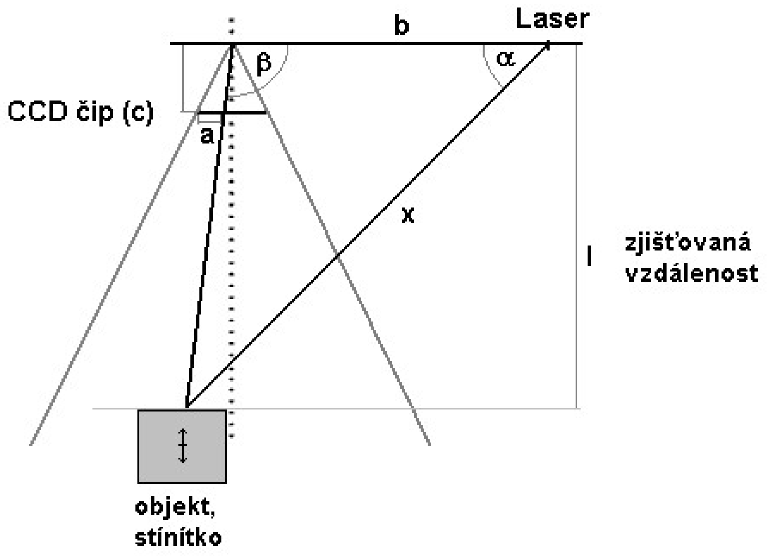
Aktivní triangulace

Cíl cvičení: Měření vzdálenosti pomocí 1D aktivní triangulační techniky

1 Teoretický úvod

Aktivní triangulační technika patří spolu s technikami pasivní triangulace, měřicími systémy s teodolity, fokusovacími technikami a technikami "podoba ze stínování" do tzv. triangulačních metod. „Aktivní“ zde znamená, že uvažujeme zdroj světla.

Princip aktivní triangulace spočívá ve fotogrammetrické rekonstrukci snímaného objektu nasvícením jeho povrchu světelným zdrojem a současným snímáním CCD snímačem. Zdroj světla spolu se snímačem a osvětleným bodem na zkoumaném objektu tvoří tzv. **triangulační trojúhelník** (**Obr. 1**). Spojnici světelný zdroj - snímač nazýváme **triangulační bází** (základnou).



Obr. 1: Jednorozměrná (1D) triangulační technika

Na straně zdroje je úhel svíraný s triangulační bází neměnný, kdežto na straně snímače je úhel určen proměnnou pozicí vysvíceného bodu CCD snímače. Z velikosti tohoto úhlu, na základě znalosti triangulační báze a parametrů kamery a objektivu (velikost čipu, ohnisková vzdálenost, …) lze určit "z" souřadnici objektu.

Jednorozměrná triangulační technika používá pro označení měřeného místa světelný paprsek (nejčastěji laser) a s výhodou se používá řádková (lineární) kamera. Vztah mezi pozicí vysvíceného bodu na snímku z kamery a vzdáleností lze určit výpočtem na základě schématu **Obr.** 1. Pokud se odražený laserový paprsek promítne do pixelu *k* z celkového počtu *pxl* pixelů, pak velikost odpovídající projekce na čipu "a" [mm] lze určit pomocí vztahu (3.1), kde *c* je velikost čipu [mm].

$$a = \frac{c \cdot k}{pxl} \qquad (1)$$

Projekci *a* lze využít pro výpočet úhlu β (*f* je ohnisková vzdálenost objektivu [mm]).

$$\beta = arctg\left(\frac{c/2 - a}{f}\right) + 90^\circ \qquad (2)$$

Kolmá vzdálenost *l* je pak určena na základě znalosti úhlů α, β a velikosti báze *b*:

$$l = \frac{b \cdot \sin\beta \cdot \sin\alpha}{\sin\left(180^\circ - (\alpha + \beta)\right)} \qquad (3)$$

Z předchozích vztahů a z obrázku vyplývá, že pokud je měřený objekt blíže ke kameře a zdroji osvětlení, bude úhel β menší a tedy projekce *a* větší. To v praxi znamená, že odražený laserový paprsek se promítne na čip do pixelu více vpravo (ve smyslu **Obr. 1**). Tímto způsobem může být určena vzdálenost objektu jen z pozice světlého bodu ve snímku z kamery.

Ze vztahů (1) až (3) lze odvodit, že přesnost měření (pixelové rozlišení, diskretizační chyba) bude tím lepší, čím větší bude velikost báze *b*, kamerové rozlišení *pxl* (počet světlo-citlivých prvků kamery) a ohnisková vzdálenost objektivu *f*. Naopak, čím větší bude velikost čipu *c* (resp. velikost světlo-citlivých prvků) a samozřejmě měřená vzdálenost *l*, tím horší výsledky získáme.

Vypočtená hodnota je však značně závislá na přesnosti změření všech potřebných údajů (především báze kamera - laser) a znalosti parametrů kamery (ohnisková vzdálenost, velikost čipu). Vztahy jsou také relativně výpočetně náročné. Proto se v praktických realizacích používá vztah určený kalibrací systému.

Pro určení vhodného kalibračního modelu lze vyjít z modelu perspektivní kamery [4]. U 1D triangulační techniky, kdy se jedná o zobrazení z $\Re^1$ (vzdálenost *l*) do $\Re^1$ (pozice pixelu v řádku kamery *k*), lze tento model výrazně zjednodušit:

$$\begin{bmatrix} hl \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 \\ t_3 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (4)$$

Matice **T** představuje hledanou transformaci. Prvek t_{22} je volitelné měřítko transformace, může tedy být nastaven jako $t_4 = 1$. Tento vztah můžeme zapsat také jako:

$$l = \frac{k \cdot t_1 + t_2}{k \cdot t_3 + 1} \qquad (5)$$

$$k \cdot t_1 + t_2 - l \cdot k \cdot t_3 = l \qquad (6)$$

Takovýto zápis umožňuje vyjádřit model maticově, ve formátu vhodném pro práci s celým souborem kalibračních dat o N bodech (jeden bod = dvojice souřadnic: pixelová pozice vysvíceného místa, odpovídající vzdálenost).

$$\mathbf{Bt} = \mathbf{L} \qquad (7)$$

Matice **B** je zde rozměru N x 3, ***L*** je sloupcový vektor N x 1 a ***t*** (rozměru 3 x 1) je sloupcový vektor neznámých koeficientů transformační matice **T**. Na každém řádku je tedy zapsán jeden kalibrační bod:

$$\begin{bmatrix} k_1 & 1 & -l_1 \cdot k_1 \\ k_2 & 1 & -l_2 \cdot k_2 \\ . & . & . \\ . & . & . \\ k_N & 1 & -l_N \cdot k_N \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ . \\ . \\ l_N \end{bmatrix} \qquad (8)$$

Nyní lze pro výpočet koeficientů t_{11}, t_{12} a t_{21} použít metodu nejmenších čtverců:

$$\mathbf{t} = \mathbf{B^+L} \qquad (9)$$

Kdy matice $\mathbf{B^+}$ je pseudo-inversní k **B** a je dána jako:

$$\mathbf{B^+} = [\mathbf{B^TB}]^{-1}\mathbf{B^T} \qquad (10)$$

Pro určení tří neznámých je zapotřebí nejméně tří vstupních kalibračních bodů, ale pro sestavení přesnějšího modelu je vhodné zařadit do souboru bodů více.

2 Seznam vybavení

1. hlavice: 4x bodový laser + řádková kamera Line 531 + objektiv Pentacon F1.8/50 mm
2. stativ Manfrotto s ruční kulovou hlavicí
3. dvoukanálový osciloskop Agilent 54622A
4. napájecí zdroj BK 0182
5. svinovací metr 5 m
6. testovací objekt

3 Návod

1. Zapněte PC, osciloskop a napájecí zdroj. Zkontrolujte nastavené napětí 12 V pro řídicí elektroniku laserů a kamery.
2. Nastavte osciloskop pro sledování řádku z kamery tak, aby byly vidět alespoň dva po sobě jdoucí synchronizační pulzy (záporné).
3. Určete řádkovou periodu kamery v μs.
4. Pro deset různých vzdáleností stativu od stěny určete z osciloskopu pozici všech čtyř laserů jako vzdálenost (na osciloskopu čas v μs) kladných pulzů od synchronizačního pulzu.
5. Spusťte Matlab a otevřete si stažený mfile soubor.
6. Změřené hodnoty zapište pod sebou do matice A ve formátu: změřená vzdálenost a odpovídající časy pro první až čtvrtý laser.
7. Spusťte m-file. Výsledkem jsou kalibrační transformační matice T1 až T4 pro každý laser (TT pro všechny) určené metodou nejmenších čtverců viz vztahy (4) až (10). Prostudujte postup výpočtu matic T v mfile.
8. Ve vykreslených grafech zkontrolujte souhlas zadaných a vypočtených vzdáleností. Chybu lze odhalit i kontrolou součtu kvadrátů odchylek.
9. Správnost hodnot t1, t2 a t3 ověřte na libovolné jiné vzdálenosti kamery od stěny výpočtem aktuální vzdálenosti a změřením skutečné vzdálenosti pomocí pásma. Vysvětlete rozdíl.
10. Určete rozměry přiloženého testovacího objektu.
11. Výsledky předveďte vyučujícímu. Vypněte zařízení a vše ukliďte do původního stavu.

Upozornění: Dodržujte bezpečnost při práci s laserovými diodami. Zabraňte zasažení oka přímými i odraženými laserovými paprsky od lesklých ploch – hodinky, prsteny!!!