

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MĚŘENÍ TVARU KLOUBNÍ DRÁHY SPODNÍ ČELISTI

Jan Čech

vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Smutný

2002

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem na uvedené diplomové práci pracoval samostatně s pomocí vedoucího práce a že jsem nepoužil jinou literaturu, než je uvedena v seznamu. Zároveň prohlašuji, že nemám námitek proti využití výsledků této práce katedrou.

V Praze, dne 20. 1. 2002

Jan Čech

Abstrakt

Při tvorbě zubních náhrad je třeba znát některé parametry dráhy kloubu spodní čelisti. Dosud se měří pomocí složité konstrukce upevněné na hlavu pacienta. Pohyb spodní čelisti je speciální mechanikou převáděn na pero případně elektromagnetický polohový snímač, který při otevírání úst zaznamenává kloubní dráhu. Takové vyšetření je složité, nepřesné a pro pacienta nepříjemné.

Předmětem diplomové práce je příspěvek k návrhu zařízení, které k měření kloubní dráhy využívá metod počítačového vidění. Naše řešení navrhuje elegantní metodu, která je jednodušší na přípravu vyšetření, přesnější a pro pacienta méně nepříjemná.

Pohyb kloubní hlavice je převáděn na pohyb trojrozměrného terčíku, pevně spojeného s dolní čelistí. Pohyb hlavy je převáděn na druhý terčík připevněný k horní čelisti. Kloubní dráha se určí z relativní pozice těchto terčíků, která se vypočítá z polohy jejich referenčních bodů a korespondujících bodů detekovaných v obraze jediné kamery.

Tato práce je součástí projektu Centra strojového vnímání (CMP) financovaného grantem NN 6333-3/2000.

Klíčová slova: čelist, kloubní dráha, počítačové vidění, kamera, terčík

Abstract

When creating dental replacements it is necessary to know certain parameters of the lower jaw joint trajectory. The trajectory is measured so far using a complicated device fixed on the patient's head. The jaw movement is transformed with the special mechanics to a pen or an electromagnetic position sensor, which records the jaw trajectory, when opening a mouth. Such an exploration is complicated, inaccurate and disagreeable for the patient.

The goal of this thesis is to contribute to design the device, which uses methods of computer vision for the joint trajectory measurement. Our solution proposes an elegant method, which is simpler for use, more accurate and more comfortable for the patient.

A motion of the joint heads is transformed to the motion of the three-dimensional target, fixed on the lower jaw. The head motion is transformed to the second target fixed on the upper jaw. Joint trajectory is computed from the relative position of these targets, which is computed from the position of the target's reference points and the corresponding points detected in the image from the one camera.

This work is a part of the project of the Center for Machine Perception (CMP) financed by the grant NN 6333-3/2000.

Key words: jaw, joint trajectory, computer vision, camera, target

Obsah

1 Úvod	9
2 Teoretický základ	13
2.1 Model perspektivní kamery	13
2.2 Radiální zkreslení	15
3 Měření polohy terčíku v prostoru	17
3.1 Výpočet pohybové matice A	17
3.2 Korespondující body	21
3.2.1 Detekce bodů v obraze	21
3.2.2 Zaměření polohy referenčních bodů terčíku a analýza přes- nosti	22
4 Měření trajektorie spodní čelisti	29
4.1 Konfigurace měření	29
4.2 Odhad polohy osy kloubu	32
4.2.1 Metoda proložení rovinou a kružnicí	34
4.2.2 Metoda invariantního prostoru zobrazení	36
4.3 Změření okluzní roviny	38
5 Experimenty	41
5.1 Simulace	41
5.2 Měření na otočně-posuvném stolku	44
5.2.1 Měření velikosti posunutí	44
5.2.2 Měření posunutí, úhlu natočení a sledování trajektorie . .	51
5.3 Měření trajektorie na artikulátoru	51
6 Implementace	57
7 Závěr	61
A Generování virtuálního obrazu terčíku	63
B Obsah CD	69

Kapitola 1

Úvod

Měření kloubní dráhy je součástí stomatologického vyšetření při tvorbě zubní náhrady.

Čelistní kloub je jeden z nejkomplicovanějších. Dolní čelist vykonává tři typy pohybů: otevření/zavření úst (deprese/elevace mandibuly), předsunutí/zasunutí čelisti (protrakce/retrakce mandibuly) a stranové posuny (tzv. mlecí pohyby), které jsou kombinací předešlých pohybů.

Při těchto pohybech levá i pravá kloubní hlavička sleduje trajektorii, která je v odborné literatuře popsána jako křivka tvaru „S“. Dráha je natolik plochá, že je často aproximována přímkou.

Důležitými parametry dráhy, které musí stomatolog u každého pacienta určit, jsou dva úhly: Odchylka přímkové aproximace dráhy a roviny horního zubního oblouku (tzv. okluzní roviny) a úhel mezi přímkovou aproximací dráhy a spojnicí kloubních hlavic.

Tyto úhly je možné nastavit na modelu čelistního kloubu, tzv. artikulátoru, viz obr. 1.1.

V současnosti existuje několik metod měření kloubní dráhy. Základní metoda spočívá v tom, že je pacientovi nasazena speciální konstrukce na hlavu a dolní čelist. Předepsané pohyby čelisti, které pacient vykonává, jsou potom složitou mechanikou přenášeny na pero zaznamenávající kloubní dráhu na papír.

Další metoda používá podobné mechanické konstrukce, ale kloubní dráhu zaznamenává místo pera a papíru polohovým elektromagnetickým snímačem.

Tyto metody mají řadu nevýhod. Vyšetření je z důvodů náročné přípravy měření, složitého upevňování časově náročné a pro pacienta nepříjemné. Díky složitým mechanikám a technice záznamu dráhy není příliš přesné, zejména první jmenovaná metoda.

Naše řešení využívá metod počítačového vidění. Základní myšlenkou je převod pohybu kloubních hlavic na pohyb terčíku spojeného s dolní čelistí. Poloha terčíku se vypočítá z jeho obrazu z kamery.

Abychom nebyli nuceni pacienta omezovat zafixováním jeho hlavy použijeme



Obrázek 1.1: Artikulátor

ještě jeden referenční terčík spojený s horní čelistí, pomocí kterého vypočítáme polohu pacientovy hlavy.

Mechanika zařízení je velmi jednoduchá. Dva terčíky se snadno a rychle připevní na dolní a horní zuby. Vyšetření je přesnější, časově nenáročné a pro pacienta méně nepříjemné.

Používáme jedinou kameru a trojrozměrné terčíky tvaru „rohu“ na, kterých je nalepen speciální vzor obsahující referenční body, které se detekují v obraze kamery. Poloha terčíku se vypočítá ze známé polohy jeho referenčních bodů a korespondujících bodů v obraze kamery. Tento algoritmus je podobný algoritmu kalibrace kamery, viz [1].

Problematikou trojrozměrného vidění se dále rovněž zabývají například publikace [8], [9] a [10].

V 2. kapitole této práce předkládáme nutný teoretický základ. Zde odvodíme model perspektivní kamery, který dále využíváme.

V 3. kapitole vysvětlíme obecný algoritmus měření terčíku v prostoru. Zmíníme se o detekci referenčních bodů v obraze a zaměření referenčních bodů terčíku v prostoru.

4. kapitola se zabývá přímo měřením trajektorie spodní čelisti člověka. Popíšeme konfiguraci měření, dále metodu odhadu polohy kloubních hlavic a odhadu orientace okluzní roviny.

Kapitola 5 popisuje provedené experimenty a prezentuje jejich výsledky od simulací až po měření kloubní dráhy na artikulátoru.

Kapitola 2

Teoretický základ

2.1 Model perspektivní kamery

Perspektivní kamera je zařízení, s jehož pomocí lze pozorovat trojrozměrný svět pomocí jeho dvojrozměrných průmětů, tedy obrazů.

Nyní odvodíme základní matematický model geometrie perspektivní kamery, a to model tzv. dírkové kamery (camera obscura). Tento model využívá zjednodušení, že obraz je promítán nekonečně malým otvorem.

Na obr. 2.1 je znázorněná situace: Bod pozorované scény X je promítán do bodu U obrazové roviny π . Dále jsou zakresleny: optická osa o , kolmá na obrazovou rovinu π , střed promítání O_c („focal point“) a hlavní bod (u_0, v_0) - průnik optické osy o a obrazové roviny π . Ohnisková vzdálenost f je vzdálenost hlavního bodu a středu promítání. Na obr. 2.1 jsou zavedeny potřebné souřadné systémy: Světový souřadný systém (x_w, y_w, z_w) , souřadný systém kamery (x_c, y_c, z_c) a souřadný systém obrazu (u, v, w) .

Vzájemná poloha světové souřadného systému a souřadné soustavy kamery je dána afinní transformací

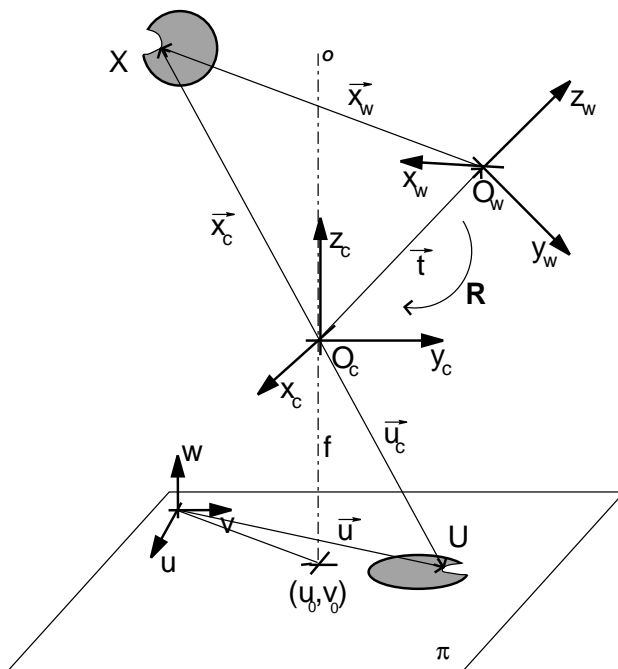
$$\mathbf{x}_c = \mathbf{R}(\mathbf{x}_w - \mathbf{t}), \quad (2.1)$$

kde \mathbf{R} je ortonormální matice rotace a \mathbf{t} je translační vektor.

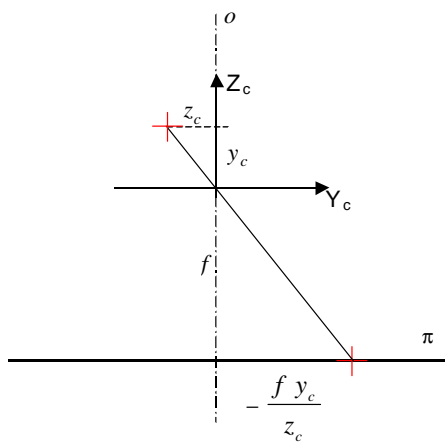
Nyní formálně popíšeme, jak se promítá bod scény do obrazové roviny, tedy popíšeme polohu průmětu U v souřadné soustavě kamery. Na obr. 2.2 je pro názornost zakreslena situace v rovině (y_c, z_c) . Na základě podobnosti trojúhelníků na obr. 2.2 lze určit hledanou y-ovou složku průmětu. Analogicky v rovině (x_c, z_c) x-ovou složku průmětu. Tedy:

$$\mathbf{u}_c = \left[-\frac{fx_c}{z_c}, -\frac{fy_c}{z_c}, -f \right]^T. \quad (2.2)$$

Dále vyjádříme polohu průmětu v souřadné soustavě obrazu (u, v, w) . Nutno poznamenat, že tato soustava nemá ortonormální bázi. Vektory báze nemají



Obrázek 2.1: Geometrie perspektivní kamery



Obrázek 2.2: Perspektivní promítání

jednotkovou velikost, navíc souřadné osy (u, v) , které leží v obrazové rovině π nejsou obecně pravouhlé. Proto

$$\tilde{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & -u_0 \\ 0 & c & -v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{fx_c}{z_c} \\ -\frac{fy_c}{z_c} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

kde symbol $\tilde{\mathbf{u}}$ znamená, že jde o homogenní souřadnice (viz např. [3]) skutečných bodů v obraze \mathbf{u} , tedy pro sloupcové a řádkové souřadnice platí

$$\mathbf{u} = \left[\frac{u}{v}, \frac{v}{w} \right]^T, \quad (2.4)$$

členy u_0, v_0 znamenají posun od hlavního bodu, členy a, c znamenají zvětšení jednotlivých os a člen b znamená již zmiňované zkosení os. Tato množina parametrů spolu s ohniskovou vzdáleností f tvoří soubor tzv. vnitřních kalibračních parametrů kamery, viz [1].

Úpravou 2.3 získáme rovnici

$$z_c \tilde{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} -fa & -fb & -u_0 \\ 0 & -fc & -v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix}, \quad (2.5)$$

kde skalár z_c nahradíme zcela obecným nenulovým skalárem α , který podle 2.4 nezmění hodnoty obrazových souřadnic u a v . Trojúhelníková matice v předchozí rovnici je tzv. matice kamery - \mathbf{K} :

$$\alpha \tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{K} \mathbf{x}_c. \quad (2.6)$$

Matice kamery \mathbf{K} zobrazuje body scény v souřadné soustavě kamery do homogenních souřadnic obrazu. Nás dále zajímá vztah mezi body scény ve světové světové souřadné soustavě a body obrazu. Dosadíme do předchozí rovnice z 2.1:

$$\alpha \tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{KR}(\mathbf{x}_w - \mathbf{t}) = [\mathbf{KR}] - \mathbf{KRt} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_w \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.7)$$

Tedy souhrně zapsáno:

$$\alpha \tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{M} \tilde{\mathbf{x}}_w, \quad (2.8)$$

kde matice \mathbf{M} , tzv. projekční matice, zobrazuje body scény v homogenních souřadnicích světového souřadného systému $\tilde{\mathbf{x}}_w$ do homogenních souřadnic obrazu. V takto zavedeném systému homogenních souřadnic je tento model lineární.

2.2 Radiální zkreslení

Lineární model odvozený v předchozí kapitole u skutečných kamer přesně neplatí. Neplatí totiž předpoklad nekonečně malé štěrby, kterou se scéna promítá. Skutečné objektivy trpí celou řadou vad a nezobrazují přesně podle dříve vysvětlené geometrie, čímž je výsledný obraz zkreslený.

Obecný princip, jak se s těmito vadami vyrovnat, je formulovat jejich matematický model, odhadnout jeho parametry a zkreslený obraz (případně jen jeho významné body) transformovat tak, aby se odchylka od lineárního modelu kompenzovala a bylo možné jej použít.

Jedna z častých vad objektivu je radiální zkreslení. Model předpokládá, že chyby (odchylky od lineárního modelu) jsou radiálně symetrické a závisí pouze na vzdálenosti od hlavního bodu.

Dále pracujeme s centrovanými souřadnicemi, tj. se souřadnicemi obrazu po odečtení souřadnic hlavního bodu:

$$\begin{aligned}\tilde{u} &= x - u_0 \\ \tilde{v} &= y - v_0\end{aligned}\quad (2.9)$$

kde x, y jsou měřené radiálně zkreslené (necentrováné) souřadnice v obrazu, u_0, v_0 souřadnice hlavního bodu a \tilde{u}, \tilde{v} jsou měřené radiálně zkreslené souřadnice obrazu.

Pro správné (kompenzované) souřadnice obrazu platí

$$\begin{aligned}u &= \tilde{u} + \delta u \\ v &= \tilde{v} + \delta v\end{aligned}\quad (2.10)$$

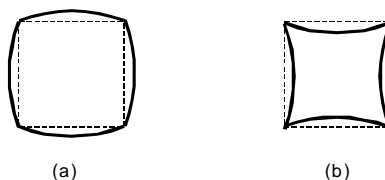
kde $\delta u, \delta v$ jsou korekce:

$$\begin{aligned}\delta u &= (\tilde{u} - u_p)(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6) \\ \delta v &= (\tilde{v} - v_p)(\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6)\end{aligned}\quad (2.11)$$

kde u_p, v_p je korekce polohy hlavního bodu vzhledem ke středu obrazu, κ_i jsou konstanty polynomu a r je radiální vzdálenost od středu obrazu:

$$r^2 = (\tilde{u} - u_p)^2 + (\tilde{v} - v_p)^2. \quad (2.12)$$

Uvažujeme-li pouze polynom druhého stupně v rovnici 2.11, tj. $\kappa_1 \neq 0, \kappa_i = 0, i > 1$, má zkreslený obraz tvar jako na obr. 2.3. Původní čtvercový obraz (čárkovaně), je radiálně zkreslen (a) soudkovitě ($\kappa_1 > 0$), resp. (b) poduškovitě ($\kappa_1 < 0$).



Obrázek 2.3: Základní typy radiálního zkreslení

Kapitola 3

Měření polohy terčičku v prostoru

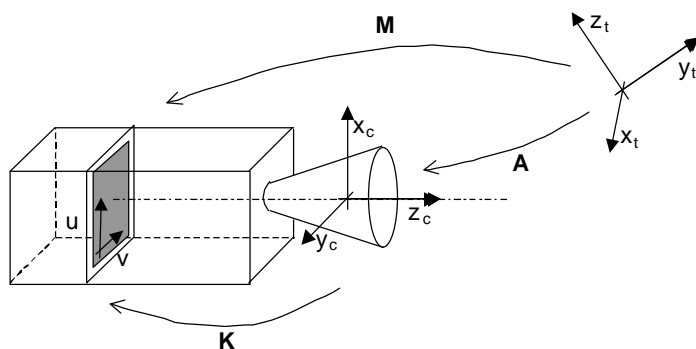
3.1 Výpočet pohybové matice A

Na obr. 3.1 je schématicky znázorněna situace při měření polohy a orientace terčičku v prostoru: souřadný systém terčičku (x_t, y_t, z_t) , souřadný systém kamery (x_c, y_c, z_c) , souřadný systém obrazu v kameře (u, v) a příslušné transformační matice K, M, A .

Nalézt polohu a orientaci terčičku znamená nalézt vzájemnou polohu a orientaci souřadných soustav kamery a terčičku, neboli určit transformační matici A tak, že

$$\tilde{x}_c = A\tilde{x}_t. \quad (3.1)$$

Připomeňme, že symbol \tilde{x} znamená, že jde o homogenní souřadnice. Trans-



Obrázek 3.1: Měření polohy a orientace terčičku v prostoru

formační matici \mathbf{A} , řekněme pohybová matice, neboť obsahuje pouze rotační a translační složku, viz 3.4. Takové zobrazení zachovává délky a vyjadřuje tedy pohyb terčíku v prostoru bez deformace.

Základem výpočtu je odhad homografie \mathbf{M} na základě polohy referenčních bodů terčíku (známé scény) a polohy korespondujících bodů v obraze:

$$\alpha \tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{M} \tilde{\mathbf{x}}_t \quad (3.2)$$

O přesném zaměření referenčních bodů terčíku a detekci korespondujících bodů v obraze pojednává kapitola 3.2.

Projekční matice \mathbf{M} se skládá z bloků, dle rovnice (2.7):

$$\alpha \tilde{\mathbf{u}} = [\mathbf{KR} \quad | \quad -\mathbf{KRt}] \tilde{\mathbf{x}}_t \quad (3.3)$$

K sestavení hledané pohybové matice \mathbf{A} , tvaru

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & -\mathbf{Rt} \\ 000 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.4)$$

je třeba extrahovat \mathbf{R}, \mathbf{t} a \mathbf{K} z (3.3). K tomu využijeme vlastnosti, že bloky matice \mathbf{M} obsahují součin horní trojúhelníkové a ortonormální matice.

Nejprve se zabýváme odhadem projekční matice \mathbf{M} . Rovnici (3.2) rozepišme po prvcích:

$$\alpha \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Pro skutečné měření (euklidovské) souřadnice v obraze platí, že

$$\begin{aligned} u' &= \frac{u}{w} = \frac{m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}}, \\ v' &= \frac{v}{w} = \frac{m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24}}{m_{31}x + m_{32}y + m_{33}z + m_{34}}. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Vynásobením jmenovateli zlomků obdržíme, rovnice

$$\begin{aligned} m_{11}x + m_{12}y + m_{13}z + m_{14} &= m_{31}xu' + m_{32}yu' + m_{33}zu' + m_{34}u', \\ m_{21}x + m_{22}y + m_{23}z + m_{24} &= m_{31}xv' + m_{32}yv' + m_{33}zv' + m_{34}v', \end{aligned} \quad (3.7)$$

které mají platit pro všechny korespondující body terčíku a obrazu. Maticově zapsáno:

$$\begin{bmatrix}
x_1 & y_1 & z_1 & 1 & | & 0 & 0 & 0 & 0 & | & -x_1 u'_1 & -y_1 u'_1 & -z_1 u'_1 & -u'_1 \\
\vdots & & & & | & \vdots & & & & | & \vdots & & & \\
x_n & y_n & z_n & 1 & | & 0 & 0 & 0 & 0 & | & -x_n u'_n & -y_n u'_n & -z_n u'_n & -u'_n \\
\hline
0 & 0 & 0 & 0 & | & x_1 & y_1 & z_1 & 1 & | & -x_1 v'_1 & -y_1 v'_1 & -z_1 v'_1 & -v'_1 \\
\vdots & & & & | & \vdots & & & & | & \vdots & & & \\
0 & 0 & 0 & 0 & | & x_n & y_n & z_n & 1 & | & -x_n v'_n & -y_n v'_n & -z_n v'_n & -v'_n
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
m_{11} \\
m_{12} \\
m_{13} \\
m_{14} \\
\hline
m_{21} \\
m_{22} \\
m_{23} \\
m_{24} \\
\hline
m_{31} \\
m_{32} \\
m_{33} \\
m_{34}
\end{bmatrix}
= \mathbf{0}, \tag{3.8}$$

kde n znamená počet korespondujících bodů. Hledáme netriviální řešení, které nejlépe tuto rovnici splňuje ve smyslu nejmenších čtverců, použitím singulárního rozkladu matice (SVD), viz [4].

Minimální počet nezávislých¹ korespondujících bodů je $n = 6$. To vyplývá z podmínek řešitelnosti soustavy (3.8). Použitý terčík obsahuje neminimální počet $n = 63$ referenčních bodů za účelem zpřesnění odhadu projekční matice \mathbf{M} .

Dále vyřešíme, jak z \mathbf{M} extrahovat „pohybové“ složky \mathbf{R}, \mathbf{t} případně matici kamery \mathbf{K} .

Jak jsme již naznačili, matice \mathbf{M} se skládá z bloků dle (3.3), přičemž její první blok 3×3 , označme jej $\mathbf{C} = \mathbf{KR}$, je součin horní trojúhelníkové \mathbf{K} , viz (2.5), a ortonormální matice \mathbf{R} . Druhý blok, označme jej $\mathbf{d} = -\mathbf{KRt}$, tvoří vektor 3×1 a tedy:

$$\alpha \tilde{\mathbf{u}} = [\mathbf{C} \mid \mathbf{d}] \tilde{\mathbf{x}}_t \tag{3.9}$$

Nyní popíšeme algoritmus, jehož vstupem je obecná čtvercová matice \mathbf{A} velikosti 3×3 plné hodnosti a výstupem jsou horní trojúhelníková \mathbf{R} a ortonormální matice \mathbf{Q} tak, že:

$$\mathbf{A} = \mathbf{RQ}. \tag{3.10}$$

Rozepíšme předchozí rovnici:

$$\begin{bmatrix}
\bar{\mathbf{a}}_1 \\
\bar{\mathbf{a}}_2 \\
\bar{\mathbf{a}}_3
\end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
r_{11} & r_{12} & r_{13} \\
0 & r_{22} & r_{23} \\
0 & 0 & r_{33}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
\bar{\mathbf{q}}_1 \\
\bar{\mathbf{q}}_2 \\
\bar{\mathbf{q}}_3
\end{bmatrix}, \tag{3.11}$$

kde $\bar{\mathbf{a}}_i$ jsou řádky matice \mathbf{A} , $\bar{\mathbf{q}}_i$ jsou ortonormální matice \mathbf{Q} .

Následující algoritmus RQ rozkladu², tedy výpočtu matic dle předchozí rovnice je založen na Gramově-Schmidtově ortonormalizačním procesu, viz [4].

¹Přesné podmínky nezávislosti referenčních bodů jsou uvedeny v [1]. Jedna ze zřejmých podmínek je, že referenční body nesmí ležet v jedné rovině.

²Jde o obdobu standardního algoritmu QR rozkladu, viz [4], který rozkládá čtvercovou matici naopak na součin ortonormální a horní trojúhelníkové matice: $\mathbf{A} = \mathbf{QR}$.

Základní myšlenka spočívá ve vyjádření vektorů $(\bar{\mathbf{a}}_1, \bar{\mathbf{a}}_2, \bar{\mathbf{a}}_3)$ v ortonormální bázi $(\bar{\mathbf{q}}_1, \bar{\mathbf{q}}_2, \bar{\mathbf{q}}_3)$, členy r_{ij} jsou jejich souřadnice v této bázi. Dále jsou použity symboly $\tilde{\mathbf{q}}_i$, což jsou vektory stejného směru jako $\bar{\mathbf{q}}_i$ ale jejich velikost není obecně jednotková. Tedy:

$$\begin{aligned}
 & \tilde{\mathbf{q}}_3 = \bar{\mathbf{a}}_3 \\
 \text{I. } & r_{33} = |\tilde{\mathbf{q}}_3| \\
 & \bar{\mathbf{q}}_3 = \frac{\tilde{\mathbf{q}}_3}{r_{33}} \\
 & \tilde{\mathbf{q}}_2 = \bar{\mathbf{a}}_2 - r_{23}\bar{\mathbf{q}}_3 \quad | \cdot \bar{\mathbf{q}}_3^T \\
 & 0 = \bar{\mathbf{a}}_2 \bar{\mathbf{q}}_3^T - r_{23} \cdot 1 \\
 \text{II. } & r_{23} = \bar{\mathbf{a}}_2 \bar{\mathbf{q}}_3^T \\
 & r_{22} = |\tilde{\mathbf{q}}_2| \\
 & |\bar{\mathbf{q}}_2| = \frac{|\tilde{\mathbf{q}}_2|}{r_{22}} \\
 & \tilde{\mathbf{q}}_1 = \bar{\mathbf{a}}_1 - r_{12}\bar{\mathbf{q}}_2 - r_{13}\bar{\mathbf{q}}_3 \quad | \cdot \bar{\mathbf{q}}_2^T \quad | \cdot \bar{\mathbf{q}}_3^T \\
 & r_{12} = \bar{\mathbf{a}}_1 \bar{\mathbf{q}}_2^T \\
 \text{III. } & r_{13} = \bar{\mathbf{a}}_1 \bar{\mathbf{q}}_3^T \\
 & r_{11} = |\tilde{\mathbf{q}}_1| \\
 & \bar{\mathbf{q}}_1 = \frac{\tilde{\mathbf{q}}_1}{r_{11}}
 \end{aligned}$$

Ortonormalizační proces začíná v kroku I. ztotožněním vektorů $\tilde{\mathbf{q}}_3$ a $\bar{\mathbf{a}}_3$. $\bar{\mathbf{q}}_3$ se normuje, tj. je vydělen vlastní velikostí, čímž získáváme první vektor $\bar{\mathbf{q}}_3$ hledané ortonormální báze. V dalších krocích postupně přidáváme zbylé bázevé vektory tak, aby všechny tyto vektory byly vzájemně kolmé, měli jednotkovou velikost a zároveň platila rovnice (3.11).

K pochopení výše uvedeného algoritmu je třeba si uvědomit, že skalární součin dvou kolmých vektorů je nulový, tj. $\tilde{\mathbf{q}}_i \tilde{\mathbf{q}}_j^T = \bar{\mathbf{q}}_i \bar{\mathbf{q}}_j^T = 0$, pro $i \neq j$ a skalární součin týchž vektorů je roven jejich velikosti, tj. $\tilde{\mathbf{q}}_i \tilde{\mathbf{q}}_i^T = |\tilde{\mathbf{q}}_i|$, $\bar{\mathbf{q}}_i \bar{\mathbf{q}}_i^T = |\bar{\mathbf{q}}_i| = 1$.

Nyní použijme tento algoritmus k rozkladu matice \mathbf{C} , viz (3.9):

$$\mathbf{C} = \hat{\mathbf{K}}\hat{\mathbf{R}}. \quad (3.12)$$

Výsledné $\hat{\mathbf{K}}$ má dle použitého algoritmu vždy kladné diagonální prvky, což ovšem není v souladu s fyzikálním významem \mathbf{K} . Proto přepíšme předchozí rovnici do tvaru

$$\mathbf{C} = \beta \hat{\mathbf{K}} \mathbf{F} \mathbf{F}^T \hat{\mathbf{R}} = \mathbf{K} \mathbf{R}, \quad (3.13)$$

kde β je nenulový skalár, \mathbf{F} je diagonální matice jejíž prvky jsou ± 1 . \mathbf{F} je ortonormální matice dále platí: $\mathbf{F} \mathbf{F}^{-1} = \mathbf{F} \mathbf{F}^T = \mathbf{F} \mathbf{F} = \mathbf{E}$. V našem případě má \mathbf{F} tvar

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

což je důsledkem opačného směru řádkové souřadnice obrazu. Potom je

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}^T \hat{\mathbf{R}}, \quad (3.15)$$

$$\mathbf{K} = \beta \hat{\mathbf{K}} \mathbf{F}. \quad (3.16)$$

Hodnotu skaláru β volíme tak, aby prvek $k_{33} = 1$. Tedy $\beta = 1/\hat{k}_{33}$.

Dále je možné, známe-li matici kamery \mathbf{K} (např. z kalibrace kamery, viz [1]), extrahovat „pohybové“ složky \mathbf{R}, \mathbf{t} z projekční matice \mathbf{M} přímo bez použití RQ rozkladu následujícím způsobem.

Známou matici kamery označíme \mathbf{K}_k . Z rovnice (3.13) vyplývá:

$$\beta \mathbf{R} = \hat{\mathbf{R}} = \mathbf{K}_k^{-1} \mathbf{C}. \quad (3.17)$$

Matici $\hat{\mathbf{R}}$ je třeba normalizovat

$$\mathbf{R} = \frac{1}{\beta} \hat{\mathbf{R}}, \quad (3.18)$$

abychom získali ortonormální matici rotace \mathbf{R} . Hodnotu skaláru β určíme jako

$$\beta = \sqrt[3]{\det \hat{\mathbf{R}}}, \quad (3.19)$$

neboť $\det \mathbf{R} = 1$, což je vlastnost každé ortonormální matice a navíc obecně platí, že $\det \gamma \mathbf{A} = \gamma^n \det \mathbf{A}$, kde γ je libovolné reálné číslo, \mathbf{A} je libovolná čtvercová matice a n je rozměr matice. V našem případě $n = 3$.

Oba uvedené způsoby výpočtu pohybové matice \mathbf{A} jsou v případě ideálních přesných dat zcela ekvivalentní. Ovšem v reálném případě, kdy nejsou referenční body terčíku přesně změřeny a detekce korespondujících bodů v obraze není zcela přesná, se výsledek obou metod nepatrně liší. Jak potvrzují experimenty, viz kapitola 5, výsledek je lepší při použití známé kalibrační matice kamery \mathbf{K}_k oproti výpočtu RQ rozkladem.

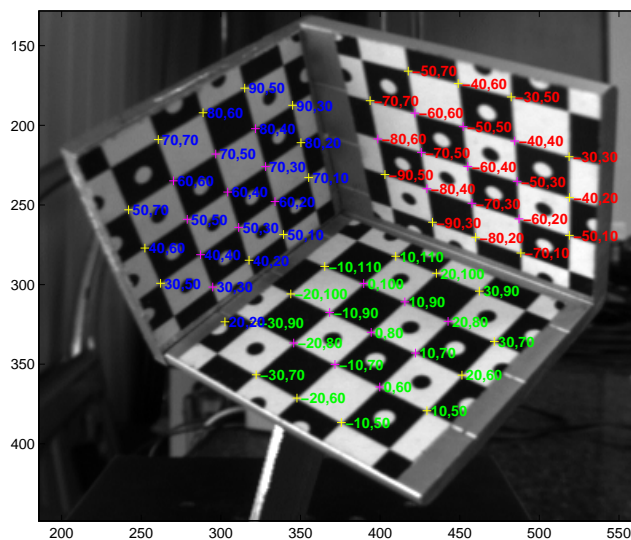
3.2 Korespondující body

Jádrem celého měření kamerou je co nejpřesnější znalost 3D polohy referenčních bodů terčíku a spolehlivá a přesná detekce bodů v obraze kamery. Následující kapitola se touto problematikou zabývá.

3.2.1 Detekce bodů v obraze

Na terčíku, viz obr. 3.2, je nalepen kalibrační vzor tvaru šachovnice, v jejích rozích jsou umístěny referenční body. Každý z referenčních bodů musí být v obraze jednoznačně identifikován.

K lokalizaci a jednoznačné identifikaci těchto bodů byl použit detektor CT-Detect, vytvořený v CMP, viz [5], [6]. Jde o program, jehož vstupem je obraz kamery s kalibračním vzorem a výstupem poloha každého detekovaného bodu spolu s jeho jednoznačným identifikačním kódem případně ještě dalšími doplňkovými informacemi, jako jsou například relace mezi jednotlivými body (struktura sousedů).



Obrázek 3.2: Terčík z pohledu kamery s detekovanými referenčními body

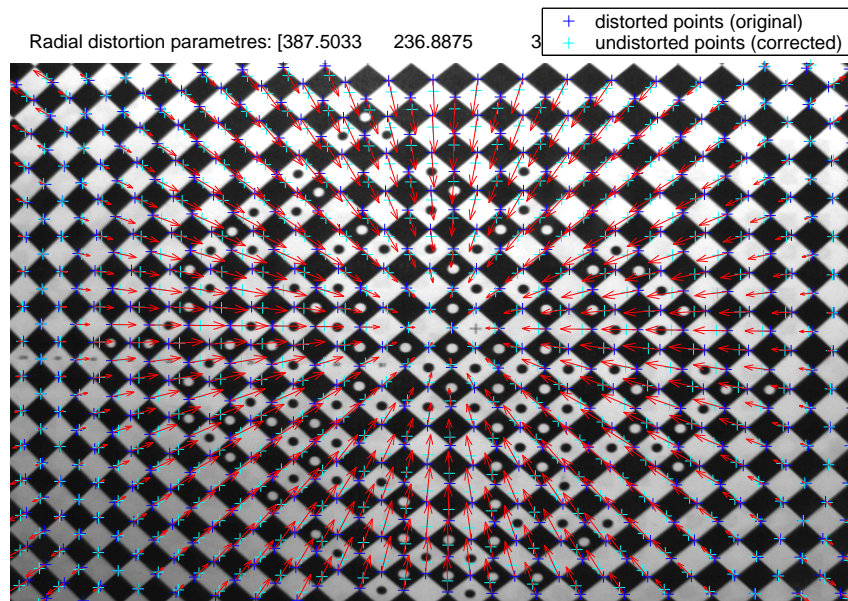
CTDetect byl navržen tak, že výsledný kód detekovaného bodu se skládá z dvourozměrných souřadnic polohy bodu v kalibračním vzoru (x, y) . K našemu účelu je takováto identifikace nedostatečná, neboť u dvou terčíků, jejichž roviny jsou vystřiženy z kalibračního vzoru se některé body opakují. Proto byla vytvořena nadstavba, která analyzuje strukturu sousedů a rozpozná rovinu, ve které detekovaný bod leží. Výsledný identifikační kód je potom rozšířen o číslo roviny, tedy (x, y, C) , viz obr. 3.2 (kód roviny je označen barevně).

Dále je nutné korigovat radiální zkreslení objektivu. K tomuto účelu byl použit software CMP, viz [7], který odhaduje parametry radiálního zkreslení podle bodů ležících ve scéně na jedné přímce, případně na jedné rovině a korespondujících bodů v obraze a umožňuje korekci detekovaných bodů. Na obr. 3.3 je obraz rovinného kalibračního obrazce sejmутý kamerou s objektivem 6.5 mm a je zde vyznačeno radiální zkreslení, které dosahuje až 25 pixelů.

Po detekci bodů pomocí CTDetect se tímto softwarem koriguje poloha u, v všech detekovaných bodů v obraze a nadále se ve všech výpočtech pracuje s polohou korigovanou.

3.2.2 Zaměření polohy referenčních bodů terčíku a analýza přesnosti

Přesnost nalepení kalibračního vzoru do pláště tvaru rohu je samozřejmě omezená. Jednotlivé roviny kalibračního obrazce jsou vůči sobě složitě otočeny a posunuty a není možné klasickými metodami (ručním odměřením) s dostatečnou přesností změřit trojrozměrné souřadnice referenčních bodů. Jak ovšem



Obrázek 3.3: Radiální zkreslení objektivu

ukazují simulace, viz kapitola 5.1, přesnost zaměření referenčních bodů hraje významnou roli v celkové přesnosti zařízení.

Proto jsme k zaměření použili fotogrammetrické stereo, viz [1]. Princip metody spočívá v tom, že dvěma kalibrovanými kamerami je pozorována scéna a podle korespondujících bodů v každém z obrazů kamer se vypočítá prostorová trojrozměrná souřadnice těchto bodů ve scéně.

Vlastní výpočet byl proveden algoritmy CMP, viz [5], [6]. Jejich vstupem byl seznam korespondujících bodů obrazu levé a pravé kamery (referenční body terčíku získané pomocí CTDetect na oba obrazy) a kalibrační obrazce každé kamery. Výstupem byl seznam korespondujících bodů v prostoru.

Nyní analyzujeme přesnost zaměření polohy referenčních bodů. Analýza se opírá o to, že body by měly ležet v prostoru na třech rovinách a na nich by měly být rozmístěny v pravidelném rastru podle kalibračního obrazce.

Nalezneme ideální polohu referenčních bodů tak, že naměřené body aproximujeme pravidelným rovinným rastrem. Proces odhadu chyby potom probíhá pro každou ze tří rovin bodů podle následující osnovy:

1. Naměřenými body proložit rovinu a naměřené body promítnout do této roviny.
2. Tuto rovinu „sklopit“ tak, aby byla rovnoběžná s rovinou xy .

3. Otočit a posunout body v rovině tak, aby došlo k optimálnímu překrytí (ve smyslu nejmenších čtverců) s pravidelným rastrem.
4. Vypočítat chyby zaměření jako rozdíl souřadnic skutečně naměřených a ideálních bodů.

Popišme si formálně jednotlivé body osnovy:

ad 1.

Naměřenými body proložíme rovinu

$$\rho : ax + by + cz + d = 0, \quad (3.20)$$

neboli

$$\rho : z = -\frac{a}{c}x - \frac{b}{c}y - \frac{d}{c} = px + qy + r. \quad (3.21)$$

Rovina je jednoznačně určena třemi body, tj. třemi parametry, proto zvolme

$$\begin{aligned} c &= 1, \\ a &= -p, \\ b &= -q, \\ d &= -r. \end{aligned} \quad (3.22)$$

Pro všechny body dané roviny má platit:

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ \vdots & & \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}, \quad (3.23)$$

kde n je počet bodů, v našem případě $n = 21$.

Maticově zapsáno spolu s řešením ve smyslu nejmenších čtverců:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\mathbf{p} &= \mathbf{b}, \\ [p, q, r]^T &= \mathbf{p} = \mathbf{M}^+ \mathbf{b}. \end{aligned} \quad (3.24)$$

Podle (3.22) získáme hledané koeficienty a, b, c, d roviny ρ . Normálový vektor ρ je

$$\mathbf{n} = [a, b, c]^T. \quad (3.25)$$

Průmět naměřených bodů do roviny ρ vypočítáme jako průnik roviny ρ a přímky l se směrovým vektorem normály roviny \mathbf{n} , která prochází naměřenými body:

$$l : \mathbf{x}_\rho = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + t \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}. \quad (3.26)$$

Dosazením do rovnice (3.20) vypočítáme parametr t přímky l :

$$\begin{aligned} a(x + ta) + b(y + tb) + c(z + tc) + d &= 0, \\ ax + a^2t + by + b^2t + cz + c^2t + d &= 0, \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$t = -\frac{ax + by + cz - d}{a^2 + b^2 + c^2}, \quad (3.28)$$

který dosadíme zpět do (3.26), čímž získáme hledaný průmět \mathbf{x}_ρ .

ad 2.

Body \mathbf{x}_ρ promítnuté do roviny ρ transformujeme tak, aby rovina ρ' , ve které leží po transformaci, byla rovnoběžná s rovinou xy , tedy její normálový vektor $\mathbf{n}_{\rho'} = [0, 0, 1]^T$.

Najdeme příslušnou rotační matici, která se skládá z otočení kolem osy x - \mathbf{R}_x následovaná otočným kolem osy y - \mathbf{R}_y . Symboly \angle v následujících rovnicích znamenají odchylku vektorů:

$$\alpha = \angle([0, b, c]^T, [0, 0, 1]^T), \quad (3.29)$$

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}, \quad (3.30)$$

$$\beta = \angle(\mathbf{R}_x[a, 0, c]^T, [0, 0, 1]^T), \quad (3.31)$$

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}. \quad (3.32)$$

Tuto transformaci aplikujeme na body \mathbf{x}_ρ promítnuté do roviny ρ stejně jako na body \mathbf{x} přímo naměřené, tedy:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}'_\rho &= \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x \mathbf{x}_\rho, \\ \mathbf{x}' &= \mathbf{R}_y \mathbf{R}_x \mathbf{x}. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Body \mathbf{x}'_ρ mají všechny stejnou konstantní z-ovou souřadnici, z-ová souřadnice bodů \mathbf{x}' osciluje kolem této hodnoty.

ad 3.

Nyní budeme pracovat v rovině, vyškrtíme konstantní z-ovou složku \mathbf{x}'_ρ a zavedme homogenní souřadnice:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}} &= [x'_{\rho 1}, x'_{\rho 2}, 1]^T, \\ \tilde{\mathbf{x}}_i &= [x_{i1}, x_{i2}, 1]^T, \end{aligned} \quad (3.34)$$

kde x_{i1}, x_{i2} jsou ideální hodnoty dle rastru kalibračního vzoru.

Hledáme optimální otočení a posunutí, tedy transformační matici tvaru

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & t_1 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.35)$$

To vede na optimalizační úlohu:

$$\|\tilde{\mathbf{x}}_i - \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}\|_2 = \min, \quad (3.36)$$

pro (ϕ, t_1, t_2) . Jde o problém nelineárních nejmenších čtverců, který řešíme pomocí funkce `leastsq` optimalizačního toolboxu systému MATLAB.

Abychom se vyhnuli uváznutí v lokálním extrému, provedme lineární odhad \mathbf{A} a určíme počáteční podmínky optimalizace, tedy:

$$\mathbf{A}_{\text{lin}} = \begin{bmatrix} a & b & t_1 \\ -b & a & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.37)$$

což vede na lineární úlohu nejmenších čtverců:

$$\begin{bmatrix} x_{i_1} \\ x_{i_2} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b & t_1 \\ -b & a & t_2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} x_{i_1} &= ax_1 + bx_2 + t_1, \\ x_{i_2} &= -bx_1 + ax_2 + t_2, \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{bmatrix} {}^1x_1 & {}^1x_2 & 1 & 0 \\ {}^1x_2 & -{}^1x_1 & 0 & 1 \\ \vdots & & & \\ {}^nx_1 & {}^nx_2 & 1 & 0 \\ {}^nx_2 & -{}^nx_1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^1x_{i_1} \\ {}^1x_{i_2} \\ \vdots \\ {}^1x_{i_1} \\ {}^2x_{i_2} \end{bmatrix}. \quad (3.40)$$

Předchozí soustavu rovnic řešíme pro neznámé (a, b, t_1, t_2) podle (3.24) a počáteční hodnoty optimalizační úlohy (3.36) určíme takto:

$$\begin{aligned} \varphi^{(0)} &= \arccos\left(\frac{a}{a^2+b^2}\right), \\ t_1^{(0)} &= t_1, \\ t_2^{(0)} &= t_2. \end{aligned} \quad (3.41)$$

Výslednou maticí \mathbf{A} body „sesadíme“, tedy

$$\tilde{\mathbf{x}}_r = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}. \quad (3.42)$$

ad 4.

Nyní se vraťme k prostorovým souřadnicím:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{rP} &= [x_{r_1}, x_{r_2}, x_3], \\ \mathbf{x}_{iP} &= [x_{i_1}, x_{i_2}, x'_{\rho_3}]. \end{aligned} \quad (3.43)$$

Třetí složka naměřených bodů v prostoru $\mathbf{x}_{\mathbf{rP}}$ je totožná s třetí složkou vektoru \mathbf{x}' a třetí složka ideálních bodů v prostoru $\mathbf{x}_{\mathbf{iP}}$ je totožná s třetí složkou vektoru \mathbf{x}'_p , viz rovnice (3.33).

Definujeme chybu zaměření jako rozdíl ideálních a naměřených bodů:

$$\mathbf{e} = [e_x, e_y, e_z] = \mathbf{x}_{\mathbf{iP}} - \mathbf{x}_{\mathbf{rP}}. \quad (3.44)$$

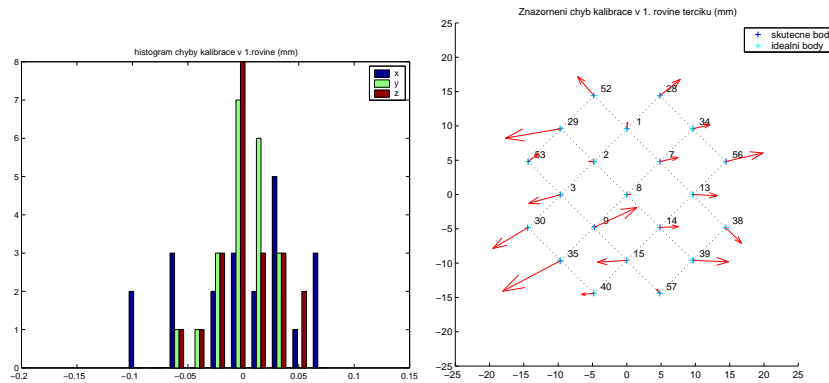
Dále definujeme střední chybu zaměření jako průměrnou vzdálenost ideálních a naměřených bodů:

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sqrt{e_{x_k}^2 + e_{y_k}^2 + e_{z_k}^2}, \quad (3.45)$$

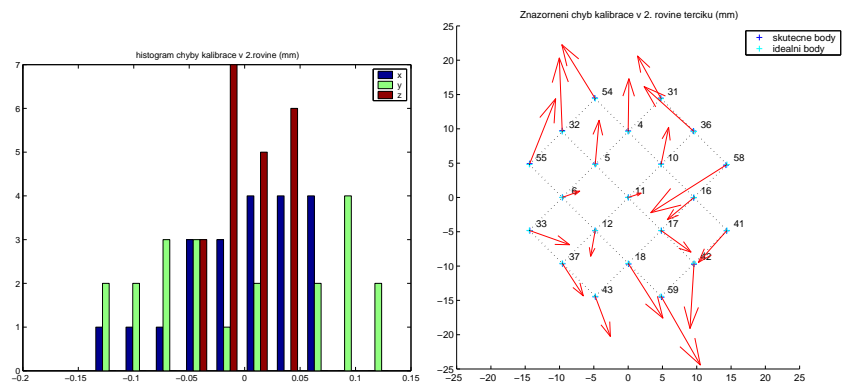
kde n je opět počet bodů příslušejících jedné rovině terčíku ($n = 21$).

Na obr.3.4, 3.5, 3.6 jsou histogramy chyby zaměření, viz (3.44) spolu s grafickým znázorněním chyby v každé z rovin terčíku.

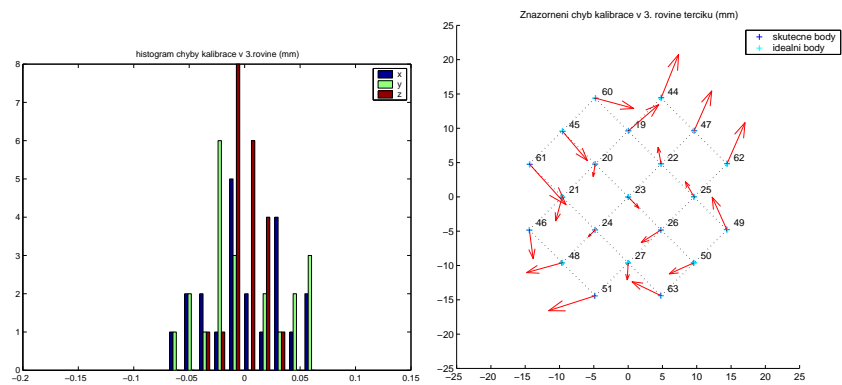
Vzhledem k velikosti střední chyby, viz (3.45), která se pohybuje od 0.05 mm do 0.1 mm, je nutné poznamenat, že měření je natolik přesné, že je obtížné rozlišit chyby měření a chyby vzniklé deformací rastru (papírového) vzoru při lepení.



Obrázek 3.4: Chyba zaměření referenčních bodů v 1.rovině terčíku, $\bar{e} = 0.0539 \text{ mm}$



Obrázek 3.5: Chyba zaměření referenčních bodů v 2. rovině terčíku, $\bar{e} = 0.0947 \text{ mm}$



Obrázek 3.6: Chyba zaměření referenčních bodů v 3. rovině terčíku, $\bar{e} = 0.0493 \text{ mm}$

Kapitola 4

Měření trajektorie spodní čelisti

4.1 Konfigurace měření

Na obr. 4.1 je zjednodušené schéma měření. Zde vidíme tři terčíky: Terčík D , který je pevně spojen se spodní čelistí, terčík H , který je pevně spojen s horní čelistí a čárkovaně terčík P^1 , který je spojen s přípravkem, pomocí něhož se změří poloha okluzní roviny. Dále je zde zakreslena osa j , která spojuje levou a pravou kloubní hlavičku - body \mathbf{x}^l a \mathbf{x}^r .

Princip měření spočívá v zjištění polohy a orientace dolního terčíku, tj. souřadné soustavy D . Souřadnice kloubních hlaviček \mathbf{x}^l a \mathbf{x}^r jsou v této soustavě díky tuhosti čelisti a upevnění terčíku během měření konstantní. Tyto souřadnice je ale třeba určit před samotným měřením trajektorie, a to na základě odhadu polohy osy kloubu j , viz oddíl 4.2.

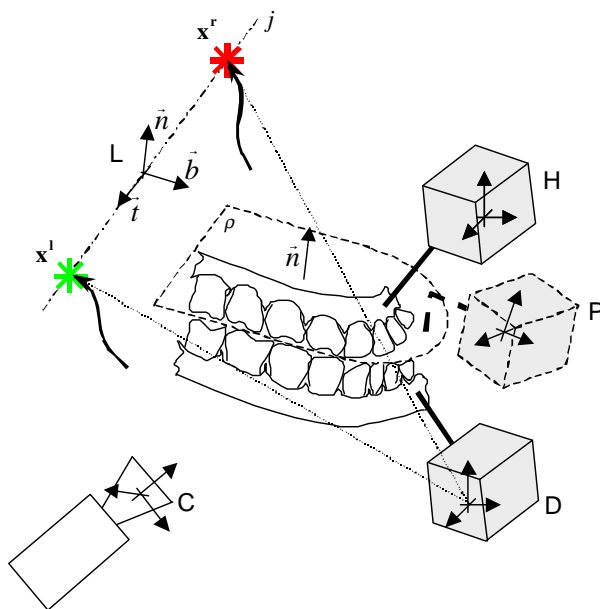
Vyjádření polohy a orientace terčíku D v souřadné soustavě kamery nestačí, neboť vlivem pohybů hlavy by bylo měření znehodnoceno. Nabízí se dvě možnosti řešení. Upevnění hlavy pacienta, tj. zafixování kamery vzhledem k lebce, nebo přidání dalšího terčíku H , který je spojen s horní čelistí, tedy s lebkou. Jeho polohu rovněž změříme kamerou, čímž získáme informaci o poloze hlavy. Naše řešení používá druhou možnost, která je pro pacienta méně nepříjemná, neboť mu umožňuje mírně, tzn. v rámci zorného pole kamery, hýbat hlavou.

Naměřenou trajektorii nakonec vyjádříme v souřadné soustavě lebky L . Její poloha a orientace je zakreslena na obr. 4.1. Počátek soustavy se nachází uprostřed kloubních hlaviček \mathbf{x}^l a \mathbf{x}^r ose j při zavřených ústech. Její orientaci určuje normála okluzní roviny, viz oddíl 4.3 a ortonormální průmět osy j , viz dále.

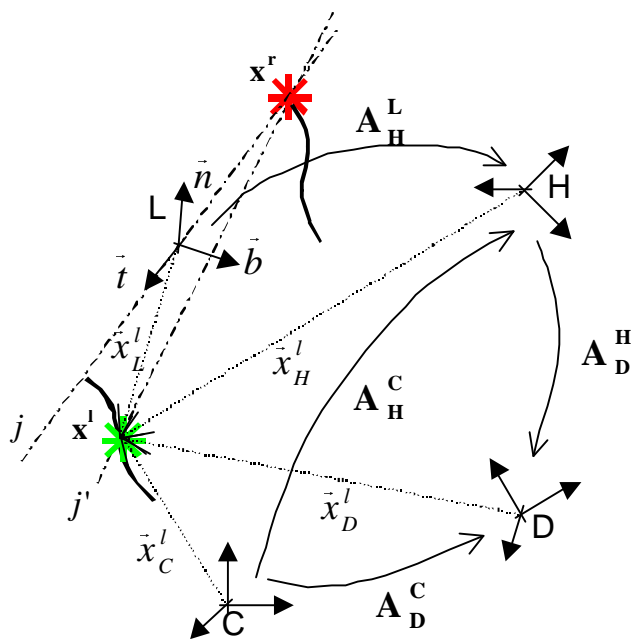
Postup měření probíhá podle následující osnovy:

1. Nasadí se horní terčík H .

¹Je zobrazen čárkovaně, neboť je v ústech pouze ve fázi měření okluzní roviny, ve které není nasazen dolní terčík D .



Obrázek 4.1: Konfigurace měření



Obrázek 4.2: Souřadné soustavy při měření trajektorie spodní čelisti

2. Pacient sevře v ústech přípravek s terčíkem P pro měření okluzní roviny, viz obr. 4.1. Tímto se zjistí orientace okluzní roviny ρ .
3. Vyjme se přípravek s terčíkem P a nasadí se terčík D .
4. Pacient vykoná pohyb otevírání úst, podle kterého se odhadne poloha osy kloubu j , viz oddíl 4.2.
5. Pacient vykoná další předepsané pohyby, tj. pohyb do strany (vlevo a vpravo) a předsunutí(zasunutí) čelisti.
6. Vypočte se kloubní dráha.

Nyní postup měření kloubní dráhy popíšme formálně. Odvození je ilustrováno na obr. 4.2.

Nejprve určíme polohu kloubních hlaviček \mathbf{x}^l a \mathbf{x}^r v souřadné soustavě D dolního terčíku. Vyjděme z rovnice osy kloubu j v souřadné soustavě D , viz oddíl 4.2:

$$j_D : \mathbf{x}_D = \mathbf{x}_{0D} + t \cdot \mathbf{u}_D. \quad (4.1)$$

Dosazením za parametr t :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_D^l &= \mathbf{x}_{0D} + 0.5d \mathbf{u}_D, \\ \mathbf{x}_D^r &= \mathbf{x}_{0D} - 0.5d \mathbf{u}_D, \end{aligned} \quad (4.2)$$

kde d je vzdálenost kloubních hlaviček, kterou lze snadno pacientovi odměřit.

Vyjádříme \mathbf{x}_D^l a \mathbf{x}_D^r souřadné soustavy D přes soustavu C kamery a H horního terčíku v souřadné soustavě L lebky. V následujícím textu pro úspornost zápisu vynecháváme indexy l a r , neboť všechny rovnice platí jak pro levou, tak pro pravou kloubní hlavičku. Jediný index \mathbf{x} označuje bázi, ke které přísluší.

Kamerou změříme pohybové matice \mathbf{A}_D^C a \mathbf{A}_H^C , viz předchozí kapitola.:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_C &= \mathbf{A}_D^C \tilde{\mathbf{x}}_D, \\ \tilde{\mathbf{x}}_C &= \mathbf{A}_H^C \tilde{\mathbf{x}}_H. \end{aligned} \quad (4.3)$$

Odtud

$$\tilde{\mathbf{x}}_H = (\mathbf{A}_H^C)^{-1} \mathbf{A}_D^C \tilde{\mathbf{x}}_D = \mathbf{A}_D^H \tilde{\mathbf{x}}_D. \quad (4.4)$$

Nyní zbývá pouze naměřené body trajektorie \mathbf{x}_H otočit a posunout, tj. transformovat do souřadné soustavy L lebky, tedy:

$$\tilde{\mathbf{x}}_L = \mathbf{A}_H^L \tilde{\mathbf{x}}_H, \quad (4.5)$$

kde

$$\mathbf{A}_H^L = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{x}_{0H} \\ 000 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Vektor \mathbf{x}_{0H} je počátek soustavy L vyjádřený v soustavě H . Bázové vektory L tvoří

$$\mathbf{R} = [\mathbf{t}_H \quad \mathbf{b}_H \quad \mathbf{n}_H], \quad (4.7)$$

viz obr. 4.2.

Vektor \mathbf{x}_{0H} spolu s vektorem \mathbf{u}_H vypočítáme buď transformací osy j_D v (4.1), maticí \mathbf{A}_D^H při zavřených ústech, viz (4.4), nebo vypočítáme osu j přímo v souřadné soustavě H , viz oddíl 4.2. Potom:

$$j_H : \mathbf{x}_H = \mathbf{x}_{0H} + t \cdot \mathbf{u}_H. \quad (4.8)$$

Vektor \mathbf{n}_H je normála okluzní roviny vyjádřená v soustavě horního terčíku, viz oddíl 4.3.

Vektor \mathbf{t}_H je ortonormální průmět směrového vektoru \mathbf{u}_H , tedy:

$$\mathbf{t}_H = \frac{\mathbf{u}_H - (\mathbf{n}_H^T \mathbf{u}_H) \cdot \mathbf{n}_H}{|\mathbf{u}_H - (\mathbf{n}_H^T \mathbf{u}_H) \cdot \mathbf{n}_H|}. \quad (4.9)$$

Předchozí rovnice je vlastně jedním krokem Gramova-Schmidtova ortonormalizačního procesu, viz [4]. Není možné použít přímo \mathbf{u}_H , neboť okluzní rovina a osa kloubu nemusí být přesně rovnoběžné.

Vektor \mathbf{b}_H stanovme jako:

$$\mathbf{b}_H = \mathbf{n}_H \times \mathbf{t}_H, \quad (4.10)$$

čímž tyto vektory tvoří ortonormální bázi.

Konečně z rovnic (4.4) a (4.5) vyplývá

$$\tilde{\mathbf{x}}_L = \mathbf{A}_H^L \mathbf{A}_D^H \tilde{\mathbf{x}}_D. \quad (4.11)$$

4.2 Odhad polohy osy kloubu

Při výpočtu polohy osy kloubu použijeme aproximaci, že kloub dolní čelisti je pouze otočný a dolní čelist při otevírání a zavírání úst vykonává kolem jeho osy ryze rotační pohyby. Jde jen o aproximaci, neboť skutečný pohyb je mnohem složitější, viz kapitola 1. Ovšem pro malé úhly otevření úst je taková aproximace pro tyto účely dostatečná.

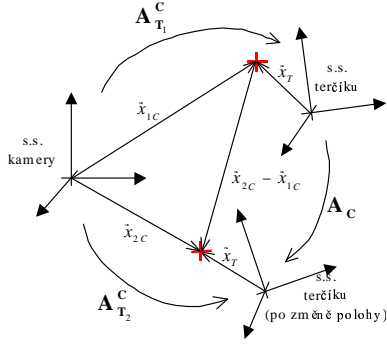
V následujícím textu pro jednoduchost předpokládáme, že osa kloubu nekoná žádný pohyb, jako kdyby byla hlava zafixována a pevně spojena s kamerou. Podle předchozího oddílu při zavedení horního referenčního terčíku stačí měřené pohybové matice $\mathbf{A}_{T_i}^C$ nahradit maticemi

$$\mathbf{A}_{D_i}^H = \mathbf{A}_{H_i}^C^{-1} \mathbf{A}_{D_i}^C, \quad (4.12)$$

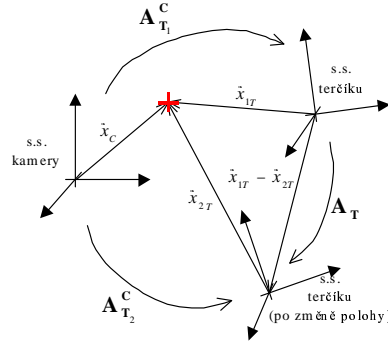
potom osa nekoná žádný pohyb v souřadné soustavě horního terčíku.

Nejprve popišme relativní pohyb terčíku v prostoru, tedy vysvětleme vzájemné vztahy souřadných soustav při pohybu terčíku.

Na obr. 4.3 a obr. 4.4 je zakreslena shodná prostorové uspořádání: kamera a dvě polohy terčíku. Na obr. 4.3 je zakreslena situace z pohledu kamery, hledáme transformaci \mathbf{A}_c . Na obr. 4.4 je zakreslena situace z pohledu terčíku a hledáme transformaci \mathbf{A}_t .



Obrázek 4.3: Pohyb v souřadné soustavě kamery



Obrázek 4.4: Pohyb v souřadné soustavě terčiku

V prvním případě platí, viz obr. 4.3:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}_{1C} &= \mathbf{A}_{T_1}^C \tilde{\mathbf{x}}_T \\ \tilde{\mathbf{x}}_{2C} &= \mathbf{A}_{T_2}^C \tilde{\mathbf{x}}_T\end{aligned}\quad (4.13)$$

Odtud

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}_{1C} &= \mathbf{A}_{T_1}^C (\mathbf{A}_{T_2}^C)^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_{2C} \\ \tilde{\mathbf{x}}_{1C} &= \mathbf{A}_C \tilde{\mathbf{x}}_{2C}\end{aligned}\quad (4.14)$$

tedy:

$$\mathbf{A}_C = \mathbf{A}_{T_1}^C (\mathbf{A}_{T_2}^C)^{-1}.\quad (4.15)$$

V druhém případě, viz obr. 4.4:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}_{1T} &= (\mathbf{A}_{T_1}^C)^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_C \\ \tilde{\mathbf{x}}_{2T} &= (\mathbf{A}_{T_2}^C)^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_C\end{aligned}\quad (4.16)$$

potom

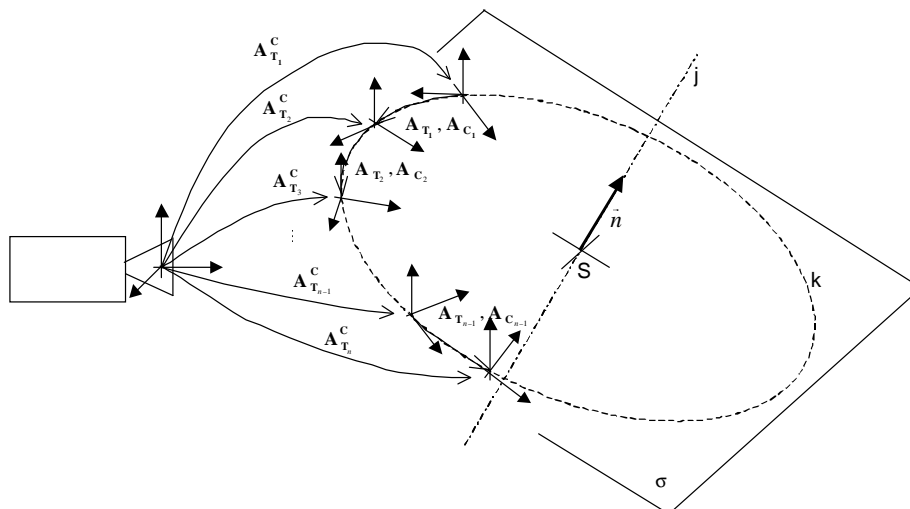
$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}_{1T} &= (\mathbf{A}_{T_1}^C)^{-1} \mathbf{A}_{T_2}^C \tilde{\mathbf{x}}_{2T} \\ \tilde{\mathbf{x}}_{1T} &= \mathbf{A}_T \tilde{\mathbf{x}}_{2T}\end{aligned}\quad (4.17)$$

tedy:

$$\mathbf{A}_T = (\mathbf{A}_{T_1}^C)^{-1} \mathbf{A}_{T_2}^C.\quad (4.18)$$

Na obr. 4.5 je situace při měření osy kloubu j . K výpočtu byly navrženy dvě metody. Jedna je založena na proložení naměřenými body terčiku rovinou a kružnicí a druhá je založená na hledání invariantního prostoru zobrazení, které tvoří pohybové transformační matice.

Obě metody dávají samozřejmě na přesných datech, tj. terčík se pohybuje po kružnici a měření je ideálně přesné, shodné výsledky. V reálném případě, kdy tyto podmínky dodrženy nejsou, se výsledky obou metod liší.



Obrázek 4.5: Měření osy kloubu

4.2.1 Metoda proložení rovinou a kružnicí

Na základě změřených pohybových matic $\mathbf{A}_{T_i}^C$ vypočítáme polohu libovolných, např. počátečních, bodů terčiku:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{iC} = \mathbf{A}_{T_i}^C [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T. \quad (4.19)$$

Tyto body mají ležet v rovině σ , viz obr. 4.5, ovšem vlivem nepřesnosti měření, či nepřesnosti pohybu terčiku mohou oscilovat v malém okolí od roviny σ .

Postupujme následujícím způsobem:

1.
 - Proložme naměřené body $\tilde{\mathbf{x}}_{iC}$ rovinou σ . Její normálový vektor \mathbf{n}_σ je zároveň směrovým vektorem hledané osy j .
 - Promítněme $\tilde{\mathbf{x}}_{iC}$ do σ .
 - Rovinu σ sklopme, tak aby výsledná rovina σ' měla normálový vektor $\mathbf{n}_{\sigma'} = [0, 0, 1]^T$.
2. Body v rovině σ' proložme kružnicí k .
3. Střed kružnice $S_{\sigma'}$ sklopme zpět do původní roviny σ . Tento bod S_σ je bodem osy j .

ad 1.

Tento bod je již popsán v oddílu 3.2.2 při analýze přesnosti zaměření referenčních bodů terčiku. Zde vypočítáme normálový vektor \mathbf{n}_σ , rotační matici sklopení roviny \mathbf{R} a konečně 2D souřadnice bodů v rovině \mathbf{x}_{2D} :

$$\mathbf{x}'_\sigma = \mathbf{R}\mathbf{x}_\sigma, \quad (4.20)$$

$$\mathbf{x}_{2\mathbf{D}} = \begin{bmatrix} x'_{\sigma_1} \\ x'_{\sigma_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}. \quad (4.21)$$

ad 2.

Pro kružnici k platí následující rovnice:

$$k : (x - S_x)^2 + (y - S_y)^2 = r^2. \quad (4.22)$$

Hledáme parametry střed (S_x, S_y) , případně poloměr (r) , které ve smyslu nejlepších čtverců vysvětlují naměřené x a y .

Úpravou předchozí rovnice:

$$x^2 + y^2 - 2xS_x - 2yS_y + S_x^2 + S_y^2 - r^2 = 0. \quad (4.23)$$

Zavedme substituci

$$k = S_x^2 + S_y^2 - r^2. \quad (4.24)$$

Potom rovnice

$$2xS_x + 2yS_y - k = x^2 + y^2 \quad (4.25)$$

má platit pro všechna měřená x a y , rozepišme proto maticově:

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ 2x_i & 0 & 0 \\ 0 & 2y_i & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ x_i^2 + y_i^2 \\ \vdots \end{bmatrix}. \quad (4.26)$$

Tuto rovnici řešíme, pro neznámé S_x, S_y, k . Řešení ve smyslu nejmenších čtverců opět nalezneme pomocí SVD rozkladu, viz [4].

Poloměr kružnice můžeme určit z rovnice (4.24).

ad 3.

Střed kružnice v rovině σ' sklopme zpět pomocí inverzní transformace z bodu 1.:

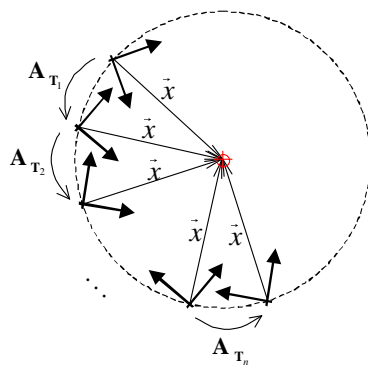
$$\mathbf{S}_\sigma = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ x'_{\sigma_3} \end{bmatrix}. \quad (4.27)$$

Konečně rovnice osy j je potom rovnicí přímky procházející bodem středem kružnice v rovině σ se směrovým vektorem, který tvoří normála této roviny:

$$j : \mathbf{x} = \mathbf{S}_\sigma + \mathbf{t} \cdot \mathbf{n}_\sigma \quad (4.28)$$

Předchozí rovnice je vyjádření osy v souřadné soustavě kamery (případně při uvažování (4.12) v souřadné soustavě horního terčíku). Pro vyjádření osy v souřadné soustavě (dolního) terčíku stačí uvažovat měřené body v souřadné soustavě terčíku. Potom rovnice (4.19) přejde do tvaru:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{i_\tau} = \mathbf{A}_{\mathbf{T}_i}^{\mathbf{C}}^{-1} [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T. \quad (4.29)$$



Obrázek 4.6: Rotace kolem osy v rovině

4.2.2 Metoda invariantního prostoru zobrazení

Chápejme pohybovou transformační matici \mathbf{A}_T , viz (4.4), jako lineární zobrazení. Všimněme si, že body, ležící na ose j mají tu vlastnost, že jsou invariantní vůči výše popsané pohybové transformaci.

Na obr. 4.6 je pro názornost nakreslen rovinný případ. Hledanou osu rotace pak tvoří jediný bod, který má ve všech soustavách stejné souřadnice \mathbf{x} . Tedy bod \mathbf{x} je invariantním prostorem zobrazení \mathbf{A}_T . Neboli:

$$\mathbf{A}_{T_i} \tilde{\mathbf{x}} = \tilde{\mathbf{x}} \quad (4.30)$$

Tato rovnice platí obecně, pouze jej řešení, tj. výsledný invariantní prostor, nemá jako v rovinném případě dimenzi 0 (bod), nýbrž v prostorovém případě dimenzi 1. Řešením je jednoparametrický prostor, tedy přímka j .

Rovnici (4.30) rozepíšme. Pro přehlednost vynecháváme u složek vynecháváme index i čísla transformace:

$$\left[\begin{array}{ccc|c} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.31)$$

Dále upravíme rovnici (4.30) a opět rozepíšme:

$$(\mathbf{A}_{T_i} - \mathbf{E})\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{0} \quad (4.32)$$

$$\left[\begin{array}{ccc|c} (r_1 - 1) & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & (r_5 - 1) & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & (r_9 - 1) & t_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (4.33)$$

Čtvrtá rovnice této soustavy vyjadřuje obecnou identitu, nepřináší žádnou informaci a proto ji vynecháme:

$$\begin{bmatrix} (r_1 - 1) & r_2 & r_3 \\ r_4 & (r_5 - 1) & r_6 \\ r_7 & r_8 & (r_9 - 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}. \quad (4.34)$$

Souhrnně zapsáno:

$$(\mathbf{R}_i - \mathbf{E})\mathbf{x} = -\mathbf{t}_i, \quad (4.35)$$

tedy:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 - \mathbf{E} \\ \mathbf{R}_2 - \mathbf{E} \\ \vdots \\ \mathbf{R}_n - \mathbf{E} \end{bmatrix} \mathbf{x} = - \begin{bmatrix} \mathbf{t}_1 \\ \mathbf{t}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{t}_3 \end{bmatrix}. \quad (4.36)$$

Řešíme soustavu rovnic

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \quad (4.37)$$

ve smyslu nejmenších čtverců, tedy $\|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|_2 = \min$, pomocí SVD, viz [4]:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^T, \quad (4.38)$$

kde matice \mathbf{D} má v našem případě tvar

$$D = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4.39)$$

Protože hledáme řešení dimenze 1, je nutné vynulovat třetí singulární číslo, které nemusí být vlivem šumu v datech nutně nulové:

$$\sigma_3 = 0. \quad (4.40)$$

Dosaďme rozklad matice soustavy \mathbf{A} do rovnice (4.37):

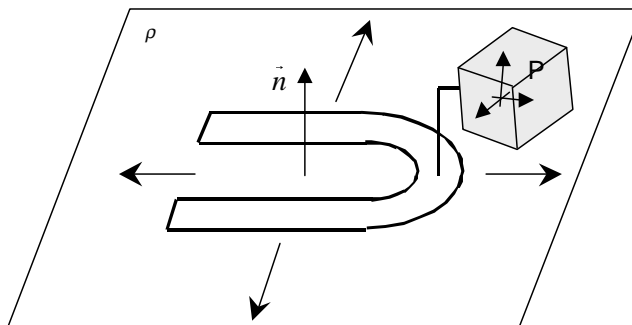
$$\mathbf{D}\mathbf{y} = \mathbf{U}^T\mathbf{b} = \mathbf{c}, \quad (4.41)$$

kde

$$\mathbf{y} = \mathbf{V}^T\mathbf{x}. \quad (4.42)$$

Potom využitím předchozí substituce:

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{V} \begin{bmatrix} c_1/\sigma_1 \\ c_2/\sigma_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.43)$$



Obrázek 4.7: Schéma přípravku pro měření okluzní roviny

$$\mathbf{n} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4.44)$$

Konečné řešení soustavy (4.36) a hledaná rovnice osy j je potom:

$$j : \mathbf{x} = \mathbf{x}_0 + t \cdot \mathbf{n}. \quad (4.45)$$

Takto získaný vektor \mathbf{n} má jednotkovou velikost a vektor \mathbf{x}_0 má velikost minimální.

Předchozí rovnice vyjadřuje osu kloubu j v souřadné soustavě (dolního) terčíku. Pro výpočet v souřadné soustavě kamery (případně při uvažování (4.12) v souřadné soustavě horního terčíku) stačí matici \mathbf{A}_t v (4.30) nahradit maticí \mathbf{A}_c^{-1} , podobně jako u předchozí metody.

4.3 Změření okluzní roviny

Na obr. 4.7 je naznačeno schéma přípravku pro měření okluzní roviny. Jde o rovinný plech, který je pevně spojen s terčíkem P .

Abychom mohli přípravek použít k měření, je nutné jej nejprve zkalibrovat v tom smyslu, že určíme orientaci normálového vektoru \mathbf{n} rovinné plochy přípravku v soustavě terčíku P . Tato kalibrace probíhá samozřejmě mimo samotné měření.

Normálu \mathbf{n}_p změříme následujícím způsobem. Přípravek posouváme po jeho rovinné ploše po pevné rovinné desce, přičemž terčík P sleduje kamera. Všechny body terčíku potom leží na jedné rovině, jejíž normála je hledaná \mathbf{n}_p .

Takto naměřené body

$$\tilde{\mathbf{x}}_{iP} = \mathbf{A}_{P_i}^C^{-1} [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T, \quad (4.46)$$

kde $\mathbf{A}_{P_i}^C$ je naměřená pohybová matice, proložíme rovinou, viz bod 1. oddílu 3.2.2.

Je zřejmé, že přípravek nesmíme při kalibraci posouvat pouze po přímce. Naopak je nutné provést obecný pohyb v rovině tak, aby v rámci zorného pole kamery leželi naměřené body \mathbf{x}_{i_P} co nejdále od sebe.

Měření okluzní roviny pacienta, viz obr. 4.1, znamená vyjádřit normálový vektor roviny přípravku \mathbf{n}_P v souřadné soustavě horního terčíku H , tj:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{n}_H \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{A}_P^H \begin{bmatrix} \mathbf{n}_P \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.47)$$

kde \mathbf{A}_P^H je příslušná transformace, pro níž platí, analogicky podle (4.4):

$$\mathbf{A}_P^H = (\mathbf{A}_H^C)^{-1} \mathbf{A}_P^C. \quad (4.48)$$

Kapitola 5

Experimenty

V následující kapitole budou popsány experimenty, které jsme provedli k ověření správnosti návrhu zařízení. Budeme postupovat od simulací, přes skutečná měření na otočně-posuvném stolku, přes měření kloubní dráhy na artikulátoru až po měření kloubní dráhy na artikulátoru.

Při experimentech používáme digitální kameru Pulnix TM9701 s objektivem 6.5 mm a frame grabber Data Translation DT3157.

5.1 Simulace

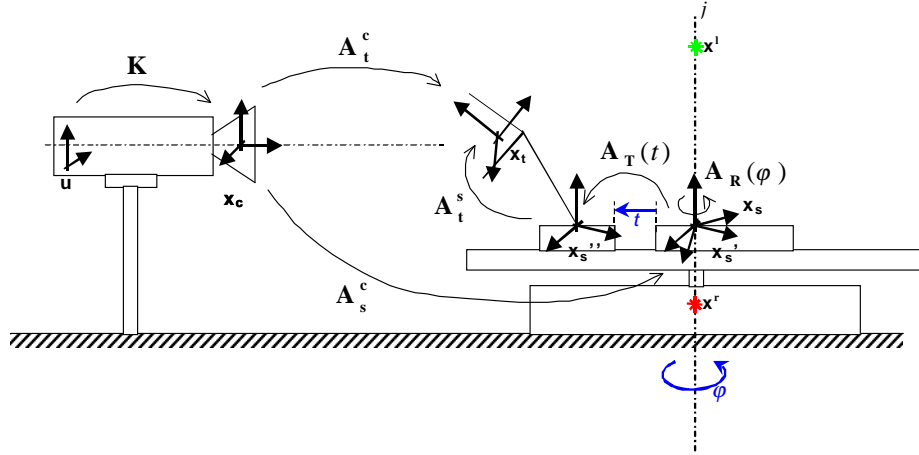
Na obr. 5.1 je zakresleno schéma experimentu s otočně-posuvným stolkem. Na otočném stolku, který umožňuje přesně odměřit úhel otočení φ , je pevně připevněn translační člen, jehož vysunutí t lze také odměřit. Terčík je spojen s pohyblivou částí translačního členu. Scéna je pozorována kamerou, která se nachází v neznámé pevné poloze.

Cílem simulace je provést odhad přesnosti zaměření polohy terčíku, odhadu polohy osy otáčení (kloubu) j , polohy významných bodů \mathbf{x}^l a \mathbf{x}^r , které leží na ose j (hlavičky levého a pravého kloubu) a zejména izolovaně posoudit vlivy jednotlivých negativních vlivů jako radiální zkreslení, nepřesnost zaměření referenčních bodů terčíku, nepřesnost v detekci bodů obraze.

K simulaci takových experimentů je nutné vytvořit model tohoto systému. Terčík, přesněji pouze jeho referenční body \mathbf{x}_t , je „umístěn“ do souřadného systému spojeného s kamerou. Tato transformace je parametrizována otočením φ a posunutím t .

Podle obr. 5.1 napíšeme přímo rovnice:

$$\begin{aligned}\tilde{\mathbf{x}}_c &= \mathbf{A}_s^c \tilde{\mathbf{x}}_s, \\ \tilde{\mathbf{x}}_s &= \mathbf{A}_R(\varphi) \tilde{\mathbf{x}}'_s, \\ \tilde{\mathbf{x}}'_s &= \mathbf{A}_T(t) \tilde{\mathbf{x}}''_s, \\ \tilde{\mathbf{x}}''_s &= \mathbf{A}_t^s \tilde{\mathbf{x}}_t.\end{aligned}\tag{5.1}$$



Obrázek 5.1: Schéma experimentu s otočně-posuvným stolkem

Potom platí, že

$$\tilde{\mathbf{x}}_c = \mathbf{A}_s^c \mathbf{A}_R(\varphi) \mathbf{A}_T(t) \mathbf{A}_t^s \tilde{\mathbf{x}}_t = \mathbf{A}_t^c \tilde{\mathbf{x}}_t, \quad (5.2)$$

kde matice \mathbf{A}_s^c a \mathbf{A}_t^s jsou konstantní, matice $\mathbf{A}_R(\varphi)$ představuje rotaci o úhel φ a translační matice $\mathbf{A}_T(t)$ reprezentuje posun o t .

Referenční body terčíku v souřadné soustavě kamery $\tilde{\mathbf{x}}_c$ promítáme perspektivní kamerou, čímž získáme virtuální obraz scény $\tilde{\mathbf{u}}$, tedy

$$\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{K} \tilde{\mathbf{x}}_c. \quad (5.3)$$

Matici \mathbf{K} volíme přibližně kalibrační matici použité kamery z reálných experimentů. Referenční body terčíku \mathbf{x}_t volíme například ve shodě se skutečnými zaměřenými body.

Přizpůsobení simulace reálným podmínkám přiblížíme zavedením šumu v referenčních bodech terčíku \mathbf{x}_t a bodů v obraze \mathbf{u} :

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{t_N} &= \mathbf{x}_t + \mathbf{n}_t, \\ \mathbf{u}_N &= \mathbf{u} + \mathbf{n}_u, \end{aligned} \quad (5.4)$$

kde \mathbf{n}_t je signál s kovarianční maticí vyplývající z analýzy přesnosti zaměření referenčních bodů terčíku, viz oddíl 3.2.2 a \mathbf{n}_u je signál s diagonální kovarianční maticí, kde směrodatná odchylka je stanovena na 0.3 pixelu. Oba signály mají normální rozdělení s nulovou střední hodnotou.

V případě bodů v obraze \mathbf{u} dále zavádíme radiální zkreslení, které body v obraze transformuje dle odhadnutého radiálního zkreslení, viz oddíl 3.2.1.

Nyní je tento model v základní úrovni ve shodě s reálnými experimenty, viz dále. Ovšem na rozdíl od reálných experimentů známe přesně správnou polohu referenčních bodů terčíku tedy i polohu osy rotace a významných bodů. Navíc můžeme ovládat intenzitu šumu a radiálního zkreslení.

Takto jsme například zjistili, že nepřesnost v zaměření referenčních bodů terčíku hraje významější roli než šum v detekci korespondujících bodů v obraze. Dále že nekorigované radiální zkreslení vyvolá větší chybu polohy terčíku, než šum v bodech obrazu několikanásobně vyšší intenzity bez radiálního zkreslení. Proto není možné jej zanedbat.

Proveďme s tímto modelem následující experiment, který je simulací reálného experimentu, jehož výsledky rovněž uvedeme v příštím oddíle.

Stolek postupně posuneme o t a otočíme o φ :

$$\begin{aligned} t &= [5, 11, 14, 22, 29, 30, 55] \text{ mm}, \\ \varphi &= [-25, -20, -15, -10, -5, 0, 5, 10, 15, 20, 25]^\circ \end{aligned} \quad (5.5)$$

tak, že pro každou pozici t ¹ provedeme všechna otočení φ .

Pro jedno z posunutí, zvolme pro $t = 5\text{mm}$, odhadněme polohu osy otáčení (kloubu) j , viz 4.2. Na ose j zapsané v souřadné soustavě terčíku zvolme významné body \mathbf{x}_l , \mathbf{x}_r (levá a pravá kloubní hlavička).

Nyní pro všechna posunutí a otočení vypočítáme pohybovou matici \mathbf{A}_t^c , pomocí algoritmů popsanych v kapitole 3.1. Potom vypočítáme polohu významných bodů \mathbf{x}^l , \mathbf{x}^r v souřadné soustavě kamery:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_c^l &= \mathbf{A}_t^c \mathbf{x}^l, \\ \mathbf{x}_c^r &= \mathbf{A}_t^c \mathbf{x}^r. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Body \mathbf{x}_c^l , \mathbf{x}_c^r tvoří pro výše popsané pohyby stolku, kterým odpovídají matice \mathbf{A}_t^c trajektorii, viz obr. 5.3 nebo obr. 5.6. Na obr. 5.2 je simulovaný obraz z kamery, kde jsou referenční body terčíku (černě), osa rotace j (modře) a body $\mathbf{x}^l, \mathbf{x}^r$ (červená, zelená hvězdička). Jsou zde zakresleny osy terčíku (žlutě) a osy kamery (červeně) a střed obrazu (zelený kříž). Obraz vznikl projekcí přes matici \mathbf{M} , viz 3.2.

Chybu měření trajektorie lze díky simulaci přesně určit pro každý bod jako rozdíl jeho naměřené polohy a polohy ideální (výpočet za ideálních podmínek bez šumu). Podobně jako v kapitole 3.2.2 definujeme střední chybu měření jako průměrnou vzdálenost ideálních a naměřených bodů, viz 3.45.

Dále je možné i bez znalosti správné ideální trajektorie posoudit přesnost měření, neboť známe posunutí t a otočení φ stolku. Následující definice platí pro oba významné body, proto vynecháme indexy l a r . Zápis $\mathbf{x}_c(t_i, \varphi_j)$ znamená změřený bod pro i -té posunutí t a j -té otočení φ , přičemž indexy i, j jsou indexy do seznamu (5.5).

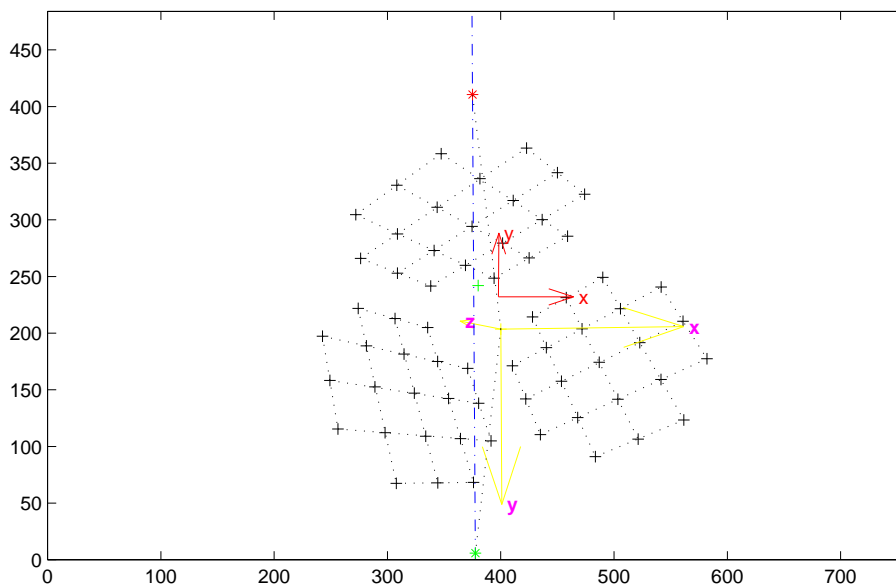
Chybu měření posunu definujeme:

$$e_{t_{ij}} = |\mathbf{x}_c(t_{i+1}, \varphi_j) - \mathbf{x}_c(t_i, \varphi_j)| - (t_{i+1} - t_i) \quad (5.7)$$

pro všechna i, j ze seznamu (5.5). Chybu měření otočení definujeme:

$$e_{\varphi_{ij}} = \angle [(\mathbf{x}_c(t_i, \varphi_{j+1}) - \mathbf{x}_0), (\mathbf{x}_c(t_i, \varphi_j) - \mathbf{x}_0)] - (\varphi_{j+1} - \varphi_j) \quad (5.8)$$

¹Tato posunutí volíme s ohledem na skutečná možná posunutí translačního členu.



Obrázek 5.2: Simulovaný obraz z kamery

pro $i > 1$ a všechna j seznamu (5.5). Symbol \angle znamená úhel vektorů a

$$\mathbf{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \mathbf{x}_c(t_1, \varphi_j) \quad (5.9)$$

je těžiště bodů, které mají ležet na ose otáčení j , n je délka seznamu (5.5).

Výpočet pohybové matice \mathbf{A}_t^c , viz (5.6) byl proveden oběma způsoby, podle 3.1, tj. RQ rozkladem a použitím známé matice kamery \mathbf{K} . Jak je patrné z následujících výsledků, použití známé matice kamery \mathbf{K} dává značně lepší výsledky.

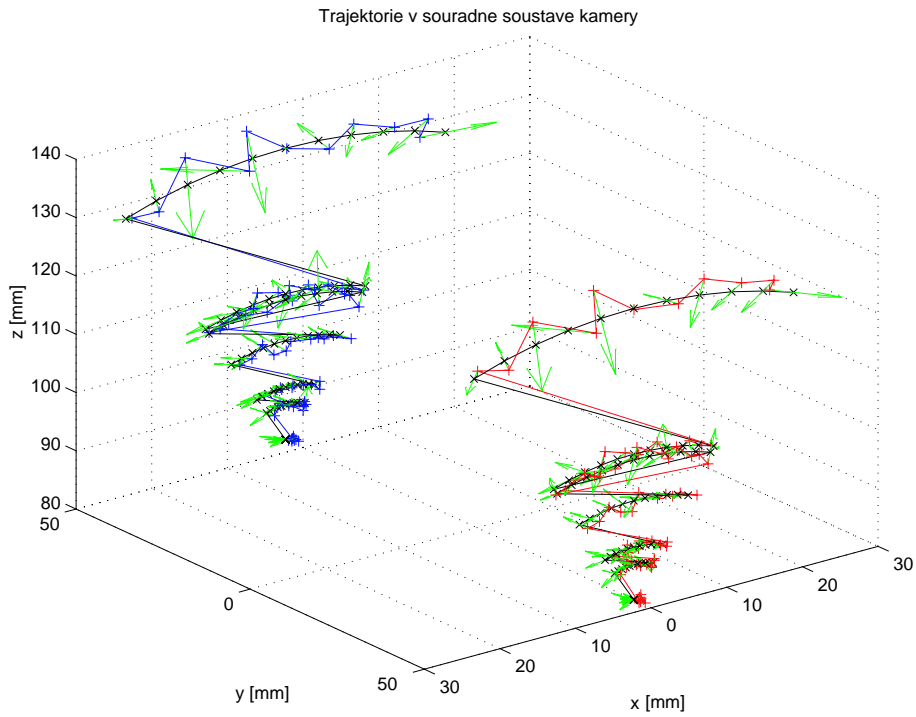
5.2 Měření na otočně-posuvném stolku

5.2.1 Měření velikosti posunutí

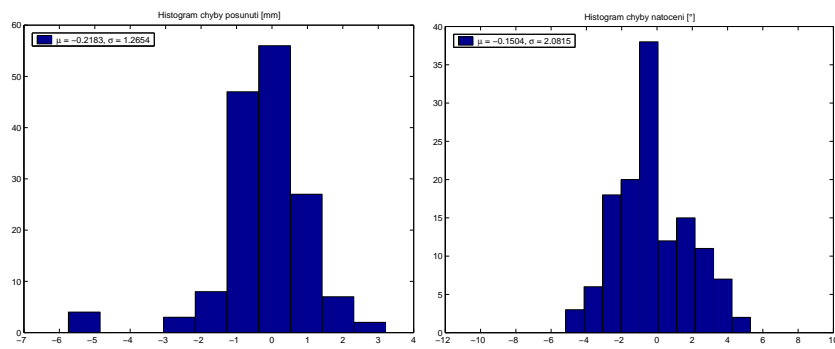
Následující experiment byl realizován na soustavě otočně-posuvného stolku, viz obr. 5.1.

Tento pokus má ověřit základní funkčnost měření polohy terčiku v prostoru v reálných podmínkách a umožnit posouzení různých zaměření referenčních bodů terčiku, odhadů radiálního zkreslení a metod výpočtu pohybové matice.

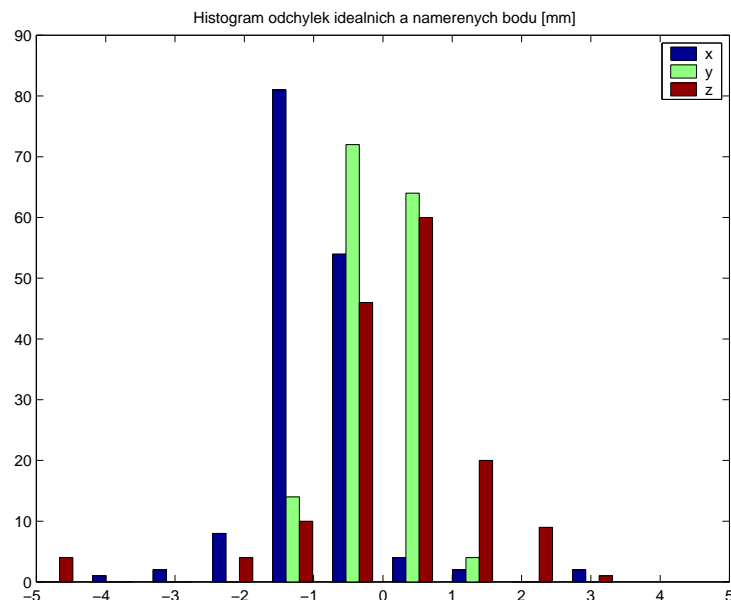
Otočný stůl je zaaretován v některé pozici φ , přičemž terčik natočíme tak, aby mohl být co nejlépe pozorován kamerou z důvodů spolehlivosti detekce referenčních bodů v obraze. Tuto scénu nasnímáme pro všechna posunutí t ze seznamu (5.5).



Obrázek 5.3: Trajektorie (RQ rozklad), ideální trajektorie (černá)



Obrázek 5.4: Histogramy chyb posunutí a otočení (RQ rozklad)



Obrázek 5.5: Histogram chyby měření (RQ rozklad), $\bar{e} = 0.9748mm$

Vezmeme vždy dvojici obrazů s různým posunutím t ze seznamu (5.5). Pro všechny kombinace vypočítáme velikost translace v souřadné soustavě terčiku t_T a souřadné soustavě kamery t_C :

$$\begin{aligned} t_{C_{ij}} &= \left| \mathbf{A}_C(t_i, t_j) \cdot [0, 0, 0, 1]^T \right|, \\ t_{T_{ij}} &= \left| \mathbf{A}_T(t_i, t_j) \cdot [0, 0, 0, 1]^T \right|, \end{aligned} \quad (5.10)$$

kde i, j jsou indexy do seznamu (5.5) prvního a druhého slotu, matici \mathbf{A}_C vypočítáme podle (4.15) a matici \mathbf{A}_T podle (4.18). Tyto matice závisí na posunutí stolku t_i, t_j .

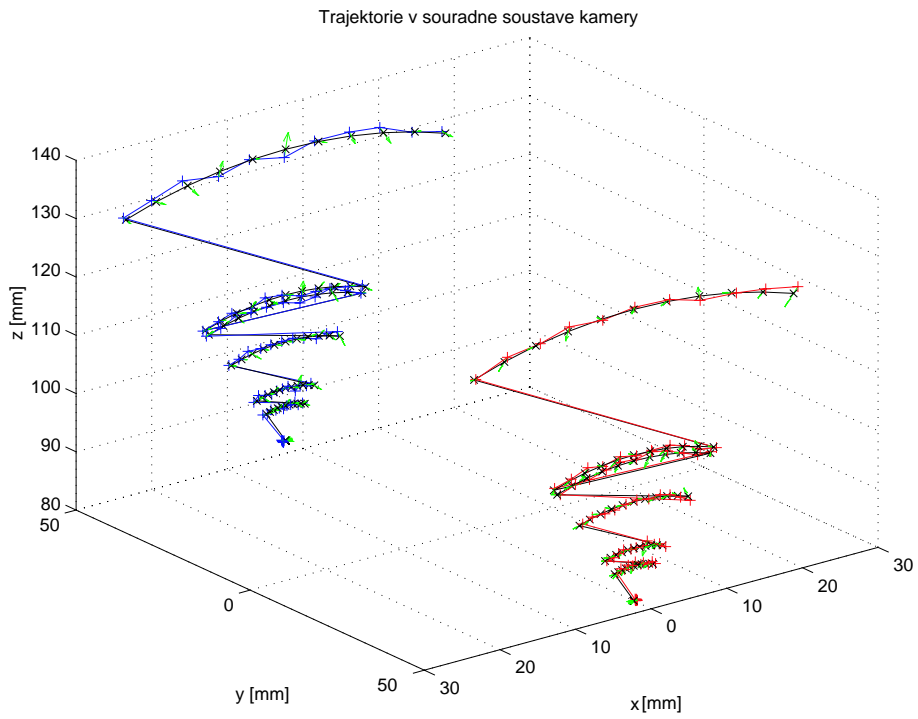
V ideálním případě s přesnými daty samozřejmě platí, že $t_{C_{ij}} = t_{T_{ij}} = |t_i - t_j|$. Rozdíl $t_{C_{ij}}$ a $t_{T_{ij}}$ v reálném případě způsobuje chyba měření orientace soustavy.

Chybu měření definujeme jako rozdíl naměřené velikosti translace a správné hodnoty posunutí:

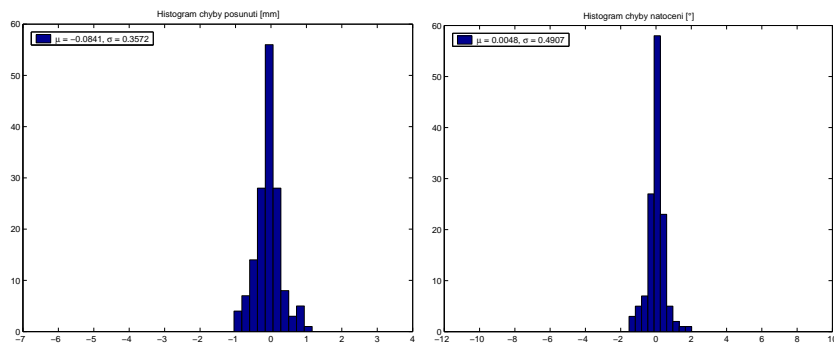
$$\begin{aligned} e_{C_{ij}} &= t_{C_{ij}} - |t_i - t_j|, \\ e_{T_{ij}} &= t_{T_{ij}} - |t_i - t_j|. \end{aligned} \quad (5.11)$$

Všechny grafy zobrazují chyby $e_{C_{ij}}$ (plná čára), a chyby $e_{T_{ij}}$ (čárkovaně) při jednotlivých kombinacích dvojic posunutí t . V legendě grafů je uvedena střední hodnota a směrodatná odchylka těchto veličin.

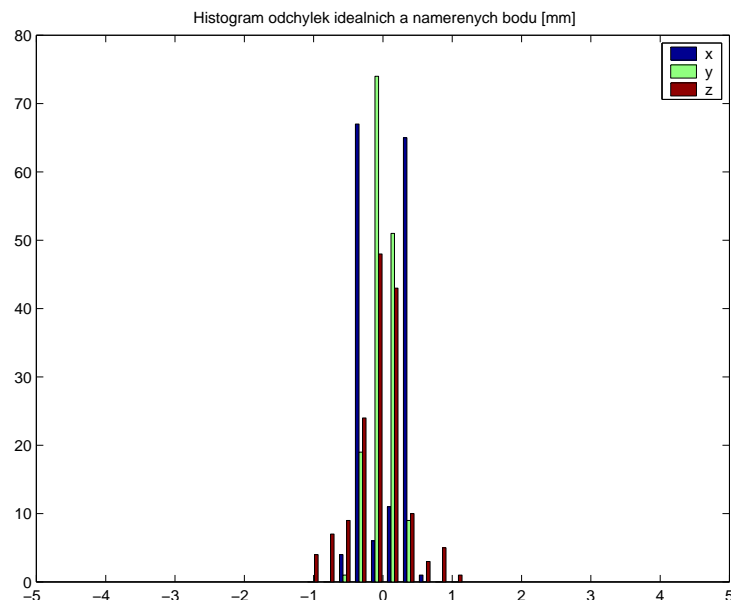
Na obr. 5.9 jsou chyby pro tři různé orientace stolku φ . Při 0° se terčik pohybuje přibližně ve směru optické osy kamery, při 90° se pohybuje kolmo na



Obrázek 5.6: Trajektorie (použití známe matice kamery \mathbf{K}), ideální trajektorie (černá)



Obrázek 5.7: Histogramy chyb posunutí a otočení (použití známe matice kamery \mathbf{K})



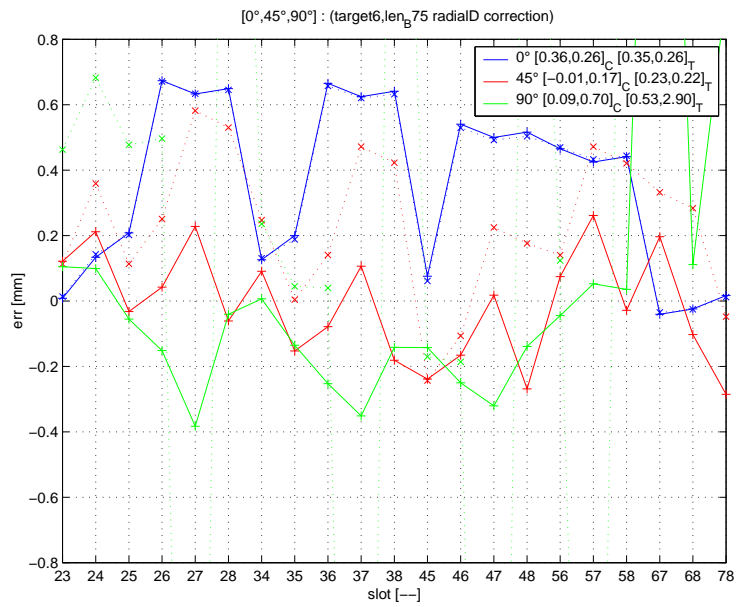
Obrázek 5.8: Histogram chyby měření (použití známe matice kamery \mathbf{K}), $\bar{e} = 0.9748\text{mm}$

optickou osu a při 45° diagonálně. Z grafu je patrné, že chyba nezávisí výrazně na směru pohybu terčíku.

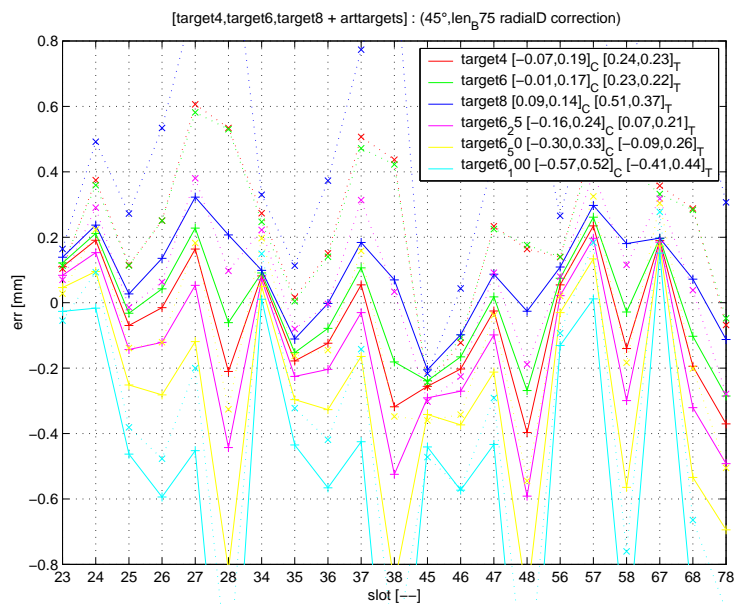
Na obr. 5.10 jsou vyneseny chyby pro různá zaměření referenčních bodů terčíku. Zaměření s označením *target6* – 25, *target6* – 50 a *target6* – 100 vznikla uměle ze zaměření *target6* odečtením 25%, 50% a 100% vektoru chyby zaměření vypočítaném v kapitole 3.2.2. Teoreticky by se měla chyba snížit, ovšem podle obr. 5.10 naopak roste. To znamená, že zaměření je natolik přesné a postihuje deformaci pravidelného rastru při lepení, protože odhad chyby zaměření založený na proložení rastrem je nepřesný.

Na obr. 5.11 jsou chyby při různých korekcích radiálního zkreslení: *noRDC* znamená bez korekce radiálního zkreslení, *len75* a *lenB75* jsou parametry odhadnuté ze dvou různých vzorů a *lenB75h* jsou parametry radiálního zkreslení odhadované z bodů ležící v jedné rovině, viz [7]. Nepřípustná chyba e_T vzniká, pokud radiální zkreslení není korigováno. Jinak všechny ostatní korekce dávají přibližně stejné výsledky.

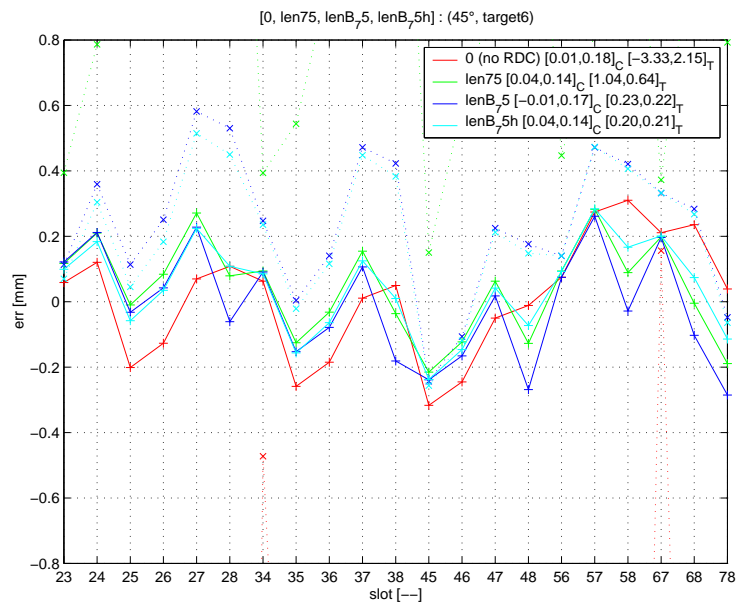
Na obr. 5.12 je vynesena chyba při výpočtu pohybových matic RQ rozkladem a při použití známé kalibrační matice kamery \mathbf{K} , která byla zjištěna průměrováním po prvcích několika matic \mathbf{K} získaných RQ rozkladem. Chyba je nižší při použití známé kalibrační matice.



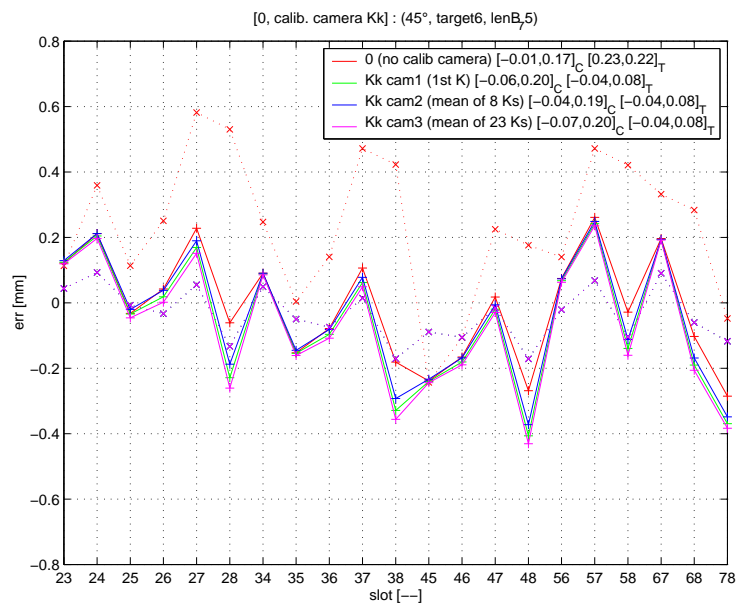
Obrázek 5.9: Chyba měření posunutí pro různé směry posunu



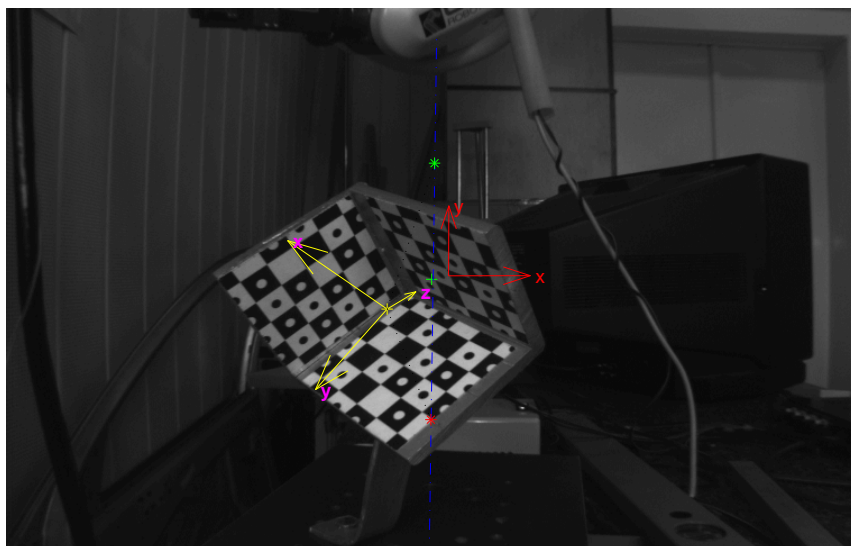
Obrázek 5.10: Chyba měření posunutí pro různá zaměření referenčních bodů terčíku



Obrázek 5.11: Chyba měření posunutí pro různé odhady radiálního zkreslení



Obrázek 5.12: Chyba měření posunutí při použití RQ rozkladu a známé kalibrační matice kamery



Obrázek 5.13: Pohled z kamery

5.2.2 Měření posunutí, úhlu natočení a sledování trajektorie

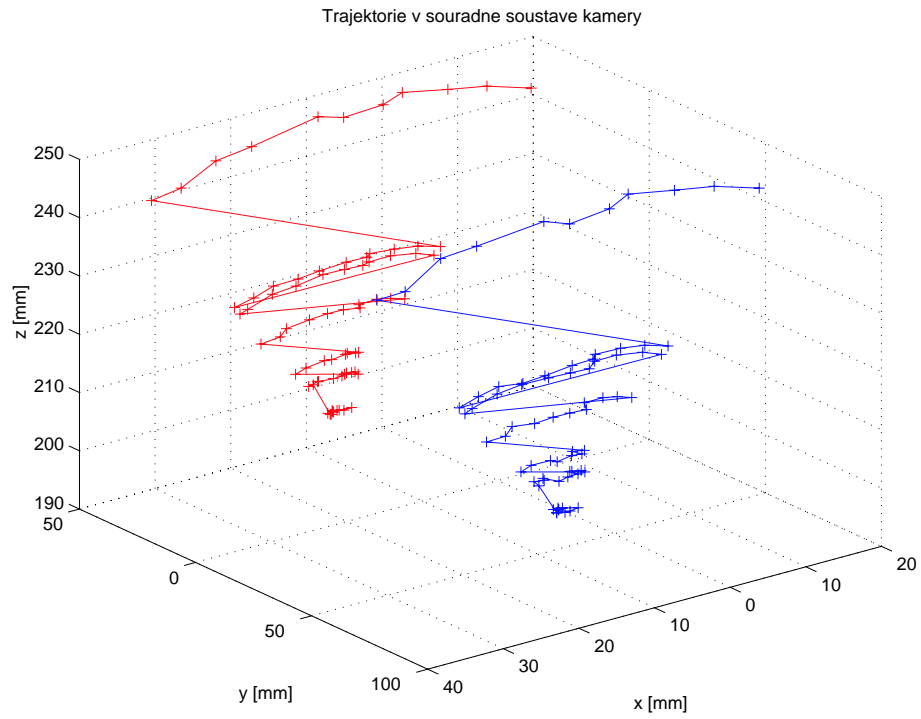
Následující experiment byl rovněž realizován na soustavě otočně-posuvného stolku, viz obr. 5.1 a je kopií dříve popsaného simulovaného experimentu na reálné soustavě. Výsledky tohoto experimentu jsou obdobné jako výsledky experimentu simulovaného.

Na obr. 5.13 je obraz z kamery doplněný pomocí zpětné projekce do obrazu o souřadné soustavy kamery a terčiku, osu otáčení a významné body podobně jako obr. 5.2.

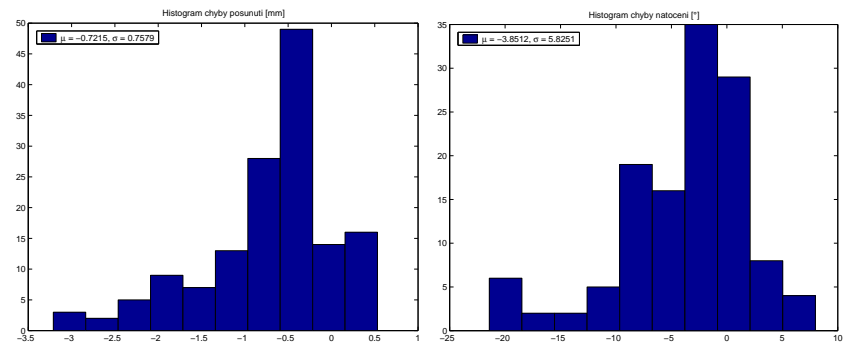
5.3 Měření trajektorie na artikulátoru

Následující experiment je měřením kloubní dráhy artikulátoru, tedy modelu čelistního kloubu. Naměřená trajektorie by proto měla být velice blízká kloubní dráze člověka. Cílem experimentu je toto demonstrovat a posoudit souvislost výsledné trajektorie.

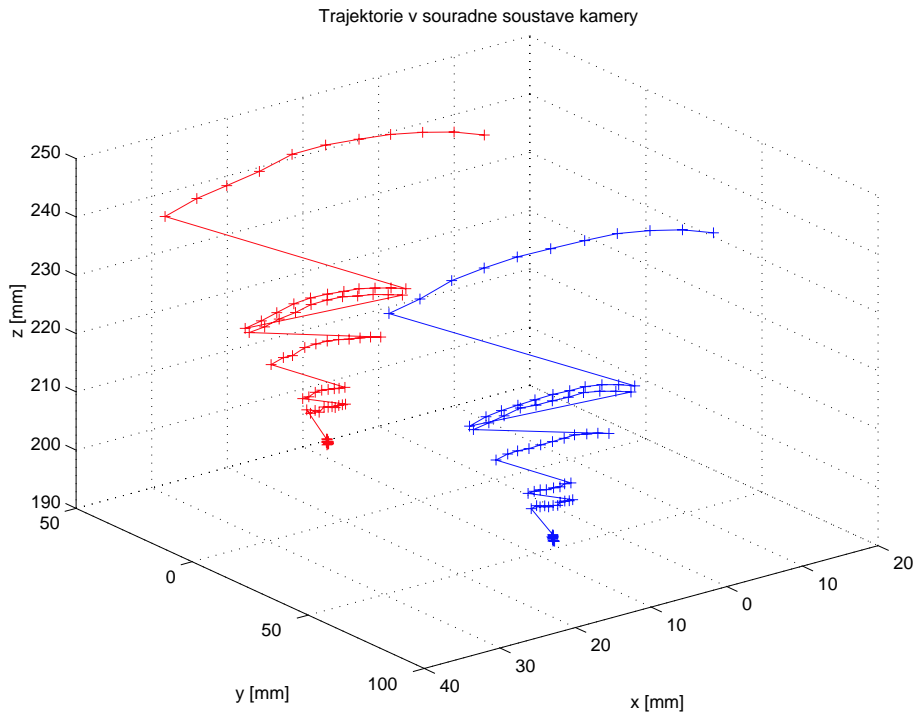
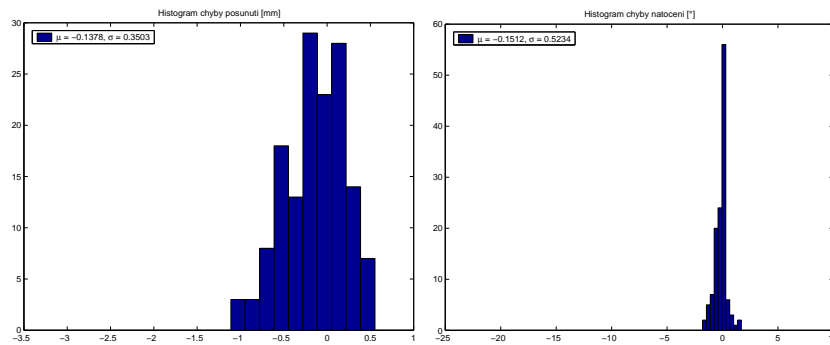
Při tomto experimentu je artikulátor pevně spojen s podložkou. Kamera je rovněž pevně upevněna k podložce, rovnoběžně s podložkou. Pohybuje se pouze čelist artikulátoru, proto není nutné zavádět další referenční terčik.

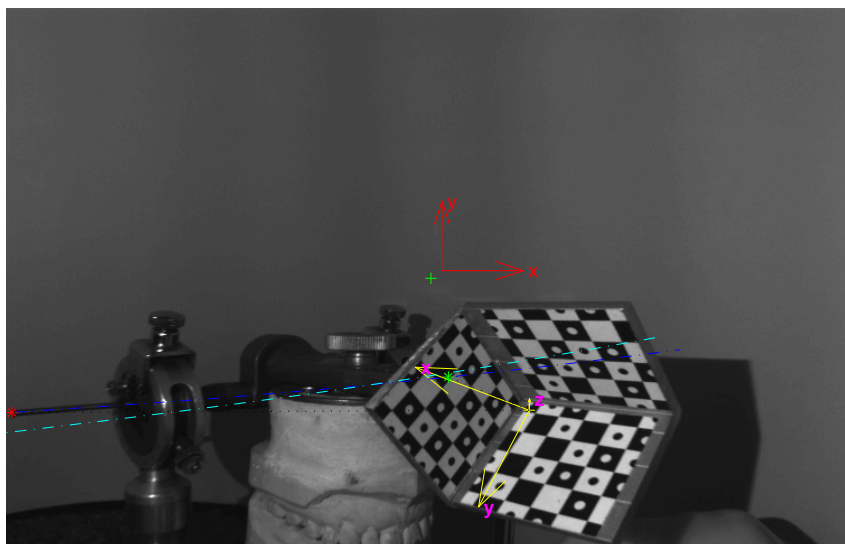


Obrázek 5.14: Trajektorie (RQ rozklad)



Obrázek 5.15: Histogramy chyb posunutí a otočení (RQ rozklad)

Obrázek 5.16: Trajektorie (použití známé kalibrační matice kamery \mathbf{K})Obrázek 5.17: Histogramy chyb posunutí a otočení (použití známé kalibrační matice kamery \mathbf{K})



Obrázek 5.18: Pohled z kamery

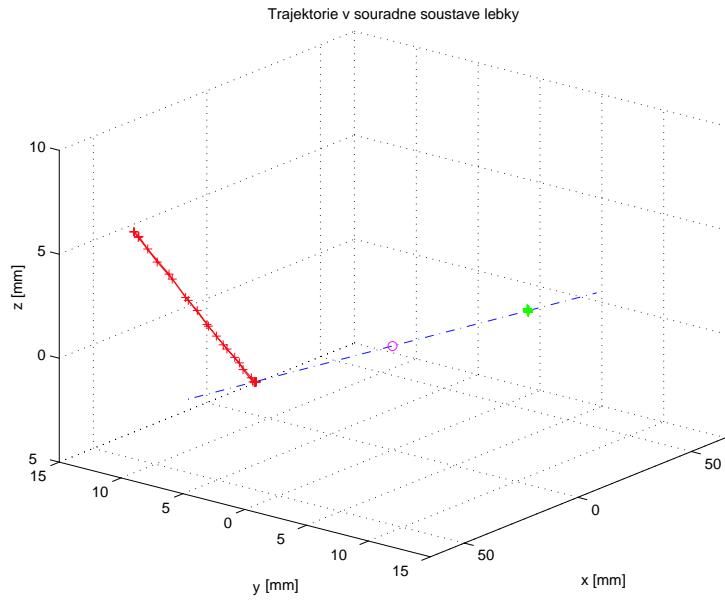
Nejprve provedeme pohyb otevírání úst, při kterém se odhadne poloha osy kloubu, na které se určí polohy kloubních hlaviček \mathbf{x}^l , \mathbf{x}^r . Poté se provedou další předepsané pohyby a vypočítá se kloubní dráha v souřadné soustavě kamery.

Kloubní dráhu v souřadné soustavě kamery nyní transformuje do souřadné soustavy „lebky“, jak je popsáno v kapitole 4.1. Pro jednoduchost uvažujme rovinu podložky rovnoběžnou s okluzní rovinou. Její normála je v tomto uspořádání osa y kamery.

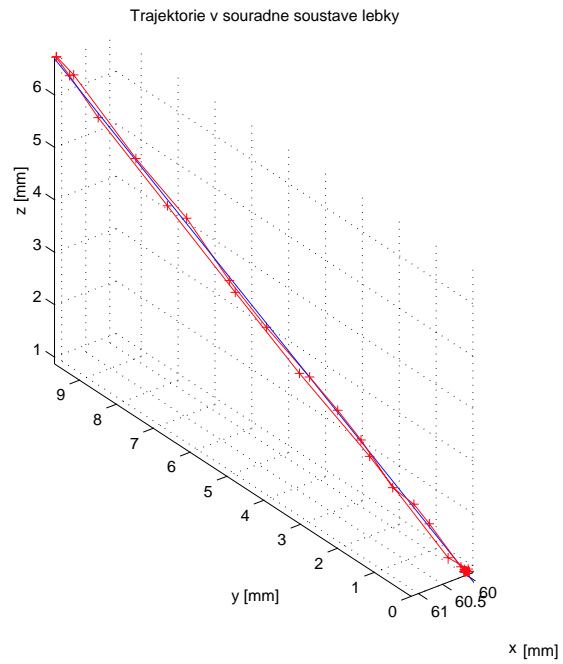
Na obr. 5.18 je pohled z kamery doplněný pomocí zpětné projekce o prvky jako na obr. 5.2 nebo obr. 5.13. Navíc je zde (světle modrou barvou) zakreslena původní poloha osy při zavřených ústech.

Na obr. 5.19 je výsledná trajektorie obou kloubních hlaviček při stranovém pohybu čelisti vpravo. Je vidět, že se pohybuje pravá kloubní hlavička a levá se naopak téměř nepohybuje. Všimněme si rovněž, že osa kloubu která je na obr. 5.19 nakreslena modrou čerchovanou čarou neleží přesně v ose x , což je dáno tím, že normála okluzní roviny (roviny podložky) není přesně kolmá na směřnici osy. To je důsledek vzájemné polohy artikulátoru, podložky a kamery.

Na obr. 5.20 je trajektorie pouze pravé kloubní hlavičky, přičemž graf má stejná měřítka na osách. Takto můžeme posoudit souvislost výsledné trajektorie. Oscilace kolem přímky, která je těmito body proložena, dosahují asi 0.1 mm, což je uspokojivý výsledek.



Obrázek 5.19: Trajektorie při pohybu čelisti vpravo (obě kloubní hlavičky)



Obrázek 5.20: Trajektorie při pohybu čelisti vpravo (pravá kloubní hlavička)

Kapitola 6

Implementace

Metodu, kterou jsme popsali v předchozích kapitolách, jsme implementovali v systému MATLAB. V této kapitole implementaci stručně popíšeme.

Protože všechny naprogramované funkce jsou doplněny o podrobnou nápovědu včetně funkčních prototypů, nebudeme se zabývat každou konkrétní funkcí, ale spíše vysvětlíme souvislost jednotlivých programových bloků s konkrétními kapitolami v této práci.

Každému významnějšímu celku odpovídá samostatný adresář, který obsahuje několik funkcí. Uvedeme vždy pouze tento adresář a významné funkce v něm obsažené, vynecháme privátní funkce.

Ct2

Detekce referenčních bodů v obrazu, nadstavba detektoru CTDetect, viz 3.2.1.

`ct2.m` - hlavní funkce adresáře

RadialD

Radiální zkreslení.

RDT - Radial Distortion Toolbox, viz [7]

`radialD_correct.m` - korekce radiálního zkreslení

`radialD_distort.m` - přidání radiálního zkreslení, pro simulace

Cal_err

Analýza přesnosti zaměření referenčních bodů terčíku, viz 3.2.2.

`cal_error.m` - hlavní funkce adresáře

Axis

Odhadování polohy osy kloubu z pohybu otevírání a zavírání úst, odpovídá kapitole 4.2.

`find_axis.m` - metoda proložení rovinou a kružnicí, viz kapitola 4.2.1

`find_axis2.m` - metoda invariantního prostoru zobrazení, viz kapitola 4.2.2

`jj_pos.m` - hlavní funkce

Pos

Měření polohy terčíku v prostoru, viz kapitola 3.

`corresp.m` - přiřazení korespondujících bodů terčíku a obrazu

`getM.m` - odhad projekční matice M

`moveM.m` - výpočet pohybové matice A , viz 3.1

`rq_gs.m` - RQ rozklad

Trajectory

Měření trajektorie čelisti viz kapitola 4.

`jj_trajectory.m` - výpočet trajektorie, hlavní funkce

`cam2skull.m` - vyjádření vektoru v souřadné soustavě lebky

`list_trans.m` - transformace vektoru seznamem matic

Simul

Simulace, viz kapitola 5.1.

`gener_world.m` - vygenerování virtuální scény

`demo_find_axis.m` - demonstrace odhadu polohy osy rotace

`demo_trajectory.m` - simulace pokusu s otočně-posuvným stolcem, viz 5.2

Experiments

Adresář obsahuje funkce a skripty vztahující se k provedeným experimentům. Důležité jsou soubory `results#.m`, které prezentují jejich výsledky. Symbol # znamená číslo experimentu.

Stereo

Soubor funkcí používaných při zaměřování referenčních bodů terčíku.

vTarget

Generování virtuálního obrazu terčíku, viz A.

`demo_vTarget.m` - demonstrace

Shared_files

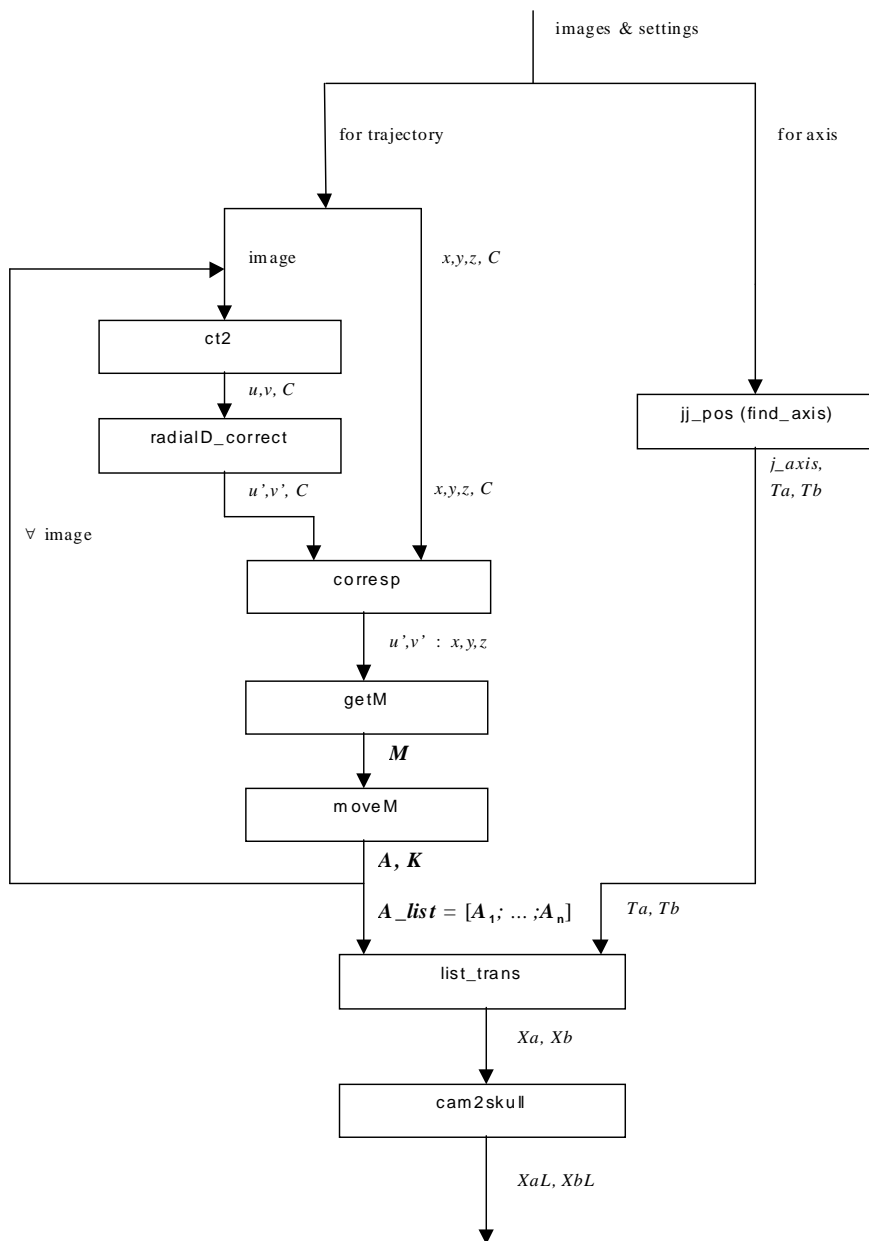
V tomto adresáři jsou obsažena data a soubory sdílené různými funkcemi, jako např. tabulky zaměření referenčních bodů terčíku, či koeficienty radiálního zkreslení objektivu.

Util

Soubor servisních, obecně použitelných funkcí, které se přímo nevztahují k tomuto problému.

Hlavní funkcí, která vypočítá trajektorii ze sekvence obrazů terčíku, je funkce `jj_trajectory.m`. Na obr. 6.1 uvádíme její blokové schéma.

Vstupem této funkce je seznam souborů s obrazy pro odhad polohy osy a obrazy pro výpočet trajektorie. Dále tabulka zaměření referenčních bodů terčíku, parametry radiálního zkreslení, případně kalibrační matice kamery a další nastavení. Výstupem je výsledná trajektorie v souřadné soustavě lebky, jako seznam bodů levé a pravé kloubní hlavice a další mezivýsledky z výpočtů.



Obrázek 6.1: Blokové schéma hlavní funkce

Nejprve se odhadne poloha osy v souřadné soustavě terčiku *j_axis*. Na ní se určí polohy kloubních hlav, tedy bodů T_a, T_b , viz funkce `jj_pos.m`.

Dále je počítána pro každý bod trajektorie, tj. každý obraz, pohybová matice \mathbf{A} udávající polohu terčiku. Funkcí `ct2.m` se v každém obraze detekují referenční body (u, v) . Následně se odstraní radiální zkreslení, pomocí funkce `radialD_correct.m`, body s korigovaným radiálním zkreslením jsou na obr. 6.1 označeny (u', v') . Přiřazení detekovaných bodů v obraze a korespondujících bodů terčiku podle kódu C provede funkce `corresp.m`. Z těchto dvojic korespondujících bodů se odhadne projekční matice \mathbf{M} , což realizuje funkce `getM.m`. Funkce `moveM.m` provádí extrakci pohybové matice \mathbf{A} .

Tyto matice se pro každý obraz shromažďují do seznamu `A_list` a funkce `list_trans.m` hromadně transformuje body obou kloubních hlav T_a, T_b , čímž získáme body trajektorie X_a, X_b . Transformací těchto bodů do souřadné soustavy lebky pomocí funkce `cam2skull.m` získáme výslednou trajektorii X_aL, X_bL .

Kapitola 7

Závěr

Navrhli jsme jednoduchou metodu měření kloubní dráhy spodní čelisti. Vyšetření naší metodou je oproti konvenčním metodám mnohem méně časově náročné.

Pro pacienta je vyšetření méně nepříjemné. Navrhované zařízení má jednoduchou mechanickou konstrukci a zejména není nutné fixovat pacientovu hlavu.

Metoda navíc automaticky odměřuje orientaci okluzní roviny, viz kapitola 4.3, a polohu koubních hlavic, viz kapitola 4.2. Jediné co je třeba přímo měřit, je vzdálenost kloubních hlavic, která se ovšem měří velice snadno, pomocí nějaké vhodné modifikace posuvného měřidla.

Navrženou metodu jsme implementovali v prostředí MATLAB. Provedli jsme sérii experimentů demonstrujících její funkčnost a použitelnost.

Při měření kloubní dráhy na artikulátoru, tj. v podmínkách blízkých skutečnému měření kloubní dráhy člověka, je přesnost přibližně 0.1 mm. Přesnost měření je tedy vzhledem k aplikaci dostatečná.

V budoucnu je třeba provést skutečné měření kloubní dráhy čelisti člověka. Dosud jsme neměli k dispozici vhodné terčíky, které se nasadí na zuby pokusné osoby. Terčíky budou v nejbližší době vyrobeny.

Objevily se také problémy detektoru referenčních bodů v obrazu. Detektor má totiž problémy při velkém sklonu kalibračního vzoru. Při tomto měření, kdy jsou ve scéně dva terčíky, je nutné, aby se v každém obrazu detekovaly minimálně dvě stěny z každého terčíku. Toto se bohužel ve většině případů nedaří. V CMP je ale vyvíjena úprava detektoru, která tento nedostatek odstraní.

Příloha A

Generování virtuálního obrazu terčíku

Při testování detektoru referenčních bodů v obraze (CTDetect, viz [5], [6]) jsme vytvořili program, který umožňuje generovat libovolný pohled na terčík a vytvořit takový jeho obraz, který je podobný skutečnému obrazu sejmutému použitou kamerou.

Pomocí tohoto programu potom můžeme vytvořit virtuální scénu jednoho nebo dvou terčíků a na výsledný obraz přímo použít CTDetect. Toto nám umožnilo zjistit, jak vystříhnout a nalepit kalibrační vzor na stěny terčíků, viz obr. A.1 a posoudit další vlastnosti detektoru (přípustný sklon terčíku), bez nutnosti provádění zdoluhavých reálných experimentů.

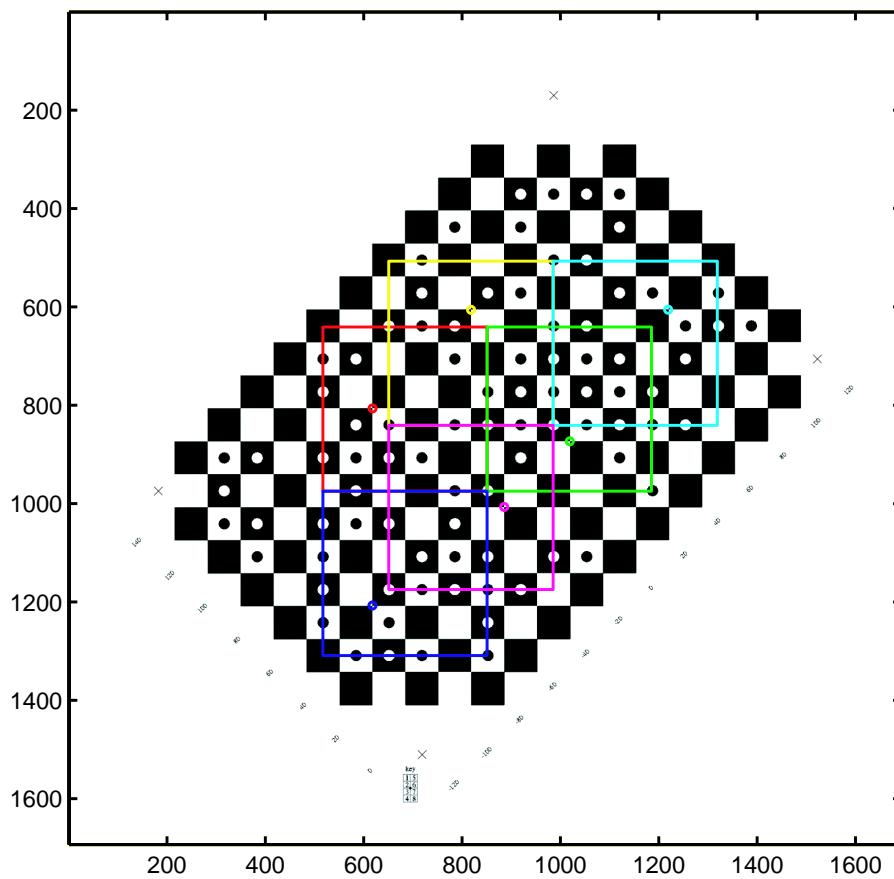
Na obr. A.1 je zobrazen originální kalibrační vzor, ze kterého vystříhneme jednotlivé stěny terčíků. Zelená, červená a modrá stěna tvoří první terčík a tyrkysová, fialová a žlutá tvoří druhý terčík. Postačí dva různé terčíky - horní H a dolní D , nebo horní H a planární P . Terčík P spojený s přípravkem na měření orientace okluzní roviny a dolní terčík D se nikdy nepoužívají současně, viz kapitola 4.1.

Na obr. A.1 jsou také zobrazeny kroužkem příslušné barvy identifikační referenční body každé roviny. Jedná se o body jádra, viz [5], [6], unikátní pro každou rovinu, které jsou spojeny v grafu sousedů se všemi ostatními detekovanými body příslušné roviny v obraze terčíků. Takto je zajištěna jednoznačná identifikace každé roviny terčíku.

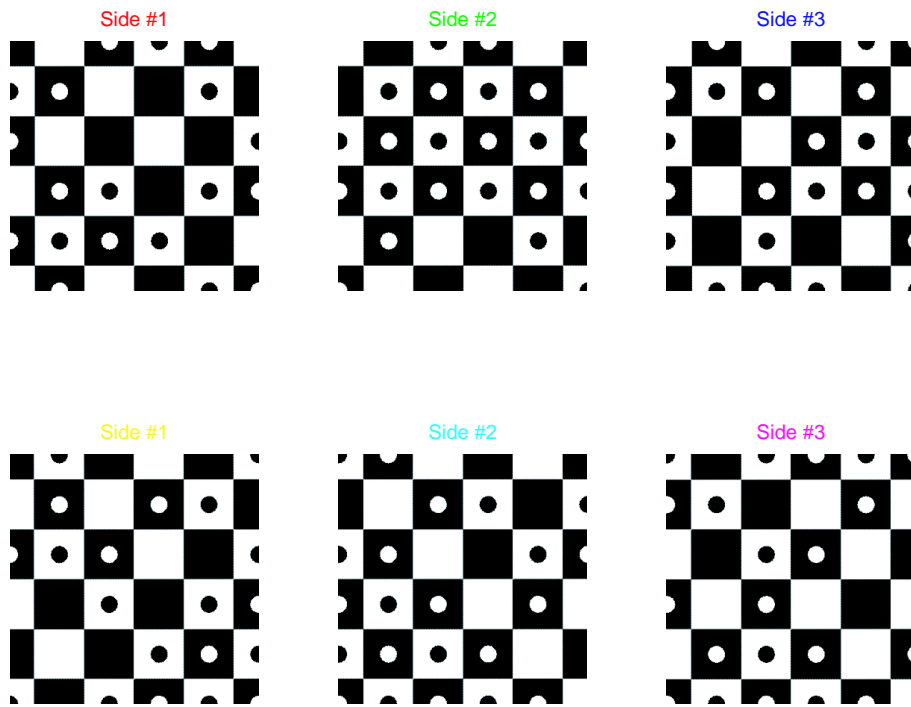
Postup při generování virtuálního obrazu terčíku, je následující. Vytvoříme trojrozměrný „drátový“ model scény. Tuto scénu v souřadné soustavě kamery promítneme přes matici perspektivní kamery do obrazu. Nakonec na jednotlivé plochy terčíku namapujeme příslušné textury kalibračního vzoru.

Vytvoříme trojrozměrný model terčíku. Jeho vrcholy zapišme jako matici bodů:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & h & h & h & 0 & 0 \\ 0 & h & h & 0 & 0 & 0 & h \\ 0 & 0 & 0 & 0 & h & h & h \end{bmatrix}, \quad (\text{A.1})$$



Obrázek A.1: Kalibrační vzor



Obrázek A.2: Kalibrační vzor jednotlivých stěn terčíku

kde h je velikost hrany terčíku: $h = 35$ mm. Takto tvořený terčik potom „umísťme“ před kameru:

$$\mathbf{x}_C = \mathbf{R}\mathbf{x} + \mathbf{t}, \quad (\text{A.2})$$

kde \mathbf{x}_C jsou body v souřadné soustavě kamery, \mathbf{R} je matice rotace a \mathbf{t} je translační vektor. Na obr. A.3 jsou zobrazeny trojrozměrné modely dvou terčků, hvězdička označuje kameru s optickou osou v ose z .

Body terčíku v souřadné soustavě kamery promítneme přes její kalibrační matici do obrazu, viz 2.6:

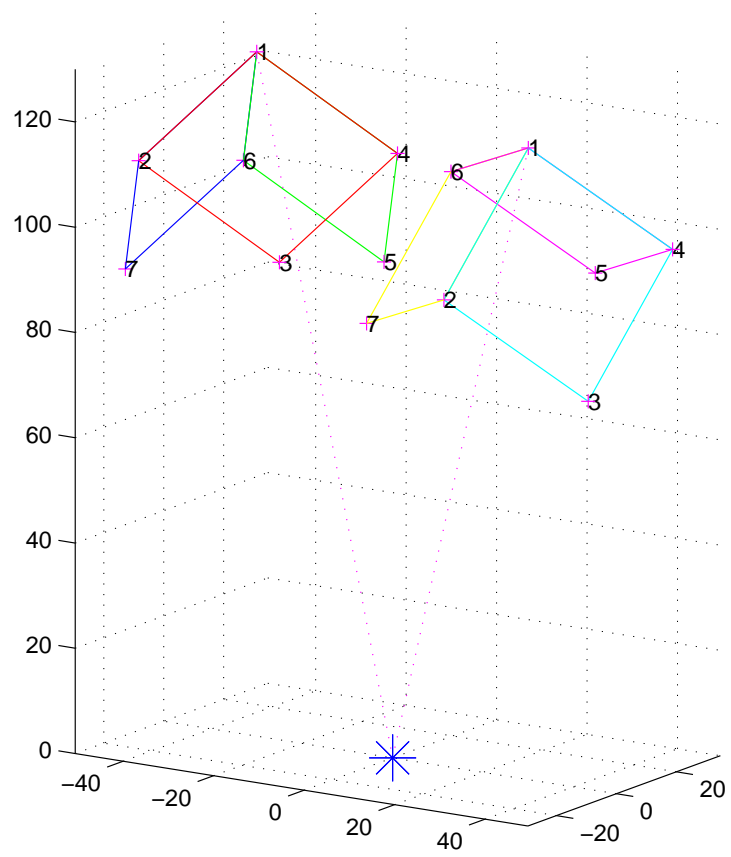
$$\tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{K}\mathbf{x}_C. \quad (\text{A.3})$$

Výsledný obraz terčků je na obr. A.4.

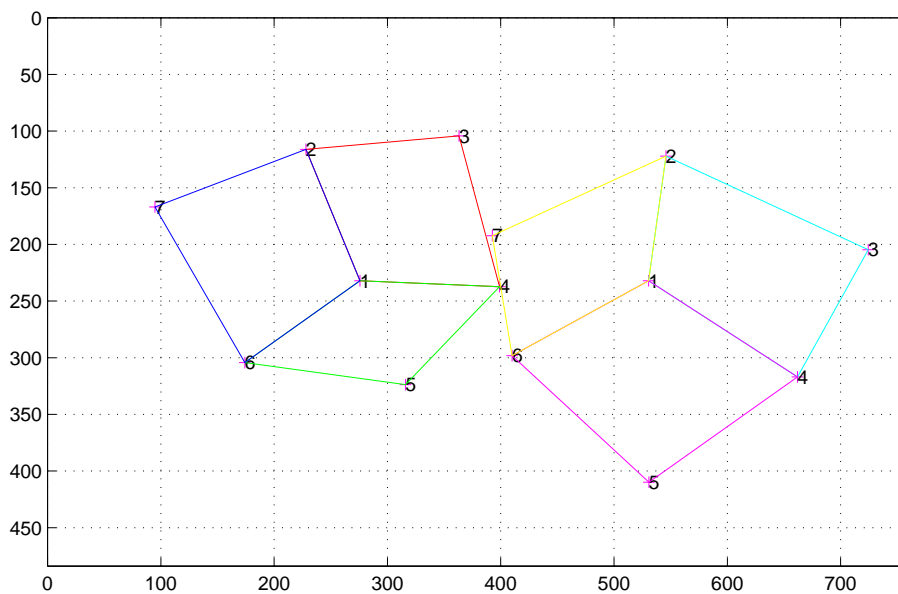
Plochy terčíku jsou dány propojením sousedních vrcholů. Nyní do těchto ploch v obraze namapujeme příslušné textury kalibračního vzoru jednotlivých stěn, viz obr. A.2.

Mapování je geometrická transformace, viz [2], jejíž matici vypočítáme z polohy korespondujících bodů každé plochy v obrazu scény, viz obr. A.4, a textury, viz obr. A.2. Korespondujícími body jsou 4 rohy plochy a textury.

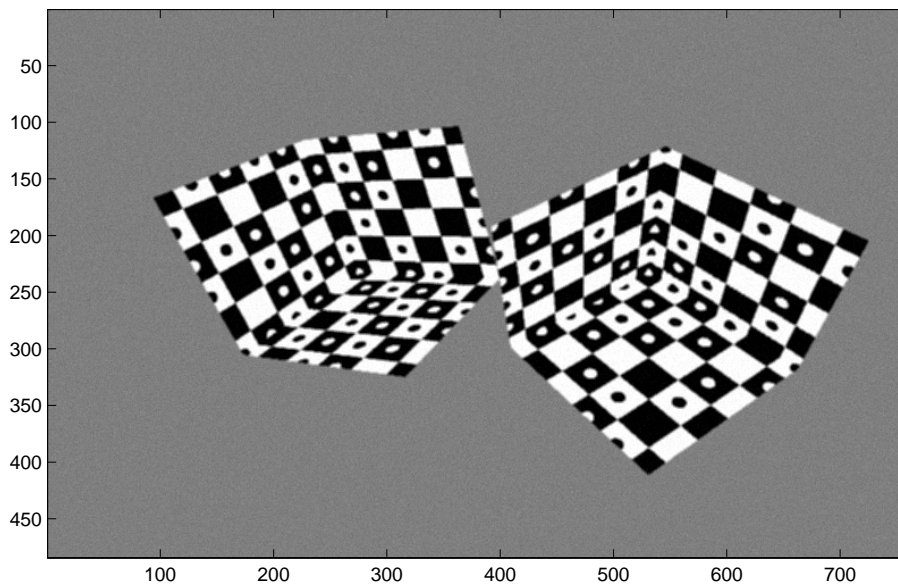
Po provedení geometrických transformací ještě obraz „rozmažeme“ konvolucí s průměrující maskou (velikosti 3×3) a přidáme šum (gaussovský šum se směrodatnou odchylkou $\sigma = 2\%$ intenzity). Výsledný virtuální obraz terčků je na obr. A.5.



Obrázek A.3: Model terčů v prostoru



Obrázek A.4: Průmět trojrozměrného modelu do obrazu



Obrázek A.5: Virtuální obraz terčičků

Příloha B

Obsah CD

CD obsahuje veškeré elektronické materiály, které jsme vytvořili v rámci této práce. Uvedeme popis adresářů:

Matlab

Funkce a skripty v Matlabu. Jejich popis je uveden v kapitole 6.

DATA

Obsahuje data jednotlivých experimentů. Jde o obrazy sejmuté kamerou, soubory typu *.png, případně soubory obsahující pouze detekované body, typ *.mat.

Text

Text této diplomové práce.

Talk

Prezentace semináře na toto téma v CMP.

Literatura

- [1] Šonka M., Hlaváč V., Boyle R.D.: *Image Processing, Analysis and Machine Vision*, PWS, Boston, 1998
- [2] Hlaváč V., Sedláček M.: *Zpracování signálu a obrazu*, skriptum ČVUT, 2000
- [3] Asada H., Slotine J.J.E.: *Robot Analysis and Control*, John Wiley and Son, New York, 1986
- [4] Krajník E.: *Maticový počet*, skriptum ČVUT, 1998
- [5] Mezsáros C.: *Automatic detection of the calibration pattern of the perspective camera*, Diplomová práce MFF UK, 2000
- [6] Mareček P.: *Systém kalibrace kamer*, Diplomová práce FEL ČVUT, 2001
- [7] Pajdla T., Werner T., Hlaváč V.: *Correcting Radial Lens Distortion without Knowledge of 3-D Structure*, CMP research report, 1997
- [8] Hartley, R. and Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000
- [9] Faugeras, Olivier: *Three-Dimensional Computer Vision: Recognizing and Locating Objects and Places*, MIT Press, 1993
- [10] Faugeras, Olivier and Quang-Tuan Luong and Papadopoulos, Théo: *The Geometry of Multiple Images: The Laws That Govern the Formation of Multiple Images of a Scene and Some of Their Applications*, MIT Press, 2001