

UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Fakulta tělesné výchovy a sportu

Katedra anatomie a biomechaniky

Autoreferát disertační práce

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

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

Praha 2009

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

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Úvod | 4 |
| 2 | Formulace hypotéz | 4 |
| 2.1 | Hlavní hypotéza | 5 |
| 2.2 | Vedlejší hypotéza | 5 |
| 3 | Obecné animační aspekty řešení | 6 |
| 3.1 | Virtuální humanoid | 6 |
| 3.2 | Snímání pohybu | 6 |
| 3.3 | IK metoda | 7 |
| 3.4 | Zhodnocení | 7 |
| 4 | Model ramenního komplexu | 8 |
| 4.1 | Geometrie modelu ramene | 8 |
| 4.2 | Omezení rotace | 9 |
| 4.3 | Dynamické pojetí parametru stiffness | 9 |
| 4.4 | Testy modelu ramene | 9 |
| 4.5 | Zhodnocení modelu ramene | 10 |
| 5 | Shrnutí | 11 |
| 5.1 | Animační metoda | 11 |
| 5.2 | Model ramene | 12 |

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. Uveďme tři širší okruhy možného využití takového modelu:

- **Animace** s malým množstvím vstupních dat.
- **Generování pohybů** interpolací mezi známými příklady (potřeba posoudit realismus výsledku).
- **Počítačové vidění** - 3D rekonstrukce postury ze záznamu jedné kamery.

Dále není bez zajímavosti možné využití těchto 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. 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.

2 Formulace hypotéz

Základní hypotéza vyjadřující střed našeho zájmu 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 v práci zaměřujeme 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. Naši 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 linearizace 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).

2.1 Hlavní hypotéza

Vzmemme-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.

2.2 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). Pokud však najdeme v dané oblasti těla větší počet bodů vhodných k označení odrazkou, můžeme je sledovat všechny. 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.*

3 Obecné animační aspekty řešení

Aby bylo vůbec možné ověřovat nápady týkající se modelu ramene, bylo potřeba vyřešit množství problémů týkajících se animační metody. Lze je rozdělit do několika tematických celků, které zde postupně stručně předneseme. V odstavci 3.1 bude popsána použitá artikulovaná struktura virtuálního humanoida. Odstavec 3.2 se pak bude věnovat problematice použití dat nasnímaných optickým snímačem pohybu. A nakonec odstavce 3.3 popíše vlastní implementaci animační metody CCD. Tato metoda byla uzpůsobena použití více koncových efektorů, čehož se týkala vedlejší hypotéza celé práce. Ověření této hypotézy zhodnotí odstavce 3.4.

3.1 Virtuální humanoid

Pro jakoukoliv práci s animační metodou je třeba nejprve vytvořit artikulovanou strukturu k animaci, tedy model člověka.

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.

3.2 Snímání pohybu

Na tomto místě nebudeme popisovat vše, co bylo vytvořeno v souvislosti s využitím systému optického snímání pohybu Qualisys, většinou jde o běžně používané postupy, či o obyčejnou programátorskou práci. Zaměříme se na aspekty, které lze vnímat jako problém. Z hlediska diskutované práce je zajímavé zacházení s odrazkami při měření pohybu horní končetiny. Byla vybrána množina bodů, které lze vhodně označit odrazkami:

```
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
```

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.

3.3 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.

Pro adaptaci metody na použití více koncových efektorů byly implementovány dvě možnosti. První spočívá v postupném vyřešení každého kloubu pro všechny koncové efektorů a *průměrování* výsledku. Druhá se *postupně přibližuje* cyklickým střídáním koncových efektorů v každé iteraci tak, že k přiblížení jednoho efektoru dochází ze situace výhodné pro efektor předchozí. Testy těchto metod z hlediska dosažitelnosti cílů ukazují 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. 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.

3.4 Zhodnocení

Oba navržené způsoby adaptace IK metody CCD pro práci s více koncovými efektorů 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 měřicího 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.

4 Model ramenního komplexu

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. Navržený model se skládá z geometrické části, kterou přiblíží odstavec 4.1 a z části pohybových omezení - limitů rozsahu pohyblivosti (4.2) a *stiffness* ("tuhost", priorita, odstavec 4.3). Různé varianty modelu byly testovány, jak popisuje odstavec 4.4. Zhodnocení modelu přináší poslední odstavec 4.5.

4.1 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. 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.

Z hlediska animačního představuje specifický problém lopatka. Teoreticky existuje několik způsobů jejího realistického modelování. 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.

4.2 Omezení rotace

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.

4.3 Dynamické pojetí parametru stiffness

Na pohyblivost kloubu působí během pohybu množství vlivů. Bývají v animačních modelech vyjádřeny parametrem *stiffness*, který je však pojmán 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**.

Z literatury se podařilo identifikovat několik vlivů působících na pohyblivost kloubů ramene. 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.

4.4 Testy modelu ramene

Model byl testován na čtyřech datových sadách 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 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 vyžádají důkladný průzkum.

Dá se také konstatovat, že možnosti testování byly negativně ovlivněny tím, že pro testy byla použita nová metoda.

4.5 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 Jakobiánem, 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 lepší animaci pomocí hierarchie kinematických řetězců.

Jednou z počátečních motivačních otázek bylo, 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 Jakobiánu, 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 2 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.

5 Shrnutí

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.

Vedlejší hypotéza práce byla **potvrzena**.

Hlavní hypotéza práce v jejím specifickém znění dle 2.1 byla **vyvrácena**. Původní hypotéza uvedená na začátku 2 jako motivace celé práce však dosaženými výsledky vyvrácena nebyla.

Úplně na závěr stručně shrňme výsledek práce z hlediska přínosu i rozpoznávaných dalších problémů.

5.1 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.

5.2 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 systematičtější testy modelu dynamické stiffness - identifikace problémových složek a jejich ladění

Reference

- [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 Araldi. 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 *VIIIP '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 *VIIIP '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] Katsuyama. *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.