



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ
FAKULTA**
Univerzita Karlova

DIPLOMOVÁ PRÁCE

František Frühbauer

Geometrické základy fotogrammetrie

Katedra didaktiky matematiky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Petra Surynková, Ph.D.

Studijní program: Matematika

Studijní obor: Učitelství matematiky – deskriptivní geometrie
pro střední školy

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V dne

Podpis autora

Název práce: Geometrické základy fotogrammetrie

Autor: František Frühbauer

Katedra: Katedra didaktiky matematiky

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Petra Surynková, Ph.D., Katedra didaktiky matematiky

Abstrakt: Diplomová práce Geometrické základy fotogrammetrie se podrobně zabývá konstruktivní fotogrammetrií a geometrickou rekonstrukcí vodorovného a šikmého snímku. Práce obsahuje rovněž kapitolu o fotogrammetrii jako vědním oboru a kapitolu o tříúběžníkové perspektivě. V závěru se práce věnuje geometrické rekonstrukci dvou snímků a rekonstrukci snímku s využitím výpočetního softwaru. Práce je určena studentům vysokých škol technických a některých přírodovědných oborů, studentům gymnázií a středních průmyslových škol technického zaměření a zájemcům o fotogrammetrii. Hlavní část diplomové práce je zpracována formou řešených příkladů a dává návod na rozšíření výuky v oblasti deskriptivní geometrie na středních a vysokých školách. Text práce je doplněn množstvím obrázků a prostorových vizualizací, které byly vytvořeny v moderním 3D modelovacím softwaru a tvoří podstatný přínos práce.

Klíčová slova: fotogrammetrie, konstruktivní fotogrammetrie, vodorovný snímek, šikmý snímek, lineární perspektiva

Title: Geometric Principles of Photogrammetry

Author: František Frühbauer

Department: Department of Mathematics Education

Supervisor: RNDr. Petra Surynková, Ph.D., Department of Mathematics Education

Abstract: The diploma thesis Geometric Principles of Photogrammetry deals with constructive photogrammetry and geometrical reconstruction of horizontal and oblique image. The paper also contains a chapter on photogrammetry as a subject of science and a chapter on three-point perspective. Graphical methods for reconstruction of individual images are used. At the end, the thesis deals with the geometric reconstruction of two images and the reconstruction of the image using the computational software. The thesis is intended for students of technical and some of the natural science universities, students of grammar schools and technical high schools and to all who are interested in photogrammetry. The main part of the diploma thesis is elaborated in the form of solved examples and provides instructions for an extension of the descriptive geometry education at high schools and universities. The text of the work is complemented by a number of pictures and spatial visualizations that were created in a modern 3D modeling software and form a substantial contribution of the thesis.

Keywords: photogrammetry, constructive photogrammetry, horizontal image, oblique image, linear perspective

Děkuji přátelům, rodině a pedagogům z Katedry didaktiky matematiky, zejména RNDr. Petře Surynkové, Ph.D., za neutuchající podporu při vzniku této práce.

Obsah

Úvod	2
1 Fotogrammetrie	4
1.1 Definice	4
1.2 Historie fotogrammetrie	5
1.3 Rozdělení fotogrammetrie	8
1.4 Prvky vnitřní a vnější orientace	11
1.4.1 Prvky vnitřní orientace	11
1.4.2 Prvky vnější orientace	12
1.5 Využití fotogrammetrie	13
2 Vodorovný snímek	16
2.1 Rekonstrukce vodorovného snímku	16
2.2 Potřebné informace o snímku	21
3 Tříúběžníková perspektiva	24
3.1 Definice a základní pojmy	24
3.2 Základní konstrukce	28
4 Šikmý snímek	38
5 Šikmý snímek – ukázka využití	46
5.1 Rekonstrukce snímků	46
5.2 Tvorba snímku za účelem rekonstrukce	58
6 Rekonstrukce ze dvou snímků	60
7 Digitální fotogrammetrie	64
Závěr	71
Seznam obrázků	72
Seznam použité literatury	74
Příloha 1 - zadání příkladů	76

Úvod

Diplomová práce Geometrické základy fotogrammetrie se zabývá konstruktivní fotogrammetrií a geometrickou rekonstrukcí vodorovného a šikmého snímku. V práci jsou využívány zejména grafické metody pro zpracování jednoho snímku.

Lineární perspektiva, fotogrammetrie a konstruktivní fotogrammetrie jsou významnou aplikací deskriptivní geometrie. Tato skutečnost ve spojení se zájmem o práci s modelovacími programy a vytvářením vizualizací a touha po rozšiřování povědomí o možnostech aplikace matematiky a deskriptivní geometrie například ve výuce na středních školách posloužily jako motivace k napsání této práce. Práce volně navazuje na bakalářskou práci stejného autora.

Diplomová práce je určena studentům vysokých škol technických a některých přírodovědných oborů, studentům gymnázií a středních průmyslových škol technických oborů a zájemcům z řad široké veřejnosti. Diplomová práce u čtenáře předpokládá již alespoň základní znalosti z předmětů matematika a deskriptivní geometrie v oblasti stereometrie a rovnoběžného a středového promítání.

Cílem práce je seznámit čtenáře s oborem fotogrammetrie obecně a zejména pak s možností využití grafických metod konstruktivní fotogrammetrie k rekonstrukci jednotlivých snímků. Práce si rovněž klade za cíl nahlédnout za obzor běžného rozsahu výuky fotogrammetrie v deskriptivní geometrii a poskytnout možnost rozšíření výuky směrem algoritmizace geometrických postupů a využití výpočetních softwarů pro potřeby konstruktivní fotogrammetrie. Dalším cílem je vytvoření učebního textu v oblasti grafických metod konstruktivní fotogrammetrie jakožto rozšiřující možnosti výuky deskriptivní geometrie na středních a vysokých školách. Studenti mohou díky podrobnému popisu řešených příkladů sami rekonstruovat vlastní snímky. Konstruktivní fotogrammetrie může rozšířit výuku nejenom v předmětu deskriptivní geometrie, jelikož na středních školách bývají základy lineární perspektivy obsahem i dalších předmětů, například výtvarné výchovy.

Text diplomové práce Geometrické základy fotogrammetrie je doplněn o velké množství ilustrujících obrázků a prostorových vizualizací, které pomáhají pochopit vysvětlovaná témata. Ač jejich vytvoření bylo časově náročné, jsou důležitým přínosem práce. Obrázky a prostorové modely byly vytvořeny v modelovacím programu Rhinoceros®¹. U prostorových vizualizací se můžeme setkat s drátěnými nebo poloprůhlednými modely rýsovaných objektů. K lepší orientaci v obrázcích jsme využili různé druhy, barvy a tloušťky čar. Ve vizualizacích byla snaha vždy najít co nejzřetelnější a nejsrozumitelnější pohled na situaci. Ilustrace konstrukcí

¹Název Rhinoceros je registrovaná ochranná známka společnosti Robert McNeel. & Associates.

jsou pro přehlednost rozděleny do několika částí. Z pohledu starších učebnic je velkým přínosem této diplomové práce vytvoření nových obrázků v moderním modelovacím softwaru. S prostorovými vizualizacemi lze v modelovacím softwaru hýbat a pozorovat je tak z různých pohledů. Seznam obrázků je přiložen na konci práce. Zdrojové soubory obrázků a vizualizací nalezne čtenář na přiloženém kompaktním disku.

Text práce je rozdělen do kapitol, které na sebe volně navazují. Struktura práce je následující. V první kapitole se seznámíme s oborem fotogrammetrie obecně. Prostudujeme zařazení, historii, rozdělení a možnosti uplatnění. Druhá kapitola je věnována rekonstrukci vodorovného snímku. Tomuto tématu se již věnovala celá bakalářská práce stejného autora, nicméně pro získání uceleného obrazu o možnostech geometrických rekonstrukcí snímků považujeme za vhodné tuto kapitolu zařadit. Třetí kapitola se zabývá základními konstrukcemi tříúběžníkové perspektivy, které jsou využity ve čtvrté kapitole k rekonstrukcím šikmého snímku. V páté kapitole si ukážeme možnosti rekonstrukce z konkrétních fotografií. Představíme si i stručný návod k fotografování snímků vhodných pro geometrickou rekonstrukci snímků. V šesté kapitole si v krátkosti přiblížíme možnosti geometrické rekonstrukce ze dvou snímků. V poslední, sedmé, kapitole se text práce věnuje řešení problémů konstruktivní fotogrammetrie a rekonstrukce vodorovného snímku za pomoci výpočetního softwaru. Konkrétně byl využit výpočetní program MATLAB[®]².

V příloze 1 nalezne čtenář předtisky popisovaných vzorových příkladů z různých kapitol. Na přiloženém kompaktním disku jsou uloženy zdrojové soubory obrázků a vizualizací, zdrojový kód vytvořené funkce pro řešení příkladu v sedmé kapitole a samotný text diplomové práce.

²Název MATLAB je registrovaná ochranná známka společnosti *The Math WorksTM, Inc.*

1. Fotogrammetrie

Fotogrammetrie jako věda se rozvinula do mnoha odvětví lidské činnosti. V podkapitole definice si krátce popíšeme její charakteristiku. Fotogrammetrie, jak ji chápeme v současnosti, vznikla před více než 150 lety a od té doby prochází aktivním vývojem. V podkapitole o historii fotogrammetrie zmíníme ovlivňující události jejího rozvoje. Vzhledem k šíři záběru tématu fotogrammetrie si popíšeme její rozdělení z několika hledisek. Na závěr kapitoly zmíníme některá současná využití fotogrammetrie v praxi. V této kapitole byly informace čerpány převážně z [4], [1] a [5].

1.1 Definice

Slovo *fotogrammetrie* vychází z řeckých slov $\varphi\omega\varsigma$ (phōs) - světlo, $\gamma\rho\acute{\alpha}\mu\mu\alpha$ (gramma) - záznam a $\mu\acute{\epsilon}\tau\rho\omicron\nu$ (metron) - měření.

Obecně lze fotogrammetrii charakterizovat jako vědní obor, který se zabývá získáním informací z obrazového záznamu. Podrobnější definice je následující.

Definice. *Fotogrammetrie je věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, modelů a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu.* Definice je převzata z [8].

Dále využitelnými měřeními můžeme rozumět nejen délky, povrchy a objemy objektů zájmu ale i jejich vzájemné polohy. Lze dobře zaznamenávat i vývoj vlastností objektu, provádíme měření ze snímků pořízených v čase. Obecněji můžeme zařadit fotogrammetrii mezi měřické metody. Velkou výhodou fotogrammetrie jako měřické metody je možnost zpracování informací a provedení požadovaných měření mimo prostor měření například v kanceláři. Tento způsob měření nazýváme bezkontaktní. Zjištění informací není tedy časově omezeno z důvodu aktuálního počasí nebo dopravního provozu. Například díky fotogrammetrii se zkrátila nutná doba pobytu vyšetřovatelů a blokování plynulosti provozu v místě dopravních nehod. Pro sběr dat potřebných k fotogrammetrickému měření je potřeba relativně krátká doba. Další výhodou je možnost opakovaného měření a zpřesňování výsledků. Opět například v průběhu řešení dopravní nehody při objevení dalších skutečností nemusí vyšetřovatelé znovu nehodu simulovat, ale často stačí provést další měření ze snímků. Zaznamenávání vývoje se využívá například v hornictví při měření objemů těžných a odtěžených materiálů nebo ve stavebnictví při vyhodnocování vývoje staveb.

Obrazovým materiálem rozumíme nejčastěji fotografie nebo měřické snímky. Měřický snímek je fotografie doplněná o další údaje sloužící k přesnému zpracování snímku. Bývá pořízen pomocí měřické komory, což je speciální fotoaparát, u kterého je laboratorně změřena ohnisková vzdálenost a fotografie jsou doplněny o měřické značky, které usnadňují určení prvků vnitřní orientace snímků (viz podkapitola 1.4). U pozemní fotogrammetrie se používá měřická komora nazvaná *phototeodolit*. V pozemní i letecké fotogrammetrii se používají *stereofotoaparáty*

pro vznik dvojic snímků. Při digitálním zpracování historických snímků dochází ke skenování snímků. Ve fotogrammetrii se také využívají snímky z neviditelného spektra světla. Například se využívá infračervených záznamů ke zjišťování zdravotního stavu zeleně. Na druhou stranu jsou hojně využívány i obyčejné snímky z digitálních fotoaparátů, které bohatě poslouží k měřickým účelům (například u již zmíněného vyšetřování dopravních nehod nebo při zjišťování průběhu menších staveb).

1.2 Historie fotogrammetrie

Události promlouvající do vývoje fotogrammetrie shrneme do následujících bodů. Sekce byla převzata a rozšířena z [11] za přispění [13], [7] a [12].

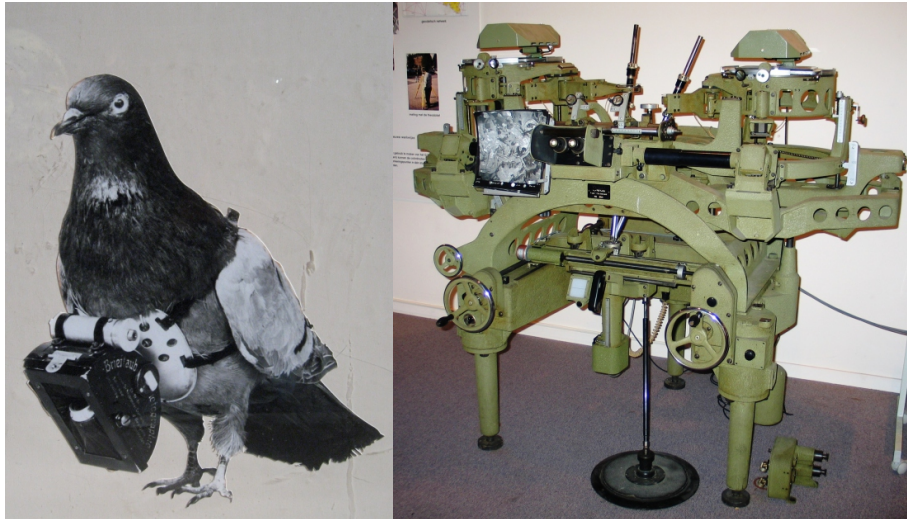
Vývoj fototeodolitu (fotogrammetrická komora pro pozemní fotogrammetrii umožňující určení prvků vnější orientace) zobrazuje obrázek 1.1. Zleva můžeme vidět první fototeodolit sestavený roku 1859 mechanikem Brunnerem, teodolit od švýcarské firmy Wild Heerbrugg typ P30 vyráběný mezi lety 1946 a 1970 a totální stanici od firmy Leica Nova typ MS50, která se používá v současnosti.

Na obrázku 1.2 je zleva zobrazen holub s fotoaparátem Němce Neubronnera a vpravo stereokomparátor firmy Wild Heerbrugg typ A8 vyráběný mezi lety 1952 a 1980.



Obrázek 1.1: Vývoj fototeodolitu. Zdroje: [15], [16] a [17].

- Popsání principu *camery obscury* neboli *dírkové komory*. V 5. století př. n. l. čínský filozof *Mu Ti*, 350 př. n. l. *Aristoteles*, roku 1032 arabský učenec *Ibn Al Hasan Haitkam* (965 – 1039) nebo r. 1485 *Leonardo da Vinci* (1452 – 1519).
- V roce 1715 *Brook Taylor* (1685 - 1731) popsal, že za určitých podmínek můžeme z perspektivního obrazu objektu získat pravoúhlé průměty objektu.



Obrázek 1.2: Holub s fotoaparátem a stereokomparátor. Zdroje: [18] a [19].

- V roce 1726 nakreslil Švýcar *Moritz Anton Kappeler* (1685 - 1769) nepřesnou mapu hory *Pilatus* ze dvou různých perspektivních průmětů vytvořených překreslením pomocí komory a hranolu.
- V roce 1759 *Johann Heinrich Lambert* (1728 - 1777) se zabývá z pohledu geometrie sestavením půdorysu z nakreslených perspektiv krajiny, tedy mapováním krajiny.
- Na přelomu let 1798 a 1799 publikuje *Gaspard Monge* (1746 - 1818) své přednášky z deskriptivní geometrie.
- V roce 1807 *William Hyde Wollaston* (1766 - 1828) sestrojil přístroj *camera lucida*, pomocí něhož se perspektiva krajiny zakreslovala přesněji.
- Ve 30. letech 19. st. *Joseph Nicéphore Niépce* (1765 - 1833) a *Jacques Daguerre* (1787 - 1851) vynalezli fotografický proces.
- Dne 19. srpna 1839 věnovala Francouzská akademie věd první komplexní fotografický proces *Daguerrotypii* široké světové veřejnosti (kromě veřejnosti Velké Británie, jelikož si Jacques Daguerre nechal objev ve Velké Británii dne 12. srpna 1839 patentovat).
- Dále dochází k inovacím a vylepšování fotografického procesu. Roku 1851 *Frederick Scott Archer* (1813 - 1857) zveřejnil metodu mokrého kolodiového procesu, ve kterém se mu podařilo zkrátit dobu osvitů na jednotky sekund.
- V 50. letech 19. st. *Aime Laussedat* (1819 - 1907) začal provádět měření ze snímků. Roku 1851 vydal dílo *Métrophotographie* a například v roce 1855 během obléhání Sevastopolu sestavil plán opevnění z pořízených snímků. V roce 1861 využil fotografie a průřezovou fotogrammetrii k vytváření map. Je považován za zakladatele fotogrammetrie.
- Roku 1858 *Gaspard-Félix Tournachon* zvaný *Nadar* (1820 - 1910) pořídil jako první letecký snímek vesničky poblíž Paříže z balónu.

- Roku 1859 sestrojil první *fototeodolit* mechanik *Brunner* podle plánů Fran-
couze A. Laussedata.
- V Německu se měřením staveb, zejména dokumentací historických památek,
z fotografií zabýval *Albrecht Meydenbauer* (1834 - 1921). Dosahoval dobrých
výsledků. V roce 1867 poprvé použil výraz *fotogrammetrie* v článku v archi-
tektickém časopise. Je také považován za zakladatele fotogrammetrie.
- Roku 1867 provedl první fotogrammetrické měření u nás *Karel Kořistka*
(1825 - 1906). Ze stanovišť na Hradčanech a Petříně zhotovil fotografie
a z nich pak průsekovou metodou určil polohy některých věží a významných
míst v Praze.
- V roce 1890 byla francouzskou firmou Pathé zkonstruována první fotogra-
fická letecká komora na filmový materiál.
- Během let 1893 až 1897 byly průsekovou metodou zmapovány Vysoké Tatry.
- V roce 1901 byl podle návrhu *Carla Pulfricha* (1858 - 1927) sestroyen *stereo-*
komparátor firmou *Zeiss* a tím došlo k rozvoji měřické metody nazývané
stereofotogrammetrie, která byla přesnější než grafická průseková metoda.
- V roce 1903 bratři *Wrightové* provedli úspěšný let. Do té doby se snímky
z výšky pořizovaly z balónů, či draků.
- Též v roce 1903 sestrojil *Theodor Scheimpflug* (1865 - 1911) překreslovač,
který vyhodnocoval letecké snímky rovinatého území.
- V roce 1908 *E. Orel* zmechanizoval zdlouhavé výpočty souřadnic jednot-
livých bodů a vytvořil *autostereograf*. Tento přístroj byl nadále vyráběn
ve firmě *Zeiss* pod názvem *stereoautograf*. Byl s výhodou používán pro po-
zemní fotogrammetrii na přehledných územích.
- Roku 1910 byla založena *International Society for Photogrammetry* (Me-
zinárodní společnost pro fotogrammetrii) jejímž prvním presidentem byl
Rakušan Eduard Doležal. Společnost se roku 1980 přejmenovala na *Inter-*
national Society for Photogrammetry and Remote Sensing (Mezinárodní
společnost pro fotogrammetrii a dálkový průzkum).
- Roku 1915 zkonstruoval *Oskar Messter* (1866 - 1943) první automatickou
leteckou komoru.
- Během první světové války se ve velkém využívala letecká fotogrammetrie
a došlo k jejímu rozvoji.
- V roce 1921 se u nás uskutečnilo první letecké stereofotogrammetrické ma-
pování. Bylo to v Trutnově. Do roku 1938 Vojenský zeměpisný ústav pomocí
letecké fotogrammetrie u nás zmapoval přes 67 000 km^2 .
- Dne 18. května 1930 proběhla ustavující schůze *Československé fotogram-*
metrické společnosti. V současné době se jmenuje *Společnost pro fotogram-*
metrii a dálkový průzkum.

- Během druhé světové války a období studené války došlo opět k velkému rozvoji, neboť byl vynalezen *spektrozónální film, radar a raketa*. Začal se rozvíjet dálkový průzkum Země a fotogrammetrie pro snímky pořízené z velké výšky.
- V roce 1957 si *Uki Helava* (1923 - 1994) nechal patentovat princip *analytického stroje*. Ten využíval přímý vztah mezi snímkovými a geodetickými souřadnicemi.
- Dne 4. října 1957 byla vypuštěna první umělá družice Země *Sputnik 1*.
- S rozvojem *GPS* (Global Positioning System) ve druhé polovině 20. století dochází ve fotogrammetrii k ulehčení určování prvků vnější orientace.
- Od roku 1980 s rozvojem výpočetní techniky dochází k rozvoji a využití analytických strojů.
- Od poloviny 80. let 20. st. dochází k velkému vývoji počítačových technologií a vzniká *digitální fotogrammetrie*.
- Dále dochází k velkému využití na poli dálkového průzkumu Země za použití snímků ze skenujících radiometrů. Družicové multispektrální a panchromatické snímky se využívají k tvorbě tematických map.
- V současnosti se v pozemní fotogrammetrii využívají digitální fotoaparáty a průřezová fotogrammetrie, moderní teodolity nebo laserové skenery pro vytváření 3D modelů z mračen bodů. V letecké fotogrammetrii se využívají digitální letecké měřické komory na principu vícenásobných komor, neboť je technicky obtížné sestavit jednotlivou komoru s požadovaným rozlišením. Fotogrammetrie získává blízký vztah ke geografickým informačním systémům.

1.3 Rozdělení fotogrammetrie

Fotogrammetrie jako taková je široký pojem a dělíme ji podle různých hledisek a využívaných technologií. Jako zdroj informací byl převážně využit [8].

1. Počet vyhodnocovaných snímků

Základní dělení fotogrammetrie je podle počtu fotografických komor při pořizování snímků pro účely měření.

(a) Jednosnímková

Využíváme pouze jeden měřický snímek. K získání snímku se využívá digitální fotoaparát nebo *fortoteodolit*, u kterého je možnost úhlově nastavit osu záběru. Ze snímku lze zjišťovat pouze rovinné souřadnice a používá se na téměř rovinné objekty. Pokud máme nějaké další informace, můžeme rekonstruovat i prostorové objekty. Při vzniku měřického snímku se může do záběru snímku umístit *měřický čtverec* s předem známými rozměry. Využití nalézá ve stavebnictví při dokreslování nových stavebních objektů do snímků nebo při tvorbě ortofotografií krajiny. Kvalita měření je závislá na kvalitě a rozlišení snímku.

(b) Dvousnímková

Dvou snímků se využívá ve *stereofotogrammetrii* nebo u *průsekové metody*.

Stereofotogrammetrie využívá stereoskopického vjemu. Dvě fotografické komory mají rovnoběžné osy záběru. Vzdálenost os záběru se nazývá *paralaxa* fotogrammetrických komor. Sledováním stereoskopické dvojice snímků objektu vzniká prostorová představa objektu. Pro zpracování stereoskopických dvojic snímků se používají stereoautograf nebo digitální komparátor. Při vizuálním zpracování snímků člověkem mohou být osy záběru mírně sbíhavé neboť lidské oči jsou schopny tuto chybu tolerovat. Při digitálním zpracování je možné se dopustit vyšší míry chyby v rovnoběžnosti os záběru fotogrammetrických komor.

Průseková metoda využívá dvou snímků z různých stanovíšť s různoběžnými osami záběru (často se používá úhel mezi osami záběru 90 stupňů) fotogrammetrických komor vytvářejících snímky. Na snímcích se párují vlíčovací body. Jedná se o jednu z nejstarších fotogrammetrických metod. Je možné ji řešit graficky i analyticky. Vyhodnocení probíhá po bodech.

(c) Vícesnímková

U vícesnímkové fotogrammetrie jsme schopni vyhodnotit prostorové souřadnice objektů, pokud se nachází na alespoň dvou snímcích. Je využívána průseková metoda. Vyhodnocení probíhá analyticky nebo graficky. Vzhledem k výpočetní náročnosti analytické metody její uplatnění přišlo až ve druhé polovině 20. století.

2. Poloha stanoviska

Dříve se dle polohy stanoviska rozlišovaly dvě kategorie především kvůli odlišným metodám zpracování a odlišným využívaným přístrojům. Byly to pozemní fotogrammetrie a letecká. S vývojem dálkového průzkumu Země se přidala ještě fotogrammetrie satelitní. Dnes zařazujeme i podkategorie fotogrammetrie blízká a makrofotogrammetrie. Parametrem dělení chápeme vzdálenost mezi fotogrammetrickou komorou a objektem zkoumání.

(a) Makrofotogrammetrie

Využívá se pro měření objektů jež jsou pro lidské oko pozorovatelné se zvětšením.

(b) Blízká

Podstatou se jedná o formu pozemní fotogrammetrie. Zkoumané objekty dosahují velikosti desítek centimetrů až desítek metrů. Využití nalézáme ve specializovaných odvětvích typu strojírenství nebo lékařství. V závislosti na požadované přesnosti je s rozvojem digitálních fotoaparátů možné pořizovat a zpracovávat snímky v širším spektru činností.

(c) Pozemní

U pozemní fotogrammetrie je stanovisko pevně spojeno se zemí a nepohyblivé. Stanovisko je geodeticky zaměřeno a dá se dobře určit orientace snímku v prostoru. Snímky se pořizují do vzdálenosti až 500 metrů. Mohou se používat dlouhé expoziční časy. Nevýhodou je možné zakrývání objektů jinými objekty a vznik nevyhodnotitelných oblastí. V anglické literatuře se pozemní fotogrammetrie někdy označuje jako *Close-range*

Photogrammetry. Snímek ještě můžeme rozdělit na *vodorovný*, kdy osa záběru je vodorovná (rovnoběžná s půdorysnou) a geometrickou podstatou snímku je jedno- nebo dvojúběžníková perspektiva, a *šikmý*, kdy osa záběru není vodorovná a geometrickou podstatou snímku je tříúběžníková perspektiva.

(d) Letecká

U letecké fotogrammetrie je stanovisko pro pořízení snímku umístěno v pilotovaném (nebo nepilotovaném) letadle či helikoptéře. (Během počátků letecké fotogrammetrie se využívaly balóny, draci nebo holubi.) Určení prostorové polohy a orientace snímku je náročnější. Zpracování je taktéž složitější. Výhodou letecké fotogrammetrie je možnost měření rozsáhlých území. Nevýhodou je, že pořizování snímků je závislé na počasí. Hlavní využití letecké fotogrammetrie je pro mapování.

(e) Družicová (satelitní)

Družicová fotogrammetrie vyžadovala vytvoření speciálních programových zařízení v oblasti digitální fotogrammetrie. Počátky datujeme do 60. let 20. století a využití bylo zejména ve vojenství ke špionážím. Využívá se i stereofotogrammetrie. Družicová fotogrammetrie je velmi blízko spojená s dálkovým průzkumem Země.

3. Způsob zpracování

(a) Analogový

Ke zpracování snímku dochází mechanicky a opticky. Jsou využívány složité analogové vyhodnocovací stroje. Setkáme se s nimi jen zřídka. Firma Zeiss ukončila jejich výrobu v roce 1990.

(b) Analytický

Analytické vyhodnocení obsahu snímku využívá pro převod snímkových souřadnic do geodetického systému prostorovou transformaci. Snímkové souřadnice se měří na *komparátoru*, transformace se počítá na počítači. Analytické vyhodnocovací stroje využívají spojení konstrukce komparátoru a počítače.

(c) Digitální

Ke zpracování je využita digitální fotografie. Její celé zpracování probíhá na počítači za pomoci specializovaných počítačových programů.

4. Metody zpracování z hlediska typu výstupu

(a) Grafické

Výstup je přímo fyzicky vykreslen. Využívá se analogových způsobů zpracování snímků. Vyhodnocení může být rychlé, ale těžko se pak výsledek dále zpracovává výpočetní technikou. Grafické metody nejsou nejpřesnější a jejich využití v současné době nepřevažuje. Princip grafických metod zpracování měřických snímků je podstatou fotogrammetrie.

Mezi grafické metody zpracování řadíme i *optické metody*, které se využívaly především k dokreslování dalších podrobností do již získaných materiálů (například zpřesňování map za využití letecké fotogrammetrie). U těchto metod se využívaly optické přístroje *obkreslovač* a *překreslovač*.

(b) Numerické

Vyhodnocená data se ukládají do paměti výpočetní techniky a mohou být dále zpracovávána, kopírována a reprodukována. V současné době dosahují nejpřesnějších a nejdůležitějších využití napříč obory, kde se fotogrammetrie uplatňuje. Využívá se analytických a digitálních způsobů zpracování snímků.

1.4 Prvky vnitřní a vnější orientace

K rekonstrukci snímků využívá fotogrammetrie znalost několika základních údajů. Jedná se o *prvky vnitřní orientace* a *prvky vnější orientace*. Údaje o zpracovávaném snímku, které umožní rekonstruovat lineární perspektivu z fotografie se nazývají prvky vnitřní orientace snímku. Polohu snímku vůči Zemi určují prvky vnější orientace. Zdrojem informací této sekce mimo jiné byl [6].

Pro potřeby fotogrammetrie se využívá také několik kartézských soustav souřadnic. Jejich umístění je v různých podoborech fotogrammetrie různě ustálené.

Snímkové souřadnice jsou souřadnice dvourozměrné kartézské soustavy souřadnic na snímku s počátkem ve středu snímku, v hlavním bodu nebo v rohu snímku.

Komorový souřadný systém má počátek ve středu promítání a jedna ze tří os kartézského souřadného systému splývá s osou záběru (platí u vodorovného nebo svislého směru záběru, u šikmého směru záběru to tak být nemusí).

Geodetický souřadný systém je prostorový kartézský systém, ve kterém popisujeme objekt zájmu. Osa z směřuje svisle vzhůru (do *zenitu*). Geodetický souřadný systém není obecně ztotožněn se zeměpisnými souřadnicemi, bývají však na ně převáděny. Geodetické souřadnice mívají počátek v nějakém referenčním bodu objektu zájmu.

Modelový souřadný systém je prostorový souřadnicový systém, který se využívá pro určení vzájemné polohy a orientaci více snímků. Počátek soustavy souřadnic bývá umístěn do středu promítání jednoho ze snímků.

1.4.1 Prvky vnitřní orientace

Prvky vnitřní orientace jednoznačně určují lineární perspektivu, která je geometrickou podstatou snímku.

Mezi prvky vnitřní orientace snímku řadíme *hlavní bod H* , respektive jeho umístění na snímku, a *distanci d* (obrazovou vzdálenost). Někdy i *radiální distorzi* nebo *paralaxu*.

Distance odpovídá délce kolmé úsečky spuštěné ze středu promítání na průmětnu. Jinak řečeno, distance je ohnisková vzdálenost objektivu, jelikož fotogrammetrické komory jsou zaostřeny na nekonečno, poté je totiž obrazová vzdálenost rovna ohniskové. Hlavní bod je průsečík kolmice na průmětnu vedené středem promítání a průmětny. Hlavní bod a horizont jsou u vodorovných snímků z měřicích komor určeny pomocí *rámových značek*, které jsou na snímku zobrazeny.



Obrázek 1.3: Snímek s rámovými značkami. Zdroj: [20].

Ukázka snímku s rámovými značkami je na obrázku 1.3. Chyby objektivů způsobují, že hlavní bod nemusí být přesně ve středu snímku. Prvky vnitřní orientace snímku jsou pro každou fotogrammetrickou komoru určeny laboratorně. Snímek, u kterého jsou známy prvky vnitřní orientace, se nazývá *měřický*.

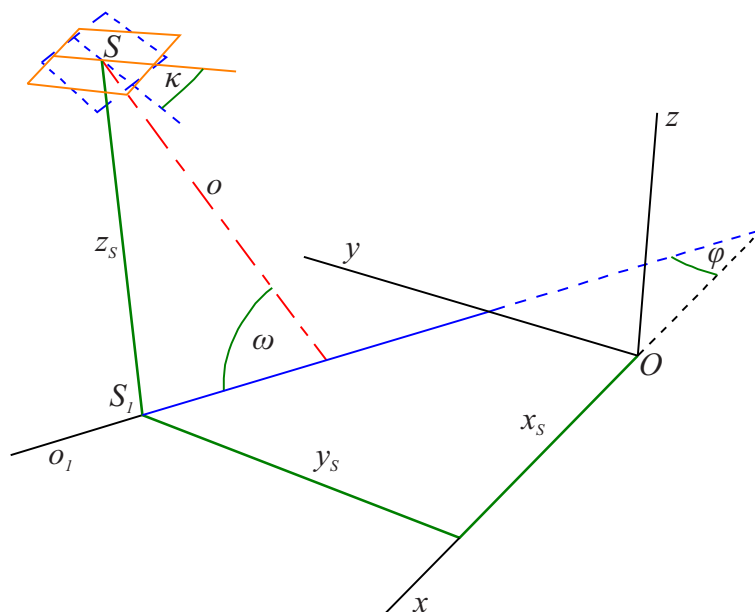
U fotogrammetrických komor se jako další parametr uvádí radiální distorze. Jedná se o posun bodů snímku ve směru od středu snímku vlivem geometrických nepřesností objektivu. U snímků, které nejsou pořízeny měřickou komorou, radiální distorzi neuvažujeme.

Při pořizování stereoskopických snímků je vlastní vzdálenost mezi středy promítání (*paralaxa*, často horizontální nebo vertikální) také považována za prvek vnitřní orientace.

1.4.2 Prvky vnější orientace

Prvky vnější orientace rozumíme polohu středu promítání a směr osy záběru.

Řadíme mezi ně *souřadnice středu promítání* x_S , y_S a z_S (poloha měřické komory, nejčastěji v pravoúhlém systému souřadnic), *směr osy záběru* určený dvěma úhly φ a ω a *úhel pootočení* snímku κ , což je úhel pootočení snímku ve vlastní rovině kolem osy záběru. Prvky vnější orientace popisuje obrázek 1.4.



Obrázek 1.4: Určení prvků vnější orientace.

U pozemní fotogrammetrie se prvky vnější orientace určují geodetickými metodami a nastavením fotogrammetrické komory a jsou přesně známy. Měřická komora s úhlově nastavitelnými osami záběru se nazývá *fototeodolit*.

V letecké fotogrammetrii prvky vnější orientace přesně známy nejsou, neboť stanoviště fotokomory je nejčastěji umístěno v pohybujiícím se letadle a je vystaveno vnějším meteorologickým vlivům. K přibližnému určení prvků vnější orientace se využívají zařízení se systémy GPS (Global Positioning System) a INS (Inertial Navigation System) a později jsou dopočítány přesně.

1.5 Využití fotogrammetrie

Základním využitím fotogrammetrie je mapování a dodávání podkladů do GIS (geografický informační systém). Pozemní fotogrammetrie se využívá k mapování členitých terénů. Letecká a satelitní fotogrammetrie se pak využívá k mapování rovinnatějších území. S rozsáhlým využitím letecké fotogrammetrie byla vytvořena topografická mapa v měřítku 1:25000 naší republiky mezi lety 1953 až 1957 s využitím vojenské i civilní zeměměřické služby. Topografické mapy měřítek 1:10000 a 1:5000 vznikaly mezi lety 1957 až 1972. Mezi lety 1995 až 2004 vznikala komplexní digitální geografický model území České republiky, který je dále spravován, zpřesňován a aktualizován Zeměměřickým úřadem.

Pro potřeby jednotlivých oborů vznikají tématické mapy. Například vodohospodářské, lesnické či silniční.

Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, oddělení Národní inventarizace lesů využilo a využívá fotogrammetrii ke zpracování a aktualizaci objektivních informací o různých parametrech lesů na našem území (plocha lesa, zásoba dříví, zastoupení dřevin, věková struktura lesa a tak dále).

Mapové servery využívají fotogrammetrii ke vzniku ortofotomapy, tedy překreslí letecké snímky tak, aby se v každém pohledu zdálo, že byla krajina fotografována přesně ve svislém směru. Na obrázku 1.5 vidíme dvakrát budovu Vysoké školy ekonomické v Praze. Vlevo je snímek mapového serveru *mapy.cz*, který překreslení nevyužívá (vidíme i jižní stěnu budovy). V pravé části snímku je fotografie mapového serveru *maps.google.com*, jehož fotografie jsou upraveny.



Obrázek 1.5: Fotografie budovy Vysoké školy ekonomické v Praze.

Další využití nalézá fotogrammetrie v nejrůznějších oborech. Ve *stavebnictví* se využívá k dokumentaci vývoje staveb, měření deformací staveb nebo k zaměrování liniových staveb. V *architektuře* a v *územním plánování* nalézá fotogrammetrie uplatnění při vzniku vizualizací a prostorových modelů krajiny a staveb. V *hornictví* se využívá k měření objemů těžby a sledování lomů. Ve *strojírenství* se používá k přeměrování částí strojů a ke zjišťování vad. Dále pak se fotogrammetrie a její metody využívají například v *zemědělství*, *vodohospodářství*, *ekologii*, *medicině*, *vojenství* a tak dále.

Dalším příkladem využití průsekové fotogrammetrie z posledních let je nasnímání většiny velkých křižovatek v Praze a jejich fotogrammetrické zpracování za účelem pozdějšího rychlejšího záznamu a vyšetření dopravních nehod.

V poslední době se rozvinulo získávání informací za účelem prostorového modelování a měření pomocí laserového skenování. Tato metoda je součástí nebo konkurence fotogrammetrie podle smyslu chápání podstaty obou metod. Výsledkem prostorového laserového skenování jsou mračna bodů. Zpracování mračen bodů probíhá digitálně. Skenování hůře identifikuje hrany a zatím je oproti fotogrammetrii mnohem dražší. Sběr informací je ovšem oproti fotogrammetrii rychlejší. Fotogrammetrie umožňuje lepší možnosti vsazení objektu zájmu do prostorové vizualizace. Skenování laserovým paprskem je limitováno rozbíhavostí paprsku. Prostorové laserové skenery se využívají například k mapování terénu a získu podkladů pro GIS.

Podstatou fotogrammetrických metod je geometrická interpretace vzniku fotografie. Deskriptivní geometrie chápe fotografii jako středový průmět fotografovaných objektů. Na tomto přístupu jsou založeny zejména grafické metody fotogrammetrie. Kromě vysokých škol je lze vyučovat i na středních školách jako součást předmětu deskriptivní geometrie, architektura nebo výtvarná výchova. Jedná se o přímou aplikaci znalostí o lineární perspektivě.

Konstruktivní fotogrammetrii chápeme jako část oboru fotogrammetrie, která se zabývá geometrickým hledáním prvků vnitřní orientace. Využívá poznatků a metod deskriptivní geometrie v oblasti středového promítání, respektive lineární perspektivy. Je využívána ke zpracování fotografií pořízených amatérskými fotoaparáty, ne tedy měřickými komorami. Doplněním fotografie o prvky vnitřní orientace vznikne *měřický snímek*, který může být dále zpracován a rekonstruován. Není tedy nutné využívat k pořízení snímků pro účely rekonstrukce snímku měřickou komoru, stačí využít digitální fotoaparát. Na druhou stranu se použitím digitálního fotoaparátu místo měřické komory sníží přesnost pozdějšího měření.

Rekonstrukcí snímku rozumíme zhotovení pravoúhlých průmětů na půdorysnu a nárysnu objektu zájmu na měřickém snímku, nebo naopak vkreslení objektu na měřický snímek, jestliže máme k dispozici jeho pravoúhlé průměty na nárysnu a půdorysnu. Nově vkreslené objekty by měly být v zorném poli, jinak by rekonstruovaný snímek neodpovídal možnostem lidského vidění.

Nejsemnější aplikací grafické metody fotogrammetrie je za využití konstruktivní fotogrammetrie rekonstrukce vodorovného snímku. (Vodorovný snímek lze lehce poznat tím, že ve skutečnosti svislé hrany jsou na snímku svislé a rovnoběžné.) Pro účely výuky je dostačující využít snímek, který není pořízen s využitím teodolitu pro přesné zaměření osy záběru. Postačí nám snímek, který se vodorovnému snímku velmi blíží. K rekonstrukci snímku můžeme využít 3D modelovací grafické programy.

Na závěr úvodní kapitoly můžeme na obrázku 1.6 vidět pamětní desku věnovanou *Václavu Láskovi* (1862 - 1943), který mimo jiné přednášel i fotogrammetrii. Deska je umístěna na panelovém domě na adrese Láskova 1796, Praha 11. Autorem fotografie je autor práce.



Obrázek 1.6: Pamětní deska v ulici Láskova v Praze.

2. Vodorovný snímek

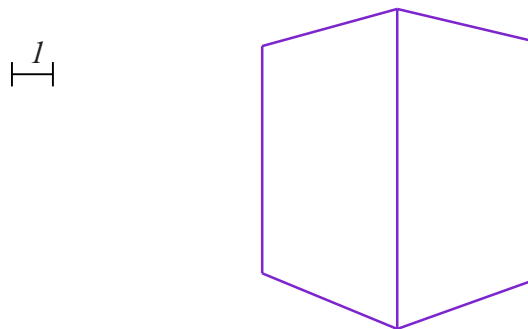
Za vodorovný snímek označujeme snímek, který má vodorovnou osu záběru fotoaparátu. Ve skutečnosti svislé hrany těles se na snímku zobrazí jako svislé rovnoběžné úsečky. Na snímku, který není vodorovný, se ve skutečnosti svislé hrany sbíhají do úběžníku. Rekonstrukcí vodorovného snímku rozumíme nalezení prvků vnitřní orientace (hlavní bod H a distance d) a zhotovení pravoúhlých průmětů objektu zájmu tak, abychom pravoúhlé průměty mohli dále využít nebo abychom mohli vkreslit do snímku další objekty. Geometrickou podstatou vodorovného snímku je jednoúběžníková nebo dvojúběžníková perspektiva.

V této části práce si uvedeme příklad na rekonstrukci vodorovného snímku a rozebereme si, zda nám stačí k rekonstrukci jako zadání pouze snímek. Tématu rekonstrukce vodorovného snímku se věnuje např. práce [11] nebo [2].

2.1 Rekonstrukce vodorovného snímku

Příklad 1. *Rekonstrukce vodorovného snímku.*

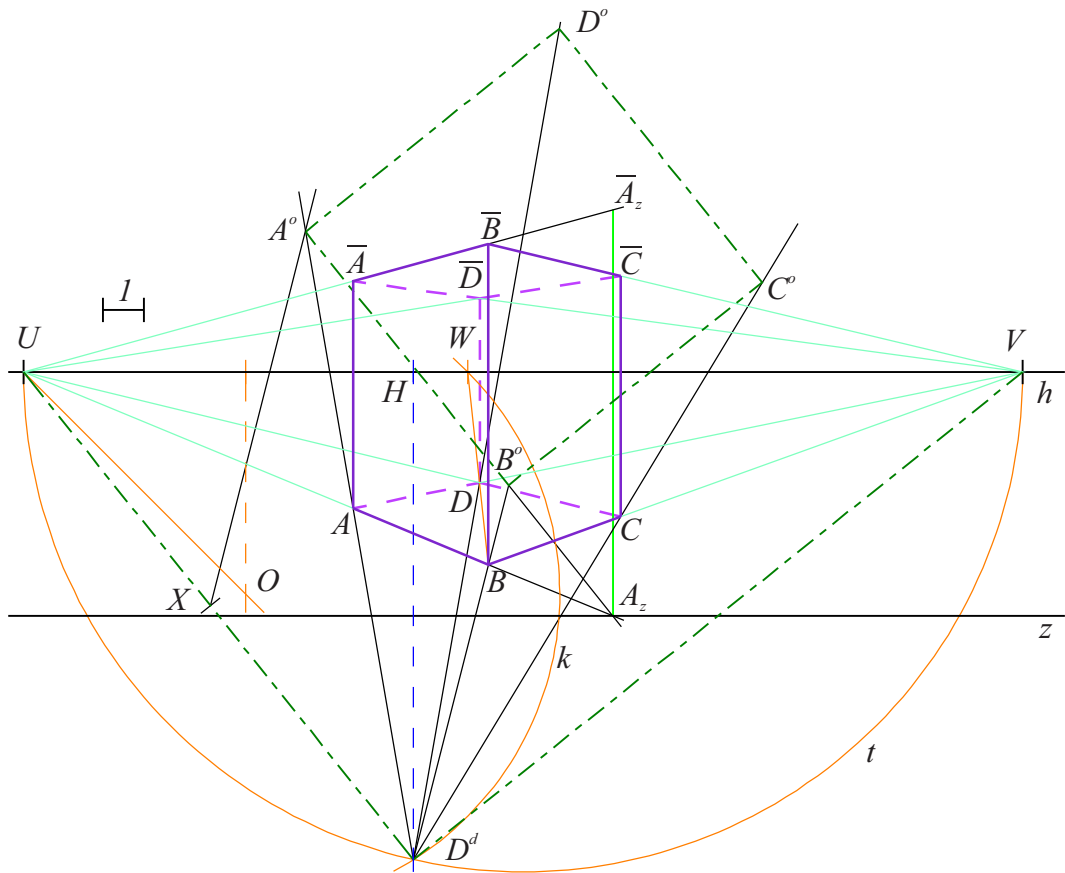
Je dán vodorovný snímek kvádrů se čtvercovou podstavou. Kvádr stojí na základní rovině. Určete prvky vnitřní orientace. Sestrojte podstavu kvádrů v otočení tak, aby čtverec podstavy měl stranu délky osm jednotek. Zadání včetně vyznačené jednotky je na obrázku 2.1. Dále určete výšku kvádrů. Do kvádrů narýsujte vodorovnou válcovou dutinu. Poloměr podstavy válce jsou tři jednotky. Osa válcové dutiny splývá s vodorovnou osou kvádrů



Obrázek 2.1: Příklad 1: Zadání.

Řešení. Věnujme se nejdříve nalezení prvků vnitřní orientace mezi něž řadíme u vodorovného snímku hlavní bod H a distanci (vzdálenost středu promítání od průmětny). Řešení je zobrazeno na obrázku 2.2. Pojmenujme viditelné vrcholy kvádrů $A, B, C, \bar{A}, \bar{B}$ a \bar{C} . Přímkou AB a $\bar{A}\bar{B}$ jsou ve skutečnosti rovnoběžné a v průmětně různoběžné. Jejich průsečíkem je úběžník U . Podobně průsečíkem přímkou BC a $\bar{B}\bar{C}$ je úběžník V . Přímkou procházející úběžníky U a V je úběžnice vodorovných rovin, kterou označujeme jako horizont h . Horizont h je kolmý na ve skutečnosti svislé hrany (například $A\bar{A}$). Dále s využitím úběžníků U a V dorýsujeme chybějící vrcholy $D = UC \cap AV$ a $\bar{D} = U\bar{C} \cap \bar{A}V$.

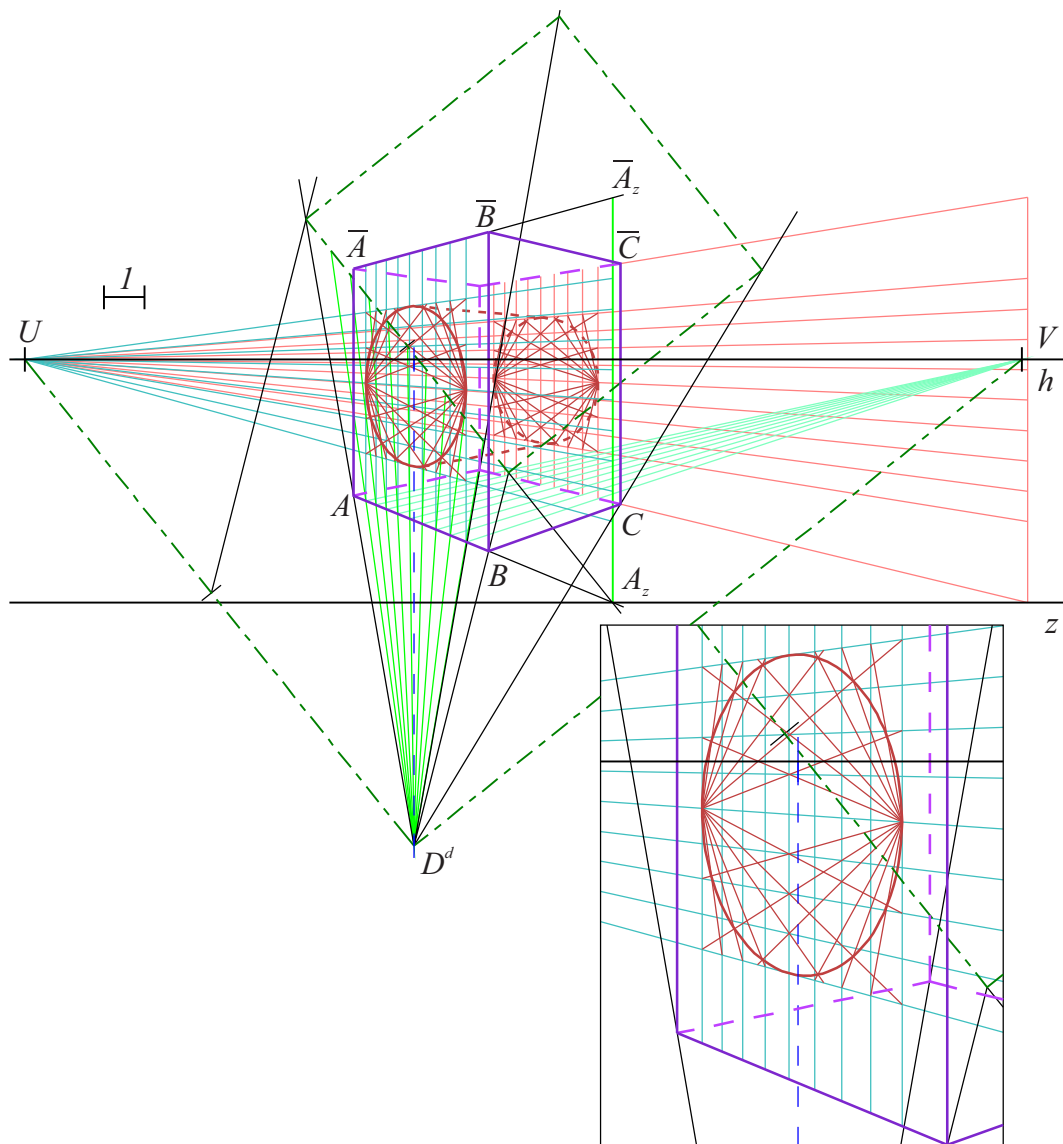
Pokračujme hledáním dolního distančního D^d a hlavního bodu H . Jelikož má kvádr čtvercovou podstavu, je velikost úhlu $|\angle USV| = 90^\circ$, kde bod S je střed



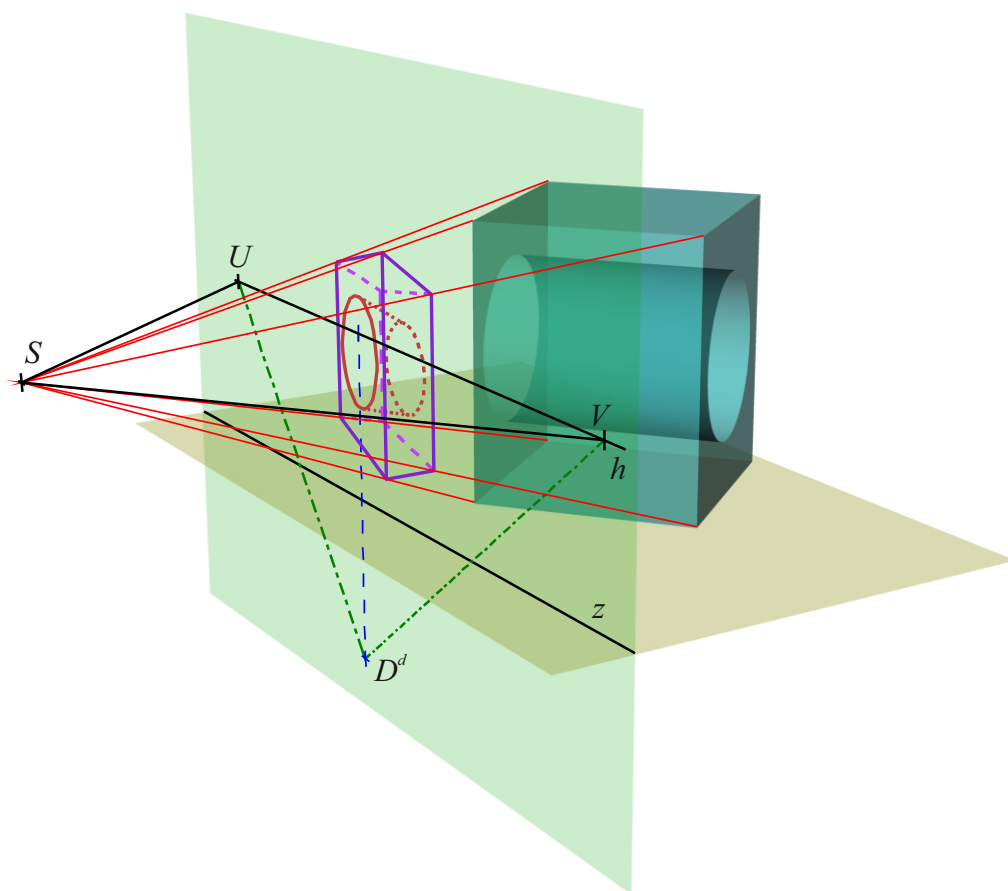
Obrázek 2.3: Příklad 1: Podstava kvádrů v otočení.

Pokračujme narýsováním vodorovné válcové dutiny. Této části se věnuje obrázek 2.4. Začneme podstavou válce ve stěně kvádrů $AB\bar{A}\bar{B}$. Ta se v obrázku zobrazí jako elipsa. Pro její sestavení využijeme příčkovou konstrukci. Stejně dlouhé úsečky se na přímkách rovnoběžných s průmětnou v průmětně zobrazují opět vzájemně stejně dlouhé. Na přímkách, které jsou různoběžné s průmětnou, se stejně dlouhé úsečky zobrazují v průmětně různě dlouhé. Proto si šířku (šest jednotek) válce vyznačíme na hranu AB . Její rozdělení na osm ve skutečnosti stejných částí sestojíme pomocí otočeného půdorysu. Ze vzniklých bodů vedeme rovnoběžné úsečky ve stěně $AB\bar{A}\bar{B}$ rovnoběžné s hranou $A\bar{A}$. Dále pak vyznačíme šířku válce (šest jednotek) na úsečce $A_z\bar{A}_z$ vyznačující skutečnou výšku kvádrů. Opět vzniklou úsečku rozdělíme na osm stejně dlouhých dílů a ze vzniklých bodů vedeme spojnice s úběžníkem U . Nyní můžeme využít příčkové konstrukce pro vkreslení elipsy vyznačující podstavu válce ve stěně $AB\bar{A}\bar{B}$. Detail příčkové konstrukce je zobrazen v obrázku 2.4. Obdobně sestojíme druhou podstavu válce. Obrys válce doplníme o společné tečny z bodu V obou zobrazených podstav a vyřešíme viditelnost.

Prostorovou vizualizaci s poloprůhledným modelem zachycuje obrázek 2.5.



Obrázek 2.4: Příklad 1: Kvádr s válcem s detailem příčkové konstrukce.



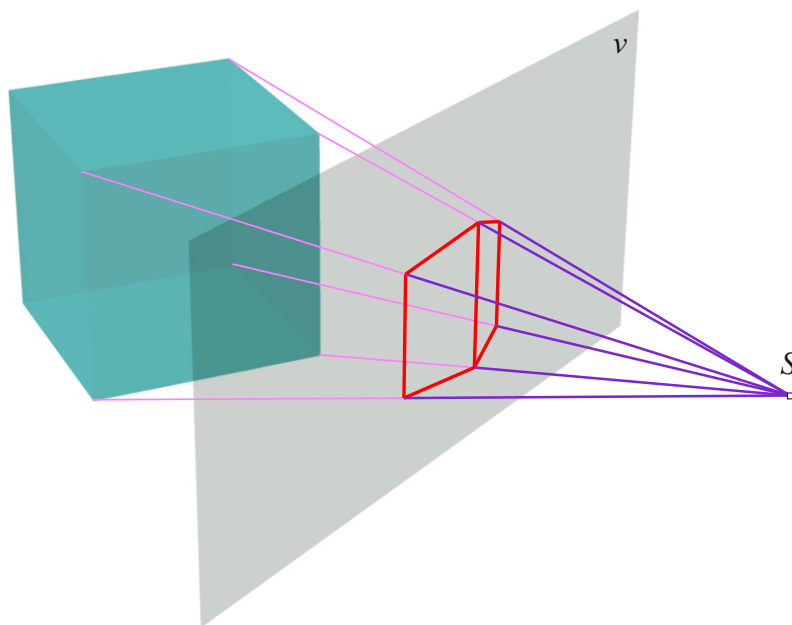
Obrázek 2.5: Příklad 1: Prostorová vizualizace.

2.2 Potřebné informace o snímku

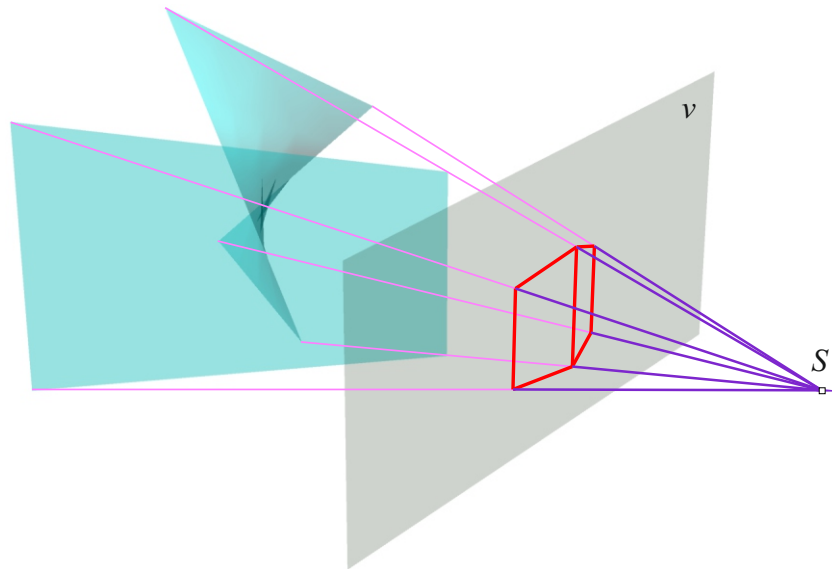
Zamysleme se nad informacemi, které k vodorovnému snímku potřebujeme obdržet, abychom ho dokázali správně rekonstruovat. V případě, že by na snímku byl průmět krychle, musí být vzorem v prostoru opravdu krychle? Může se jednat i o jiné těleso, jehož průmět by byl shodný s průmětem krychle? Ano. Pokud bychom nevěděli, že se jedná o snímek krychle, nedokážeme ho správně rekonstruovat. Na obrázku 2.6 je vizualizace vzniku průmětu krychle ve vodorovném snímku. Na následujících obrázcích 2.7 a 2.8 vidíme, že stejný průmět může vzniknout zobrazením jiných rovinných či prostorových objektů. Průmět, který je průmětem krychle, můžeme vytvořit například pomocí části zborcené přímkové plochy a části roviny tvaru lichoběžníku umístěné v prostoru, jak můžeme vidět na obrázku 2.7.

K určení horizontu ve vodorovném snímku nám stačí znát dva středové průměty úseček, o kterých víme, že jsou ve skutečnosti vzájemně rovnoběžné a rovnoběžné se základní rovinou. Prodloužením úseček v průmětně získáme jejich průsečík, který je jejich úběžníkem. Tímto úběžníkem bude horizont procházet. Jelikož je snímek vodorovný, horizont je zároveň kolmý na úsečky, které mají ve skutečnosti svislý směr. Informace, že se jedná o rovnoběžnostěn stojící na základní rovině, je pro nás velmi důležitá.

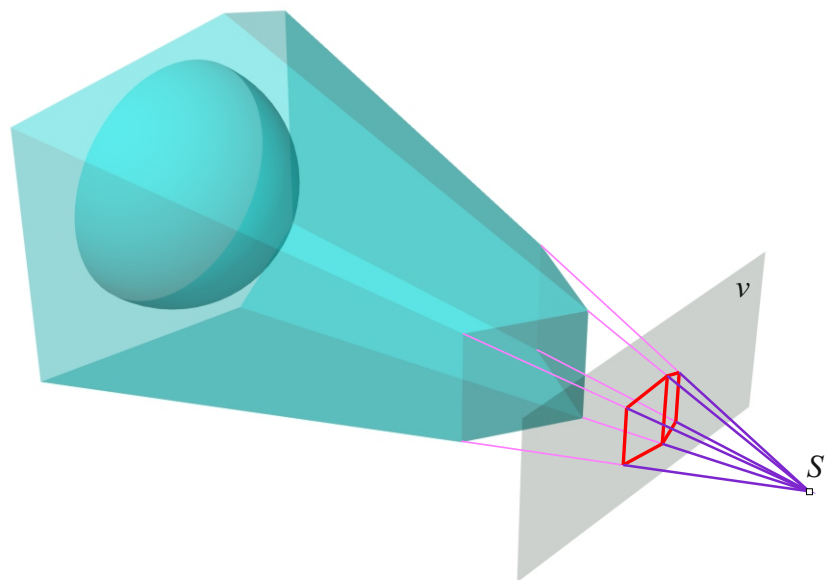
K určení distance a polohy hlavního bodu nám stačí znát dva úhly a jejich velikosti na tělese, které ve skutečnosti leží v pro nás známých rovinách v průmětu (roviny stěn). Důležité je tedy i sdělení, o poměru délek stran nebo některých konkrétních rozměrech tělesa.



Obrázek 2.6: Snímek: Vizualizace průmětu krychle.

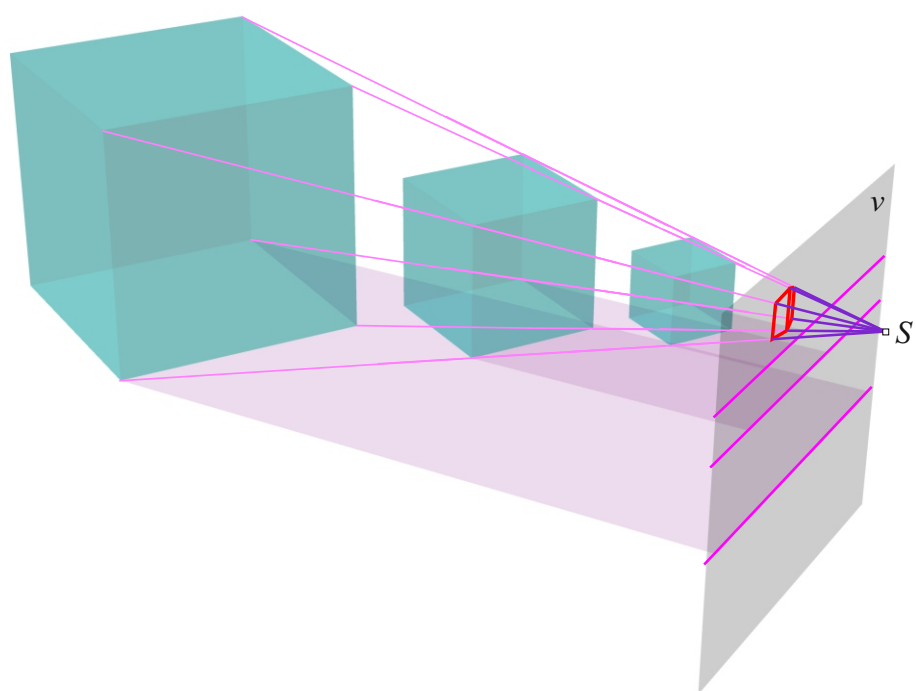


Obrázek 2.7: Snímek: Čtyřúhelník a přímková plocha.



Obrázek 2.8: Snímek: Těleso s půlkulovou dutinou.

Určení základnice vyplývá z konkrétního rozměru délky hrany. V případě, že známe například pouze poměr délek hran, je možností, kde základnici umístit, nekonečně mnoho, jelikož vzorec pro průmět tělesa je nekonečně mnoho daných těles stejnohlých se středem stejnohllosti ve středu promítání S . Myšlenku ilustruje obrázek 2.9. Na obrázku jsou zobrazeny tři stejnohlé krychle se stejným průmětem. Pro každou z nich je vyznačena základnice v průmětně.



Obrázek 2.9: Snímek: Stejnolehlé krychle se stejným průmětem.

3. Tříúběžníková perspektiva

V následujících odstavcích si popíšeme zobrazovací metodu tříúběžníkovou perspektivu, která je geometrickým základem části fotogrammetrie věnující se rekonstrukci ze šikmého snímku. Kapitola nemá za cíl podrobně popsat principy a konstrukce tříúběžníkové perspektivy, ale pouze zmínit několik konstrukcí, které se nám budou hodit nejvíce při následujících rekonstrukcích snímků. Pro podrobné seznámení s principy a konstrukcemi ve středovém promítání, lineární perspektivě a speciálně tříúběžníkové perspektivě odkážeme čtenáře například na [9] a [2].

3.1 Definice a základní pojmy

Pro úplnost si uvedeme definici středového promítání a lineární perspektivy.

Nechť je v prostoru dána rovina ν a bod S , který v rovině ν neleží. *Promítáním* z bodu S do roviny ν rozumíme zobrazení, ve kterém bodu A , $A \neq S$, v prostoru (vzor) odpovídá průsečík A^s přímky SA s rovinou ν (obraz). Rovinu ν nazýváme *průmětnou*, bod S *středem promítání*, přímku AS *promítací přímkou* a bod A^s *průmětem bodu A* .

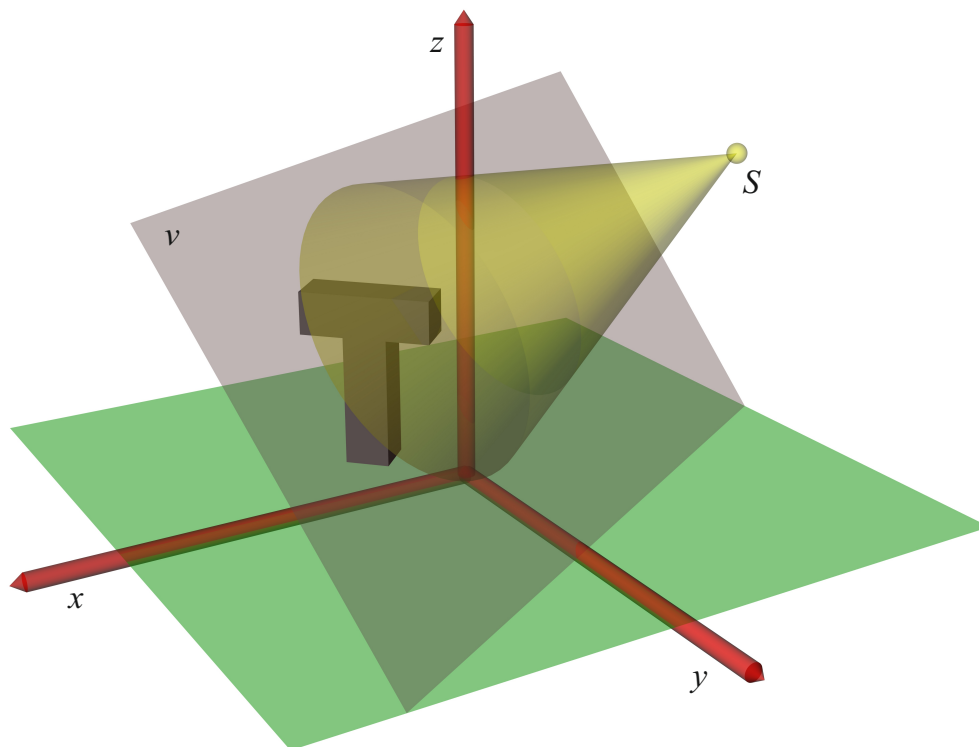
Středovým promítáním rozumíme promítání, ve kterém je střed promítání vlastní. *Středový průmět* je obraz v průmětně vzniklý středovým promítáním objektu v prostoru.

Rovnoběžným promítáním rozumíme promítání, ve kterém je střed promítání nevlastní a je určeno směrem.

V deskriptivní geometrii chceme umět zpět z obrazu zobrazovaného objektu v průmětně rekonstruovat zobrazovaný objekt, tudíž vyžadujeme, aby zobrazení (promítání) bylo vzájemně jednoznačné. Takovéto zobrazení nazýváme *zobrazovací metodou*.

Středovým promítáním jako zobrazovací metodou rozumíme zobrazení z prostoru do průmětny, které bodu v prostoru A přiřadí dvojici bodů $[A^s; A_2]$, kde A^s je středový průmět bodu A a A_2 je rovnoběžný průmět bodu A určený kolmým směrem k průmětně. Neumíme tímto způsobem zobrazit do průmětny střed promítání S a obráceně není jednoznačně určen vzor bodu $A^s = A_2$, který leží na přímce kolmé k průmětně a procházející bodem S . Řešením je vyjmutí přímky kolmé k průmětně procházející bodem S z prostoru a vyjmutí průsečíku této přímky s průmětnou ν z průmětny ν a jejich nezobrazování (případně zobrazení s využitím dalších metod). Jiným řešením je přidání ke kolmým průmětům bodů jejich orientovanou vzdálenost od průmětny. V praxi se často využívají pouze kolmé průměty a zobrazení bodů na kolmé přímce k průmětně procházející bodem S se řeší další metodou, například přidáním dalšího kolmého průmětu do jiné průmětny. Více o tom pojednává například [3].

Lineární perspektiva je speciálním typem středového promítání. Má za cíl vystihnout lidské vidění.



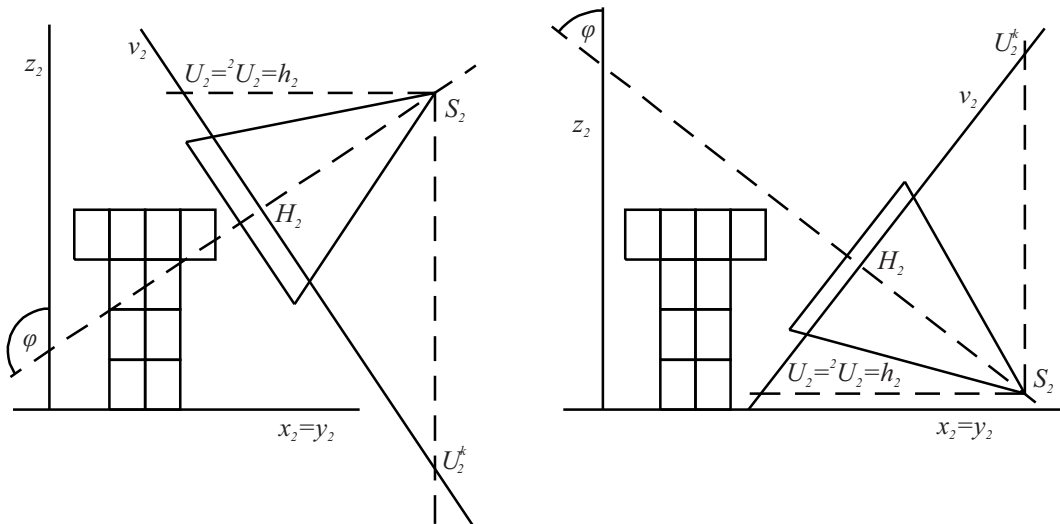
Obrázek 3.1: Prostorové znázornění tříúběžníkové perspektivy.

Nechť je v prostoru dána kartézská soustava souřadnic. Jelikož se lineární perspektiva zabývá zobrazováním objektů reálného světa (například rodinného domu), ztotožňeme směr osy z kartézské soustavy souřadnic se svislým směrem (směrem kolmým na vodorovnou rovinu). Toto přizpůsobení nám umožní přirozenější orientaci v lineární perspektivě.

Tříúběžníková perspektiva je lineární perspektiva, pro kterou platí, že osa zorného úhlu a průmětna jsou v obecné poloze vůči soustavě souřadnic. Má následující vlastnosti.

- *Střed promítání* S je vlastní a je umístěn do oka pozorovatele.
- Pozorovaný objekt obvykle stojí na rovině určené osami x a y kartézské soustavy souřadnic.
- Pozorovaný objekt leží v *zorném kuželu*, což je rotační kužel s vrcholem v bodu S . Osa kužele je kolmá na průmětnu a je v obecné poloze vůči osám soustavy souřadnic. Úhel mezi povrchovou přímkou zorného kužele a jeho osou je mezi 20 a 25 stupni.
- Rovina *průmětny* ν je v obecné poloze vůči souřadnicovým osám kartézské soustavy souřadnic. Zobrazovaný objekt je z pohledu pozorovatele umístěn za průmětnou.

Prostorová situace je znázorněna na obrázku 3.1.



Obrázek 3.2: Bokorys perspektiva ptačí (vlevo) a žabí (vpravo).

Uvedeme si ještě další vlastnosti a označení.

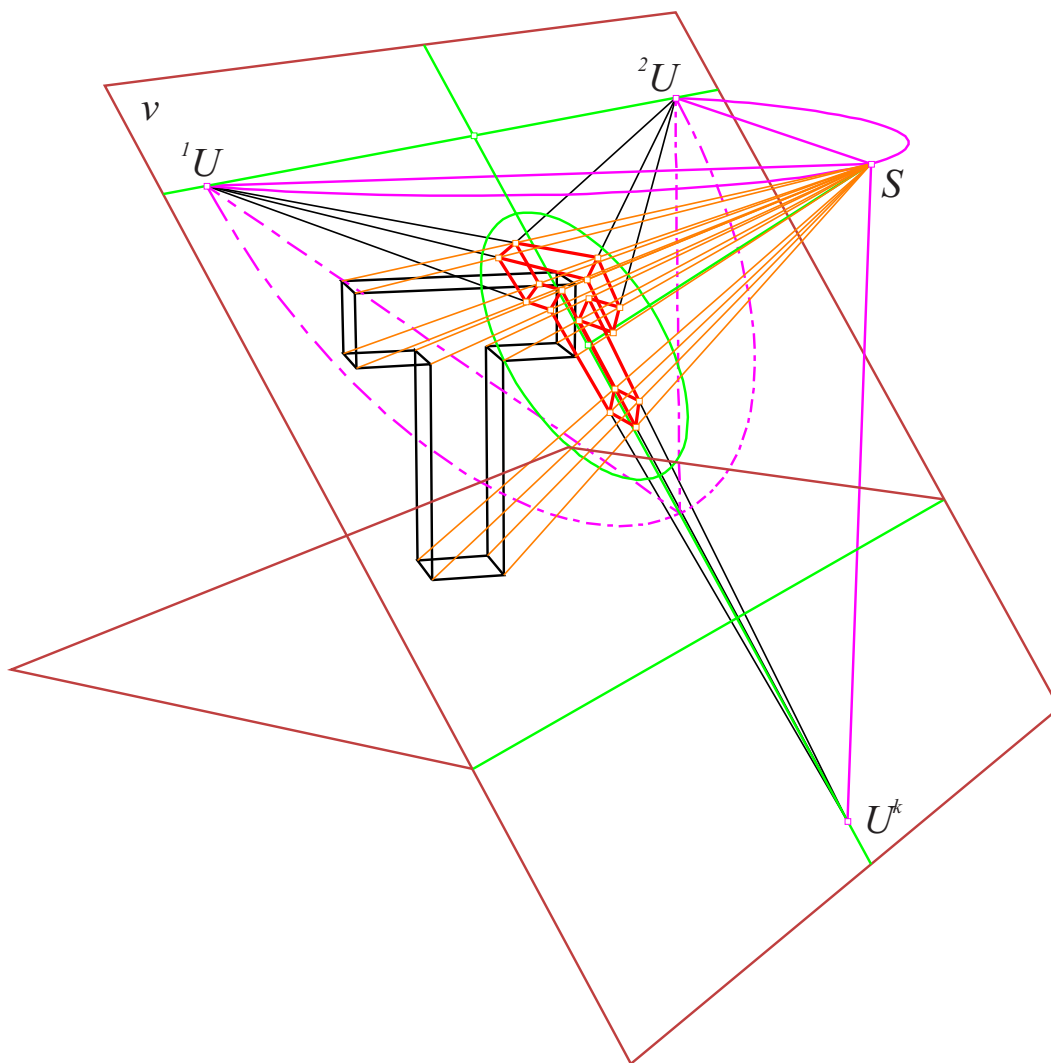
Rozlišujeme perspektivu ptačí a žabí (viz obrázek 3.2). Pro *ptačí perspektivu* (nadhled) platí, že směr osy zorného kužele svírá s kladným směrem osy z kartézské soustavy souřadnic úhel mezi 90 a 180 stupni. Pro *žabí perspektivu* (podhled) platí, že směr osy zorného kužele svírá s kladným směrem osy z kartézské soustavy souřadnic úhel mezi 0 a 90 stupni.

Hlavní bod H je kolmý průmět středu promítání S do průmětny ν . Vzdálenost mezi středem promítání a průmětnou označujeme jako *distance*. *Obzorová rovina* je rovina rovnoběžná s rovinou xy a procházející středem promítání S .

Úběžníky dvou kolmých směrů ve vodorovné rovině značíme 1U , 2U a *úběžník svislého směru* U^k . *Horizont h* je úběžnice vodorovných rovin, zároveň to je také průsečnice obzorové roviny a průmětny. Úběžník svislých směrů U^k se v žabí perspektivě zobrazí nad horizontem a v ptačí perspektivě pod horizontem. *Úběžník hloubkových přímk* U^s se zobrazí jako průsečík horizontu a kolmice k horizontu vedené úběžníkem svislého směru U^k .

Průnikem zorného kuželu a průmětny je *zorné pole*. Perspektivní obraz zobrazeného objektu leží uvnitř zorného pole. Prostorovou situaci některých z pojmů ilustruje obrázek 3.3.

Tříúběžníkovou perspektivu lze zadat úběžníky tří kolmých směrů nebo hlavním bodem a distancí.



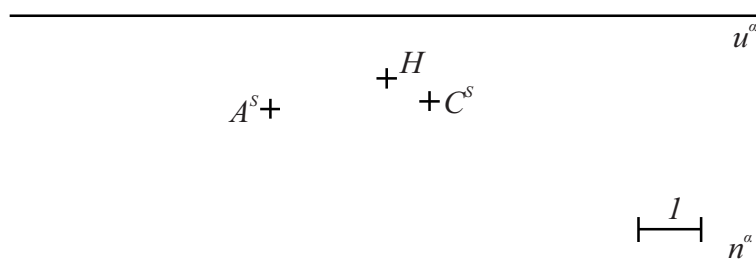
Obrázek 3.3: Prostorová situace průmětu tělesa v tříúběžníkové perspektivě.

3.2 Základní konstrukce

V této podkapitole si ukážeme několik konstrukcí pro zobrazování v tříúběžníkové perspektivě. Všechny vycházejí z metod řešení úloh ve středovém promítání. Pro základní konstrukce (například zobrazení bodu, přímky a roviny) odkážeme čtenáře na [3] nebo [9].

Příklad 1. *Zobrazení mnohoúhelníku.*

V tříúběžníkové perspektivě (středovém promítání) zobrazte čtverec $ABCD$ v rovině α . Dány jsou středové průměty A^s a C^s , úběžnice u^α , stopa n^α , kolmý průmět středu promítání H a distance $d = 4$. Délka jednotky je vyznačena v zadání (viz. obr 3.4). Dále určete skutečnou délku strany čtverce.

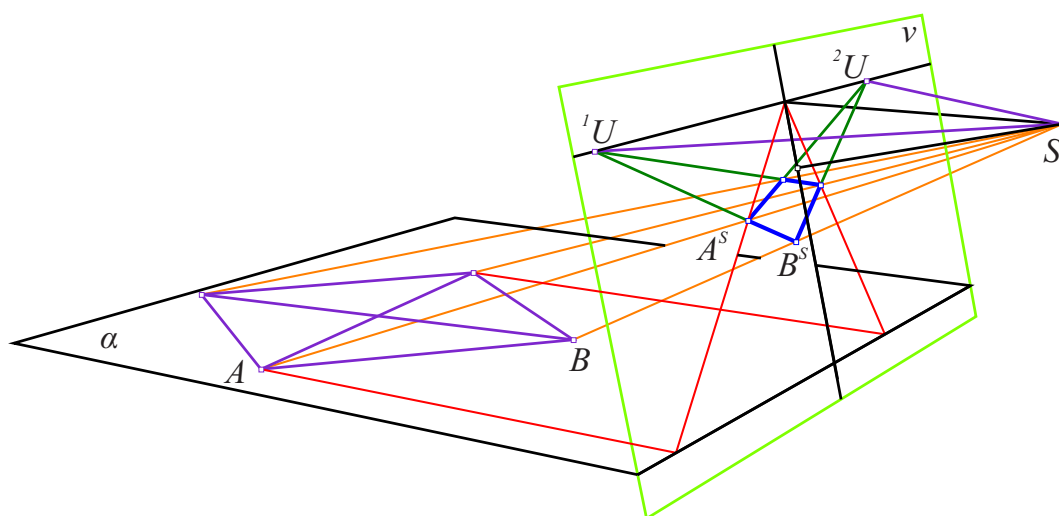


Obrázek 3.4: Příklad 1: Zadání.

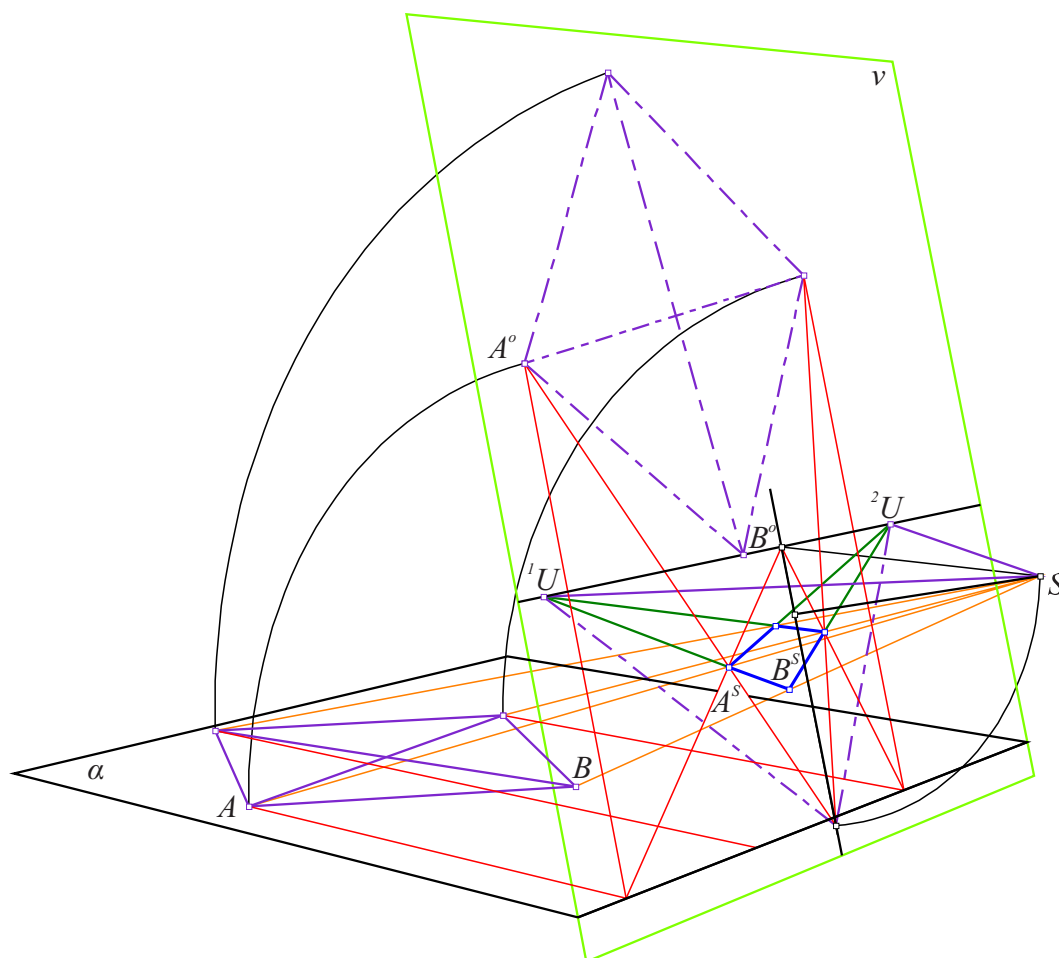
Řešení. První část řešení je znázorněna na obrázku 3.5. Nejdříve otočíme rovinu α do průmětny. Sklopíme bod S na distanční kružnici $k_d(H; r = 4)$ a získáme tak bod (S) . Průsečík hlavní vertikály (kolmice na stopu n^α vedená bodem H) a úběžnice u^α je úběžník spádových přímek U^s . Sestrojíme otočený bod S^o jako průsečík hlavní vertikály a kružnice $l(U_s; r = |U_s(S)|)$. Otácejme část roviny před průmětnou směrem dolů a část za průmětnou směrem nahoru z pohledu ze středu promítání S . Otočené vrcholy čtverce A^o a C^o získáme jako průnik otočených spádových přímek jimi procházejících a spojnice bodů S^oA^s či S^oB^s .

Nyní můžeme v otočení dorýsovat čtverec $A^oB^oC^oD^o$. K sestrojení středového průmětu čtverce $ABCD$ využijeme úběžníky U a V , které získáme jako průsečíky úběžnice u^α a přímek rovnoběžných se stranami čtverce $A^oB^oC^oD^o$ procházejících otočeným středem promítání S^o . Středové průměty přímek procházejících rovnoběžnými stranami se protínají v odpovídajících úběžnících. Vše je vidět na obrázku 3.6. Skutečnou délka strany čtverce odpovídá délce $|A^oB^o|$ a je rovna pěti jednotkám.

Prostorová situace v příkladu je znázorněna na obrázcích 3.7 a 3.8. Je na nich také vidět, že roviny α a ν si odpovídají ve středové kolineaci v prostoru. Osou kolineace je průsečnice rovin α a ν přímka n^α a středem kolineace je střed promítání S .



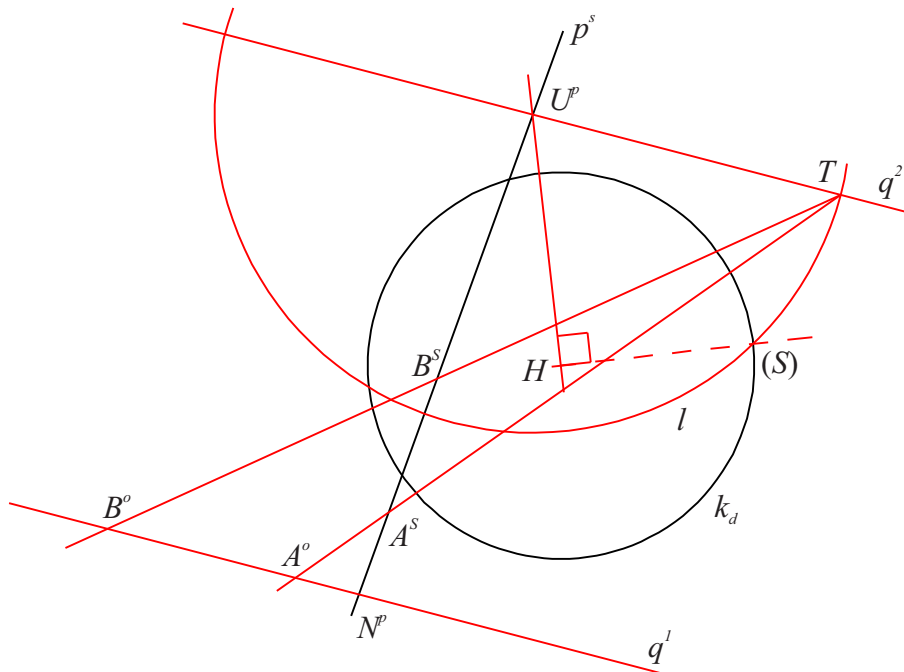
Obrázek 3.7: Příklad 1: Prostorová situace.



Obrázek 3.8: Příklad 1: Prostorová situace včetně otočení.

Příklad 2. *Skutečná délka úsečky.*

Ve středovém promítání zobrazte skutečnou délku úsečky AB . Jsou dány hlavní bod H , distanční kružnice $k_d(H; |HS|)$ a středové průměty přímký p^s , která je určena úběžníkem U^p a stopníkem N^p , a na ní ležících bodů A^s a B^s .



Obrázek 3.9: Příklad 2: Skutečná délka úsečky.

Řešení. Úloha je popsána například v [3]. Řešení je znázorněno na obrázku 3.9. Na obrázku 3.10 je ilustrována prostorová situace. Zadání a řešení v průmětně ν má černou a červenou barvu. Části přímek před průmětnou jsou fialové a části přímek za průmětnou modré.

Využijeme kosoúhlé promítnutí středově promítací roviny přímký p dané středem promítání S a přímkou p do průmětny ν . Zvolíme v průmětně ν rovnoběžné přímký q^1 a q^2 , kde q^1 prochází stopníkem N^p a přímká q^2 prochází úběžníkem U^p . Přímkou p' zobrazíme na přímkou q^2 tak, že jejich průsečík U^p bude samodružným bodem a střed promítání S zobrazíme do bodu T , přičemž $|U^pS| = |U^pT|$. Bod T nazýváme dělicím bodem. Body A^o a B^o získáme jako průsečíky přímek TA^s a TB^s s přímkou q^1 . Úsečka $|A^oB^o|$ má délku skutečné vzdálenosti bodů A a B .

Pokud bychom volili přímký q^1 a q^2 kolmé k přímce p^s , prostorově bychom využili otočení středově promítací roviny přímký p kolem přímký p^s do průmětny ν .

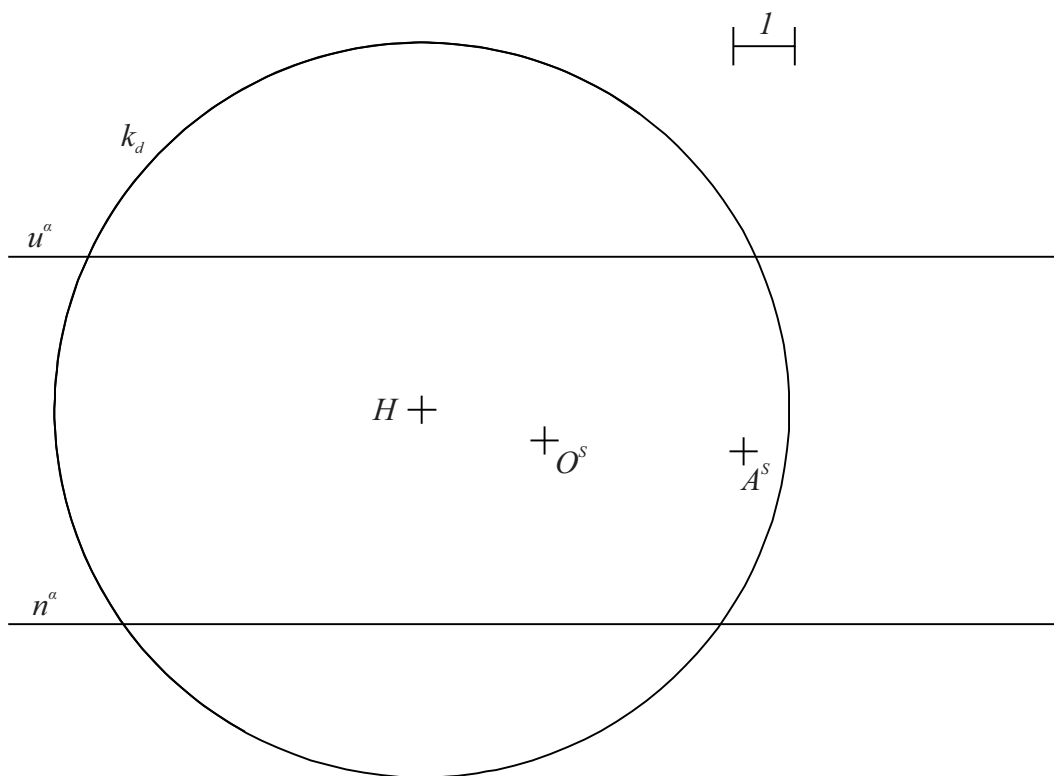
Ukažme si nyní, proč platí $|A^oB^o| = |AB|$, popřípadě $|A^oN^p| = |AN^p|$. Řešení vychází z podobnosti rovnoramenných trojúhelníků U^pST a N^pAA^o . Platí, že trojúhelník U^pST je rovnoramenný, jelikož jsme konstrukci provedli tak, aby platilo $|U^pS| = |U^pT|$. Dále platí že $|\angle TU^pS| = |\angle AN^pA^o|$ a trojúhelníky U^pST a N^pAA^o jsou stejnohlé se středem stejnolehlosti A^s . Tedy trojúhelník N^pAA^o je rovnoramenný a platí $|A^oN^p| = |AN^p|$ tedy i $|A^oB^o| = |AB|$.

Postup určení skutečné velikosti úsečky shrneme do následujících bodů.

1. $q^1; N^p \in q^1$
2. $q^2; U^p \in q^2, q^2 \parallel q^1$
3. $(S); (S) = a \cap k_d, a \perp HU^p, H \in a$ (sklopení středu promítání S)
4. $T; T = q^2 \cap l(U^p; |U^p(S)|)$ (dvě řešení, jedno zvolíme)
5. $A^o, B^o; A^o = q^1 \cap TA^s, B^o = q^1 \cap TB^s$
6. $|AB| = |A^oB^o|$

Příklad 3. *Zobrazení hranolu.*

V tříúhelníkové perspektivě sestrojte pravidelný šestiboký hranol s podstavou v rovině α . Dány jsou hlavní bod H , úběžnice u^α roviny α , stopa n^α roviny α , distanční kružnice k_d , středový průmět středu podstavy O^s a středový průmět vrcholu šestiúhelníka bod A^s . Výška hranolu je sedm jednotek. Jednotka je znázorněna na obrázku zadání 3.11.



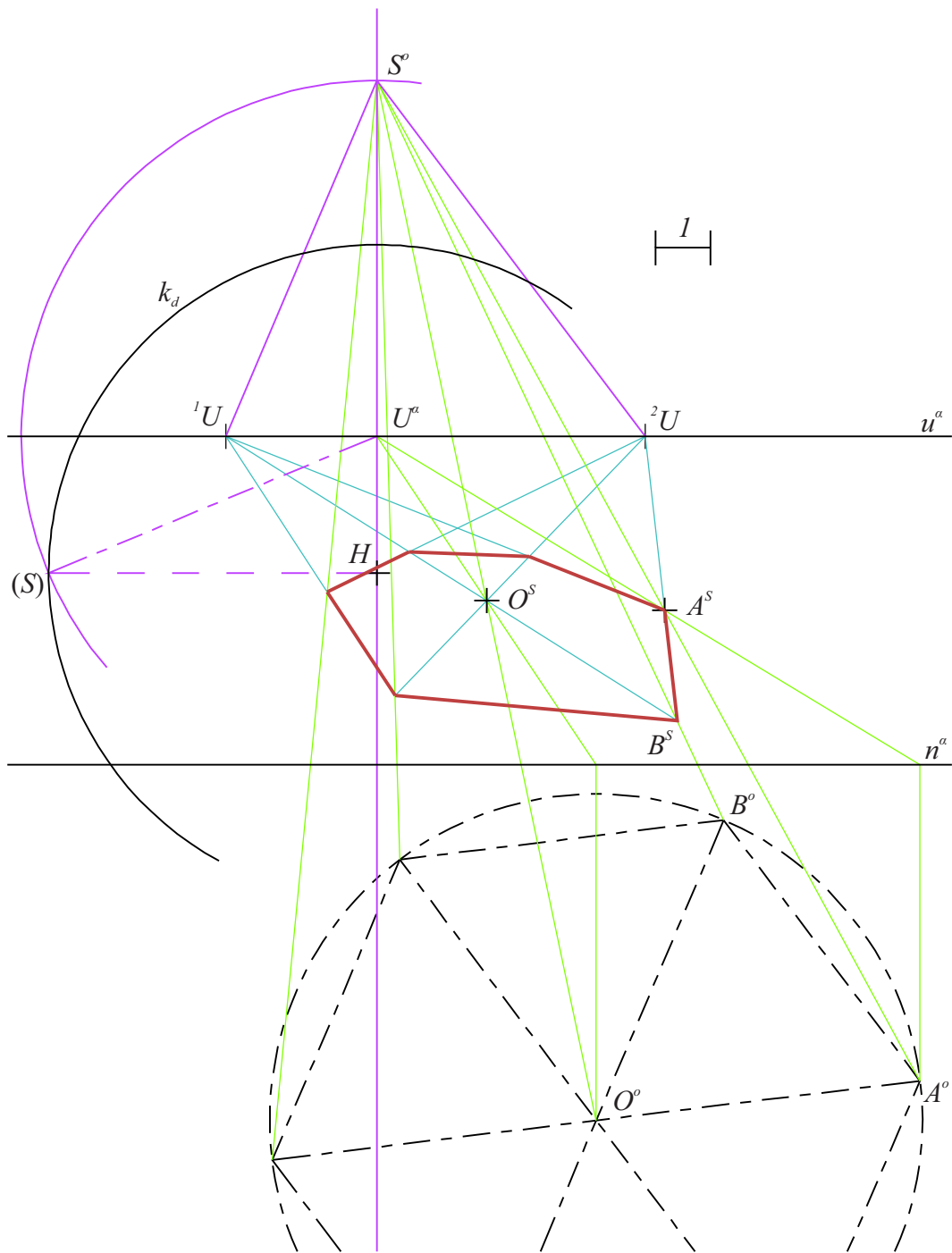
Obrázek 3.11: Příklad 3: Zadání.

Řešení. Podstava hranolu leží v rovině α . Stejně jako v příkladu 1 využijeme otočení roviny α do průmětny. Situaci ilustruje obrázek 3.12. Střed promítání se v otočení zobrazí do bodu S^o , střed podstavy do bodu O^o a vrchol podstavy A do bodu A^o . V otočení zkonstruujeme pravidelný šestiúhelník se středem O^o a jedním vrcholem A^o . Ke konstrukci středového průmětu podstavy hranolu využijeme úběžníky 1U a 2U .

V dalším kroku vyneseme výšku tělesa na boční hraně vedené bodem A . Vy-
užijeme postup z příkladu 2. Situaci znázorňuje obrázek 3.13. Všechny boční
hrany tělesa leží na přímkách kolmých k rovině α . Tedy jejich středové průměty
prochází úběžníkem normál N^α , který sestrojíme sklopením středově promítací
roviny kolmé ke stopě n^α . Výšku vyneseme nejprve na boční hraně procházející
bodem A . Přímkou, na které leží boční hrana procházející bodem A , označme a .
Její středový průmět a^s prochází úběžníkem normál N^α (který je jejím úběžní-
kem, tedy $N^\alpha = U^a$) a bodem A^s . Stopník N^α přímkou a získáme jako průnik
druhého průmětu a_2 a středového průmětu a^s přímkou a . Nyní můžeme aplikovat
postup z příkladu 2. Volme rovnoběžné přímky q^1 a q^2 , kde $N^\alpha \in q^1$ a $N^\alpha \in q^2$.
V našem případě volme $q^1 = a'_2$ a $q^2 = a_2$. Pomocí dělicího bodu T získáme
otočený bod $A^o \in q^2$ a od něj na přímkou q^2 nanese požadovanou výšku tělesa,
která je sedm jednotek. Získáme tak otočený bod horní podstavy \bar{A}^o . Pomocí dě-
licího bodu T jej přeneseme na přímkou a^s a získáváme boční hranu tělesa úsečku
 $|A^s \bar{A}^s|$.

Horní podstavu tělesa dorýsujeme pomocí úběžníků 1U a 2U a bočních hran
směřujících do úběžníku normál N^α . Nakonec na tělese doplníme viditelnost jed-
notlivých hran, jak je znázorněno na obrázku 3.14.

Na závěr příkladu připojme poznámku. V obrázku 3.14 je vidět, že hranol
je zobrazením celkem zdeformovaný, zejména v okolí bodu \bar{B}^s . V úvodních od-
stavcích kapitoly jsme si uvedli, že zobrazovaný objekt by měl ležet uvnitř zorného
kuželu. Pro lidské oko je přirozené vnímat přibližně v rozsahu zorného kuželu.
V příkladu 3 zobrazovaný objekt neleží v zorném kuželu, proto dochází k vel-
kému zkreslení. Průnik zorného kuželu s průmětnou je kruh vyznačený v obrázku
3.14 žlutou kružnicí $m(H; d \cdot \tan(\varphi))$, kde H značí hlavní bod, d distanci a φ úhel,
který svírá osa zorného kuželu s jeho površkou. K této nepřesnosti jsme si do-
volili přistoupit, aby se příklad přehledně vešel na stránku a abychom poukázali
na nepřirozené zkreslení rýsovaných objektů mimo zorný kužel.



Obrázek 3.12: Příklad 3: Zobrazení podstavy.

4. Šikmý snímek

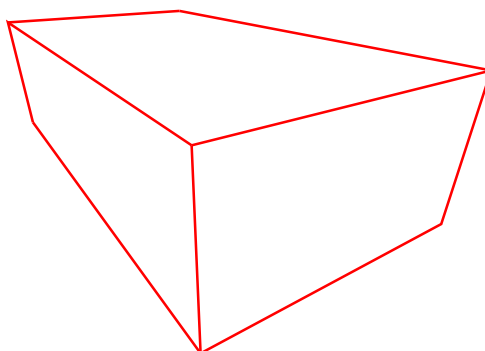
Snímek, který nemá vodorovnou osu záběru, označujeme ve fotogrammetrii jako snímek šikmý. Geometrickou podstatou šikmého snímku je tříúběžníková perspektiva. Jako zdroj informací pro tuto kapitolu posloužily [14], [10] nebo [2].

V této kapitole se naučíme v několika příkladech nalézt prvky vnitřní orientace snímku a rozměry těles a budeme se zabývat vkreslením dalších objektů do šikmého snímku.

Uvažujme zavedení kartézské soustavy souřadnic stejně jako v kapitole 3. Svislý směr vzhůru ve skutečnosti ztotožňujeme s kladným směrem osy z a rovinu xy považujeme za vodorovnou. Rovinu xy nazýváme základní a předpokládáme, že objekty zájmu na základní rovině stojí.

Příklad 1. Rekonstrukce šikmého snímku.

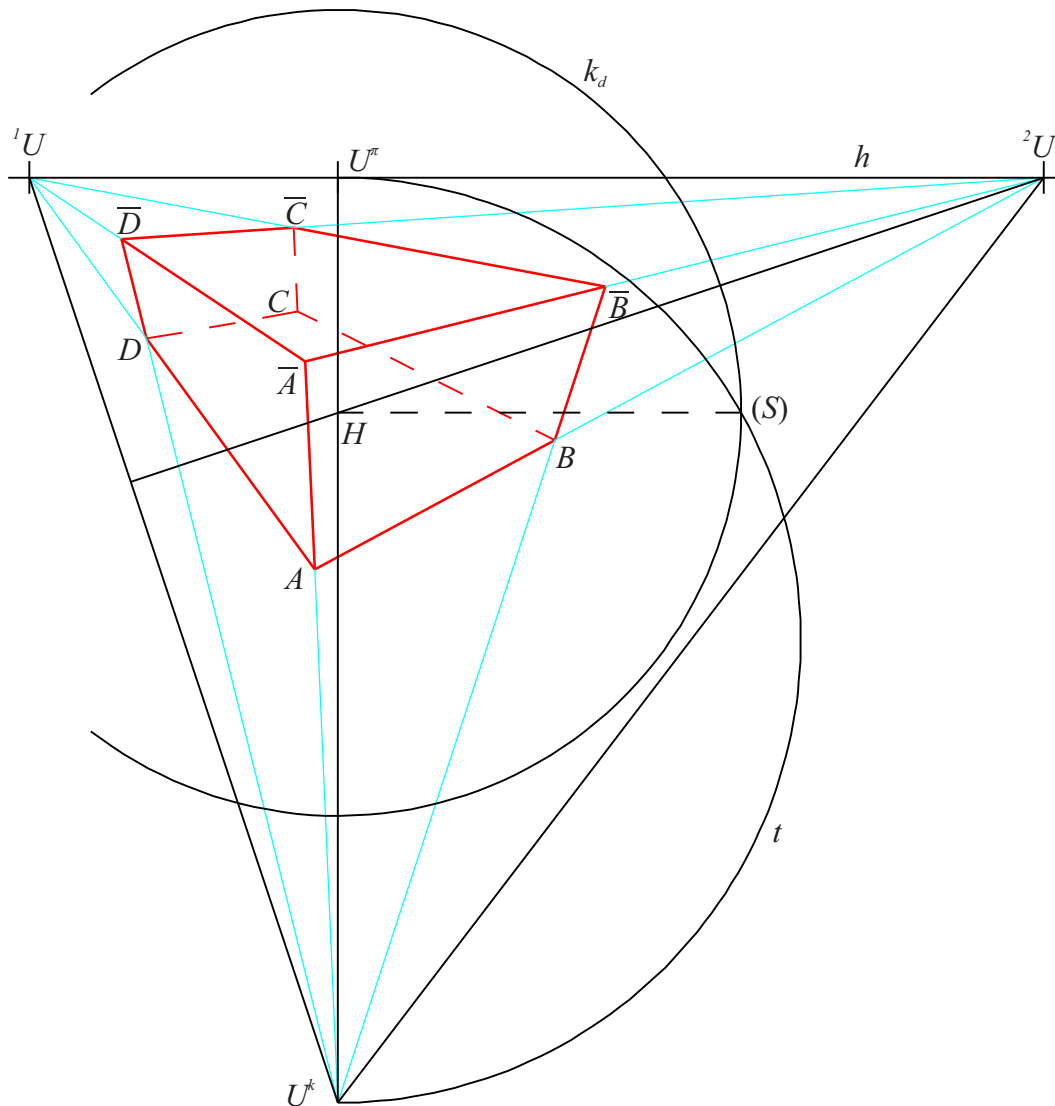
Je dán šikmý snímek kvádru stojícího na základní rovině. Najděte prvky vnitřní orientace snímku (hlavní bod a distanci). Zadání je zobrazeno na obrázku 4.1.



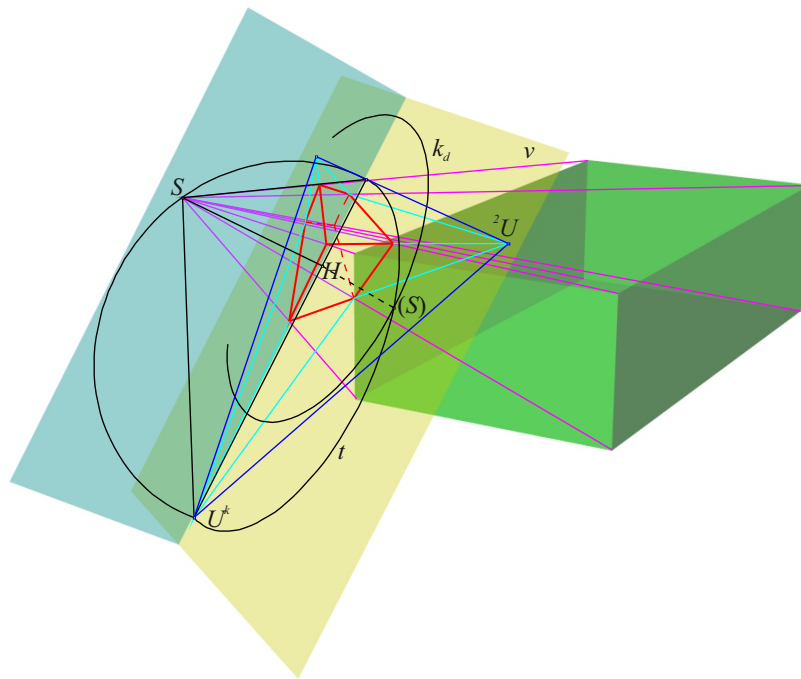
Obrázek 4.1: Příklad 1: Zadání.

Řešení. Postup řešení příkladu ilustruje obrázek 4.2. Označme vrcholy kvádru $A, B, C, D, \bar{A}, \bar{B}, \bar{C}$ a \bar{D} . Přímkou AB, CD a $\bar{C}\bar{D}$ jsou ve skutečnosti rovnoběžné. V průmětně se sbíhají do úběžníku, jelikož nejsou s průmětnou rovnoběžné. Pojmenujme jej 2U . Podobně přímkou $AD, \bar{A}\bar{D}$ a $\bar{B}\bar{C}$ se sbíhají do úběžníku 1U . Spojnice bodů 1U a 2U je úběžnice roviny podstavy $ABCD$. Označme ji h jako horizont, jelikož kvádr stojí na základní rovině. Svislé směry $A\bar{A}, B\bar{B}$ a $D\bar{D}$ se sbíhají do úběžníku normál základní roviny U^k . Nyní můžeme pomocí úběžníků doplnit průmět tělesa o vrchol C a z něho vycházející hrany, které nejsou vidět. Body $S, U^k, {}^1U$ a 2U tvoří s prostorem čtyřstěn. Úsečky $SU^k, S{}^1U$ a $S{}^2U$ mají společný bod střed promítání S a jsou po dvojicích na sebe kolmé. Hlavní bod H je kolmým průmětem středu promítání S do průmětny. Proto hlavní bod H určíme jako průsečík výšek trojúhelníku ${}^1U{}^2UU^k$. Distanci zjistíme ve sklopení středově promítací roviny některé z výšek pomocí Thalétovy kružnice nad průměrem jednoho z úběžníků a paty příslušné výšky. V obrázku 4.2 jsme využili kružnici t nad průměrem U^kU^π . V prostoru je trojúhelník $U^kU^\pi S$ pravoúhlý, kde S je střed promítání. Distance je rovna velikosti úsečky $|H(S)|$.

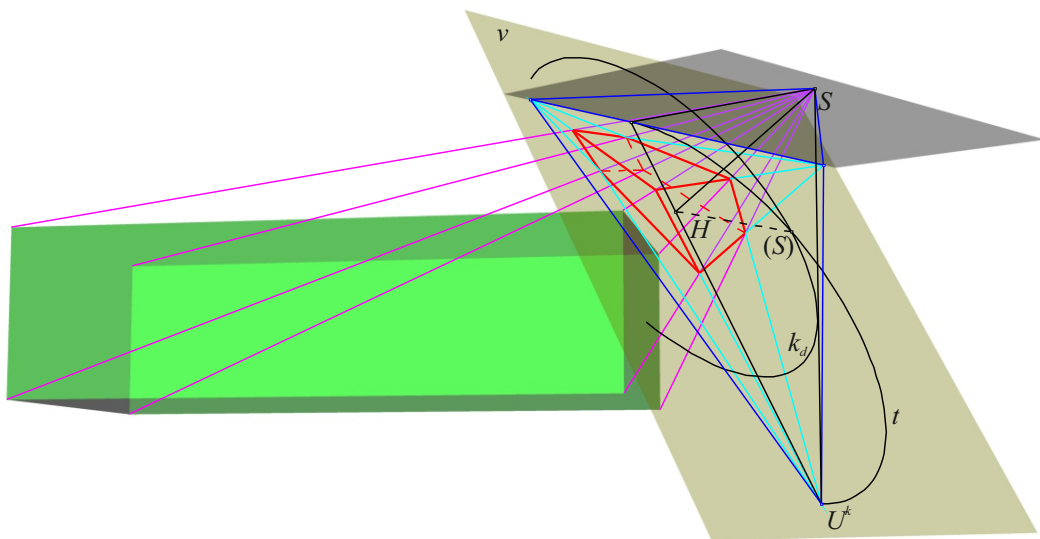
Prostorová vizualizace příkladu je znázorněna na obrázku 4.3 a 4.4. Je zobrazen vztah tělesa v prostoru, středového průmětu tělesa v průmětně ν , středově promítací roviny úsečky U^kU^π a horizontální roviny (středově promítací rovina horizontu). Model kvádru v prostoru je umístěn na jiné základní rovině, než která je využita v dalších příkladech.



Obrázek 4.2: Příklad 1: Hledání prvků vnitřní orientace.



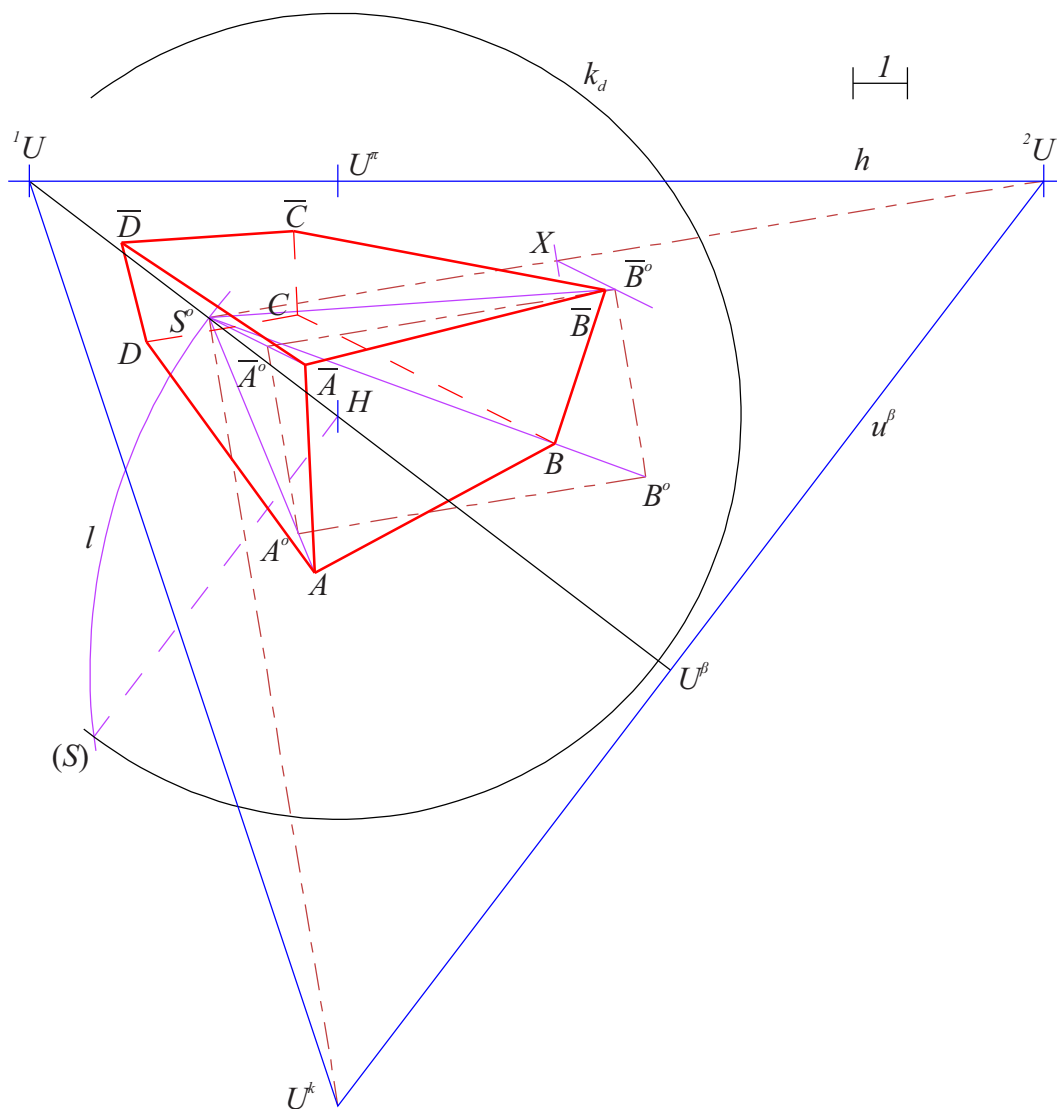
Obrázek 4.3: Příklad 1: Prostorová vizualizace I: hledání prvků vnitřní orientace.



Obrázek 4.4: Příklad 1: Prostorová vizualizace II: hledání prvků vnitřní orientace.

Příklad 2. Zjištění rozměrů kvádrů.

Zjistěte délky hran kvádrů ze šikmého snímku z předchozího příkladu, jestliže délka hrany AB je 6,5 jednotek. Jednotka je vyznačena v obrázku s řešením příkladu 4.5.



Obrázek 4.5: Příklad 2: Otočení roviny boční stěny do průmětny.

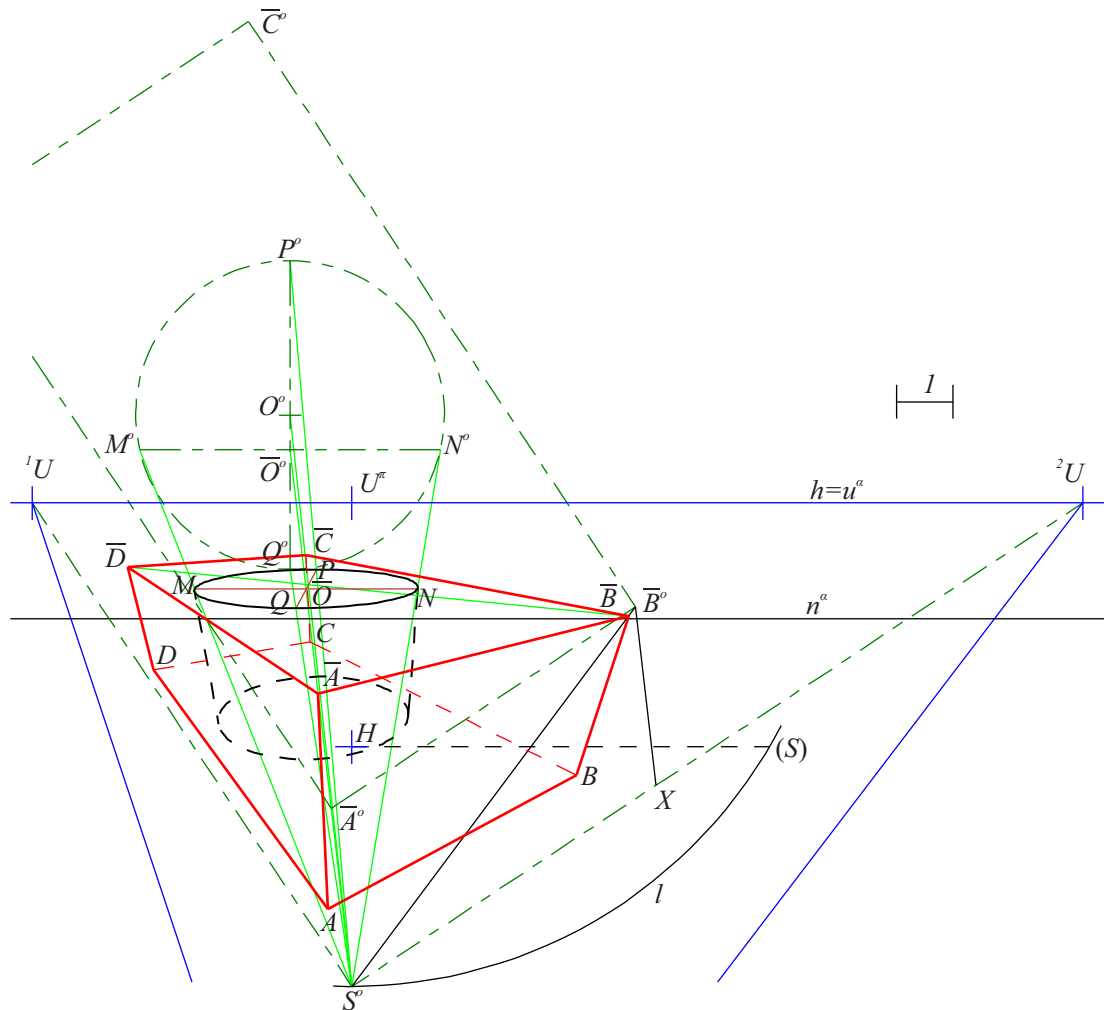
Řešení. Skutečné délky hran zjistíme buď pomocí otočení roviny stěny do průmětny nebo pomocí dělicích bodů.

Rovinu boční stěny $AB\bar{A}\bar{A}$ pojmenujme β . Ke zjištění délky hrany $|A\bar{A}|$ využijeme otočení roviny β do průmětny. Řešení je zobrazeno na obrázku 4.5. Navážeme na příklad 1 a využijeme již zjištěných prvků vnitřní orientace a úběžníků směrů jednotlivých hran kvádrů ve snímku. Spojnice úběžníků ${}^2UU^k$ je úběžnicí roviny β . Pata kolmice k úběžnici u^β spuštěné z úběžníku 1U je úběžník spádových přímek U^β roviny β . Pomocí středu ve sklopení (S) na distanční kružnici k_d získáme střed v otočení S^o , tedy $S^o = {}^1UU^\beta \cap l(U^\beta; |U^\beta(S)|)$. Spojnice středu v otočení S^o s úběžníky 2U a U^k jsou směry hran AB a $A\bar{A}$ v otočené rovině do průmětny, tedy $A^oB^o \parallel {}^2US^o$ a $A^o\bar{A}^o \parallel S^oU^k$. Zároveň body v otočení leží na přímce procházející středem v otočení S^o a jejich odpovídajícími středovým

tací roviny úsečky 1UH leží střed promítání na distanční kružnici k_d bod $(S)_2$. Se-
strojíme dělicí bod $T_2 = q^2 \cap l_2({}^1U; |{}^1U(S)_2|)$. Průsečíky přímek T_2A a T_2D s pří-
mkou q^1 body ${}_2A^\circ$ a ${}_2D^\circ$ vymezují skutečnou délku úsečky $|AD|$. Přeměřením zjis-
tíme její délku 12,5 jednotky. Je to zároveň skutečná délka všech hran kvádru
ve skutečnosti rovnoběžných s hranou AD .

Příklad 3. *Vkreslení válce do kvádrů.*

Do kvádrů z příkladů 1 a 2 vkreslete svislou válcovou dutinu s podstavami ve vo-
dorovných stěnách kvádrů. Průměr válce je 5,5 jednotky. Osa válce splývá se svis-
lou osou kvádrů.



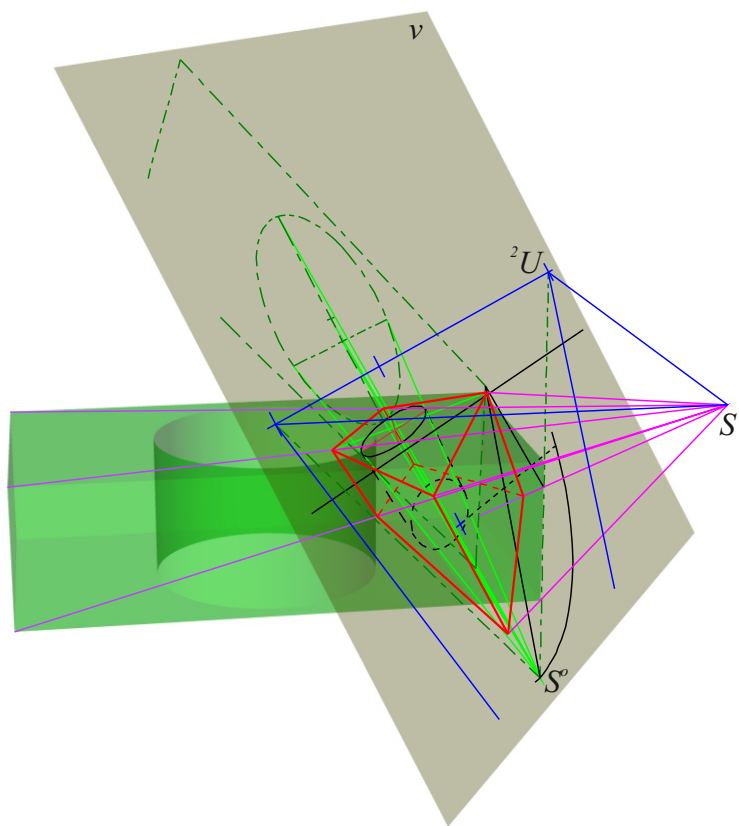
Obrázek 4.7: Příklad 3: Vkreslení kružnice do horní podstavy.

Řešení. V řešení postupujeme podle obrázku 4.7. Vykreslíme nejdříve do horní
podstavy kvádrů $\bar{A}\bar{B}\bar{C}\bar{D}$ hraniční kružnici horní podstavy válce. Pojmenujme
rovinu horní podstavy kvádrů α . Rovina α je rovnoběžná s rovinou dolní pod-
stavy kvádrů a jejich úběžnice se tedy shodují. Otočíme rovinu α do průmětny.
Střed promítání S se v otočení zobrazí do bodu S° . Distanci vyznačuje délka
úsečky $H(S)$. Narýsujeme horní podstavu v otočení $\bar{A}^\circ\bar{B}^\circ\bar{C}^\circ\bar{D}^\circ$. Víme, že strana
 $\bar{A}^\circ\bar{B}^\circ$ je rovnoběžná s přímkou ${}^2US^\circ$ a měří 6,5 jednotky. Jednotka je vyzna-
čena v obrázku řešení. Vyneseme 6,5 jednotky na přímkou ${}^2US^\circ$ od bodu S° . Zís-
káme tak bod X . Z bodu X vedeme rovnoběžku s paprskem $S^\circ\bar{A}^\circ$. Průsečík této

rovnoběžky s paprskem $S^o\bar{B}$ je bod \bar{B}^o . Dorýsujeme zbytek podstavy v otočení $\bar{A}^o\bar{B}^o\bar{C}^o\bar{D}^o$. Stopa roviny α (značíme ji n^α) prochází průsečíkem přímek $\bar{A}^o\bar{B}^o$ a $\bar{A}\bar{B}$ a je rovnoběžná s horizontem h , neboť horizont h je úběžnicí roviny α . Roviny α v otočení a průmětna si odpovídají ve středové kolineaci se středem kolineace S^o a osou kolineace n^α . V otočení narýsujeme hraniční kružnici horní podstavy válce se středem v průsečíku úhlopříček obdélníku horní podstavy kvádru v otočení a průměrem 5,5 jednotky. Její střed v otočení označme O^o . Kružnice se v průmětně zobrazí jako elipsa. Střed kružnice v otočení O^o neodpovídá středu elipsy v průmětu. Zobrazme do průmětny průměr kružnice v otočení kolmý na stopu n^α (v obrázku označen P^oQ^o). Získáme průměr PQ hledané elipsy. Střed úsečky PQ bude středem elipsy, v obrázku je označen \bar{O} . Jemu odpovídá v otočení bod \bar{O}^o . Zobrazme sečnu M^oN^o procházející bodem \bar{O}^o rovnoběžně s osou středové kolineace stopou n^α . Získáme úsečku MN , která společně s úsečkou PQ tvoří sdružené průměry zobrazované elipsy. Můžeme použít Rytzovu konstrukci k nalezení os elipsy a dorýsovat ji. Elipsa je obrazem hraniční kružnice horní podstavy vkreslované válcové dutiny.

Stejný postup uplatníme na zobrazení hraniční kružnice dolní podstavy vkreslovaného válce. Zobrazí se také na elipsu. Společné tečny z bodu U^k (úběžník normál roviny α , na obrázku 4.7 není zobrazen) narýsovaných elips tvoří obrys válcové dutiny. Na závěr doplníme viditelnost jednotlivých čar. Prostorovou situaci příkladu 3 ilustruje obrázek 4.8.

V příkladech 2 a 3 jsme si mohli povšimnout, že zobrazované těleso má neprázdný průnik s průmětnou. Na obrázku 4.7 se hrany horní podstavy v otočení protínají s hranami horní podstavy v průmětně. Byla porušena zásada lineární perspektivy zobrazovat objekty za průmětnou. Dopustili jsme se porušení této zásady, aby se příklady daly přehledně narýsovat.



Obrázek 4.8: Příklad 3: Prostorová vizualizace.

5. Šikmý snímek – ukázka využití

5.1 Rekonstrukce snímků

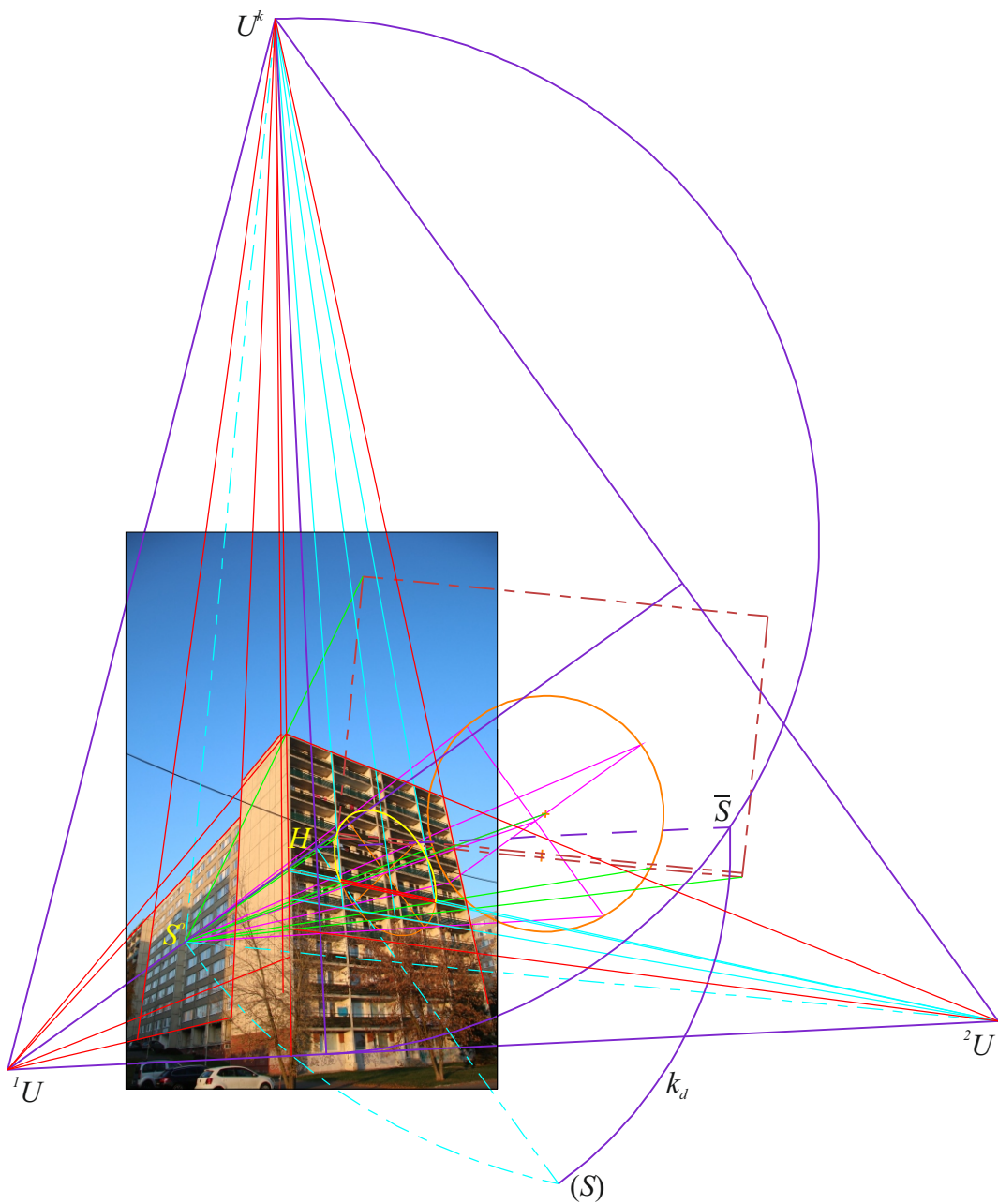
V této kapitole si ukážeme příklady rekonstrukce šikmého snímku. Snímky nejsou pořízeny měřickou komorou.

Příklad 1. Je dána fotografie panelového domu. Vizualizujte, jak by vypadala dočasná instalace pódia na úrovni šestého balkónu od země. Pódium bude mít šířku tří prostředních balkónů a hloubku jednoho balkónu. Pódium zastřešte pláštěm tvaru části válcové plochy s osou procházející o patro výš. Fotografie je zobrazena na obrázku 5.1. Na fotografii můžeme vidět vysokoškolskou kolej Univerzity Karlovy. Autorem snímku je autor práce. Snímek byl pořízen digitálním fotoaparátem na automatický režim.



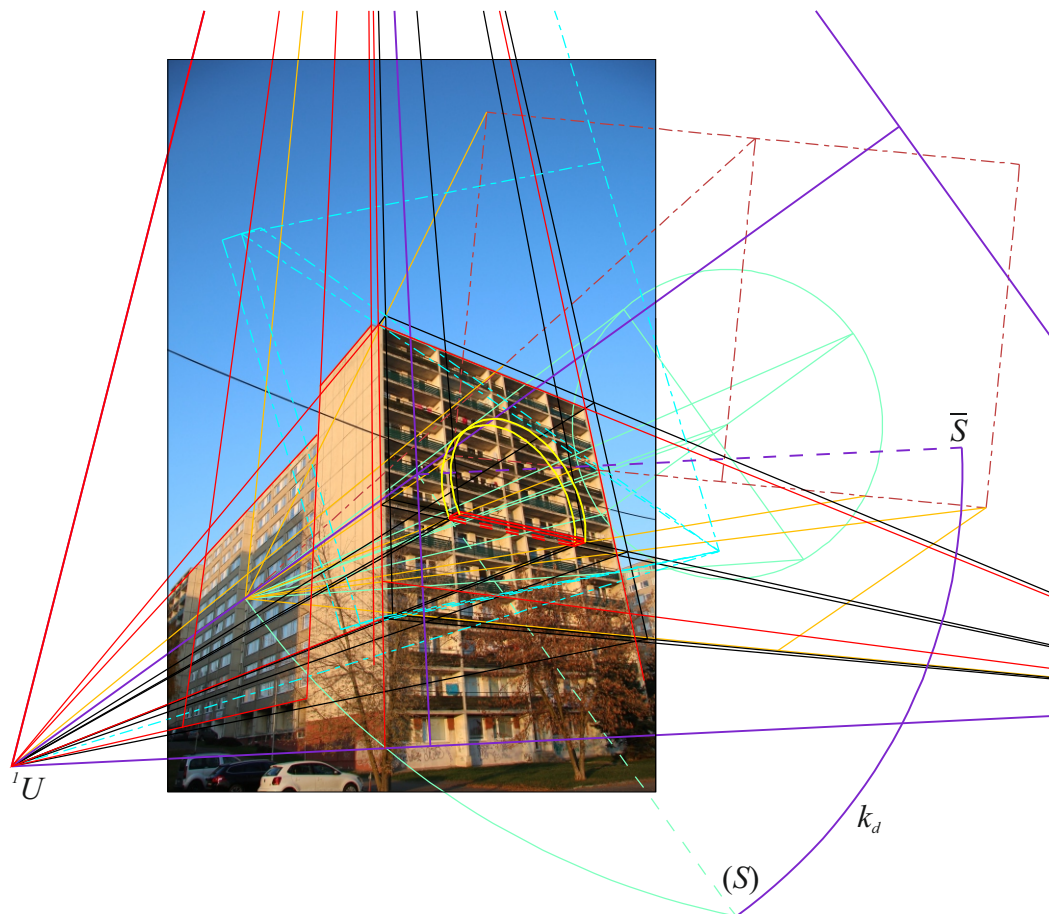
Obrázek 5.1: Příklad 1: Zadaná fotografie.

Řešení. V dané fotografii nejdříve určíme prvky vnitřní orientace. Na panelovém domě jsou vidět hrany budovy tří na sebe kolmých směrů. Pomocí dvojic úseček každého ze tří směrů určíme úběžníky. V obrázku 5.2 jsou pojmenovány 1U , 2U a U^k . V ortocentru trojúhelníka ${}^1U^2UU^k$ se nalézá hlavní bod H daného snímku. Distanci určíme ve sklopení středově promítací roviny jedné z výšek trojúhelníka ${}^1U^2UU^k$. K určení distance jsme využili sklopení středově promítací roviny výšky trojúhelníka ${}^1U^2UU^k$ procházející úběžníkem U^k . Distance je rovna délce úsečky $|H\bar{S}|$.



Obrázek 5.2: Příklad 1: Prvky vnitřní orientace a otočení čelní stěny do průmětny.

Nyní přistoupíme k narýsování části pódia a jeho zastřešení, které přiléhají k lodžím. Otočíme hraniční rovinu domu (rovinu zábradlí lodží) do průmětny a dorýsujeme v otočení požadovaný útvar. Část hraniční kružnice zastřešení se ve fotografii zobrazí na část elipsy (v obrázku rýsována žlutě).



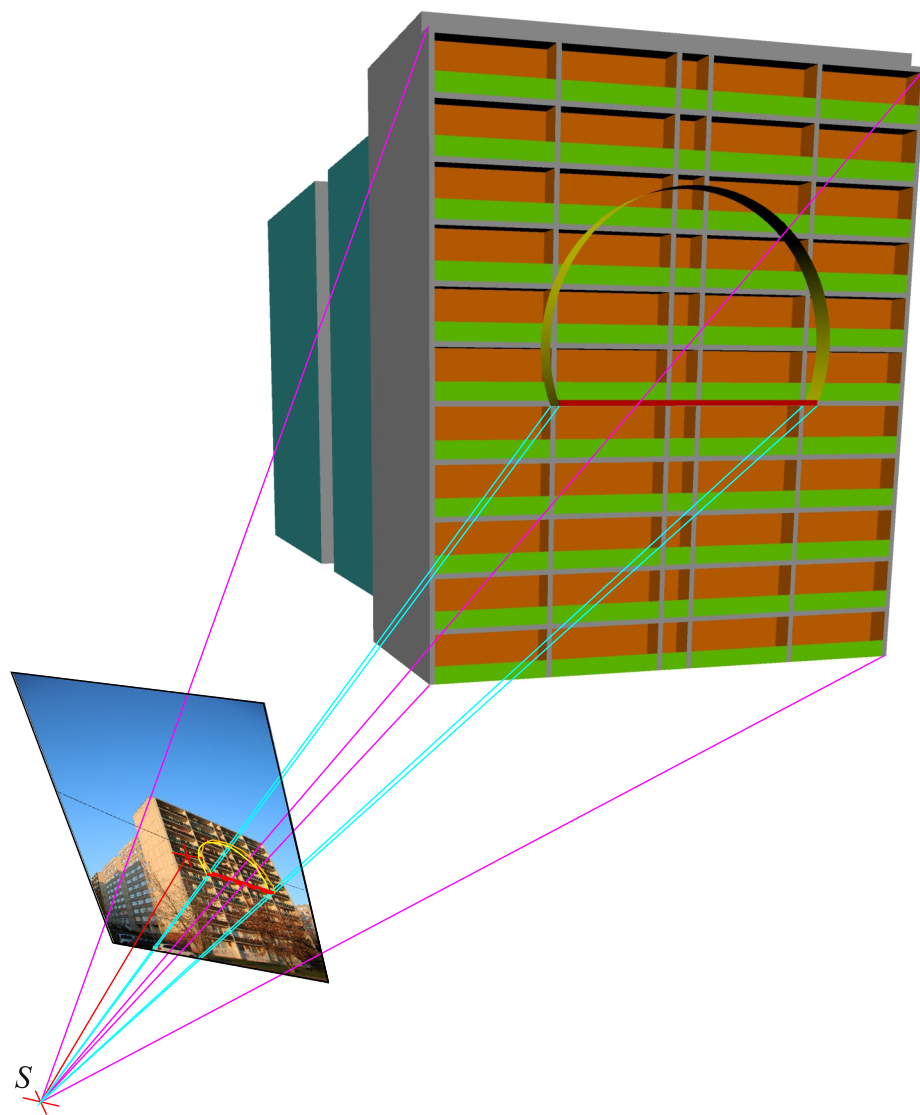
Obrázek 5.3: Příklad 1: Ukázka rysu.

Pro zobrazení hloubky pódia a zastřešení využijeme otočení roviny stěny, jejíž úběžnice prochází úběžníky 1U a U^k , do průmětny. V otočení zjistíme šířku panelu použitého k vybudování lodží, což bude i hloubka pódia. Můžeme pak do fotografie dorýsovat i přímky roviny rovnoběžné s rovinou zábradlí lodží, ve které budou ležet hrany začátku pódia a část druhé hraniční kružnice zobrazující zastřešení. K jejich vrýsování do fotografie využijeme opět otočení roviny do průmětny. Část konstrukce je vidět na obrázku 5.3.

Obrázek 5.4 vizualizuje podobu pódia se zastřešením ve fotografii. Na obrázku 5.5 můžeme vidět vztah prostorového modelu a fotografie.



Obrázek 5.4: Příklad 1: Vizualizace pódia na stěně budovy.



Obrázek 5.5: Příklad 1: Prostorová vizualizace vkreslení pódia.

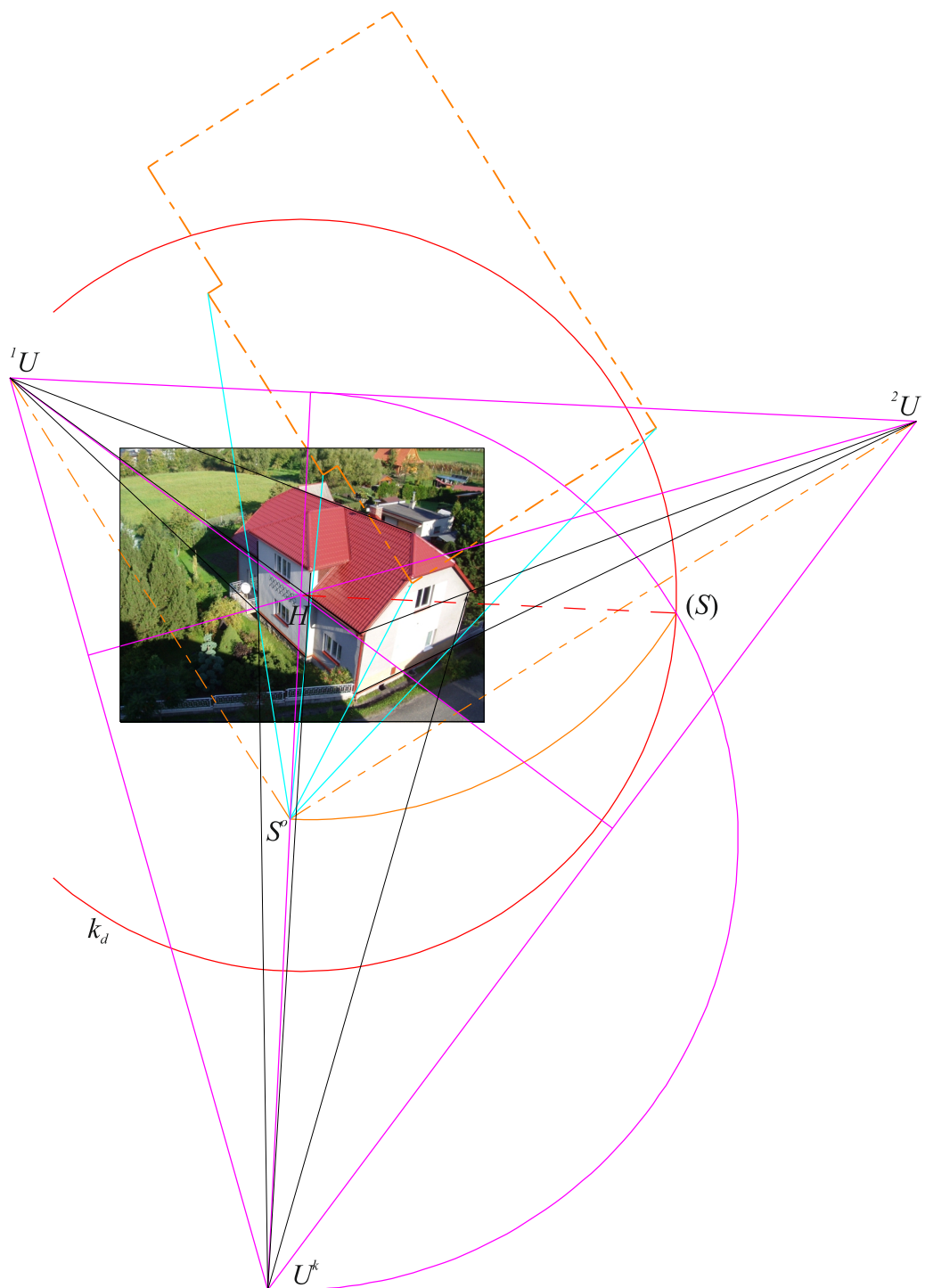
Příklad 2. Je dán šikmý snímek domu (viz obrázek 5.6). Rekonstruuje snímek za účelem vizualizace obdélníkového bazénu a půlkruhového dláždění v zahradě domu. Dále zjistíte, z jaké výšky nad zemí byl snímek pořízen, jestliže svislý rozměr oken směřujících do zahrady je 150 cm.



Obrázek 5.6: Příklad 2: Zadání. Zdroj: [21].

Řešení. Snímek není pořízen z měřické komory, je tedy potřeba pro rekonstrukci snímku nejdříve určit prvky vnitřní orientace snímku. Hledání prvků vnitřní orientace mimo jiné zobrazuje obrázek 5.7. Prodloužíme hrany domu, které reprezentují tři ve skutečnosti na sebe kolmé směry. Průsečíky dvojic ve skutečnosti rovnoběžných hran jsou úběžníky 1U , 2U a U^k . V průsečíku výšek trojúhelníka ${}^1U^2UU^k$ leží hlavní bod H . Pro zjištění distance využijeme sklopení středově promítací roviny některé z výšek trojúhelníka ${}^1U^2UU^k$. Distanci pak určuje délka úsečky $|H(S)|$. Tímto jsme určili prvky vnitřní orientace snímku.

Nyní přistupme k další části zadání, ve které vkreslíme do zahrady bazén s půlkruhovým dlážděním. Je třeba otočit rovinu zahrady respektive rovinu prvního podlaží domu do průmětny. Otočení je zobrazeno na obrázku 5.7. Úběžnicí této roviny je přímka ${}^1U^2U$. Otáčíme pomocí středu promítání v otočení S° . Na obrázku 5.8 je zobrazeno i vrýsování bazénu. Bazén má hladinu v rovině prvního podlaží domu a šířku stejnou s šířkou vystouplé části domu směřující do zahrady. Půlkruhové dláždění je zobrazeno u bazénu dále od silnice. K narýsování útvaru dláždění využijeme konstrukce pro zobrazení kružnice v lineární perspektivě. Půlkruhový okraj dláždění se zobrazí do fotografie jako část elipsy. Vizualizace bazénu a dláždění ve fotografii je zobrazena na obrázku 5.9.



Obrázek 5.7: Příklad 2: Prvky vnitřní orientace a půdorys.

Posledním úkolem je zjištění, z jaké výšky nad zemí byl snímek pořízen, jestliže svislý rozměr oken směřujících do zahrady je 150 cm. V obrázku 5.8 jsou také zobrazeny části bočních stěn v otočení do průmětny, které nám poslouží k vymodelování prostorové situace a posléze určení hledaného údaje. Prostorový model je zobrazen na obrázku 5.10. Přesný rozměr okna nám určil i přesný rozměr domu a tedy i vzdálenost středu promítání od roviny přízemního podlaží domu. Po vymodelování situace bylo zjištěno, že snímek byl pořízen z výšky 16,02 metrů nad prvním podlažím domu. V modelu domu pro zjednodušení neuvažujeme například přesahy střechy nebo komín.

Další možnost, jak zjistit hledanou výšku je zobrazena na obrázku 5.8. Chceme určit vzdálenost středu promítání od roviny terénu. Pro zjednodušení uvažujeme rovinu terénu shodnou s rovinou prvního podlaží domu. Tuto vzdálenost v prostoru vyjadřuje úsečka s krajními body ve středu promítání a v patě kolmice na rovinu terénu spuštěné ze středu promítání. Pojmenujme ji výška v . Výška v se zobrazí ve správném poměru ke svislému rozměru okna v otočení do průmětny, jestliže otočíme rovinu, ve které leží výška v i úsečka zobrazující svislý rozměr okna. Je pro nás výhodné využít otočení roviny některé již otáčené roviny do průmětny. Využijeme otočení roviny stěny vystouplé části domu do zahrady. Tato rovina je v prostoru svislá a výška v je s ní rovnoběžná. Rozmysleme, která úsečka v rovině stěny vystouplé části domu bude mít stejnou délku jako výška v , a poté určíme její středový průmět ve fotografii.

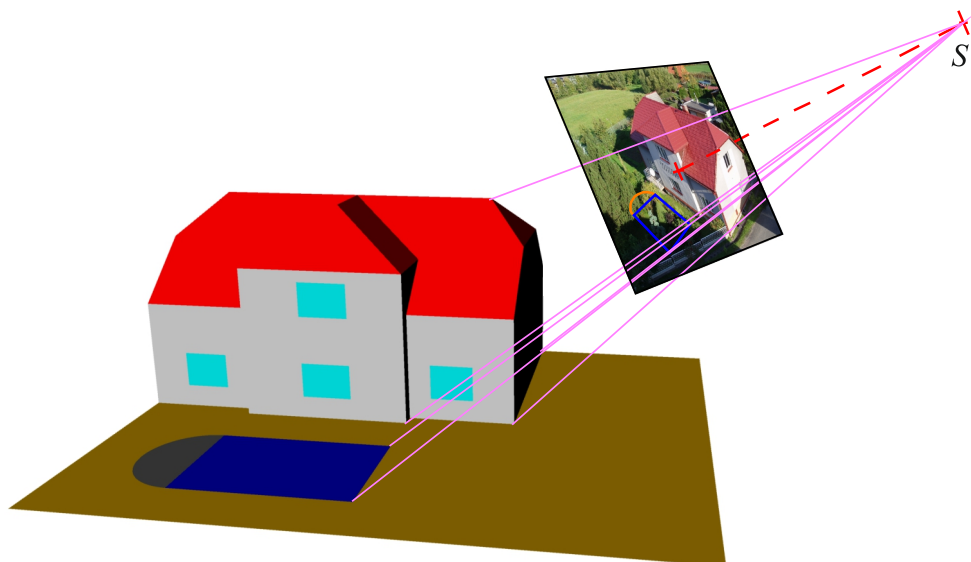
Uvažujme následující prostorovou konstrukci. Promítněme výšku v rovnoběžně ve vodorovném směru (to znamená všechny body výšky v promítněme ve směru přímek, které jsou vodorovné a vzájemně rovnoběžné) do roviny stěny vystouplé části domu. Výhodné je zároveň v prostoru dodržet směr svislé středově promítací roviny procházející úběžníkem spádových přímek vodorovných rovin U^π . Situaci ilustruje obrázek 5.11. Promítnutá výška v je v obrázku 5.11 označena jako v' .

Na fotografii se střed promítání tímto způsobem zobrazí do úběžníku spádových přímek roviny terénu U^π . Druhý krajní bod výšky v se zobrazí na hranu ležící v rovině terénu a zároveň ležící v rovině stěny vystouplé části domu. Výška v' má svislý směr, její průmět ve fotografii tedy směřuje do úběžníku U^k . V obrázku 5.8 je zobrazena plnou červenou čarou a je označena v'^s .

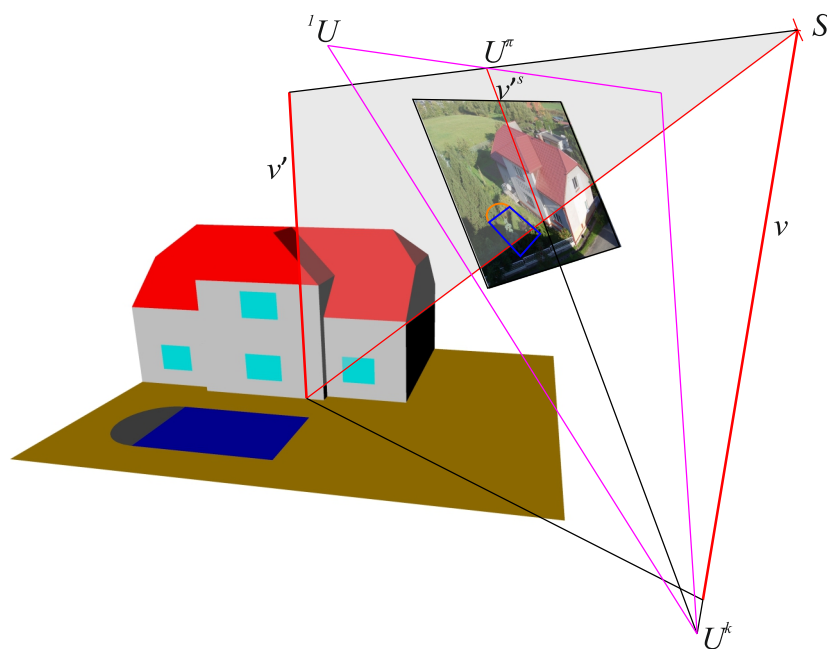
Nyní už stačí zobrazit výšku v'^s v otočení roviny vystouplé části domu do průmětny pomocí paprsků vedených ze středu promítání v otočení \bar{S}^o . V obrázku 5.8 je zobrazena čerchovanou červenou čarou a je označena v'^o . Po přeměření a poměrném přepočítání délek úseček v otočení vyjadřujících svislý rozměr okna a výšku v' respektive v dostaneme stejný výsledek jako v řešení přes prostorový model.



Obrázek 5.9: Příklad 2: Vizualizace bazénu.



Obrázek 5.10: Příklad 2: Prostorový vztah modelu a snímku.



Obrázek 5.11: Příklad 2: Vizualizace zjištění výšky.

Příklad 3. Je dán šikmý snímek (viz obrázek 5.12) části rotační kuželové plochy a kvádrů. Rovina podstavy kuželu je rovnoběžná se základní rovinou. Kvádr leží na základní rovině. V kuželu je nasypáný bílý prášek. Zjistěte jaký objem zaujímá bílý prášek, jestliže výška kuželu je 15 cm. Autorem snímku je autor práce. Snímek byl vyfocen digitálním fotoaparátem v automatickém režimu.



Obrázek 5.12: Příklad 3: Zadání.

- Vodorovný nebo šikmý snímek

Je dobré si rozmyslet, zda chceme rekonstruovat vodorovný nebo šikmý snímek.

Vodorovný snímek vznikne, pokud osa záběru je při fotografování vodorovná. Lehce tento snímek poznáme tak, že ve skutečnosti svislé hrany jsou na fotografii rovnoběžné. Pro naše účely nevadí, pokud je osa záběru pouze přibližně vodorovná (odchylka od vodorovného směru do tří stupňů se dá tolerovat). Je dobré dbát i na příčný náklon fotoaparátu. Pokud není fotoaparát ustaven vodorovně v příčném směru, nebude horizont rovnoběžný s hranou fotografie. Rekonstrukcí vodorovného snímku vzniká dvojúběžníková perspektiva.

Šikmý snímek nemá osu záběru vodorovnou. Opět platí, že pokud není fotoaparát ustaven vodorovně v příčném směru, nebude horizont rovnoběžný s hranou fotografie (to nastalo u příkladu 1 i u příkladu 2 v této kapitole). Rekonstrukcí šikmého snímku vzniká tříúběžníková perspektiva.

- Fotografovaný objekt

Lze fotografovat objekty malé (krabice od bot) i velké (vícepodlažní dům). Je vhodné si pro účely rekonstrukce snímku rozmyslet, které hrany objektů je potřeba na snímku zobrazit, aby bylo možné snímek zrekonstruovat. Pro rekonstrukci vodorovného snímku je potřeba znát ještě poměr délek některých ze stran nebo některé rozměry objektu. Je možné na fotografovaném objektu před pořízením snímku vyznačit body, které pak využijeme při rekonstrukci snímku. Je také možné k fotografovanému objektu položit objekt známých rozměrů a známého tvaru, který později usnadní samotnou rekonstrukci snímku.

Využití konstruktivní fotogrammetrie na střední škole je možné v rámci ročnických nebo předmětových projektů či přímo v hodinách. Studenti by měli zvládnout alespoň určení prvků vnitřní orientace snímku případně určení rozměrů hranatých objektů.

6. Rekonstrukce ze dvou snímků

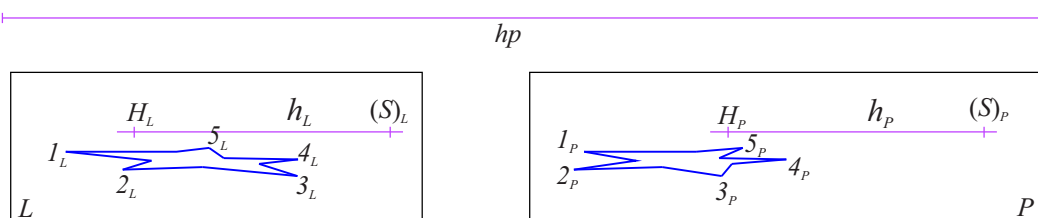
Rekonstrukcí ze dvou a více snímků se zabývá *průseková fotogrammetrie*. Čím více je využito snímků, tím dochází k získání přesnějších výsledků. U průsekové fotogrammetrie se osy záběru sbíhají. Původně se průseková metoda řešila geometricky, nyní se využívá počítačových technologií. Na fotografiích se označí odpovídající si body a hledají se pak jejich prostorové souřadnice. Někdy se odpovídající si body na objektu zájmu vyznačí pomocí *vlíčovacích bodů*, aby se snadněji na fotografiích identifikovaly.

Rekonstrukcí ze dvou snímků se zabývá i *stereofotogrammetrie*. Pro dvojice snímků je charakteristické, že osy záběru jsou rovnoběžné. Původně byly vyvinuty překreslovací stroje, do kterých se snímková dvojice vložila a pracovník s využitím stereoskopického vjemu určoval prostorové souřadnice bodů objektu zájmu. Nyní probíhá zpracování i těchto dvojic snímků zejména s využitím digitálních technologií.

U obou metod je nutné znát vzájemnou polohu jednotlivých snímků mezi sebou.

Příklad 1. Zobrazení mnohoúhelníku.

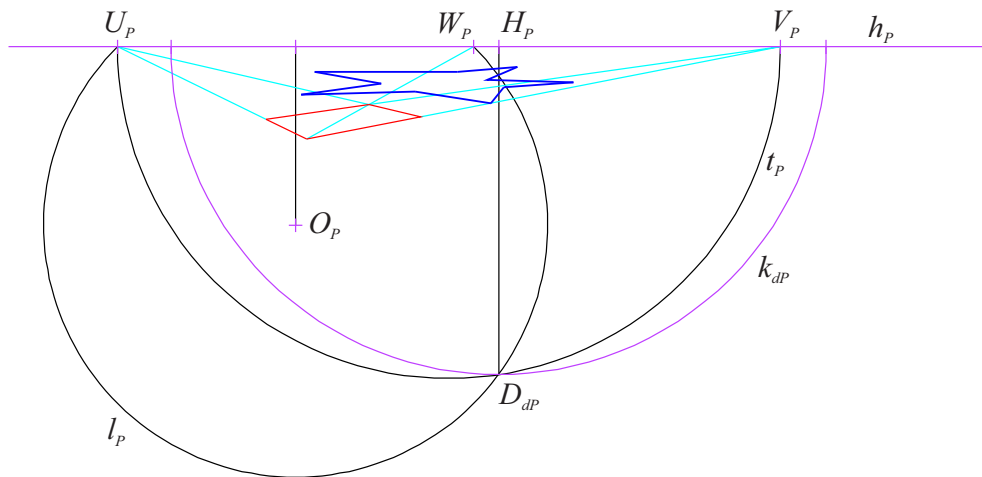
Jsou dány dva snímky (viz obrázek 6.1). Levý snímek je označený písmenem L a pravý snímek je označený písmenem P . Snímky jsou vodorovné (osy záběru jsou vodorovné i horizont je na každém snímku vodorovný). Osy záběru snímků jsou rovnoběžné. U každého snímku jsou známy hlavní bod (označené H_L a H_P), distance (délky úseček $|H_L(S)_L|$ a $|H_P(S)_P|$) a horizont (označený h_L a h_P). Známa je délka úsečky vyjadřující vzdálenost středů promítání respektive hlavních bodů (v obrázku 6.1 je označena hp). Na snímcích je zobrazen mnohoúhelník tvaru pěticípé hvězdy, který je umístěn v základní rovině. Odpovídající vnější vrcholy hvězdy jsou označeny $1_L, 2_L, 3_L, 4_L$ a 5_L a $1_P, 2_P, 3_P, 4_P$ a 5_P . Úkolem je zjistit skutečnou velikost a tvar mnohoúhelníku v poměru k zadaným prvkům vnitřní orientace.



Obrázek 6.1: Příklad 1: Zadání.

Řešení.

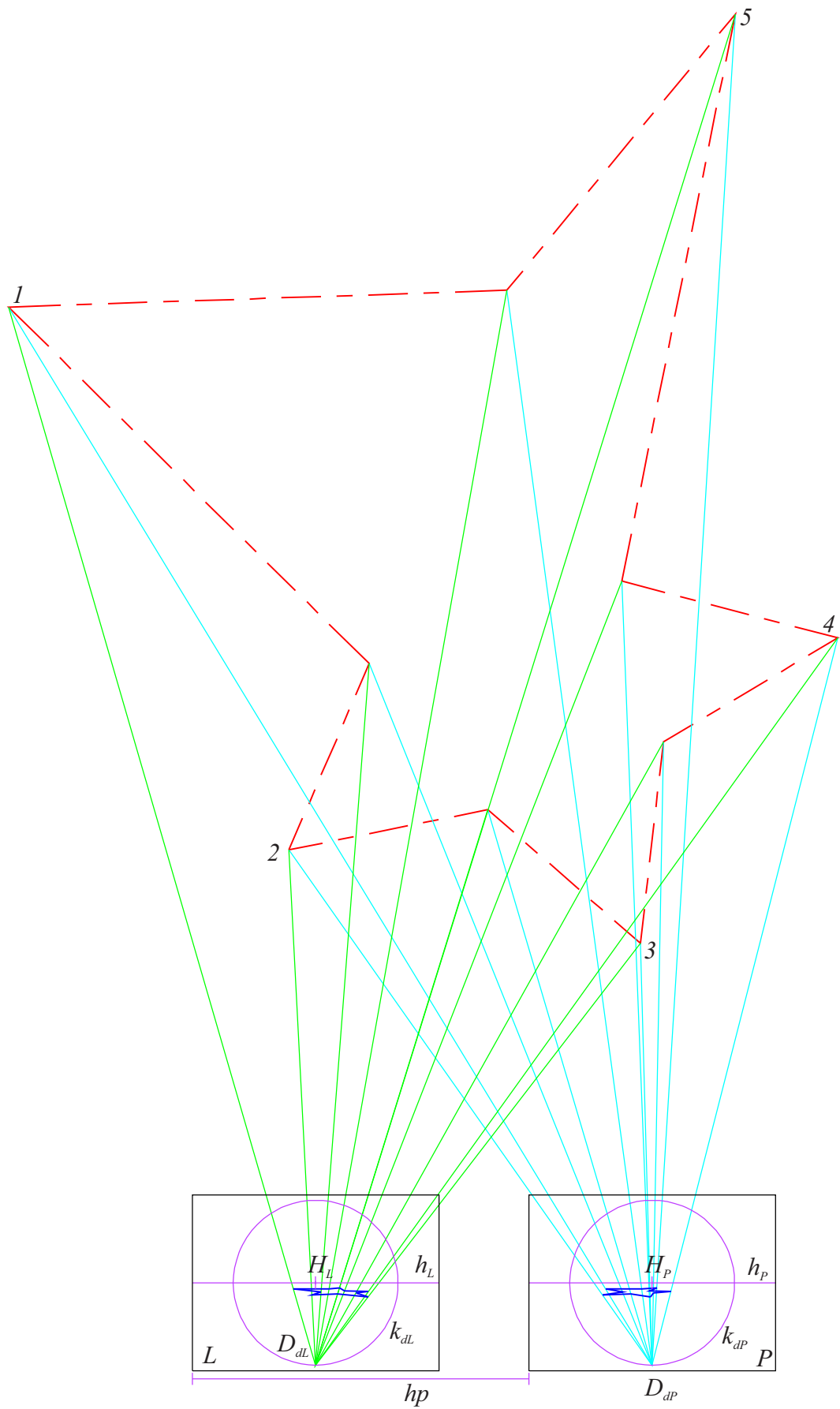
Ne vždy máme k dispozici měřickou komoru se známými prvky vnitřní orientace. K určení prvků vnitřní orientace si můžeme při vytváření snímků dopomoci umístěním *měřického čtverce* (pomocný čtverec uměle vložený do záběru) do vodorovné roviny (viz obrázek 6.2). Později ve snímku prvky vnitřní orientace určíme známým způsobem. Na obrázku 6.2 je znázorněno určení prvků vnitřní orientace na pravém snímku s využitím měřického čtverce. Vzdálenost hlavních bodů levého a pravého snímku respektive středů promítání snímků (*horizontální paralaxu*) určíme už při samotném fotografování snímků.



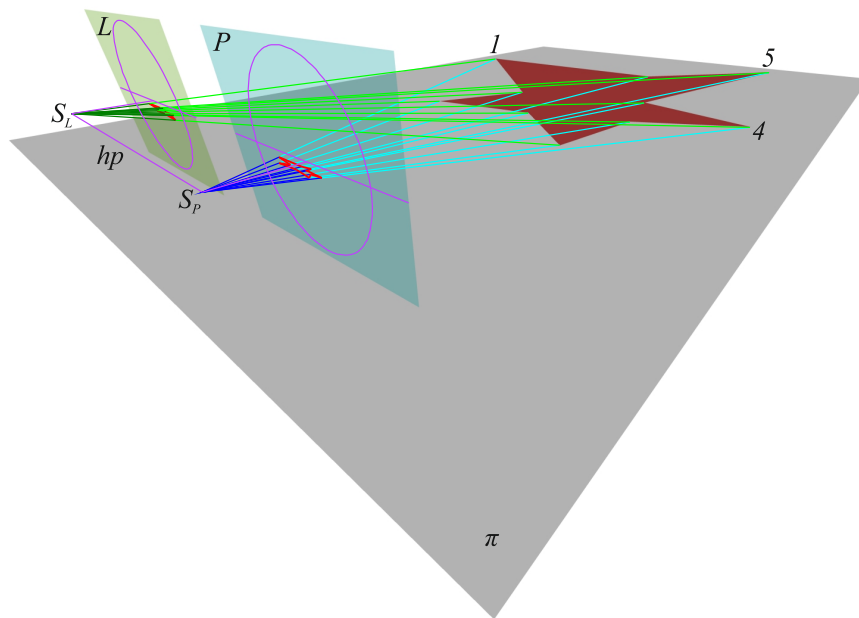
Obrázek 6.2: Příklad 1: Nalezení prvků vnitřní orientace.

Nyní přistoupíme k samotnému řešení zadaného příkladu. Řešení je znázorněno na obrázku 6.3. Umístíme snímky do jedné roviny vedle sebe tak, aby vzdálenost hlavních bodů odpovídala délce horizontální paralaxy. Horizonty levého i pravého snímku leží na stejné přímce. Objekt zájmu se nalézá ve vodorovné rovině. Na každém snímku určíme dolní distančník D_d (na levém snímku v obrázku 6.3 je označen D_{dL} a na pravém snímku je označen D_{dP}). Z dolního distančníku na obou snímcích vedeme paprsky jednotlivými vrcholy hvězdy (i těmi, které nejsou označeny v obrázku zadání). Na obrázku 6.3 mají paprsky pravého snímku tyrkysovou barvu a paprsky levého snímku barvu zelenou. V průsečících odpovídajících si paprsků nalézáme vrcholy mnohoúhelníku v otočení základní roviny do průmětny. V otočení se nám zobrazí skutečný tvar a velikost mnohoúhelníka ve správném poměru k zadaným parametrům.

Prostorová vizualizace vytvoření snímků je zobrazena na obrázku 6.4.



Obrázek 6.3: Příklad 1: Nalezení skutečného tvaru.



Obrázek 6.4: Příklad 1: Prostorový model.

7. Digitální fotogrammetrie

Metody digitální fotogrammetrie se vyznačují zpracováním snímků s využitím počítačových technologií. Cílem metod digitální fotogrammetrie je algoritmizace a automatizace postupů rekonstrukcí snímků. Vstupem mohou být digitalizované původně analogové snímky nebo přímo snímky z digitálních komor (někdy i vícenásobných) nebo fotoaparátů. Digitální fotogrammetrie výpočetně určuje prostorové souřadnice bodů objektu zájmu ze snímkových souřadnic. Hojně se využívají transformace soustav souřadnic. Literatura rozšiřující znalosti o matematické a geometrické podstatě rekonstrukce snímků je například [5] nebo [4].

Výhody digitálních metod zpracování snímků ve fotogrammetrii jsou značné. Zpracování snímků je velmi zrychleno a usnadněno využitím programového vybavení. Pro uživatele také není nutná podrobná znalost matematické a geometrické podstaty rekonstrukcí snímků. Další nespornou výhodou je možnost snadného uchování dat pro potřeby případné další reprodukce výsledků.



Obrázek 7.1: Optický skener a mapovací vozík. Zdroje [22] a [23].

Častým (mezi-) výstupem digitálních fotogrammetrických metod je *mračno bodů*. Mračno bodů je množina bodů, které reprezentují povrch objektu zájmu. Mračno bodů může vznikat různými způsoby. Je produktem průsekové fotogrammetrie z více snímků zpracovaných příslušnými softwary. Objekt zájmu nafotíme z mnoha stran, nahrajeme snímky do vyhodnocovacího programu, určíme odpovídající si body a software vyhodnotí mračno bodů. Dalším způsobem, jak získat mračno bodů, je skenování objektu laserovými nebo optickými skenery. Mračna bodů se zpracovávají pro další využití, jimiž jsou například vizualizace, měření a podobně. Nevýhodou skenování je náročnější identifikace hran objektu.



Obrázek 7.2: Mobilní 3D skener. Zdroj [24].

Na obrázku 7.1 vidíme optický skener ATOS a měřicí vozík NavVis, který obsahuje šest digitálních fotogrammetrických komor a tři laserové skenery. Na obrázku 7.2 vidíme mobilní 3D skener sloužící k mapování.

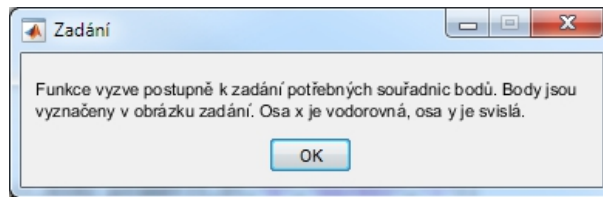
Následuje příklad, pro jehož vyřešení vznikla ve výpočetním programu funkce, která vypočítá prvky vnitřní orientace snímku a rozměry kvádrů se čtvercovou podstavou.

Příklad.

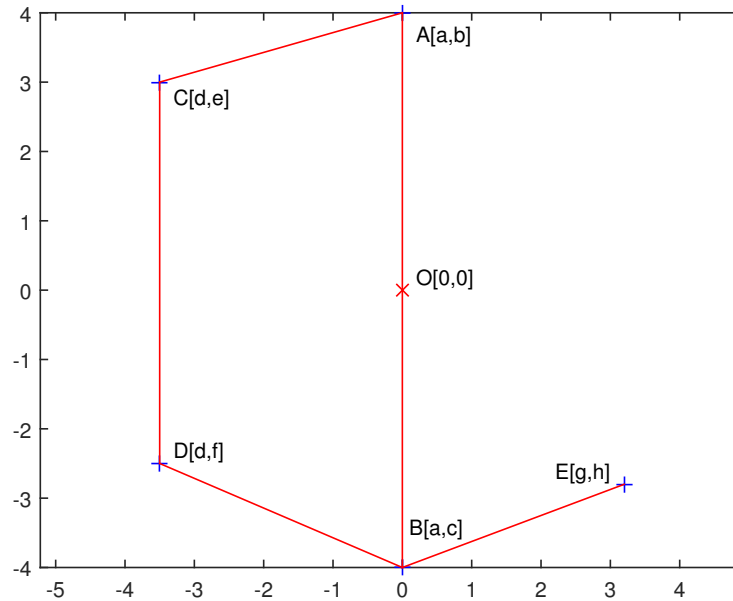
Je dán vodorovný snímek kvádrů se čtvercovou podstavou stojícího na základní rovině. Známé jsou snímkové souřadnice pěti bodů zobrazující vrcholy kvádrů. Předpokládejme, že známe pořadí a typ vrcholů. Za využití výpočetního softwaru zjistíte prvky vnitřní orientace snímku. Dále po zadání vzdálenosti horizontu a základnice určete rozměry kvádrů.

Řešení. Příklad jsme vyřešili ve výpočetním programu MATLAB. Příklad byl řešen geometrickým postupem (stejně jako v kapitole 2). Výstupy programu jsou zvýrazněny rámečkem. Výpočetní program umožňuje i grafický výstup. Text řešení je tedy doplněn několika ilustracemi. Pro potřeby vyřešení tohoto příkladu byla vytvořena funkce *pvo.m*, jejíž zdrojový kód může čtenář nalézt na přiloženém kompaktním disku.

Souřadnice bodů jsou zadány v kartézské soustavě souřadnic s počátkem v rovině snímku, vodorovnou osou x v rovině snímku a svislou osou y v rovině snímku. Svislé hrany hranolu mají tedy ve snímku směr osy y . Po spuštění funkce je uživatel vyzván (viz obrázek 7.3) k zadání souřadnic bodů ve snímku. Uživatel může volit polohy průmětů několika vrcholů kvádrů. Je třeba zachovat pořadí zadávaných vrcholů. Význam jednotlivých souřadnic vrcholů je znázorněn v grafickém výstupu (viz obrázek 7.4), kde jsou vyznačeny počátek soustavy souřadnic a jednotlivé souřadnice vrcholů.



Obrázek 7.3: Příklad: Informační hláška.



Obrázek 7.4: Příklad: Souřadnice zadávaných bodů.

Zadáme programu požadované hodnoty. Například následovně.

```

a= 0
b= 4
c= -4
d= -3.5
e= 3
f= -2.5
g= 3.2
h= -2.8

```

Ze zadaných souřadnic bodů program spočítá souřadnice úběžníků a dopočítá souřadnice posledního v průmětu viditelného vrcholu. Dále určí souřadnice chybějícího vrcholu dolní podstavy. S jeho využitím může určit úběžník úhlopříčky dolní čtvercové podstavy. Přichází na řadu zjištění souřadnic dolního distančníku. program ho spočítá jako průsečík Thalétovy kružnice nad úběžníky hran podstavy a části kružnice, z níž je vidět úsečka ohraničená úběžníkem hrany podstavy a úběžníkem úhlopříčky podstavy pod úhlem 45 stupňů.

Postup nalezení souřadnic průsečíků dvou kružnic, který využívá náš program, si nyní popíšeme detailněji. Mějme dvě kružnice $k_1(S_1; r_1)$ a $k_2(S_2; r_2)$. Označme souřadnice středů kružnic následovně $S_1 = [x_1; y_1]$ a $S_2 = [x_2; y_2]$. Předpokládejme, že kružnice mají dva průsečíky R_1 a R_2 . Sledujme obrázek 7.5. Vzdálenost středů kružnic označme $d = |S_1S_2| = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$. Vyjádřeme nyní délku úsečky $|S_1U|$, kde U je pata výšky v trojúhelníku $\triangle S_1S_2R_1$ vedoucí vrcholem R_1 . Trojúhelníky $\triangle S_1R_1U$ a $\triangle S_2R_1U$ jsou pravoúhlé, tedy

$$\begin{aligned} r_1^2 &= v^2 + |S_1U|^2 \\ r_2^2 &= v^2 + |S_2U|^2 \\ r_1^2 - r_2^2 &= |S_1U|^2 - |S_2U|^2 = (|S_1U| + |S_2U|)(|S_1U| - |S_2U|) = d(|S_1U| - |S_2U|) \\ (r_1^2 - r_2^2)/d &= |S_1U| - |S_2U| = 2|S_1U| - d \\ |S_1U| &= (r_1^2 - r_2^2)/(2d) + d/2. \end{aligned}$$

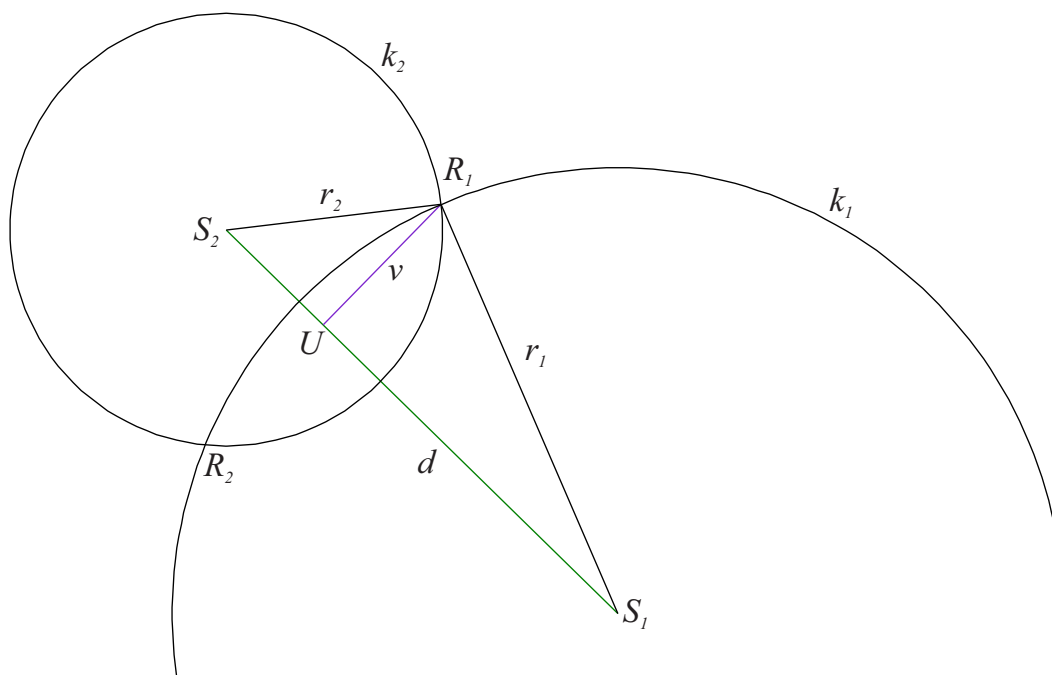
Výška trojúhelníku $\triangle S_1S_2R$ bude mít délku $v = \sqrt{r_1^2 - |S_1U|^2}$. Nyní dopočítáme souřadnice bodu $U = [U_x; U_y]$.

$$\begin{aligned} U_x &= x_1 + (|S_1U|/d)(x_2 - x_1) \\ U_y &= y_1 + (|S_1U|/d)(y_2 - y_1). \end{aligned}$$

Na závěr určíme souřadnice hledaných průsečíků $R_{1,2} = [R_{x1,2}; R_{y1,2}]$ takto

$$\begin{aligned} R_{x1,2} &= U_x \mp (v/d)(y_1 - y_2) \\ R_{y1,2} &= U_y \pm (v/d)(x_1 - x_2). \end{aligned}$$

V řešení příkladu funkce využije pouze jeden z průsečíků.



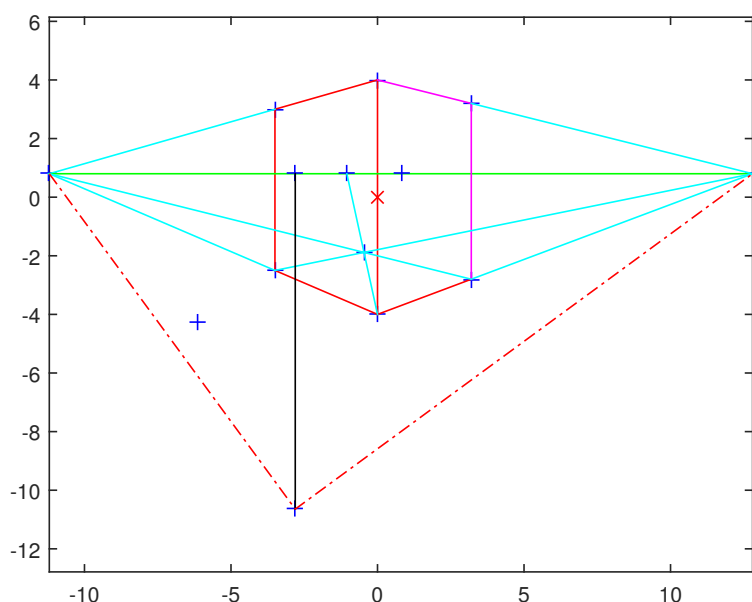
Obrázek 7.5: Příklad: Určení průsečíků dvou kružnic.

Po nalezení souřadnic dolního distančníku již snadno určíme souřadnice hlavního bodu snímku a příslušnou distanci. Program vypíše výšku (y -ovou souřadnici) horizontu, souřadnice hlavního bodu a distanci. Tím byly určeny prvky vnitřní orientace snímku. Na obrázku 7.6 vidíme grafický výstup programu v této fázi řešení příkladu. Pro zadané souřadnice průmětů vrcholů hranolu spočítal program následující hodnoty prvků vnitřní orientace.

```

horizont =
    0.8000
H =
    -2.8069    0.8000
distance =
    11.4451

```



Obrázek 7.6: Příklad: Nalezení prvků vnitřní orientace.

Další částí úkolu je zjištění rozměrů hranolu na snímku. Pro výpočet konkrétních rozměrů je třeba znát další údaj. Funkce vytvořená pro řešení příkladu nás vyzve k zadání výšky horizontu.

```
Zadej vysku horizontu:
```

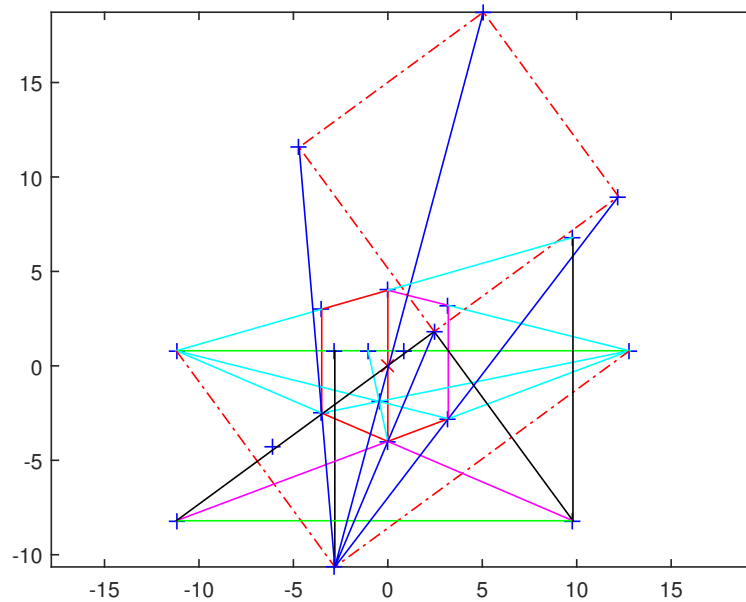
Po zadání výšky horizontu uživatelem, program spočítá y -ovou souřadnici základnice (stopy základní roviny, tedy roviny podstavy), souřadnice stopníku přímky, na které leží hrana podstavy, a souřadnice vrcholů podstavy v otočení roviny podstavy do průmětny. Poté spočítá a vypíše skutečnou délku hrany podstavy kvádrů. Nyní už chybí pouze určit skutečnou výšku tělesa. Tu určíme pomocí stejnohléhlého zobrazení svislé hrany na základnici se středem stejnohléhlosti v úběžníku. Obrázek 7.7 zobrazuje grafický výstup situace. Pro zadanou výšku horizontu 9 (v měřítku snímkových souřadnic) vypočetl program následující hodnoty.

```

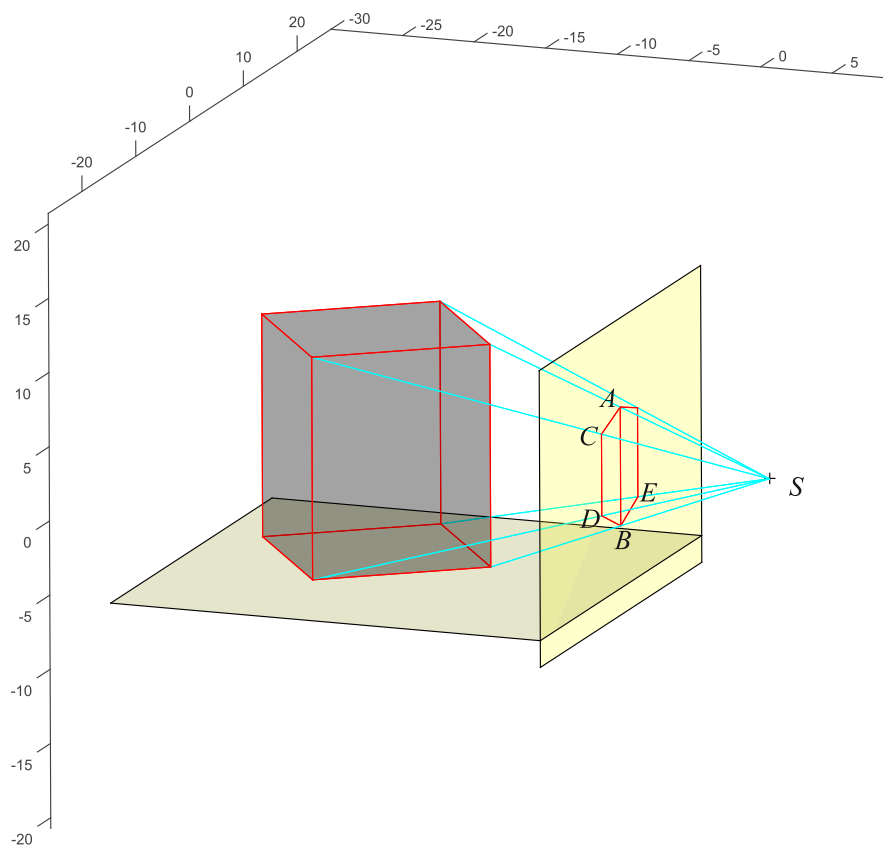
Zadej vysku horizontu: 9
vyska_horizontu =
    9
zakladnice =
    -8.2000
delka_hrany_podstavy =
    12.0961
vyska =
    15.0000

```

Na obrázku 7.8 je zobrazen grafický výstup prostorové vizualizace. Je zobrazen poloprůhledný model středu promítání, snímku, paprsků, kvádrů a základní roviny. Vyznačené jsou body střed promítání S a zadané body A , B , C , D a E . Podrobnější popis geometrické podstaty konstrukce můžeme nalézt v kapitole 2.



Obrázek 7.7: Příklad: Určení skutečných rozměrů kvádrů.



Obrázek 7.8: Příklad: Prostorová vizualizace.

Závěr

V diplomové práci Geometrické základy fotogrammetrie získal čtenář komplexní přehled o fotogrammetrii jako vědním oboru a seznámil se s grafickými metodami konstruktivní fotogrammetrie pro rekonstrukce vodorovného a šikmého snímku. Taktéž se seznámil v krátkosti s možnostmi geometrické rekonstrukce dvojic snímků. V závěrečné kapitole se čtenář dočetl o možnostech využití výpočetních programů pro potřeby konstruktivní fotogrammetrie a geometrické rekonstrukce snímku.

Veškeré představené postupy a konstrukce v diplomové práci mají původ v zobrazovacích metodách deskriptivní geometrie, zejména ve středovém promítání, speciálně pak v lineární perspektivě, která je geometrickou podstatou konstruktivní fotogrammetrie a geometrické rekonstrukce snímků.

Práce byla koncipována jako učební text formou navazujících řešených příkladů. V práci se nevyužívaly pouze základní konstrukce středového promítání, avšak podařilo se je prezentovat způsobem, aby i studenti středních a vysokých škol byli schopni látku zvládnout v návaznosti na učivo předmětů matematika a deskriptivní geometrie. Diplomová práce poskytuje možnost a dává návod na rozšíření výuky středních škol zasahujícího do předmětů geometrie, deskriptivní geometrie, výtvarná výchova, fotografování, architektura, design, geodézie, kartografie, práce s grafickými programy, práce s výpočetními programy či počítačová grafika. Příspěvkem práce je i poskytnutí předtisků zadání řešených příkladů v příloze 1.

V rámci diplomové práce bylo vytvořeno množství vlastních vizualizací a obrázků, které velmi napomohly pochopení látky. Velkou měrou přispěly k dosažení stanovených cílů práce a jsou obohacením současné literatury týkající se tématu fotogrammetrie. Přínosem je i poskytnutí zdrojových souborů obrázků a vizualizací, se kterými lze nadále pracovat, na přiloženém kompaktním disku.

V závěru práce je ukázána částečná automatizace rekonstrukce snímku ze souřadnic bodů ve snímku ve výpočetním prostředí MATLAB. V oboru fotogrammetrie se nabízí rozšíření textu ve směru zpracování snímků s využitím digitálních metod fotogrammetrie ve smyslu obecnější částečné nebo úplné automatizace rekonstrukce snímků.

Seznam obrázků

1.1	Vývoj fototeodolitu. Zdroje: [15], [16] a [17].	5
1.2	Holub s fotoaparátém a stereokomparátor. Zdroje: [18] a [19].	6
1.3	Snímek s rámovými značkami. Zdroj: [20].	12
1.4	Určení prvků vnější orientace.	13
1.5	Fotografie budovy Vysoké školy ekonomické v Praze.	14
1.6	Pamětní deska v ulici Láskova v Praze.	15
2.1	Příklad 1: Zadání.	16
2.2	Příklad 1: Nalezení prvků vnitřní orientace.	17
2.3	Příklad 1: Podstava kvádrů v otočení.	18
2.4	Příklad 1: Kvádr s válcem s detailem příčkové konstrukce.	19
2.5	Příklad 1: Prostorová vizualizace.	20
2.6	Snímek: Vizualizace průmětu krychle.	21
2.7	Snímek: Čtyřúhelník a přímková plocha.	22
2.8	Snímek: Těleso s půlkulovou dutinou.	22
2.9	Snímek: Stejnolehlé krychle se stejným průmětem.	23
3.1	Prostorové znázornění tříúběžníkové perspektivy.	25
3.2	Bokorys perspektiva ptačí (vlevo) a žabí (vpravo).	26
3.3	Prostorová situace průmětu tělesa v tříúběžníkové perspektivě.	27
3.4	Příklad 1: Zadání.	28
3.5	Příklad 1: Otáčení roviny do průmětny.	29
3.6	Příklad 1: Středový průmět čtverce $ABCD$	29
3.7	Příklad 1: Prostorová situace.	30
3.8	Příklad 1: Prostorová situace včetně otočení.	30
3.9	Příklad 2: Skutečná délka úsečky.	31
3.10	Příklad 2: Prostorová vizualizace.	32
3.11	Příklad 3: Zadání.	33
3.12	Příklad 3: Zobrazení podstavy.	35
3.13	Příklad 3: Vynesení výšky.	36
3.14	Příklad 3: Horní podstava.	37
4.1	Příklad 1: Zadání.	38
4.2	Příklad 1: Hledání prvků vnitřní orientace.	39
4.3	Příklad 1: Prostorová vizualizace I: hledání prvků vnitřní orientace.	40
4.4	Příklad 1: Prostorová vizualizace II: hledání prvků vnitřní orientace.	40
4.5	Příklad 2: Otočení roviny boční stěny do průmětny.	41
4.6	Příklad 2: Zjištění délky hrany AD pomocí dělicích bodů.	42
4.7	Příklad 3: Vykreslení kružnice do horní podstavy.	43
4.8	Příklad 3: Prostorová vizualizace.	45
5.1	Příklad 1: Zadaná fotografie.	46
5.2	Příklad 1: Prvky vnitřní orientace a otočení čelní stěny do průmětny.	47
5.3	Příklad 1: Ukázka rysu.	48
5.4	Příklad 1: Vizualizace pódia na stěně budovy.	49
5.5	Příklad 1: Prostorová vizualizace vykreslení pódia.	50

5.6	Příklad 2: Zadání. Zdroj: [21].	51
5.7	Příklad 2: Prvky vnitřní orientace a půdorys.	52
5.8	Příklad 2: Vršování bazénu.	53
5.9	Příklad 2: Vizualizace bazénu.	55
5.10	Příklad 2: Prostorový vztah modelu a snímku.	55
5.11	Příklad 2: Vizualizace zjištění výšky.	56
5.12	Příklad 3: Zadání.	56
5.13	Příklad 3: Prvky vnitřní orientace a otočení roviny podstavy kuželu.	57
5.14	Příklad 3: Otočení roviny hladiny prášku a roviny řezu kuželu.	58
6.1	Příklad 1: Zadání.	60
6.2	Příklad 1: Nalezení prvků vnitřní orientace.	61
6.3	Příklad 1: Nalezení skutečného tvaru.	62
6.4	Příklad 1: Prostorový model.	63
7.1	Optický skener a mapovací vozík. Zdroje [22] a [23].	64
7.2	Mobilní 3D skener. Zdroj [24].	65
7.3	Příklad: Informační hláška.	66
7.4	Příklad: Souřadnice zadávaných bodů.	66
7.5	Příklad: Určení průsečíků dvou kružnic.	67
7.6	Příklad: Nalezení prvků vnitřní orientace.	68
7.7	Příklad: Určení skutečných rozměrů kvádrů.	69
7.8	Příklad: Prostorová vizualizace.	70

Seznam použité literatury

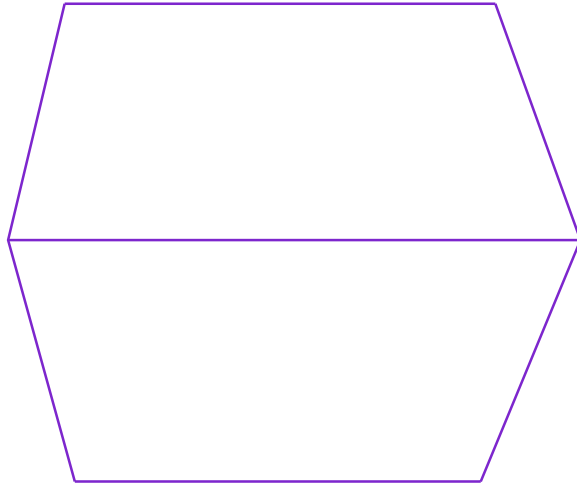
- [1] ŠMIDRKAL, Josef. *Fotogrammetrie*. Praha: Geodetický a kartografický podnik, 1986.
- [2] DRÁBEK, Karel, František HARANT a Ota SETZER. *Deskriptivní geometrie II*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1979. Řada teoretické literatury.
- [3] KADEŘÁVEK, František, Josef KLÍMA a Josef KOUNOVSKÝ. *Deskriptivní geometrie*. 2. dotisk 3. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1954. Čs. akademie věd. Sekce matematicko-fyzikální.
- [4] LUHMANN, Thomas. *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications*. Dunbeath: Whittles, c2006. ISBN 1870325508.
- [5] WOLF, Paul R., Bon A. DEWITT a Benjamin E. WILKINSON. *Elements of photogrammetry with applications in GIS*. Fourth edition. New York: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 9780071761123.
- [6] SVATÝ, Zdeněk. *Application of photogrammetry in forensic science*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2014. ISBN 9783659544118.
- [7] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. V Praze: České vysoké učení technické, 2009. ISBN 9788001042496.
- [8] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 10*. Praha: České vysoké učení technické, 1998. ISBN 8001018636.
- [9] DRÁBEK, Karel, František HARANT a Ota SETZER. *Deskriptivní geometrie*. 2. nezměn. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [10] KOČANDRLOVÁ, Milada a Jaroslav ČERNÝ. *Konstruktivní geometrie*. 3. vydání. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2016. ISBN 9788001060490.
- [11] FRÜHBAUER, František. *Rekonstrukce fotografického snímku*. Praha, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze. Matematicko-fyzikální fakulta. Vedoucí práce Petra SURYNKOVÁ.
- [12] MENŠÍK, Miroslav. *Geometrické základy fotogrammetrie*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1966.
- [13] PAVELKA, Karel. 150 let fotogrammetrie (1. část), *Zeměměřič*. Praha: Klaudian Praha, 2000, ročník 7, číslo 3.
- [14] SURYNKOVÁ, Petra. *Deskriptivní geometrie IIa*. [Přednáška]. Praha: Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova, 2012/2013.
- [15] *Teodolit*. [Online]. [Datum přístupu: 14.4.2017]. Odkaz: antiques-delaval.com/en/items-sold/700-theodolite-bronze-brunner-paris-19th-century.html.

- [16] *Teodolit*. [Online]. [Datum přístupu: 14.4.2017]. Odkaz: sage.unsw.edu.au/currentstudents/ug/projects/f-pall/jpeg/0213.jpg
- [17] *Totální stanice*. [Online]. [Datum přístupu: 14.4.2017]. Odkaz: cdn.shopify.com/s/files/1/0542/7477/products/Leica-Nova-MS50-Multi-Station-side-view.jpg?v=1433767424
- [18] *Holub s fotoaparátem*. [Online]. [Datum přístupu: 15.4.2017]. Odkaz: upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/12/Dr_Julius_Neubronner_patented_a_miniature_pigeon_camera_activated_by_a_timing_mechanism%2C_1903.jpg
- [19] *Stereokomparátor*. [Online]. [Datum přístupu: 15.4.2017]. Odkaz: upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2a/Restitutietoestel_24-03-2007_16-43-10.jpg/800px-Restitutietoestel_24-03-2007_16-43-10.jpg
- [20] *Ground zero*. [Online]. [Datum přístupu: 15.4.2017]. Odkaz: upload.wikimedia.org/wikipedia/en/7/7c/World_Trade_Center_September_23_2001.jpg
- [21] *Dům, Lhotka*. [Online]. [Datum přístupu: 20.4.2017]. Odkaz: http://www.obec-lhotka.eu/pic/big/gal_1652.jpg
- [22] *Optický skener*. [Online]. [Datum přístupu: 8.5.2017]. Odkaz: <http://www.konstrukter.cz/wp-content/uploads/2015/02/bezdotykovy-skener-3d-atos.jpg>
- [23] *Měřicí vozík*. [Online]. [Datum přístupu: 8.5.2017]. Odkaz: http://www.quantum3d.cz/ariadne/file_generators/thumb.php?_fileId=947_fileDataId=2325_width=2048_height=2048_mime=image/jpeg_enlarge=_site=geovap_web
- [24] *3D skener*. [Online]. [Datum přístupu: 8.5.2017]. Odkaz: http://www.quantum3d.cz/ariadne/file_generators/thumb.php?_fileId=588_fileDataId=1036_width=2048_height=2048_mime=image/jpeg_enlarge=_site=geovap_web

Příloha 1 - zadání příkladů

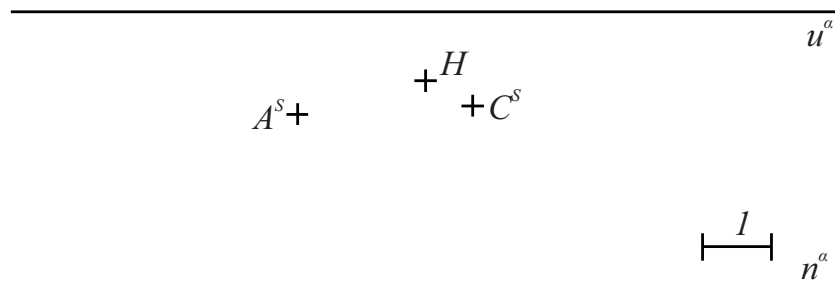
Na dalších stranách jsou k nalezení předtisky příkladů.

l

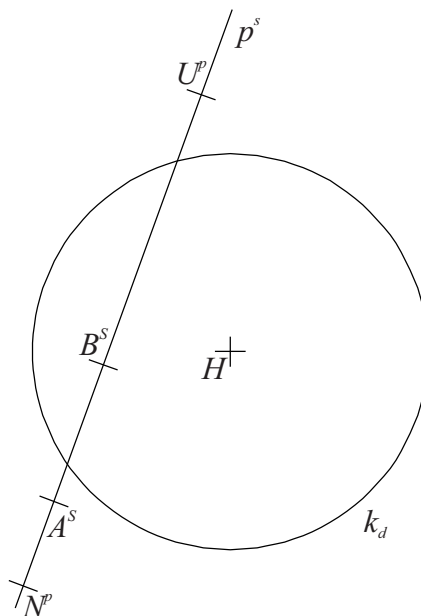


Příklad. Je dán vodorovný snímek kvádrů se čtvercovou podstavou. Kvádr stojí na základní rovině. Určete prvky vnitřní orientace snímku. Čtverec podstavy má stranu délky osm jednotek. Určete výšku kvádrů.

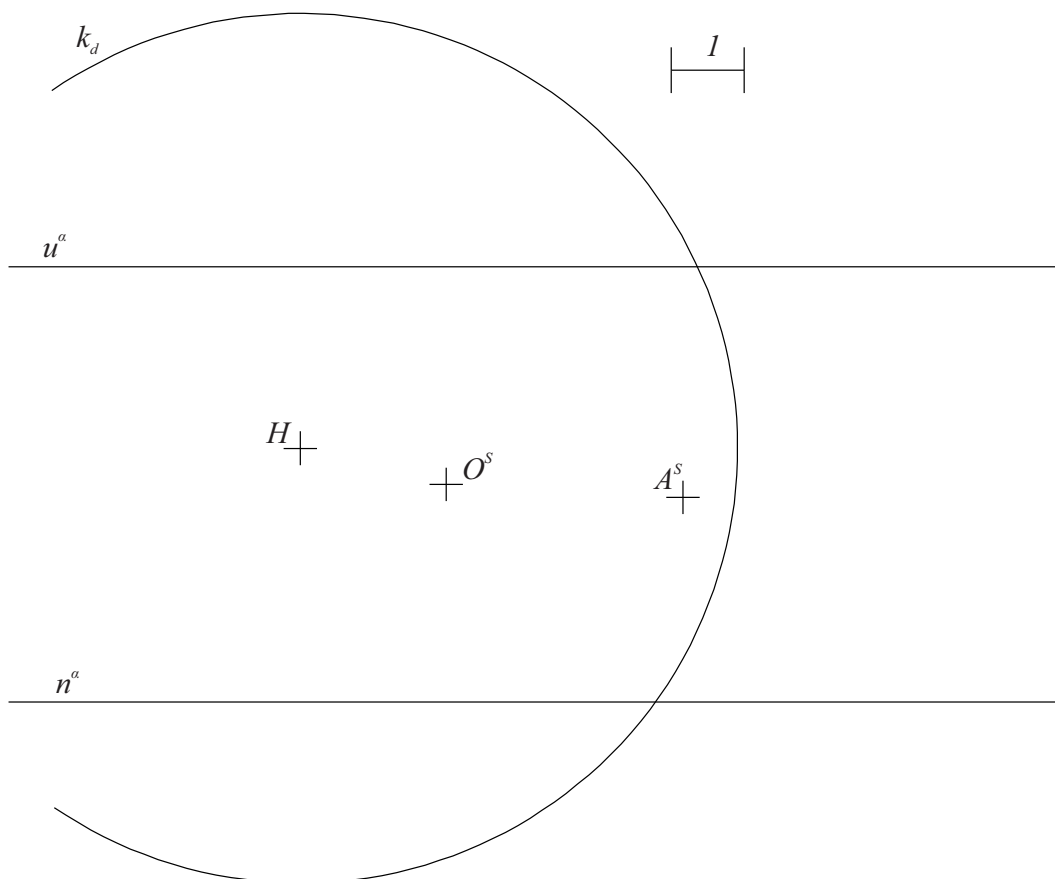
Příklad. V tříúběžníkové perspektivě (středovém promítání) zobrazte čtverec $ABCD$ v rovině α . Dány jsou středové průměty A^s a C^s , úběžnice u^α , stopa n^α , kolmý průmět středu promítání H a distance $d = 4$. Délka jednotky je vyznačena v zadání. Dále určete skutečnou délku strany čtverce.



Příklad. Ve středovém promítání zobrazte skutečnou délku úsečky AB . Jsou dány hlavní bod H , distanční kružnice k_d a středové průměty přímky p^s , která je určena úběžníkem U^p a stopníkem N^p , a na ní ležících bodů A^s a B^s .



Příklad. V tříúběžníkové perspektivě sestrojte pravidelný šestiboký hranol s podstavou v rovině α . Dány jsou hlavní bod H , úběžnice u^α roviny α , stopa n^α roviny α , distanční kružnice k_d , středový průmět středu podstavy O^s a středový průmět vrcholu šestiúhelníka bod A^s . Výška hranolu je sedm jednotek. Jednotka je znázorněna v zadání.



Příklad. Je dán šikmý snímek kvádrů stojícího na základní rovině. Najděte prvky vnitřní orientace snímku. Zjistěte délky hran kvádrů, jestliže délka hrany AB je 6,5 jednotek. Jednotka je vyznačena v zadání.

