

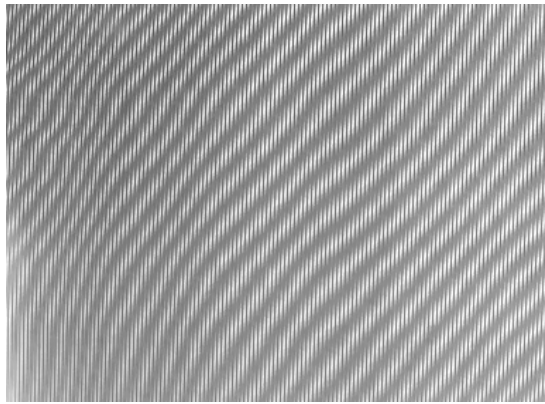
3D metody počítačového vidění, registrace, rekonstrukce

účel měření

- bezkontaktní měření polohy a vzdálenosti
- zjištění/měření (prostorových) rozměrů
- zjištění 3D tvaru – “reverzní inženýring” – modely existujících věcí, modely pro virtuální realitu
- zprostředkovaně rychlost (s informací o časech snímání)

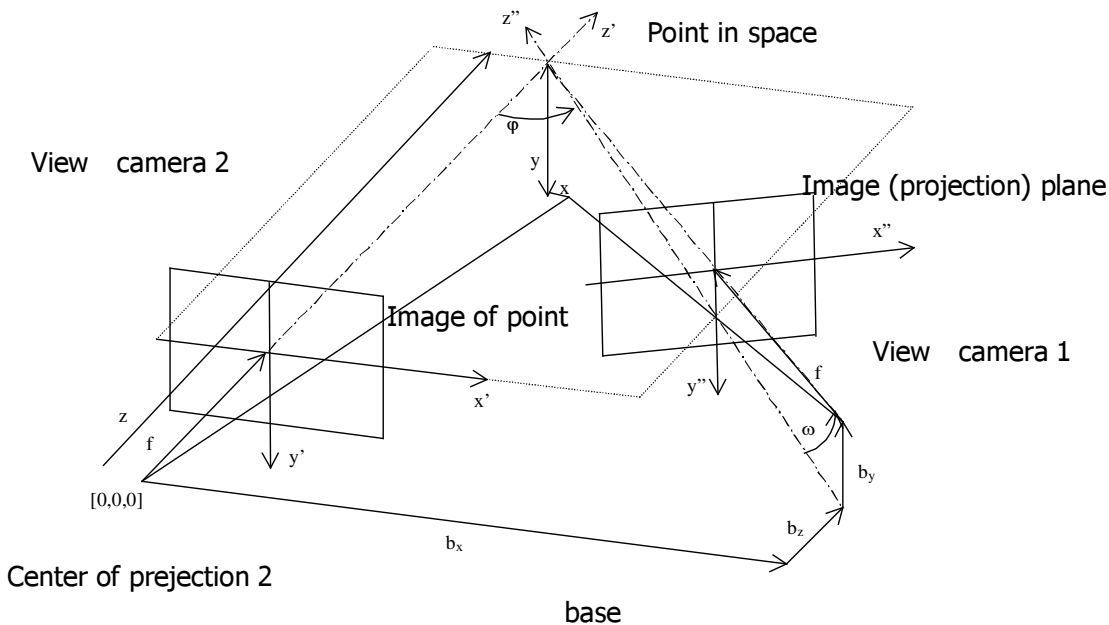
Typy měření

- s apriorní znalostí (velikost \leftrightarrow poloha)
- doba letu – velké vzdálenosti (radar, ultrazvukové detektory)
- triangulace
- tvar z jasu (stínu, odrazu)
- z hloubky ostrosti
- interferenční metody (zázněje) – citlivé metody, malý rozsah hloubky,



*interferenční obraz – od maxima k maximu je rozdíl jedné vlnové délky
(rozdíl jeden proužek mezi mřížkami referenční a měřicí)*

- volba typu měření se volí podle rozměrů objektů, scény a parametrů objektu (odrazivost, ...)



obecná sestava dvou pohledů pro 3D měření

Součásti měření

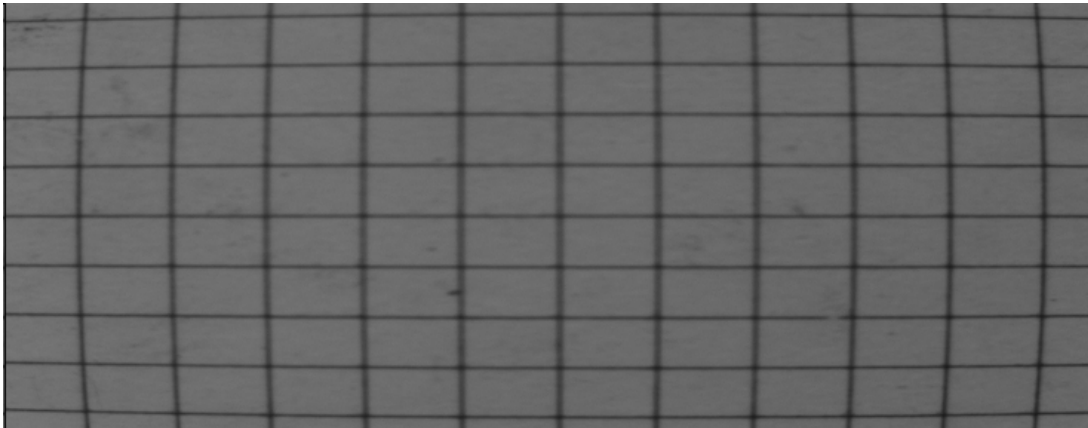
- scéna – snímaný prostor – spojený s reálnými souřadnicemi
- snímek – výsledný 2D průmět scény pořízení snímačem s optikou (2D jasové pole)
- pohled – udávající prostorové parametry pořízených snímků. Rezentováno transformací souřadnic
- kamera – určuje způsob zobrazení scény. Rezentováno vnitřní orientací (parametry zobrazení)
- objekty ve scéně (definované svými rozměry a jasovými vlastnostmi)
- více kamer, objektů či pohledů spojených pevnou transformací (stereo pár, složitější objekt...)
- pohyb (lze přidat ke všem součástem, včetně kombinací)

Vstupní data

- snímky – průměty 3D na 2D
- ultrazvuk – 2D řezy
- většinou centrální promítání (dírková kamera), někdy rovnoběžné promítání (telecentrické objektivy – větší hloubka ostroty, méně světla)
- model kamery
- vnitřní orientace – zobrazovací konstanta, střed promítání, zkreslení
- vnější orientace – poloha a směr pohledu

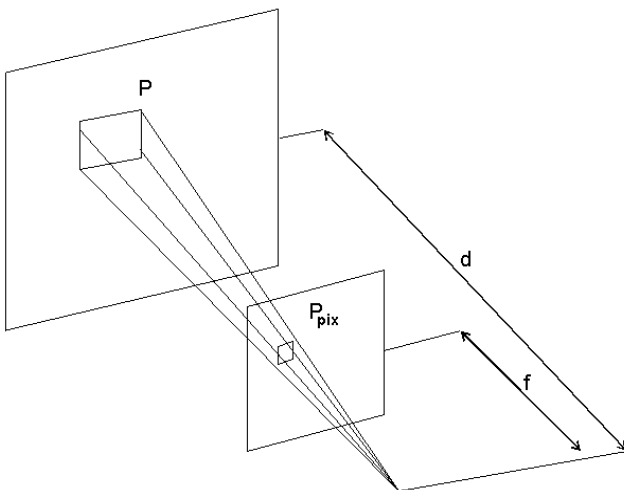
Problémy

- ztráta 1D informace při projekci
- velké množství dat, složité zpracování, vyhledávání odpovídajících si objektů
- nutnost najít objekty, problémy s objekty bez jasových přechodů
- vliv zkreslení



vliv zkreslení na zobrazení čtvercové sítě

- změna scény přemístěním světelných zdrojů (jiné odrazy, stíny, reflexy)
- nutnost stanovit parametry kamer (vnitřní orientaci) a vazby kamer
- pixelu odpovídá prostorový jehlan - co je v něm se zobrazí do pixelu



- rozlišovací schopnost – u horší optiky dochází k „rozmazání“ bodů a tedy jejich nepřesné lokalizaci pro výpočty
- přesnost určení polohy bodu ovlivňuje šum
- objekty nejsou na všech pohledech (skryté objekty)
- u jednodušších CMOS nejsou všechny body snímány ve stejném čase – zkosení obrazu, pro statické scény

Postup vyhodnocení

- snímání – pořízení vstupních dat (snímků)
- registrace – převod/spojování množin dat do společného systému koordinát. Vyhledání společných objektů na různých snímcích.
- rekonstrukce – vytvoření obrazu/modelu předlohy

Snímání

- snažíme se aby snímek měl velké množství snadno identifikovatelných a rozpoznatelných objektů
- snažíme se aby bylo co nejvíce objektů společných různým snímkům
- snímáme v různém čase, z různého místa, různými technikami -> vytvoření báze a tedy získání prostorové informace

Registrace

- “pevná” – například snímky místností, domů, krajiny – zjišťujeme polohy objektů – lineární transformace
- “nepevná” – například snímky lidských orgánů – hledáme posuny v obraze (např. hýbající se srdce, plíce, jeden člověk v různém čase, zjištění rozdílů daného jedince a “normálního” člověka) – warping, Elastic Image Registration

hledáme mapování (bodů, oblasí, objektů) mezizdrojem (referencí) a cílem.

kombinace metod:

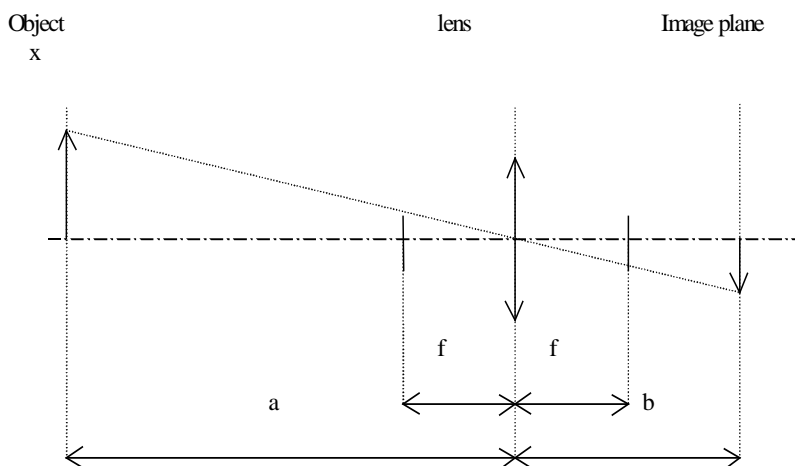
- výpomoc obsluhy – zadá základní množinu, nebo vše, řeší kolize
- korelace (obrazová nebo frekvenční doména)
- významné body
- hypotézy pro spojování bodů – hodnocení podobnosti objektů a kvality výsledku
- epipolární geometrie (predikce)

Rekonstrukce

- 3D model (plošný, drátový)
- 3D data (pouze poloha nebo vzdálenost)

Vnitřní orientace:

- parametry zobrazovacího systému (optická část snímání)
- konstanta kamery (místo ohniskové vzdálenosti),
- střed zobrazení (místo hlavní přímky, principal point),
- zkreslení (většinou zjednodušený model) – nejčastěji radiální zkreslení,
- někdy i vliv cesty signálu a grabberů (např. „posunutí jednotlivých řádků oproti sobě“).



$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{x}{h-f} = \frac{x'}{f}$$

zobrazovací rovnice dírkové kamery, základní zobrazovací model

Hloubka ostrosti

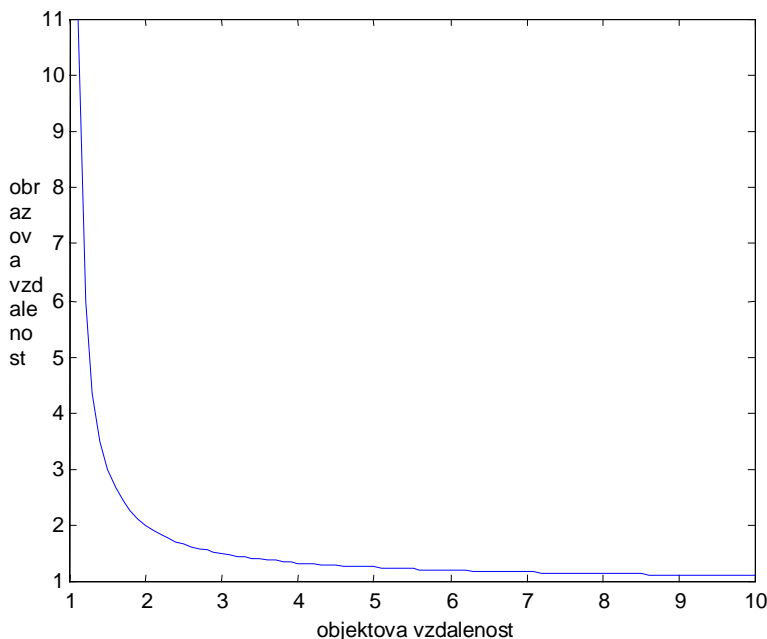
udává vzdálenost v objektovém prostoru o kterou můžeme objekt posunout, aniž by se „rozmazal“ (tj. aby se ideální bod zobrazil do více než jednoho zobrazovacího elementu)

pro kroužek průměru k je

$$s_1 - s_2 = 2 \frac{f}{d} k \frac{x}{f} \left(\frac{x}{f} + 1 \right), \quad s_\infty = \frac{f^2}{\frac{f}{d} k} .$$

D je průměr výstupní pupily (je dán průmětem nejužšího místa do výstupu, $\frac{f}{d}$ (světelnost objektivu) udává vliv clony na hloubku ostrosti.

- "rozmazání" objektu je úměrné vzdálenosti od zaostřené roviny (PSF).
- Pokud nemá objekt mnoho hran, pak se na něj promítá vzor, který je obsahuje.
- Problémem je že bližší hrana může udávat ostrost i povrchu, který je vidět za ní.
- Snímky lze získat také pomocí elektronových mikroskopů – malé vzdálenosti.
- Z grafu je vidět, že tato metoda je využitelná pro vzdálenosti objektů kolem ohniskové vzdálenosti



Závislost vzdálenosti obrazové roviny na vzdálenosti objektu

Depth of focus

- objekt (nebo kamera) se pohybují ve směru optické osy
- sleduje se, kdy jsou „nejzaostřenější“. „šířka“ neboli „ostrost“ hrany, která se zjistí na sérii posunutých snímků, má extrém při zaostření

Kalibrace kamery:

- zjištění hodnot vnitřní orientace kamery (pro zpřesnění výpočtů),

- lze provádět na testovacích vzorech nebo na reálných snímcích (opatrně, nutný větší počet bodů, nebo se vkládají kalibrační body uměle (policie – místo činu, průmyslové měření))
- Korekce zkreslení – $dx(x,y)$, $dy(x,y)$

$$[x, y] = c \left[\frac{X}{Z}, \frac{Y}{Z} \right] \quad \text{centrální promítání}$$

$$\frac{dr}{r} = \frac{dc}{c} \Rightarrow dc = ca_3 r^2 + ca_5 r^4 + \dots \quad \text{radiální zkreslení}$$

$$dx = \frac{X}{Z} ca_3 r^2 + \frac{X}{Z} ca_5 r^4 + \dots \quad \dots \quad \text{korekce radiálního zkreslení ve směru X}$$

korekce dalších složek zkreslení

$$dt = (J_1 r^2 + J_2 r^4 + \dots) \cos(\alpha - \alpha_0)$$

$$dx = [p_1 r^2 + 2 p_1 x^2 + 2 p_2 xy] [1 + P_3 r^3 + P_4 r^4 + \dots]$$

korekce natočení os a nestejného měřítka

$$dx = -\delta \sin \alpha (-x \cdot \sin \alpha + y \cdot \cos \alpha)$$

Vnější orientace

- parametry (např. transformace = tři rotace, tři posunutí, obecně až 16 parametrů) popisující polohu kamery v prostoru (vzájemný vztah souřadné soustavy kamery a „světových“ koordinátů)
- relativní orientace kamery
- absolutní transformace
- báze

kalibrace systémů

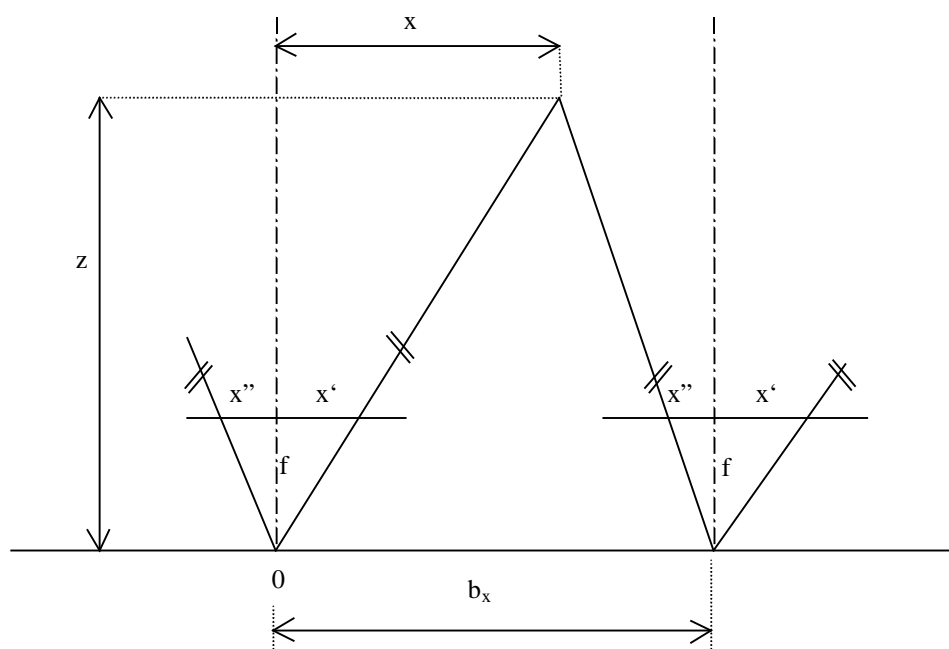
- zjištění vlastních a vzájemných parametrů prvků systému (kamery, světla, objekty).
- Lze provést laboratorně na testovacích vzorcích,
- následně použít ke kontrole změny parametrů – rozladění systému
- je možné též zjistit během výpočtů

Určení 3D z 2D snímku

- lze určit 3D informaci i z jedné projekce
- nutnost apriorní znalosti
- znalost velikosti → měření vzdálenosti
- znalost vzdálenosti → měření velikosti
- využití homogenních transformací – transformace 2D – 2D

Triangulace – 3D rekonstrukce

- zjištění 3D polohy na základě “protínání” paprsků
- lze i jeden pohled a znalost měřeného objektu
- více pohledů

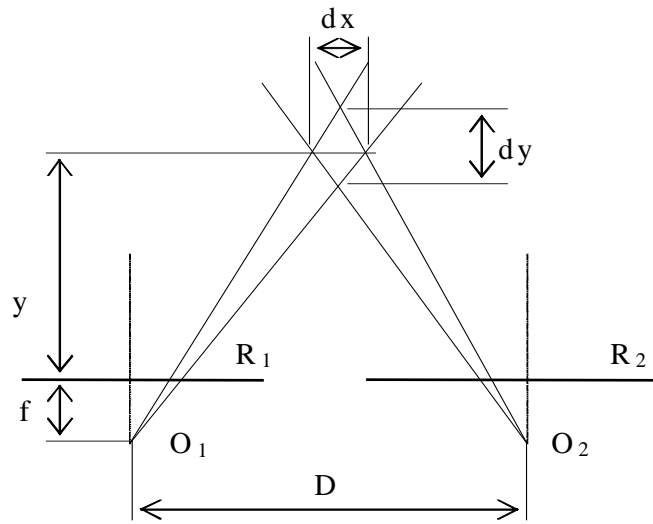


základní schéma pro měření 3D stereofotogrammetrie s rovnoběžnými optickými osami – paralaxa

$$p = x' - x''$$

paralaxa – úhlová změna pozice (způsobená pohybem)

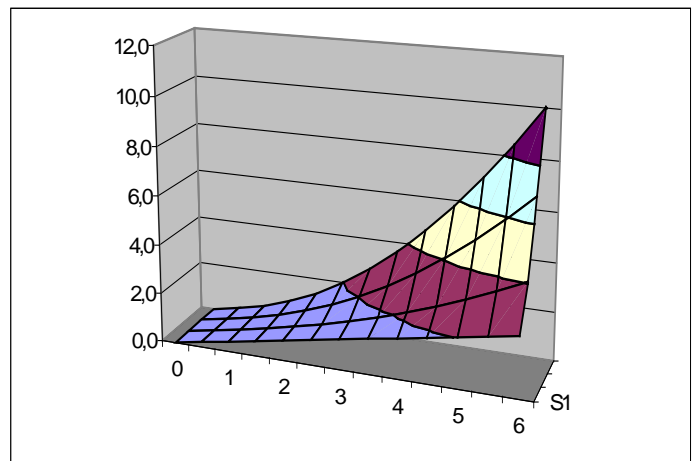
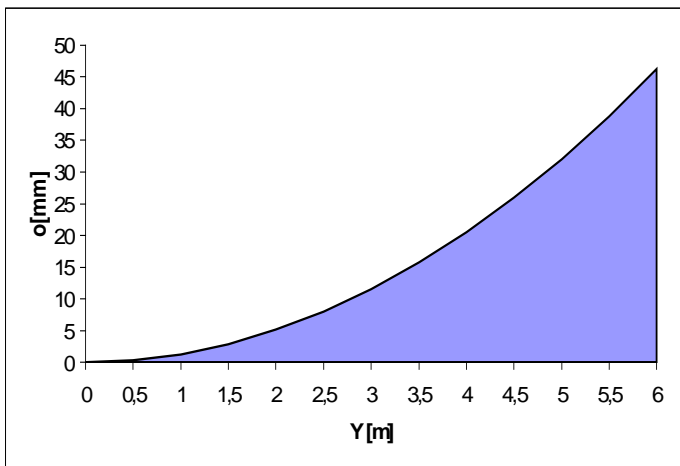
$$x = x' \frac{b_x}{p} \quad y = y' \frac{b_x}{p} \quad z = f \frac{b_x}{p} \quad \text{výpočet souřadnic}$$



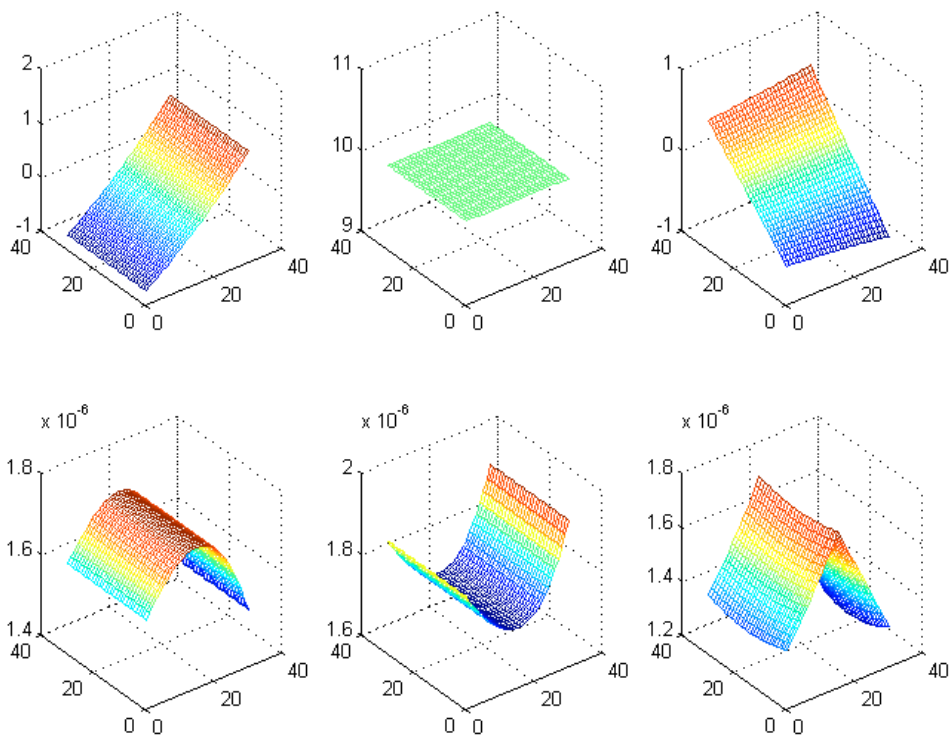
chyba diskretizace vzniklá u stereofotogrammetrického měření

$$\sigma_z = m \cdot \frac{Z}{D} \cdot \sigma_{xp} = \frac{Z^2}{f \cdot D} \cdot \sigma_{xp} \quad \sigma_x = \sqrt{\left(\frac{x_1}{f} \cdot m \cdot \frac{Z}{D} \cdot \sigma_{xp} \right)^2 + (b + \sigma_x)^2} \quad \sigma_p = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot P_{pix}$$

výpočet chyby měření

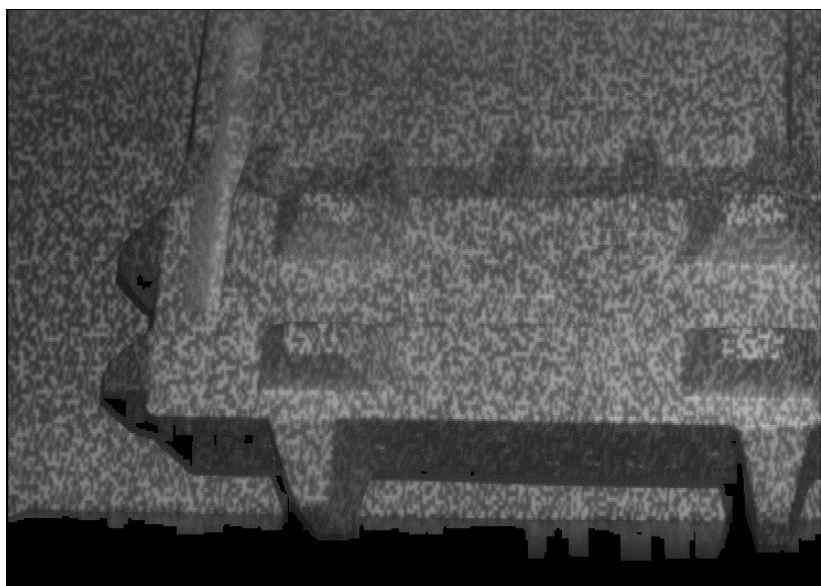


tvar chyby diskretizace v závislosti na vzdálenosti a poloze na detektoru

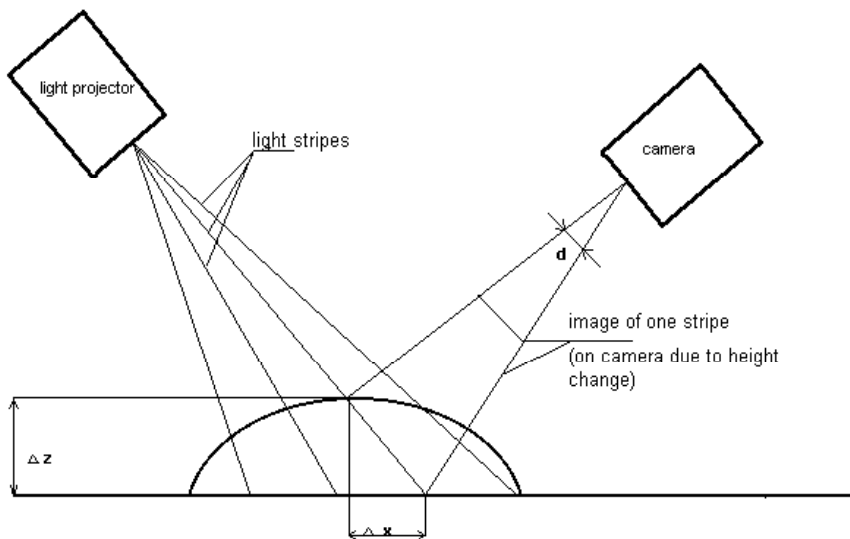


Dvě kamery, vzájemný úhel pohledu kamer 90°, dívají se do bodu na ose kamer. Horní řada udává polohu x , vzdálenost od kamery, y . Dolní řada udává příslušné chyby určení těchto hodnot.

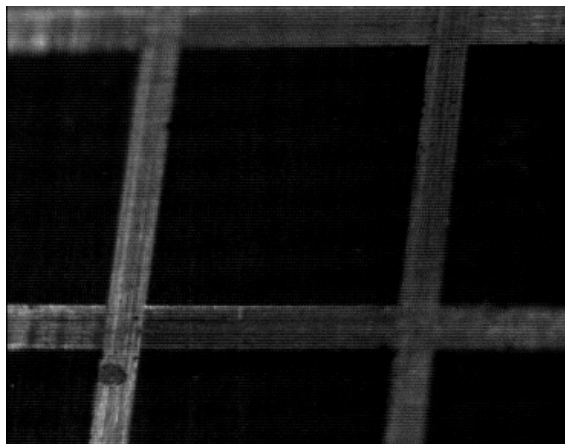
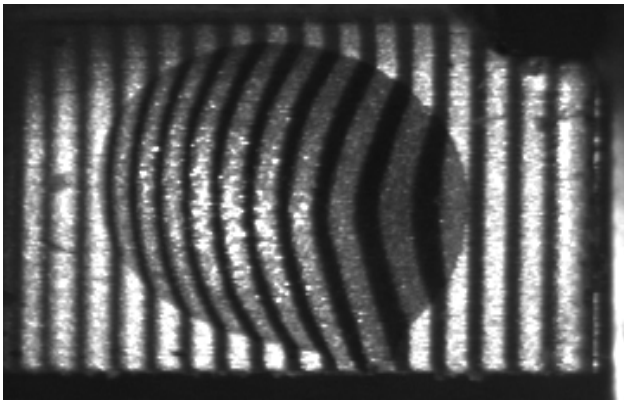
- pasivní osvětlení – zvýšení počtu detekovatelných bodů (velké množství ploch)



- aktivní osvětlení – světlo je součástí měření („inverzní“ paprsky), nejjednodušeji jedna kamera a jedno světlo



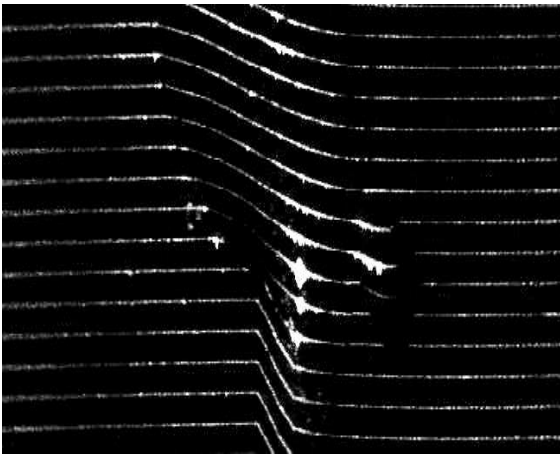
Ukázka změny polohy průmětu v závislosti na výšce. Patrný je i posun v rovině podstavy, závislý na výšce



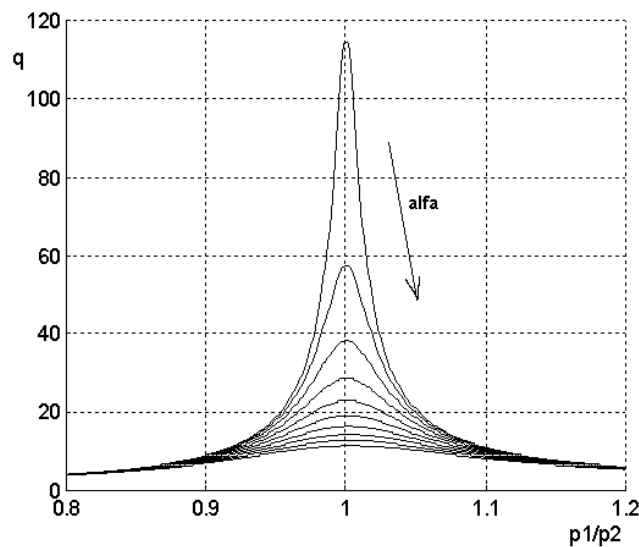
- více pohledů může být tvořeno i pohybem (pohyb měřeného objektu, nebo kamery – např. robotická ruka)
- 3D senzory – kombinace několika kamer a světel (laserů)

Typy osvětlení

- bod – jednoduché, zdlouhavé, nutná mechanická část
- čára – jednoduché, rychlé vyhodnocení, nutná mechanická část
- sada čar (kamera + laserový pruh + posun = detekce lidí, ráfků kol, profilů ...)



- modulované a pohyblivé čáry, vlny
- vzory (kódy, bílý šum)
- barevné vzory
- interference – lineární mřížky, křížové mřížky, kruhy
- interference – holografie, spekle



Rozteč kroku moiré čar (q) v závislosti na úhlu na točení vozru (α) a vzájemném poměru kroku mřížek (p_1/p_2)

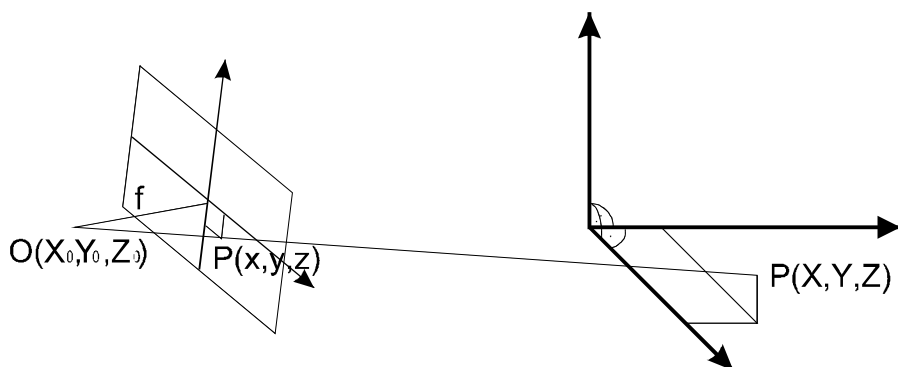
Metody pro výpočty triangulace

- koplanarita

báze a vektory spojující ohniska a průměty tvoří (ideálně) rovinu
kritériální funkce je

$$Q = \sum (b \cdot v_1) x \quad v_2$$

- pro dvojici pohledů stačí 5 bodů – nelineární problém. Obecně se pracuje s 8 body
- Bundle adjustment – nelineární systém rovnic pro zobrazení bodů prostoru centrálním promítáním na 2D, a řešení těchto rovnic vůči neznámým parametrům (hledané polohy, parametry systému vnitřní i vnější). Slouží k postupnému zlepšování vyhledání 3D parametrů (scéna, kamera, body...). Ztrátová funkce hodnotí předpoklad (promítnuté objekty) se skutečností (vlastní průměty). Minimalizací ztrátové funkce získáváme řešení



$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R * \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \right)$$

R je buď funkce tří úhlů, nebo lze použít všech koeficientů k minimalizaci výsledné složky minimalizované funkce

$$u = f \frac{r_{11}(X - X_u) + r_{12}(Y - Y_u) + r_{13}(Z - Z_u)}{r_{21}(X - X_u) + r_{22}(Y - Y_u) + r_{23}(Z - Z_u)} - u_0$$

$$v = f \frac{r_{31}(X - X_u) + r_{32}(Y - Y_u) + r_{33}(Z - Z_u)}{r_{21}(X - X_u) + r_{22}(Y - Y_u) + r_{23}(Z - Z_u)} - v_0$$

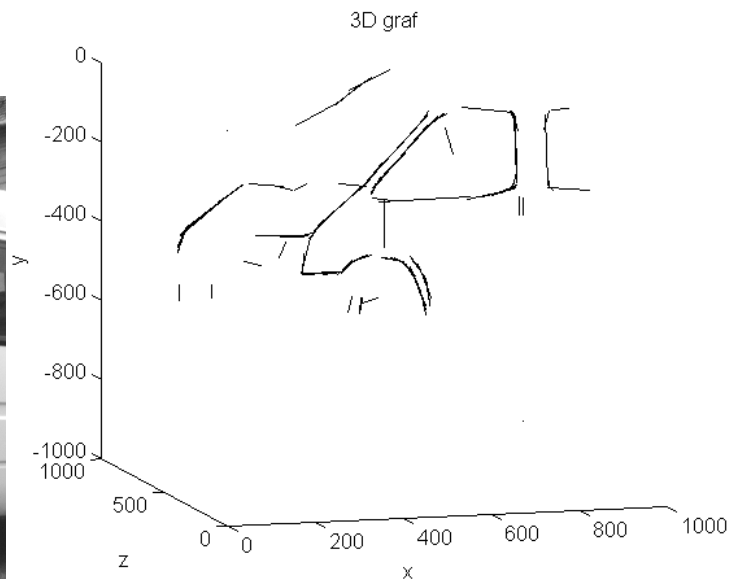
Po úpravě na implicitní rovnice, jsou tyto použity jako vazební funkce v minimalizačním procesu. Každý promítnutý bod tedy dává dvě vazební funkce.

Přesnost měření

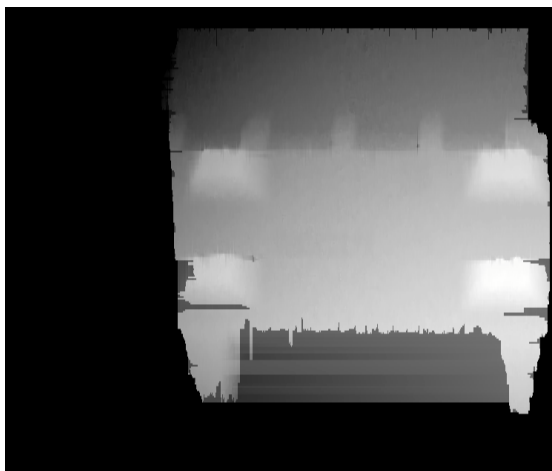
- vzájemné umístění kamer
- počet kamer
- rozmístění a typ měřených objektů

Reprezentace dat

- 3D souřadnice – vhodné pro měření
- drátový model (hranice, vrcholy, hrany)



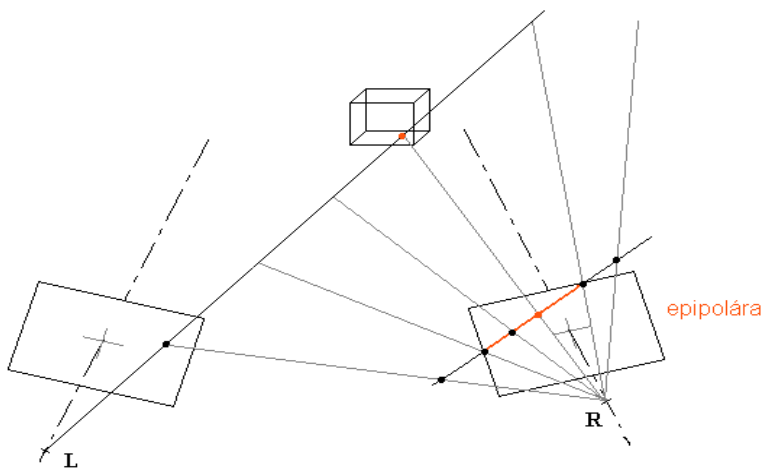
- hloubková (jasová) mapa – vyjádření hodnot „vzdálenosti“ pomocí jasů ve 2D poli $Z(x,y)$



- trojúhelníky (a jejich sítě)
- plošky
- voxely

Vyhodnocování dat

- registrace dvojic, problém korespondence – vyhledání, sesouhlasení,
- vyhledání „zajímavých“ objektů – jasové přechody (body, hrany), plochy s charakteristickými vlastnostmi
- spárování – sesouhlasení stejných objektů na různých pohledech
- epipolární linie – přímky, hyperboly ... - křivky na druhé kameře, na kterých se může objevit obraz sledovaného objektu.
- rektifikace – “narovnání” epipolárních linií tak aby snímky měly rovnoběžné normály -> rovnoběžné epipoláry. Tyto snímky jsou vhodné pro vyhodnocování člověkem.



- korelační koeficient – míra shody, vyhodnocení vhodných kandidátů korespondujících bodů
- lineární programování – vztahy mezi body, disparity (gradient) – (neuvažujeme-li „skoky“, pak je to spojitě a monotónní). Zakázaná oblast – je-li v popředí menší objekt – tyč, drát...geometrické vlastnosti snímaných objektů – plochy jsou hladké (disparity také) – snažíme se predikovat vlastnosti plochy – rovina, zakřivení ...
-

postup vyhodnocení

- získání dat - většinou více zdrojů, směrů ...
- kalibrace – zjištění (vzájemné) polohy zdrojů. Při měření nebo na kalibru (vhodný 3D objekt)
- detekce povrchů – zjištění společných bodů, ploch. Vyhledání bodů pro rekonstrukci povrchu. Rekonstrukce částí povrchu, které jsou možné (společně viditelné). Hrubě a jemně – mapa 3D.

- rekonstrukce povrchů – spojení jednotlivých částí (viditelných z párů zdrojů) do jednoho 3D celku – složení globální 3D mapy.
- tvorba modelu, vyhlazení – převod do „srozumitelných“ dat (např. polygony, voxely ...) a vyhlazení – odstranění hrubých vad a chyb na přechodech
- Generace sítě, prvotní vyhlazení (vyhlazení – jsou pokutovány ostré přechody, prokládání hladkými křivkami), optimalizace sítě (snížení počtu vrcholů sítě), spojení sítí z různých pohledů, vyhlazení, optimalizace globální sítě, geometrická optimalizace (např. vylepšení „smetených“ hran a vrcholů), topologická optimalizace (finální optimalizace).