



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**FAKULTA DOPRAVNÍ**

**Ústav soudního znalectví v dopravě**

**VYUŽITÍ FOTOGRAMMETRIE  
VE ZNALECKÉ PRAXI**

**USE OF PHOTOGRAMMETRY  
IN FORENSIC SCIENCE**

Bakalářská práce

Studijní program: Technika a technologie v dopravě a spojích  
Studijní obor: Dopravní systémy a technika

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.

**Zdeněk Svatý**

---

**Praha 2012**

Zadání

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří mi poskytli podklady pro vypracování této práce. Zvláště pak děkuji Ing. Tomášovi Mičunkovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultování bakalářské práce a zapůjčení techniky. Dále pak děkuji doc. Ing. Jindřichu Šachlovi, CSc., Ing. Michalovi Frydrýnovi a Ing. Alžbětě Kvášové za konzultování a poskytování rad k práci. V neposlední řadě je mou milou povinností poděkovat svým rodičům a blízkým za morální a materiální podporu, které se mi dostávalo po celou dobu studia.

## Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na ČVUT v Praze Fakultě dopravní.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze .....

.....

podpis

## **Anotace bakalářské práce**

Autor: Zdeněk Svatý

Název práce: **Využití fotogrammetrie ve znalecké praxi**

Obor: Dopravní systémy a technika

Druh práce: Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.

Rozsah práce: 56 stran textu, 2 přílohy

Klíčová slova: fotogrammetrie, blízká fotogrammetrie, trojúhelník posazu

### Anotace:

Předmětem bakalářské práce „**Využití fotogrammetrie ve znalecké praxi**“ je poskytnutí základních informací o fotogrammetrii, o jejím vývoji a využívaných fotogrammetrických metodách. O způsobech a technologiích snímání fotogrammetrických snímků a vyhodnocování jednotlivých typů fotogrammetrie. Zároveň uvádím její současné využití v rámci získávání informací o místech dopravních nehod. V praktické části byl proveden pokus o určení posedového trojúhelníku cyklisty za využití jednosnímkové fotogrammetrie.

## **Abstract Bachelor's thesis**

Author: Zdeněk Svatý

Title: **Use of Photogrammetry in Forensic Science**

Branch: Transportation Systems and Technology

Document type: Bachelor's thesis

Thesis advisor: Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D.

Range of work: 56 pages of text, 2 supplement

Keywords: photogrammetry, close-range photogrammetry, cyclist seating triangle

### Abstract:

The subject of bachelor work "**Use of Photogrammetry in Forensic Science**" is to provide basic information about photogrammetry such as information about development and use of different photogrammetric techniques, types and ways of photogrammetric imaging and evaluation of photogrammetric images based on used photogrammetric techniques. This thesis also deals with use of photogrammetry in forensic science, especially in obtaining additional information about traffic accident sites. In practical part, field experiment was made to determine cyclist seating triangle and location of cyclist's eyes using single image photogrammetry.

# OBSAH

1	Úvod .....	10
2	Definování pojmu .....	11
3	Historický vývoj .....	12
3.1	Předchůdci .....	12
3.2	Objev fotografie .....	12
3.3	Rozvoj stereofotogrammetrie .....	13
3.4	Příchod analytické fotogrammetrie .....	14
3.5	Rozvoj výpočetní techniky a digitální fotogrammetrie .....	14
3.6	Graf historického vývoje .....	15
4	Základní vztahy a pojmy ve fotogrammetrii .....	16
4.1	Teorie optického zobrazení .....	16
4.1	Souřadné systémy .....	16
4.2	Vnitřní orientace .....	18
4.3	Vnější orientace .....	19
5	Dělení fotogrammetrie .....	20
5.1	Dle snímkové konfigurace .....	20
5.1.1	Jednosnímková fotogrammetrie .....	21
5.1.2	Stereofotogrammetrie .....	21
5.1.3	Vícesnímková fotogrammetrie .....	22
5.2	Dle polohy komory při snímání .....	22
5.2.1	Satelitní fotogrammetrie .....	23
5.2.2	Letecká fotogrammetrie .....	23
5.2.3	Pozemní fotogrammetrie .....	24
5.2.4	Blízká fotogrammetrie .....	24
5.2.5	Makro fotogrammetrie .....	24
5.3	Dle výstupních hodnot fotogrammetrického vyhodnocení snímku .....	24
5.3.1	Grafické .....	25
5.3.2	Numerické (číselné) .....	25
5.4	Dle způsobů získávání snímků .....	25
5.4.1	Analogová fotogrammetrie .....	25
5.4.2	Digitální fotogrammetrie .....	26

6	Metody a přístroje pro vyhodnocování fotogrammetrických snímků .....	27
6.1	Analogové metody .....	27
6.1.1	Komparátory.....	27
6.2	Analytické metody .....	28
6.3	Digitální metody.....	29
6.3.1	DPW .....	29
6.4	Vyhodnocování měřičských snímků jednosnímkové fotogrammetrie .....	30
6.4.1	Grafické metody.....	30
6.4.2	Optické metody .....	30
6.4.3	Digitální metody.....	31
6.5	Vyhodnocování dvojic stereofotogrammetrických snímků.....	32
6.6	Vyhodnocení vícesnímkové konfigurace .....	33
6.6.1	Průseková fotogrammetrie .....	33
6.6.2	Metoda svazkového vyrovnání bloku.....	35
7	Chyby ovlivňující měření a kalibrace měřičské komory.....	37
7.1	Chyby objektivů .....	37
7.1.1	Sférická aberace .....	37
7.1.2	Astigmatismus.....	37
7.1.3	Asférická vada (koma) .....	37
7.1.4	Zklenutí pole .....	38
7.1.5	Chromatická vada.....	38
7.1.6	Distorze objektivu .....	38
7.2	Kalibrace .....	39
7.2.1	Laboratorní kalibrace .....	39
7.2.2	Kalibrace za pomoci testovacího pole.....	39
7.2.3	Simultální kalibrace (Self-calibration).....	41
8	Aplikace fotogrammetrie.....	42
8.1	Využití fotogrammetrie pro analýzu dopravních nehod.....	42
8.2	Využívaný fotogrammetrický software pro analýzu dopravních nehod .....	43
8.2.1	PC-RECT .....	43
8.2.2	PHOTODELER PRO .....	44
8.2.3	DMU (Dokumentace místa události) .....	45
8.3	Využití fotogrammetrie pro zaměřování křižovatek .....	46
8.4	Porovnání s jinými používanými metodami.....	46



9	Praktická část.....	48
9.1	Cíl pokusu .....	48
9.2	Místo a použitá technika .....	49
9.3	Postup a vyhodnocení.....	50
10	ZÁVĚR.....	53
	POUŽITÁ LITERATURA .....	54
10.1	Seznam použité literatury .....	54
10.2	Seznam použitých internetových stránek .....	54
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK.....	55
	Seznam obrázků .....	55
	Seznam tabulek .....	55
	SEZNAM PŘÍLOH .....	56

# 1 Úvod

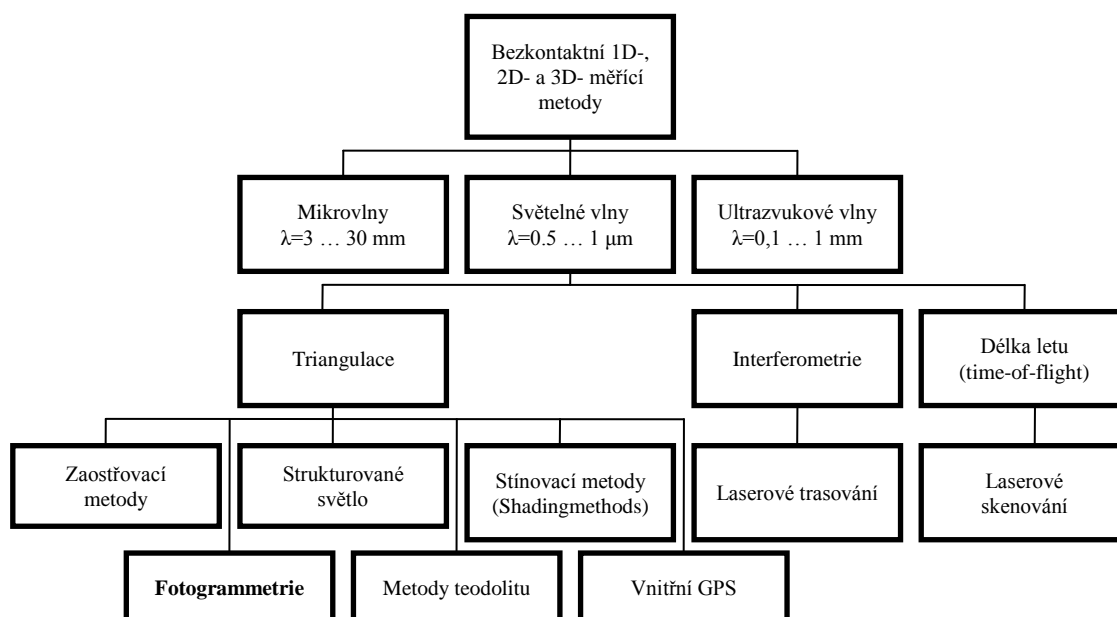
Dokumentace míst dopravních nehod má za úkol vytvořit jasnou představu o situaci na místě a o všech okolnostech, za nichž k události došlo. Bohužel se vyskytují případy, kdy je dokumentace nedostatečná, nepřesná, či nebyly při dokumentování zaznamenány v té době zdánlivě nedůležité stopy. S odstupem času, který často následné znalecké vyhodnocení doprovází, většina stop či významných orientačních bodů mizí a fotodokumentace se tak stává jediným přesným zdrojem dodatečných informací, které je většinou potřeba získat. Nehledě na to, zda se jedná o polohy stop, zpřesnění plánu místa dopravní nehody či určení míry deformací automobilu. Z tohoto hlediska je fotogrammetrie, se svou možností dodatečného měření z pořízené fotodokumentace, která je v dnešní době nedílnou součástí dokumentace míst dopravních nehod, ideálním nástrojem pro znalce a mnohdy i jeho jediným prostředkem. Navíc vyhodnocování provádí přímo sám znalec a získané informace tak nejsou zatíženy možnou chybou jiných osob, které se podílely na pořizování dokumentace místa nehody.

Cílem bakalářské práce je shrnout a přiblížit základní informace o fotogrammetrii, metodách, na kterých je založena a na jejím využití v praxi, zejména pak v soudním znalectví pro vyhodnocování míst dopravních nehod. První část se věnuje obecné definici samotného termínu fotogrammetrie a snaží se popsat její místo mezi bezkontaktními měřickými metodami. Následuje část věnovaná snaze o zpřehlednění a zařazení obrovského množství variací fotogrammetrie v závislosti na možnostech jejich využití. Jsou zmíněny hlavní vyhodnocovací metody a principy, které využívají. Závěr je věnován vlastnímu praktickému využití fotogrammetrie v praxi i s nastíněním používaných postupů a srovnání s alternativními metodami. Práce je doplněna i pokusem o praktické využití jednosnímkové fotogrammetrie pro určení trojúhelníku posazu u cyklisty spolu s výškou jeho očí nad komunikací, jelikož se jedná o významné parametry ovlivňující analýzu dopravní nehody.

## 2 Definování pojmu

Technologický vývoj je vysoce závislý na schopnosti pozorovat a měřit fyzické objekty, či jevy. Velké množství situací vyžaduje, aby pozorování či měření objektů byla získána na dálku. Fotogrammetrie je měřičská technologie, která spolehlivě plní tuto potřebu již od dob vynálezu fotografie v 19. století. Termín fotogrammetrie zavedl jako první německý architekt A. Meydenbauer v druhé polovině 19. století a do běžného používání byl zaveden založením Amerického společenství pro fotogrammetrii v roce 1934. Vlastní slovo fotogrammetrie je složenina tří latinských slov: **Photos** znamenající světlo, **Gramma** znamenající psát či kreslit a **Metron** znamenající měřit. Volný překlad by tedy mohl znít „měření za pomoci světla“. [1] Fotogrammetrií v nejširším slova smyslu rozumíme takovou měřičskou metodu, která umožňuje určení tvaru, velikosti či polohy měřeného předmětu v prostoru z jednoho či více obrazových, nejčastěji fotografických, záznamů. [2] Primárním úkolem fotogrammetrického měření je získání třírozměrné rekonstrukce objektu v digitální podobě (souřadnic a odvozených geometrických parametrů) či grafické formy (obrazů, plánů, map).

Fotogrammetrie patří mezi optické měřičské metody využívající světlo jako nosič informace. Měřicí technologie využívající elektromagnetické vlnění mohou být děleny následujícím způsobem, který je znázorněn na obr. 1. V praxi je však možná i kombinace měřičích metod, kde se využívá tzv. multi-senzorů, pro využití výhod každé z nich.



Obrázek 1: Bezkontaktní měřicí metody [přeloženo z 3]

### 3 Historický vývoj

V následující kapitole je ukázán přehledný vývoj fotogrammetrie od prvopočátků samotné myšlenky využití obrazů pro nepřímé měření až po poslední trendy ve vývoji fotogrammetrie. Hlavním cílem je obsáhnout zejména významné a přelomové okamžiky, které měly zásadní vliv na vývoj fotogrammetrie. Z důvodu přehlednosti je popis rozdělen do několika etap.

#### 3.1 Předchůdci

Nejrannější počátky využívání středového promítání, na jejichž principu je založeno fotogrammetrické měření, se vyskytují již v prvním tisíciletí p. n. l., kdy arabský učenec Ibn Al Hasan Haitkam, jako první popsal zařízení s názvem „**Camera obscura**” – Dírková komora. Přístroj s úzkým otvorem vpředu, kterým prochází světlo následně promítané na papír. Výsledný obraz se pak dá snadno obkreslit. Za dalšího předchůdce může být považován Leonardo da Vinci, který popsal využití dírkové komory pro konstrukci středových průmětů. Později se začalo využívat světlo lomných hranolů v zařízení nazvaném „**Camera Lucida**”. Zde se paprsky přicházející vodorovně lámaly kolmo vzhůru a umožňovaly tak vidět současně plátno s promítaným obrazem. Obrovskou nevýhodou těchto zařízení či jim podobným byla skutečnost, že obraz byl ručně překreslen. Tím se vnášela velká míra nepřesnosti do případného měření. Proto se pro praktické využití muselo počkat až do vynálezu média, které by bylo schopné dostatečně věrně zachytit měřený předmět.

#### 3.2 Objev fotografie

Tímto médiem byla fotocitlivá vrstva využívaná ve fotografii. První význačnou etapu tedy lze logicky datovat od doby krátce po objevu fotografie, tedy od 30. a 40. let 19. století do přelomu století. Všeobecně se objev fotografie připisuje francouzským pracovníkům J. N. Niépceovi a J. L. M. Daguerrovi. V tomto období je využívána fotogrammetrie zejména pro architektonické a pozemní topografické mapování. Vyskytují se první pokusy o využití draků či balónů pro vynesení snímacích komor do výšky, od kterých bylo následně upuštěno z důvodu příliš obtížného pořizování dostatečného množství fotografií potřebných pro pokrytí daného území. Pro měření byla využívána průseková fotogrammetrie, kde je zapotřebí určení společných bodů na fotografiích.

Jejím největším problémem je obtížná identifikace stejného bodu na snímcích, při snaze o co největší vzdálenosti mezi jednotlivými stanovišti. Větší vzdálenost je žádoucí z důvodu přesnosti měření.

Významnou osobností této doby je A. Laussedat, jenž je označován jako zakladatel fotogrammetrie. Jeho pokusy a následně plány či mapy sloužily převážně vojenským účelům. Laussedat pojmenoval svou metodu „**Metrotopografie**“, která je nyní známa pod pojmem stolová či průseková metoda. Je uváděn jako vynálezce fototeodolitu. [3] Toto zařízení vhodně kombinuje možnost přesného změření úhlů polohy komory při snímání pomocí vestavěného teodolitu, s vlastní měřičskou komorou, čímž značně usnadňuje následnou fotogrammetrickou orientaci.

### 3.3 Rozvoj stereofotogrammetrie

Druhou etapu vývoje je možno datovat od počátku 20. století. V této době se začíná využívat stereoskopického efektu a objevu F. Stolzeho „**putovní značky**“ (1893). „V roce 1901 zkonstruoval C. Pulfrich první přístroj, který umožňoval prověření měřičských snímků s použitím prostorové měřičské značky - stereokomparátor. Zavedením stereofotogrammetrie byly odstraněny obtíže v identifikaci bodů, za cenu pracnějšího početního a grafického řešení. Rakouský důstojník von Orel (1877-1941) zkonstruoval doplňkové zařízení ke stereokomparátoru, které nahradilo pracný počtářský postup a jeho přístroj stereoautograf (1909) realizuje základní fotogrammetrické rovnice a bez výpočtu kreslí polohu bodů přímo na papír.“ [2]

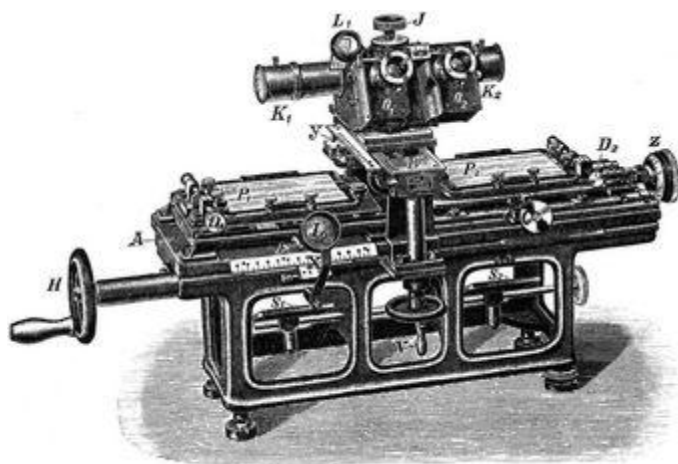


Abb. 175. Stereokomparator von Pulfrich.

Obrázek 2: Pulfrichův stereokomparátor [3]

Rychlý rozvoj letectví na počátku století měl velmi významný vliv na vývoj fotogrammetrie. Vyvinutá letadla a říditelné vzducholodě poskytovaly platformu ideální pro letecké komory. Výhodou letecké fotogrammetrie je, že Země fotografovaná vertikálně z výšky, je téměř ideální předmět pro fotogrammetrické měření. Navíc cestování vzduchem je nejen rychlé, ale činí téměř každé místo dostupné. Možnost pořizování snímků z plánovaných míst, na rozdíl od předtím využívaných draků či neřiditelných balónů, byla velkou výhodou.

Po skončení 1. světové války byla fotogrammetrie ovlivněna rychlým rozvojem fotokomor, filmů a inženýrských zařízení využívaných v letecké fotogrammetrii pro mapování. Jiné než topografické užití bylo sporadické. Důvodem bylo, že se vyskytovalo pouze několik vhodných fotoaparátů a analogové plotry přinášely řadu omezení na komorovou konstantu, formát obrazu a rozložení či natočení měřičských komor. V roce 1921 prezentoval R. Hungershoff první univerzální analogový plotr - autokartograf. Ten v sobě spojoval fotogoniometrické řešení využívající Porro-Koppe principu pozorování, kde je fotografie pozorována přes čočky se stejnými charakteristikami zkreslení jako měly čočky fotokomory při snímání. Tím autokartograf umožnil vykreslování pozemních i leteckých stereogramů libovolné orientace.

### **3.4 Půchod analytické fotogrammetrie**

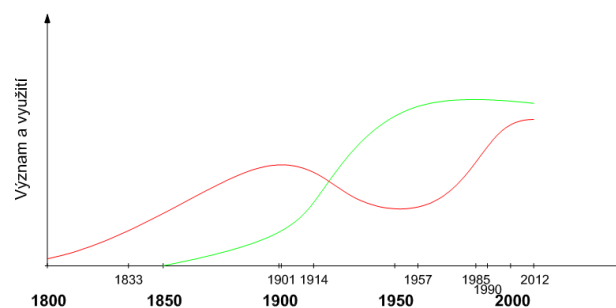
Další etapou byl nástup analytických metod vyhodnocování, který je datován od 50. let 20. století. Rostoucí využití digitálních elektronických počítačů v tomto desetiletí se odrazilo i ve snaze o čistě analytický či početní přístup k fotogrammetrii. To vyvrcholilo v roce 1957, kdy U. V. Helava navrhl první analytický stereoplotr - stereokomparátor pod počítačovou kontrolou. Analogové výpočty nebyly flexibilní, s ohledem na vstupní parametry a výsledné výstupy, a jejich přesnost byla omezena fyzickými vlastnostmi použitých zařízení. Početní metoda umožňuje teoreticky neomezenou přesnost ve výpočtech a využití je omezeno pouze matematickým modelem, na kterém je založena. Navíc je možné dosáhnout přeúčitosti, která může pomoci odhalit hrubé chyby a poskytuje cenné statistické informace o měřeních a výsledcích. [1]

### **3.5 Rozvoj výpočetní techniky a digitální fotogrammetrie**

Doposud poslední etapou vývoje fotogrammetrie je v současné době tzv. Digitální fotogrammetrie. Její vznik je datován od 80. let 20. století. Pokroky v počítačové

technologii, zejména růst výpočetní kapacity a růst paměti, vedly ke snaze o převedení obrazu do podoby blízké pro počítač. Ta byla následně automaticky měřena. Počáteční přístup automatického obrazového měření byl, že komparátory a kompilátory obsahovaly zařízení pro skenování filmů za využití analogových korelačních technik pro částečně automatické rozpoznávání a měření obrazů. Avšak tomuto přístupu chyběla robustnost, z důvodu různé kvality pořizovaných snímků a dosahované výsledky byly horší než při využití člověka. S velkou výhodou se dnes využívá digitálních fotoaparátů se snímačem tvořeným CCD (Charged Couple Devices), což jsou polovodiče reagující na dopadající světlo, které se skládají do mříží a následně z nich může být získán digitální obraz. Snímání s CCD polem ve snímací ohniskové rovině má výhodu v digitálním výstupu a v dnešní době je schopné se kvalitou i rozlišením přiblížit či v určitých oblastech i překonat klasické fotografie. Současný trend a rychlost vývoje digitálních technologií nasvědčuje tomu, že jejich využití se bude neustále zvyšovat. V současné době se již využívá softwarových produktů pro vyhodnocování snímků i z neměřičských fotoaparátů za využití kalibrace z pořizovaných snímků. Tím se značně snižují náklady na pořizování a vyhodnocování fotogrammetrického měření.

### 3.6 Graf historického vývoje



Obrázek 3: Historické srovnání pozemní a letecké fotogrammetrie

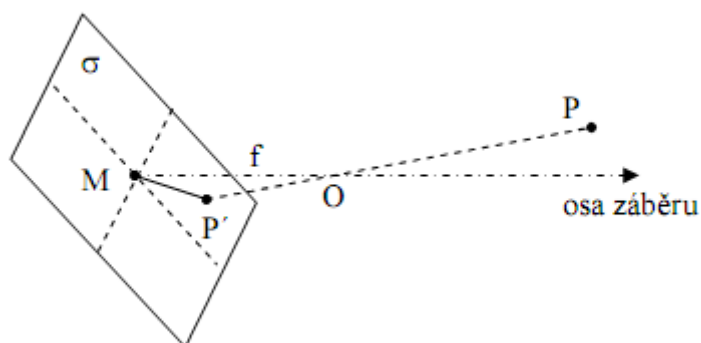
Na obr. 3 je znázorněno alespoň několik nejvýznamnějších okamžiků, které měly vliv na vývoj a využití fotogrammetrie. Červeně je znázorněna fotogrammetrie pozemní, kde druhý nárůst využití se týká především blízké fotogrammetrie, a zeleně je znázorněna letecká fotogrammetrie. Znázorněnými událostmi jsou: objev fotografie (1833), vývoj stereokomparátoru (1901), využití letadla jako platformy pro měřičskou komoru (1914), vývoj analytického komparátoru (1957), počátek využití digitálních technologií (1985) a ukončení výroby analogových komparátorů (1990).

## 4 Základní vztahy a pojmy ve fotogrammetrii

Pro hlubší pochopení principů metod fotogrammetrie je třeba definovat některé základní pojmy. Následné podkapitoly se věnují vztahu mezi obrazovou informací a geometrií objektu odvozeného na základě parametrů vnitřní a vnější orientace.

### 4.1 Teorie optického zobrazení

Z hlediska deskriptivní geometrie je fotografické zobrazení, ať analogové či digitální, středovým promítáním a získané měřičské snímky umožňují rekonstrukci svazku paprsků v předmětovém prostoru. Středové promítání je určeno průmětnou (v případě fotografie je to snímková rovina) a středem promítání. Každý bod fotografovaného předmětu odpovídá bodu ve snímkové rovině. Paprsky vedené mezi odpovídajícími body (bod a jeho obraz) se protínají v jediném bodě, kterým je právě střed promítání. V praxi jsou ovšem objektivy komor a fotoaparátů složeny ze soustav čoček, na kterých dochází k lomu paprsků. Nejde tedy o přesnou středovou projekci.



Obrázek 4: Schéma principu středového promítání [4]

### 4.1 Souřadné systémy

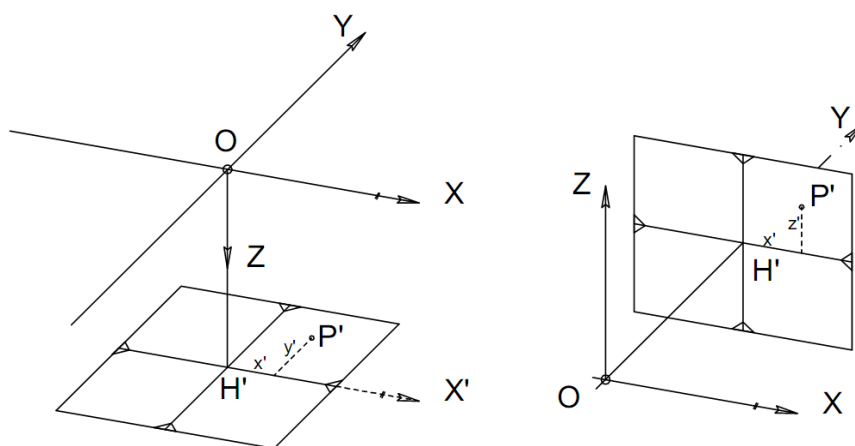
Fotogrammetrie využívá několik kartézských souřadných systémů, které je nutno rozlišovat.

- Souřadný systém snímaného předmětu (označované také jako geodetický) definovaný referenčním (vlíčovacím) bodem většinou na snímaném předmětu, například na vozidle, definovaný dle konstrukčních os. Další variantou je systém definovaný referenčním bodem, který je geodeticky zaměřen.  $\mathbf{x} = [X, Y, Z]$



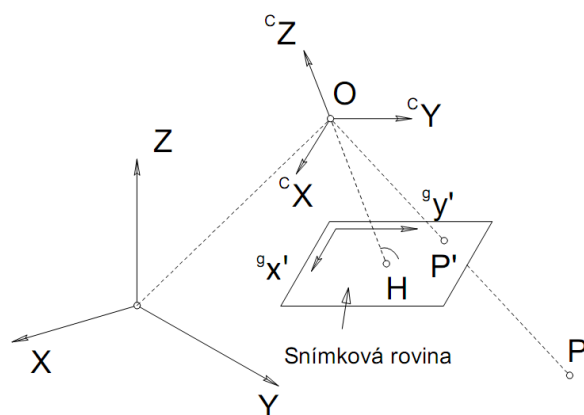
- Snímkový souřadný systém je dvourozměrný souřadný systém definovaný ve snímkové rovině kamery. V závislosti na typu kamery je počátek umístěn různě. V případě analogové je to do středu snímku  $M'$  a v případě digitální je to na pozici pixelu  $(0,0)$ . Snímkové souřadnice se označují  $x', y', z'$ .
- Komorový souřadný systém má svůj počátek ve středu promítání. Uspořádání os je různé mezi leteckou a pozemní fotogrammetrií, jak je znázorněno na obr. 5, kde jsou i snímkové souřadné systémy analogového snímku. V současné době se však používá u obou metod orientace osy „z” ve směru fotografování.  

$${}^c\mathbf{x} = [{}^cX, {}^cY, {}^cZ]$$



Obrázek 5: Rozložení os v letecké (vlevo) a pozemní (vpravo) fotogrammetrii [2]

- Modelový souřadný systém je prostorový souřadný systém popisující vzájemnou polohu a orientaci dvou a více snímků (snímkových souřadných systémů). Většinou se jeho počátek umísťuje do středu promítání jednoho ze snímků.



Obrázek 6: Zobrazení bodu v souřadném systému předmětu  $[X, Y, Z]$ , komorovém souřadném systému  $[{}^cX, {}^cY, {}^cZ]$  a snímkovém souřadném systému  $[{}^g x', {}^g y']$  [1]

## 4.2 Vnitřní orientace

„Vztahy mezi rovinou snímku a středem objektivu jsou dány prvky vnitřní orientace. Abychom mohli označit fotografický snímek za měřičský, musíme znát jeho vnitřní orientaci”. [2] Fotoaparát může být modelován jako prostorový systém, který se skládá z planární snímací oblasti (film či elektrický senzor) a čoček s jejich středem promítání. Ve fotogrammetrické praxi je většinou vnitřní orientace stálá a její vlastnosti se nemění. Fotoaparát s konstantní vnitřní orientací se nazývá měřičská komora. V současné době lze využívat pro snímání i fotoaparáty o neznámé vnitřní orientaci. V případě jejich využití je však nutné, v následném vyhodnocení přidat parametry vnitřní orientace jako další neznámé pro výpočet. Vnitřní orientace velmi úzce souvisí s kalibrací dané komory.

Parametry vnitřní orientace jsou definovány středem promítání, komorovou konstantou a hlavním bodem snímku. Souřadnice polohy a vzdálenost středu promítání či odchylek od středového promítání se popisují vzhledem k snímkovému souřadnému systému. Prvky vnitřní orientace jsou:

- Hlavní bod snímku  $H'$

Je definován dle [5], jako průsečík osy záběru s rovinou snímku. Pokud se nejedná o výřez a objektiv není posuvný do stran či výškově, je totožný se středem snímku  $M'$ . U měřičských snímků se výhodně využívají rámové značky zhotovené komorou sloužící k přesnému určení středu snímku a tedy i hlavního bodu snímku.

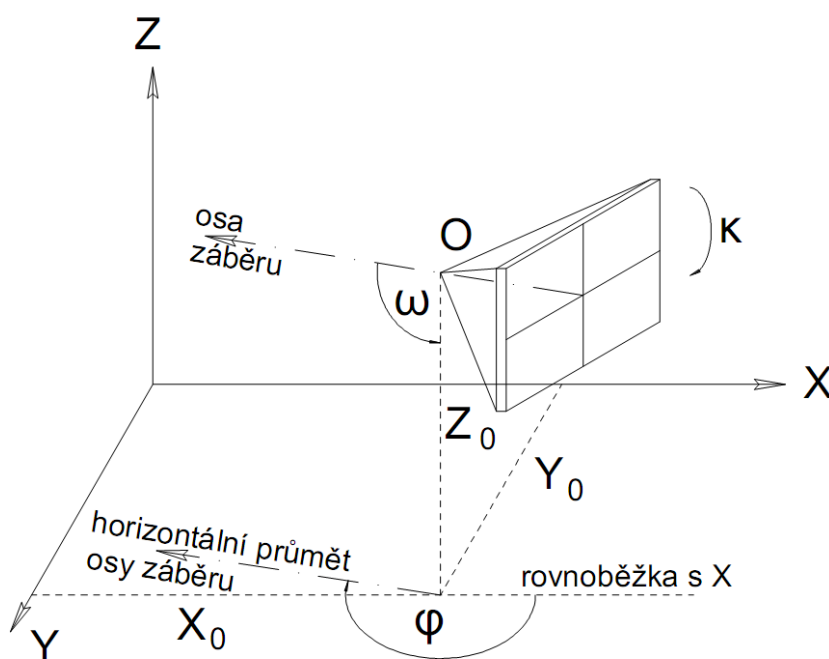
- Konstanta komory  $c_k$

Je to vzdálenost hlavního bodu snímku od středu promítání. Měřičské kamery jsou většinou zaostřeny na nekonečno. V tom případě je komorová konstanta rovna ohniskové vzdálenosti  $f$  použitého objektivu.

Při pořizování stereo snímků je vlastní vzdálenost mezi středy promítání také považována za prvek vnitřní orientace.

### 4.3 Vnější orientace

„Prvky vnitřní orientace určují vztahy mezi předmětovým a paprskovým trsem a snímkem. Neurčují však polohu paprskového trsu v prostoru. Tuto polohu určují prvky vnější orientace.” [2] Měřičská komora schopná určit prvky vnější orientace se nazývá **fortoteodolit**.

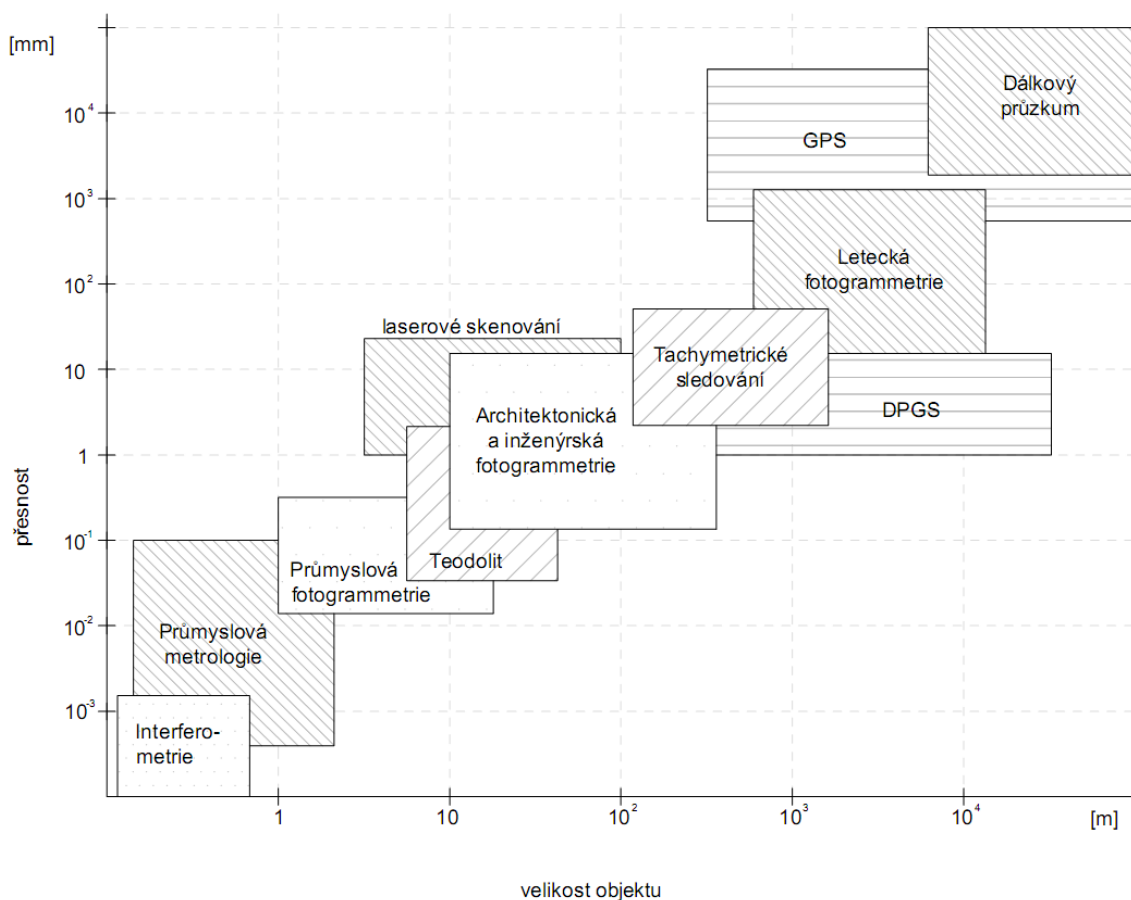


Obrázek 7: Prvky vnější orientace [2]

Je zapotřebí šesti prvků pro přesné určení polohy kamery v prostoru. Jsou to tři pravouhlé geodetické souřadnice středu promítání  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$  a tři úhly. Dva určují směr osy fotografického záběru - úhel stočení snímku  $\varphi$  a úhel sklonu snímku  $\omega$ . Třetí úhel  $\kappa$  určuje pootočení snímku v jeho rovině. Vše je názorně ukázáno na obr. 7.

## 5 Dělení fotogrammetrie

Fotogrammetrii lze dělit dle různých technických hledisek či využívaných technologií, nejen pro pořizování vlastních snímků, ale také pro vlastní vyhodnocování. V následující kapitole jsou popsány nejvýznamnější typy fotogrammetrie i s nastíněním jejich možného praktického využití. Pro znázornění vysoké variability a širokého spektra využití slouží obr. 8. Ten ukazuje vztah mezi velikostí měřeného objektu, dosahovanou přesností a využívanou technologií v praxi.



Obrázek 8: Rozdělení využití měřičských metod v závislosti na velikosti měřeného objektu a dosahované přesnosti [přeloženo z 3]

### 5.1 Dle snímkové konfigurace

Nezákladnější rozlišení fotogrammetrie je dle snímkové konfigurace. Snímková konfigurace je určena uspořádáním poloh komorových stanic a jejich směrů snímání v okamžiku měření. Obecně se fotogrammetrie na jejím základě rozděluje do tří typů: jednosnímková, stereo a vícesnímková.

### 5.1.1 Jednosnímková fotogrammetrie

Jedná se o jednosnímkovou konfiguraci, tedy máme k dispozici pouze jeden měřický snímek měřeného předmětu. Vztah využívaný v jednosnímkové fotogrammetrii se nazývá kolineace a je vyjádřen projektivní transformací. Vzhledem k tomu, že se na snímku dají určit pouze rovinné souřadnice, lze ji použít pouze na předměty rovinné či blízké rovinným. V případě prostorového členění dochází k radiálním posunům, které znemožňují přesné vyhodnocení. Jelikož zkreslení způsobené radiálním posunem roste v závislosti na vzdálenosti od středu, je vhodné situovat části objektu s většími výstupky pokud možno do středu snímku. Třírozměrná rekonstrukce z jednoho snímku je možná pouze tehdy, pokud jsou k dispozici další geometrické informace o předmětu, či se na snímku nachází objekt o známých rozměrech. Tím může být například měřičský čtverec o předem definovaných rozměrech, viz [5].

Jednosnímková konfigurace se dá vhodně využít pro ortofotografie, fotoplány a mozaiky rovinných území bez požadavků na vysokou přesnost. Dalším možným praktickým využitím je měření rovinných objektů, jako jsou například fasády stavebních objektů či fotoplány fresek. Dosažitelná přesnost měření závisí primárně na obrazovém měřítku a na schopnosti přesného rozlišení měřených vlastností na snímku.

### 5.1.2 Stereofotogrammetrie

Tato konfigurace se využívá, pokud má být následně využito vizuálního či automatizovaného stereoskopického zpracování. Princip spočívá v nahrazení přirozeného lidského prostorového vidění pozorováním „stereoskopických dvojic“ neboli stereogramů, které při pozorování vytvářejí prostorový efekt. Stereoskopická dvojice jsou dva měřičské snímky pořízené z různých stanovišť o předem definované vzdálenosti a s předem daným sklonem směru snímání. Při vizuálním zpracování se vyžadují paralelní či mírně konvergentní směry snímání. Důvodem je zrakové ústrojí člověka, které dokáže pohodlně zpracovat snímky jen do určité míry konvergence. V případě automatického zpracování toto omezení odpadá a je možné využít vyšší míru konvergence. Další možná konfigurace nastává, pokud jsou polohy stanic navzájem posunuté, ale snímané směry stále paralelní. Snímky pak stále poskytují stereoskopický efekt, jen je následně nutno brát do úvahy jejich rozdílné měřítko. Rozlišujeme snímkovou dvojici normální (osy záběru jsou kolmé k fotogrammetrické základně), rovnoběžně stočený případ (osy záběru jsou stočené

o určitý úhel  $\varphi \neq 0$ ), rovnoběžně skloněný případ (osy záběru jsou stočené o určitý úhel  $\omega \neq 0$ ), obecně orientovanou a konvergentní.

Pro vyhodnocování stereografických snímků se následně využívá stereoautografu či digitálního komparátoru. Princip metody vyhodnocení snímkové dvojice je popsán podrobněji v rámci kapitoly 6.5. Nyní stačí zmínit, že využívá prostorové měřičské značky a určování paralax snímkové dvojice.

### **5.1.3 Vícesnímková fotogrammetrie**

Vícesnímková konfigurace není omezena výběrem uspořádání komorových stanic či směrů snímání. V principu je předmět nasnímán neomezeným počtem snímků z takových poloh, které umožní dostatečné protínání úhlů paprskových trsů v prostoru. Souřadný systém snímaného předmětu může být následně určen metodou protínání paprskových svazků. V podstatě se jedná o vícesnímkové prostorové protínání. Technologicky je postup označován jako průseková fotogrammetrie. Pokud je dostatečné množství obrazových paprsků, alespoň 3-4 snímky na předmětový bod, o správné konfiguraci, lze získat jednotnou přesnost ve všech měřených souřadnicích. [3]

Využívá se jí nejčastěji, pokud to vyžaduje struktura předmětu a je třeba více poloh snímání, např. z důvodu složitosti struktury, či pokud je třeba vysoká přesnost. Pokud je dostatečné geometrické pokrytí, je možné použít simultánní kalibraci kamery, za využití samokalibrovací snímkové triangulace.

## **5.2 Dle polohy komory při snímání**

Dalším možným parametrem pro dělení fotogrammetrie je vzájemná vzdálenost a poloha komory ve vztahu k předmětu snímání. Velký vliv na toto dělení má také použitá platforma pro snímání. Do 90. let minulého století se rozlišovaly dva základní druhy fotogrammetrie - letecká a pozemní. Důvodem bylo používání odlišných analytických zařízení. To vedlo i ke vzniku odlišného označení či definování například os a úhlů. V dnešní době lze dle polohy komory rozlišit pět základních typů fotogrammetrie: Satelitní (družicová), letecká, pozemní, blízká a makro fotogrammetrie.

### **5.2.1 Satelitní fotogrammetrie**

„Družicová fotogrammetrie vznikla na základě špionážních a interpretačních snímků specializovaných družic již v šedesátých letech. Pro tvorbu fotomap se družicových snímků využívalo i v naší republice. Praktické civilní uplatnění přišlo po startu družice Spot - 1 v roce 1984, jelikož družice byla vybavena elektronickým skenerem s rozlišením 10 m v panchromatickém režimu, s možností tvorby stereozáběrů. Takto získané snímky ale nebylo možno vyhodnotit na běžných zařízeních, bylo nutno vytvořit speciální programové vybavení v oblasti digitální fotogrammetrie. Dnes je družicová fotogrammetrie speciální, ale jinak již běžná technologie a rozlišení dnešních komerčních družic je lepší než 1 m.” [6] Družicové snímkování se provádí ve výškách nad 200 km.

### **5.2.2 Letecká fotogrammetrie**

Při metodě letecké fotogrammetrie je stanovisko pro pořízení snímku umístěné v letadle a nebo v jiném pohybujícím se dopravním prostředku. Obecně lze výškově letecké snímání zařadit do výšek nad 300 m. Na leteckém snímku se zobrazí značně větší plocha než ve fotogrammetrii pozemní. Vzhledem k tomu, že se pořizují především přibližně kolmé snímky, je vzdálenost od místa fotografování k objektům (vzhledem k výšce letu) přibližně stejná. Důsledkem toho je dosažena téměř homogenní přesnost polohopisného a výškopisného vyhodnocení. Nevýhodou je, že zpravidla nelze dostatečně přesně určit prostorovou polohu snímku v okamžiku jeho pořízení a tedy i způsoby zpracování budou složitější než při použití pozemní fotogrammetrie. Právě v této oblasti nastal v poslední době významný pokrok, daný zaváděním zařízení GPS/INS, která umožňují určovat prvky vnější orientace jednotlivých snímků přímo při letu. [2][6]

Velkou výhodou využití letecké fotogrammetrie je velmi rychlé snímkování rozsáhlých a vzdálených území, umožněné rychlostí využívaných letadel a výkonností automatických měřičských leteckých komor. Z toho lze odvodit i vhodnost využití letecké fotogrammetrie pro mapování, sběr dat pro geografické informační systémy (GIS) nebo digitální model terénu.

### **5.2.3 Pozemní fotogrammetrie**

„Při metodě pozemní fotogrammetrie je stanovisko zpravidla nepohyblivé, umístěné na Zemi. Při fotografování máme čas i technické možnosti přesně geodeticky určit souřadnice stanoviska i prostorovou orientaci snímku. Zpracování takových snímků bude proto jednodušší. Nedostatkem pozemní fotogrammetrie ovšem je, že jednotlivé předměty měření jsou vzájemně zakrývány a snímek obsahuje často značnou část nevyhodnotitelných oblastí (zakrytých prostor) a dále má další podstatnou vadu - přesnost měření v prostorové složce (vzdálenosti objektu) ubývá se čtvercem vzdálenosti. Zejména z tohoto důvodu se pozemní fotogrammetrie hodí pro objekty, které jsou přibližně ve stejné vzdálenosti (fasády domů, strmé břehy říčních koryt, stěny lomů, skály apod.). Dosah pozemní fotogrammetrie záleží na komoře a je cca 500 m. Trend poslední doby jsou speciální aplikace pozemní fotogrammetrie, které se týkají zejména následující kategorie, blízké fotogrammetrii. Velký rozvoj v oblasti dokumentace, např. památkových objektů, je dán zejména cenově přístupnými digitálními kamerami a zpracovatelskými programy.” [6]

### **5.2.4 Blízká fotogrammetrie**

Obecně lze říci, že blízká fotogrammetrie je formou pozemní fotogrammetrie, která se používá na předměty v rozmezí velikosti od 1 m do 200 m. Dosahovaná přesnost je větší než 0,1 mm u dolní hranice uvedeného rozmezí a až 1 cm na jeho druhém konci. Právě tato část pozemní fotogrammetrie má rostoucí význam v nově se rozvíjejících speciálních využití, v řadě zcela odlišných oborů (lékařství, design, strojírenství, apod.).

V rámci blízké fotogrammetrie se v současnosti nejčastěji využívá vícesnímkové konfigurace a počítačového vyhodnocení.

### **5.2.5 Makro fotogrammetrie**

Jedná o fotogrammetrii, u které se využívá zobrazovací měřítko větší než 1. Jedná se tedy o zvětšení. Jejím polem praktického využití je zejména automatická měřicí technologie v průmyslových odvětvích.

## **5.3 Dle výstupních hodnot fotogrammetrického vyhodnocení snímku**

V závislosti na formě záznamu výstupu vyhodnocení fotogrammetrického snímku lze rozdělit fotogrammetrické metody na grafické a numerické.



### **5.3.1 Grafické**

Grafický přístup je starší varianta, která se dnes již nevyužívá tolik jako numerická. „Při grafických metodách je výsledek vyhodnocení snímku přímo graficky vyznačován na kreslicím stole, připojeném k vyhodnocovacímu stroji. Grafické metody vyhodnocení jsou relativně rychlé pro zkušeného zhodnocovatele. Při mapování vzniká přímo kartografický originál polohopisné, případně i výškopisné složky mapy. Takový to výstup je ale v dnešní době zastaralý, protože výsledek nelze dále přímo zpracovávat výpočetní technikou a nelze ho ani kvalitně reprodukovat či editovat. Výsledek má navíc pouze grafickou přesnost (cca  $\pm 2$  mm v měřítku vyhotovovaného originálu).” [6]

### **5.3.2 Numerické (číselné)**

V dnešní době základní způsob vyhodnocení, který automaticky ukládá souřadnicové informace o poloze měřeného bodu buď přímo do paměti zařízení, či je možné je uložit na datový disk. Následně pak mohou být informace zpracovány do výsledné podoby či použity dalším zařízením. Výstupní formát má dvě varianty: vektorovou či rastrovou. Velkou výhodou tohoto přístupu je univerzálnost, hospodárnost, přenositelnost a hlavně možnost pozdějšího zásahu a změn dat.

## **5.4 Dle způsobů získávání snímků**

Jak již bylo řečeno, měřičské snímky získáváme nejčastěji pomocí měřičských komor. Ne všechny využívají stejný způsob snímání a uchovávání obrazové informace. Poslední variantou jak dělit fotogrammetrii je logicky podle závislosti na způsobu použitém pro získání měřičských snímků. Jsou jimi analogová a digitální fotogrammetrie. Nezávisle na použitém způsobu jsou však obecně na fotogrammetrické snímky kladeny dvě základní podmínky. První je potřeba vysoké rozlišovací schopnosti a stálosti fotografického materiálu a druhou je maximální geometrická věrnost obrazu s ohledem na středové promítání.

### **5.4.1 Analogová fotogrammetrie**

Je to starší varianta fotogrammetrie spjatá už s jejím raným vývojem. Nejprve se jako medium využívalo skleněných desek s fotocitlivým filmem. Obecně lze říct, že jejich výhodou byla nízká srážlivost po vyvolání. Ale vysoká hmotnost, obtížná manipulace a kombinace křehkosti s vyšší hmotností byly příliš velkým problémem. Postupně se začal

využívat fotografický film, zejména v letecké fotogrametrii, který se využívá v případě analogové fotogrametrie dodnes. Jeho hlavní předností je snadná manipulace a nízká hmotnost.

Navzdory rapidnímu a rychlému rozvoji v digitálních technologiích si stále analogové snímání a zpracování udržuje své výhody. Klasické měřičské komory stále jsou, a jistě ještě určitou dobu budou, důležitou součástí sběru dat. Důvodem je zejména výborná informační kapacita filmového materiálu a dlouhodobě v praxi odzkoušené, vysoce propracované a prověřené technologie měřičských komor. Hlavní nevýhodou analogového snímání je časová prodleva před možným vyhodnocením, způsobená chemickým zpracováním a sušením fotografického materiálu předtím, než může být využit. Dalším omezením je, že fotografický snímek není tak geometricky stabilní jako jeho digitální protějšek, což vede k nižším přesnostem.

#### **5.4.2 Digitální fotogrametrie**

Čistě digitální přístup poskytuje obrazové informace ihned a přímo ze senzoru. Avšak dnešní technologie stále ještě není schopna dodat širokoúhlé senzory potřebné pro ekvivalentní výkony srovnatelné s analogovou technologií. Zejména v oblasti rozlišovací schopnosti a kapacity. Avšak v oblasti malých formátů už dnes jasně převládá digitální záznam. Rozhodující výhodou digitálního snímání je možnost využití automatizace. Jak ve snímkovém měření, tak i v následné analýze zpracování fotogrammetrických snímků. Tím lze dosáhnout vyšší obrazové měřicí přesnosti a simultánního zobrazení obrazu i grafiky. Navíc je možné dosáhnout spojení získávání snímků a prezentace výsledků v reálném čase.

Skenování neboli digitalizace analogových snímků za využití vhodně navržených skenerů je hybridním spojením obou předchozích variant. Využívá výhod fotografické snímání technologie a zpracování digitálních snímků. Mezi nevýhody patří vložení dalšího kroku digitalizace, který způsobuje další prodlevu, či ztráta obrazové informace ve srovnání s původním fotografickým snímkem.

## 6 Metody a přístroje pro vyhodnocování fotogrammetrických snímků

V této kapitole je představeno několik základních metod, vyhodnocovacích postupů a přístrojů, které se využívají pro vyhodnocování fotogrammetrických snímků. Použité metody vycházejí nejen z matematických závislostí, ale využívají také grafických a technických prostředků pro vyhodnocování fotogrammetrických snímků. Některá z uvedených zařízení se již v běžné praxi nevyužívají, ale principy využití při jejich návrhu a fungování se používají nadále. Základní možné rozdělení metod je dle způsobu zpracování snímků, tedy způsobu převodu snímkových souřadnic na prostorové souřadnice zvoleného systému. Rozlišujeme analogové, analytické a digitální metody.

### 6.1 Analogové metody

Pro analogové zpracování měřičských snímků je třeba využívat analogových vyhodnocovacích zařízení, která za svou přesnost platí robustností a složitostí. Metody využívají pro rekonstrukci paprskových trsů v předmětném i obrazovém prostoru mechanické, optické či optickomechanické projekce. Nevýhodou je také jednoúčelovost, která úzce souvisí s dosahovanou přesností. Navíc modernější analytická či digitální zařízení jsou na obsluhu, údržbu či přesnost zdaleka lepší. Přestože je tato technologie v současnosti určena převážně pro archivní snímky, či nepříliš rozsáhlé soubory dat, lze s její pomocí dosáhnout rychlého a levného vyhodnocení. Výroba těchto typů zařízení byla ukončena ke konci 80. let 20. století. [2][6]

#### 6.1.1 Komparátory

Zařízení určená k velmi přesnému měření a určování snímkových souřadnic. Rozlišujeme různé typy komparátorů v závislosti na množství měřených fotografií či využití technologii. Princip odečítání naměřené hodnoty závisí na typu komparátoru a má velmi výrazný vliv na přesnosti následných výpočtů a proto je na něj kladen velký důraz. Postupem času se tak dostaly analogové měřicí přístroje až na mechanicko-technickou mez přesnosti, která odpovídá přibližně 1  $\mu\text{m}$ .

První variantou komparátoru je monokomparátor. Jedná se o zařízení využívané pro měření snímkových souřadnic jediného snímku. Vysoké přesnosti je dosahováno především díky velice jednoduché konstrukci. Následuje stereokomparátor pro vyhodnocování stereosnímků. Po roce 1957 se začala uplatňovat myšlenka spojení

výpočetní techniky s komparátorem především z důvodů jejího rapidního rozvoje a potenciálu. Vzniklé zařízení se nazývá analytický komparátor. Poslední variací je komparátor určený pro digitální snímky, který se nazývá komparátorem digitálním. S jeho pomocí je možné vyhodnocovat i běžné analogové fotografie, které byly nasnímány vysoce přesnými fotogrammetrickými laboratorními skenery. Přesnost určení bodu je pak dána v pixelech a pohybuje v rozmezí 0,1-0,01 velikosti pixelu.

Z důvodu velkého vlivu na rozvoj tehdejší fotogrammetrie bude podrobněji popsán stereokomparátor. Přístroj vyvinutý v roce 1901 Carlem Pulfrichem umožňuje měření snímkových souřadnic a souřadnicových rozdílů levého a pravého snímku, tedy určování horizontálních a vertikálních paralax. K měření je využita měřičská prostorová značka. Tou je optický kurzor, který se promítá na oba snímky za využití stereoskopického jevu. Díky tomu se pak značka jeví prostorově společně s obsahem snímků. Následným posouváním jednotlivých snímků vůči sobě se umístí měřičská značka tak, aby byla přímo na měřeném bodě. Následně jsou odečteny snímkové souřadnice. Stereokomparátor umožňoval pouze bodové vyhodnocování. Proto byl později rozšířen o možnost přímého překreslování vrstevnic měřeného terénu za pomoci mechanického převodu - takové zařízení se nazývalo stereoautograf.

## **6.2 Analytické metody**

Analytická metoda spočívá ve spojení analogové metody s výpočetní technikou. V zásadě můžeme rozlišit dva typy analytického vyhodnocování. Analytické vyhodnocování obsahu snímku využívá výpočetní techniky pro převod snímkových souřadnic do geodetického systému prostorovou transformací. Snímkové souřadnice jsou měřeny na přesných komparátorech. Touto metodou lze zpracovávat snímky pořízené z libovolné komory či libovolně stočené. Analytické vyhodnocovací stroje využívají technologie stereokomparátoru, který je rozšířen o počítač. Práce probíhají na originálních snímcích, které je nutné předem řádně zorientovat. Operátor zjišťuje snímkové souřadnice, které se následně přepočítávají na geodetické souřadnice snímaných bodů.

## 6.3 Digitální metody

„Digitální technologie využívá digitální obraz. Pro převod snímkových souřadnic do geodetického systému užívá též prostorovou transformaci, která se řeší na počítači. Snímkové souřadnice se měří přímo na obrazovce. Jednodušší systémy si vystačí s běžným počítačem a programem, pro stereometody je nutno doplnit počítač o hardwarové doplňky umožňující stereovidění.” [6]

### 6.3.1 DPW

Digitální fotogrammetrické stanice se označují zkratkou DPW (Digital Photogrammetry Workstation). Zpočátku jejich vývoje, přibližně od druhé poloviny 80. let 20. století, firmy dodávaly vlastní software i případný fotogrammetrický hardware společně. Vývoj v této oblasti jde neuvěřitelně rychle kupředu, a výroba s vývinem vlastního hardwarového vybavení v miniaturních sériích je proto finančně enormně náročná, ne-li nemožná. Z toho důvodu v dnešní době převažuje pouze dodání softwaru s doporučenou konfigurací hardwaru, případně s technickými doplňky pro stereovizi.

Vlastní zpracování a vyhodnocení snímků v digitální formě v rámci grafického uživatelského prostředí vede jasně k zlepšení efektivity a kvality zpracování. Výhodou je, že zobrazení snímků, tvorba prostorového modelu a výsledná data, jsou v rámci jednoho uzavřeného programu.

Postup při tvorbě s programem může být ukázán na programu Image Modeler od společnosti AutoDesk. Po načtení fotografií do projektu je provedena kalibrace vyhledáním jejich společných identických bodů. V případě geodetického zaměření vlíčovacích bodů jsou tyto body zadány do projektu. Po provedení kalibrace (systém oznámí skutečnost jejího uspokojivého provedení) je možné přistoupit k vlastnímu sběru 3D bodů a 3D vektorizaci projektu. Výsledkem práce je práce je 3D model zájmového objektu nebo lokality ve formě 3D ploch, 3D křivek a 3D bodů. Zdrojové fotografie mohou být použity pro textury užití na vytvořených modelech pro vizualizování celého projektu. Výstupní formáty DXF, DWG, VRML, FBX, 3DS umožňují přenos zpracovaných dat i do jiných aplikací, nejen od Autodesku.

## **6.4 Vyhodnocování měřičských snímků jednosnímkové fotogrammetrie**

Existuje několik způsobů vyhodnocení měřičského snímku jednosnímkové fotogrammetrie. Může se jednat o grafické, optické či digitální metody. V současnosti se však grafických a optických metod běžně nevyužívá.

### **6.4.1 Grafické metody**

Na přímkách v průčelné poloze, tedy rovnoběžných se snímkovým horizontem, se při středovém promítání nemění dělicí poměr. Toho lze vhodně využít při určování poloh bodů a tvarů. Metody využívají Pappovy věty o zachování dělicího dvojpoměru řad bodů a svazků přímek při středovém promítání a jsou určeny pro bodové vyhodnocování. Postup konstrukce a vyhodnocení nezávisí na znalosti prvků vnitřní či vnější orientace, pokud je však známo alespoň měřítko či referenční vzdálenost.

Prvním případem je proužková metoda. S pomocí proužků papíru lze informace ze snímku získat, či je naopak do snímku přidat. Využívá se čtyř totožných bodů na plánu i na snímku, z nichž žádný neleží na spojnici ostatních.

Druhou variantou je použití projekčních sítí – trojúhelníkových či rovnoběžníkových. Ty jsou u šikmých snímků perspektivně zkresleny. Sloužily zejména při zakreslení většího počtu bodů ze snímku. Vhodně se této metody využívalo pro určování poloh stop při dopravních nehodách. Důvodem je tvar vozovky, který výborně odpovídá potřebám a omezením těchto grafických metod.

### **6.4.2 Optické metody**

Vyhodnocovací přístroje s historickým významem, které se opět v současnosti nevyužívají. Hlavní výhodou oproti grafickým metodám je možnost souvislého zakreslování. Vyskytovaly se dva typy zařízení – obkreslovač a překreslovač.

Obkreslovač je zařízení umožňující současně pozorovat snímek území a jemu odpovídající část mapy. Skládá se ze stojanu, nosiče snímků, jehož vzdálenost a otočení je možné měnit pro ztotožnění odpovídajících bodů na mapě, předsádkových čoček a dvojitého hranolu spojeného polopostříbřenou přeponou. Využíval se zejména v letecké fotogrammetrii pro vkreslování nových podrobností do již vyhotovené mapy.

„Překreslovače jsou přístroje, které při splnění určitých, dále uvedených geometrických a optických podmínek, umožňují eliminaci vlivu sklonu osy záběru v okamžiku expozice na letecký snímek, a které současně umožňují snímek zvětšit do žádaného měřítka.” [2] Podmínkami jsou čočková podmínka a Scheimpflugova podmínka ostrého zobrazení, podle které rovina snímku, rovina promítací a střední rovina musí mít společnou průsečnici. Dosahované přesnosti byly přibližně 0,3-0,8 mm v měřítku fotoplánu, který ovšem není homogenní.

Specifickou kategorií překreslování je diferenciální překreslování. Metoda je založena na řešení rovnic kolineární transformace, která přesně popisuje vztahy mezi snímkovým souřadnicovým systémem a geodetickým souřadnicovým systémem. Prakticky je členité území rozděleno na diferenciální malé plošky ve tvaru obdélníků, které se v souladu s výškovou členitostí terénu fotografickou cestou překreslují (řešeno plynulou změnou zvětšení). Pro určení výšky se zde využívalo stereo efektu vniklého ze dvou překrývajících se leteckých snímků. Na rozdíl od předešlé metody je zde již uvažována výšková členitost. Výsledkem vyhodnocení je překreslený snímek, převedený ze středového promítání na pravouhlý (ortogonální), nazývaný ortofoto, Metoda byla využívána zejména v 60. a 70. letech 20. století a dnes se již prakticky nevyužívá. Byla nahrazena technologií digitálního ortofota.

### **6.4.3 Digitální metody**

Digitální metody využívají a zpracovávají snímky v digitální podobě, pořízené digitální komorou či naskenováním analogových měřičských snímků. Můžeme rozlišit dvě digitální metody. První je digitální překreslení, které je nejjednodušší formou digitální fotogrammetrie. Svým postupem odpovídá postupu analogových překreslovačů. Pro vyhodnocování se využívá software, který umožňuje provádět kolineární transformaci obrazu na základě vlíčovacích bodů. Softwary umožňující digitální překreslení jsou například český Topol, Iras-C či MSR.

Druhou variantou je digitální ortofoto. Principem je odstranění radiálních posunů jednotlivých pixelů, které jsou způsobeny proměnlivými výškovými poměry terénu. Děje se tak výpočtem nových poloh pixelů na základě známých převýšení pixelů nad srovnávací rovinou. Pro získání potřebných informací existují dva přístupy. Klasická metoda využívá orientovanou leteckou stereodvojici a výpočet potřebného digitálního modelu terénu je

realizován na základě vyhodnocení překrytového území. Druhým přístupem je vyhodnocení snímku se známými parametry vnitřní a vnější orientace doplněné přesným digitálním modelem terénu. Digitální model většinou již existuje, či je nově vytvořen (např. leteckým laserovým skenováním). Tento způsob je v dnešní době preferován. [7]

## 6.5 Vyhodnocování dvojic stereofotogrammetrických snímků

Pro vyhodnocování stereofotogrammetrických snímků je potřebné definování snímkových souřadnic obrazu bodu na snímcích ( $x', z'$  a  $x'', z''$ ). Z těch lze následně vypočítat hodnoty velikosti horizontální paralaxy a vertikální paralaxy dle vzorců:

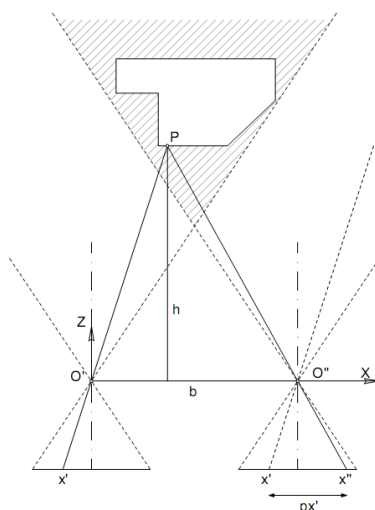
$$p = x' - x'' \quad (1)$$

$$q = z' - z'' \quad (2)$$

Pokud máme dále definovanou základnu  $b_0$ , která je dána jako vzdálenost mezi stanovišti snímání, je možné pro každý obecný bod P určit jeho vzdálenost středu promítání ze vztahu, kde  $f$  reprezentuje ohniskovou vzdálenost komory (tedy  $c_k$ ). A i souřadnice bodu  $x$  a  $z$ . Vzájemné polohy a vztahy jsou znázorněny na obr 9.

$$y = \frac{b \cdot f}{p}, \quad z = y \cdot \frac{z'}{f} = y \cdot \frac{z''}{f}, \quad x = y \cdot \frac{x'}{f} \quad (3,4,5)$$

V případě stočeného snímku se používá matematického převodu na normální za pomoci vyjádření nové základny  $b'$ .



Obrázek 9: Stereoskopická dvojice s vyznačenými snímkovými souřadnicemi  $x', x''$  a horizontální paralaxy  $px'$  [3]



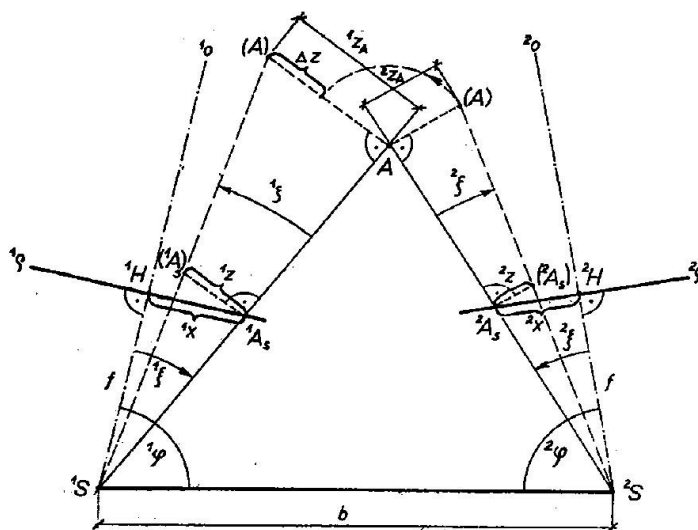
Důležité omezující podmínky a parametry jsou, že přesnost určení vzdálenosti klesá s druhou mocninou vzdálenosti a lze dosáhnout vyšší přesnosti zvětšením základny  $b_0$  či  $f$ . Velký vliv má přesnost určení paralax, která je dána mechanickými vlastnostmi přístroje.

## 6.6 Vyhodnocení vícesnímkové konfigurace

Pro vyhodnocování vícesnímkové konfigurace existují dvě hlavní metody. Jsou to průseková fotogrammetrie, která je starší a dnes méně používaná, a metoda vyrovnání bloku. Tato metoda měla položený teoretické základy již dříve, ale praktické využití přišlo až v 50. letech 20. století z důvodu výpočetní náročnosti.

### 6.6.1 Průseková fotogrammetrie

Průseková fotogrammetrie je jednou z nejstarších fotogrammetrických metod. Podle postupu, který je podobný práci s měřičským stolem, bývá někdy nazývána stolová fotogrammetrie. V podstatě se jedná o protínání vpřed, řešené pomocí měřičských snímků. Ze známých geodetických souřadnic fotografických stanovišť a průsečíků os záběru je možná následná rekonstrukce na plánu v předem definovaném měřítku. Do něj se vynesou snímkové souřadnice bodu měřeného bodu, polohy středů promítání a výsledný bod zjistíme jako průsečík přímk procházejících středem promítání a obrazem bodu ve snímkové rovině. Převýšení se následně určuje jako trigonometrické měření výšek.



Obrázek 10: Průseková metoda stolové fotogrammetrie [4]

Dnešní moderní průseková fotogrammetrie využívá analytického řešení. Její počátky leží v polovině 80. let 20. století. Řešení je založeno na výpočtu základní fotogrammetrické rovnice:

$$X - X_0 = (Z - Z_0) \frac{r_{11}(x' - x'_0) + r_{12}(z' - z'_0) - r_{13}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(z' - z'_0) - r_{33}f} \quad (6)$$

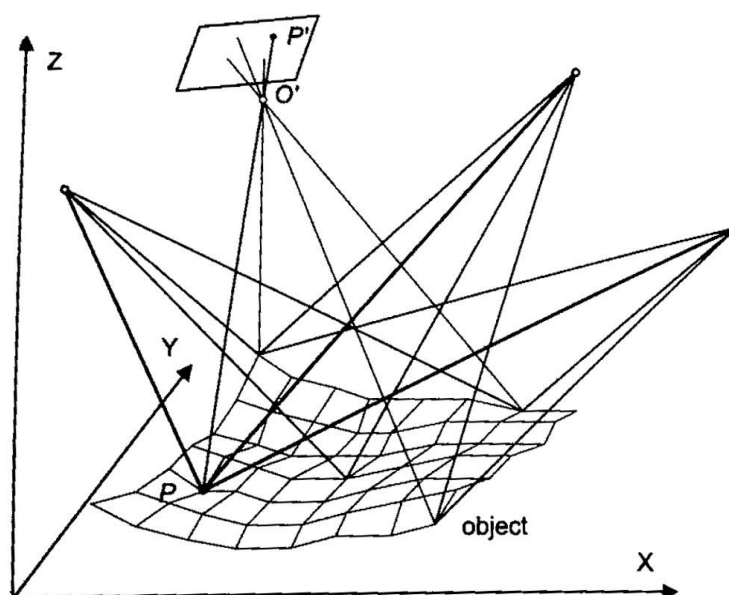
$$Y - Y_0 = (Z - Z_0) \frac{r_{21}(x' - x'_0) + r_{22}(z' - z'_0) - r_{23}f}{r_{31}(x' - x'_0) + r_{32}(z' - z'_0) - r_{33}f} \quad (7)$$

kde  $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}$  je matice prostorové rotace,  $X, Y, Z$  jsou geodetické souřadnice

bodů,  $X_0, Y_0, Z_0$  jsou souřadnice projekčního centra,  $x', z', (-f)$  (pro pozemní fotogrammetrii) jsou měřičské snímkové souřadnice a  $x'_0, z'_0$  jsou souřadnice hlavního bodu. Výpočet se provádí iterací pomocí souřadnic známých vřícovacích bodů; znamená to, že potřebujeme přibližné hodnoty neznámých před výpočtem. Do výpočtu lze také zahrnout opravu o radiální distorzi. Minimální počet vřícovacích bodů pro transformaci do geodetického systému je sedm změřených veličin. Běžně se zaměřuje 6-10 vřícovacích bodů na jednodušším objektu. Prostorové vyhodnocení lze provést ze dvou snímků bez kontroly, tři a více konvergentních snímků nám dává možnost kontroly a vyrovnání. Navíc více snímků sice znamená nárůst pracnosti, ale i zvýšení přesnosti určených poloh bodů. [6]

## 6.6.2 Metoda svazkového vyrovnání bloku

Jedná se o metodu určenou pro simultánní numerické přiřazení nekonečného množství paprskových trsů (snímků), které jsou umístěny různě v prostoru. Někdy může být také označována po svém autorovi jako Schmidovo řešení. Využitím spojovacích bodů jsou jednotlivé snímky propojeny do jednoho globálního modelu, kde může být následně zrekonstruován povrch měřeného předmětu v třírozměrném prostoru. Propojení do globálního předmětného souřadného systému je provedeno za využití minimálního počtu vlíčovacích bodů. Větší oblasti bez vlíčovacích bodů jsou propojeny pomocí menších vícesnímkových sub-setů, v nichž se vypočítávají nové body následně využívané jako vlíčovací.



Obrázek 11: Vícesnímková triangulace [3]

Metodu vyrovnání svazkového bloku lze chápat jako obecnou formu prostorového protínání se zahrnutím dalších neznámých pro snímky a předmětové body. V přeurtčitém systému rovnic vyrovnávací metoda určuje souřadnice zobrazovaného objektu, parametry vnější orientace a další modelové parametry, spolu s odpovídajícím statistickou informací o přesnosti a spolehlivosti. Praktickým problémem neleží v matematické formulaci výpočtů, ale v řešení rozsáhlé soustavy rovnic, až několika tisíc, generování přibližných hodnot pro neznámé a v neposlední řadě detekci a eliminaci hrubých chyb. Nejvýznamnějším geometrickým omezením je, že všechny korespondující snímkové

paprskové trsy se musí dostatečně vhodně překrývat a zobrazovat spojovací či vlíčovací body. Vzhledem k tomu, že všechny pozorované (měřené) hodnoty a všechny neznámé parametry fotogrammetrického projektu se berou do úvahy při jednom simultánním výpočtu, bez potřeby mezikroku v podobě modelových souřadnic, je metoda vyrovnání svazkového bloku nejsilnější a nejpřesnější metodou snímkové orientace a určování bodů ve fotogrametrii. Její vývoj je velice úzce spjat s vývojem výpočetní techniky. [6]

Matematickým základem je přímá prostorová transformace měřených snímkových souřadnic na souřadnice geodetické. Symbolicky může být zapsána transformace takto:

$$x', y', z' (= -f), x'', y'', z'' (= -f) \rightarrow X, Y, Z \quad (7)$$

Vzhledem k tomu, že základní výraz obsahuje nelineární prvky, je nutno je z výpočetních důvodů linearizovat. Linearizace se děje Taylorovým rozvojem a výpočet probíhá iterativně. Každý snímek má šest neznámých parametrů vnější orientace ( $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ ). Každý vlíčovací bod dává minimálně čtyři rovnice a musí být zobrazen alespoň na dvou snímcích. Následně každý další nově určený bod přináší čtyři další rovnice, ale již pouze 3 neznámé v podobě určovaných geodetických souřadnic. Pokud budeme považovat za neznámé i parametry vnitřní orientace, přidají se další tři neznámé do soustavy rovnic. [6]

## **7 Chyby ovlivňující měření a kalibrace měřičské komory**

### **7.1 Chyby objektivů**

Kvalita měřičského objektivu výrazně ovlivňuje přesnost určení snímkových souřadnic. V důsledku různých chyb, které vznikají při zobrazování objektivem, dochází k porušení ideálního středového promítání. Chyby a odchylky od ideálního zobrazení se nazývají optické vady nebo aberace. Je možno je rozdělit do dvou skupin v závislosti na způsobu ovlivnění zobrazení. První skupinou jsou vady, které mají vliv na ostrost zobrazení. Druhá skupina ovlivňuje správné geometrické zobrazení. Obzvláště významnou je druhá skupina, která bývá označena jako zkreslení neboli distorze objektivu.

#### **7.1.1 Sférická aberace**

Vada vyvolaná tím, že při průchodu paprsků objektivem v různých vzdálenostech od optické osy se různě lámou. Neprotínají se v jednom bodě, ale vytvářejí kolem optické osy tzv. kaustickou plochu. Neostrost, kdy se bod nezobrazí jako bod, ale jako malý rozptylový kroužek. Sférická vada může být zmenšena vhodnou kombinací více čoček (spojné a rozptylné). Také zacloněním okrajových paprsků je možné na úkor světelnosti zvýšit ostrost. Vadu nelze zcela odstranit, ale pouze kompenzovat. Optický systém zbavený sférické vady se nazývá aplanát.

#### **7.1.2 Astigmatismus**

„Na čočku šikmo dopadající svazek paprskový nevytvoří přímo bodový obraz předmětového bodu P, nýbrž dva obrazy, dvě čárky k sobě kolmé, které neleží ve stejné rovině.“ [2] Nazývají se fokály a leží ve dvou rovinách tangenciální a sagitální. Objektivy upravené tak, že tangenciální i sagitální plochy padnou do roviny zobrazovací, se nazývají anastigmaty.

#### **7.1.3 Asférická vada (koma)**

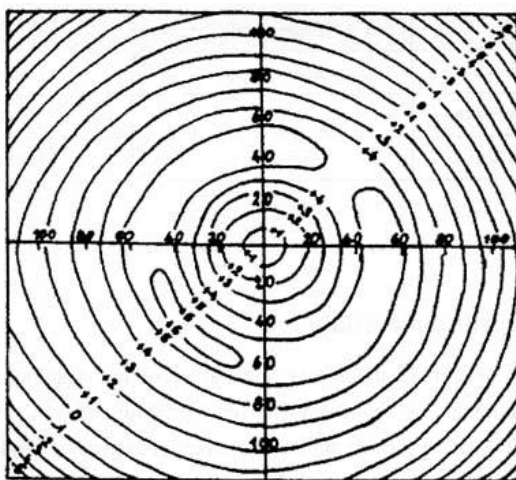
Dopadá-li na optickou soustavu šikmý a široký svazek paprsků, pak místo bodu se vytvoří kaustika s jednou rovinou symetrie. Tato nesymetrická aberace má velký vliv na jakost obrazu zejména u velkých soustav. Koma se projevuje už při malých vzdálenostech bodů od osy. Pro větší vzdálenosti dochází ke kombinaci komy s astigmatismem.

### 7.1.4 Zklenutí pole

Jedná se o vadu objektivu, která způsobena tím, že zobrazené body ležící v rovině kolmé k ose promítání se nezobrazují obecně opět v ploše kolmé, ale na ploše duté či vypuklé v závislosti na objektivu. Pouze střední část je kolmá. V důsledku toho se jediná zobrazí ostře. Proto při fotografování rovinného předmětu není v žádné poloze obraz v celém rozsahu ostrý.

### 7.1.5 Chromatická vada

Tato vada je způsobená při průchodu bílého světla čočkou a jeho následným rozkladem ve spektru v důsledku různé lámavosti paprsků různých vlnových délek. Důsledkem toho je neostrá kresba, která je na okraji různě zbarvená. Vadu lze kompenzovat složením objektivu z různých čoček z různých typů skel. Ve fotogrammetrii se korigují objektivy pro barvu žlutou (pro oko nejcitlivější) a pro barvu modrou (fotograficky nejúčinnější).



Obrázek 12: Radiální distorze objektivu vyjádřená pomocí izolinií [6]

### 7.1.6 Distorze objektivu

Vady, které mají rozhodující vliv na přesnost měření. Rozeznáváme radiální a tangenciální distorzi. Jsou způsobené souhrnem geometrických nepřesností daných z výroby objektivu. Jednotlivé prvky objektivu nejsou urovnaný naprosto přesně do ideální optické osy. To způsobuje, že paprsky při průchodu objektivem jsou mírně odkloněny a poloha zobrazeného bodu se mírně liší od správné polohy. Následkem toho se přímky

(například čtvercové sítě) nezobrazí jako rovné čáry, ale jako prohnuté. Určení distorzí provádí buď přímo výrobce, nebo je možné je určit analytickými metodami. V dnešní době je fotogrammetrický software schopen zavádět opravy a minimalizovat distorzi objektivu. Pokud je dosaženo přeurčitosti při určování poloh bodů, je možné distorzi ze snímků vypočítat. To umožňuje využívat i jiné než pouze měřičské komory pro snímání.

## **7.2 Kalibrace**

Kalibrace se využívá pro určení geometrického modelu použité komory. Model je popsán prvky vnitřní orientace a doplňkovými informacemi jako jsou radiální a tangenciální zkreslení, afinita a nekolmost os souřadného systému. Vzhledem k tomu, že se předpokládá stálá vnitřní orientace prvků v měřičské komoře, je kalibrace určena především pro semiměřičské, neměřičské komory a digitální fotoaparáty. Na rozdíl od měřičských komor však není zaručena dlouhodobá stálost vnitřních parametrů a tak je nutné provádět kalibrační postup cyklicky.

Rozlišují se základní tři metody kalibrace. Jsou charakterizovány využitým referenčním předmětem, časem a místem kalibrace.

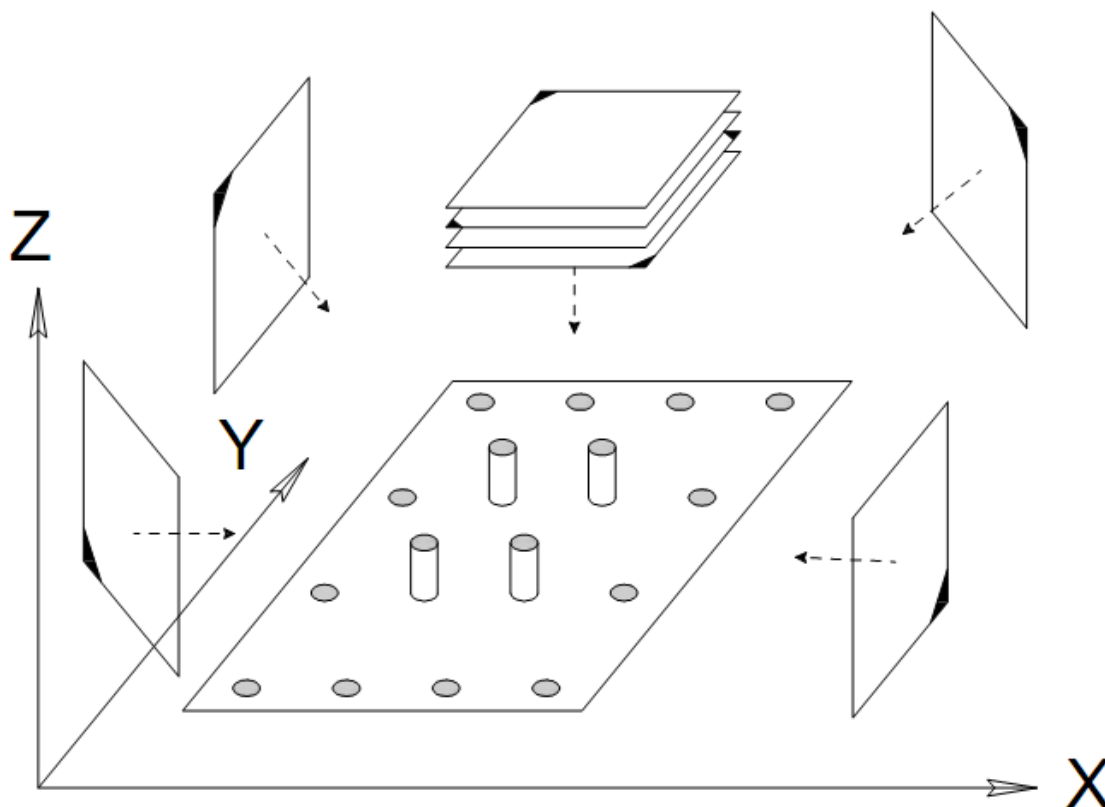
### **7.2.1 Laboratorní kalibrace**

Laboratorní kalibrace se všeobecně využívá pouze pro měřičské komory. Parametry vnitřní orientace jsou určovány goniometry, kolimátory a různými optickými technikami, kde jsou měřeny směry či úhly světelných paprsků, procházejících objektivem komory. Laboratorní kalibrace se provádějí na specializovaných pracovištích.

### **7.2.2 Kalibrace za pomoci testovacího pole**

Metoda založená na využívání vhodného testovacího pole, které obsahuje body o známých souřadnicích či vzdálenostech. To je nasnímáno z různých fotografických stanovišť, které navzájem zajišťují svou orientací dobré protínání paprskových trsů. Testovací pole může být přenosné, například na připevněné na desce. Přenosné testovací pole, či přenosná rámová konstrukce o předem určených vlastnostech s vyznačenými body, se dá využít při snímání objektu současně. Druhou variantou je testovací pole, které je pevně umístěné (např. na stěně budovy).

Na obr. 13 je znázorněna vhodná snímková konfigurace pro kalibraci. Pro kalibraci fotoaparátu je pořízeno 8 snímků, kde na každém je zobrazeno co nejvíce testovacích bodů. Vhodné je, aby každý následující snímek byl pootočen o  $90^\circ$  okolo své optické osy pro zajištění rotační symetrie měření i výsledků.



Obrázek 13: Snímková konfigurace pro kalibraci testovacím polem [3]

Naměřené snímkové souřadnice a dané referenční (objektové) souřadnice jsou následně zpracovány metodou protínání paprskových svazků, aby mohly být zjištěny parametry kamerového souřadného systému (prvky vnitřní orientace) stejně jako parametry vnější orientace. Numerické výpočty mohou vést k nechtěným korelacím mezi vypočítávanými parametry, tomu lze předejít především vhodnou snímkovou konfigurací. Dalším důležitou podmínkou pro přesné určení ohniskové vzdálenosti je určení alespoň jedné informace o měřítku ve směru osy záběru. Toho lze dosáhnout referenční vzdáleností mezi danými body na testovacím poli. Rotace snímků o  $90^\circ$  slouží k určení správné polohy hlavního snímkového bodu a nestejného měřítka v jednotlivých osách (afinita).



### 7.2.3 Simultální kalibrace (Self-calibration)

„Simultální kalibrace je způsob kalibrace, kdy jsou snímky používané pro kalibraci využity pro vlastní vyhodnocení (rekonstrukci objektu).” [6] Testovací pole je umístěno na měřeném objektu a není třeba znát souřadnice jeho jednotlivých bodů až na polohy vřícovacích bodů. Ty jsou následně využity pro určení prvků vnější orientace, jako je poloha a rotace. Prvky vnitřní orientace jsou určovány opět za pomoci snímkových souřadnic a podmínek protínání bodů testovacího pole. Tyto body jsou pak označovány jako spojovací body. Pro určení správného měřítka je potřeba stejně jako v předchozím případě určit v objektovém prostoru jednu vzdálenost. „Hlavní předností je, že vnitřní orientace se určuje přímo pro časový okamžik snímkování měřeného objektu, což zaručuje ve srovnání s ostatními způsoby kalibrace nejvyšší přesnost při vyhodnocení objektu.” [6][3]

## 8 Aplikace fotogrammetrie

Obecně bylo definováno již v roce 1962 E. H. Thompsonem pět základních případů, kdy je vhodné využít fotogrammetrii. 1) Pokud je měřený objekt nepřístupný, popř. velice špatně přístupný; 2) Pokud není měřený objekt pevný a je třeba určit jeho okamžité rozměry; 3) Pokud není jisté, zda bude určení rozměrů daného objektu vůbec potřebné; 4) Pokud není v době měření jasné, jaké rozměry bude třeba určit; 5) Pokud je objekt velice malý. Ty mohou být dále rozšířeny o tři další případy; 6) Pokud by přímé měření ovlivnilo měřený objekt, popř. by narušilo činnosti probíhající v okolí předmětu; 7) Když jsou třeba výsledky v reálném čase; 8) Pokud je vyžadováno současné zaznamenávání a měření velkého množství bodů. [3]

### 8.1 Využití fotogrammetrie pro analýzu dopravních nehod

Cílem dokumentace míst dopravních nehod a kriminálních trestních činů je vytvořit jasnou představu o situaci na místě a o všech okolnostech, za nichž k události došlo. Dokumentace se v současné době skládá z následujících částí: protokol o nehodě v silničním provozu, topografická dokumentace (náčrtek, plánek, různá schémata) a fotodokumentace místa dopravní nehody. Z časového hlediska je současný způsob ohledání místa události velmi náročný a bývá ovlivněn mnoha negativními faktory, které zhoršují objektivní podmínky pro zpracování dokumentace (shluk lidí, přerušená doprava apod.). [8][9]

„Když je událost dokumentována na podkladě přímých terénních měření, může se stát, a to i při mimořádné pečlivosti, že není zaregistrována nějaká podrobnost z místa události, která může být v průběhu ohledání jen málo důležitá nebo nemusí s událostí na první pohled vůbec souviset, ale ukáže se být neobyčejně důležitou v průběhu připravovaného řízení. Téměř nikdy není možno tyto podrobnosti reprodukovat, protože se obvykle rychle stírají a mnohdy také sama terénní situace časem podléhá změnám.” [8]

S tím souvisí zejména pro znalce velice důležitý aspekt v rámci vyhodnocování nehodového děje. I v případě určení poloh významných stop pro vyhodnocení v dokumentaci z místa nehody, měření bylo prováděno jinou osobou, která se mohla dopustit nepřesností či metodických pochybení. V takovém případě může fotogrammetrické vyhodnocení snímkové dokumentace samotným znalcem vést k ověření či zpřesnění polohových informací. V případě, že se jedná o vyhodnocení dopravní nehody

s delším časovým odstupem, mohou se podmínky v místě nehody změnit. Využité výchozí body pro měření a orientaci již nemusí existovat či jsou nezřetelné. Tehdy využití fotografických informací může být jediným způsobem, který má znalec k dispozici. Pak fotogrammetrie poskytuje jediný způsob dodatečného určování poloh či měření.

## **8.2 Využívaný fotogrammetrický software pro analýzu dopravních nehod**

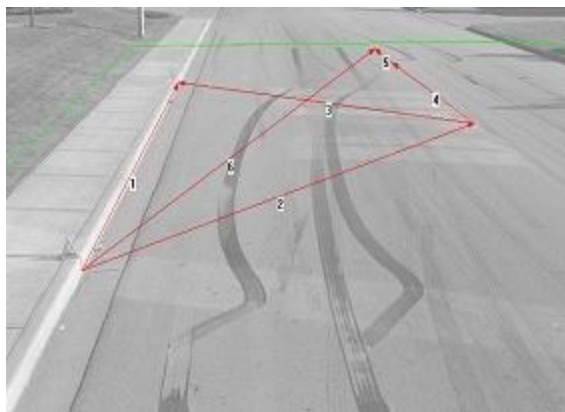
V současnosti se využívá pro vyhodnocování fotografické dokumentace pouze digitální fotogrammetrie, a to za využití softwarových prostředků. Několik v praxi používaných je následně popsáno, včetně naznačení postupu práce v nich.

### **8.2.1 PC-RECT**

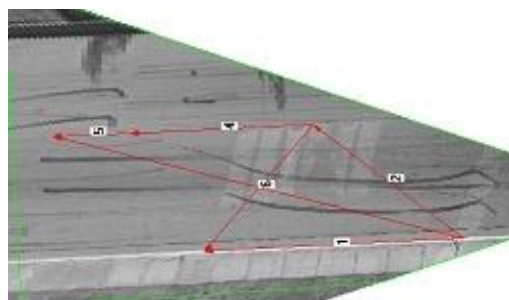
„V současné době je patrně nejpoužívanějším programem pro zpracování fotografií z místa dopravní nehody softwarová aplikace PC-RECT od rakouské společnosti DSD (Dr. Steffan Datentechnik Ges.m.b.H). Pracuje na principu jednosnímkové digitální rektifikace fotografií – transformuje šikmo vyfotografovanou plochu vozovky na přesný rovinný plánek místa dopravní nehody v půdorysu, v němž je možno zobrazit všechny vzdálenosti a úhly v daném měřítku. Velký význam má použití tohoto softwaru v tom, že na fotografii je možno dodatečně změřit jakoukoli vzdálenost nebo délku stopy v případě, kdy to bylo na místě nehody opomenuto. Pro samotnou rektifikaci je však nezbytně nutné na ploše objektu rozpoznat nejméně čtyři body. Po zpracování je možno plánek vytisknout nebo uložit jako bitmapový soubor pro účely dalšího použití v jiných softwarových aplikacích (např. pro simulaci nehodového děje v programu PC-CRASH přímo na reálně zanechaných stopách na rektifikované fotografii).” [9]

Postup práce v rámci programu je následující. Po načtení fotografie z místa dopravní nehody, která může být ve formátech GIF, TIF, BMP, PCX, ESP, či případném naskenování analogové fotografie, je možné snímek následně upravit. Zejména invertace barev, zvýšení či snížení kontrastu a světlosti může pomoci při následném určování bodů. Po načtení je nutné vyznačit oblast, výřez plochy, která bude použita pro transformaci. Pro správné převedení je nutná definice referenční vzdálenost, která může být provedena dvěma způsoby. První se používá v případě známé (změřené) vzdálenosti dvojice bodů buď horizontálně na vozovce či vertikálně v prostoru. Druhou možností je definice vzdálenosti za pomoci „čtyřúhelníkové metody”. Tato varianta je přesnější a volí se v případě, že jsou známy všechny vzdálenosti mezi zvolenými body. Po vybrání

definovaných bodů je zadána vzdálenost první dvojice bodů a ostatní jsou dopočítány. Ty se dají následně změnit dle skutečnosti. Obecně platí, že s rostoucí velikostí referenční vzdálenosti roste i přesnost výpočtu. Do výpočtu jsou zahrnuty i parametry vnější orientace. Výsledný projekt lze exportovat pro využití například v simulačních programech. [12]



Obrázek 14: Fotografie s definovanými vzdálenostmi mezi body [12]



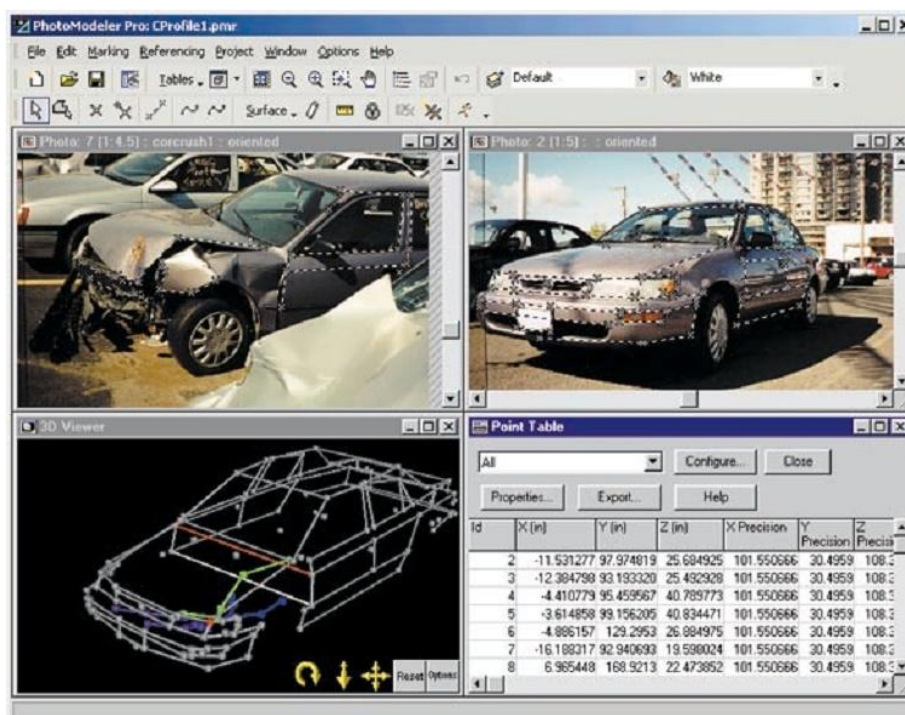
Obrázek 15: Výsledné transformované ortofoto [12]

V případě rozsáhlejších ploch míst dopravní nehody, je možno provést vyhodnocení z více snímků, které jsou navzájem propojeny přes dvojice bodů. Postup je v principu shodný s postupem jednosnímkovým. V rámci programu je možné vyhodnocovat i prostorové měření či vyhodnocování videozáznamu. Záznam musí být rozdělen na jednotlivé průběžně číslované snímky, v nichž se následně definují referenční vzdálenosti. Do vzniklého výkresu je možné vkreslovat vodorovné dopravní značení či zvýrazňovat potřebné místa. [9][10]

### 8.2.2 PHOTOMODELER PRO

Program společnosti Eos Systems Inc. je fotogrammetrický systém, který není primárně určen pouze pro vyhodnocování v rámci problematicky dopravních nehod, avšak může být k tomu velice vhodně použit. Díky němu je možné tvořit situační plány, měřit vzdálenosti a polohy stop či významných bodů míst dopravních nehod a trojrozměrných modelů. Jeho praktické využití pro znaleckou činnost spočívá i v možnosti přesného určení deformací vozidel, které lze využít pro výpočet deformačních energií a z nich následně získat rychlosti vozidel v okamžiku nárazu. Poslední variací využití může být vytvoření modelu na základě reálného vozidla. Ten pak může být opět využit pro simulační či jiné programy. Program je schopen pracovat společně s měřičskými

komorami, či vyhodnocovat snímky pořízené z fotoaparátů s neznámými parametry vnitřní orientace.



Obrázek 16: Měření deformací v programu Photomodeler PRO [14]

Program využívá průsekové fotogrammetrie a umožňuje fotogrammetrické výsledky práce, nejčastěji ve formě trojrozměrného modelu, například ve formátu DXF, dále exportovat do různých grafických aplikací. Tam může být následně upravován, okótován či použit pro simulaci nehodového děje. Postup je velice podobný postupu v programu PC-RECT, se snahou o co nejvíce uživatelsky přátelské prostředí.

### 8.2.3 DMU (Dokumentace místa události)

„Tuzemská aplikace DMU je založena na principu blízké fotogrammetrie. Vyvinul ji Kriminální ústav Praha a používá se zejména při tvorbě přesného plánu místa dopravní nehody ze dvou a více pořízených fotografií, na nichž musí být zobrazeny nejen vyhodnocované objekty, ale také referenční body se známými parametry vnější orientace. Systém DMU je složen ze dvou samostatných programů. Prvních z nich je GEODET, který zpracovává snímané souřadnice známé dvojice bodů. Druhým programem je AutoCad doplněný o uživatelské prostředí DMUCAD, které je možné dle potřeby dále doplňovat.“ [9]

Mezi hlavní výhody tohoto systému patří jednoduchost práce, jak během práce na místě nehody, tak během následujícího zpracování, velmi nízké nároky na výpočetní techniku a možnost kdykoliv doplnit nově získané informace. Nezanedbatelnou výhodou je také podstatně nižší pořizovací cena ve srovnání s ostatními, stejně zaměřenými programy.

### **8.3 Využití fotogrammetrie pro zaměřování křižovatek**

V průběhu posledních let byla většina větších křižovatek na území hlavního města Prahy nasnímána metodou vícesnímkové průsekové fotogrammetrie. Výsledkem této snahy jsou přesné předpřipravené plány, které následně slouží k zaznamenání dopravní nehody. Tím je zvýšena nejen rychlost a efektivita práce při měření místa dopravní nehody, ale zvyšuje se tím značně i přesnost. [13]

### **8.4 Porovnání s jinými používanými metodami**

Technické prostředky (kolečko, pásmo, krokomeř), jichž se v současné době využívá, vykazují poměrně velkou relativní chybu, která pak může ovlivnit případný vyšetřovací pokus nebo rekonstrukci události. Závisí nejen na správném využívání přístrojů, ale i na dodržení vhodných postupů. Zanedbatelné nejsou ani další okolnosti, jako je nerovnost terénu, povětrnostní podmínky apod. Právě v těchto případech lze s výhodou využít fotogrammetrie. Ať již se jedná o mapování místa dopravní nehody, či následného určování poloh, či rozměrů předmětů z policejní dokumentace v případě, že kvalita získaných snímků a pokrytí dané oblasti je dostačující. V současné době, kdy lze využít i snímky pořízených fotoaparátem o neznámé vnitřní orientaci, to znamená pro fotogrammetrický postup jasnou výhodu a flexibilitu.

Další možnou alternativou získávání přesných polohopisných informací je trojrozměrné laserové skenování. Fotogrammetrie je charakterizována poměrně rychlým pořizováním fotogrammetrických snímků, avšak využívá ve srovnání s laserovým skenerem méně bodů. Má lepší možnosti vličování výsledku referenčního systému pomocí vličovacích bodů a dobrou identifikaci hran důležitých pro vyhodnocení s možností ručního, poloautomatického či plně automatického výběru zjišťovaných informací. Oproti tomu 3D skenery jsou charakterizovány velmi rychlým sběrem přímo měřených bodů (tisíce až miliony změřených bodů v řádech desítek minut), zcela automatickým provozem a špatnou identifikací hran. Pro nízkou vzdálenost dosahuje fotogrammetrie vysoké přesnosti, která s vzrůstající vzdáleností klesá. Oproti tomu laserové skenery mají jen

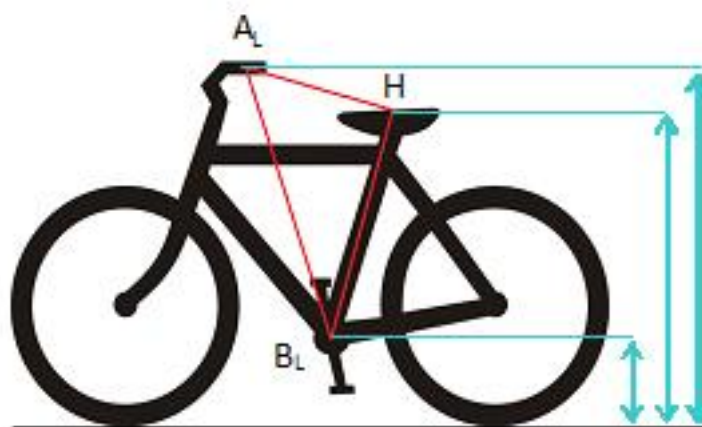
mírně se zhoršující přesnost s rostoucí vzdáleností, ale krok měření je omezen rozbíhavostí laserového paprsku (stopy laseru). Pro zpracování získaných „mračen bodů“ je nutný speciální software. Skenovací přístroje, a zejména patřičný software, jsou stále ve vývoji a jsou velmi drahé. Zařízení velmi rychle stárnou v důsledku velmi rapidního pokroku výpočetní techniky.

## 9 Praktická část

### 9.1 Cíl pokusu

Praktická část práce je zaměřena na použití fotografických digitálních snímků pro určení některých význačných parametrů při jízdě na kole. Těmi jsou poloha a rozměry trojúhelníku posazu a výška očí nad komunikací.

Trojúhelník posazu má velmi důležitý vliv nejen na komfort jízdy cyklisty, ale také na dynamické vlastnosti vozidla – ovlivňuje mimo jiné umístění těžiště, momenty setrvačnosti či aerodynamický odpor. Je definován podobně jako u jednostopých motorových vozidel referenčním bodem nad sedákem (H), vztažným bodem na řídítkách v místě doteku dlaně ( $A_L$ ) a vztažným bodem ve středu kliky ( $B_L$ ). Výška očí je dalším velmi významným parametrem při jízdě na kole. V závislosti na ní je možné určit oblasti zakrytého výhledu, tedy to, co mohl či nemohl cyklista v průběhu případného nehodového děje vidět.



Obrázek 17: Trojúhelník posazu

Jelikož cyklista v klidu a při pohybu v různých režimech jízdy (do kopce, z kopce, rovina) zaujímá různé polohy, jsou klasické metody určování vzdáleností, např. použití pásma, nevhodné. Fotografický snímek je schopný nezávisle na režimu jízdy cyklisty zaznamenat všechny relevantní informace s minimálním zkreslením rychle, komfortně a flexibilně. Proto byl proveden pokus, který měl ověřit možnost využití fotogrammetrického určování rozměrů a poloh žádoucích parametrů.



## 9.2 Místo a použitá technika

Získávání dat bylo provedeno 10. května 2012 na cyklistické stezce na Rašínově nábřeží pod železničním mostem. Měření se zúčastnili Ing. Tomáš Mičunek, Ph.D., Luboš Nouzovský a Zdeněk Svatý. V daném místě je povrch stezky tvořen hladkou dlažbou, která cyklistovi umožňuje plynulý pohyb a komfortní jízdu na rozdíl od žulových dlažebních kostek na zbývající ploše nábřeží. Z tohoto důvodu se cyklisté pohybují pouze na omezeném úzkém prostoru, který je dán rozměry dlažby, které jsou v celém rozsahu neměnné. Šířka byla určena za pomoci pásma a činí 350 mm. Osy jednotlivých směrů jsou od sebe vzdáleny 1240 mm.

Snímky byly pořízeny digitálním fotoaparátem Casio EX-F1, jehož technické parametry jsou blíže specifikovány v tab. 1. Fotoaparát byl umístěn na stativu a vlastní snímání bylo prováděno za pomoci dálkové spouště. Díky tomu byla v průběhu celého měření poloha fotoaparátu neměnná, čímž byly zajištěny konstantní podmínky pro všechny snímky.

Tabulka 1: Technické parametry fotoaparátu Casio EX-F1

Parametry fotoaparátu	
Typ fotoaparátu	Digitální EVF zrcadlovka
Typ senzoru	1/1,8" CMOS
Rozlišení celkové / efektivní	6,6 MPix / 6,0 MPix
Max. rozlišení snímku	2816x2112 px
Poměr stran	16:9, 4:3, 3:2
Procesor	Casio EXILIM 2.0
Citlivost ISO	AUTO, 100, 200, 400, 800, 1600
Objektiv	
Ohnisková vzdálenost (skutečná)	7,3 - 87,6 mm
Ohnisková vzdálenost (přepočten)	36 - 432 mm
Světelnost objektivu	F2,7 - F4,6
Clona	F2,7 - F15 (široké ohnisko); F4,6 - (dlouhé ohnisko)
Zoom	Optický 12x, Digitální 4x, Kombinovaný 48x
Stabilizace	Optický stabilizátor (CMOS-shift)

Nastavení fotoaparátu v době snímání je patrné v tab. 2. Z důvodu rozsahu práce byla zanedbána distorze objektivu a vlastní kalibrace fotoaparátu. Z důvodu dosažení maximální přesnosti byl fotoaparát v době snímání zaostřen na nekonečno a byla vypnuta funkce automatického ostření. Snímání se provádělo vždy sérií snímků rychlostí 15 snímků za sekundu.

**Tabulka 2: Informace o nastavení fotoaparátu při snímání**

Exif informace	
Citlivost	ISO 100
Clona	f/2,7
Expoziční čas	1/1600 s
Expoziční program	Normální program
Ohnisková vzdálenost	7,3 mm
Přepočtená ohnisková vzdálenost	36 mm
Rozměr X	2816 px
Rozměr Y	2112 px
Rozlišení	72 px/palec
Barevný prostor	sRGB

Pro určení nejistot měření bylo využito cyklistické kolo, u kterého byly předem změřeny rozměry potřebné pro další vyhodnocení. Dále je v práci toto kolo označováno jako referenční. Měřenými rozměry byl rozvor a výška středu kliky od komunikace. Dané rozměry byly určeny za pomoci pásma a činily – rozvor 1085 mm a výška středu kliky 292 mm. Pro usnadnění následného přesného určení na snímcích byly význačné body na kole označeny.

### 9.3 Postup a vyhodnocení

Snímání bylo provedeno následujícím způsobem. Nejdříve bylo vyfotografováno referenční kolo v klidu v krajních polohách cyklistické stezky. Následně byly pořízeny snímky dvou průjezdů referenčního kola v daném směru. Pak již probíhalo vlastní snímání projíždějících cyklistů sérií snímků. Z důvodu dosažení vyšší přesnosti vyhodnocení a určení, zda nedošlo k posunu fotoaparátu, bylo v průběhu měření zopakováno nasnímání referenčního kola v klidu v krajních polohách.

Grafické vyhodnocení snímků bylo provedeno v programu firmy Autodesk AutoCad 2012. U snímků referenčního kola v krajních polohách bylo, díky známému rozvoru, určeno měřítko snímku, do kterého byl následně snímek převeden tak, že jedna jednotka odpovídala 1 mm. Postupně tedy byla získána 4 měřítka pro každý směr. Aritmetickým průměrem měřítek bylo určeno měřítko, které by odpovídalo snímku zachycujícím průjezd středem daného pásu pro zvolený směr. Následně byly převedeny všechny zbývající získané snímky do daného měřítka a na nich byly graficky určeny polohy významných bodů posedového trojúhelníku a výšky očí. Jejich vzájemné

vzdálenosti, délky a polohy byly následně exportovány za využití funkce EXTRDATA do programu Microsoft Office Excel 2007, kde byly zpracovány a vyhodnoceny.



Obrázek 18: Snímek převedený do měřítka s určeným trojúhelníkem posazu a výškou očí

Kombinovaná standardní nejistota měření byla určena sumací standardních nejistot typu A a B dle vzorce (8).

$$u_x = \sqrt{(u_{xA}^2 + u_{xB}^2)} \quad (8)$$

Standardní nejistota A byla určena ze snímků průjezdu referenčního kola po stezce. Tyto snímky byly převedeny do již předem získaného měřítka. Ze získaných hodnot výběrového průměru byla určena výběrová směrodatná odchylka. Z důvodu nižšího počtu měření byl kvalifikovaným odhadem určen koeficient ( $k_x = 3,5$ ) a s jeho pomocí následně i standardní nejistota A.

$$u_{xA} = k_x s_{\bar{x}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (9)$$

Standardní nejistota B byla určena ze snímků krajních poloh v klidu, které byly převedeny do (aritmetickým průměrem) získaného měřítka. Následná maximální odchylka byla zvolena jako maximální rozsah změn  $\Delta z_{\max}$ . Nejistota způsobená pásmem při určení rozvoru byla z důvodu mnohem menší velikosti vůči této nepřesnosti zanedbána. Vzhledem k tomu, že většina cyklistů využívá středu cyklostezky, odpovídá výskyt hodnot Gaussovu rozdělení (koeficient  $\kappa = 2$ ).

$$u_{xB} = \frac{\Delta z_{\max}}{\kappa} \quad (10)$$

Standardní kombinovaná nejistota měření vyšla  $\pm 30,4$  mm. To odpovídá relativní hodnotě 2,8 % vztažené k referenčnímu rozvoru kola.

Získané referenční snímky převedené do měřítka, snímky s určenými význačnými body a snímky pro určení nejistot se nacházejí v příloze v digitální podobě ve výkresovém souboru programu AutoCad. Vypočtená měřítka pro jednotlivé referenční snímky, výsledná měřítka pro dané směry a určení nejistot se nacházejí v tabulkách spolu s výslednými hodnotami trojúhelníku posazu a výšky očí v digitální podobě na příloženém CD. Výsledné získané hodnoty, referenční snímek vnitřního okraje a referenční snímek průjezdu jsou součástí přílohy.

## 10 ZÁVĚR

V rámci této bakalářské práce byla podrobně popsána metoda fotogrammetrie a její využití ve znalecké praxi. Byl rozebrán nejen vývoj metody, ale i její následné logické členění. Práce obsahuje rozdělení a popis používaných technologií pro vlastní snímání a vyhodnocování dat. Zhodnotila jejich vhodnost pro použití, obecné výhody a možné omezení pro aplikaci. Nastínila praktické využití jednotlivých typů fotogrammetrie v různých oborech. Byl položen důraz na jejich použití v rámci vyhodnocování míst dopravních nehod, doplněných srovnáním s jinými možnými měřicími metodami. Bylo ukázáno, že fotogrammetrie je velmi výhodnou a v praxi hojně využívanou metodou, která skýtá pro vyhodnocování míst dopravních nehod mnoho výhod.

Na závěr byl proveden praktický pokus, kde za pomoci grafického vyhodnocení jednosnímkové fotogrammetrie byl určován trojúhelník posazu cyklisty. Cílem praktické úlohy bylo nejen získání vlastních dat, ale zejména seznámení s úskalími praktického měření, jeho plánováním a vyhodnocováním. Dále také osvojení si správných postupů při práci s fotoaparátem a jeho správné nastavení. Z tohoto hlediska se dle mého názoru praktická úloha podařila. Získané hodnoty se vyznačují vcelku vysokou nejistotou tři centimetry, ovšem většina cyklistů využívá středů stezky, kde je určování hodnot přesnější. Projevilo se také to, že velmi záleží na vzdálenosti snímaného předmětu od fotoaparátu a chybějící kalibrace fotoaparátu. Z tohoto důvodu však byl pro měření zvolen vzdálenější směr cyklistické stezky, kde má šířka prostoru, v kterém se projíždějící cyklista může vyskytnout, mnohem menší vliv na získanou odchylku. Ověřilo se, že vhodnější metodou by byla vícesnímková fotogrammetrie, která by spolu se softwarovým zpracováním dosáhla mnohem vyšší míry přesnosti. Navíc získané zkušenosti pomohou v budoucnu dosáhnout mnohem přesnějších výsledkům.

Díky podrobnému seznámení s problematikou fotogrammetrie, jejími výhodami a omezeními pro použití, je položen dobrý teoretický základ a přehled o technologiích pro pokračování v hlubším využívání této metody. Proto v následující diplomové práci se budu moci zaměřit na hlubší poznání a praktické využití zejména softwarových nástrojů a vícesnímkové fotogrammetrie pro dodatečné zaměřování poloh stop na místech dopravních nehod a zpřesňování topografické dokumentace.

## POUŽITÁ LITERATURA

### 10.1 Seznam použité literatury

- [1] MCGLONE, J, Edward M MIKHAIL, James S BETHEL a Roy MULLEN. *Manual of photogrammetry*. 5th ed. Bethesda, Md.: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, c2004, 1151 s. ISBN 15-708-3071-1.
- [2] HERMANY, J. a V. PICHLÍK. *Fotogrammetrie: učebnice pro 3. a 4. ročník středních průmyslových škol zeměměřičských*, 1976. Vyd. Praha: Kartografie n.p., 1976.
- [3] AL], T. Luhmann [et]. *Close range photogrammetry: principles, techniques and applications*. Dunbeath (Escocia): Whittles, 2006. ISBN 04-701-0633-6.
- [4] MENŠÍK, Miroslav. *Geometrické základy fotogrammetrie*. Vydání 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n.p, 1966, č. publikace 55-2-06.
- [5] BRADÁČ, Albert. *Soudní inženýrství*. 1. vyd. Brno: CERM, 1997, 718 s. ISBN 80-720-4057-X.
- [6] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 200 s. ISBN 978-80-01-04249-6.
- [7] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 2*. 1. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 163 s. ISBN 978-80-01-04719-4.
- [8] DOČEKAL, Zdeněk. *Využívání metody a techniky pozemní fotogrammetrie při vyšetřování dopravních nehod a kriminálních trestných činů*. Československá kriminalistika. roč. XIII/1980/ č. 03
- [9] HLAVÁČ, Petr. *Aplikace výpočetní techniky při analýze dopravních nehod*. Zlín, 2011. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Petr Skočík.
- [10] HLAVÁČ, Petr. *Typické stopy dopravních nehod*. Zlín, 2009. Bakalářská práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Vladislav Štefka.
- [11] HODAČ, J. Digitální ortofoto: stručná historie. In: [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: [lfgm.fsv.cvut.cz/data/fm30/m-Ortofoto.pdf](http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/fm30/m-Ortofoto.pdf)
- [12] DATENTECHNIK, Steffan. *PC-RECT: Operating & Technical Manual* [online]. Linz, Austria: Macinnis engineering Associates, 2009 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://80.123.144.74/DSD/>
- [13] VACH, Karel. Využití průřezové fotogrammetrie při leteckém snímkování z nízkých výšek. [online]. [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: [http://www.pce.sk/clanky/body\\_zbor98\\_4.htm](http://www.pce.sk/clanky/body_zbor98_4.htm)

### 10.2 Seznam použitých internetových stránek

- [14] EOS SYSTEMS INC. *Photo Modeler: Measuring & Modeling the Real World* [online]. 2011 [cit. 2012-04-20]. Dostupné z: <http://www.photomodeler.com/>

# SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Bezkontaktní měřicí metody [přeloženo z 3].....	11
Obrázek 2: Pulfrichův stereokomparátor [3].....	13
Obrázek 3: Historické srovnání pozemní a letecké fotogrammetrie .....	15
Obrázek 4: Schéma principu středového promítání [4].....	16
Obrázek 5: Rozložení os v letecké (vlevo) a pozemní (vpravo) fotogrammetrii [2].....	17
Obrázek 6: Zobrazení bodu v souřadném systému předmětu $[X, Y, Z]$ , komorovém souřadném systému $[CX, CY, CZ]$ a snímkovém souřadném systému $[gx', gy']$ [1].....	17
Obrázek 7: Prvky vnější orientace [2] .....	19
Obrázek 8: Rozdělení využití měřičských metod v závislosti na velikosti měřeného objektu a dosahované přesnosti [přeloženo z 3].....	20
Obrázek 9: Stereoskopická dvojice s vyznačenými snímkovými .....	32
Obrázek 10: Průřezová metoda stolové fotogrammetrie [4].....	33
Obrázek 11: Vícesnímková triangulace [3].....	35
Obrázek 12: Radiální distorze objektivu vyjádřená pomocí izolinií [6] .....	38
Obrázek 13: Snímková konfigurace pro kalibraci testovacím polem [3].....	40
Obrázek 14: Fotografie s definovanými vzdálenostmi mezi body [12] .....	44
Obrázek 15: Výsledné transformované ortofoto [12].....	44
Obrázek 16: Měření deformací v programu Photomodeler PRO [14] .....	45
Obrázek 17: Trojúhelník posazu .....	48
Obrázek 18: Snímek převedený do měřítka s určeným trojúhelníkem posazu a výškou očí .....	51

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Technické parametry fotoaparátu Casio EX-F1 .....	49
Tabulka 2: Informace o nastavení fotoaparátu při snímání .....	50

## SEZNAM PŘÍLOH

1. Obrázek1: Snímek vnitřního okraje č.1 s vyznačeným rozvorem
2. Obrázek 2: Snímek průjezdu referenčního kola č. 1 s vyznačeným rozvorem
3. Tabulka 1: Získané hodnoty posedového trojúhelníku a výšky očí nad komunikací





**Obrázek 1: Snímek vnitřního okraje č. 1 s vyznačeným rozvorem**



**Obrázek 2: Snímek průjezdu referenčního kola č. 1s vyznačeným rozvorem**

Tabulka 1: Získané hodnoty posedového trojúhelníku a výšky očí nad komunikací

Získané hodnoty			[mm]	[cm]
Cyklista 1	Trojúhelník posazu	výška řídítek - $A_L$	976,76	97,7
		výška středu klik - $B_L$	316,17	31,6
		výška sedla - H	970,01	97,0
	Vzdálenosti mezi:	$A_L-B_L$	844,91	84,5
		$A_L-H$	735,67	73,6
		$B_L-H$	704,77	70,5
Výška očí		1469,27	146,9	
Cyklista 2	Trojúhelník posazu	výška řídítek - $A_L$	887,41	88,7
		výška středu klik - $B_L$	266,08	26,6
		výška sedla - H	1018,01	101,8
	Vzdálenosti mezi:	$A_L-B_L$	793,55	79,4
		$A_L-H$	758,60	75,9
		$B_L-H$	793,56	79,4
Výška očí		1485,20	148,5	
Cyklista 3	Trojúhelník posazu	výška řídítek - $A_L$	913,67	91,4
		výška středu klik - $B_L$	270,75	27,1
		výška sedla - H	991,59	99,2
	Vzdálenosti mezi:	$A_L-B_L$	810,38	81,0
		$A_L-H$	733,70	73,4
		$B_L-H$	758,56	75,9
Výška očí		1469,71	147,0	
Cyklista 4	Trojúhelník posazu	výška řídítek - $A_L$	938,92	93,9
		výška středu klik - $B_L$	256,84	25,7
		výška sedla - H	963,67	96,4
	Vzdálenosti mezi:	$A_L-B_L$	819,21	81,9
		$A_L-H$	683,49	68,3
		$B_L-H$	743,10	74,3
Výška očí		1545,85	154,6	
Cyklista 5	Trojúhelník posazu	výška řídítek - $A_L$	940,98	94,1
		výška středu klik - $B_L$	283,74	28,4
		výška sedla - H	991,51	99,2
	Vzdálenosti mezi:	$A_L-B_L$	769,35	76,9
		$A_L-H$	649,15	64,9
		$B_L-H$	749,71	75,0
Výška očí		1498,41	149,8	