je pole reálných čísel obecné délky. Zápis trojicí čísel by mohl být vynucen použitím datového typu SFVec3f, což je pole reálných čísel o pevné délce rovné třem.

Situace je stejná u parametru “stiffness”, který je opět typu MFFloat, tedy pole reálných čísel libovolné délky.

Je tedy možné tato pole naplnit jinými daty pro jinou reprezentaci omezujících parametrů. Model kloubu by tak byl čitelný aplikací odpovídající standardu, pokud by se tato nepokoušela číst a použít omezující parametry. V praxi by to znamenalo, že by náš model byl dobře použitelný na přehrávání hotových animací, ale jejich vytváření by bylo možné jen v naší aplikaci.

## Kapitola 6

# System ramenního kloubu

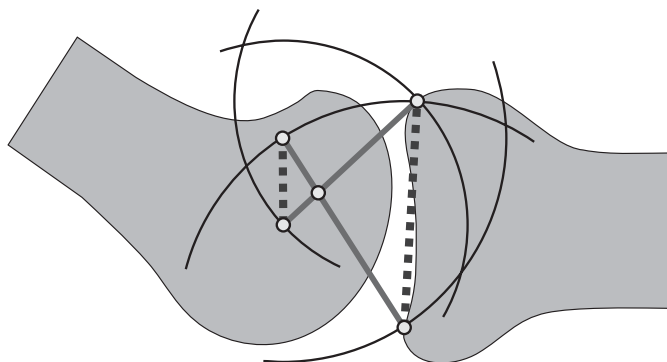
Dosud byla řeč o virtuálních modelech lidských kloubů, aniž bychom se nějak zabývali klouby jako takovými. Ve všech případech byl kloub ztotožněn s pevným středem otáčení, což velmi dobře vyhovuje použití nástrojů geometrických transformací, na nichž je založena 3D počítačová grafika. Model kloubu pro počítačovou animaci zhruba odpovídá konceptu biokinematické dvojice ve smyslu mechanické náhrady vazebních podmínek a vztahů mezi vzájemně artikulujícími segmenty, definující jejich vzájemnou pohyblivost [1]. Kategorizace biokinematických dvojic běžná v biomechanice je však značně odlišná. Základní model kloubu odpovídá biomechanickému konceptu kulové dvojice se třemi rotačními stupni volnosti. Mechanismem omezení rozsahu pohybu je možné eliminovat některé z rotačních stupňů volnosti, takže prakticky všechny otočné dvojice s nimiž biomechanika operuje jsou modelovány i v počítačové animaci. Kompletně jsou však zanedbány všechny možné translační stupně volnosti.

Komplikovanější biokinematické dvojice, které lépe reprezentují kinematiku reálného “anatomického” kloubu (např. vzájemně sprážená zdvojená rotačně-posuvná dvojice kolenního kloubu), které se simulují “zkříženým” čtyřkloubovým mechanismem, jaký ukazuje obrázek 6.1, v běžné počítačové animaci celé postavy vůbec neexistují. Počítačová animace tedy obecně modeluje kloub výrazně jednodušším způsobem, než je běžné v biomechanice. Většina pobyblivých spojení na těle je v počítačové animaci reprezentována stejnou strukturou.

Skutečná “konstrukční” rozdílnost kloubů však přesto v některých animačních úlohách způsobuje problémy. Asi nejvýznamnější z nich spočívá v komplexním systému kloubu ramene, jehož stavba se od ostatních kloubů liší nejvýrazněji. Složitá anatomická struktura ramene umožňuje velký rozsah pohyblivosti horní končetiny. Ramenní kloub se pohybuje při téměř veškeré aktivitě horních končetin, jeho animace má tedy velký význam.

Věnujme se v této kapitole rameni blíže. Pokud úspěšně vymodelujeme ramenní kloub pomocí nástrojů, které jsme popsali dříve (obecný model





Obrázek 6.1: Schema biokinematické dvojice značně podrobně modelované “zkříženým” čtyřkloubovým mechanismem.

kloubu o třech rotačních stupních volnosti obohacený o pohybové parametry), nebude již problém modelovat stejným způsobem jiné části těla. Navíc rameno představuje určitou výzvu z hlediska měření pohybu. Seznamme se tedy dále s funkcí a anatomickou stavbou systému ramenního kloubu (sekce 6.1). V sekcích 6.2 a 6.2.2 přiblížíme specifika kinematického modelu a jeho úpravu pro potřeby animace. Nakonec (sekce 6.4) popíšeme některé problémy a řešení týkající se lopatky, jakožto části ramene, která je pro animaci nejproblematičtější.

## 6.1 Funkce a stavba ramene

Úlohou ramenního kloubu je připojení horní končetiny k tělu. Toto spojení musí horní končetině dodávat potřebnou stabilitu a mobilitu, což jsou ve své podstatě protichůdné požadavky.

Mezi primáty lze pozorovat širokou škálu různě funkčních horních končetin počínaje druhy pohybujícími se po zemi kvadripedním způsobem, kde rameno slouží primárně podpoře, a konče vysoce pohyblivými horními končetinami opic, žijících v korunách stromů. Z hlediska použití je lidská horní končetina nedaleko od středu tohoto spektra směrem k pohyblivosti.

Systém lidského ramenního kloubu poskytuje horní končetině trvalou oporu ve vzpřímené pozici díky klíční kosti napojené na hrudník. Zároveň kombinace tří kloubů umožňuje velký rozsah pohyblivosti pro různorodou manipulaci. Mechanismus posuvného kloubního spojení mezi lopatkou a hrudníkem celek při těchto manipulacích zpevňuje a poskytuje účinný zdroj síly svalů upnutých přes lopatku. Takto se lidská horní končetina stala velmi univerzálním manipulátorem.

U čtyřnohých tvorů se také projevuje protichůdnost požadavků stability a mobility, stavba ramenního kloubu však bývá jiná už díky bočně

zploštělému hrudníku, který lépe umožňuje použití předních končetin k lokomoci. Příkladem tvora velmi specializovaného na pohyblivost může být gepard, který nemá klíční kost. Celá horní končetina je na těle držena svaly, což jí umožňuje vyjímečnou pohyblivost sloužící dobře k dosažení vysoké rychlosti při lovu. Na druhou stranu taková stavba pletence nedovoluje dlouhodobou zátěž, což je ovšem naprosto v souladu se způsobem života velkých šelem.

Lidský ramenní kloub je tedy univerzálním mechanismem dovolujícím širokou škálu činností. Vývoj univerzální horní končetiny byl jistě v korelaci s vývojem mozku a univerzální inteligence a byl tak podobně zásadním faktorem na utváření člověka.

### 6.1.1 Anatomie

Detailním popisem anatomické stavby lidského ramenního kloubu se tato práce zabývat nebude, neboť za tím účelem existují publikace lepší a povolanější [33][9][16][19]. Kromě anatomických knih stojí za zmínku i zajímavý příklad využití technik virtuální reality, kterým je internetová učebnice [62]. Je však na místě podat zde aspoň základní fakta o stavbě ramene, než se začneme věnovat problémům s jeho modelováním.

Ramenní kloub je součástí pletence horní končetiny, který ji připojuje k tělu. Celý systém ramene se skládá ze tří kostí, čtrnácti vazů a jedenácti svalů [62].

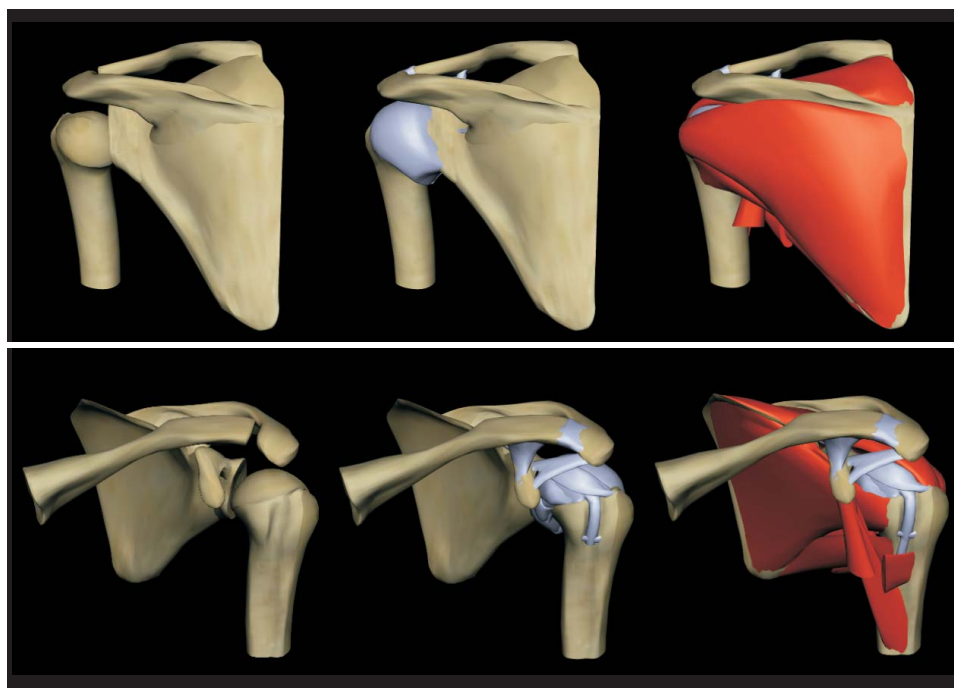
Kosti ramene jsou kost pažní (*humerus*), kost klíční (*clavicula*) a lopatka (*scapula*). Tyto kosti jsou propojeny dvěma klouby a třetí důležitý kloub je napojuje na zbytek těla na kraniálním konci kosti prsní (*sternum*).

S kostí prsní je spojena kost klíční kloubem *sternoklavikulárním* (*SC*). Druhý konec klíční kosti navazuje *akromioklavikulárním* (*AC*) kloubním spojením na nadpažek (*acromion*), jeden z výběžků lopatky.

Zmiňme ještě tři z vazů upínajících se na klíční kost pro jejich význam pro pohyblivost ramene. Jsou jimi *ligamentum conoidale* a *ligamentum trapezoideum* které spojují klíční kost s lopatkou a *ligamentum costoclaviale* mezi klíční kostí a žebrem. Tyto vazy limitují rozsahy pohyblivosti jednotlivých fází elevace horní končetiny [8] a jsou důležitým faktorem pro odvození rozsahů pohyblivosti jednotlivých kloubů systému ramene.

Lopatka je obalena svaly a vazy, jimiž je přidržována na povrchu hrudníku. Tímto je vlastně realizováno další kloubní spojení mezi lopatkou a hrudníkem (*thorax*), označované jako *scapulotorakální* (*ST*) spojení. Tento kloub se principiálně liší od ostatních tím, že je posuvný spíše než rotační. Svaly obalující ST spojení jsou hlavním zdrojem pohybu pletence horní končetiny.

Lopatka dále navazuje ještě jamkou (*glenum*) na kost pažní kloubem nazývaným ramenní nebo *glenohumerální*. Tento kloub je kloub kulový, kulová hlavice pažní kosti zapadá do značně mělké a volné jamky (*glenum*) tvořené výběžky lopatky. Celé glenohumerální spojení je obaleno pouzdrem



Obrázek 6.2: Anatomický 3D model ramene z interaktivní učebnice anatomie [62]. Horní trojice obrázků představuje pohled na systém ramene zezadu, první obrázek zleva obsahuje jen kosti, druhý přidává vazy a třetí i svaly. Dolní řada je totéž při pohledu zepředu (a mírně shora).

vazů, které mu spolu s celkovým tvarem hlavice a jamky poskytují potřebnou pevnost.

Kombinace značně pohyblivého ramenního kloubu s mělkou jamkou a kloubů incidujících s klíční kostí umožňuje horní končetině značný rozsah pohyblivosti. Pro lepší představu viz obrázek 6.2.

## 6.2 Kinematika

V souvislosti s pohyblivostí ramenního kloubu se v literatuře objevuje pojem *rytmus ramene* (*shoulder rhythm*) [28], jímž se označuje soulad současných pohybů všech složek ramenního pletence. Jednotlivé svaly nikdy nepracují samostatně a proto přirozený pohyb vždy zahrnuje pohyb všech kloubů. Například pažní kost je schopná 100° elevace vůči lopatce. Celková elevace ramene však bývá okolo 180°, což znamená, že i zbytek ramenního pletence musí přispět. První a velmi vyčerpávající popis konceptu "rytmu ramene" byl popsán v článku [8].

Zmíněná publikace ve své době (1978) sumarizovala stav výzkumu po-

hyblivosti ramene a model, kterým tyto poznatky shrnula, je uznávaný dodnes. Systém ramene je popsán dvěma segmentovými strukturami. První se skládá z hrudníku, klíční kosti a lopatky. Je to uzavřená struktura, jak klíček, tak lopatka jsou připojeny pohyblivým spojením na hrudník, který je této struktuře pevnou bází. Druhá segmentová struktura je tvořena lopatkou (případně klaviskapulárním článkem - soustavou klíčku a lopatky) a pažní kostí. Plynulý pohyb elevace paže v plném rozsahu (okolo 180°) zahrnuje pohyb všech kloubů. zajímavé jsou hlavně změny chování první segmentové struktury, kde dochází ke změnám pohyblivosti (počtu stupňů volnosti) během pohybu.

V první fázi pohybu jsou všechny klouby pohyblivé. Od určitého okamžiku (napnutím ligamenta conoidale) je zablokován AC kloub a soustava klíčku a lopatky se pohybuje jako celek otáčením kolem osy spojující SC kloub a bod nedaleko mediálního konce spina scapulae. Po napnutí ligamenta costoclaviculare (cca 100° celkové elevace) je však další rotace kolem této osy nemožná. Následuje krátká fáze pohyblivosti AC kloubu, než dojde k napnutí ligamenta trapeziodeum, čímž je vzájemný pohyb klíčku a lopatky opět znemožněn. Od toho okamžiku zůstává AC kloub na místě a soustava klíčku a lopatky se otáčí kolem osy procházející SC a AC klouby. Mezitím pohyb glenohumerálního kloubu, jehož jamka je unášena a otáčena vzhůru, probíhá plynule.

### 6.2.1 Náhradní kinematická struktura ramene

Pro účely počítačové simulace bude třeba nalézt vhodou reprezentaci celého systému ramene a jeho pohyblivosti.

Náhradní kinematická struktura popisující pohyblivost lidského těla by měla co nejvíce odpovídat skutečnosti. Základem této struktury pro nás může být graf vazeb mezi kostmi. Intuitivně by se dal předpokládat graf, v němž hrany budou reprezentovat kosti, uzly pak jejich pohyblivá spojení - klouby. Protože však hrana grafu může incidovat právě se dvěma uzly a kost typicky může být zahrnuta ve více než dvou spojeních, použijeme pro základní schéma pohyblivosti opačné významy uzlů a hran - uzel bude symbolizovat kost, hrana vazbu mezi kostmi.

Ukažme si, jak by vypadal podgraf, který by popisoval ramenní kloub a jeho návaznost na zbytek těla. Zbytkem těla je obvykle rozuměn hrudník, zajímavější však bude, když budeme vazbu sledovat až k páteři, přesněji k některému z obratlů. Protože nás zajímá hlavně rameno, zanedbáme zbytek horní končetiny loketním kloubem počínaje. Tato část těla je ramenním kloubem unášena a z kinematického hlediska na jeho pohyblivost nemá vliv.

Předchozí sekce (6.1) se věnovala anatomické stavbě ramene. Odtud je zřejmé, že náš graf bude obsahovat uzly symbolizující tři popsané kosti (kost pažní, lopatku a kost klíční), které na sebe budou v tomto pořadí navazovat. Bylo také zmíněno, že kost klíční navazuje na kost prsní, čímž je rameno

vzdálenosti [m]	dýchání	ramena
Střední hodnota	0,162435	0,158845
Minimální vzdálenost	0,159226	0,150841
Maximální vzdálenost	0,166154	0,163484
Rozdíl	0,006928	0,012643
Směrodatná odchylka	0,002153	0,002127

Tabulka 6.1: Výsledky pokusu podporujícího tvrzení, že se při pohybu významně nemění vzájemná poloha sternoklavikulárních kloubů a páteře.

připojeno k hrudníku.

Prsní kost je s páteří spojena žebry, která nejsou ani k obratlům ani k prsní kosti připojena pevně. Díky pohyblivosti v těchto spojích by bylo třeba zahrnout žebro jako uzel do našeho grafu. Prsní kost je ovšem k páteři připojena žebry z obou stran, čímž se v našem grafu objevuje smyčka.

Pohyblivost připojení žeber k páteři a k prsní kosti se však zdá být zanedbatelná. K ověření této hypotézy jsme provedli experiment, při němž jsme sledovali optickým systémem snímání pohybu vzájemnou vzdálenost mezi kraniálním koncem prsní kosti a trnem prvního hrudního obratle (tyto body lze snadno označit odrazkou). Jedním z měřených pohybů bylo hluboké hrudní dýchání, druhým zase rozsáhlé pohyby ramen. Výsledky udává tabulka 6.1.

Je vidět, že ačkoliv se obě měření liší výrazně v rozdílu minimální a maximální hodnoty, jsou si velmi blízká ve směrodatné odchylce, která je velmi malá. Je možné předpokládat, že tato směrodatná odchylka odráží spíše chybu měření, než vlastní změny vzájemné polohy sledovaných bodů. Považujeme tedy model hierarchické náhradní kinematické struktury, který prezentuje sternoklavikulární klouby jako přímé potomky prvního hrudního obratle, za dostatečně přesný.

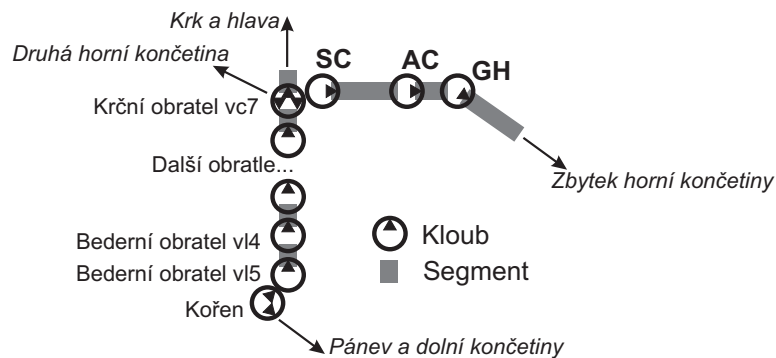
Další smyčka vzniká zahrnutím skapulotorakálního spojení mezi lopatkou a hrudníkem (ST spojení). Jedná se o posuvné a velmi pohyblivé spojení, které má zásadní význam pro pohybové vlastnosti ramene jako celku. Toto spojení tedy nemůžeme snadno zanedbat a je třeba ho nějakým způsobem modelovat. Sekce 6.4 se mu bude věnovat blíže.

Popis pohyblivosti takovýmto jednoduchým grafem se ovšem zjevně hodí jen pro základní představu o pohyblivosti soustavy. Nemá žádný význam pro jakékoliv výpočty a simulace. Za tím účelem musí být graf rozšířen. Každý uzel musí nést nějaký geometrický popis kosti a umístění jejích kloubních spojení. Hrana pak nese nějakou specifikaci vlastností spojení. Zvláště v případě složitějších 3D systémů taková reprezentace může ztrácet na přehlednosti a grafické názornosti.

### 6.2.2 Model pro animaci

Počítačová grafika při zobrazování animovaných segmentových struktur hojně využívá mechanismu geometrických transformací a jejich hierarchického skládání. Náhradní kinematická struktura používaná v animaci je na tomto principu založená. Je pro ní vžit termín *kostra* (*skeleton*), ale toto slovo zde má blíž k pojmu z teorie grafů, spíše než z anatomie. Jedná se totiž o stromový graf, kde každý uzel představuje geometrickou transformaci (kloub) a každý potomek je podřízen svému předku (je jím transformován). Kořen bývá umístěn do oblasti pánve. Graf tedy nepopisuje stavbu těla, ale vliv kloubů na jednotlivé části těla.

Hrany tohoto stromového grafu většinou odpovídají skutečným kostem. Výjimku tvoří právě oblast napojení ramenních kloubů na zbytek hierarchie tvořený páteří. Zde je třeba provést některá zjednodušení. Ramena bývají přímým potomkem některého obratle. V případě anatomicky nejvěrnější hierarchie doporučované standardem H-Anim [58] jsou sternoklavikulární klouby potomky prvního hrudního obratle. Jsou tak podřízeny stejné transformaci jako sedmý krční obratel. Obrázek 6.3 představuje výřez z diagramu hierarchické struktury popsané standardem H-Anim a ukazuje oblast ramenního kloubu a její návaznost na zbytek hierarchie.



Obrázek 6.3: Výřez z diagramu hierarchické struktury, jak ji specifikuje standard H-Anim [58]. (SC - sternoklavikulární kloub, AC - akromioklavikulární kloub, GH - glenohumerální kloub)

Zanedbáním pohyblivých spojení mezi žebry a prsní kostí a mezi žebry a obratli byla odstraněna smyčka ve stromovém grafu nepřijatelná. Toto zanedbání lze bez újmy na realismu provést. Potomci uzlu jsou podřízeni stejné transformaci, nemohou tedy měnit vzájemnou polohu. Toto je zřejmě pravda pro oba sternoklavikulární klouby, které jsou na jedné kosti. Experiment popsaný na konci předchozího odstavce (6.2.1) ukazuje, že na reálném lidském těle se nemění ani vzájemná poloha SC kloubů a příslušného krčního obratle. V tomto ohledu je popsán strom transformací do značné míry vyhovující i

z kinematického hlediska.

Větším problémem je zanedbání spojení mezi lopatkou a hrudníkem, které představuje další smyčku, geometrickými transformacemi se modelovat nedá a přesto v některých animačních úlohách může mít významný vliv na výsledek. Této problematice bude věnována sekce 6.4.

### 6.3 Dynamika

Z dynamického hlediska je horní končetina většinou modelována jako soustava tuhých těles propojených rotačními klouby [27]. Ačkoliv takový dynamický model by měl být propojen s modelem kinematickým, v případě ramenního kloubu to není úplně možné.

Tuhá tělesa, jimiž je modelována horní končetina bývají paže, předloktí a ruka (někdy jsou předloktí a ruka spojené do jednoho tělesa). Toto rozdělení je vázáno na tři předpoklady.

- Mechanické chování horní končetiny vzhledem k trupu je nezávislé na zbytku těla.
- V rámci každého segmentu se kosti a měkké tkáně pohybují stejně.
- Deformace měkkých tkání neovlivňují mechanické vlastnosti segmentu jako celku.

U zmíněných částí horní končetiny si tyto zjednodušující předpoklady vynucují jen drobná zanedbání například ohybových deformací okolo kloubů nebo rozdílů pohybu měkkých tkání oproti kostem daných jejich pružností.

V případě systému ramenního kloubu se na tyto předpoklady přistoupit nedá a soustava tuhých těles odpovídající kostem v rameni tímto způsobem vytvořit nelze. Svalová hmota vázaná na kosti ramene je vzájemně provázaná a propojení segmentů soustavy nelze zjednodušit na jeden bod středu otáčení rotačního kloubu. Navíc objem měkkých tkání v oblasti ramene vykazuje příliš velké pohybové deformace.

### 6.4 Problém lopatky

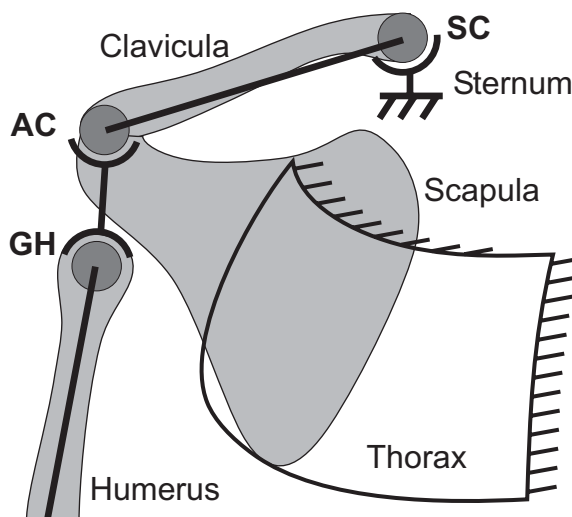
Posuvné spojení lopatky s hrudníkem představuje smyčku v grafu závislostí kloubů podobně jako propojení klíčních kostí s páteří žebry. Na rozdíl od žebere však lopatku z pohybového modelu nelze vynechat. Nabízí se možnost prosté redukce lopatky na spojnicí acromioclaviculárního a glenohumerálního kloubu. Takto je lopatka většinou modelována (modely, které zjednodušují rameno na jeden kloub zde neuvažujeme). Takové řešení je poměrně jednoduché, využívá intuitivně přirozené hierarchie sternoklavikulárního, akromioklavikulárního a glenohumerálního kloubu, které je možno modelovat jako

rotační. Můžeme tak produkovat animace do značné míry realistické, pokud jde o pohyb těla jako celku. Animace však není realistická na úrovni pohybu přímo v kloubech ramenního systému.

V dalších odstavcích přiblížíme možnosti, jak lopatku modelovat, aby se rameno animovalo realistictěji.

#### 6.4.1 Modelování jako omezení

Považujme klíční kost za opěrnou část ramenního pletence a použijme jí pro popis hierarchie sternoklavikulární → acromioclaviculární kloub. Potom lopatka a její posuvné spojení s hrudníkem lze interpretovat jako mechanismus omezení pohyblivosti sternoklavikulárního a možná i akromioclaviculárního kloubu. Náhradní kinematickou strukturu ramene v takovém případě ukazuje obrázek 6.4.



Obrázek 6.4: Schéma náhradní kinematické struktury při implementaci lopatky pouze pohybovými omezeními kloubů. Grafické znázornění kloubů respektuje jejich stavbu, jamku a hlavici, ne transformační hierarcii. (SC - sternoklavikulární kloub, AC - akromioclaviculární kloub, GH - glenohumerální kloub)

Svaly a vazy poutající lopatku k povrchu hrudníku skutečně omezují oblast prostoru v níž se může pohybovat jamka glenohumerálního kloubu vzhledem k hrudníku. Jednoduchý způsob, jak zohlednit existenci spojení lopatky s hrudníkem, je tedy dosazení vhodných hodnot omezujících parametrů kloubů, které v hierarchické struktuře postavy leží mezi hrudníkem a glenohumerálním kloubem.

Zřejmě se toto týká hlavně kloubu sternoklavikulárního. Míra vlivu to-

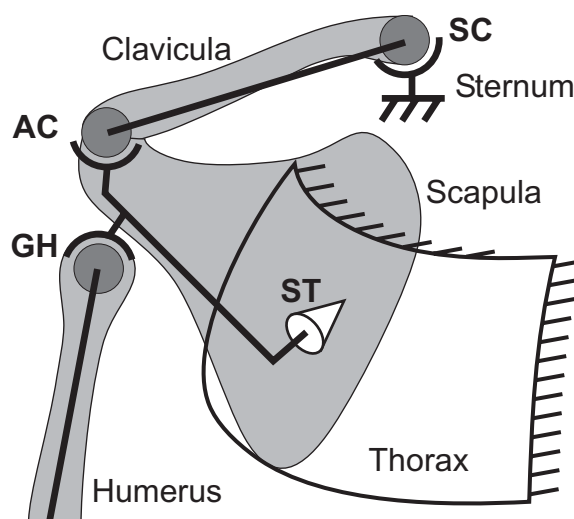


hoto omezení na akromioklavikulární kloub bude nejspíš výrazně menší, protože ten přímo inciduje s pevnou hmotou lopatky.

Problémem tohoto řešení budou nepříliš realistické hodnoty rotace v kloubech incidujících s lopatkou, tedy v kloubu acromioclaviculárním a glenohumerálním. Přestože glenum bude omezení nadřizovaných kloubů udržováno v správné oblasti prostoru, je pravděpodobné, že jeho orientace nebude přesně taková, jaká by byla u skutečného kloubu. Toto by bylo zvláště viditelné pokud by byl animován kostlivec - kaudální konec jeho lopatky by tak nezůstával přimknut k hrudníku [28].

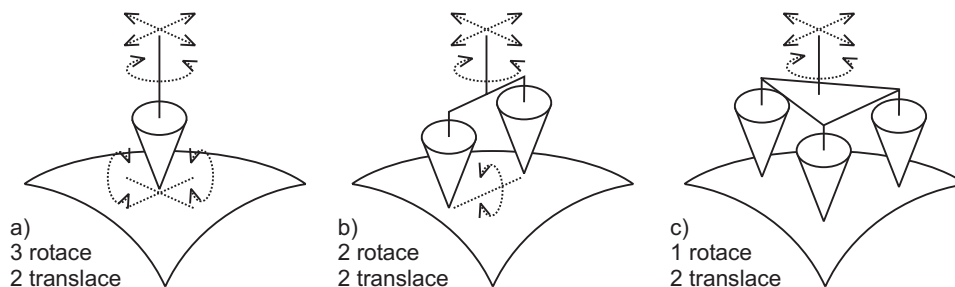
#### 6.4.2 Animace lopatky

V některých aplikacích může být potřeba získat realističtější údaje o pohybu jednotlivých kloubů ramene. Lopatka tak musí být modelována tak, že náhradní kinematická struktura skutečně implementuje spojení lopatky s hrudníkem. Obrázek 6.5 představuje možnou náhradní kinematickou strukturu s lopatkou.



Obrázek 6.5: Schéma možné náhradní kinematické struktury s modelovanou lopatkou. (SC - sternoklavikulární kloub, AC - akromioklavikulární kloub, GH - glenohumerální kloub, ST - spojení lopatky s hrudníkem)

Lopatka je omezena tím, že je kinematicky neurčitou vazbou vázaná k povrchu hrudníku. Tomu by odpovídal model lopatky bodovým kontaktem pohyblivým po ploše. Ten by měl dva translační stupně volnosti a tři rotační. V literatuře jsou však zmíněny i omezenější modely dvojnožkou (*dipod*) nebo trojnožkou (*tripod*), které mají dva nebo jeden rotační stupeň volnosti. Obrázek 6.6 schematicky ilustruje různé modely lopatky.



Obrázek 6.6: Modely lopatky s různým počtem stupňů volnosti: a) bodové spojení, b) dvojnožka, c) trojnožka.

Práce [28] popisuje řešení problému animace horní končetiny s využitím algoritmu inverzní kinematiky, který je schopen počítat s více koncovými efektorů [6].

Při animaci horní končetiny bude zřejmě jeden z koncových efektorů umístěn někde v oblasti ruky. Další koncový efektor bude umístěn na lopatce. Získáme tak dva otevřené kinematické řetězce (horní končetinu a rameno), které mají některé klouby společné. Pro oba můžeme sestavit Jakobián a získáme vztahy:

$$\Delta H = J_H \Delta \alpha \quad \Delta S = J_S \Delta \alpha \quad (6.1)$$

Kde  $\Delta H$  a  $\Delta S$  jsou vektory kroku přiblížení příslušného koncového efektoru ke svému cíli.  $J_H$  a  $J_S$  jsou Jakobiány pro příslušné koncové efektorů a  $\Delta \alpha$  je vektor přírůstků rotací v kloubech horní končetiny.

Oba členy 6.1 mohou být spojeny do jedné rovnice popisující vztah pro celou horní končetinu včetně ramene takto:

$$\begin{bmatrix} \Delta H \\ \Delta S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_H \\ J_S \end{bmatrix} \Delta \alpha \quad (6.2)$$

Kombinovaný Jakobián pak invertujeme a řešíme standardní úlohu inverzní kinematiky.

Algoritmus navržený v [6] a použitý v [28] pracuje jako běžný algoritmus IK s několika úpravami. Standardně se v každé iteraci určí přírůstky posunutí po přímé spojnici mezi koncovými efektorů a cíli. Pak je spočítán a invertován Jakobián pro aktuální konfiguraci kostry. Spočtená nová konfigurace je porovnána s příslušnými limity rotace kloubů a v případě porušení limitu je ponechána předchozí hodnota a kloub není uvažován pro další výpočty. Takto se Jakobián postupně plní nulami, dokud není dosaženo cílů, nebo nějaké kompromisní polohy v případě, že některý z cílů není dosažitelný.

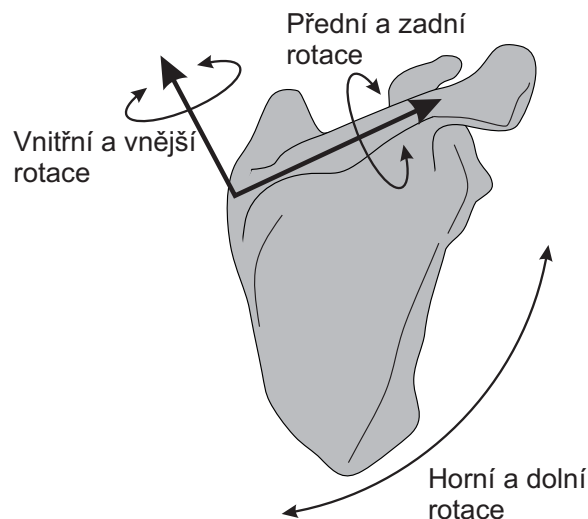
Použití druhého koncového efektoru na lopatce umožňuje kontrolovat pohyb lopatky a udržovat ho v mezích daných plochou hrudníku. Hod-

noty rotace v kloubech přímo lopatkou ovlivňovaných jsou tak vypočteny s přispěním obou koncových efektorů a tedy by měly více odpovídat skutečnému pohybu.

Velkým problémem tohoto přístupu však je získávání realistických trajektorií koncového efektoru lopatky, na nichž závisí celkový realistický efekt animace. Nicméně je možné, že úpravami tohoto přístupu lze vytvořit lépe a obecněji použitelnou metodu.

### 6.4.3 Pohyblivost lopatky

Oba výše popsané základní přístupy k modelování lopatky vyžadují znalost jejích rozsahů pohyblivosti. Příkladem výzkumu v tomto oboru budiž práce [7], která popisuje rozsahy tří ortogonálních rotací v závislosti na humerální elevaci.



Obrázek 6.7: Rotační parametry lopatky sledované v práci [7]

Pro popis rozsahů pohyblivosti kloubů by byly zajímavé naměřené mezní rotace lopatky. Dala by se pomocí nich odvodit oblast prostoru, v níž se pohybuje glenum či acromion a odtud zas meze rotace sternoklavikulárního kloubu, které by využil první přístup k modelování lopatky (6.4.1). Problém může představovat fakt, že rotace lopatky je vlastně vyjádřena Eulerovými úhly. Objem pohyblivosti definovaný mezními Eulerovými úhly není realistický (viz 5.4), jedná se o kvádr. Kvádr popisující objem pohyblivosti lopatky je navíc v souřadném systému otočeném oproti souřadnému systému omezeného kloubu.

Zásadní překážkou využití zmíněné práce v animaci je neznámý střed otáčení. Osy uvedené na obrázku 6.7 jsou vztažené k souřadnému systému

lopatky. Podle práce [8] se však lopatka při elevaci paže otáčí postupně kolem dvou os.

Znalost mezí pohyblivosti lopatky též může být využita druhým modelovacím přístupem (6.4.2) pro omezení prostoru, v němž může být vedena trajektorie koncového efektoru na lopatce.

## 6.5 Meze rotací kloubů ramene

Meze pohyblivosti jednotlivých kloubů ramenního komplexu není snadné určit. Podle učebnice goniometrie [17] lze snadno zmapovat pohyblivost celého ramene, ale jen málo se dá vysledovat ohledně příspěvků jednotlivých složek k pohybu celku. S pomocí goniometrických postupů a anatomických nákresů [19] je možné dobrat se hodnot, které se dají ve virtuálním modelu použít.

Pohyblivost kloubů se liší člověk od člověka a proto je v mnoha případech u mezních rotací uváděn interval. V takových případech volíme pro virtuální model mez intervalu, která je vzdálenější od základní polohy. Naše meze tak budou brány jako meze rotace kloubů v rámci populace, ne jen průměrného jedince.

### 6.5.1 Meze kloubu ramenního

Ramenní (glenohumerální) kloub je zmapován nejlépe. Některé jeho pohyby se dají měřit s vyloučením příspěvku lopatky. To platí o axiální rotaci, která je o něco méně než  $90^\circ$  ( $85^\circ$ ) v laterálním (vnějším) směru a o něco více než  $90^\circ$  ( $95^\circ$ ) ve směru mediálním (vnitřním).

Rotace kolem ostatních souřadných os glenohumerálního kloubu už nejsou tak snadno měřitelné, protože se na pohybu v příslušném směru podílí i pohyb lopatky.

Pohyb vpřed a vzhůru v sagitální rovině, flexe, může proběhnout až do  $180^\circ$  od základní pozice. Pouze  $120^\circ$  je však příspěvek glenohumerálního kloubu, zbytek je dílem abdukce a laterální rotace lopatky. V opačném směru, extenze, je možný pohyb až do  $60^\circ$ , v případě flektovaného loketního kloubu. Hodnota mezní extenze je bez příspěvku lopatky, jejíž pohyblivost je v tomto směru značně omezená.

Ve frontální rovině v laterálním směru probíhá abdukce. Její rozsah také bývá  $180^\circ$  od základní pozice, ale v tomto případě literatura ([17]) udává příspěvek glenohumerálního kloubu jen  $90^\circ$ . V opačném směru addukce není v základní pozici možná protože v pohybu brání hrudník. V mírné flexi (před tělem) je možná do  $45^\circ$ , v mírné extenzi (za tělem) možná není.

Rozsah pohyblivosti ramene ještě pomáhá vymezit měření horizontální abdukce a addukce, tedy pohybů paže abdukované o  $90^\circ$  v transverzální rovině. Zde ovšem literatura neuvádí, zda se jedná o pohyb celého ramenního

systému, nebo jen glenohumerálního kloubu. Horizontální addukce je možná do  $130^\circ$  a abdukce do  $30^\circ$  s flektovaným loktem.

### 6.5.2 Meze kloubu akromioklavikulárního

Pohyblivost lopatky zmíněná v 6.4.3 musí být pro účely animace převedena na příspěvky rotací kloubů lopatce nadřezaných, tedy sternoklavikulárního a hlavně akromioklavikulárního. První kloub je měřitelný a bude popsán níže v 6.5.3. Rotace v kloubu akromioklavikulárním musí udávat natočení lopatky vůči klíční kosti.

Kniha [19] zmiňuje rozsah axiální rotace  $30^\circ$ . Axiální rotací je míněna torze vazivového disku mezi kostními články kloubu. Osa této rotace je přibližně kolmá na rovinu lopatky a blíží se ose klíční kosti. Není však řečeno, jaká část ze zmíněného rozsahu přísluší kterému směru rotace. Berme tedy mez rotace ve smyslu vzad nulovou a ve smyslu vpřed  $30^\circ$ .

Úhel mezi lopatkou a klíční kostí v transverzální rovině se podle [19] mění jen minimálně v rozsahu asi  $10^\circ$  od základní pozice, kdy obě kosti svírají úhel asi  $60^\circ$ , do hodnoty  $70^\circ$  při extrémní protrakci klíční kosti.

Poslední úhel se mění též minimálně, o jeho hodnotách se literatura nezmiňuje.

### 6.5.3 Meze kloubu sternoklavikulárního

Kniha [19] udává pohyblivost klíční kosti v jejím spojení s kostí prsní tak, že laterální konec klíční kosti s může přemístit o 10 cm vpřed a vzhůru a o 3 cm vzad a dolů. Rozmezí axiální rotace je podle téhož zdroje  $30^\circ$ . Takový popis pohyblivosti je značně nekonzistentní a nepřesný.

U axiální rotace opět není zřejmé přemístění vůči uvolněné základní poloze. V práci [8] je popsána rotace klaviskapulárního článku podél spojnice akromioklavikulárního a sternoklavikulárního kloubu. Navíc sama kniha [19] zmiňuje, že axiální rotace v sternoklavikulárním kloubu spolu s  $30^\circ$  axiální rotace akromioklavikulárního kloubu vytváří  $60^\circ$  rotace lopatky, při elevace paže. Vzhledem k těmto faktům je vhodné považovat rozsah axiální rotace ve smyslu dolů za nulový a ve smyslu vzhůru za  $30^\circ$ .

Hodnoty protrakce/retrakce a deprese/elevace klíční kosti jsou popsány přemístěním v délkových jednotkách. Při předpokládané délce klíční kosti 15 cm tyto údaje odpovídají  $42^\circ$  mezní protrakce a  $12^\circ$  mezní retrakce. Stejně tak mezní elevace bude  $42^\circ$  a mezní deprese  $12^\circ$ . Takto principiálně nepřesný odhad pohyblivosti si můžeme dovolit zaokrouhlit na  $45^\circ$  a  $15^\circ$ .

## 6.6 Závěr

Z výše uvedených faktů o kinematice a pohyblivosti kloubů ramene vyplývá zřejmá propojenost jednotlivých stupňů volnosti. Třeba mez extenze gle-

nohumerálního kloubu je ovlivněná flexí kloubu loketního. Postup nastavování jamky glena vzhůru při elevaci paže je také záležitostí více stupňů volnosti v kloubech sternoklavikulárním i akromioklavikulárním, které se střídají (viz 6.2).

Pohyblivost kloubu (jednoho jeho stupně volnosti) může tedy být závislá na stavech (aktuálních rotacích) okolních kloubů. Z hlediska animace inverzní kinematikou můžeme pohyblivost pojmout jako zobecnění parametru *stiffness*. Tento parametr byl popsán v sekci 5.8 jako číslo z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . Jednotlivé závislosti pohyblivosti kloubu lze vyhodnotit zvlášť a složit je násobením nebo fuzzy logickými operacemi, čímž vznikne *stiffnes*, použitá ve výpočtu animace.

Tento přístup k vyhodnocování parametru *stiffness* se dobře hodí ke kusému charakteru poznání pohyblivosti kloubů ramene. O využití jednotlivých kousků informace pro odvození hodnoty *stiffness* pojedná kapitola 8 věnovaná popisu vlastního modelu ramenního kloubu.

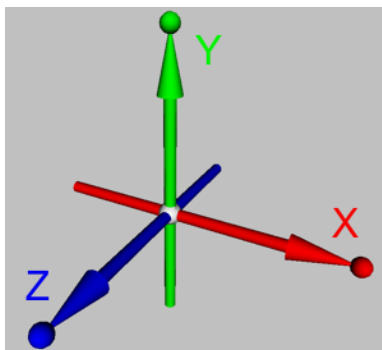
## Kapitola 7

# O implementaci testovací platformy

Testovací platforma pro experimenty s pohybovými omezeními kloubů byla napsána v jazyce Java. Pro veškerá 3D zobrazení bylo použito standardu VRML a prohlížeče Cortona VRML Client od Parallel Graphics [61], s nímž je dodávána javovská implementace rozhraní EAI (External Authoring Interface) přes které může aplikace zasahovat do VRML scény.

Součástí testovací platformy je okno s instancí VRML prohlížeče a scénou, do které jsou vkládány objekty, především virtuální humanoid (model člověka). Dále aplikace obsahuje přehrávač animací ve formátu VRML, který je původní součástí.

Na tomto místě je vhodné zaznamenat směry a orientace souřadných os, které jsou v práci použité. Jak ukazuje obrázek 7.1, osa  $x$  je vodorovná a její kladný směr je orientován vpravo. Osa  $y$  je svislá a míří vzhůru a osa  $z$  je vodorovná mířící vpřed. Toto uspořádání je dáno standardem VRML a liší se od souřadných systémů na které může být čtenář zvyklý.



Obrázek 7.1: Směr a orientace jednotlivých souřadných os podle VRML.

Hlavní funkcí aplikace je výpočet jednotlivých snímků animace. K tomuto účelu bylo implementováno načítání dat ze souboru *TSV*, který je textovým výstupem programu Qualisys Track Manager a obsahuje údaje o měření a trajektorie markerů. Načtená data jsou použita k tvorbě kinematických řetězců. Pro řešený snímek naměřeného pokybu je pak těmto řetězcům spočten stavový vektor minimalizující vzdálenost koncového efektoru od změřené pozice. Tento výpočet inverzní kinematiky (IK) probíhá mírně adaptovanou metodou Cyclic Coordinate Descent (CCD) [44].

Z metod inverzní kinematiky jsou v literatuře hojně popsány metody využívající Jakobián. Na druhou stranu metoda CCD často zmiňovaná není, pravděpodobně proto, že neoplývá teoretickou čistotou, jíž se vyznačují postupy založené na pseudoinverzi Jakobiánu. Přesto je CCD používanou metodou, která má své praktické výhody. Z těchto důvodů byla pro experimenty vybrána právě tato metoda.

Tato kapitola zmiňuje některé zajímavější aspekty implementace testovací platformy. Nejprve bude sekce 7.1 shrnout vše, co se týká popisu anatomie, tedy použitý virtuální humanoid a doplňkové popisy kloubů. Sekce 7.2 pak pojedná o problémech spojených se sběrem testovacích dat pomocí optického snímání pohybu systémem Qualisys. A nakonec sekce 7.3 přiblíží problematiku implementace IK metody CCD a její použití při animaci H-Anim modelu daty naměřenými systémem Qualisys.

## 7.1 Virtuální humanoid

Použitý model člověka odpovídá standardu H-Anim v nejpodrobnější úrovni artikulace (LOA 3) [58]. Hlavní důvod pro tuto volbu byl ten, že standard zachovává anatomickou realitu a klouby, které popisuje, odpovídají kloubům skutečným. Toto je třeba zdůraznit, neboť geometrické rozmístění kloubů (transformací) výrazně ovlivňuje vlastnosti kinematických řetězců z hlediska animace. Standardu také odpovídá základní poloha humanoida, jak ji ilustruje obrázek 7.2

Mnoho virtuálních humanoidů použitých v různých aplikacích obsahuje dodatečné klouby, které nemají anatomickou obdobu. Typicky se takové klouby objevují uprostřed délek jednotlivých segmentů (například stehen), mají jeden stupeň volnosti a realizují axiální rotaci segmentu. Použití těchto kloubů je motivováno většinou zlepšením vizuálních vlastností povrchu segmentu při animaci technikou *míchání vrcholů* (*vertex blending*) 2.2.2, ale animační vlastnosti takto upravené sekvence kloubů jsou také změněné, což je pro náš úkol nežádoucí.

Těžiště našeho zájmu leží v oblasti rotací v kloubech. Proto je na modelu nejdůležitější právě kostra a ne pokožka. Pro obecné experimenty s animační technikou CCD proto byl použit starý model s oddělenými segmenty, který byl ke stažení pro nekomerční použití na stránkách laboratoře VrLab [65] a



byl již předtím použit v jiných projektech [51][35][25]. Kostra tohoto modelu však byla pro potřeby aktuálního výzkumu upravena. Páteř byla doplněna o několik chybějících obratlů na standardní úroveň artikulace a středy obratlů byly přesunuty tak, aby vznikla typická křivka páteřního kanálu. Hlavně ale byly upraveny polohy kloubů ramenního pletence. Souřadnice doporučené standardem [58] neodpovídaly anatomické realitě a proto byly odhadnuty souřadnice nové s využitím obrázků z anatomických učebnic [16][33].

Kromě tohoto modelu byl použit ještě model speciálně vytvořený pro testování pohybových parametrů ramene. Postup jeho tvorby se dotýká problematiky studia ramene, proto se mu detailněji věnuje odstavec 7.1.1.

Dále byl model vybaven sadou předdefinovaných bodů (H-Anim standardní objekt *Site*), které odpovídají bodům, na něž se při snímání pohybu optickým systémem Qualisys umísťují odrazky. Tyto body (objekty *Site*) pak slouží jako koncové efektory při animaci nasnímaného pohybu inverzní kinematikou.

Další objekty *Site* pak slouží k identifikaci důležitých anatomických bodů, které nemohou být použity na skutečném těle ke sledování pohybu, ale z hlediska testování výsledné animace je užitečné sledovat je na modelu. Jedná se o dva body na lopatce - *Trigonum Spinae* a *Angulus Inferior*. Body na lopatce se pohybují pod kůží a, ačkoliv jsou snadno hmatatelné, nelze je použít pro umístění sledovatelné odrazky.

Další funkcí vyznačených bodů je určení os souřadných systémů jednotlivých kloubů. Ačkoliv, jde o zpracování kloubů obecně, hlouběji se o tom zmiňuje kapitola 8 věnovaná modelu ramenního kloubu.

### 7.1.1 Tvorba modelu

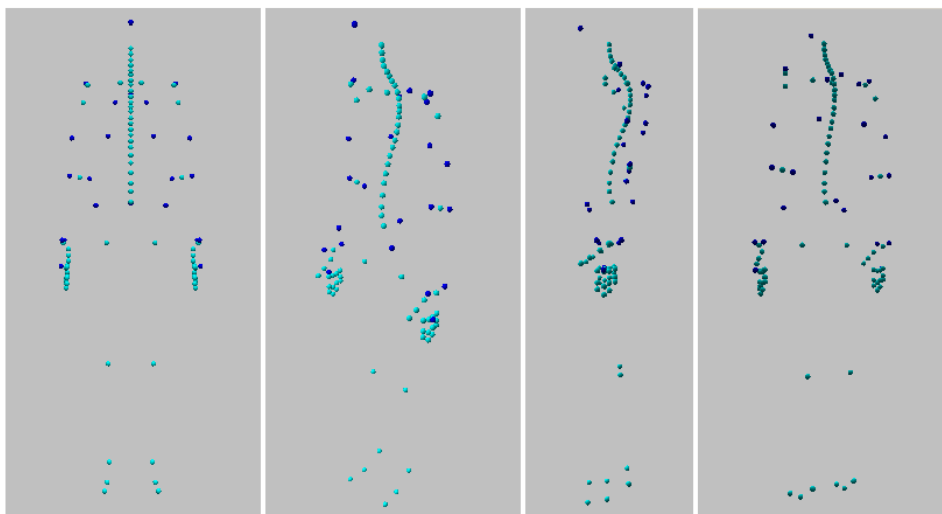
Model použitý pro vlastní testování pohybových parametrů ramene nemá vůbec žádnou pokožku a skládá se jen z kostry a několika bodů na povrchu těla. Tento model byl vytvořen s pomocí statického měření systémem Qualisys tak, aby rozměrově odpovídal herci použitému pro snímání testovacích dat. Takto by v naměřených datech měla být výrazně redukována pravděpodobnost výskytu pozic pro model nedosažitelných.

Zvláštní pozornost byla při tvorbě tohoto modelu věnovaná hlavně kloubům ramene a bodům důležitým pro animaci ramene. Polohy kloubů SC a AC bylo jednoduché poměrně přesně určit s použitím jediného markeru. Kloub GH skrytý pod svaly byl odhadnut s použitím vektorů daných třemi markery rozmístěnými po povrchu deltoidu na základě pozorování pohybů v rameni.

Vybrané body na lopatce (AI a TS) byly označeny jedním markerem, což při statickém měření vyhovuje. V klidu jejich nalezení a označení nepředstavuje problém. Tyto body jsou na modelu důležité z hlediska pozorování jejich chování v průběhu animace, neváží se na ně žádná pohybová data.

Body použité jako koncové efektory pro samotné řízení pohybu ramene jsou zase umístěné na místech dobře nalezitelných v průběhu celého pohybu, proto jejich umístění na základě naměřených dat nebylo problémem.

Polohy ostatních kloubů byly v podstatě odhadnuté, pro animaci ramene nemají velkou důležitost. Za zmínku stojí páteř, jejíž křivka vykazuje silnou kifózu hrudní páteře i poměrně výraznou lordózu páteře bederní. Tyto tvary vznikly při prokládání malého počtu změřených bodů hladkou křivkou. Pravděpodobně se však výsledný tvar přibližuje skutečnému tvaru páteře měřeného subjektu. Vzhled modelu ilustruje obrázek 7.2.



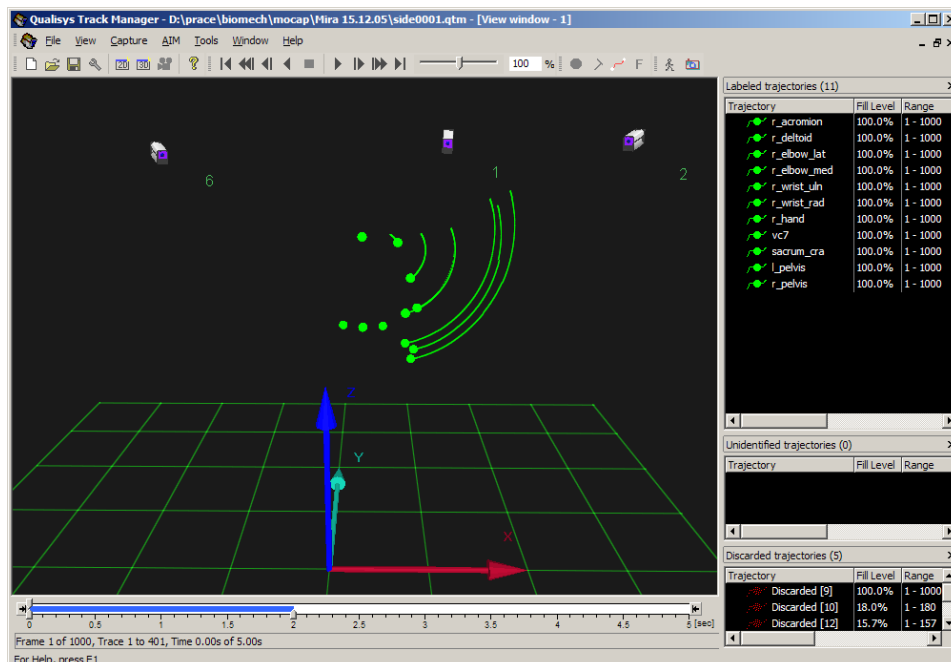
Obrázek 7.2: Použitý virtuální humanoid rozměrově odpovídající herci. Světlejší kuličky označují středy kloubů, tmavší zase body (objekty *Site*). Obrázek také ilustruje základní polohu našeho humanoida.

## 7.2 Systém Qualisys

Testovací data byla získávána optickým systémem snímání pohybu Qualisys. Záznam skutečného pohybu představuje dobrý testovací materiál, protože zaručeně popisuje něco, co je v mezích pohyblivosti lidských kloubů. Je tedy s čím porovnávat pohyby vypočítané animačním systémem s různě vyjádřenými omezujícími parametry.

Systém Qualisys sleduje několika kamerami odrazky, jimiž jsou opatřeny vybrané body na těle sledovaného subjektu (herce). Z údajů jednotlivých kamer pak systém vypočítá 3D souřadnice. Záznam pohybu tedy má formu 3D trajektorií jednotlivých bodů. Bezprostředně po měření musí tato data ještě projít fází postprocessingu, většinou uživatelského, což je vlastnost všech

optických snímačů pohybu. V této fázi se trajektorie přiřazují markerům a řeší se nejasnosti způsobené zákryty nebo přerušeními.



Obrázek 7.3: Uživatelské rozhraní programu Qualisys Track Manager. Za povšimnutí stojí orientace os odlišná od standardu VRML. Zobrazená sada odrazek odpovídá měření pohybu pravé horní končetiny (v tomto případě jde o boční elevaci).

Tyto operace uživateli umožňuje program Qualisys Track Manager, jehož uživatelské rozhraní ilustruje obrázek 7.3. Hlavní součástí je okno 3D scény v níž je možno zobrazovat jednotlivé snímky měřeného pohybu, přehrávat celý záznam i zobrazovat části sledovaných trajektorií. Za povšimnutí stojí zobrazený osový kříž, na němž je vidět, že systém Qualisys a systém VRML (viz obrázek 7.1) používají každý jinou konvenci orientace souřadného rámce. V pravé části jsou pak okna vlastního správce trajektorií. Zeleně jsou značené trajektorie zpracované - přiřazené k markerům. Červeně pak trajektorie nezpracované.

Pro každý ze sledovaných bodů v záznamu měření existuje trajektorie a každý bod se tak dá použít jako koncový efektor v algoritmu IK. Optickým systémem snímání pohybu nelze měřit orientaci odrazky, pouze její polohu. V případě, že by se na segment daly umístit tři vůči sobě navzájem nehybné odrazky, bylo by možné jich využít pro výpočet orientace segmentu, která by se pak dala použít algoritmem IK jako další podmínka zpřesňující řešení.

Tři pevné body na jeden segment však zdaleka nejsou běžné. Hlavně

při snímání pohybu horní končetiny bývá velký problém vhodné body pro umístění odrazek na těle vůbec nalézt. Dobře slouží různé kostní výrůstky za předpokladu, že se příliš nepohybují pod kůží, na níž je odrazka nalepena. Kostí pletence horní končetiny, zejména lopatka, jsou však obaleny svalstvem a pohybují se ve značném rozsahu.

### 7.2.1 Použité markery

Pro měření pohybů pravé horní končetiny byla použita tato sada markerů:

```
r_pelvis, l_pelvis, sacrum_cra
vt1
r_acromion
r_deltoid, r_elbow_lat, r_elbow_med
r_wrist_uln, r_wrist_rad,
r_hand
```

První tři jsou v oblasti pánve, jsou to pravý i levý přední horní trn kyčelní (*spina iliaca anterior superior*) a střední hrana křížové kosti (*crista sacralis mediana*). Tyto tři body jsou vůči sobě navzájem nehybné a tvoří trojúhelník, který se svým umístěním v pánevní oblasti výborně hodí pro výpočty umístění a orientace celého virtuálního humanoida ve scéně.

Další odrazka je umístěna na mediálním trnu (*processus spinosus*) prvního hrudního obratle a může sloužit k dalšímu upřesnění pozice, eventuálně velikosti celého humanoida. Hlavně ale označuje kloub, který je v hierarchii modelu přímo nadřazen bázi kinematických řetězců horních končetin.

První sledovaný bod na vlastní horní končetině je akromion. V oblasti pletence horní končetiny je to jediný výrazný hmatný bod. Bohužel v extrémních elevacích pravděpodobně dochází k posunu akromionu pod kůží s markerem, čímž vzniká nepřesnost měření polohy tohoto bodu.

Velmi důležité body jsou mediální a laterální kondyly lokte, které jsou dobře hmatné a kůže se přes ně pohybuje zanedbatelně. Jsou to body, které ideálně slouží jako koncový efektor pro animaci řetězce tvořeného klouby ramene. Pro doplnění lze přidat ještě odrazku na pažní kost v oblasti úponu deltového svalu. Díky této trojici je paže jediným segmentem, pro který by se dala spočítat báze souřadného systému pro výpočet orientace.

Další dva dobře sledovatelné body jsou ulnární a radiální kondyly zápěstí. Na segmentu předloktí se však špatně hledá třetí bod pro výpočet báze.

Na ruce je sledovatelných bodů více, ale tyto body mění vzájemnou polohu při pohybech ruky a navíc jsou velmi blízko sebe, což by ztěžovalo jejich rozlišování optickým snímačem pohybu. Jménem *hand* je tedy označen bod na hřbetu ruky v místě prvního kloubu prostředního prstu. Tento bod je pro reprezentaci ruky použit jako jediný.

Záznam měření všech popsaných bodů je vidět na obrázku 7.3. Rozmístění odrazek na příslušných bodech na těle zase ukazuje obrázek 7.4.



Obrázek 7.4: Rozmístění markerů pro měření pohybu horní končetiny na těle. Zakryté jsou jen dva z popsanych bodů - levá pánev a radiální kondyl zápěstí.

### 7.2.2 TSV soubor

Naměřené trajektorie sledovaných bodů lze v programu Qualisys Track Manager uložit do textového formátu TSV. Vzorek souboru v tomto formátu nám ukáže, jak snadno je čitelný:

```
NO_OF_FRAMES      1000
NO_OF_CAMERAS     6
NO_OF_MARKERS     11
FREQUENCY         200
NO_OF_ANALOG      0
ANALOG_FREQUENCY  0
DESCRIPTION --
TIME_STAMP        2005-12-15, 14:34:11
DATA_INCLUDED     3D
MARKER_NAMES      r_acromion r_deltoid ...
```

Je vidět, že TSV soubor obsahuje hlavičku s údaji o měření, jako je počet snímků, počet kamer, počet odrazek, snímkovací frekvence a podobně. Pro účely animace jsou důležité zejména počet snímků a snímkovací frekvence, z nichž se vypočítá doba trvání animace.

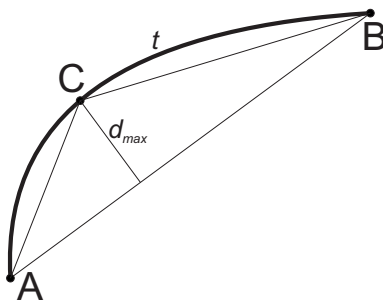
Údaj o počtu odrazek se také hodí, ale nejdůležitější je vlastní seznam odrazek podle jmen, po němž pak následují vlastní naměřená data, která v našem příkladu nejsou zahrnuta. Data jsou zapsána po trojicích souřadnic snímek po snímku v pořadí jednotlivých markerů, jak je uvádí seznam.

Testovací program tento formát souboru načítá a uchovává v paměti ve strukturách, které odpovídají jednotlivým trajektoriím. Jak vyplývá z obrázků 7.1 a 7.3, je potřeba při načítání dat provést převod souřadnic mezi systémy Qualisys a VRML.

### 7.2.3 Zjednodušení trajektorie

Protože standard VRML poskytuje pro účely animace celou řadu interpolátorů, není nutné ukládat na disk všechna spočtená animační data, ale pouze klíčové snímky, v nichž dochází ke změnám pohybu.

Někdy i samotné naměřené trajektorie jsou příliš jednoduché a není pro ně potřeba vzorkovací frekvence tak vysoké, jaká byla použita při měření. V takovém případě je vhodné trajektorii v zájmu menší výpočetní náročnosti animačního procesu zjednodušit a počítat pak jen s vybranými snímky.



Obrázek 7.5: Funkce algoritmu pro zjednodušení křivky. Křivka (posloupnost vzorků)  $t$  omezená krajními body  $A$  a  $B$  je rozdělena bodem  $C$ , jehož vzdálenost  $d_{max}$  od spojnice  $AB$  je maximální. Proces se rekurzivně opakuje s oběma částmi křivky  $t$ , dokud je  $d_{max}$  větší než předem zadaný práh.

Pro tyto případy byl implementován algoritmus zjednodušení křivky reprezentované sekvencí vzorků. Tento algoritmus pracuje rekurzivně. Nejprve zařadí do výběru krajní body křivky (označme je  $A$  a  $B$ ). Potom, pokud je délka křivky (posloupnosti vzorků) větší než 1, nalezne bod, jehož vzdálenost od spojnice krajních bodů je největší (označme ho  $C$ ). Je-li tato vzdálenost menší, než předem zadaný práh, algoritmus končí. V opačném případě je aplikován na obě části křivky rozdělené bodem  $C$  ( $AC$  a  $CB$ ). Obrázek 7.5 ilustruje průběh algoritmu.

Algoritmus byl implementován tak, aby byl použitelný pro body libovolné dimenze. Dá se jím tedy zjednodušovat křivka původní 3D trajektorie, stejně tak jako výsledné rotační křivky (posloupnosti čtyřrozměrných kvaternionů). Zde je uváděn jen pro úplnost, protože se s ním počítá pro tvorbu animací spíše než pro experimenty s pohybovými parametry kloubů. Experimentální aplikace jej využívá pouze pro zobrazení naměřených dat.

## 7.3 Implementace IK solveru

Třetí důležitá složka testovací platformy je mechanismus, který naměřené souřadnice sledovaných bodů promění v rotace v kloubech virtuálního humanoida. Protože tento problém je principiálně úlohou inverzní kinematiky, používá se pro program, který jej řeší, pojmu *IK solver*. Náš IK solver implementuje metodu Cyclic Coordinate Descent (CCD).

V této sekci bude popsána konstrukce celého programového modulu, který se o animaci stará. Kromě umístění humanoida do scény a řešení kinematického řetězce budou zmíněny i některé funkce, které nesouvisí přímo s výzkumem pohybových parametrů kloubů, ale mohou mít význam při tvorbě animací z dat naměřených systémem Qualisys.

Protože počítačová animace je posloupností klíčových pozic (snímků), bude v textu věnovaném výpočtu animace vždy popisován výpočet jednoho snímku.

### 7.3.1 Inicializace

Nejprve je třeba systém inicializovat načtením pohybových dat z TSV souboru. Protože každý marker je označen jménem, které odpovídá jménu některého z objektů *Site* na povrchu virtuálního humanoida, je možné v iniciační fázi propojit naměřené trajektorie s příslušnými body na modelu. To se děje s pomocí datových struktur vybudovaných nad VRML modelem humanoida, které umožňují vyhledávání objektů a pohyb v hierarchii kloubů humanoida. Pro úplnost uveďme, že toto hledání objektů *Site* podle jména probíhá sekvenčně. Při počtu objektů *Site* nepřesahujícím řád desítek (23) není třeba používat efektivnější způsoby hledání.

Objekt *Site* obsahuje informaci o nadřazeném objektu *Joint*, tedy o kloubu jehož geometrické transformaci je přímo podřízen. Stejně tak každý z kloubů (objektů *Joint*) nese informaci o svém nadřazeném kloubu. Proto je snadné určit polohu měřeného bodu v hierarchii transformací a určit tak seznam kloubů, jejichž rotace se budou pomocí změřené trajektorie počítat. Tento seznam je kinematický řetězec kloubů počínající kloubem nejbližší nadřazeným sledovanému bodu a končící svou bází. Báze je poslední kloub řetězce, který má pevnou polohu, ale může měnit svou rotaci (viz obrázek 2.11 v kapitole 2).

Báze může být určena automaticky, o čemž se zmíníme v odstavci 7.3.5 věnovaném možnostem rozsáhlejšího systému tvorby animací pomocí IK a snímače pohybu Qualisys. Pro potřeby pokusů s klouby ramene je jako báze použit příslušný sternoklavikulární kloub.

### 7.3.2 Umístění humanoida do scény

Než se začne s jakýmkoliv výpočty IK, je nutné umístit humanoida na správné místo ve scéně. Jinými slovy, je potřeba spočítat globální transformaci humanoida pro sjednocení různých souřadných systémů (naměřená data jsou v globálním, světovém souřadném systému a souřadnice koncového efektoru a středů kloubů zase v souřadném systému svázaném s humanoidem). Veškeré výpočty pak probíhají v globálním souřadném systému.

K tomuto výpočtu, jak již bylo zmíněno v odstavci 7.2.1, slouží trojice markerů okolo pánve, pojmenované  $r\_pelvis$ ,  $l\_pelvis$ ,  $sacrum\_cra$ . Označme tyto body symboly  $RP$ ,  $LP$  a  $SA$ .

Polohu kořene hierarchie humanoida  $X_G$  pak získáme řešením parametrické rovnice

$$X_G = V_3 \cdot t + V_2 \cdot s + V_1 \cdot r + SA \quad (7.1)$$

kde

$$\begin{aligned} V_1 &= (LP - SA) \\ V_2 &= (RP - SA) \\ V_3 &= (RP - SA) \times (LP - SA) \end{aligned} \quad (7.2)$$

Hodnoty parametrů jsou  $t = 0.4299$  a  $s = r = 0.2368$ . Tyto hodnoty byly spočteny z rovnice 7.1. Za  $RP$ ,  $LP$ ,  $SA$  a  $X_G$  byly dosazeny souřadnice příslušných bodů z virtuálního humanoida v lokálním souřadném systému.

Globální translaci  $T$  získáme vektorovým odečtením  $T = X_G - X_L$ , kde  $X_L$  je poloha kořene v lokálním souřadném systému humanoida.

Pro výpočet globální rotace je použita opět trojice změřených bodů  $RP$ ,  $LP$  a  $SA$  a jejich ekvivalenty v lokálním souřadném systému humanoida. Vyjdeme z faktu, že změřené souřadnice by měly být obrazem souřadnic na modelu otočeným kolem kořene hierarchie humanoida. Přesuneme proto všechny body do stejného souřadného systému odečtením souřadnic kořene hierarchie a v případě naměřených hodnot také odečtením právě vypočítané globální translace. Potom spočteme z průmětů jednotlivých bodů do rovin  $xz$ ,  $yz$  a  $xy$  dílčí rotace v těchto rovinách. Postačující matematický aparát je v tomto případě kosínová věta. Složením dílčích rotací vznikne globální rotace humanoida. Při tvorbě matice globální rotace je třeba zohlednit fakt, že tato rotace nemá střed v počátku souřadného systému humanoida, který je mezi jeho chodidly, ale v kořeni hierarchie, který se nachází v oblasti pánve (kloub *HumanoidRoot*).

Výpočet globální rotace vyhovuje pro měření pohybů člověka, jehož pánve je orientovaná jako by byl přibližně vzpřímený.

Jistě se nabízí otázka, proč není k výpočtu globální rotace použit algoritmus IK, stejný jako pro výpočty ostatních rotací. Ano, použití IK na řetězec o jednom kloubu (*humanoidRoot*) s více koncovými efektorů ( $r\_pelvis$ ,  $l\_pelvis$ ,  $sacrum\_cra$ ) by bylo možné. Náš IK solver však vznikl právě proto,



aby tuto techniku ověřil, proto byla raději použita jiná metoda pro nalezení globální rotace.

### 7.3.3 Řešení kinematického řetězce

Pro řešení kinematického řetězce je použita metoda CCD, jejíž princip je popsán v kapitole 4, konkrétně v sekci 4.4. Zopakujme na tomto místě důležité vzorce. Úhel otočení  $i$ -tého kloubu získáme vyřešením výrazu:

$$\phi = \arctan \frac{k_3}{k_2 - k_1} \quad (7.3)$$

kde  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_3$  jsou konstanty:

$$\begin{aligned} k_1 &= w_p(\mathbf{P}_{id} \cdot \mathbf{osa}_i)(\mathbf{P}_{ic} \cdot \mathbf{osa}_i) + w_o \sum_{j=1}^3 (\mathbf{u}_{jd} \cdot \mathbf{osa}_i)(\mathbf{u}_{jc} \cdot \mathbf{osa}_i) \\ k_2 &= w_p \mathbf{P}_{id} \cdot \mathbf{P}_{ic} + w_o \sum_{j=1}^3 \mathbf{u}_{jd} \cdot \mathbf{u}_{jc} \\ k_3 &= \mathbf{osa}_i \left[ w_p (\mathbf{P}_{ic} \times \mathbf{P}_{id}) + w_o \sum_{j=1}^3 (\mathbf{u}_{jc} \times \mathbf{u}_{jd}) \right] \end{aligned}$$

Vektory  $\mathbf{P}_{id}$  a  $\mathbf{P}_{ic}$  spojují střed  $i$ -tého kloubu (jehož osa rotace je jednotkový vektor  $\mathbf{osa}_i$ ) s cílovou a s aktuální polohou koncového efektoru. Ortonormální matice  $O_d = (\mathbf{u}_{1d}, \mathbf{u}_{2d}, \mathbf{u}_{3d})$  a  $O_c = (\mathbf{u}_{1c}, \mathbf{u}_{2c}, \mathbf{u}_{3c})$  označují cílovou a aktuální orientaci koncového efektoru.

V naší situaci nejsme vždy schopni pro sledovaný koncový efektor zajistit také znalost jeho orientace. Proto byla implementována jen první část vzorců pro výpočet konstant  $k_1$ ,  $k_2$  a  $k_3$ , jako by váha  $w_o$  byla nulová.

Před vlastním výpočtem stavového vektoru je kinematický řetězec o  $n$  kloubech, které mají obecně 3 stupně volnosti, převeden na kinematický řetězec o  $3n$  kloubech po jednom stupni volnosti. Každý z těchto pomocných kloubů má danou osu otáčení, buď jednu ze tří souřadných os, nebo jednu z anatomických os, které budou popsány v sekci 8.1.2.

Vlastní výpočet probíhá takto:

```
i = 0
střed a osa i-tého kloubu do GS
WHILE (EE není dost blízko){
    vyřeš i-tý kloub
    aktualizuj transformace
    IF (i < index báze) i = i + 1
    ELSE i = 0
    střed a osa i-tého kloubu do GS
}
```

Pole kloubů je seřazeno tak, že kloub bezprostředně nadřazený koncovému efektoru je první a báze je poslední. Střed a osa každého kloubu musí být před výpočtem úhlu převedeny do globálních souřadnic (GS) s ohledem na aktuální stav nadřazených kloubů.

Podmínka řídicí WHILE cyklus vyhodnocuje vzdálenost koncového efektoru (EE) od cíle a porovnává ji s předem zadanou tolerancí. Tato podmínka je navíc doplněna o počítadlo iterací pro případ nedosažitelného cíle. Mez je nastavena na 1000 iterací. Jedna iterace je průchod celým řetězcem, tedy čítač se inkrementuje při nulování indexu kloubu.

Krok řešení  $i$ -tého kloubu prostě realizuje výše popsané vzorce. Je nalezen úhel, který při aktuálním stavu kinematického řetězce posune koncový efektor nejbližší k cíli (na spojnici kloubu a cíle). V tomto okamžiku dochází na aplikaci omezujících parametrů, která bude diskutována jinde. Vypočtený a upravený úhel se pak přičte k úhlu kloubu (aktualizace transformací).

### 7.3.4 Více koncových efektorů

Při obecném použití našeho algoritmu IK nelze zaručit dostatečný počet měřených bodů pro výpočet orientace koncového efektoru. V některých případech však lze sledovat na segmentu více než jeden bod. Nabízí se otázka, jak tyto body využít při výpočtu stavového vektoru.

Systém Qualisys používá měřených bodů pro určení polohy kloubu, který se sám o sobě sledovat nedá. Takto určený kloub by se pak dal použít jako koncový efektor. Problém by nastal, pokud by bodů na určení polohy nebylo dost. První pokusy o implementaci našeho IK solveru pracujícího s daty z Qualisysu toto řešení používaly.

Lepší se ukázalo použití markeru a korespondujícího objektu *Site* na povrchu humanoida přímo jako koncového efektoru. Další markery mohou být také použité jako koncové efekty pro tentýž kinematický řetězec.

Možností použití více koncových efektorů je několik:

1. *Na úrovni řešení  $i$ -tého kloubu.* Výpočet úhlu se provede vždy pro každý z naměřených bodů a jako výsledný úhel se použije průměr (vážený průměr). Omezující parametry lze aplikovat před nebo po průměrování. Kritérium přiblížení může být průměr vzdáleností jednotlivých efektorů od svých cílů, či maximální vzdálenost.
2. *Na úrovni kinematických řetězců.* Nalezne se celý stavový vektor řešení pro každý z kinematických řetězců. Použije se průměr stavových vektorů. Tento proces je třeba opakovat, protože zprůměrováním se koncové efekty vzdálí od svých cílů.
3. *Střídání koncových efektorů.* Pro každou iteraci výpočtu se použije jiný koncový efektor. Každý tedy ovlivní celý kinematický řetězec a

přiblížení následujícího efektoru bude vycházet ze situace příznivé pro předchozí efektor.

První a třetí z uvedených možností byly implementovány.

### 7.3.5 Hierarchie kinematických řetězců

Markery použité při měření pohybů horní končetiny (viz 7.2.1) jsou rozmístěny tak, že popisují pohyb několika segmentů a umožňují rozdělit animovanou strukturu do série kratších hierarchicky rozmístěných kinematických řetězců. Vždy kloub, kolem něhož jsou seskupené markery, je bází dalšího, podřízeného kinematického řetězce.

Takto nám trojice *sacrum\_cra*, *r\_pelvis* a *L\_pelvis* určuje globální transformaci. První z kinematických řetězců pak bude mít bází v kořeni humanoida (*HumanoidRoot*) a posledním kloubem bude *vt1*, jemuž je přímo podřízen stejnojmenný marker. Další řetězec se bude skládat pouze ze sternoklavikulárního kloubu, koncovým efektozem bude marker *r\_acromion*. Následovat bude řetězec obsahující akromioklavikulární a glenohumerální kloub se třemi koncovými efektozem *r\_deltoid*, *r\_elbow\_med* a *L\_elbow\_lat*. Dále bude řetězec opět o jednom – loketním – kloubu a dvou koncových efektozem *r\_wrist\_rad* a *L\_wrist\_uln*. Poslední řetězec bude obsahovat zápěstní kloub a koncový efektor *r\_hand*.

Takto uspořádané kinematické řetězce by mohly umožňovat výpočet animace zobrazující věrně změřený pohyb. Nejprve by se vyhodnotil stavový vektor páteře (první řetězec). Spočtené rotace kloubů by se projevily v globální transformaci báze podřízeného řetězce řízeného efektozem na akromionu, a tak dále až k poslednímu řetězci.

Za předpokladu, že animovaný model by rozměry přesně odpovídal měřenému herci, dal by se tímto způsobem vytvořit systém tvorby komplexních animací pomocí dat naměřených systémem Qualisys. Byl implementován algoritmus, který z naměřených dat automaticky vytváří posloupnost kinematických řetězců hierarchicky uspořádanou podle umístění na kostře virtuálního humanoida. Tyto řetězce pak byly vyhodnoceny neomezeným CCD solverem. Výsledky diskutuje sekce 9.2.2.

Algoritmus pro vytvoření posloupnosti kinematických řetězců funguje na principu prohlédávání stromu (struktury kostry virtuálního humanoida) do hloubky a používá dva zásobníky (Last In First Out): zásobník potenciálních koncových efektozů *EEstack* a zásobník potenciálních bází *Bstack*. Zásobníková operace *push* vkládá objekt do zásobníku a *pop* objekt vyjímá. Vytvořené kinematické řetězce se ukládají do spojového seznamu. Vstupem je humanoid, naměřená DATA a kloub, který představuje bází nejvýše v řetězci (PB - primární báze).

```

akt_baze = PB
akt_kloub = PB
IF (akt_kloub má potomky){
  FOR (každý potomek){
    EEstack.push(akt_kloub.potomek)
    Bstack.push(akt_baze)
  }
}
WHILE (EEstack není prázdný){
  akt_kloub = EEstack.pop
  akt_baze = Bstack.pop
  IF (akt_kloub je v DATA){
    ŘETĚZEC (akt_kloub, akt_baze)
    IF (akt_kloub má potomky){
      FOR (každý potomek){
        EEstack.push(akt_kloub.potomek)
        Bstack.push(akt_kloub)
      }
    }
  }
  ELSE{
    IF (akt_kloub má potomky){
      FOR (každý potomek){
        EEstack.push(akt_kloub.potomek)
        Bstack.push(akt_baze)
      }
    }
  }
}
}

```

Pokud by naměřená data nebyla uspořádána tak, aby poskytovala jedinou primární bázi, tedy kdyby například obsahovala řetězce končetin, končící v sternoklavikulárních a kyčelních kloubech, dal by se popsany algoritmus upravit tak, že by se část před WHILE cyklem provedla postupně pro každou z dílčích primárních bází. Automatické nalezení těchto primárních bází ve stromové struktuře humanoida je jednoduché a není třeba ho zde blíže popisovat. Výsledná posloupnost kinematických řetězců by také byla animovatelná naprogramovanými nástroji. Pouze hledání globální transformace není univerzální.

Protože vytvoření systému tvorby animací nebylo těžištěm disertace, bylo upuštěno od vývoje mechanismu pro automatickou změnu proporcí virtuálního humanoida podle naměřených dat. Práce na dalším zobecnění tvorby kinematických řetězců pro IK solver byly také zastaveny.

## 7.4 Tvorba animace

IK metodou lze vypočítat stavový vektor kinematického řetězce pro jednu polohu koncového efektoru, tedy jeden snímek animace. Vlastní animace vzniká řazením těchto snímků, eventuálně interpolací mezi nimi. Výsledný pohyb typicky není plynulý a tedy ani příliš věrohodný. Dosáhnout zlepšení lze dvěma způsoby:

- Na úrovni výpočtu jednotlivých snímků, animace bude kvalitnější, pokud bude mechanismus výpočtu schopen vyhnout se nerealistickým posturám. Toto je střed zájmu této práce.
- Na úrovni zpracování výsledných animačních křivek je potřeba vyhledat výsledná data. Tuto možnost práce neoslovuje.

## 7.5 Závěr

Testovací platforma pro pokusy s pohybovými parametry kloubů ramene vznikla z rozpracované rozsáhlejší aplikace, která měla pomocí IK algoritmu vytvářet komplexní animace z dat naměřených systémem Qualisys. Její přínos je tak rozdělen na poznatky přímo související s hlavním tématem disertační práce a na poznatky, které jsou použitelné při tvorbě animací, ale s tématem souvisejí volněji.

Pro hlavní téma práce jsou v aplikaci důležité tyto tři tématické celky.

### 1. Popis animovaného virtuálního humanoida:

- Kostra obsahuje všechny klouby dle standardu H-Anim.
- Polohy kloubů byly přizpůsobeny anatomické realitě (může být v konfliktu s požadavky animačních technik, jmenovitě animace pokožky, kterou ovšem zanedbáváme).
- Objekty *Site* na pozice markerů pro snímání pohybu systémem Qualisys.
- Další objekty *Site* pro obrysy lopatky.
- Externí soubor pro popis anatomických souřadných systémů kloubů (dle ISB).

### 2. Měření systémem Qualisys:

- Vybrána sada bodů na něž je vhodné umístit markery pro měření horní končetiny.
- Načtení pohybových dat z textového formátu *TSV*.

- Převod mezi souřadnými systémy Qualisys (měření) a VRML (zobrazení).

### 3. Výpočet animace:

- Výpočet globální transformace z markerů kolem pánve.
- Řešení kinematického řetězce metodou CCD bez znalosti orientace koncového efektoru.
- Výsledné posloupnosti rotací lze zjednodušit z hlediska paměťové náročnosti.

Další implementované funkce by měly význam pro vytváření komplexních animací. Z naměřených dat je automaticky vytvořena posloupnost kinematických řetězců, které mohou mít více koncových efektorů a jsou uspořádány hierarchicky podle umístění v stromové struktuře kostry humanoida. Jejich postupným vyhodnocením IK solverem lze vytvořit animaci. Aby to bylo možné zbývá vyřešit:

- Změnu proporcí animovaného modelu podle naměřených dat. Dosaďovací model vznikl ruční editací podle výsledků statického měření.
- Zobecnit výpočet globální transformace humanoida (umístění do scény).
- Vytvořit metodiku čištění výsledných animačních křivek, aby bylo dosaženo plynulého pohybu.

## Kapitola 8

# Model ramenního kloubu

Středem pozornosti práce byl systém ramenního kloubu. Důležité poznatky o jeho anatomii a pohybových vlastnostech byly shrnuty v kapitole 6. Na tomto místě přineseme popis technického řešení použitého při vlastních pokusech s animací ramene.

Celé rameno je pojato jako otevřený řetězec tří kloubů: *sternoklavikulární* (SC), *akromioklavikulární* (AC) a *glenohumerálního* (GH). Následující je vždy podřízen geometrické transformaci předchozího. Pohyblivé spojení mezi lopatkou a hrudníkem je realizováno pouze formou pohybových omezení zúčastněných kloubů. Takovýto model je vhodný pro animaci jednoduchou animační metodou, jakou je CCD.

Veškeré pokusy byly prováděny s modelem pravého ramene, jak je zvykem soudě podle literárních pramenů (např. [47]). V dalším textu popíšeme důležité parametry modelů jednotlivých kloubů. První budou parametry geometrické (počátek a osy souřadného systému, sekce 8.1) a dále pohybové (meze rotace, sekce 8.2 a omezení pohyblivosti, 8.3). V poslední sekci (8.4) přiblížíme způsob zápisu modelu pro zpracování animačním programem.

### 8.1 Souřadné systémy kloubů

Geometricky je kloub určen především středem otáčení. Proces získávání souřadnic středů kloubů byl založen na snímání systémem Qualisys, jímž byly získány souřadnice bodů na povrchu těla v blízkosti vlastních kloubů. Z těchto naměřených hodnot byly s pomocí anatomických učebnic a prostého odhadu získány souřadnice kloubů.

Z důvodů, které se týkají použití omezujících parametrů nelze klouby uvažovat se všemi stupni volnosti a je třeba je rozdělit dle Eulerova teoremu na tři rotace o jednom stupni volnosti. Tento rozklad je vhodné provést podle anatomických os, například tak, jak je doporučuje Mezinárodní biomechanická společnost (ISB) v článku [47]. Tam navržené souřadné systémy pro klíček, lopatku a paži byly s drobnými úpravami použity.

### 8.1.1 Hierarchické řazení stupňů volnosti

Při skládání dílčích rotací do 3D rotace celého kloubu je důležité určit pořadí. Obecně použité pravidlo je, že rotace axiální je vyhodnocena jako první.

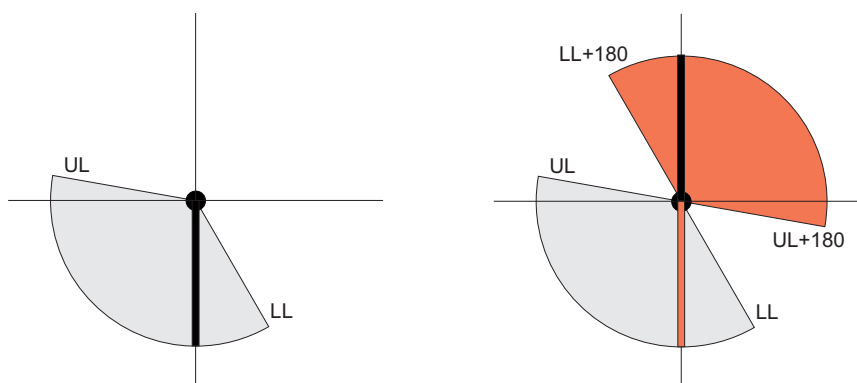
Definované pořadí skládání jednotlivých stupňů volnosti v podstatě odpovídá rozdělení 3D rotace na složky krutu (axiální rotace, *twist*) a směru (*swing*), jak popisuje sekce 5.6.

Každý kloub je rozložen na tři klouby o jednom stupni volnosti následujícím způsobem:

1. **Axiální rotace.**
2. **Směrová rotace** - první složka.
3. **Směrová rotace** - druhá složka (článek je již rotován první složkou).

Stupeň volnosti odpovídající axiální rotaci příslušného článku je zařazen tak, aby byl vyhodnocen jako první. Tak bude jeho rotace vždy rotací axiální bez ohledu na aktuální nastavení ostatních stupňů volnosti a lze ji omezovat anatomickými limity axiální rotace.

Další stupně volnosti pak vyjadřují první a druhou složku směru příslušného článku. První složka odpovídá přesně rotaci článku podle dané anatomické osy. Druhá otáčí již rotovaný článek kolem osy kolmé na předchozí. Toto značně zkresluje použitelnost anatomických limitů rotace pro omezování stavového prostoru kinematického řetězce.



Obrázek 8.1: Vlevo: Článek ve svém rozsahu pohyblivosti (UL je horní limit, LL dolní). Vpravo: Článek rotovaný předchozím stupněm volnosti o více než  $90^\circ$ , spočtená rotace je pak aplikována (a omezována) na jeho opačný (červený) konec. Je tedy třeba posuzovat podle rozsahu pohyblivosti posunutého o  $180^\circ$  (červená výseč).

První složka směrové rotace může být omezena změřenými limity rotace kolem příslušné anatomické osy, pokud přijmeme zjednodušující předpoklad,



že tato omezení nejsou závislá na aktuální axiální rotaci. V případě glenohumerálního kloubu je toto zjednodušení přiměřené realitě, neboť používané metody měření [17] nenaznačují významnou závislost.

Druhá složka směrové rotace naráží na problém v okamžiku, kdy je článek předchozí složkou rotován o více než  $90^\circ$ . Úhel spočtený v takovém případě IK algoritmem vybočuje z rozsahu pohyblivosti. Článek je totiž zrovna nastaven tak, že by se v rozsahu pohyblivosti nacházel jeho obraz středově symetrický podle středu otáčení. Proto je nutné v takovém případě spočítat a prověřit rozsah pohyblivosti posunutý o  $180^\circ$ . Situaci ilustruje obrázek 8.1.

Vzhledem k rozsahům pohyblivosti jednotlivých kloubů, se tato situace vyskytuje jen u kloubu glenohumerálního. Klouby AC a SC nepřesahují v žádném stupni volnosti a v žádném směru  $90^\circ$ , nejsou tedy z tohoto hlediska problematické.

Kloub AC však představuje jiný problém - který z jeho stupňů volnosti prohlásit za axiální rotaci. Byla použita osa daná spojnicí AC a bodu TS (viz obrázek 8.2).

### 8.1.2 Popis souřadných systémů

Dále popíšeme jednotlivé klouby z hlediska jejich souřadných systémů a pořadí skládání jednotlivých stupňů volnosti.

#### Sternoklavikulární kloub

Souřadný systém klíčku má počátek v kloubu SC. Osa axiální rotace ( $x$ ) je dána spojnicí SC a AC kloubů. Jako osa deprese/elevace ( $z$ ) je použit vektorový součin osy  $x$  a svislice. A nakonec osa protrakce/retrakce ( $y$ ) je vektorovým součinem předchozích dvou os. Všechny tři osy opět tvoří ortogonální bázi.

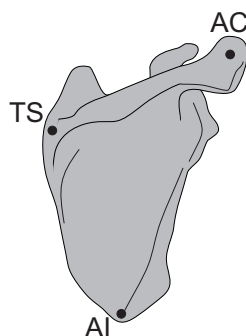
Pořadí skládání rotací je  $xzy$ , první je rotace kolem osy  $x$ , pak kolem  $z$  a nakonec kolem  $y$ .

#### Akromioklavikulární kloub

Počátek souřadného systému je umístěn do AC kloubu. Osa  $x$  je osou pro předozadní (anterio-posteriorní) rotaci a je určena spojnicí mezi akromioklavikulárním kloubem a bodem TS (trigonum spinae). Osa  $z$  je osou boční (latero-mediální) rotaci a je kolmá na rovinu určenou všemi třemi body na lopatce. Je tedy dána vektorovým součinem vektorů mezi AC kloubem a oběma body - TS a AI (angulus inferior). Poslední osa,  $y$  je osou protrakce/retrakce lopatky a je kolmá na obě předchozí osy. Lze ji tedy získat jejich vektorovým součinem.

Obrázek 8.2 ukazuje všechny tři důležité body na lopatce.

Pořadí skládání rotací je  $xzy$ , první je rotace kolem osy  $x$ , pak kolem  $z$  a nakonec kolem  $y$ .



Obrázek 8.2: Lopatka s vyznačenými body pro určení os souřadného rámce. AC - akromioklavikulární kloub, AI - angulus inferior, TS - trigonum spinae

### Glenohumerální kloub

Souřadný systém paže má počátek v kloubu GH a je opět odvozen od osy axiální rotace, která v tomto případě odpovídá ose svislé ( $y$ ) určené spojnicí glenohumerálního a loketního kloubu. Osa abdukce/addukce ( $z$ ) je kolmá na rovinu určenou GH kloubem a mediálním a laterálním kondylem lokte. nakonec osa flexe/extenze ( $x$ ) je zas vektorovým součinem os předchozích. Také se jedná o ortogonální bázi.

Pořadí skládání rotací je  $yzx$ , první je rotace kolem osy  $y$ , pak kolem  $z$  a nakonec kolem  $x$ .

### Shrnutí

Ve všech případech spočtené tři vektory evidentně tvoří bázi a to ortogonální, protože jsou na sebe kolmé.

Všechny osy spočtené výše popsaným způsobem byly pro použití ve výpočtech normalizovány na jednotkové vektory.

## 8.2 Meze rotace

O různých způsobech, jak popsat meze rotace kloubu pojednává kapitola 5. Protože v našem případě dochází v procesu animace k rozkladu kloubu na 3 dílčí rotace, bylo k vyjádření mezí použito nejjednoduššího přístupu nezávislých omezení Eulerových úhlů. Při použití anatomických os pro jednotlivé rotace lze vhodné meze rotací získat ze standardních učebnic pro fyzioterapeuty [17], [19].

Model používá v podstatě přesně ty hodnoty, vypsané v sekci 6.5.

### Sternoklavikulární kloub

Axiální rotace ve SC kloubu (kolem osy  $x$ ) je v rozmezí  $-30^\circ$  až  $0^\circ$ . Tak, jak jsou definované osy kloubu, odpovídá dopředné rotaci záporný smysl otáčení.

Protrakce (kladný smysl) a retrakce (záporný smysl), tedy rotace kolem osy  $y$ , se pohybují v rozmezí  $-15^\circ$  až  $45^\circ$ .

Deprese (kladný smysl) a elevace (záporný smysl), rotace kolem osy  $z$ , se pohybují v rozmezí  $-45^\circ$  až  $15^\circ$ .

### Akromioklavikulární kloub

Lopatka není vůči klíční kosti velmi pohyblivá, významná je jen rotace kolem osy  $z$ , která odpovídá axiální rotaci AC kloubu a je podobně jako v případě SC kloubu v rozmezí  $-30^\circ$  až  $0^\circ$ .

Rotace kolem osy  $x$  je v rozmezí  $-15^\circ$  až  $15^\circ$ .

Konečně rotace kolem osy  $y$ , která odpovídá rozvírání úhlu mezi klíčkem a lopatkou v transverzální rovině se pohybuje v rozmezí  $0^\circ$  až  $15^\circ$ .

### Glenohumerální kloub

Rotace kolem osy  $x$ , tedy flexe (kladný smysl) a extenze (záporný smysl), je v rozmezí  $-45^\circ$  až  $90^\circ$ .

Rotace kolem osy  $z$ , abdukce (kladný smysl) a addukce (záporný smysl) ramenního kloubu, je v rozmezí  $-60^\circ$  až  $120^\circ$ . Addukce v základní poloze sice není možná, ale bereme zde v úvahu maximální addukci kdekoliv v rozmezí pohyblivosti a proto používáme hodnotu addukce při mírné flexi.

Axiální rotace, tedy rotace kolem osy  $y$ , probíhá v rozmezí  $-95^\circ$  až  $90^\circ$ , záporný smysl otáčení odpovídá rotaci dovnitř.

## 8.3 Omezení pohyblivosti - parametr stiffness

Omezením pohyblivosti v této sekci nejsou míněny meze rozsahu pohyblivosti diskutované výše, ale zobecnění toho, co bývá vyjadřováno parametrem *stiffness*, tedy **tuhost** kloubu, jeho ochota pohnout se a přispět k celkovému řešení. Pohyblivost v jednotlivých stupních volnosti závisí na mnoha faktorech. Některé mohou být považovány za statické, dané reologií konkrétního kloubu a nezávislé na konkrétních úhlech v řetězci. Jiné jsou jasně dynamické, pohyblivost může být ovlivněna blížící se mezí, nebo hodnotou rotace v jiném stupni volnosti, dokonce i v jiném kloubu.

Pro zohlednění všech těchto vlivů slouží algoritmu inverzní kinematiky parametr *stiffness*, který upravuje přírůstek rotace pro daný kloub v každé iteraci výpočtu. Jak je popsáno v sekci 5.8, tento parametr je číslo z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . V rozporu s tradičním pojetím *stiffness* znamená v našem modelu

nižší hodnota menší pohyblivost kloubu. Při takovéto interpretaci hodnoty se parametr obvykle nazývá *springiness*, my se držíme názvu *stiffness*, protože je použit standardem H-Anim.

### 8.3.1 Skládání složek omezení a fuzzy logika

Každá závislost pohyblivosti kloubu na nějaké veličině vede k číslu z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . Tento interval je uzavřen vůči operaci násobení a proto lze násobení použít k vyjádření skládání jednotlivých vlivů, jak ukazuje vztah 8.1.

$$stiffness = \prod_{i=1}^n stiffness_i \quad (8.1)$$

Skládání násobením však plně nezohledňuje charakter podmínek omezujících pohyblivost. V situaci, kdy je třeba vyjádřit účinek jednoho *nebo* druhého omezení, násobení složek nám nepostačí.

Každá složka *stiffness* je v podstatě zobecněným přepínačem mezi stavy **Pohyblivost** a **Nehybnost**. Pokud by šlo jen o rozhodování mezi těmito dvěma stavy, bylo by možné podmínky skládat běžnými logickými operacemi. Jelikož naše přepínače jsou zobecněné a připouští stavy mezi krajními možnostmi, musíme sáhnout po *fuzzy logice*, která je zobecněním běžné dvoustavové logiky.

Ke složení omezení platících zároveň tedy použijeme fuzzy logického součinu definovaného vztahem 8.2. Ke složení podmínek platících alternativně potom použijeme fuzzy logického součtu definovaného vztahem 8.3.

$$A \text{ and } B = \min(A, B) \quad (8.2)$$

$$A \text{ or } B = \max(A, B) \quad (8.3)$$

Symboly A a B ve vztazích 8.2 a 8.3 představují čísla z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . Z téhož intervalu zjevně bude i výsledek. Je vidět, že se tyto operace ke skládání složek *stiffness<sub>i</sub>* velmi hodí.

### 8.3.2 Vyhodnocení jednotlivých vlivů

Jednotlivé složky *stiffness<sub>i</sub>* mohou být dané buď číslem nebo závislostí na rotaci některého ze zúčastněných stupňů volnosti. Tyto závislosti byly implementovány jako lineární interpolátor, který získává příslušnou hodnotu interpolací mezi nejbližšími dvěma známými vzorky. Je tak možné při vyšším počtu vzorků teoreticky vyjádřit jakoukoliv křivku, ale prakticky není nikdy nepřesahuje počet vzorků řád jednotek. Použity jsou závislosti jedno a dvourozměrné. Dvourozměrný případ interpoluje postupně, nejprve dvě hodnoty v jednom rozměru, mezi nimiž je pak interpolováno v rozměru druhém.

Jako příklad uveďme závislost pohyblivosti axiální rotace SC na okamžité hodnotě své vlastní rotace (tabulka 8.1. Tato závislost se snaží podchytit menší pohyblivost kloubu, který se blíží své mezi.

Hodnota “klíč” udává relativní polohu klíčové hodnoty v rozsahu pohyblivosti. Vzhledem k procesu tvorby těchto křivek, který se silně opíral o náčrtky známých informací a následnou interpolaci, se ukázalo pohodlnější vpisovat do záznamu křivek klíčové hodnoty relativně.

Při výpočtu *stiffness* se nejprve spočítá relativní hodnota rotace příslušného stupně volnosti (v našem příkladě axiální rotace SC), dále se zjistí mezi kterými dvěma klíči tato rotace leží a provede se lineární interpolace mezi příslušnými klíčovými hodnotami.

Pokud je stupeň volnosti druhou složkou nastavení směru článku, může nastat situace, že jeho rotace je mimo rozsah pohyblivosti a nelze použít k indexování do tabulky pro *stiffness*. V takovém případě bude potřeba odečíst od rotace  $180^\circ$ , protože se jedná o případ zmíněný v sekci 8.1.1 (obrázek 8.1).

Při tvorbě modelu ramene byla snaha využít každou obecnou informaci o vlivech na pohyblivost kloubů zdravého ramene a vyjádřit jí nějakou výše popsanou závislostí.

### 8.3.3 Ramenní rytmus

Práce [8] popisuje detailně pohyb ramenního komplexu a příspěvky jednotlivých kloubů k celkovému efektu. Přináší také grafické a číselné výsledky některých měření. Z těchto podkladů lze usoudit následující: Postup jamky glena vzhůru je v první polovině celkové elevace dílem elevace klíčku ve SC kloubu. Trigonum spinae na lopatce zůstává přibližně na jednom místě v té fázi přibližně na jednom místě. Ve druhé polovině zas na jednom místě zůstává akromion. Pohyb glena je tedy dílem axiální rotace klíčku. Za tu jsou odpovědné axiální rotace SC kloubu a stupeň volnosti kloubu AC, který koresponduje s rotací kolem osy nazvané v našem modelu z.

Protože je často zmiňováno [8][17], že pohyb GH kloubu při elevaci je plynulý, lze jej použít jako indikátoru postupu celé elevace. Výše popsané změny pohyblivosti SC a AC kloubu tak lze vyjádřit jako závislost na stavu rotace v GH kloubu: Když se rotace přiblíží polovině elevace, pohyblivost SC kloubu kolem osy z se přiblíží nule a naopak pohyblivosti SC kolem x a AC kolem z se od nuly přiblíží jedné.

Podobně se dá zapsat, že když se rotace SC kolem z přiblíží maximální elevaci, vzroste pohyblivost rotace SC kolem x a AC kolem z nuly k hodnotě 1.

Protože ale metoda CCD směřuje k řešení velkými skoky, je třeba tato omezení uvolnit. Pokud rotace v GH skočí v první iteraci na hodnotu k níž přísluší už jen pohyblivost axiální rotace SC, je třeba povolit i pohyblivost elevace SC, jinak by tento stupeň volnosti k řešení už nemohl přispět. Omezení pro SC a AC použitá v modelu se tak mohou týkat jen stupňů volnosti

aktivních ve druhé fázi elevace - budou utlumené dokud elevace nevzroste do příslušné fáze.

Další fakt, který lze vyčíst o souhře ramenních kloubů například z učebnice [17], se týká přibližného poměru zastoupení jednotlivých složek. *Na každých 10° flexe GH připadá 5° elevace lopatky.* V případě abdukce je tento poměr udáván 1:1. Vzhledem k tomu, že na elevaci lopatky se podílí v různých fázích různý kloub, tato zdánlivě jednoduše formulovaná informace se do našeho systému začleňuje velmi těžko a byla vynechána. (Nehledě už na to, že vzhledem k tomu, jak zmíněná publikace uvádí mezní abdukci a mezní flexi GH, měly by poměry příspěvků být obrácené - 1:1 pro flexi a 10°GH na 5° lopatky u abdukce.)

### 8.3.4 Vliv lokte

Učebnice [17] stručně zmiňuje vliv flexe lokte na extenzi GH kloubu. Je-li loket ve flexi, je GH schopen větší extenze.

Pro úplnost může být pohyblivost GH kolem  $x$  doplněna o dvourozměrnou závislost na rotaci GH kolem  $x$  a lokte kolem  $x$ .

### 8.3.5 Addukce ramene

Ze běžné lidské zkušenosti i z nákrešů v literatuře (např. [19]) je zřejmé, že GH kloub není v základní pozici schopen addukce, protože paži brání v pohybu hrudník. V extenzi pak addukci brání lopatka, ale ve flexi je tento pohyb do značné míry možný. Stejně tak není možná extenze v addukci.

Z toho plyne, že pohyblivost GH kloubu ve smyslu abdukce/addukce a flexe/extenze (kolem  $z$  a  $x$ ) je ovlivněna dvourozměrnou závislostí na aktuální rotaci GH kolem  $x$  a kolem  $z$ .

### 8.3.6 Blízkost mezní rotaci

V animaci se občas používá úprava pohyblivosti tlumením při dosahování meze rotace. Čím je kloub blíže k mezi, tím méně bude ochoten svou rotaci měnit. Při dosažení meze potom lze jeho pohyblivost nastavit na 0, čímž se mu znemožní mez překonat.

Toto řešení má nevýhodu v tom, že je pak potřeba zvlášť ošetřit případ, kdy se kloub naopak dostává dále od meze, které dosáhl v některé z předchozích iterací výpočtu a tuto změnu rotace mu umožnit.

Pokud použijeme tlumení pohyblivosti v blízkosti meze, je výhodnější tlumit jen do určité úrovně a nechat tak kloubu možnost od meze se vzdálit. Případné narušení meze je řešeno nastavením porušující výsledné rotace na hodnotu meze. Je také možné meze vůbec neaplikovat a implementovat je jen utlumením stupně volnosti při splnění určité podmínky, tedy jen dynamickou stiffness.

### 8.3.7 Vlivy dané animační metodou

Sám princip metody CCD přináší určitá omezení pro pohyblivost kloubů. Protože jsou klouby řešeny postupně od koncového efektoru k bázi, mají klouby bližší k EE sklon přispívat více k řešení. Experimenty ukazují, že hlavně souhra SC a AC tím může být narušena. Proto je vhodné klouby v hierarchii předřazené omezovat více.

### 8.3.8 Pohyblivost jednotlivých kloubů

Popis konkrétních nastavení závislostí ovlivňujících pohyblivost je pro jednotlivé klouby je v této sekci. Závislosti budou prezentovány formou tabulek, kde druhý řádek bude obsahovat klíče, tedy relativní pozice rotace v rozmezí pohyblivosti. V třetím řádku budou příslušné klíčové hodnoty pohyblivosti. A pro doplnění a lepší představu první řádek uvede hodnoty úhlů příslušející klíčům.

V sekci 9.3 kapitoly o experimentech jsou popsány pokusy se dvěma modely. První z nich používá limity rotace a všechny zde uvedené závislosti ovlivňující stiffness. To je model, který se skládá z naprosto zobecnitelných stavebních bloků a je tedy nejbližší hlavnímu cíli práce.

Druhý model používá pro každý kloub jen závislosti na rotacích stupňů volnosti GH kloubu a neprosazuje limity rotací. Jediné limity jsou realizovány u GH kloubu utlumením jeho pohyblivosti po dosažení určené meze pomocí stiffness, ostatní klouby jsou ponechány neomezené. Tento model není úplně zobecnitelný, neboť realizace omezení závisí na poloze kloubu v kinematickém řetězci.

### Sternoklavikulární kloub

Rotace **SC kolem x** odpovídá axiální rotaci a pro pohyblivost v tomto směru jsou vytvořeny následující závislosti.

Závislosti na rotaci *SC kolem x* (podle 8.3.6) ukazuje tabulka 8.1. Pohyblivost klesá v těsném okolí mezních rotací. Protože horní mez je zároveň základní polohou, není vhodné přílišné utlumení.

Z odstavce 8.3.3 vyplývají pro pohyblivost SC kolem x závislosti na rotaci SC kolem z a na rotaci GH kolem x a z, protože SC se kolem x pohybuje ve druhé fázi elevace.

Pohyblivost SC kolem x, tedy axiální rotace je pravděpodobnější, když se rotace SC kolem z blíží k  $-45^\circ$ , což odpovídá maximální elevaci klíčku. Axiální rotace nastupuje jako další fáze po elevaci klíčku. Závislost pohyblivosti SC kolem x na rotaci *SC kolem z* ukazuje tabulka 8.2.

Stejně v konečné fázi lze pohyblivost řídit rotacemi *GH kolem x* a *kolem z*, jak ukazují tabulky 8.3 a 8.4. Obě tyto rotace souvisí mohou být částí elevace celé horní končetiny a oběma pomáhá pohyb lopatky vzhůru. ten je nejdřív realizován elevací klíčku a v konečné fázi axiální rotací klíčku.

úhel	-30°	-27°	-1°	0°
klíč	0	0,1	0,95	1
stiffness	0,1	1	1	0,5

Tabulka 8.1: Závislost pohyblivosti SC kolem x na hodnotě rotace v tomto stupni volnosti.

úhel	-45°	-39°	-30°	15°
klíč	0	0,1	0,25	1
stiffness	1	1	0,2	0,2

Tabulka 8.2: Závislost pohyblivosti SC kolem x a AC kolem z na hodnotě rotace SC kolem z.

úhel	-45°	33°	56°	90°
klíč	0	0,58	0,75	1
stiffness	0,1	0,1	1	1

Tabulka 8.3: Závislost pohyblivosti SC kolem x a AC kolem z na hodnotě rotace GH kolem x.

úhel	-60°	45°	75°	120°
klíč	0	0,58	0,75	1
stiffness	0,1	0,1	1	1

Tabulka 8.4: Závislost pohyblivosti SC kolem x a AC kolem z na hodnotě rotace GH kolem z.

úhel	-15°	-9°	33°	45°
klíč	0	0,1	0,8	1
stiffness	0,1	1	1	0,1

Tabulka 8.5: Závislost pohyblivosti SC kolem y na hodnotě rotace v tomto stupni volnosti.

úhel	-45°	-33°	9°	15°
klíč	0	0,2	0,9	1
stiffness	0,1	1	1	0,1

Tabulka 8.6: Závislost pohyblivosti SC kolem z na hodnotě rotace v tomto stupni volnosti.



Rotace **SC kolem y** odpovídá protrakci a retrakci klíční kosti. Pro pohyblivost tohoto stupně volnosti evidujeme jedinou závislost a to na jeho vlastní rotaci (podle 8.3.6). Závislost pohyblivosti SC kolem y na rotaci SC kolem y ukazuje tabulka 8.5.

Rotace **SC kolem z** odpovídá elevaci a depresi klíční kosti. Pro pohyblivost tohoto stupně volnosti evidujeme závislost na jeho vlastní rotaci (podle 8.3.6).

Závislost pohyblivosti SC kolem z na rotaci SC kolem z ukazuje tabulka 8.6.

### Akromioklavikulární kloub

Pro pohyblivost **AC kolem x** v tabulce 8.7 evidujeme pouze závislost na rotaci AC kolem x (podle 8.3.6).

úhel	-15°	-9°	9°	15°
klíč	0	0,2	0,8	1
stiffness	0,1	0,5	0,5	0,1

Tabulka 8.7: Závislost pohyblivosti AC kolem x na hodnotě rotace v tomto stupni volnosti.

úhel	0°	12°	15°
klíč	0	0,8	1
stiffness	0,5	0,5	0,1

Tabulka 8.8: Závislost pohyblivosti AC kolem y na hodnotě rotace v tomto stupni volnosti.

úhel	-30°	-24°	-3°	0°
klíč	0	0,2	0,9	1
stiffness	0,1	0,5	0,5	0,3

Tabulka 8.9: Závislost pohyblivosti AC kolem z na hodnotě rotace v tomto stupni volnosti.

Stejná situace je pro pohyblivost **AC kolem y**, v tabulce 8.8 evidujeme opět jen závislost na rotaci AC kolem y (podle 8.3.6).

Rotace **AC kolem z** je rotace doplňující svou úlohou rotaci SC kolem x (axiální rotace klíčku) a proto pro ní platí stejné závislosti. Nejdřív ovšem v tabulce 8.9 uveďme opět závislost na rotaci AC kolem z podle 8.3.6.

Otáčení AC kolem z má stejnou úlohu a probíhá ve stejné fázi pohybu jako otáčení SC kolem x. Proto pro pohyblivost v obou zmíněných stupních

volnosti platí stejné závislosti podle 8.3.3. Tyto závislosti na rotaci SC kolem  $z$ , GH kolem  $x$  a GH kolem  $z$  jsou v tabulkách 8.2, 8.3 a 8.4

### Glenohumerální kloub

Pohyblivost **GH kolem  $x$** , tedy ve smyslu flexe a extenze je ovlivněná blízkostí vlastní meze (8.3.6). Zejména v případě extenze je tato mez ovlivněná rotací GH kolem  $z$ . Je-li kloub v addukci, extenze již není možná. Tuto závislost je třeba pojmout jako dvourozměrnou na rotaci GH kolem  $x$  a zároveň na rotaci GH kolem  $z$ . Stejnou závislost pak bude využívat i stupeň volnosti GH kolem  $z$  a zobrazuje ji tabulka 8.10.

úhel		-60°	-51°	-6°	3°	75°	111°	120°
klíč		0	0,05	0,3	0,35	0,75	0,95	1
úhel	klíč							
-45°	0	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
-40°	0,05	0,05	0,05	0,1	0,5	0,5	0,5	0,1
-18°	0,2	0,05	0,05	0,5	1	1	1	0,1
0°	0,333	0,05	0,2	0,5	1	1	1	0,1
22°	0,5	0,1	0,5	0,8	1	1	1	0,1
33°	0,58	0,1	1	1	1	1	1	0,1
83°	0,95	0,1	1	1	1	1	1	0,1
90°	1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabulka 8.10: Závislost pohyblivosti GH kolem  $x$  a GH kolem  $z$  na hodnotách rotace v obou těchto stupních volnosti. Vodorovnou osu představuje GH kolem  $z$  (abdukce/addukce) a svislou GH kolem  $x$  (flexe/extenze).

Pro pohyblivost **GH kolem  $y$** , což je axiální rotace paže, evidujeme v tabulce 8.11 jen závislost na rotaci GH kolem  $y$  ve smyslu 8.3.6.

úhel	-95°	-78°	72°	90°
klíč	0	0,1	0,9	1
stiffness	0,1	1	1	0,1

Tabulka 8.11: Závislost pohyblivosti GH kolem  $y$  na hodnotě rotace v tomto stupni volnosti.

Problematika možností abdukce a addukce, pohyblivosti **GH kolem  $z$**  je také komplikovaná. Hraje tu roli jak blízkost mezí (8.3.6), tak i závislost na flexi, jak bylo zmíněno v 8.3.5. V podstatě se pohybují samotné meze tohoto stupně volnosti v závislosti na rotaci GH kolem  $x$ . Proto byla pro pohyblivost GH kolem  $z$  použita stejná dvourozměrná závislost na rotaci GH kolem  $z$  a zároveň GH kolem  $x$ , jaká byla popsána pro pohyblivost GH kolem  $x$ . Zobrazuje ji tabulka 8.10

## 8.4 Popis kloubů

V práci je použit virtuální humanoid dle standardu H-Anim zapsaný v jazyce VRML. Tam jsou zapsány údaje o hierarchii kloubů, středy a limity jejich rotace (objekt *Joint*) a jsou tam do hierarchie včleněné zvláštní body (objekt *Site*). Model ramene ale používá více informací, než je formát H-Anim schopen pojmout. Proto byl VRML popis modelu doplněn o dodatečné popisy kloubů v proprietárním snadno čitelném textovém formátu. Příkladem nám bude popis AC kloubu:

```
<joint_coords>

<origin> <joint> r_acromioclavicular </joint> </origin>

<axis>
<name> x
<vector>
<site> r_trigonum_spinae </site>
<joint> r_acromioclavicular </joint>
</vector>
</axis>

<axis>
<name> z
<cross>
<vector>
<site> r_trigonum_spinae </site>
<joint> r_acromioclavicular </joint>
</vector>
<vector>
<joint> r_acromioclavicular </joint>
<site> r_angulus_inferior </site>
</vector>
</cross>
</axis>

<axis>
<name> y
<cross>
<axis> x </axis>
<axis> z </axis>
</cross>
</axis>

<sequence> zyx

...
```

Ve standardu není počítáno se specifikací souřadných rámců pomocí pojmenovaných bodů. Možnost různého pořadí skládání Eulerových úhlů také není zohledněna. A dynamické pojetí parametru *stiffness* je úplně mimo rámec standardu. O to vše se v modelu stará dodatečný soubor.

Textový formát je odvozen od jazyka XML. Celý zápis je ohraničen závorkami `<joint_coords>` a `</joint_coords>`, které slouží jen k tomu, aby program věděl, kde začít a kde přestat číst. nejprve uvedeme část popisující souřadný systém kloubu.

Text se odkazuje na hlavní soubor dat, představovaný H-Anim zápisem modelu humanoida. Závorky `<joint>``</joint>` a `<site>``</site>` ohraničují jméno příslušného objektu *Joint* nebo *Site*, jehož souřadnice má program použít. Závorky `<origin>``</origin>` identifikují kloub.

Následují závorky `<axis>``</axis>`, které ohraničují popis souřadné osy. Osa má jméno `<name>`, které má hodnotu x, y, nebo z. Osa může být buď vektor (závorky `<vector>``</vector>`) určený dvěma body, nebo vektorový součin (závorky `<cross>``</cross>`), v němž mohou figurovat vektory, nebo již spočtené osy určeno jménem.

Nakonec je specifikováno pořadí (`<sequence>`) skládání Eulerových rotací kolem spočtených souřadných os.

V další části souboru pak je závorkami `<stiffness>``</stiffness>` ohraničen popis dynamické *stiffness*. Kloub má tři stupně volnosti odpovídající rotacím kolem os popsanych v souboru výše. Každý z nich má vlastní omezení pohyblivosti, jejichž popisy jsou v bloku uzavřeném závorkami `<DOF>``</DOF>`. Stupeň volnosti má jméno `<name>`, které má hodnotu x, y, nebo z. Dále obsahuje seznam závislostí.

Jednotlivé závislosti jsou ohraničené závorkami `<dep>``</dep>`. Každá závislost má také jméno `<name>`, jímž je pak identifikována při vyhodnocování celkové *stiffness*. Dále popis závislosti obsahuje trojici závorek `<joint>``</joint>`, `<key>``</key>` a `<value>``</value>`. V prvních je identifikace kloubu jehož rotace pohyblivost ovlivňuje (určeno jménem kloubu a číslem stupně volnosti). Další pak obsahují seznam klíčů (relativních poloh v rozsahu pohyblivosti) a klíčových hodnot pro interpolaci.

Pokud obsahuje stupeň volnosti více závislostí, je v jeho popisu (v jeho závorkách `<DOF>``</DOF>`) ještě položka `<result>`, za níž následuje výraz složený ze jmen použitých závislostí a logických spojek AND a OR. Tento výraz představuje fuzzy logické operace, jimiž se vyhodnocuje celková *stiffness* daného stupně volnosti.

Příklad zápisu dynamické stiffness:

```
...  
  
<stiffness>  
  
<DOF>  
<name> x  
  
<dep>  
<name> ACx  
<joint>  
r_acromioclavicular 0  
</joint>  
<key>  
0 0.2 0.8 1  
</key>  
<value>  
0.1 1 1 0.1  
</value>  
</dep>  
  
<result> ACx AND/OR ...  
  
</DOF>  
  
...  
  
</stiffness>  
  
</joint_coords>
```

## Kapitola 9

# Experimenty

Animační techniky IK počítají stav kinematického řetězce, tedy *posturu* artikulované struktury člověka při znalosti pozice koncového efektoru, bodu na konci řetězce. Možných řešení bývá typicky nekonečné množství a vzniklá postura nemusí vždy odpovídat možnostem reálného těla. Naším cílem bylo stvořit model ramene, který by pomáhal při výběru postury pokud možno realistické. Ověřit úspěšnost takového modelu půjde nejlépe právě spočtením a zhodnocením postur pro vybrané polohy koncového efektoru.

Animace vzniká postupným promítnutím postur spočtených pro sobě jdoucí polohy koncového efektoru. Kvalita vzniklého pohybu je dalším stupněm možného hodnocení. Čištění výsledné animace za účelem získání plynulého pohybu je záležitostí zpracování jednotlivých animačních křivek a nemá již tolik společného s vlastním modelem ramene. Při hodnocení modelu tedy budou rozebírány jen jednotlivé postury.

Nejprve v sekce 9.1 stručně popíšeme použitá testovací data z hlediska pohybů, které představují a zavedeme označení dat a koncových efektorů, které budeme dále používat. Vlastní experimenty jsou rozděleny do dvou částí. První, popsaná v sekci 9.2, se zabývá použitelností animačních metod bez vlastních pohybových omezení. Druhá část (sekce 9.3 se pak věnuje vlivu pohybových omezení nejen na vlastní dosažitelnost cílů, ale hlavně na vizuální realismus dosažených postur.

### 9.1 Testovací data

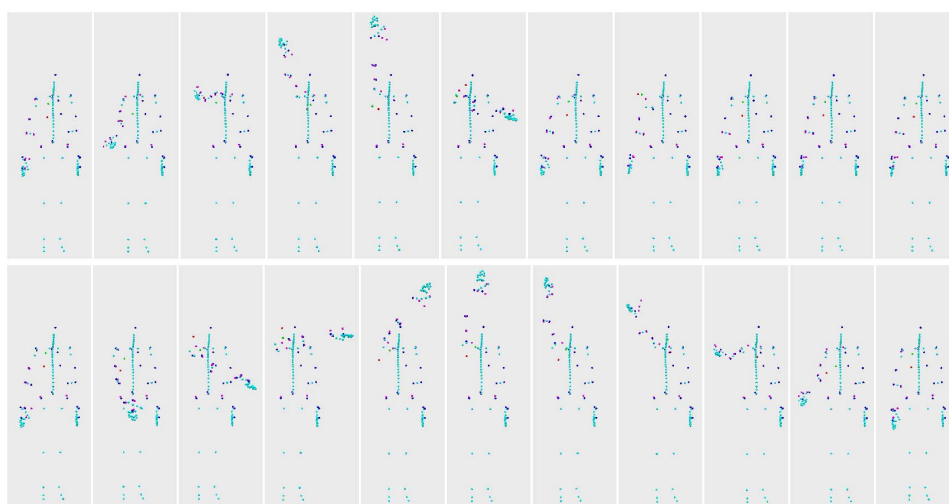
Pro účely testování modelu byla provedena měření čtyř pohybů horní končetiny. Obrázky 9.1 a 9.2 ukazují z každého pohybu vždy každý stý snímek vyřešený neomezeným kinematickým řetězcem ramene a třemi koncovými efekty. Tyto pohyby jsou:

1. Abdukce ze základní polohy až do úplné elevace a zpět (viz první řádek v obrázku 9.1).

2. Flexe ze základní polohy až do úplné elevace a zpět (viz druhý řádek v obrázku 9.1).
3. Vnější rotace ze základní polohy přes všechny extrémní pozice zpět do základní polohy (viz první řádek v obrázku 9.2).
4. Vnitřní rotace ze základní polohy přes všechny extrémní pozice zpět do základní polohy (viz druhý řádek v obrázku 9.2).



Obrázek 9.1: Posloupnosti snímků měřených pohybů, abdukce a flexe.



Obrázek 9.2: Posloupnosti snímků měřených pohybů vnější a vnitřní rotace.

První dva pohyby poskytují příklady různých stupňů elevace ve dvou základních směrech. Druhé dva zase obsahují příklady extrémních pozic včetně addukce a extenze, liší se směrem otáčení končetiny. Protože souhra pohybů v kloubech ramene bývá popsána především na elevaci [8], jsou pro první fázi testování modelu důležité hlavně oba naměřené příklady elevací.

Všechny datové sady byly naměřeny systémem Qualisys se šesti kamerami, při snímkovací frekvenci 200 Hz a čase 7 s, což znamená, že každá obsahuje 1400 snímků. Uloženy jsou ve formátu TSV, který je načítán testovacím programem. Použitá sada markerů odpovídá tomu, co bylo popsáno v sekci 7.2.1. Jako koncové efektorů přímo podřízené ramennímu kloubu mohou sloužit *r\_elbow\_lat*, *r\_elbow\_med* a *r\_deltoid*.

Pro označování koncových efektorů použijeme v dalším textu zkratky:

- **D** pro *r\_deltoid*
- **EL** pro *r\_elbow\_lat*
- **EM** pro *r\_elbow\_med*

Řazením těchto zkratk popíšeme konfiguraci koncových efektorů a pořadí jejich vyhodnocování.

Jednotlivé datové sady budeme dále označovat těmito zkratkami

- **ABD** pro pohyb číslo 1, abdukce.
- **FLX** pro pohyb číslo 2, flexe.
- **EX** pro pohyb číslo 3, vnější rotace.
- **IN** pro pohyb číslo 4, vnitřní rotace.

## 9.2 Pokusy s IK solverem

Pro testování IK solveru byl vybrán vzorek snímků z testovacích dat a pro tyto snímky byla spočtena postura. Pro testování prvků v literatuře běžně nepopsaných, jako je použití více koncových efektorů a hierarchicky uspořádané sady více kinematických řetězců, nebyly uvažovány omezující parametry kloubů a byla sledována jen čistá dosažitelnost cílů neomezeným kinematickým řetězcem.

Testy byly zaměřeny na dva hlavní body:

1. Na ověření vedlejší hypotézy této práce, tedy na použití více koncových efektorů při výpočtech IK metodou CCD.
2. Na ověření myšlenky animace pomocí hierarchie kinematických řetězců vytvořené z markerů, které jsou použité v měření systémem Qualisys.



### 9.2.1 Více koncových efektorů

Myšlenka použití více koncových efektorů při řešení IK úlohy byla popsána v sekci 7.3.4. Implementovány a testovány byly dvě možnosti, jak využít více koncových efektorů:

1. *Průměrování* - každý výpočet úhlu je proveden postupně pro všechny koncové efektorů a použit je průměrný úhel. Počet výpočtů v jedné iteraci tak je přímo úměrný počtu koncových efektorů.
2. *Postupné vyhodnocování* - v každé iteraci je kinematický řetězec vyřešen jednou, pokaždé pro jiný koncový efektor. Každá iterace tak pracuje na přiblížení jiného koncového efektoru, vždy ze situace, do které se kinematický řetězec dostal přiblížením předchozího.

Pro obě metody byl sledován počet iterací potřebných pro dosažení cíle. Za dosažený cíl je považováno přiblížení na blíž než 2cm. Není-li cíle dosaženo v 1000 iteracích, je výpočet ukončen a je zobrazena dosažená postura. Pro testy byl použit kinematický řetězec ramenního kloubu (SC-AC-GH), protože kloubu glenohumerálnímu je podřízeno nejvíce sledovaných bodů. Ačkoliv byl měřen i akromion, jeho použitím pro animaci by byl ramenní komplex rozdělen do dvou kratších řetězců, proto nebyl použit. Byly použity všechny čtyři datové sady. Jelikož byl sledován jen počet iterací potřebných k dosažení cíle, bylo možné testy automatizovat a provést jich větší množství. Z každé datové sady byl testován každý 10. snímek od 80. po 1200., tedy dohromady 113 snímků.

Metoda *průměrování* byla testována se všemi třemi koncovými efektorů a se třemi možnými dvojicemi koncových efektorů.

U metody *postupného vyhodnocování* záleží na pořadí ve kterém jsou koncové efektorů vyhodnocovány. Testů s trojicí koncových efektorů tedy bylo 6 a dalších 6 testů bylo s různými dvojicemi.

V případě použití jediného koncového efektoru (kteréhokoliv ze tří možných), není mezi oběma metodami rozdíl a neomezený IK solver vždy dosáhne cíle. Je třeba poznamenat, že nalezené řešení nebývá realistické. Pro ilustraci uveďme výsledky dosažené pro každý z koncových efektorů. V tabulce 9.1 jsou průměrné počty iterací potřebné k dosažení cíle spolu s minimálním a maximálním počtem v rámci celého testu (v závorce).

	<b>ABD</b>	<b>FLX</b>	<b>EX</b>	<b>IN</b>
<b>D</b>	1,8 (1-3)	2 (1-6)	6,3 (1-31)	6 (1-31)
<b>EL</b>	3,2 (1-24)	3 (1-15)	13,5 (2-164)	11,4 (1-81)
<b>EM</b>	3,7 (1-35)	2,7 (1-10)	7,8 (1-61)	8 (1-32)

Tabulka 9.1: Tabulka výsledků neomezeného IK solveru s jedním koncovým efektořem

Pro více koncových efektorů přinesla metoda *průměrování* výsledky zobrazené v tabulce 9.2. K průměrnému, minimálnímu a maximálnímu počtu iterací přibývá ještě počet snímků na nichž nebylo cíle dosaženo (ten je uveden za závorkou, pokud je místo maximálního počtu iterací uveden symbol N).

	<b>ABD</b>	<b>FLX</b>	<b>EX</b>	<b>IN</b>
<b>ELEMD</b>	149 (2-N) 8	68 (2-N) 3	143 (3-N) 6	152 (1-N) 5
<b>EMEL</b>	14 (1-323)	21 (2-412)	42 (1-N) 1	52 (3-888)
<b>DEM</b>	25 (1-310)	36 (2-747)	50 (2-N) 1	89 (2-N) 3
<b>DEL</b>	269 (1-N) 23	256 (1-N) 21	243 (2-N) 14	284 (1-N) 17

Tabulka 9.2: Tabulka výsledků neomezeného IK solveru s více koncovými efekty, metoda *průměrování*. Symbol N znamená, že cíle nebylo dosaženo v 1000 iteracích

Tabulka 9.3 ukazuje výsledné počty iterací získané metodou *postupného vyhodnocování*.

	<b>ABD</b>	<b>FLX</b>	<b>EX</b>	<b>IN</b>
<b>ELEMD</b>	125 (2-N) 3	49 (3-N) 2	153 (4-N) 6	146 (3-N) 5
<b>EMELD</b>	121 (2-N) 3	62 (3-N) 1	171 (4-N) 4	235 (2-N) 8
<b>DELEM</b>	93 (1-N) 3	53 (3-N) 2	147 (3-N) 6	168 (2-N) 4
<b>DEMEL</b>	118 (1-N) 4	49 (2-N) 1	306 (4-N) 9	238 (2-N) 3
<b>EMDEL</b>	82 (4-N) 2	38 (2-N) 1	132 (4-N) 5	134 (2-N) 4
<b>ELDEM</b>	126 (2-N) 3	75 (2-N) 4	286 (4-N) 7	216 (4-N) 8
<b>EMEL</b>	58 (2-N) 1	17 (2-406)	70 (3-N) 1	34 (2-247)
<b>ELEM</b>	15 (1-78)	24 (3-648)	79 (3-N) 3	45 (4-968)
<b>DEM</b>	84 (1-N) 2	36 (2-N) 1	56 (2-N) 1	89 (2-N) 3
<b>EMD</b>	57 (2-563)	22 (2-638)	55 (4-723)	102 (2-N) 3
<b>DEL</b>	113 (1-N) 3	108 (2-N) 4	101 (2-N) 2	190 (1-N) 10
<b>ELD</b>	73 (1-360)	100 (1-N) 5	156 (3-N) 11	121 (2-N) 3

Tabulka 9.3: Tabulka výsledků neomezeného IK solveru s více koncovými efekty, metoda *postupného vyhodnocování*. Symbol N znamená, že cíle nebylo dosaženo v 1000 iteracích

### Srovnání metod

Z údajů v tabulkách je vidět, že počty iterací jsou pro obě metody srovnatelné, spíše se kloní ve prospěch metody *postupného vyhodnocování*. V iteraci této metody se každý kloub řeší jen jednou, kdežto u *průměrování* tolikrát, kolik je koncových efektorů. Proto se nabízí závěr, že *postupné vyhodnocování* spěje k cíli rychleji.

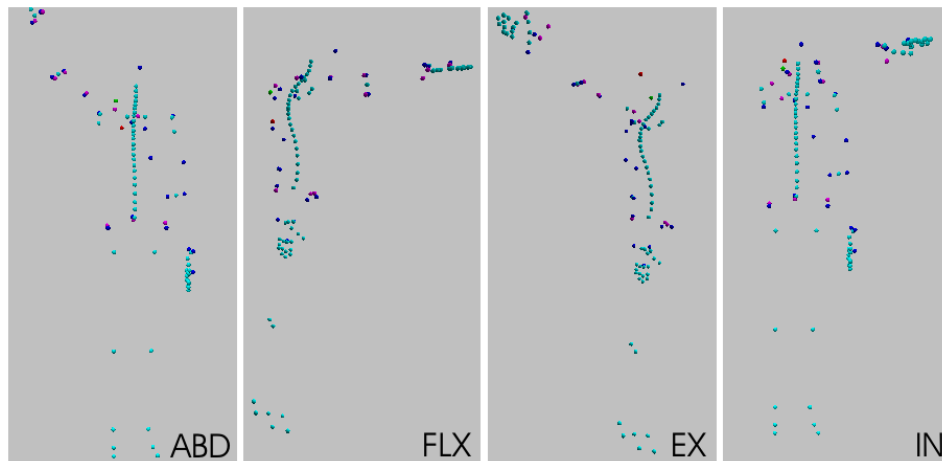
Z hlediska přesnosti jsou také obě srovnatelné, opět je *postupné vyhodnocování* možná o trochu lepší hlavně u jednoduchých pohybů jako **ABD** a **FLX**. Nevyřešené snímky nebyly pro obě metody stejné a vyskytují se izolovaně.

### Konfigurace koncových efektorů

Z pokusů s různými konfiguracemi koncových efektorů lze vypořádat, že z hlediska přesnosti i rychlosti nejlépe dopadá kombinace *r\_elbow\_lat* a *r\_elbow\_med*. Oba tyto body leží zhruba stejně daleko od středu nadřazeného kloubu i osy příslušného článku, která vede mezi nimi.

Úspěšnost této konfigurace není jen důsledkem zjevného faktu, že splnit dvě podmínky je snazší, než splnit podmínky tři. Konfigurace všech tří koncových efektorů zdaleka nedopadla nejhůře. Poslední místo patří dvojici *r\_elbow\_lat* a *r\_deltoid* ležící v různé vzdálenosti od středu nadřazeného kloubu a v přibližně stejné úhlové pozici vzhledem k ose článku.

Z výsledků pro různé permutace trojice koncových efektorů těžko lze vyvodit závěry. Obrázek 9.3 ukazuje hlavní problémové polohy v jednotlivých testovacích pohybech.



Obrázek 9.3: Ukázky poloh v jednotlivých testovacích pohybech, které způsobovaly potíže při výpočtu algoritmem IK. Tyto snímky jsou všechny vyřešené s konfigurací koncových efektorů **ELEMD**. Za povšimnutí stojí, že s výjimkou **FLX** je poloha pravé lopatky úplně nereálná (zelený bod TS, červený AI)

Pohyby **ABD** a **FLX**, které oba jdou tam a zase zpět, podle očekávání vykazují dvě oblasti neřešitelných snímků příslušející stejné úrovni elevace.

Pohyby **EX** a **IN** se liší směrem rotace paže. Oba vykazují úseky problematických poloh. Extrémní zapažení na začátku **EX** se vyskytuje ke konci

IN. Stejně tak extrémní addukce se vyskytuje a způsobuje problémy v obou pohybech (viz obrázek 9.3).

Část problémů u obou těchto pohybů, zejména extrémní zapažení, lze přičíst na vrub tomu, že se je nepodařilo snímat s dostatečnou fixací páteře. Při výpočtech tak poloha báze (první hrudní obratel) neodpovídá změřené poloze.

### 9.2.2 Hierarchie kinematických řetězců

Pro pokusy s hierarchií kinematických řetězců byly použity všechny čtyři datové sady. Použitá sada markerů vedla na vytvoření konfigurace kinematických řetězců popsané v sekci 7.3.5. Stručně ji zde zopakujeme:

- Kloub *HumanoidRoot*, měřené body *sacrum\_cra*, *r\_pelvis* a *l\_pelvis*. Řetězec slouží k výpočtu globální transformace humanoida.
- Páteř od *vl5* po *vt1*, měřený bod *vt1*.
- Kloub *r\_sternoclavicular*, měřený bod *r\_acromion*.
- Klouby *r\_acromioclavicular* a *r\_shoulder*, měřené body *r\_deltoid*, *r\_elbow\_med* a *l\_elbow\_lat*.
- Kloub *r\_elbow*, měřené body *r\_wrist\_rad* a *l\_wrist\_uln*.
- Kloub *r\_wrist*, měřený bod *r\_hand*.

Kritérium přiblížení k cíli je opět aspoň 2cm pro každý koncový efektor, po 1000 iteracích je výpočet ukončen jako neúspěšný. Opět je jako výsledek použita postura dosažená při ukončení výpočtu. Provedené testy byly zaměřeny na vizuální hodnocení spíše než na nějakou kvantifikaci výsledků. Ze všech čtyř datových sad bylo vybráno, spočteno a zobrazeno několik snímků (okolo 10).

### Chování páteře

Kromě ramene nemají klouby použitého modelu nastavena pohybová omezení a proto všechny tyto testy proběhly s neomezenými kinematickými řetězci. Proto byly mnohé vypočítané postury nereálné až bizarní, zejména díky chování kinematického řetězce páteře. Páteř totiž dosahovala svého cíle pohybem jediného obratle. Jedním z výsledků těchto pozorování tedy je, že při použití kinematického řetězce páteře je třeba nějak zajistit, aby se celkové řešení rozdělilo mezi ostatní obratle. Studium pohyblivosti obratlů a experimenty s jejich pohybovými parametry by tedy byly na místě.

### Retargetting

Implementace myšlenky hierarchie kinematických řetězců byla částečně motivována pracovní hypotézou, že by tento algoritmus mohl být použit pro animaci modelu rozměrově neodpovídajícího měřenému herci, tedy jako metoda tzv. retargettingu. Tato hypotéza se zatím nepotvrdila. Za vyvrácenou se ovšem také považovat nedá.

Hypotéza byla založena na tom, že článek kinematického řetězce by měl být při nedosažení cíle aspoň namířen k cíli. Každý nedosažený cíl, nebo i nepřesnost v orientaci při dosažení cíle daného jedním bodem, přináší nepřesnost, která ovlivňuje počáteční podmínky pro podřízené řetězce. Otázka, jak by se tyto nepřesnosti daly omezit či eliminovat použitím vhodně modelovaných pohybových omezení, zatím čeká na zodpovězení.

### Problém do budoucna

Ukazuje se, že animace pomocí hierarchie kinematických řetězců vytvořené z dat naměřených systémem optického snímání pohybu je oblast tematicky navazující na pokusy s pohybovými parametry kloubů. Jako takovou ji zde tedy za současného stavu nemůžeme probádat hlouběji.

Poznání, že tudy by mohla vést další cesta zkoumání pohybových vlastností kloubů, lze hodnotit jako jeden z přínosů práce.

## 9.3 Pokusy s modelem ramene

Pokusy s modelem ramene souvisí s testováním animační metody. Předchozí testy byly prováděny na modelu bez jakýchkoliv mezí s použitím více koncových efektorů.

Teoreticky by se měl úspěšný model ramene vyznačovat schopností dosáhnout s minimem vstupních dat stejné postury, jaké by dosáhl neomezený IK solver řízený větším množstvím naměřených bodů. Model ramene je implementován pohybovými parametry kloubů, proto je na místě testovat ho prostě tak, že zopakujeme předchozí testy tentokrát se zapojením různých omezení. Toto provedeme ve dvou stupních:

1. Se zapojením **mezi rotace**
2. Se zapojením **dynamicky vyhodnocovaného parametru *stiffness***

Pokud by se model ukázal funkční, bylo by zajímavé vizuální srovnání výsledků testů s více efekty bez omezení a testů s jedním efektem a omezeními. Kromě testů popsaných v 9.2.1 tedy bude potřeba provést subjektivní hodnocení kvality dosažené postury. Všechny hodnoty v tabulkách mají stejný význam, jako v sekci 9.2.1. Celkový počet řešených snímků je

113 pro každou sadu. Průměrný počet iterací je počítán ze všech snímků, tedy i nevyřešených, kde je počet iterací roven 1000. Počty nevyřešených snímků jsou tak vysoké, a počet iterací potřebných na vyřešení řešitelného snímku tak nízký, že hodnota průměrného počtu iterací v této situaci vypovídá spíše o počtu neřešitelných snímků, než o iteracích. Průměr zde není vhodně zvolený statistický ukazatel.

### 9.3.1 Omezení rotace

Omezení rotací jsou nastavená na hodnoty uvedené v sekcích 6.5 a 8.2, které jsou získané z literatury ([17][19]). Pokud tyto meze přijmeme za pravdu, můžeme testy vzít jako ukazatel použitelnosti animační metody pro tvorbu anatomicky realistických animací.

#### Testy dosažitelnosti cíle

S jedním koncovým efektozem nachází neomezený IK solver nějaké řešení velmi spolehlivě. Tabulka 9.4 ukazuje, že při aplikaci limitů rotace tomu tak není. Zobrazíme-li změřené výsledky graficky jako závislost počtu iterací na pořadí snímku, uvidíme, že problémy způsobují snímky s velkou celkovou elevací paže.

	<b>ABD</b>	<b>FLX</b>	<b>EX</b>	<b>IN</b>
<b>D</b>	488 (1-N) 55	393 (1-N) 44	313 (1-N) 35	462 (1-N) 52
<b>EL</b>	500,6 (1-N) 56	429 (1-N) 48	305 (1-N) 34	411,7 (1-N) 46
<b>EM</b>	385 (1-N) 42	385,5 (1-N) 43	271 (1-N) 30	342 (1-N) 38

Tabulka 9.4: Tabulka výsledků neomezeného IK solveru s jedním koncovým efektozem při aplikaci limitů rotace.

Pro více koncových efektozů přinesla metoda *průměrování* výsledky zobrazené v tabulce 9.5. Tabulka 9.6 zase ukazuje výsledné počty iterací získané metodou *postupného vyhodnocování*.

	<b>ABD</b>	<b>FLX</b>	<b>EX</b>	<b>IN</b>
<b>ELEMD</b>	749 (2-N) 84	471 (2-N) 52	468 (3-N) 52	632 (1-N) 69
<b>EMEL</b>	553 (1-N) 61	394 (2-N) 43	343 (2-N) 38	520 (3-N) 57
<b>DEM</b>	624 (1-N) 70	481 (2-N) 51	410 (3-N) 46	590 (3-N) 65
<b>DEL</b>	561 (1-N) 63	467 (1-N) 52	551 (2-N) 61	752 (1-N) 82

Tabulka 9.5: Tabulka výsledků neomezeného IK solveru s více koncovými efektozy, metoda *průměrování*, použity limity rotace.

Množství neřešitelných snímků je kupodivu srovnatelné pro libovolný počet i konfiguraci koncových efektozů. S většími či menšími rozdíly pokrývají vždy stejnou část pohybu – velkou celkovou elevací paže.

	<b>ABD</b>	<b>FLX</b>	<b>EX</b>	<b>IN</b>
<b>ELEMD</b>	569 (2-N) 63	567 (5-N) 60	446 (5-N) 48	812 (5-N) 87
<b>EMELD</b>	651 (2-N) 71	435 (2-N) 46	586 (4-N) 51	857 (2-N) 94
<b>DELEM</b>	573 (1-N) 64	545 (2-N) 58	420 (3-N) 44	818 (6-N) 88
<b>DEMEL</b>	594 (1-N) 64	526 (4-N) 54	600 (4-N) 51	842 (4-N) 91
<b>EMDEL</b>	598 (3-N) 66	444 (2-N) 47	429 (4-N) 46	734 (2-N) 79
<b>ELDEM</b>	695 (3-N) 75	490 (2-N) 51	614 (5-N) 52	842 (5-N) 91
<b>EMEL</b>	548 (2-N) 61	399 (2-N) 44	360 (3-N) 40	571 (2-N) 63
<b>ELEM</b>	616 (2-N) 69	623 (3-N) 69	369 (4-N) 41	680 (3-N) 76
<b>DEM</b>	602 (1-N) 66	658 (4-N) 71	423 (4-N) 47	788 (4-N) 86
<b>EMD</b>	586 (4-N) 65	449 (2-N) 49	424 (3-N) 47	707 (2-N) 77
<b>DEL</b>	573 (1-N) 59	463 (1-N) 52	397 (2-N) 44	621 (1-N) 68
<b>ELD</b>	525 (1-N) 59	414 (1-N) 46	384 (3-N) 40	627 (2-N) 69

Tabulka 9.6: Tabulka výsledků neomezeného IK solveru s více koncovými efektorů, metoda *postupného vyhodnocování*, použity limity rotace. Symbol N znamená, že cíle nebylo dosaženo v 1000 iteracích

### Zhodnocení vzhledu

Vzhledem k tomu, že pro naše potřeby je vlastní chování kloubů ramene důležitější než samotné dosažení cíle, je nutné vypočítané postury vizuálně zkontrolovat. Jak vyjádřit pojem "realistické postury" číselně k automatickému vyhodnocování, je rozsáhlé téma samo o sobě. Tato pozorování tedy nebylo možné řešit automaticky a proto bylo třeba pracovat s výrazně menším množstvím vzorků.

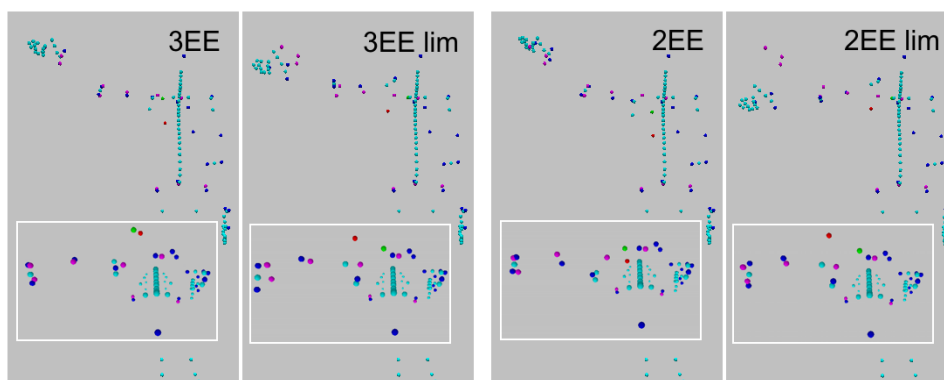
Pro každou sadu dat byl vybrán vždy každý padesátý snímek a byl zpracován pro tyto kombinace koncových efektorů:

- ELEMD jako zástupce permutací všech tří koncových efektorů.
- ELEM jako vzorek dvojice koncových efektorů. Záměrně byla vybrána ta dvojice, pro kterou testy bez limitů rotace dopadaly nejlépe.
- EL jako vzorek situace s jedním koncovým efektořem.

Výsledné postury (ať už byl cíl dosažen, nebo ne) byly zhodnoceny s důrazem na to, jak moc se lopatka drží v reálných mezích.

Pohyb **ABD** je velmi jednoduchý a i bez omezení jsou nalezená řešení velmi často vizuálně realistická. Zejména pokud však požadujeme dosažení všech tří cílů, lopatka je často velmi deformovaná. Použití mezí způsobuje často podivné chování.

Obrázek 9.4 ukazuje na příkladu snímku 800, jak různě může dopadnout řešení, při různých okolnostech. Při použití všech tří koncových efektorů je cíl bez limitů rotace dosažen za cenu nepřirozeného odklopení lopatky.



Obrázek 9.4: Pohyb ABD, snímek 800, ukázka různého chování lopatky za různých okolností. Vlevo: 3 koncové efektorů bez limitů a s limity. Vpravo: Totéž pro 2 koncové efektorů. Malé rámečky ukazují detail téže situace při pohledu zhora. Lopatka je označena body AI (červený) a TS (zelený).

Naproti tomu při použití limitů cíle dosaženy nejsou. V SC kloubu je příliš velká rotace neodpovídající celkové elevaci, ale lopatka je v pozici adekvátní této poloze.

Případ dvou koncových efektorů je zajímavější. Bez limitů je lopatka v přirozenější pozici, ale při skutečném pohybu by bod AI nebyl nikdy tak blízko páteři. Řešení nalezené s limity opět prosazuje zvýšenou elevaci SC a paže se přibližuje oběma svým cílům z úhlu zjevně jiného, než jak byla při měření. Celkový dojem je značně nepřirozený. Lopatka se sice chová poměrně adekvátně situaci, rameno jako celek však rozhodně ne.

Obecně lze konstatovat, že zavedení limitů do jisté míry vylepšilo pozici lopatky, pokud bez nich byla nerealistická. Se zavedením limitů je jediným problémem přílišné laterální vytáčení lopatky ven kolem AC kloubu. Toto zlepšení je však vykoupeno tím, že se cíl mnohdy stává nedosažitelným.

### 9.3.2 Parametr stiffness

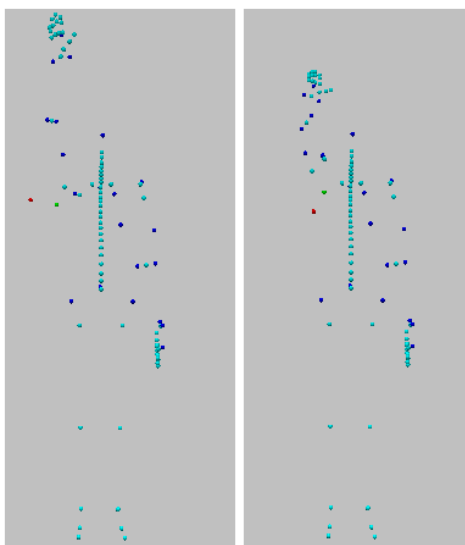
Vzhledem k neuspokojivému chování ramene po aplikaci limitů, byla další fáze testů provedena se dvěma modely, tak, jak je popisuje sekce 8.3.8. První model dodržuje původní plán přidávání jednotlivých omezujících parametrů, využívá limitů a doplňuje je o stiffness dynamicky vyhodnocovanou ze všech známých závislostí.

Druhý model naproti tomu opouští přímé omezování rotací kloubů a omezuje pouze jejich pohyblivost. Skutečné omezení rozsahu pohyblivosti zachovává pouze u GH kloubu, podle jehož hodnot rotace se řídí pohyblivost ostatních kloubů. Závislosti, v nichž GH kloub nefiguruje jako řídicí veličina jsou tedy vynechány.



### Testy dosažitelnosti cíle

Protože tabulky dosažených počtů iterací na dosažené úrovni nepřesnosti ztrácí smysl, nebudeme je zde uvádět. Postačí konstatování, že u prvního modelu, který zachovává omezení rozsahů pohyblivosti, je tabulka dosažených počtů iterací s jedním koncovým efektořem velmi podobná tabulce 9.4. Stejně tak tabulky dosažených počtů iterací s více koncovými efektoři pro metodu *průměrování* i pro metodu *postupného vyhodnocování* se podobají tabulkám 9.5 a 9.6, v maličko horším podání.



Obrázek 9.5: Dynamicky vyhodnocená stiffness mění polohu lopatky. Řešen byl 450. snímek sady FLX s kombinací koncových efektořů ELEMD. Vlevo bez omezení, cíle byly dosaženy, ale lopatka je velmi nepřirozená. Vpravo s druhým modelem stiffness, cíle dosaženy nebyly, ale vliv na polohu lopatky je zřejmý. Lopatka: AI - červená, TS - zelená

Naproti tomu druhý model dopadl s jedním koncovým efektořem výrazně lépe, téměř jako bez omezení, tabulka by odpovídala tabulce 9.1. Pouze u pohybů **EX** a **IN** se objevují oblasti neřešitelných snímků. Jedná se o vysoké zapažení případně o addukci též ve vysoké úrovni elevace. Ve všech těchto polohách je patrná nepřesnost umístění báze řešeného kinematického řetězce způsobená nedostatečnou fixací páteře při snímání těchto pohybů. Může se tedy jednat o polohy pro člověka nedosažitelné.

Dosažené počty iterací pro více koncových efektořů však dopadají pro obě metody o poznání hůře a opět se víc blíží tabulkám 9.5 a 9.6. Je zde však patrné jisté zlepšení a hlavně závislost na počtu koncových efektořů. Pro dvojice koncových efektořů bylo neřešitelných snímků výrazně méně, než

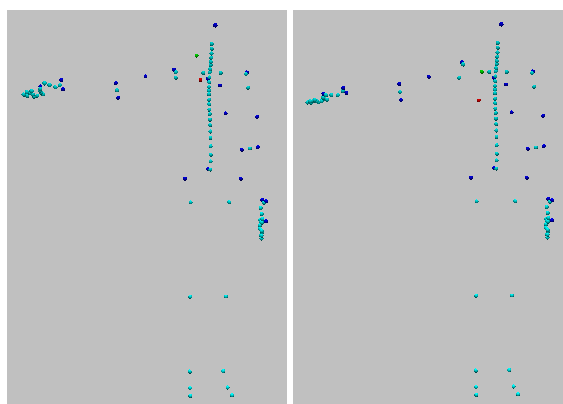
pro trojice. Výjimku tvoří kombinace DEL/ELD, která již byla diskutovaná ve srovnání metod v sekci 9.2.1.

### Zhodnocení vzhledu

Hodnocení vizuálního realismu spočtených postur probíhalo, jak je popsáno v sekci 9.3.1.

Zavedení stiffness má omezovat stavový prostor kinematického řetězce a to se také děje, což vede ke zhoršení celkových výsledků. Stiffness ovšem také má upravovat pořadí a poměr, jakým klouby přispívají k celkovému řešení. V některých vzácných případech to vedlo ke zlepšení oproti situaci bez použití stiffness.

Zajímavé bylo chování druhého sledovaného modelu. Při použití jediného koncového efektoru bylo nalezené řešení víceméně shodné s řešením nalezeným bez omezení. To je dáno pravděpodobně tím, že metoda směřuje k cíli nejkratší cestou a na samém počátku nebyla na klouby uvalena žádná omezení, v tomto případě ani meze rozsahu pohyblivosti. Pokud ovšem došlo na další iterace, nebo postupné přibližování řešením více koncových efektorů, často došlo ke zlepšení vzhledu řešení oproti neomezenému případu. Naproti tomu existovaly případy, kdy byla výsledná poloha lopatky značně nepřirozená i při dosažení celkových cílů.



Obrázek 9.6: Dynamicky vyhodnocená stiffness mění polohu lopatky. Řešen byl 200. snímek sady ABD s kombinací koncových efektorů ELEMD. Vlevo bez omezení, cíle byly dosaženy, ale lopatka je velmi nepřirozená. Vpravo s druhým modelem stiffness, byly cíle také dosaženy s výrazně lepší polohou lopatky. Lopatka: AI - červená, TS - zelená

První model byl příliš ovlivněn použitím limitů na to, aby se dynamická stiffness výrazněji projevila, ačkoliv i tam lze pozorovat její vliv. Chování druhého modelu výrazněji ukazuje účinek této techniky a možná naznačuje

její potenciál. Obrázky 9.5 a 9.6 ukazují příklady situací, kdy druhý model zlepšil polohu lopatky v prvním případě ovšem za cenu ztráty cíle.

Je vidět, že dynamicky vyhodnocovaná stiffness řešení ovlivňuje a někdy i pozitivně. Vzhledem k tomu, že je to problém o mnoha rozměrech, je možné, že jeho bližším průzkumem lze nakonec skutečně dosáhnout fungujícího modelu ramenního komplexu. To by potvrdilo, že jde o krok správným směrem na cestě k obecnému modelu kloubu.

# Kapitola 10

## Závěr

Protože záměrem práce bylo prozkoumat systém ramenního kloubu z hlediska animace inverzní kinematikou, bylo třeba vyrovnat se také s řadou dílčích problémů týkajících se vlastního použití zvolené animační metody. Díky tomu práce přináší velké množství dalších otázek. Není však úplně možné očekávat přehledná a jednoznačná řešení problémů formulovaných tak volně, jako byly problémy této práce.

V této kapitole se pokusíme shrnout výsledky práce. Nejprve se detailněji zaměříme na vlastní hypotézy práce, vedlejší v sekci 10.1 a hlavní 10.2. Nakonec v sekci 10.3 stručně vyjmenujeme jednotlivé oblasti, ve kterých práce jakkoliv přispívá, ať už formulací dalšího problému, nebo nějakým dílčím řešením.

### 10.1 Vedlejší hypotéza a obecné animační aspekty

Použití optického snímání pohybu pro sběr testovacích dat vedlo k potřebě adaptovat zvolenou animační metodu inverzní kinematiky (CCD), která je schopná dosahovat cílů určených prostorovými souřadnicemi polohy a orientace. Je zřejmé, že při použití dat z optického snímače pohybu (jehož funkce byla stručně zmíněna mimo jiné v 2.2.5) se musíme bez znalosti orientace cíle obejít. Pokud však najdeme v dané oblasti těla větší počet bodů vhodných k označení odrazkou, můžeme je sledovat všechny.

Z této úvahy vyplynula vedlejší hypotéza práce: *Animační metodu inverzní kinematiky CCD lze upravit pro použití více koncových efektorů ke zpřesnění výsledné animace.*

#### 10.1.1 Virtuální humanoid

Pro jakoukoliv práci s animační metodou je třeba nejprve vytvořit artikulovanou strukturu k animaci, tedy model člověka. O modelování člověka

obecně se lze dočíst v sekci 2.2.2 a tematiku použitého modelu člověka rozebírá sekce 7.1.

Model použitý pro pokusy s animací neměl pokožku, neboť pokožka je samostatným animačním problémem závislým na chování kostry jakožto vlastní řídicí struktury. Pro nás je důležitá kostra, tedy rozmístění kloubů. A rozmístění kloubů animované struktury by mělo odpovídat tomu u měřeného herce. Naše práce používá záznamy pohybů od jednoho herce. Ze statického měření vybraných bodů byl vytvořen rozměrově odpovídající model.

Ukazuje se, že některé části virtuálního humanoida (např. rameno) mohou být při animaci velmi citlivé i na malé změny polohy kloubů. Výběr měřených bodů na povrchu těla a metodika, jak od nich odvodit polohu kloubu uvnitř, je proto tématem, které zasluhuje systematický průzkum.

### 10.1.2 Snímání pohybu

Vlastní proces snímání pohybu je blíže diskutován v sekci 7.2, která shrnuje co bylo v rámci práce vytvořeno v přímé souvislosti s využitím systému optického snímání pohybu Qualisys.

Odstavec 7.2.1 popisuje práci s odrazkami při měření pohybu horní končetiny. Byla vybrána množina bodů, které lze vhodně označit odrazkami. Ukázalo se, že akromion, který je jako dobře hmatný bod přirozenou volbou, se také pohybuje pod kůží. To je na překážku zejména při měření velkých elevací paže, kdy odrazku odsunuje kontrakce předního pramene deltoidu. Akromion je jediný přiměřeně stabilní hmatný bod v dané oblasti, pro přesná měření pohybu ramene je důležitý. Chování odrazky na něm umístěné si proto zasluhuje systematické pozorování a vyhodnocení, aby bylo možno kompenzovat nepřesnosti plynoucí z pohybu měkkých tkání.

Pro animaci celé horní končetiny (nejen ramene) by mohlo být užitečné zvětšit počet odrazek na ruce (segment podřízený zápěstí) na dva (první a poslední prst místo jen prostředního). Při rozměrech ruky a vhodně nastavenému kritériu přiblížení by metodě neměla vadit možnost drobných změn vzájemné vzdálenosti těchto bodů a segment zápěstí by byl ve vypočtené postuře lépe axiálně rotován.

### 10.1.3 IK metoda

Byla implementována metoda řešení úlohy inverzní kinematiky Cyclic Coordinate Descent (CCD). V naší implementaci tato metoda rozkládá klouby na jednotlivé stupně volnosti, každý 3D kloub je rozložen na tři klouby představující dílčí rotace kolem jednotlivých os souřadného rámce 3D kloubu. Postupným řešením jednotlivých stupňů volnosti směrem od koncového efektoru k bázi se koncový efektor přibližuje cíli. Detaily implementace popisuje sekce 7.3.

Pro adaptaci metody na použití více koncových efektorů byly implementovány dvě možnosti. První spočívá v postupném vyřešení každého kloubu pro všechny koncové efekторы a zprůměrování výsledku. Druhá zase cyklicky střídá koncové efekторы v každé iteraci tak, že k přiblížení jednoho efektoru dochází ze situace výhodné pro efektor předchozí. Sekce 9.2.1 popisuje, jak byly tyto metody testovány a ukazuje poměrně slibné výsledky.

Testovaná adaptace CCD byla také pokusně použita při výpočtu postury z naměřených dat pomocí hierarchie kinematických řetězců z těchto dat automaticky odvozených (viz 9.2.2). Ukázalo se, že původní nápad na použití této myšlenky k animaci rozměrově odlišných virtuálních humanoidů není zrovna životaschopný. Nicméně pro animaci modelu rozměrově shodného s hercem na němž byla pohybová data snímána by tato cesta mohla být vhodná.

#### 10.1.4 Zhodnocení

Oba navržené způsoby adaptace IK metody CCD pro práci s více koncovými efekторы fungují na všech testovaných datech. Očekávané zhoršování dosažitelnosti cílů se zvyšujícím se počtem koncových efektorů nenastalo. Naopak se ukázalo, že nejhůře se metoda chovala pro dvojici koncových efektorů, které ležely v přibližně stejné úhlové poloze vůči ose segmentu (ale v různé vzdálenosti od středu otáčení).

Ačkoliv pro některé sledované snímky řešení nebylo nalezeno, většinou se však stávalo, že byl poměrně snadno řešitelný hned sousední snímek, což bylo překvapivé při snímkovací frekvenci 200Hz mezi nimi nemohl být velký rozdíl. Závěr je, že dosažená míra neúspěšnosti při řešení snímků nemusí být na překážku tvorbě animace.

Vizuální kvalita nalezených řešení byla hlavně při použití tří koncových efektorů velmi slušná z hlediska obyčejné animace. Při zobrazení lopatky se však ukazuje, že tento realismus se vždy netýká i její polohy. Běžný problém animace ramene tedy zůstává.

**Vedlejší hypotézu** (*Animační metodu inverzní kinematiky CCD lze upravit pro použití více koncových efektorů ke zpřesnění výsledné animace*) **můžeme považovat za ověřenou.**

Při vhodné volbě snímaných bodů skýtá kombinace měřícího systému Qualisys a animační metody CCD slibný potenciál pro tvorbu realistických animací. I při neznalosti orientace cíle (což je při práci s optickým snímáním pohybu běžná situace) lze metodu použít najednou pro více sledovaných bodů určených jen jejich souřadnicemi v 3D prostoru.

## 10.2 Hlavní hypotéza

Středem pozornosti práce bylo využití anatomicky daných možností kloubu k vytvoření modelu použitelného v těch animačních úlohách, kde není dostatek vstupní informace k nalezení uspokojivého řešení. Jako příklad nejkomplikovanějšího kloubního spojení v těle byl pro pokusy vybrán komplex ramenního kloubu. Protože parametry modelu jsou závislé na použité animační metodě, byl záměr dále zúžen na práci s metodou řešení úlohy IK Cyclic Coordinate Descent (CCD), která není ve výzkumu často oslovovaná.

Hlavní hypotéza práce tedy zní: *Lze vytvořit takový model kloubu, který bude možné použít při modelování ramenního komplexu tak, aby umožnil animační metodě CCD najít řešení vyhýbající se nerealistickým polohám lopatky.*

### 10.2.1 Geometrie modelu ramene

Model je řešen jako hierarchie geometrických transformací rotace. Není tedy možné měnit vzájemnou polohu kloubů jinak, než otáčením, vzdálenost mezi klouby v hierarchii sousedícími se nemůže měnit. Proto pomocí tohoto modelu nebude možné simulovat extrémní poškození jako je fraktura klíční kosti, která evidentně mění vzdálenost mezi sternoklavikulárním a akromioklavikulárním kloubem.

Rozmístění kloubů modelu v prostoru bylo získáno měřením systémem Qualisys a bylo diskutováno v odstavci 10.1.1. Osy souřadných rámců jednotlivých kloubů byly spočteny z pozic významných bodů na těle tak, jak je uvedeno ve standardu ISB [47]. Polohy těchto bodů byly získány stejně jako polohy kloubů. Blíže se souřadným rámcům kloubů věnuje sekce 8.1.

Sekce 6.4 rozebírá fenomén lopatky z hlediska animačního a naznačuje teoretické možnosti, jak lopatku modelovat realisticky. Vzhledem k zaměření práce na situace s omezenými vstupními daty, na použití optického snímání pohybu a na univerzálnost modelu kloubu, je zde vliv lopatky a skapulotorakálního spojení modelován jen pohybovými omezeními akromioklavikulárního a sternoklavikulárního kloubu.

### 10.2.2 Omezení rotace

Problematicke pohybových parametrů a hlavně omezení kloubů byla věnována kapitola 5. Náš model realizuje omezení rotace kloubů jako limity jednotlivých Eulerových úhlů, složek celkové 3D rotace. Tento jednoduchý přístup vyhovuje datovým strukturám standardu H-Anim a také je v souladu s běžnou praxí měření pohybových rozsahů kloubů [17]. Z literatury získané meze rotací kolem jednotlivých os byly použity v modelu tak, jak je uvedeno v sekci 8.2.

### 10.2.3 Dynamické pojetí parametru *stiffness*

Na pohyblivost kloubu působí během pohybu množství vlivů. Bývají v animačních modelech vyjádřeny parametrem *stiffness*, který je však pojímán staticky, jako číslo z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ , kterým se násobí řešení nalezené pro daný kloub. Tato práce se pokusila zohlednit fakt, že pohyblivost kloubů se během pohybu mění a *stiffness* by měla být pojata **dynamicky**.

Tento aspekt modelu rozebírá sekce 8.3, kde jsou vypsané vlivy na pohyblivost kloubů ramene, jak se je podařilo identifikovat z literatury.

Každý z těchto vlivů je vyjádřen jako zobrazení do intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$  a toto zobrazení je při výpočtu postury vyhodnoceno v závislosti na aktuální hodnotě řídicí proměnné.

Protože tyto vlivy mohou působit zároveň, nebo alternativně, lze k jejich skládání s úspěchem použít **fuzzy logických operací** součinu a součtu.

### 10.2.4 Testy modelu ramene

Model byl testován na čtyřech datových sadách (viz 9.1) dvěma způsoby. Jednak automaticky na velkém množství snímků z hlediska dosažitelnosti cíle. Druhý způsob testování byl zaměřen na vizuální realismus nalezené postury. Tyto testy nebylo možné provádět ve velkém rozsahu, protože bylo třeba každé řešení posoudit. Kdyby bylo možné vypracovat metodiku, jak automaticky číselně zhodnotit kvalitu spočtené postury, bylo by možné i tyto testy automatizovat a provést ve velkém rozsahu. Zobecnění a kvantifikace kritérií používaných při posouzení postury by mohlo být jedním z možných směrů dalšího výzkumu.

Testy modelu ramene, blíže diskutované v sekci 9.3 ukazují, že ve sledovaných datech existují snímky, pro něž lze zlepšit výpočet postury použitím limitů rotace nebo dynamicky vyhodnocované *stiffness*. Ani jeden z parametrů však není příliš úspěšný. Především se ale ukazuje, že **lze dynamicky měnit pohyblivost kloubů**. Jedná se však o problém o příliš mnoha parametrech, které si vyžadují důkladný průzkum.

Dá se také konstatovat, že možnosti testování byly negativně ovlivněny tím, že pro testy byla použita nová metoda.

### 10.2.5 Zhodnocení modelu ramene

Z pokusů a získaných zkušeností vyplývá, že metoda CCD je metoda hodící se k rychlému nalezení nějakého řešení, která ovšem neposkytuje mnoho možností k zobecnění omezujících parametrů. Tato metoda dobře pracuje s neomezeným kinematickým řetězcem a je schopná dobře zvládnout i práci s více koncovými efekty, pokusy o zavedení pohybových omezení kloubů však selhávají.

Pokusy se zavedením samotných omezení bez vyhodnocování *stiffness* ukazují neúnosně vysokou chybovost v oblasti vyšších elevací. I snímky bez



omezení řešitelné úspěšně a s poměrně realistickou polohou lopatky, jsou po zavedení limitů neřešitelné. Další omezování prostoru řešení zavedením parametru stiffness situaci přirozeně jen dále zhoršuje.

Navíc metoda nepostupuje k cíli postupně, jako pracují metody s Jakobianem, ale od počátku se snaží nalézt nejkratší cestu k řešení. Odtud plyne její výhoda rychlé konvergence, ale zároveň se těžko realizují omezení zohledňující pohybový soulad kloubů ramene (*shoulder rhythm*).

Závěrem tedy je, že metodu CCD se nevyplatí vylepšovat zaváděním pohybových omezení, neboť její síla je skutečně jen ve výpočetní nenáročnosti a rychlé počáteční konvergenci. Parametr stiffness zde může být tím, čím dosud byl - statickou prioritou tlumící některé stupně volnosti, aby k řešení mohly přispět i jiné, umístěné dále od koncového efektoru. Takto by se například mohla využít u jednotlivých obratlů k eliminaci efektu zmíněného odstavcem 9.2.2 a k lepší animaci pomocí hierarchie kinematických řetězců.

Sekce 5.8 začíná úvahou, jak by se dala zobecněná dynamická stiffness využít a za jakou výpočetní cenu. Experimenty přinejmenším ukazují, že odpověď na tu poslední otázku bude: Za příliš velkou výpočetní cenu. Jednoduchou metodu CCD nemá smysl tímto komplikovat. Větší šanci by mohly mít metody založené na Jakobianu, které cíle dosahují po rovnoměrných krocích.

**Hypotéza:** *”Lze vytvořit takový model kloubu, který bude možné použít při modelování ramenního komplexu tak, aby umožnil animační metodě CCD najít řešení vyhýbající se nerealistickým polohám lopatky”* tedy rozhodně **ověřena nebyla**.

Pokud lze vytvořit obecný model kloubu použitelný pro animaci ramene, tak z dosavadních experimentů je zřejmé, že to rozhodně nebude s metodou CCD bez nějakých zásadních úprav. V tomto smyslu **lze hypotézu považovat za vyvrácenou**.

Obecněji pojatou počáteční variantu hlavní hypotézy uvedenou v sekci 1.1 však na základě těchto výsledků za vyvrácenou považovat nelze. Testy ukazují, že **dynamická stiffness může být funkční**, pouze zatím není probádána natolik, aby se stala použitelným nástrojem.

## 10.3 Shrnutí

Úplně na závěr stručně shrňme výsledek práce z hlediska přínosu i rozpoznávaných dalších problémů.

### 10.3.1 Animační metoda

Přínos:

- Geometrický popis virtuálního humanoida.

- Výběr bodů pro měření pohybů horní končetiny.
- Implementace neomezeného CCD IK solveru.
- Adaptace metody CCD na libovolný počet koncových efektorů (dva způsoby).
- Automatická tvorba hierarchie kinematických řetězců z nasnímaných dat a její použití k animaci postavy.

Další úkoly:

- Metodika měření středů kloubů.
- Detailnější průzkum bodů pro měření horní končetiny (akromion, ruka).
- Průzkum možností animace nasnímanými daty pomocí hierarchie kinematických řetězců. To zahrnuje nastavení pohybových parametrů ostatních kloubů (páteř) a zobecnění výpočtu globální transformace.
- Generování animace z postur vypočtených jakoukoliv metodou - čištění animačních křivek.

### 10.3.2 Model ramene

Přínos:

- Koncepce **dynamické stiffness** - identifikace vlivů měnících pohyblivost kloubů ramene.
- Použití **fuzzy logických operací** pro skládání těchto vlivů.
- Slepá ulička použití metody CCD.

Další úkoly:

- Ověření dynamické stiffness s metodou řešení úlohy IK, která k řešení dochází **postupně**.
- Vytvoření metodiky číselného hodnocení kvality spočtené postury z hlediska anatomického realismu.
- Podrobnější a systematictější testy modelu dynamické stiffness - identifikace problémových složek a jejich ladění

# Literatura

- [1] Patobiomechanika a patokinesiologie kompendium. www online resource. <http://biomech.ftvs.cuni.cz/pbpk/kompendium/index.php>.
- [2] C. Babski and D. Thalmann. A seamless shape for HANIM compliant bodies. In *Proceedings of VRML 99*, pages 21 – 28. ACM Press, 1999.
- [3] P. Baerlocher and R. Boulic. *Deformable Avatars*, chapter Parametrization and range of motion of the ball-and-socket joint, pages 180–190. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [4] P. Baerlocher and R. Boulic. An inverse kinematics architecture enforcing an arbitrary number of strict priority levels. *Visual Computer*, 2004.
- [5] Roman Berka. *Level of Motion Detail in Virtual Reality*. PhD thesis, Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, 2002.
- [6] R. Boulic, R. Mas, and D. Thalmann. Interactive Identification of the Center of Mass Reachable Space for an Articulated Manipulator. In *Proc. of International Conference of Advanced Robotics ICAR'97*, 1997.
- [7] S. Dayanidhi, M. Orlin, S. Kozin, S. Duff, and A. Karduna. Scapular kinematics during humeral elevation in adults and children. *Clinical Biomechanics*, 20:600–606, 2005.
- [8] Z. Dvir and N. Berme. The Shoulder Complex in Elevation of the Arm: A Mechanism Approach. *Journal of Biomechanics*, 11:219 – 225, 1978.
- [9] I. Dylevský, R. Druga, and O. Mrázková. *Funkční anatomie člověka*. Grada, 2000.
- [10] David H. Eberly. *3D Game Engine Design: A Practical Approach to Real-time Computer Graphics*. Morgan Kaufmann publishers, 2001.
- [11] P. Fua, L. Herda, R. Plaenkers, and R. Boulic. Human Shape and Motion Recovery Using Animation Models. In *19th Congress, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000.

- [12] M. Girard. *Making Them Move*, chapter Constrained Optimization of Articulated Animal Movement in Computer Animation, pages 209–232. Morgan-Kaufmann, 1991.
- [13] L. Herda, R. Urtasun, P. Fua, and A. Hanson. Automatic Determination of Shoulder Joint Limits using Quaternion Field Boundaries. *International Journal of Robotics Research*, 22(6), 2003.
- [14] K. Hoshino. Interpolation and Extrapolation of Motion Capture Data. In *Proceedings of International Workshop on Lifelike Animated Agents Tools, Affective Functions, and Applications*, pages 40 – 45, 2002.
- [15] Vít Houska. Animace na GPU. Master’s thesis, MFF UK, 2005.
- [16] R. Čihák. *Anatomie*.
- [17] V. Janda and D. Pavlů. *Goniometrie*. Institut pro další vzdělávání pracovníků ve zdravotnictví, Brno, 1993.
- [18] H. Jing and E. C. Prakash. Sinus Cone - A ThetaPhi Algorithm for Human Arm Animation. In *Proceedings of IEEE Conference on Information Visualization*, pages 318–322, 2000.
- [19] I. A. Kapandji. *The Physiology of the Joints*, volume 1. Churchill Livingstone, 1970.
- [20] Ladislav Kavan and Jiří Žára. Real-time skin deformation with bones blending. In *WSCG Short Papers Proceedings*, 2003.
- [21] Ladislav Kavan and Jiří Žára. Spherical blend skinning: A real-time deformation of articulated models. In *2005 ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. ACM Press, April 2005.
- [22] N. Klopčar, M. Tomšič, and J. Lenarčič. A kinematic model of the shoulder complex to evaluate the arm-reachable workspace. *Journal of Biomechanics*, 40:81 – 91, 2007.
- [23] Caroline Larboulette, Marie-Paule Cani, and Bruno Arnaldi. Dynamic Skinning: Adding Real-Time Dynamic effects to an Existing Character Animation. In *SCCG '05: Proceedings of the Spring Conference on Computer Graphics*, pages 85–91, New York, USA, May 2005. ACM.
- [24] S. Lim, I. and D. Thalmann. *Deformable Avatars*, chapter A Vector-Space Representation of Motion Data for Example Based Motion Synthesis, pages 169 – 179. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [25] Martin Linda, Vladimír Štěpán, and Sporka Adam. The Drum Set Tutorial System by Means of Inverse Kinematics. In *CEMVR '05*:

*Proceedings of the Central European Multimedia and Virtual Reality Conference*, page 75–80, Aire-la-Ville, Switzerland, June 2005. Eurographics Digital Library.

- [26] G. Loy, M. Eriksson, J. Sullivan, and S. Carlsson. Monocular3D Reconstruction of Human Motion in Long Action Sequences. In Tomáš Pajdla and Jiří Matas, editors, *Proceedings of ECCV 2004: 8th European Conference on Computer Vision*, volume 4, pages 442 – 455. Springer-Verlag, 2004.
- [27] W. Maurel and D. Thalmann. A case study analysis on human upper limb modeling for dynamic simulation. In *Journal of Computer Methods in Biomechanics and Biomechanical Engineering*, volume 2, pages 65 – 82, 1999.
- [28] W. Maurel and D. Thalmann. Human shoulder modeling including scapulo-thoracic constraint and joint sinus cones. *Computers and Graphics*, 24:203 – 218, 2000.
- [29] M. Meredith and S. Maddock. Motion Capture File Formats Explained. <http://www.dcs.shef.ac.uk/~mikem/research/mocap.html>.
- [30] S. Oore, D. Terzopoulos, and G. Hinton. Local Physical Models for Interactive Character Animation. In *Computer Graphics Forum, The International Journal of the Eurographics Association*, volume 21, pages 337 – 346, September 2002.
- [31] Cary B. Phillips and Norman Badler. Jack: A Toolkit for Manipulating Articulated Figures. In *Proceedings of the 1st annual ACM SIGGRAPH symposium on User Interface Software*, pages 221 – 229, 1988.
- [32] J. Semančík, J. Pelikán, and J. Žára. Synthesis of Terrain-Adapted Walk from Example Steps. In *VIIP '04: Proceedings of the Visualization, Imaging and Image Processing*, 2004.
- [33] S. Standring. *GRAY'S ANATOMY: The Anatomical Basis of Medicine and Surgery, 39th Edition*. Elsevier Churchill Livingstone, 2005.
- [34] V. Štěpán and S. Otáhal. *Biomechanics, Biofluidics and Alternative Biomaterial Substitutions*, chapter Biomechanics and Virtual Reality. Charles University In Prague, 2006.
- [35] Vladimír Štěpán and Jiří Žára. Teaching Tennis in Virtual Environment. In *SCCG '02: Proceedings of the Spring Conference on Computer Graphics*, pages 49–54, New York, USA, April 2002. ACM.

- [36] Vladimír Štěpán, Jiří Žára, and Václav Hlaváč. Scene Modelling and 3D Presentation of Learned Activities – Design Issues. Research Report CTU–CMP–2002–17, Center for Machine Perception, K13133 FEE Czech Technical University, Prague, Czech Republic, November 2002.
- [37] Vladimír Štěpán, Jiří Žára, and Václav Hlaváč. Describing Human Activities for VR Presentation. In *VIIP '03: Proceedings of the Visualization, Imaging and Image Processing*, pages 37–42, Anaheim, USA, September 2003. IASTED.
- [38] Vladimír Štěpán, Jiří Žára, and Václav Hlaváč. Virtual Reality Presentation Demo: Human Activities in VR. Research Report CTU–CMP–2003–21, Center for Machine Perception, K13133 FEE Czech Technical University, Prague, Czech Republic, October 2003.
- [39] Vladimír Štěpán, Jiří Žára, and Václav Hlaváč. Virtual Reality Presentation Demo: Replay of Interpreted Activity. Research Report CTU–CMP–2004–12, Center for Machine Perception, K13133 FEE Czech Technical University, Prague, Czech Republic, October 2004.
- [40] Vladimír Štěpán, Jiří Žára, and Václav Hlaváč. Presenting Generalized Human Activities in Virtual Environment. In *SCCG '05: Proceedings of the Spring Conference on Computer Graphics*, pages 49–56, New York, USA, May 2005. ACM.
- [41] D. Tolani, A. Goswami, and N. I. Badler. Real-time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs. *Graphical Models*, 5(62):353–388, 2000.
- [42] M. Unuma, K. Anjyo, and R. Takeuchi. Fourier Principles for Emotion-based Human Figure Animation. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 91–96. ACM Press, 1995.
- [43] A. Watt and M. Watt. *Advanced Animation and Rendering Techniques*. ACM Press, 1992.
- [44] Ch. Welman. Kinematics and geometric constraints for articulated figure manipulation. Master's thesis, Simon Fraser University, 1993.
- [45] S. K Wilcox. *Web developer.com Guide to 3D Avatars*. John Wiley and Sons, Inc., Canada, 1998.
- [46] J. Wilhelms, A. Van Gelder, L. Atkinson-Derman, and A. Luo. Human Motion from Active Contours. In *Proceedings of Workshop on Human Motion (HUMO'00)*, 2000.

- [47] G. Wu, F. C. T. van der Helm, H. E. J. Veeger, M. Makhsous, P. Van Roy, C. Anglin, J. Nagels, A. R. Karduna, K. McQuade, X. Wang, F. W. Werner, and B. Buchholz. ISB recommendation on definitions of joint coordinate systems of various joints for the reporting of human joint motion—Part II: shoulder, elbow, wrist and hand. *Journal of Biomechanics*, 38(5):981 – 992, 2005.
- [48] Katsu Yamane. *Simulating and Generating Motions of Human Figures*. Springer-Verlag, 2004.
- [49] Jiří Žára. *Laskavý průvodce virtuálními světy*. Computer Press, 1999.
- [50] Jiří Žára, Bedřich Beneš, Jiří Sochor, and Petr Felkel. *Moderní počítačová grafika*. 2. vydání, Computer Press, 2004.
- [51] Domovská stránka projektu ActIPret. <http://actipret.infa.tuwien.ac.at>.
- [52] Stránky software Alias Maya. <http://www.alias.com>.
- [53] Avatar Studio, Canal Numedia. <http://www.vrmlworlds.com/software/avatarstudio/>.
- [54] Stránky firmy Blaxxun. <http://www.blaxxun.com>.
- [55] Stránky projektu CAHRISMA. <http://vrlab.epfl.ch/Projects/cahrisma.html>.
- [56] Stránky sdružení CIANT. <http://www.ciant.cz>.
- [57] Stránky firmy Eidos Interactive. <http://www.eidosinteractive.com>.
- [58] H-Anim (Human Animation Working Group). <http://www.hanim.org>.
- [59] Stránky projektu LIFEPLUS. <http://www.miralab.unige.ch/subpages/lifeplus/>.
- [60] Internetová matematická encyklopedie Mathworld. <http://mathworld.wolfram.com>.
- [61] Oficiální web Parallel Graphics (Cortona VRML client). <http://www.parallelgraphics.com>.
- [62] Rastislav Hromádka. Anatomický ústav 1.LF UK, interaktivní část internetových stránek. <http://www.rastho.com>.
- [63] Stránky hry Rome: Total War. <http://www.totalwar.com/community/rome.htm>.

- [64] Stránky projektu VHCE. <http://www.vhce.info>.
- [65] Virtual Reality Lab (former LIG), EPFL Lausanne. <http://vrlab.epfl.ch>.