

Bakalářská práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra kybernetiky

# Kalibrace kamery pro robotické pracoviště

**Jaroslav Lištvan**

Studijní program: Kybernetika a robotika  
Obor: Robotika

Leden 2018

Vedoucí práce: Ing. Pavel Krsek, Ph.D.





## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student:** Jaroslav Lištván  
**Studijní program:** Kybernetika a robotika (bakalářský)  
**Obor:** Robotika  
**Název tématu:** Kalibrace kamery pro robotické pracoviště

### Pokyny pro vypracování:

1. Seznamte se s metodami kalibrace kamery implementovanými v knihovně OpenCV a vzájemné kalibrace kamery a manipulátoru.
2. Připojte k počítači kameru Nikon a připravte pro pořizování snímků v prostředí ROS (Robot Operating System).
3. Realizujte kalibraci kamery prostřednictvím knihovny OpenCV.
4. Navrhněte a realizujte vzájemnou kalibraci manipulátoru a kamery, aby bylo možné provádět manipulaci na základě snímků pořízených kamerou.
5. Vše pečlivě dokumentujte.

### Seznam odborné literatury:

- [1] M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle: Image Processing, Analysis and Machine Vision. Thomson, 3rd edition, ISBN 978-0-495-08252, 2007.
- [2] R. Hartley and A. Zisserman: Andrew. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge University, 2nd edition, ISBN 0-521-54051-8, 2003.
- [3] J. Heller, M. Havlena, T. Pajdla: Globally Optimal Hand-Eye Calibration Using Branch-and-Bound. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI), ISSN 0162-8828, 38(5), pages 1027-1033, 2016.
- [4] P. F. Sturm and S. J. Maybank: On plane-based camera calibration: A general algorithm, singularities, applications. In CVPR, ISSN: 1063-6919, pages 1432-1437. IEEE Computer Society, 1999.

**Vedoucí bakalářské práce:** Ing. Pavel Krsek, Ph.D.

**Platnost zadání:** do konce letního semestru 2017/2018

L.S.

prof. Dr. Ing. Jan Kybic  
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.  
děkan

V Praze dne 9. 1. 2017

## Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych poděkovat Ing. Pavlu Krskovi, Ph.D. za ochotu a podporu v průběhu psaní této práce.

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

V Praze dne 9. 1. 2018

.....

## Abstrakt / Abstract

Práce se zabývá kalibrací kamery na robotickém pracovišti. Cílem je odhad vnějších a vnitřních parametrů kamery. Tedy zajištění opravy deformace obrazu poskytnutého kamerou a odhadnutí její polohy a orientace v rámci robotického pracoviště. Účelem je umožnit použití kamery ke snímání pracovního prostoru, aby na základě této informace bylo možné provádět robotickou manipulaci s předměty.

**Klíčová slova:** OpenCV, kalibrace, kamera, Aruco

This thesis studies camera calibration in robotic workspace. Goal is to estimate extrinsic and intrinsic camera parameters. Thus enable undistortion of image provided by camera, and estimating camera's position and orientation in robotic workspace. Purpose of this thesis is to enable use of camera to gather accurate information about camera workspace to be used for robotic manipulation with objects in camera workspace.

**Keywords:** OpenCV, calibration, camera, Aruco

**Title translation:** Camera calibration for robotic workspace

## / Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	1
<b>2 Robotické pracoviště</b> .....	2
2.1 Kamera .....	2
2.2 Objektiv .....	3
2.3 Robot .....	4
2.4 Pracovní prostor .....	5
<b>3 Záznam obrazu a dat</b> .....	6
<b>4 Matematický model kamery</b> .....	7
4.1 Model kamery .....	7
4.2 Zobrazení souřadnic bodů do zobrazovací roviny .....	8
4.3 Parametry kamery .....	9
4.3.1 Vnitřní parametry .....	9
4.3.2 Vnější parametry .....	10
4.4 Zkreslení obrazu .....	11
4.4.1 Tangenciální zkreslení ...	11
4.4.2 Radiální zkreslení .....	12
<b>5 Kalibrace kamery</b> .....	13
5.1 Implementace v OpenCV .....	14
5.2 Získání parametrů zpracová- ným snímků kalibru .....	15
<b>6 Vzájemná kalibrace robota a   kamery</b> .....	16
6.1 Určení dvojrozměrných sou- řadnic značky a knihovna ArUco .....	17
6.2 Určení trojrozměrných sou- řadnic značky ArUco .....	19
6.3 Výpočet polohy kamery .....	20
6.4 Promítnutí bodů do roviny pracovní plochy .....	21
6.5 Výpočet reprojekční chyby ...	21
<b>7 Experimenty</b> .....	22
7.1 Kalibrování kamery .....	22
7.1.1 Získání snímků kalibru ..	22
7.1.2 Zpracování snímků .....	22
7.1.3 Vyhodnocení výsledků ...	23
7.2 Kalibrace robota a kamery ...	24
7.2.1 Získání sad souřadnic ...	24
7.2.2 Zpracování snímků .....	24
7.2.3 Vyhodnocení výsledků ...	25
<b>8 Závěr</b> .....	26
<b>Literatura</b> .....	27

## Tabulky / Obrázky

2.1. Parametry fotoaparátu Nikon D5100 .....	3	2.1. Robotické pracoviště .....	2
2.2. Parametry objektivu AF Nikkor 50mm f/1.8D .....	3	2.2. Fotoaparát Nikon .....	3
		2.3. Objektiv Nikkor .....	4
		2.4. Robotická sestava .....	4
		2.5. Schéma rozvržení zařízení na pracovišti .....	5
		4.1. Ilustrace promítání kamerou.....	7
		4.2. Model promítání do zobrazovací roviny .....	8
		4.3. Promítání pozorovaného bodu na průmětnu .....	9
		4.4. Transformace souřadnic mezi soustavou souřadnic kamery a pracoviště.....	10
		4.5. Vzájemná poloha čočky a snímacího čipu .....	11
		4.6. Průchod paprsků čočkou způsobující radiální zkreslení .....	12
		4.7. Podoba radialního zkreslení na obrázku šachovnice .....	12
		5.1. Kalibrační obrazce - šachovnicové s různými počty bodů ..	13
		5.2. Kalibrační obrazec - šachovnicový s detekovanými kalibračními body .....	14
		5.3. Promítání na rovinu zobrazovacího čipu .....	15
		6.1. Poloha pozorovaných bodů v pracovišti a jejich promítnutí na průmětnu kamery.....	16
		6.2. Ukázka značek ArUco různých slovníků značek.....	17
		6.3. Značky ArUco detekované ve snímku s označenými rohy .....	18
		6.4. Značky ArUco s nalezeným středem a orientací .....	18
		6.5. Model gripperu s umístěnou značkou ArUco a zobrazenou sledovanou osou $r2@x\_gripper$ .	19
		6.6. Souřadnice a orientace soustavy souřadnic gripperu $r2@x\_gripper$ v RVIZ .....	20
		7.1. Ukázka umístění kalibračního obrazce .....	22
		7.2. Nastavování ramena ke snímání značky ArUco .....	24



# Kapitola 1

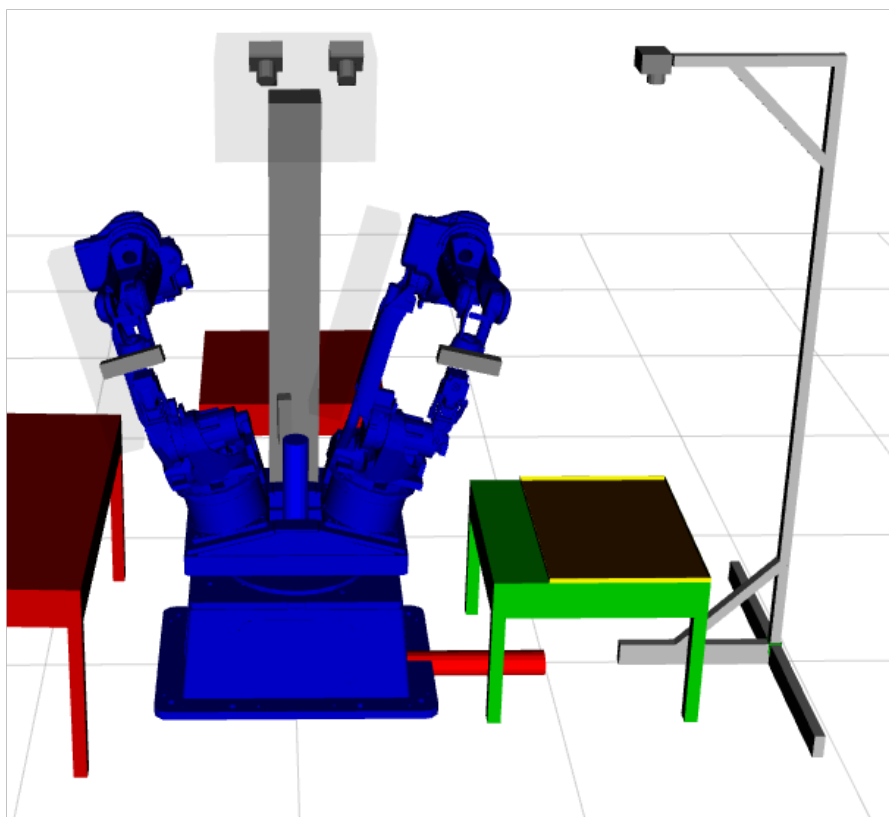
## Úvod

Tato práce se zabývá kalibrací kamery a vzájemnou kalibrací kamery a robota na robotickém pracovišti. Cílem je pomocí kalibrace kamery umožnit její přesnější použití k provádění měření v oblasti pracovní plochy. Dále je cílem pomocí vzájemné kalibrace robota a kamery umožnit použití výsledků těchto měření pracovní plochy k řízení manipulčního ramena robota a manipulaci s předměty v oblasti pracovní plochy. K provedení těchto úkolů budou využity nástroje knihovny OpenCV. Výsledkem bude získání vnitřních parametrů kamery popisující geometrii jejich promítání obrazu a zkreslení způsobená použitím objektivu. U vzájemné kalibrace robota a kamery bude získána poloha a orientace kamery v soustavě souřadnic používané robotem, které nám umožní popsat polohu předmětů pozorovaných kamerou v souřadnicích používaných manipulátorem.

## Kapitola 2

### Robotické pracoviště

Pro tuto úlohu je robotickým pracovištěm prostor obsahující následující. Robotická sestava tvořená dvěma svařovacími rameny na otočné základně. Stůl v manipulačním dosahu robota na kterém spočívá táč tvořící pracovní plochu. Kamera umístěna nad táčem zabírající celou jeho plochu.



Obrázek 2.1. Model robotické pracoviště v simulátoru Rviz

Pod základnou robotické sestavy definujeme kartézskou soustavu souřadnic robotického pracoviště  $F_{RP}$ . Počátek této soustavy se nachází v úrovni podlahy s rovinou tvořenou osami X a Y odpovídající rovině podlahy a osou Z směřující vzhůru.

### 2.1 Kamera

Na robotickém pracovišti je ke snímání pracovní plochy je použit fotoaparát Nikon Digital SLR Camera D5100 [1]. Kamera je napájena z robotické sestavy a ke komunikaci s ní slouží USB kabel, kterým je připojena k PC. Kamera je upevněna na konstrukci, která ji drží nad středem pracovní plochy. Zorné pole kamery dané vybraným objektivem je namířeno svisle k zemi přibližně na střed pracovní plochy.



Obrázek 2.2. Fotoaparát Nikon D5100

PARAMETR	HODNOTA
Typ	Nikon Digital SLR Camera D5100
Rozlišení	4928 x 3264 px
Počet efektivních pixelů	19.2 Mpx
Velikost senzoru	23.6 x 15.6 mm (ASP-C Nikon)
Obrazové pole	95% obrazu vertikálně i horizontálně
Typ senzoru	CMOS
Upevňovací bajonet	Bajonet Nikon F (s AF kontakty)

Tabulka 2.1. Parametry fotoaparátu Nikon D5100 [1]

## 2.2 Objektiv

Použitým objektivem je objektiv AF Nikkor 50mm f/1.8D [2]. Tento objektiv byl vybrán vzhledem k požadavkům kladenými pracovním prostorem. Objektiv je namontován na kameru nacházející se nad pracovní plochou a je na ní namířen. Proto byl objektiv vybrán tak, aby jeho zorné pole obsáhlo celou pracovní plochu. Rozmezí pro výšku umístění kamery nad pracovní plochou je omezeno použitím robotických ramen a výškou stropu. Tomuto odpovídá objektiv s ohniskovou vzdáleností 50 mm. Vzhledem k vzdálenosti od pracovní plochy vybíráme nastavení clony 5.6. Toto znamená hloubku ostrosti od X1 do X2 pro zaostření na táč v pracovní ploše ve vzdálenosti Y. V tomto rozmezí se nachází celá pracovní plocha.

PARAMETR	HODNOTA
Typ	AF Nikkor 50mm f/1.8D
Ohnisková vzdálenost	50 mm
Světelnost	f/1.8
Obrazový uhel	46 stupňů
Nejkratší zaostřitelná vzdálenost	0.45 m

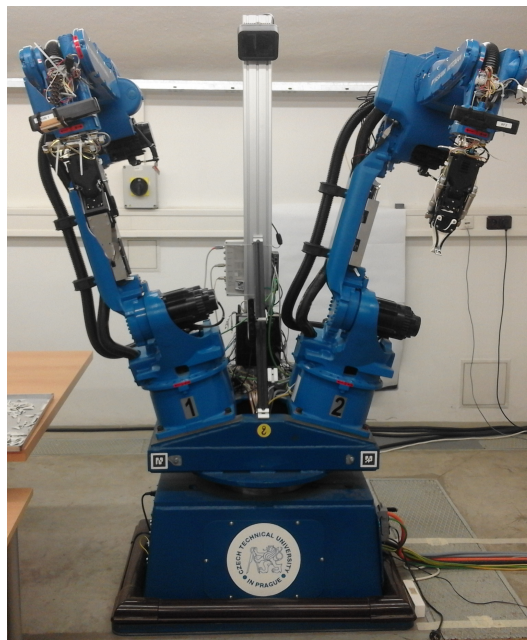
Tabulka 2.2. Parametry objektivu AF Nikkor 50mm f/1.8D [2]



Obrázek 2.3. Objektiv AF Nikkor 50mm f/1,8D

## 2.3 Robot

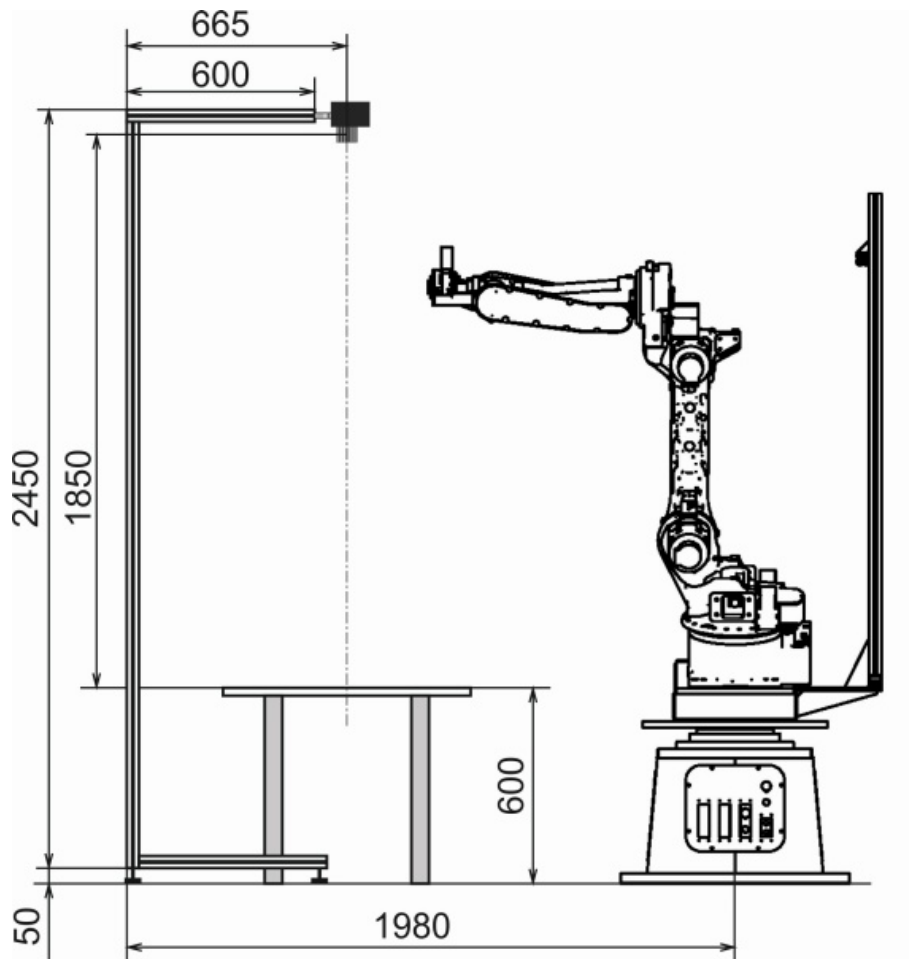
Použitým robotem je sestava dvou svářečských ramen Motoman MA1400 upevněných na otočné základně. Ramena disponují šesti stupni volnosti s dosahem 1434 mm a maximální nosností 3 kg. Konce ramen jsou vybaveny uchopovacími mechanismy pro manipulaci s drobnými předměty. [3]



Obrázek 2.4. Robotická sestava

## 2.4 Pracovní prostor

Pracovním prostorem pro účely řešení úlohy je plocha kovového tácu o velikosti 80 na 60 cm, který je umístěn na ploše stolu ve výšce 60.6 cm na zemi. Tác je na robotickém pracovišti umístěn tak, aby se celý nacházel v pracovní obálce robotické sestavy. Kamera je umístěna nad středem tácu. Kamera míří svisle k zemi a je zaměřena na střed tácu.



Obrázek 2.5. Schéma rozvržení zařízení na pracovišti [4]

## Kapitola 3

### Záznam obrazu a dat

Tato kapitola popisuje záznam obrazu, který bude použit pro kalibraci kamery a vzájemnou kalibraci robota a kamery. V zadání práce stojí. Připojte k počítači kameru Nikon a připravte pro pořizování snímků v prostředí ROS (Robot Operating System)[5]. Při provádění tohoto úkolu jsem se setkal se značnými obtížemi. I přes vyzkoušení různých balíčků pro ovládání kamer v ROS se mi nepodařilo získat výstup kamery. Při hledání řešení jsem se setkal s knihovnami pro ovládání kamer *libgphoto2* a *libgphoto2-port*. Tyto knihovny umožňují ovládání kamer pomocí jednoduchých povelů a jsou kompatibilní s řadou modelů kamer. Vzhledem ke komplikacím při práci se systémem ROS a jeho nepotřebností ve zbytku práce používám knihovny *libgphoto2* a *libgphoto2-port*. [6]

Práce byla vypracována na počítači s operačním systémem Linux Ubuntu 16.04 LTS. Byly použity knihovny OpenCV a *opencv\_contib* verze 3.2.0 a verze robotického operačního systému *kinetic*. Dále byly nainstalovány knihovny a balíčky projektu *Clopema* za účelem ovládání robota. [7]

Práce byla vypracována na počítači s operačním systémem Linux Ubuntu 16.04 LTS. Byly použity knihovny OpenCV a *opencv\_contib* verze 3.2.0 [8]. K záznamu obrazu slouží program *capture.cpp*, který jsem k tomuto účelu vytvořil. Program po spuštění nabízí náhled pořízeného snímku v nižší kvalitě. Tento náhled lze obnovit stisknutím tlačítka R, či lze tento snímek uložit v plné kvalitě pod výchozím pořadovým jménem stisknutím tlačítka Mezerník. Při uložení snímku se automaticky vytvoří nový náhled. K ukončení programu a uložení posledního snímku slouží tlačítka Esc. Program se spouští z příkazového řádku povelem *./capture*.

Ke kalibracím byly použity programy *calibrate\_RC.cpp* a *calibration.cpp*, které byly adaptovány z ukázkových programů knihovny OpenCV, nebo používají funkce těchto knihoven.

K záznamu dat jako jsou vnitřní parametry kamery, seznamy snímků ke zpracování a zaznamenané souřadnice bodů slouží soubory formátu *yml* a *xml*.

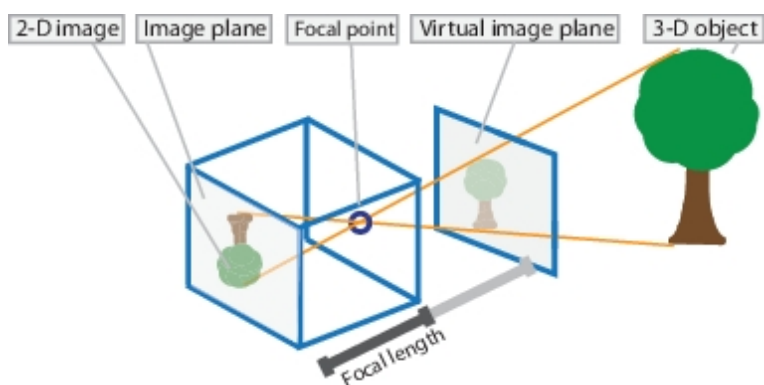
Všechny použité programy, typy souborů a povely ke spuštění jsou součástí přiložených souborů.

# Kapitola 4

## Matematický model kamery

### 4.1 Model kamery

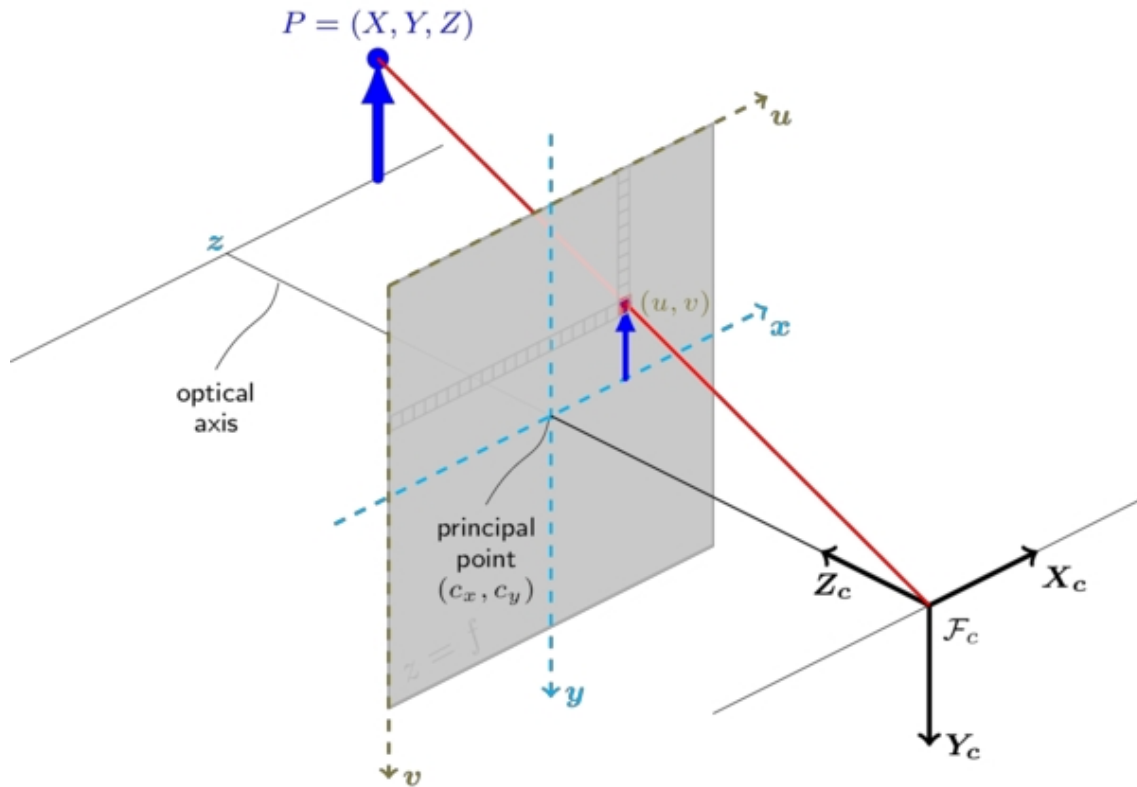
Model popisuje kameru jako zařízení využívající středové promítání. Kamera středově promítá souřadnice bodů z trojrozměrného prostoru do prostoru dvojrozměrného. Dvourozměrným prostorem je zobrazovací rovina, která je u fyzických kamer tvořena zobrazovacím čipem. Na zobrazovací rovině se středovým promítáním vytváří obraz středově otočený v obou směrech. Pro zjednodušení matematického popisu lze pracovat se zobrazovací rovinou mezi ohniskem a scénou. Tato zobrazovací rovina je paralelní k zobrazovací rovině za ohniskem a nachází se v ohniskové vzdálenosti od ohniska mezi ohniskem a zabíranou scénou. Výhodou použití zobrazovací roviny před ohniskem je že, promítnutý obraz není středově otočený jako u zobrazovací roviny. Zobrazovací rovinu budeme nazývat průmětnou.



Obrázek 4.1. Nákres středového promítání na zobrazovací rovině [9]

## 4.2 Zobrazení souřadnic bodů do zobrazovací roviny

Zobrazovací rovina neboli průmětna se v tomto modelu se nachází v ohniskové vzdálenosti od počátku soustavy souřadnic kamery  $F_C$  ve směru optické osy  $Z_C$ . V zobrazovací rovině zavedeme rovinnou kartézskou soustavu souřadnic  $F_P$ . Bod průniku optické osy a zobrazovací roviny nazýváme hlavním bodem.



Obrázek 4.2. Model promítání souřadnic do zobrazovací roviny [10]

$$wm = A[R|t]P \quad (4.1)$$

Po vyjádření vektorů  $m$  a  $P$  v rovnici 4.1 a použitím rovnic 4.2 získáme rovnici 4.3. [11]

$$u = \frac{x}{w}, v = \frac{y}{w} \quad (4.2)$$

$$w \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} = A[R|t] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

kde  $w$  je faktor zvětšení,  $m$  vektor souřadnic sledovaného bodu v zobrazovací rovině se souřadnicemi  $u, v$  v soustavě souřadnic  $F_P$ ,  $P$  vektor souřadnic promítaného bodu v soustavě souřadnic pracoviště,  $A$  je matice vnitřních parametrů kamery,  $R|t$  je rotační matice a posuvný vektor popisující vnější parametry kamery. [10]

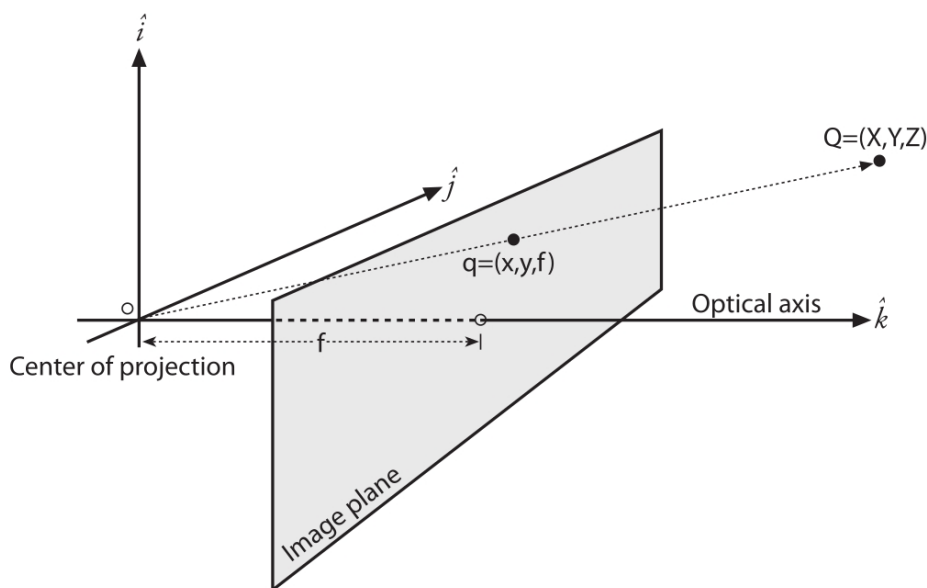


## 4.3 Parametry kamery

Parametry popisující jak kamera promítá pozorované body na zobrazovací rovinu. Dělí se na vnitřní a vnější.

### 4.3.1 Vnitřní parametry

Jde o sadu parametrů popisující vnitřní fungování kamery. Jedná se o vzdálenost ohniska a polohu hlavního bodu. Zapisujeme je v podobě matice sloužící k transformaci souřadnic pozorovaných bodů ze souřadnicového systému kamery  $F_C$  do souřadnicového systému průmětny  $F_P$ . Transformaci souřadnic popisuje rovnice 4.4 a 4.5. [11]



Obrázek 4.3. Promítání pozorovaného bodu na průmětnu [11]

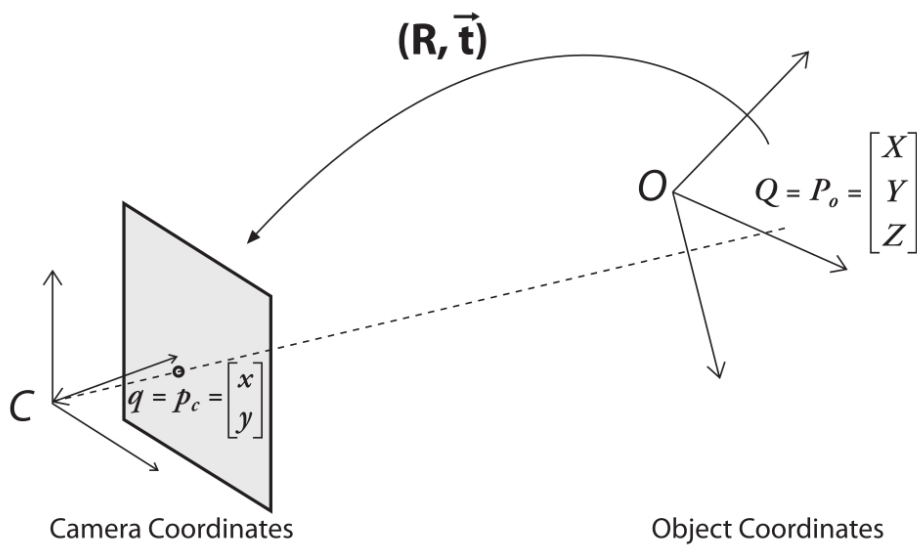
$$m = AP_C \quad (4.4)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{p_x} & 0 & c_x \\ 0 & \frac{f}{p_y} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

kde  $m$  je vektor souřadnic obrazu promítaného bodu v soustavě souřadnic průmětny  $F_P$  se souřadnicemi  $(x, y, Z_C)$ .  $A$  je matice vnitřních parametrů kamery,  $P_C$  je vektor souřadnic promítaného bodu v soustavě souřadnic kamery  $F_C$  se souřadnicemi  $(X_C, Y_C, Z_C)$ ,  $f$  je ohnisková vzdálenost,  $c_x$  a  $c_y$  jsou souřadnice hlavního bodu v soustavě souřadnic  $F_P$ ,  $p_x$  a  $p_y$  jsou velikosti pixelu zobrazovacího čipu kamery ve směrech daných os  $X$  a  $Y$  soustavy souřadnic  $F_C$ .

### 4.3.2 Vnější parametry

Vnějšími parametry se myslí poloha a orientace kamery v prostoru snímané scény. Pomocí znalosti těchto parametrů se provádí přepočítání souřadnic bodů ze soustavy souřadnic sledované scény do soustavy souřadnic kamery. Postup popisuje rovnice 4.6. V případě aplikace kamery ke strojovému vidění se díky matematickým úpravám provádí opačná operace. Tedy určuje se poloha bodu pozorovaného kamerou v soustavě souřadnic scény. Tuto operaci popisuje rovnice 4.7. Tohoto se využívá k provedení vzájemné kalibrace kamery a robota.



**Obrázek 4.4.** Transformace souřadnic mezi soustavou souřadnic kamery a pracoviště [11]

$$P_C = [R|t] P$$

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$P = R^{-1} [P_C - t] \quad (4.7)$$

Kde matice  $R$  je rotační matice z soustavy souřadnic pracoviště do soustavy souřadnic kamery  $F_C$ . Matice  $R^{-1}$  je matice inverzní k matici  $R$ . Vektor  $t$  je translační vektor mezi soustavou souřadnic pracoviště a souřadnicovou soustavou kamery  $F_C$ .  $P$  je vektor souřadnic promítaného bodu v soustavě souřadnic pracoviště,  $P_C$  je vektor souřadnic promítaného bodu v soustavě souřadnic kamery  $F_C$ . [11]

## 4.4 Zkreslení obrazu

Obraz scény u reálných kamer neodpovídá zcela základním matematickým modelům, ale je deformován vlivem reálné optiky. Většina zkreslení v našem případě je způsobeno odlišností mezi matematickým modelem a konstrukcí reálných čoček, tak nepřesnostmi při samotné výrobě kamer. Pro účely řešení úlohy budeme brát v úvahu radiální a tangenciální zkreslení, která vznikají z těchto důvodů.

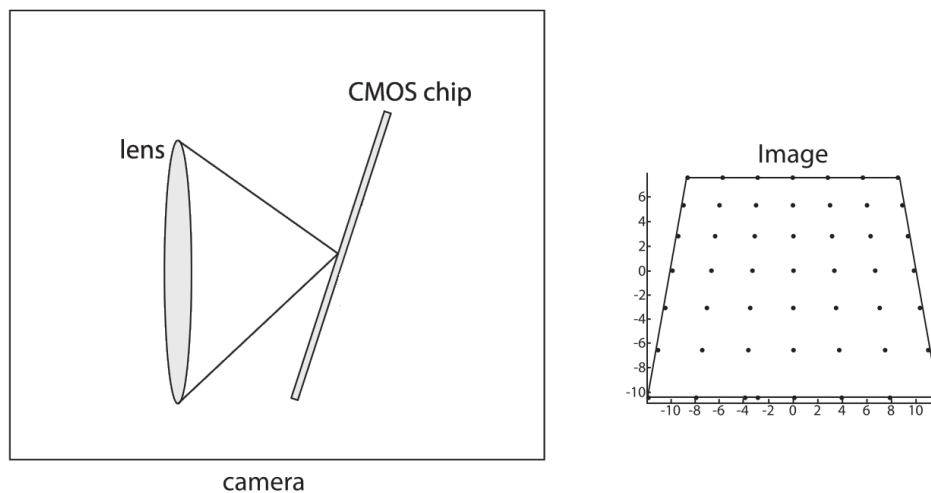
### 4.4.1 Tangenciální zkreslení

Tangenciální zkreslení je výsledkem nedokonalosti v provedení konstrukce kamery. Nepřesnosti v osazení čoček a zobrazovacích čipů vedou k tomu že, zobrazovací čip a čočka nejsou vůči sobě orientovány paralelně. Toto odchylení vede ke změnám míst dopadu paprsků vůči paralelnímu umístění. Toto zkreslení se projevuje v podobě odchylení bodů od skutečných poloh v míře dané vzdálenosti od hlavního bodu. Oblasti se stejnou mírou odchylení od skutečné polohy machá podobu elips v okolí hlavního bodu. U moderních kamer je přesnost provedení taková, že tangenciální zkreslení má v porovnání s radiálním mnohem menší vliv na přesnost obrazu. Knihovna OpenCV používá k jejímu popisu dva koeficienty. [11]

$$r^2 = x^2 + y^2 \quad (4.8)$$

$$x' = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \quad (4.9)$$

$$y' = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \quad (4.10)$$

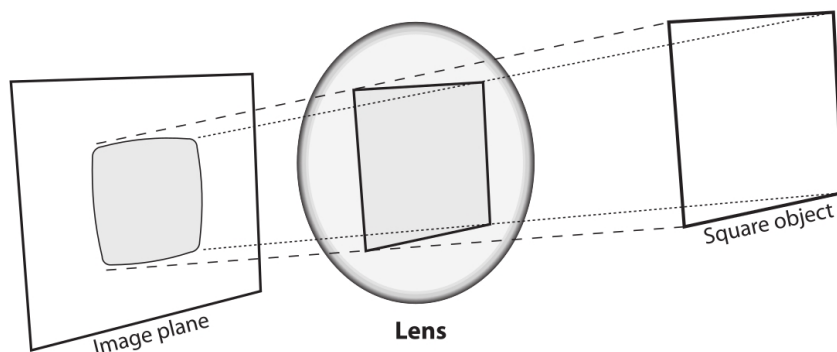


**Obrázek 4.5.** Vzájemná poloha čočky a snímacího čipu a její vliv na tangenciální zkreslení míst dopadu paprsků [11]

Kde  $x$ ,  $y$  jsou souřadnice obrazu v soustavě souřadnic průmětny  $F_P$ ,  $r$  je vzdálenost od počátku soustavy  $F_P$ ,  $p_1$  a  $p_2$  jsou koeficienty tangenciálního zkreslení a  $x'$ ,  $y'$  jsou souřadnice obrazu bez tangenciálního zkreslení. [11] [10]

### 4.4.2 Radiální zkreslení

Radiální zkreslení je způsobena tvarem čoček způsobující zkreslení obrazu v soustředných kruzích způsobené měnící se mírou zakřivení světelných paprsků blíže k okraji čočky. Toto zkreslení tedy ovlivňuje body obrazu více vzdálené od optického středu obrazu a je tedy horší pro čočky menších velikostí.



Obrázek 4.6. Průchod paprsků čočkou způsobující radiální zkreslení [11]

Radiální zkreslení je v optickém středu neboli hlavním bodě nulové. S rostoucí vzdáleností od hlavního bodu roste. Tento růst se popisuje pomocí Taylorových řad. K popisu radiálního zkreslení se v použité implementaci OpenCV využívá používá tři parametrů. Z těchto koeficientů  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  se používají pro běžné čočky a třetí se využívá pro čočky s velkým radiálním zkreslením jako jsou čočky typu rybí oko. [11]

$$r^2 = x'^2 + y'^2 \quad (4.11)$$

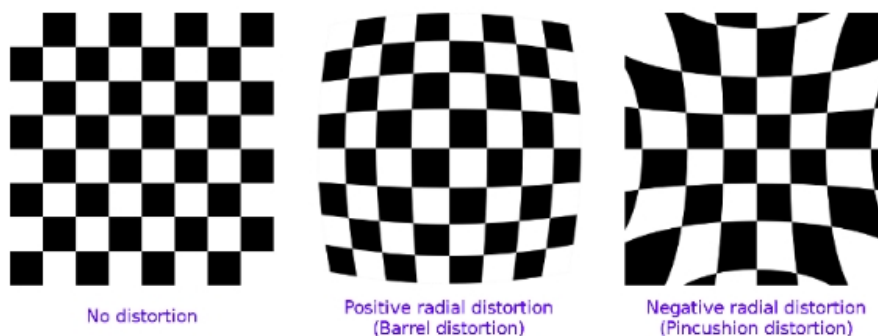
$$x'' = x' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (4.12)$$

$$y'' = y' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \quad (4.13)$$

$$u = \frac{f}{p_x} x'' + c_x \quad (4.14)$$

$$v = \frac{f}{p_y} y'' + c_y \quad (4.15)$$

Kde  $k_1, k_2, k_3$  jsou koeficienty radiálního zkreslení,  $x', y'$  souřadnice obrazu promítaného bodu v soustavě souřadnic průmětny  $F_P$ ,  $x'', y''$  upravené souřadnice  $x, y$  s odstraněným vlivem radiálního zkreslení. [10] [11]

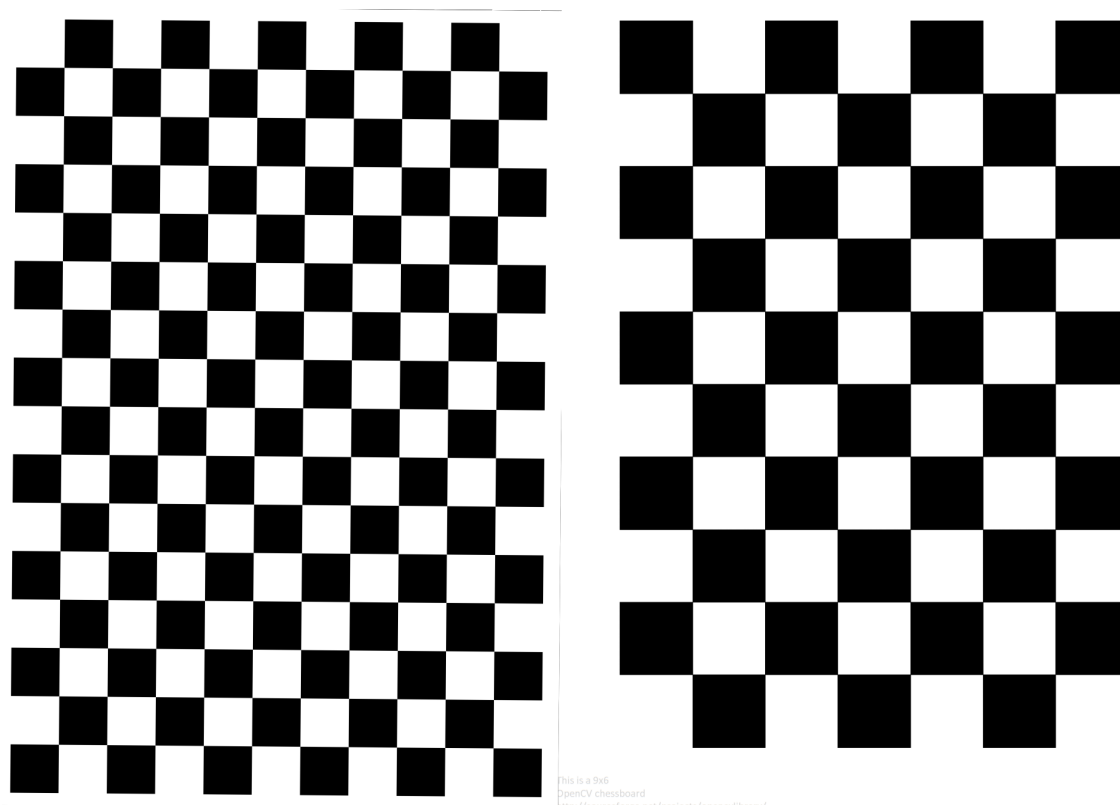


Obrázek 4.7. Podoba radiálního zkreslení na obrázku šachovnice [10]

## Kapitola 5

### Kalibrace kamery

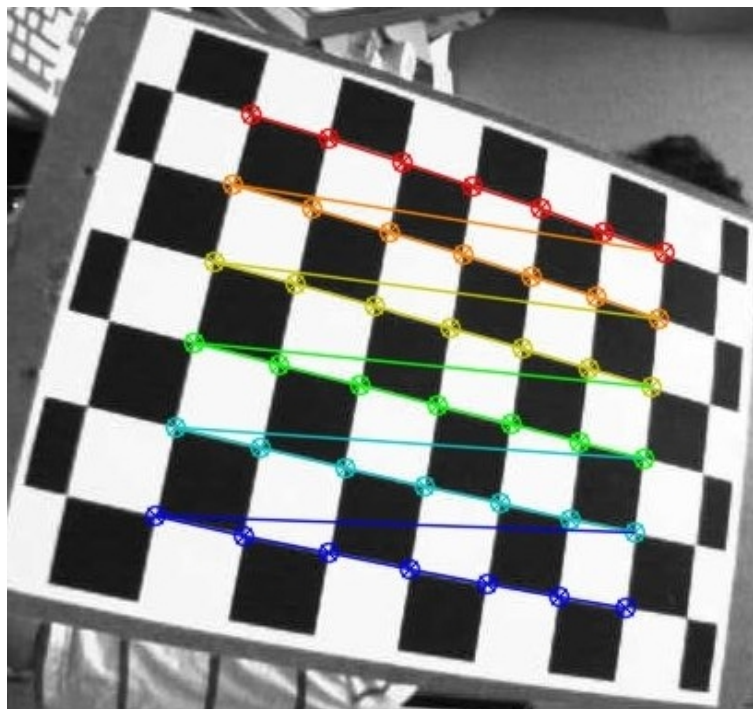
Kalibrace kamery je proces získání hodnot parametrů popisující chování dané kamery. Tímto se myslí vnitřní parametry kamery a koeficienty popisující zkreslení obrazu získaného kamerou. Tyto hodnoty jsou však pro danou kameru neznámé. Znalost těchto hodnot je nutná pro použití obrazu kamerou k aplikacím strojového vidění. Kalibrace tedy slouží k získání vztahů mezi obrazovými body tvořící obraz kamery a jednotkami fyzického světa tvořící kamerou zabíranou scénou. Se znalostí těchto vztahů je poté možné provést měření fyzického světa s pomocí obrazu pořízeného kamerou. Tyto hodnoty pro použitou kameru a objektiv získáme pomocí zpracování snímku obsahující kalibr. Kalibr je předmět se známou strukturou a rozměry. [10]



Obrázek 5.1. Kalibrační obrazce - šachovnicové s různými počty bodů

## 5.1 Implementace v OpenCV

Výsledkem kalibrace při použití knihoven OpenCV budou čtyři vnitřní parametry a pět parametrů zkreslení. V implementaci knihovny OpenCV se provádí zpracování a kalibrace následujícím způsobem. Ze souboru s názvy a cestou k uloženým snímkům se načtou snímky ke zpracování funkcí `findchessboardcorners`. Tato funkce prohledá snímek algoritmem pro analýzu obrazu a hledá v něm body vybraného kalibračního obrazce zadaných rozměrů. Funkce v případě úspěšného nalezení kalibru získá polohy bodů kalibru v souřadnicích obrazu. Sady těchto bodů pro všechny snímky s nalezeným obrazcem se poté dále zpracují pomocí funkce `calibratecamera`. Funkce `calibratecamera` používá k určení vnitřních parametrů a parametrů zkreslení znalosti vzájemných poloh bodů kalibru a znalosti bodů kalibru získaných ze snímků. Funkce provádí tyto kroky. V případě rovinného kalibru vypočítá počáteční vnitřní parametry jinak je načte ze vstupních parametrů a parametry zkreslení jsou nastaveny jako nulové. Dále se odhadne výchozí pozice kamery s pomocí funkce `solvePnP` jako by již byly známy vnitřní parametry. V dalším kroku se spustí Levenberg-Marquardtův optimalizační algoritmus, který má za úkol minimalizovat rozdíl mezi skutečnou polohou bodů a jejich polohou vypočítanou podle odhadů parametrů. Výstupem těchto kroků jsou odhady vnitřních parametrů, parametrů zkreslení a výsledná průměrná odchylka mezi skutečnými a vypočítanými polohami bodů. [10]



**Obrázek 5.2.** Kalibrační obrazec - šachovnicový s detekovanými kalibračními body

## 5.2 Získání parametrů zpracováním snímků kalibru

Při řešení této úlohy použijeme jako kalibr šachovnicový obrazec. Tento obrazec obsahuje velké množství rozeznatelných bodů, které tvoří hrany černých a bílých čtverců. Tyto body se nacházejí v pravidelné a známé struktuře čtvercovité mřížky. V kameře probíhá promítání na zobrazovací rovinu, kde může být obraz kalibru změněn jen ve čtyřech směrech. Tedy nehledě na počet bodů na kalibru je potřeba pro použitelný snímek mít body alespoň čtyři. Vyšší počet bodů než čtyři slouží k robustnější detekci. K úspěšné kalibraci musíme určit celkem deset parametrů. Čtyři parametry vnitřní a šest parametrů popisující pozici a orientaci kalibru ve scéně. Máme tedy čtyři vnitřní parametry a  $6K$  parametrů kalibru pro  $K$  snímků.  $K$  snímků poskytuje  $2NK$  omezení k určení parametrů. Kde  $N$  je počet bodů kalibru ve snímku. Musí tedy platit

$$2NK \geq 6K + 4 \quad (5.1)$$

neboli

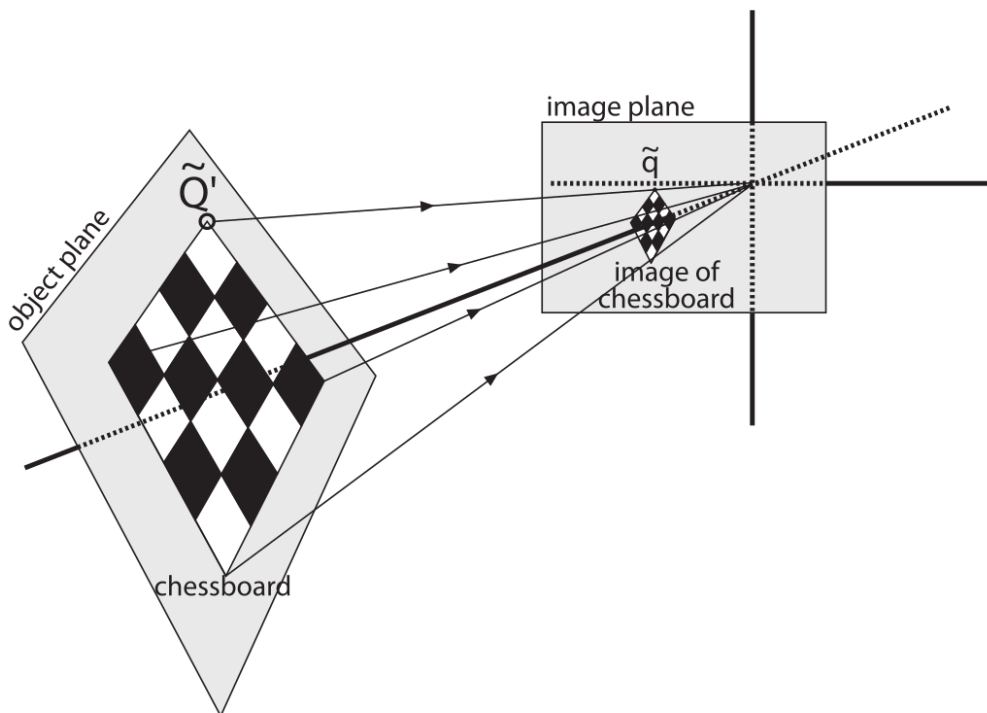
$$(N - 3)K \geq 2 \quad (5.2)$$

Vyhledem k tomu, že počet bodů na snímek větší než čtyři slouží pouze pro větší robustnost platí, že  $N=4$ . Tedy platí:

$$(4 - 3)K \geq 2 \quad (5.3)$$

$$K \geq 2 \quad (5.4)$$

K co nejlepšímu odhadu parametrů je třeba mít co největší variabilitu hodnot omezení. Proto kalibrační obrazec nasnímáme z různých úhlu a v různých místech zabírané pracovní plochy. [11]

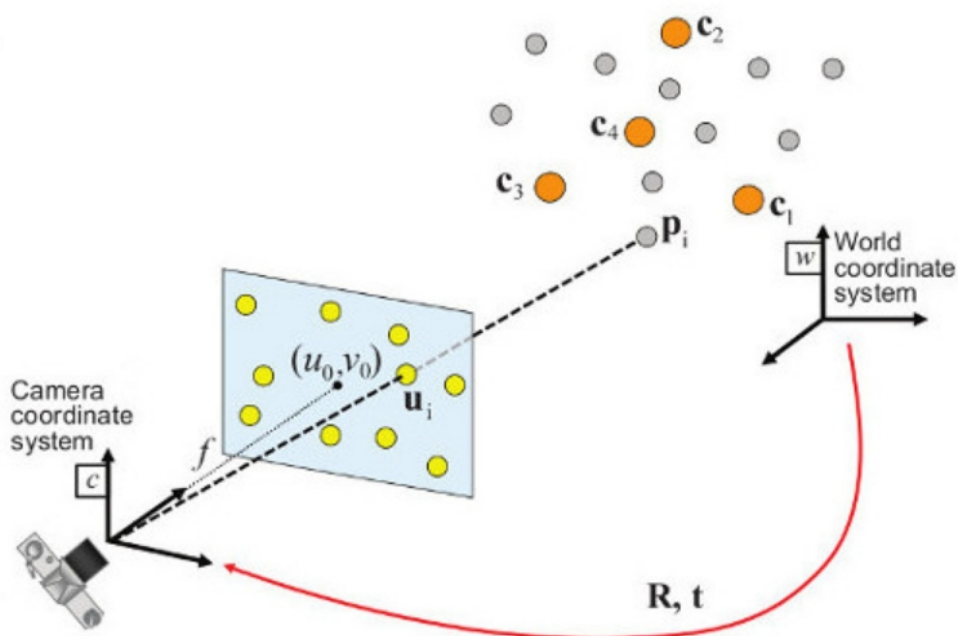


Obrázek 5.3. Promítání na rovinu zobrazovacího čipu [11]

## Kapitola 6

### Vzájemná kalibrace robota a kamery

Vzájemnou kalibrací robota a kamery se myslí získání vzájemných vztahů pro převedení výsledků měření provedeného kamerou do soustavy souřadnic používané robotem. Kamerou získaná měření fyzických jednotek v oblasti pracovního prostoru jsou popsány v soustavě souřadnic kamery. K použití těchto měření k řízení robota je potřeba nalézt rotační matici a translační vektor mezi soustavou souřadnic kamery a soustavou robotického pracoviště  $F_{RP}$ . Jimi tvořena transformační matice nám umožní transformovat souřadnice kamerou nalezených bodů do souřadnic robotického pracoviště a jejich použití k řízení robota v oblasti pracovní plochy. K výpočtu pozice a orientace kamery v soustavě souřadnic pracoviště  $F_{RP}$  využijeme funkci knihovny OpenCV *solvePnP*. [12] Tato funkce slouží k nalezení pozice perspektivy za pomoci dvou sad souřadnic stejné množiny bodů a znalostí parametrů kamery. Dvě sady souřadnic jsou souřadnice bodů v trojrozměrném prostoru a jejich rovinné souřadnice bodů zobrazené při promítání v dané perspektivě. Trojrozměrné souřadnice jsou souřadnice bodů v soustavě souřadnic pracoviště  $F_{RP}$ . Dvojměrné souřadnice jsou souřadnice stejných bodů v rovině průmětny kamery  $F_P$ .



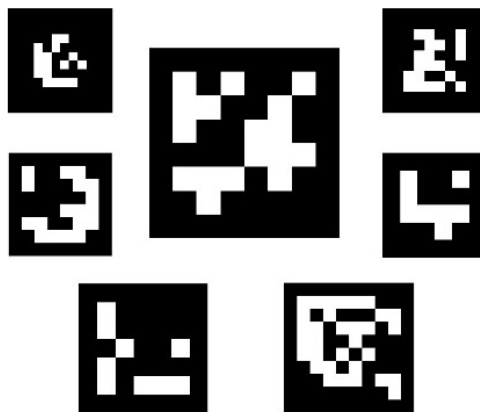
**Obrázek 6.1.** Poloha pozorovaných bodů v pracovišti a jejich promítnutí na průmětnu kamery [13]



Sady souřadnic získáme pomocí značky umístěné na rameni robota a zachycení její polohy v různých bodech kamerou. Rameno robota navedeme pomocí programu RVIZ a pro každou pozici pořídíme snímek kamerou a provedeme zápis polohy a orientace segmentu ramena robota na kterém se nachází značka. Souřadnice značky na těle robota v soustavě souřadnic pracoviště vypočítáme pomocí transformační matice popisující transformaci souřadnic ze sledované soustavy souřadnic segmentu ramena robota na kterém se značka nachází do soustavy souřadnic pracoviště  $F_{PR}$ . Souřadnice značky na průmětně kamery určíme pomocí doplňkové knihovny značek ArUco OpenCV. [14]

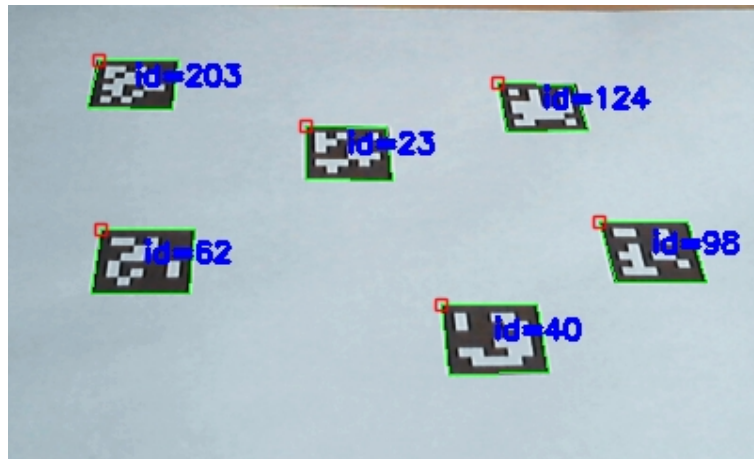
## 6.1 Určení dvojrozměrných souřadnic značky a knihovna ArUco

Značky ArUco jsou součástí doplňkových knihoven OpenCV. Účelem těchto značek je odhad pozice a orientace jimi označených těles v aplikacích strojového vidění, jako jsou navigace robotů a rozšířená realita. Jedná se o široký počet znaků tvořený čtvercovitým okolím s vnitřní mřížkou tvořenou dalšími menšími černými a bílými čtverci. Díky podobě této vnitřní mřížky je možné jednotlivé značky neidentické značky rozeznat a získat jejich polohu a orientaci vůči snímající kamere. K řádnému použití funkcí používající značky ArUco je nutné znát vnitřní parametry a parametry zkreslení použité kamery.



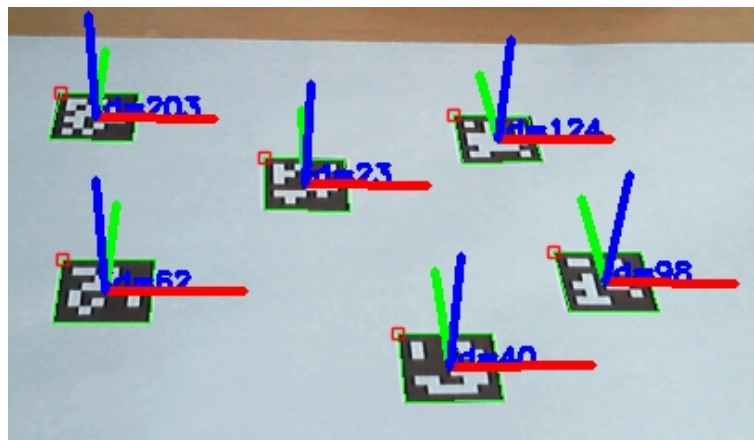
**Obrázek 6.2.** Ukázka značek ArUco různých slovníků značek [14]

Knihovna *ArUco* obsahuje několik funkcí umožňující práci s těmito značkami. K detekci značek na snímku slouží funkce `detectMarkers`. Tato funkce vrací souřadnice rohů detekovaných značek na snímku společně s jejich ID dané slovníkem značek do kterého patří. Tyto získané pozice rohů lze také dále zpřesnit pomocí při nastavení parametrů detektoru k provedení upřesnění poloh rohů pomocí na úrovni pod rozměry jednotlivých obrazových bodů. V případě této úlohy jsem použil nastavení třiceti iterací a minimální přesnosti 0.01. Ke kontrole detekce značek je možné použít funkci `drawdetectedMarkers` k vykreslení nalezených rohů na zpracovaný snímek kamery a kontrole uživatelem.



**Obrázek 6.3.** Značky ArUco detekované ve snímku s označenými rohy [14]

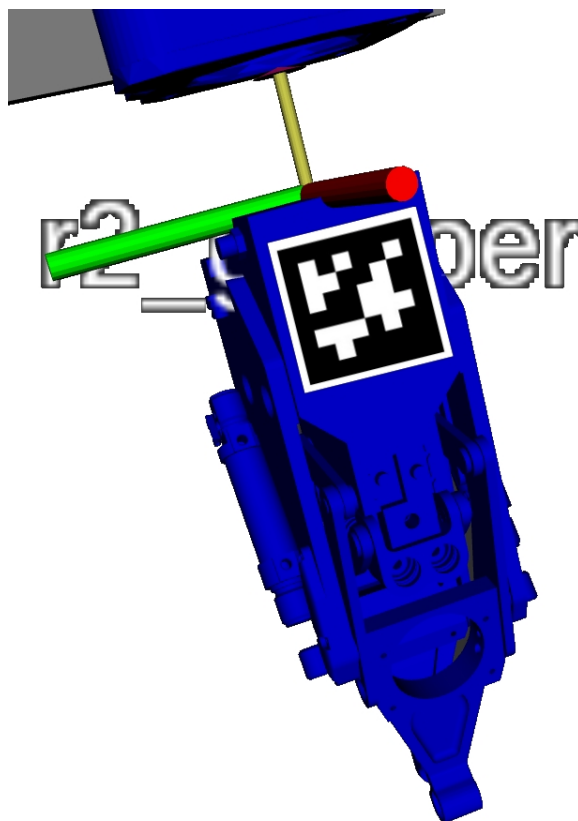
Se znalostí rohů značky použijeme funkci `estimatePoseSingleMarker`, kterou odhadneme pozici středu a orientaci značky v soustavě souřadnic kamery  $F_C$ . Tato funkce popisuje pozici a orientaci značky pomocí polohového vektoru a úhlů *Rodrigues* v soustavě souřadnic kamery. Střed značky v soustavě souřadnic  $F_C$  dále promítneme na průmětnu kamery pomocí funkce `projectPoints`. Tato funkce využívá parametrů kamery k transformaci trojrozměrných souřadnic ze soustavy souřadnic kamery  $F_C$  na dvojrozměrné souřadnice v soustavě průmětny kamery  $F_P$ .



**Obrázek 6.4.** Značky ArUco s nalezeným středem a orientací [14]

## 6.2 Určení trojrozměrných souřadnic značky ArUco

K určení souřadnic značky v soustavě souřadnic pracoviště  $F_{PR}$  je nutné znát její polohu vůči sledované soustavě souřadnic segmentu manipulátoru na kterém se nachází. V případě této úlohy byla ArUco značka umístěna na konci manipulátoru na součásti sloužící k uchopování předmětů. V modelu robota v prostředí RVIZ je soustava souřadnic daného segmentu nazvána *r2\_gripper*. Prostředí RVIZ poskytuje pro tuto a další soustavy souřadnic segmentů manipulátoru informaci o jeho poloze a orientaci vůči soustavě souřadnic pracoviště  $F_{PR}$ .



**Obrázek 6.5.** Model gripperu s umístěnou značkou ArUco a zobrazenou sledovanou osou *r2\_gripper* [14]

Kde počátek soustavy souřadnic gripperu se nachází na konci žluté uhlopříčky v horní části obrázku. Červený válec reprezentuje osou X, zelený válec osu Y a osu Z reprezentuje válec kolmý na osy X a Y, směřující dolů tělem gripperu. Střed značky je umístěn tak, aby ležel na rovině tvořené osami X a Z soustavy souřadnic gripperu.

▼ r2_gripper	<input checked="" type="checkbox"/>
Parent	r2_tip_link
▼ Position	0.51126; -0.81754; 1.6521
X	0.511261
Y	-0.81754
Z	1.65214
▼ Orientation	0.7008; 0.70156; -0.091238; -0.091534
X	0.700796
Y	0.701556
Z	-0.0912384
W	-0.0915344

**Obrázek 6.6.** Souřadnice a orientace soustavy souřadnic gripperu *r2\_gripper* v RVIZ

Poloha soustavy souřadnic *r2\_gripper* je prostředím RVIZ uváděna v souřadnicích počátku soustavy souřadnic *r2\_gripper* v soustavě souřadnic pracoviště  $F_{PR}$  a orientace v kvaternionech X, Y, Z, W. Tyto kvaterniony popisují rotaci ze soustavy pracoviště  $F_{PR}$  do soustavy *r2\_gripper*. Kvaterniony převedeme pomocí funkce *toRotationMatrix* knihovny *eigen3* na rotační matici  $R_g$ . [15]

Pozice značky ArUco na gripperu je dána jejím umístěním. Jak je výše uvedeno střed značky umístěné na straně gripperu leží na rovině tvořené osami X a Z soustavy souřadnic *r2\_gripper*. Souřadnice značky použité v této úloze jsou  $x = 0.032$  m,  $y = 0$ ,  $z = 0.081$  m.

S pomocí těchto hodnot poté vypočítáme polohu středu značky v soustavě souřadnic pracoviště  $F_{PR}$  pro libovolnou pozici a orientaci následovně.

$$P_a = [R_g^T | t_z] P_g \quad (6.1)$$

Kde  $P_a$  je poloha značky ArUco v soustavě pracoviště  $F_{PR}$ ,  $P_g$  je poloha počátku soustavy *r2\_gripper* v soustavě souřadnic pracoviště  $F_{PR}$ ,  $[R_g^T | t_z]$  je transformační matice s transponovanou rotační maticí  $R_g^T$  a pravou stranou tvořenou posuvným vektorem  $t_z$ , Matice  $R_g^T$  je rotační matice ze soustavy souřadnic *r2\_gripper* do soustavy souřadnic pracoviště  $F_{PR}$ . Posuvný vektor  $t_z$  je polohový vektor středu značky ArUco v soustavě souřadnic *r2\_gripper*.

### 6.3 Výpočet polohy kamery

Jak je napsáno na začátku kapitoly k výpočtu vnějších parametrů kamery na pracovišti využije funkce *solvePnP*. Funkce s použitím vnitřních parametrů a parametrů zkreslení poskytne odhad pozice a orientace počátku soustavy souřadnic pracoviště  $F_{PR}$  vůči soustavě souřadnic kamery  $F_C$ . Pozice počátku  $F_{PR}$  je určena souřadnicemi  $P_{PR}$  v soustavě souřadnic kamery  $F_C$ . Orientace kamery je popsána jako v případě značky ArUco v úhlech *Rodrigues*. Tyto úhly pomocí stejnojmenné funkce taktéž převedeme na rotační matici. Tato rotační matice  $R_{C-R}$  popisuje rotaci ze soustavy souřadnic kamery do soustavy souřadnic pracoviště. Pro polohu a orientaci kamery v soustavě souřadnic pracoviště platí

$$P_{CAM} = -[R_{C-R}]^T P_{PR}, \quad (6.2)$$

kde  $P_{CAM}$  je poloha kamery v soustavě souřadnic pracoviště  $F_{PR}$ ,  $R_{C-R}^T$  je rotační matice ze soustavy souřadnic kamery  $F_C$  do soustavy souřadnic pracoviště  $F_{PR}$ .

## 6.4 Promítnutí bodů do roviny pracovní plochy

K výpočtu reprojekční chyby vzájemné kalibrace promítneme souřadnice značek na rovinu tvořící pracovní plochu. Tato plocha se nachází ve výšce 610 mm na nad úrovní podlahy. K promítnutí využijeme získanou polohu kamery v soustavě souřadnic pracoviště  $F_{PR}$  a orientaci kamery, která míří kolmo na pracovní plochu. Pro potřeby tohoto promítání posuneme počátek soustavy souřadnic  $F_{PR}$  do místa kamery  $P_{CAM}$ . Do této nové soustavy souřadnic  $F_{CAM}$  budeme převádět souřadnice bodů ze soustavy  $F_{PR}$  odečtením  $P_{CAM}$  od daných souřadnic. Souřadnice bodů v rovině pracovní plochy dané průnikem paprsku vycházejícího z bodu  $P_{CAM}$  a procházející promítaným bodem získáme pomocí následujících vztahů. Tyto vztahy jsou zjednodušeny díky posunutí počátku do bodu  $P_{CAM}$ .

$$x_{rov} = h \frac{x}{z}, \quad (6.3)$$

$$y_{rov} = h \frac{y}{z}, \quad (6.4)$$

kde  $x_{rov}$ ,  $y_{rov}$  jsou souřadnice bodu promítnutého do roviny pracovní plochy v  $F_{CAM}$ ,  $(x, y, z)$  jsou souřadnice promítaného bodu v  $F_{CAM}$ ,  $h$  je vzdálenost kamery od roviny pracovní plochy. Platí  $h = P_{CAM}(z) - 0.61$ , kde  $P_{CAM}(z)$  je souřadnice v ose  $z$  pozice kamery v  $F_{PR}$  a 0.61 je výška stolu nad zemí.

## 6.5 Výpočet reprojekční chyby

K ověření přesnosti určení polohy měření v pracovní ploše kamerou provedeme výpočet směrodatné odchylky vzdáleností mezi nastavenými polohami značek a odhadů jejich poloh získaných pomocí kamery.

$$d = \sqrt{(x_c - x_r)^2 + (y_c - y_r)^2}, \quad (6.5)$$

$$e = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d^2}, \quad (6.6)$$

kde  $x_c$  a  $y_c$  jsou souřadnice značky získané kamerou,  $x_r$  a  $y_r$  jsou souřadnice značky dané nastavením ramene robota. Veličina  $d$  je vzdálenost mezi body dány souřadnicemi  $(x_c, y_c)$  a  $(x_r, y_r)$ . Veličina  $n$  je počet dvojic souřadnic a  $e$  je směrodatná odchylka vzdáleností jednotlivých dvojic. [16]

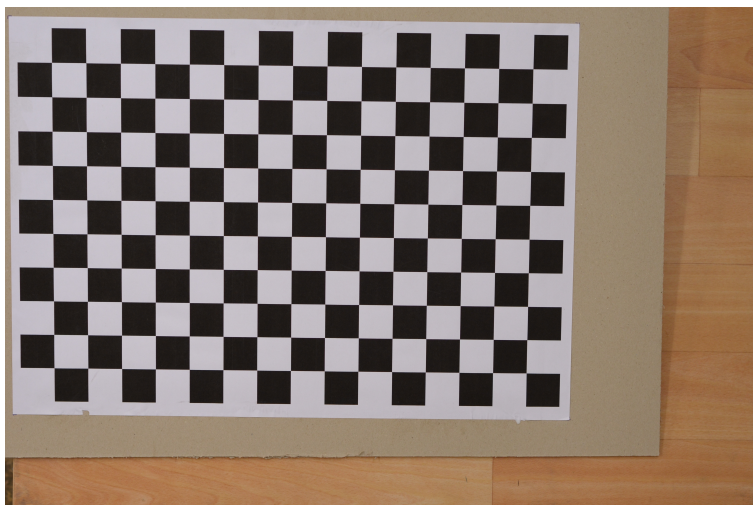
# Kapitola 7

## Experimenty

### 7.1 Kalibrování kamery

#### 7.1.1 Získání snímků kalibru

K provedení kalibrace kamery jsem použil kalibr tvořený mřížkou bílých a černých čtverců o straně s velikostí 36 milimetrů. Rozměry mřížky byly 15 na 10 bodů tvořenými hranami čtverců. Celková velikost plochy kalibračního obrazce byla 576 na 396 milimetrů. Plocha kalibru je 0.228 metrů čtvercích, což je téměř polovina plochy pracovního prostoru. V rámci požadavků kladeného rovnicí 5.4 musí být naschromážděny více než dva snímky. Snímky jsem zaznamenal pomocí funkce *capture*, jejíž použití je popsáno v Kapitole 3. Umístění kalibru na jednotlivých snímcích je provedeno tak, aby byla množina těchto pohledů co se týče pozic a orientací co nejrozmanitější. Kalibr byl mírně nakloněn směrem mimo pracovní plochu ve čtyřech různých směrech.



Obrázek 7.1. Ukázka umístění kalibračního obrazce

#### 7.1.2 Zpracování snímků

Pro zpracování snímků a provedení kalibrace použijte k práci přiložený program *calibration*. Tento program spustíte v příkazovém řádku s příkazy  
`./calibration -w=15 -h=10 -s=0.036 -o=camera.yml -op -oe imageFile.xml`  
Kde *w* je šířka a *h* výška kalibru v počtech hran tvořících kalibrační body. Parametr *s* je velikost strany čtverců v metrech, parametr *o* je název výstupního souboru ve formátu *yml* s výsledky kalibrace. *ImageFile.xml* je vstupní soubor ve formátu *xml* obsahující místní cesty ke snímkům určeným ke zpracování.

### 7.1.3 Vyhodnocení výsledků

Výsledkem kalibrace je následující matice A vnitřních parametrů a parametry zkreslení s vypočítanou reprojekční odchylkou. Tyto hodnoty jsou uloženy v souboru *camera.yml* vytvořeném funkcí *calibration*.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{f}{p_x} & 0 & c_x \\ 0 & \frac{f}{p_y} & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11345 & 0 & 2519 \\ 0 & 11345 & 1586 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7.1)$$

kde  $p_x = \frac{W}{w}$  a  $p_y = \frac{H}{h}$ , W a H jsou šířka a výška zobrazovacího čipu CMOS v metrech, w a h jsou šířka a výška zobrazovacího čipu CMOS v pixelech. Hodnoty matice kamery lze ověřit pomocí výpočtu

$$\begin{aligned} \frac{f}{p_x} &= f \frac{w}{W} = 11345, \\ \frac{f}{p_y} &= f \frac{h}{H} = 11345, \\ f_x &= 11345 \frac{W}{w} = 11345 \frac{0.0236}{4928} = 0.0543, \\ f_y &= 11345 \frac{H}{h} = 11345 \frac{0.0156}{3264} = 0.0542, \end{aligned}$$

Ohniskové vzdálenosti  $f_x$  a  $f_y$  jsou téměř identické a s přihlédnutím k tomu, že zobrazovací čip bude mít svůj okraj neosázený optickými body odpovídá získaná oprická vzdálenost použitému objektivu.

Hodnoty  $c_x = 2519$  a  $c_y = 1586$  označující polohu hlavního bodu odpovídají přibližně středu obrazu. Zobrazovací čip má rozměry 4928 na 3264 obrazových bodů. Střed zobrazovacího čipu podle zobrazovacích bodů odpovídá  $u = 2464$  a  $v = 1632$ . Hodnoty parametrů zkreslení jsou

$$(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3) = (0.05693, -1.26035, -0.00095, 0.00065, 0),$$

kde parametry k jsou koeficienty radiálního zkreslení a parametry p koeficienty tečného zkreslení.

Hodnota reprojekční chyby kalibrace byla určena jako 0.56 obrazového bodu.

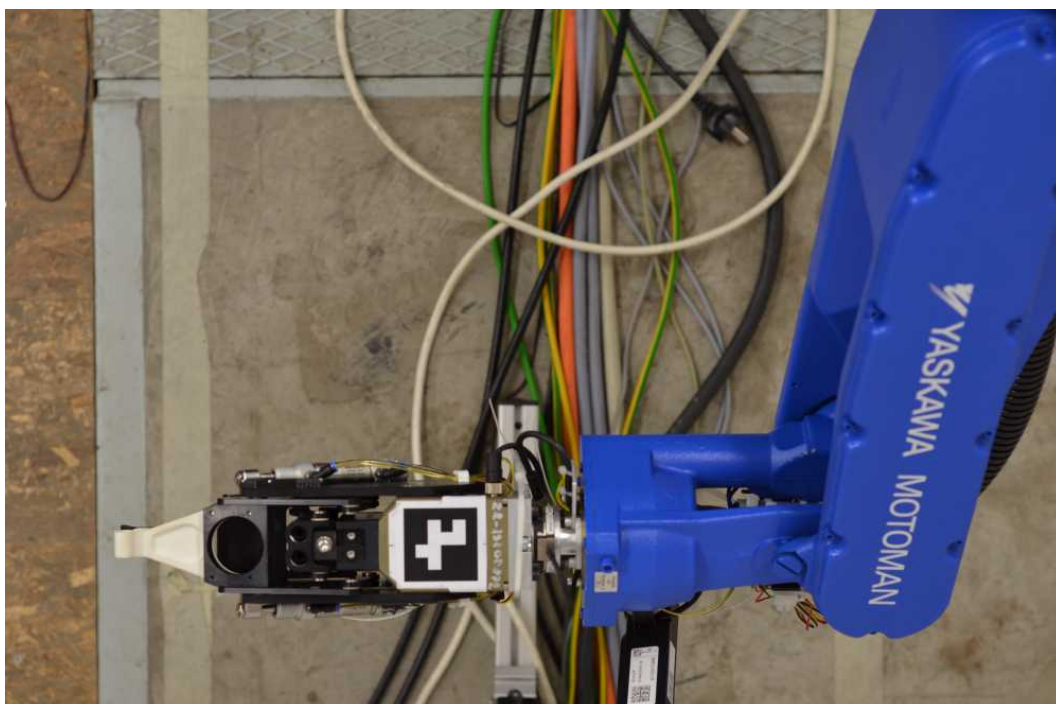
Vzhledem ke správnosti hodnot získaných procesem kalibrace považují tuto kalibraci kamery za vyhovující.



## 7.2 Kalibrace robota a kamery

### 7.2.1 Získání sad souřadnic

K provedení vzájemné kalibrace robota a kamery je potřeba získat dvě sady souřadnic. Obě sady popisují stejné body. Jedna ze sad obsahuje trojrozměrné souřadnice bodů získané pomocí ovládacího softwaru robota a druhá dvojrozměrné souřadnice získané provedením záznamu scény pracovního prostoru kamerou. K získání souřadnic se nastavuje rameno robota opatřené značkou ArUco do 14 poloh v různých výškových hladinách v prostoru pracovní plochy. V průběhu toho se zaznamenávají souřadnice v prostředí RVIZ a pořizují se snímky značky ArUco kamerou.



Obrázek 7.2. Nastavování ramena ke snímání značky ArUco

### 7.2.2 Zpracování snímků

Ke zpracování snímků a získaných souřadnic ramene použijí k tomu vytvořený program *calibration\_RC*. Ke zpracování je nutné, aby byl připravený seznam cest ke snímkům ke zpracování v souboru *imageFile.xml*, parametry kamery v souboru *data\_camera.yml* a zaznamenané v souboru *data\_robot.yml*. Poté program se spustí v příkazovém řádku povelom

```
./calibration_RC
```

Výstupem programu budou vypsány pozice bodů a průběžné výsledky zakončené polohovým vektorem kamery v soustavě souřadnic pracoviště  $F_{PR}$ , polohovým vektorem počátku soustavy souřadnic pracoviště v soustavě souřadnic kamery  $F_C$  a rotační maticí ze soustavy souřadnic pracoviště do soustavy souřadnic kamery. Dále je uvedena reprojekční chyby tvořena směrodatnou odchylkou mezi polohami značky známými pomocí softwaru robota a snímků kamery.



### ■ 7.2.3 Vyhodnocení výsledků

Výsledkem provedené vzájemné kalibrace robota a kamery je následující jsou souřadnice polohy kamery  $P_{CAM}$  a rotační matice  $R_{R-C}$ .

$$R_{R-C} = \begin{bmatrix} -0.0010 & 0.9999 & 0.0065 \\ 0.99997 & 0.0011 & -0.0024 \\ -0.0025 & 0.0065 & -0.9999 \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

$$P_{CAM} = [1.2645 \quad -0.0630 \quad 2.6024] \quad (7.3)$$

Rotační matice odpovídá svými hodnotami očevánání vzhledem k orientaci kamery kolmo na rovinu pracovního prostoru. Souřadnice polohy kamery taktéž odpovídají přibližnému umístění kamery na osou X ve výšce přibližně 2.6 metrů nad zemí. Reprojekční chyba po zobrazení do roviny pracovní plochy je 0.7 mm. U zobrazovacího čipu šířky 23.6 mm a počtu obrazových bodů 4928 pro ohniskovou vzdáleností 50 mm bude na vzdálenosti přibližně dvou metrů odpovídat obrazový bod zabírat prostor velikosti 0.2 mm. Tato kalibrace robota a kamery je tedy vyhovující. Odchylka kalibrace je 0.7 mm, což je 3.5 obrazových bodů.

## Kapitola 8

### Závěr

V práci byl popsán postup a byla provedena kalibrace kamery a vzájemná kalibrace robota a kamery. Cílem bylo získat vnitřní parametry kamery umožňující použití kamery k měření na pracovní ploše a umožnění použití těchto měření k řízení robota a manipulaci s předměty na pracovní ploše. Těchto cílů bylo dosaženo.

Analýzou série snímků kalibračního obrazce pomocí funkcí knihovny OpenCV byly získány vnitřní parametry kamery včetně koeficientů radiálního a tečného zkreslení. Tyto parametry kamery umožňují provádět s pomocí snímků měření na pracovní ploše a odstanit vlivy zkreslení obrazu kamery způsobené objektivem. Výpočet chyb těchto parametrů ukázal že pracují s průměrnou chybou menší než je obrazový bod kamery.

V případě kalibrace robota a kamery bylo provedeno sledování polohy značky ArUco umístěné na rameni robota pomocí jejich souřadnic na těle robota a snímků kamery při různých nastaveních manipulačního ramena v oblasti pracovní plochy. S využitím funkcí knihovny OpenCV byly z těchto dvou sad souřadnic vypočítány vnější parametry kamery. Získaná poloha a orientace kamery ve světových souřadnicích umožňuje použití výsledků měření kamerou k řízení manipulátoru. Vypočítaná odchylka těchto měření byla po promítnutí do roviny pracovní plochy 0.7 mm.

## Literatura

- [1] Technická specifikace. *Nikon*. [cit. 2017-05-25].  
[http://www.nikon.cz/cs\\_CZ/product/discontinued/digital-cameras/2015/d5100#tech\\_specs](http://www.nikon.cz/cs_CZ/product/discontinued/digital-cameras/2015/d5100#tech_specs).
- [2] Technická specifikace. *Nikon*. [cit. 2017-03-27].  
<https://store.nikon.cz/nikkor-lenses-fixed-focal-length/af-nikkor-50mm-f-1.8d/JAA013DA/details#specificationstab>.
- [3] MA1400-4. *YASKAWA*. [online]. [cit. 2017-05-09].  
[http://www.motoman.cz/cs/produkty/roboty/product-view/?tx\\_catalogrobot\\_pi1%5Buid%5D=2499&cHash=e9e2392124a15a5cf9d2ace0a65545e9](http://www.motoman.cz/cs/produkty/roboty/product-view/?tx_catalogrobot_pi1%5Buid%5D=2499&cHash=e9e2392124a15a5cf9d2ace0a65545e9).
- [4] Home. *RadioRoSo*. [online]. [cit. 2017-05-26].  
<http://radiatoro.ciirc.cvut.cz/>.
- [5] Morgan Quigley, Brian Gerkey a William D. Smart. *Programming Robots with ROS*. 1. vydání. O'Reilly Media, 2015. ISBN 978-1-4493-2389-9.
- [6] gphoto. *libgphoto2 library*. [online]. [cit. 2017-05-26].  
<http://gphoto.org/doc/>.
- [7] Home. *CloPeMa - Clothes Perception and Manipulation*. [online]. [cit. 2017-05-09].  
<http://clopema.eu/>.
- [8] OpenCV. *Open Source Computer Vision Library*. [online]. [cit. 2017-05-26].  
<http://opencv.org/>.
- [9] What Is Camera Calibration? *MathWorks*. [online]. [cit. 2017-11-14].  
<https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>.
- [10] Camera Calibration a 3D Reconstruction. *Open Source Computer Vision Library*. [online]. [cit. 2017-12-31].  
[https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera\\_calibration\\_and\\_3d\\_reconstruction.html](https://docs.opencv.org/2.4/modules/calib3d/doc/camera_calibration_and_3d_reconstruction.html).
- [11] Learning OpenCV. *bogotobogo*. [online]. [cit. 2017-04-08].  
<http://www.bogotobogo.com/cplusplus/files/OReilly%20Learning%20OpenCV.pdf>.
- [12] Quarterly Journal of Applied Mathematics. *Quarterly Journal of Applied Mathematics*. [online]. [cit. 2017-04-08].  
<http://www.fit.vutbr.cz/~peringer/SIMLIB/>.
- [13] Real Time pose estimation of a textured object. *OpenCV*. [online]. [cit. 2017-04-08].  
[https://docs.opencv.org/3.3.0/dc/d2c/tutorial\\_real\\_time\\_pose.html](https://docs.opencv.org/3.3.0/dc/d2c/tutorial_real_time_pose.html).
- [14] Detection of ArUco Markers. *OpenCV*. [online]. [cit. 2016-12-23].  
[https://docs.opencv.org/3.2.0/d5/dae/tutorial\\_aruco\\_detection.html](https://docs.opencv.org/3.2.0/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html).
- [15] Gaël Guennebaud, Benoît Jacob a others. *Eigen v3*. <http://eigen.tuxfamily.org>. 2010.
- [16] Wikipedia. *Směrodatná odchylka*. [online]. [cit. 2017-05-09].  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Sm%C4%9Brodatn%C3%A1\\_odchylka](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sm%C4%9Brodatn%C3%A1_odchylka).