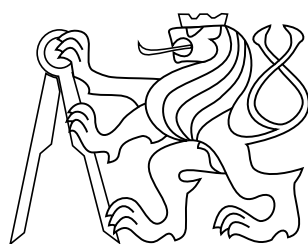


bakalářská práce

Automatická kalibrace báze průmyslového robotu

Marina Ionova



Květen 2020

Ing. Pavel Burget, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, Katedra řídicí techniky

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Ionova** Jméno: **Marina** Osobní číslo: **474683**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Automatická kalibrace báze průmyslového robota

Název bakalářské práce anglicky:

Automatic base calibration of an industrial robot

Pokyny pro vypracování:

1. Zvolte metodu pro nalezení báze průmyslového robota na základě detekce značek. Metodu a značky upravte tak, aby byla použitelná pro vybraný příklad laboratorní výrobní linky.
2. Navrhněte a implementujte aplikaci pro detekci báze z obrazu na základě zvolené metody.
3. Aplikaci propojte s robotem tak, aby jej byla aplikace schopna pro účely kalibrace sama vhodně polohovat.

Seznam doporučené literatury:

1. Bruno Siciliano, Oussama Khatib (Eds.). Springer Handbook of Robotics. 2008. ISBN: 978-3-540-23957-4
2. OpenCV Documentation. <https://docs.opencv.org>.
3. KUKA Roboter GmbH. KUKA.RobotSensorInterface.
4. Wolfgang Mahnke, Stefan-helmut Leitner. OPC Unified Architecture. 2009. ISBN: 978-3-540-68898-3

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Burget, Ph.D., Testbed CIIRC

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **07.01.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **22.05.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

Ing. Pavel Burget, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Poděkování

Děkuji Pavlu Burgetovi za nabídku zajímavého a praktického zadání. Děkuji Ondřeji Novákovi za vedení celé práce. Děkuji kolegům z Testbedu Filipu Dvořákovi a Alexandru Lazarovovi za pomoc s robotem a tiskem 3D součástky. Děkuji Křištofu Pučejdlovi za konzultace a rady v psaní odborných textů. Největší poděkování patří mým rodičům a kamarádům za inspiraci a podporu v průběhu celého bakalářského studia.

Prohlášení

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

Datum

Podpis

Abstrakt

Jedním z hlavních aspektů moderního průmyslu je přesnost a autonomie výrobního procesu. K tomu patří i zvyšující se nárok na schopnost a flexibilitu průmyslových robotů. Důležité je určení přesné polohy a orientace v prostoru pracovní platformy, kde robot provádí nezbytné manipulace, což přímo ovlivňuje jeho přesnost při plnění úkolů. Například mobilní robot, který jezdí do skladu pro součástky, musí přesně lokalizovat krabice s nimi, aby je dokázal správně uchopit. V této práci je navržen způsob řešení tohoto problému, a to metodou kalibrace báze průmyslového robota. Proces nalezení báze je založen na analýze obrazu z kamery, která je připojena k přírubě robota a snímá pracovní platformu s na ní umístěnými referenčními objekty. V závislosti na poloze a orientaci referenčního objektu na snímku vzhledem k základně robota se vypočítá nová báze.

Klíčová slova

průmyslový robot, kalibrace báze, strojové vidění

Abstract

One of the main aspects of modern industry is the accuracy and autonomy of the production process. This includes the increasing demand for the capabilities and flexibility of industrial robots. One of them is the determination of the exact position and orientation of the platform, where the robot performs the necessary manipulations. This calibration directly affects its accuracy for performed tasks. For example, a mobile robot that travels to a warehouse must accurately locate the boxes with parts in order to grip them properly. In this work, I propose an approach to solve this problem, namely the method of finding the base of an industrial robot. It is based on the analysis of the image from the camera, which is connected to the robot flange and scans the workspace with the reference objects placed on it. Depending on the position and orientation of the reference object in the image with respect to the robot root, a new base is calculated.

Keywords

industrial robot, base calibration, machine vision

Obsah

1 Úvod	1
2 Kalibrace robota	3
3 Zpracování obrazu	6
3.1 Nastavení parametrů kamery a předzpracování obrazu	6
3.1.1 Fokus	6
3.1.2 Distorze	7
3.2 Filtr barev a detekce referenčního objektu	8
4 Robot	10
4.1 Ovládání robota	11
5 Algoritmus kalibračního procesu	12
5.1 Umístění referenčního objektu na platformě	17
5.2 Návod na použití	18
5.3 Testování	19
6 Závěr	20
Literatura	22

1 Úvod

Zatímco moderní průmyslový rozvoj trvá již několik století, éra Průmyslu 4.0 začíná právě nyní. Jeho cílem je dosáhnout vyšší úrovně provozní efektivity a produktivity a vyšší úrovně automatizace. Hlavním záměrem této modernizace je individuální, na zákazníka orientovaná adaptace produktů a služeb, která zvýší přidanou hodnotu pro organizace a zákazníky [1]. Díky Průmyslu 4.0 je možné v reálném čase přizpůsobit nabídku produktů a služeb individuálním potřebám zákazníků. Průmysl 4.0 je velmi úzce spojen s oblastmi, jako je internet věcí (IoT), kyberfyzikální systémy (CPS) a informační a komunikační technologie (ICT)[2]. Kombinace uvedených principů umožňuje digitalizovat a automatizovat výrobní proces pomocí propojení informačních systémů a senzorů [3]. Jednotlivé podsystémy vzájemně spolupracují pomocí standardních internetových protokolů, jako je OPC (Open Platform Communications) pro předpovídání, samoladění a přizpůsobování změnám [4].

Důležitou roli v moderním průmyslu hrají roboty. Tradiční průmyslové robotické manipulátory mají obvykle velmi dobrou opakovatelnost, ale relativně nízkou přesnost [5]. Rozdíl mezi skutečnými polohami při opakovaném nastavení jedné polohy je ovlivňován jenom po provedení velkého množství operace, zatímco rozdíl mezi skutečnou polohou a polohou vypočítanou z modelu se liší poměrně silně. Vzhledem k očekávání vysoce kvalitního produktu v Průmyslu 4.0, musí být roboty kalibrovány. Existuje dostatečně velký počet faktorů, kvůli nimž vznikají chyby a nepřesnosti [6]. Z těch hlavních jsou to faktory prostředí (teplota nebo proces zahřívání), parametrické faktory (například změna kinematického parametru v důsledku výrobních a montážních chyb, vliv dynamických a statických parametrů), měření (rozlišení a nelinearita snímačů polohy kloubu) a výpočty (chyby zaokrouhlování počítače a zavedeného řízení). Jednou z metod geometrické kalibrace robota je stanovení relativní polohy souřadných systémů robota pro práci v přesně alokovaném prostoru.

Cílem mé bakalářské práce je pro vybraný příklad laboratorní robotické buňky navrhnout a ověřit koncept pro nalezení nové báze průmyslového robota na základě detekce referenčních značek kamerou. Motivací k řešení této úlohy je moderní výrobní proces, v jehož průběhu jsou díly výroby umístěny na platformách, které se pohybují mezi jednotlivými roboty. K dosažení požadované přesnosti prováděných manipulací je potřeba detekovat polohu a orientaci platformy v prostoru vůči základně robota. Umístění referenčního objektu na výrobní platformu umožní provádět detekci kamerou, která je připevněna na přírubě robota. Jako referenční objekt byl zvolen červený obdélník, jehož poloha a orientace se snadno dají rozpoznat na snímku z kamery.

Tato kalibrace dává možnost správně určit polohu výrobků, což pomáhá zvýšit přesnost provedené práce a umožňuje přizpůsobit robota změnám v jeho pracovním prostoru. Metoda je vhodná k použití u mobilních robotů. Konkrétním příkladem je robot, který má z úkol manipulovat se součástmi ve skladu. Ke správnému uchopování jednotlivých součástí je třeba vědět, kde se nachází a jak je orientovaná konkrétní krabice.

Úvod do kalibračního procesu robota, jeho rozdělení dle fyzikálních vlastností a analýza již existujících metod kalibrací jsou popsány v Kapitole 2. V Kapitole 3 jsou předvedeny metody zpracování obrazů použité v této práci, nastavení parametrů kamery a předzpracování snímku. Kapitola 4 popisuje použitý model robota KUKA a způsoby ří-

1 Úvod

zení. Robot slouží k testování kalibračního algoritmu navrženého v této práci. Samotný algoritmus zarovnání robota a výpočet báze jsou popsány v Kapitole 5. V závěru 6 jsou uvedené výsledky provedené práce a náměty na budoucí zlepšení metody.

2 Kalibrace robota

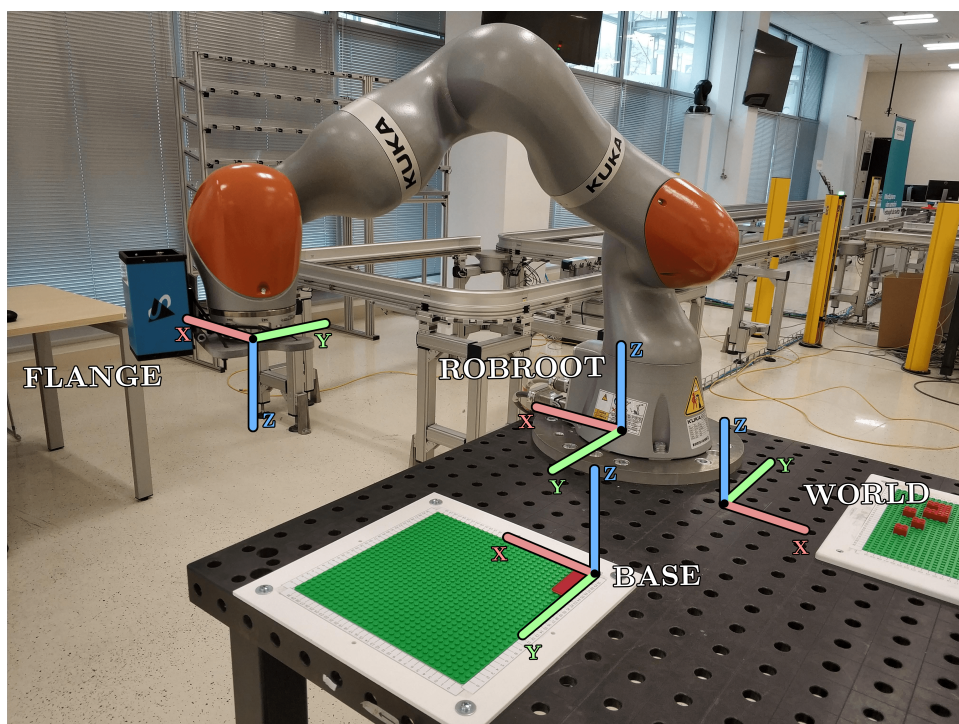
Kalibrace robota je proces určování fyzikálních parametrů, které popisují geometrické a mechanické vlastnosti konstrukce robota a jeho pracovního prostoru. Mechanické kalibrační parametry jsou rozděleny do dvou skupin, dynamické a statické [7]. Druhé zmínění je více závislé na konkrétním kuse robota, jeho namontování nebo deformaci dílů v důsledku nehod, opotřebení nebo faktorů prostředí. Jsou to například délky ramen nebo orientace kloubových os. Dynamické parametry jako hmotnost ramen a kloubů, tuhost ramen a kloubů, vůle a poddajnost pohonů přispívají k výskytu nepřesností v pohybu robota. Tyto nepřesnosti se typicky s časem zvětšují, což je další důvod pro potřebu přesné kalibrace.

Geometrická kalibrace je určení polohy částí robota v prostoru a definování transformačních matic mezi souřadnými systémy robota. K popisu průmyslového robota se nejčastěji používá několik kartézských souřadnicových systémů. Roboty KUKA, druh jednoho z nich se používá k testování programu napsaného v rámci této práci, rozlišují následující soustavy [8]:

- WORLD : Světový souřadnicový systém je ve výchozím stavu umístěn v robotické základně, ale je možné jej definovat libovolně.
- ROBROOT: Robroot je výchozí souřadnicový systém robota, který definuje polohu robota vzhledem ke světovému souřadnicovému systému. Tento systém je fixován v podstavci (neboli patě) robota.
- FLANGE: Je pevně stanovený systém, umístění ve středu příruby robota. Tento bod je vztažným bodem pro souřadnicový systém nástroje, tj. TOOL.
- TOOL: Uživatelsky definovaný souřadnicový systém konkrétního nástroje. Počátek souřadnicového systému nástroje se nazývá nástrojový středový bod a definuje se dle každého typu nástroje zvlášť.
- BASE: Souřadnicový systém báze definuje polohu manipulační platformy vzhledem ke světovému souřadnicovému systému. Báze je volně definovatelná a výhodná pro polohování přípravků, obrobků atd.

Jednotlivé systémy jsou kartézské souřadnicové systémy popsány osami X, Y, Z a příslušnými rotacemi A, B a C dle os Z, Y a X. Umístění a orientace jednoho systému vůči jinému jsou popsány polohovým vektorem a rotacemi podle těchto třech os.

BASE se často používá k určení polohy pásového dopravníku nebo plošiny se zbožím. Při provádění výpočtu trajektorie v této bázi se zvyšuje přesnost práce, protože robot bude provádět manipulaci v souřadnicích platformy, kde se přímo nachází tyto díly. Otázkou však je, jak najít tento souřadnicový systém. Tradiční metody založené na vidění vyžadují pro kalibraci robota přesné 3D příslušenství měřené v referenčním souřadnicovém systému [9],[10]. Takový postup je nepohodlný, časově náročný a v některých aplikacích nemusí být proveditelný. Metody autokalibrace [11] předpokládají, že kamera je pevně připojena k přírubě robotu, a používají kalibrační šachovnici k určení polohy a orientace. V metodách kalibrace typu hand-eye [12] nebo world-robot



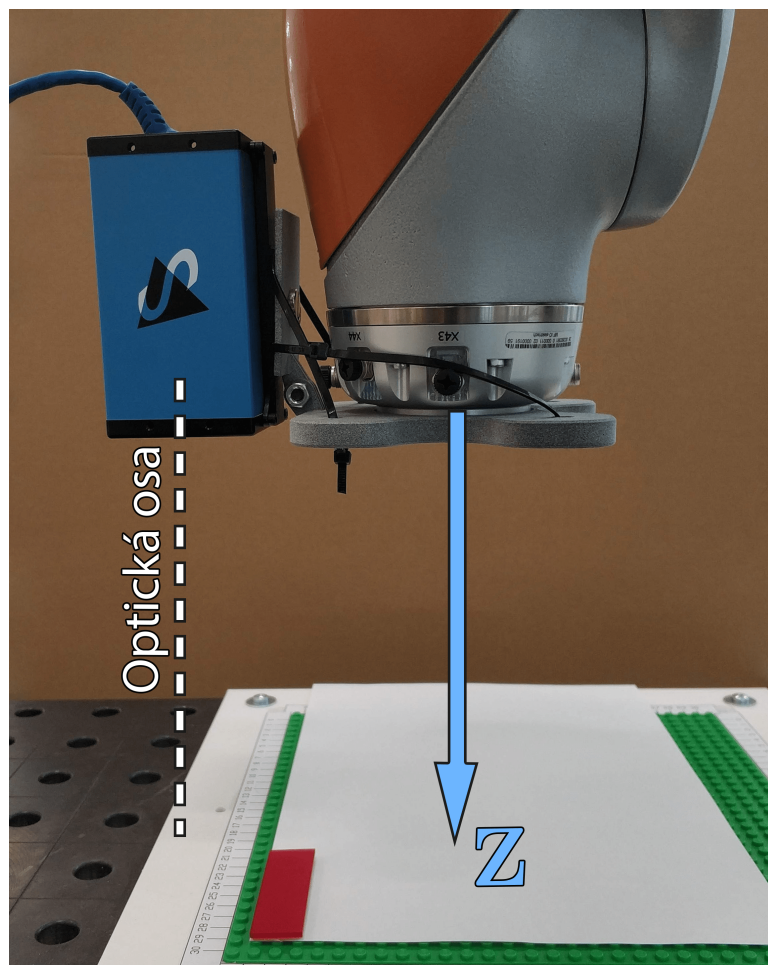
Obrázek 2.1 Souřadnicové soustavy průmyslového robota na vybraném příkladu laboratorní robotické buňky

calibration problem [13] jsou kamery umístěny vedle robota. Metody uzavřené smyčky, jako je virtuální uzavřený kinematický řetězec [14], používají měření úhlu kloubu již v robotu, což lze považovat za takzvanou autokalibraci. Existují metody používající laser [15],[16] k zachycení údajů o poloze robota k modelování tuhosti manipulátoru a predikci kinematických parametrů.

Metoda pro nalezení polohy platformy v prostoru, jež je navržena v dané práci, používá kameru umístěnou přímo na rameni robota. Je připevněna k přírubě robota pomocí speciálního držáku vytisknutého na 3D tiskárně. Objektiv kamery je umístěn ve směru osy Z souřadnicového systému příruby. Umístění kamery bylo zvoleno tak, aby mohla snímat platformu s na ní připevněným červeným obdélníkem, který je orientačním objektem, jenž slouží k nalezení platformy v prostoru. Obraz z kamery je vyhodnocen algoritmem, který na základě polohy, orientace a velikosti obdélníku v obraze vypočítá přesné souřadnice polohy příruby robota v souřadnicovém systému WORLD.

Zarovnání robota se řídí principem Look-Compute-Move. V jednom cyklu se udělá snímek aktuální konfigurace (Look). Na základě zpracování obrazu se určí pozice příruby vzhledem k referenčnímu objektu a je rozhodnuto, zda ukončit program nebo vypočítat souřadnice pro určení směru dalšího pohybu (Compute). Ve druhém případě se po aktualizaci souřadnic robot pohne (Move).

Kalibrační proces se považuje za dokončený, když je příruba robota v takové poloze, kdy optická osa kamery protíná střed obdélníku a ten má vodorovnou orientaci v obraze. Navíc by vzdálenost od kamery k platformě měla být 200 mm, což odpovídá určité velikosti referenčního objektu na snímku. Na základě aktuální polohy příruby se spočítá transformační matice pro přechod ze souřadnicového systému WORLD do BASE.



Obrázek 2.2 Umístění kamery na přírubě robota

Hledaná matice přechodu je

$$\mathbf{T}_W^B = \mathbf{T}_F^B \mathbf{T}_W^F, \quad (1)$$

kde \mathbf{T}_F^B je matice s explicitními parametry, které jsou definované velikostí obdélníku, jeho umístěním od krajů platformy a konstrukce držáku. Matice \mathbf{T}_W^F je definována současnou polohou a orientací FLANGE vůči WORLD.

Zásadní rozdíl představeného kalibračního procesu od těch již známých je v tom, že tato metoda nevyžaduje kalibrační šachovnici k nalezení plošiny [11]. Ke správné funkcionalitě metoda vyžaduje jen přesného umístění referenčního objektu na platformě. Tento objekt může být poměrně malých rozměrů, což umožňuje jeho současné umístění na pracovní platformě spolu s výrobkem. To znamená, že kalibrace se může provádět přímo během výrobního procesu bez nutnosti odstranění dílu, na rozdíl od kalibrace za použití šachovnice.

3 Zpracování obrazu

Používání kamer v průmyslu je již několik desetiletí běžné. S jejich pomocí je sledována bezpečnost provozu v podnicích, prováděna kontrola kvality a počtu produktů a také kontrola procesu nakládky zboží. Kamera v průmyslu ve své podstatě nahrazuje oči pracovníka, který by stejnou operaci prováděl ručně. V posledních letech se ale stále více prosazuje podstatně náročnější nasazení kamer v kombinaci se softwarem na strojové vidění k automatizaci výroby s minimálním zapojením obsluhy.

Průmyslové kamerové zobrazovací systémy jsou již důležitou součástí automatizace výroby. Ve všech fázích výroby—od kontroly surovin a sledování výroby (například odhalování vad) až po kontrolu výstupů a zajištění kvality—tyto systémy hrají klíčovou roli při dosahování vysoké účinnosti a zajišťování souladu s normami kvality. Zpracováním a analýzou získaných obrazových dat se zabývá strojové vidění; aplikace počítačového vidění pro průmysl a výrobu. Zatímco počítačové vidění je obecná sada metod, které umožňují počítačům pracovat s obrysy a získávat data z obrazu, oblastmi zájmu strojového vidění jsou digitální vstupní a výstupní zařízení a počítačové sítě určené k řízení výrobních zařízení, jako jsou robotické manipulátory nebo vyhledávací zařízení vadných výrobků.

Systémy strojového vidění pracují na principu zkoumání jednotlivých pixelů obrazu a rovněž se zabývají zpracováním a vyvozováním závěrů pomocí znalostní báze a sady funkcí. Jako je rozpoznávání vzorů. Ačkoli existují i některé algoritmy strojového vidění, které napodobují všestranné lidské vizuální vnímání, většina používaných algoritmu je specializována na konkrétní úlohu z domény zpracování obrazu.

Ve většině případů systémy strojového vidění používají kombinaci metod zpracování k provedení úplné identifikace. Stejně tak i v dané práci je použita sada následujících metod: analýza barev, binarizace, konturování a měření.

Zpracování obrazu se provádí v programu napsaném v jazyce Python. Ten využívá jednak knihovnu OpenCV (Open Source Computer Vision Library) [17], která je určena pro použití v oblasti počítačového vidění a strojového učení, jednak knihovnu NumPy [18], určenou pro vědecké výpočty v oblasti vícerozměrných polí.

3.1 Nastavení parametrů kamery a předzpracování obrazu

3.1.1 Fokus

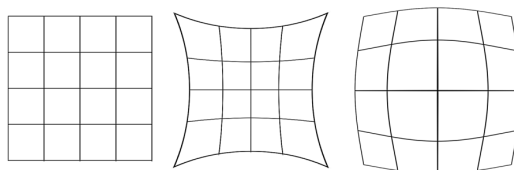
Na začátku práce probíhalo testování metod analýzy zpracování obrazů za použití kamery Intel RealSense Depth Camera - D415. Kvalita obrazu byla dostatečná a nebyly žádné problémy s předzpracováním obrazu. V průběhu práce ji ale bylo nutno změnit na průmyslovou kameru Imaging Source DFK Z30GP031 [19], u které vyvstaly potíže s automatickým nastavením ohniskové vzdálenosti. Dle informace výrobců by se kamera měla zaostřovat buď pomocí funkce *Auto Fokus* nebo ostřením na určitý objekt, jsou-li uvedeny jeho souřadnice v obraze. V obou případech se používá volání metody `Set_Property()` objektu třídy `TIS`, která je v použité knihovně `tiscamera` [20]. Sada funkce automatického fokusování požaduje na vstup souřadnice levého horního rohu, šířku a výšku objektu v pixelech, na které by se kamera měla zaostřit. Na základě

velkého množství experimentů se však ukázalo, že kamera je bez označení oblasti fokosování je schopna najít správnou ohniskovou vzdálenost pouze tehdy, když je předmět umístěn ve vzdálenosti maximálně 15 cm. Byl-li předmět umístěn dál od kamery, zaostření se ani při opakovaných pokusech nezdařilo. Po několika neúspěšných experimentech bylo rozhodnuto použít druhou variantu, tedy zaostřování na určitém objektu. Na obrázku byl detekován referenční obdélník a jeho souřadnice levého horního rohu, šířka a výšky byly zapsané do příslušných funkcí. Ukázalo se však, že jedno volání sady těchto funkcí nestačí a je nutné celou sekvenci iterovat. To znamená, že kamera v jednom cyklu vyfotí jeden snímek, porovná jeho zaostření s předchozím, nastaví ohniskovou hodnotu znova a vypíše ji. Testovací program byl spuštěn několikrát s různou vzdáleností referenčního obdélníku od kamery. Ukázalo se, že nalezená ohnisková vzdálenost konverguje k určité hodnotě v průměru za 100 cyklů, a to jen ve vzdálenosti předmětu od kamery maximálně 30 cm. V případě větší vzdálenosti hodnota fokusu nekonvergovala.

Nezaostřené snímky způsobují chybu v procesu detekce referenčního obdélníku, jehož rozmazané hranice nejsou přesně detekovatelné. Zjištěné chyby je nezbytné eliminovat ještě před spuštěním programu kalibrace tím, že se umístí příruba robota do výšky 10 až 30 cm nad platformou. Softwarově je tento problém vyřešen přidáním funkce, která spouští cyklus nastavující ohniskovou vzdálenost na základě souřadnic referenčního obdélníku na snímku. Cyklus skončí po 100 iteracích, nebo když hodnota fokusu zkonverguje.

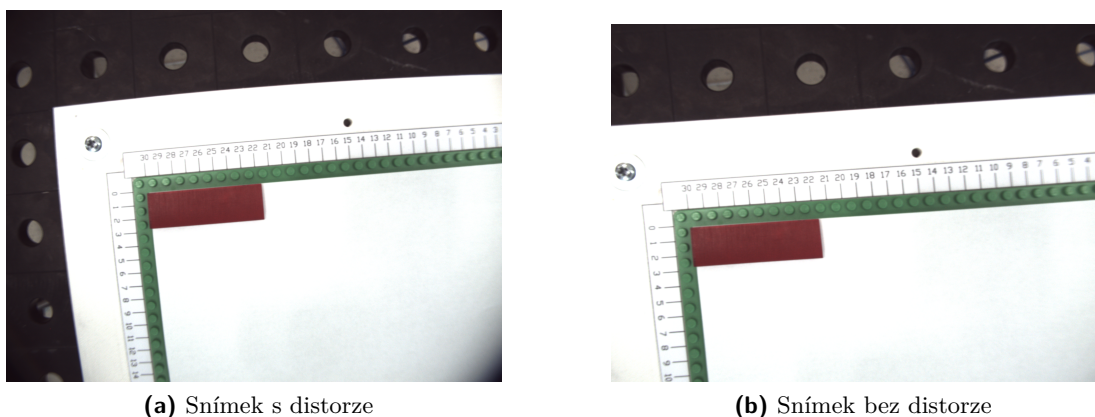
3.1.2 Distorze

Prvním krokem v procesu zpracování obrazu je změna radiálního zkreslení obrazu. Kvůli rozšířenému pozorovacímu úhlu kamery dochází zejména se zvětšující vzdáleností od optické osy k distorzi. Tím se porušuje geometrická podobnost mezi objektem a jeho obrazem, jak je to znázorněno na Obrázku 3.1. Distorze může být zredukována buďto ve fázi návrhu optického systému vhodným výběrem čoček a dalších prvků, nebo zpracováním obrazu v počítači.



Obrázek 3.1 Typy distorze: původní objekt, zobrazení s kladnou a zápornou distorzí.

Navržená metoda při následném použití dat ze získaného obrazu by měla vliv zkreslení na určení parametrů obdélníku, což by vyvolávalo chybu při výpočtu měřítka. Aby se obraz zbavil radiálního zkreslení, je nutné určit kalibrační koeficienty kamery. Jednou z možností je metoda, která na základě několika snímků šachovnice určí požadované parametry. Tato metoda je implementována v samotném programu, který používá funkci pro kalibrace kamery z knihovny OpenCV. Po spuštění tohoto programu se v konzole objeví zpráva o zpracovaných fotografiích a zobrazí se dva důležité parametry - *camera matrix* a *distortion coefficients*. To jsou nezbytné kalib-



(a) Snímek s distorze

(b) Snímek bez distorze

Obrázek 3.2 Příklad zbavení distorze

rační faktory. Dále v hlavním programu při příjmu nového obrazu z kamery funkce `cv2.getOptimalNewCameraMatrix()` vrací novou matici kamery na základě parametru volného škálování. Tyto parametry a kalibrační koeficienty získané z předchozího skriptu jsou odeslány do funkce `cv2.undistort()`, která převádí obraz tak, aby kompenzoval zkreslení objektivu.

3.2 Filtr barev a detekce referenčního objektu

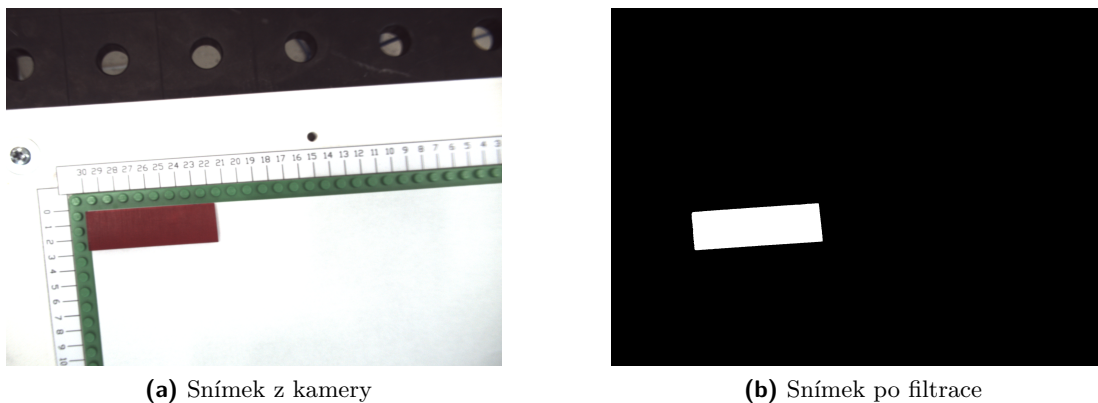
Orientace příruby je určována kamerou, v jejímž zorném poli by měl být červený obdélník umístěný na plošině. Výběr barevného objektu nebyl náhodný, protože jej lze na obrázku najít poměrně přesně.

Pro kalibrační algoritmus je potřeba z obrazu získat obrys referenčního obdélníku. Obrys je jednoduše souvislá křivka rozdělující všechny body v obraze stejnou barvou nebo intenzitou. Obrys je užitečným nástrojem pro detekci a rozpoznávání objektů. Odlesky, stín a struktura materiálu, ze kterého je obdélník vyroben, mají velký vliv na změnu barvy zobrazené na obrázku. Rozpoznání objektu v barevném modelu RGB (červená-zelená-modrá) je docela problematické, protože je obtížné rozlišit řadu odstínů určité barvy. Lepší je proto barevný model HSV. V HSV je "H" odstín (například červená, zelená nebo modrá), "S" je sytost. Čím větší je tento parametr, tím "čistší" je barva, a proto se tento parametr někdy nazývá příměs barvy. Čím více se parametr blíží k nule, tím více neutrální "šedou" barvu získává. "V" je hodnota jasu.

Prvním krokem při rozpoznávání barevných objektů na obrázku je nastavení barevného filtru pro určitou barvu. Základem filtru jsou prahové hodnoty určité barvy. Pomocí uživatelského rozhraní je možné nastavují horní a dolní hranice tří hlavních parametrů HSV modelu. Přesnější postup použití programu je uveden v Kapitole 5.2.

Pro dané podmínky osvětlení je dolní hranice $[167, 124, 34]$ a horní $[180, 174, 47]$. Uvedené parametry je nezbytné vepsat do kódu. Tyto parametry v kódu slouží jako prahové hodnoty pro filtr `cv2.inRange()`.

Dalším důležitým nástrojem strojového vidění je funkce konturování, tj. hledání obrysů v obraze. Poměrně velká část metod analýzy obrazu pracuje konkrétně s obrysy, nikoli s pixely. V OpenCV k nalezení obrysů existuje funkce `findContours()`, která na vstupu požaduje frame, tj. obrázek v 8-bitovém formátu. Hledání obrysů používá pro práci monochromatický obraz, což je právě výstupem z barevného filtru. Výsledkem je seznam všech nalezených obrysů v obraze. Každý jednotlivý obrys je pole (x, y) souřadnic hraničních bodů objektu.



(a) Snímek z kamery

(b) Snímek po filtraci

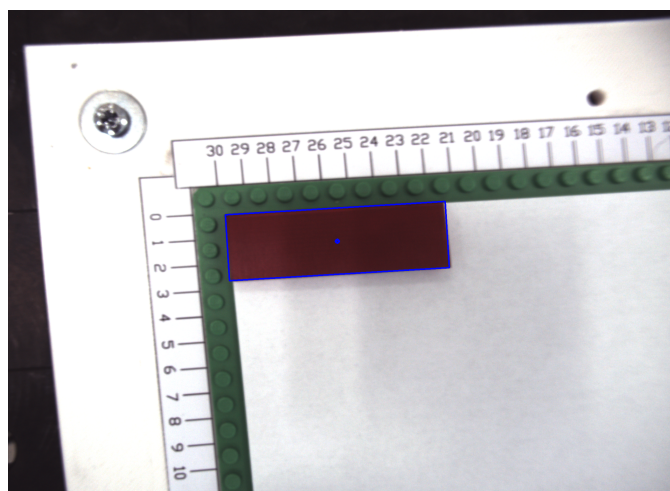
Obrázek 3.3 Příklad aplikace barevného filtru

Obrysy nalezené na obrázku nemusí mít vždy požadovaný tvar, a proto je nutné určit, zda nalezený obrys je obdélník. K tomu je použita funkce `minAreaRect()`, která hledá obdélník o minimální velikosti, jenž se vejde do dané uzavřené smyčky. Je třeba poznamenat, že tato funkce neurčuje, zda je obrys obdélníkový, snaží se pouze do něj optimálním způsobem vložit obdélník. Použitá funkce vrací strukturu `Box2D`, která obsahuje následující hodnoty: střed (x, y) , šířka, výška a úhel natočení. K nakreslení tohoto obdélníku však potřebujeme jeho 4 rohy, jež vypočítá funkce `cv2.boxPoints()`.

Ve zkratce se obrázek zpracovává ve čtyřech krocích:

- Korekce zkreslení
- Barevná filtrace
- Vyhledání obrysů
- Nalezení obdélníku v sadě obrysů a výpis jeho parametrů (souřadnice středu a rohů)

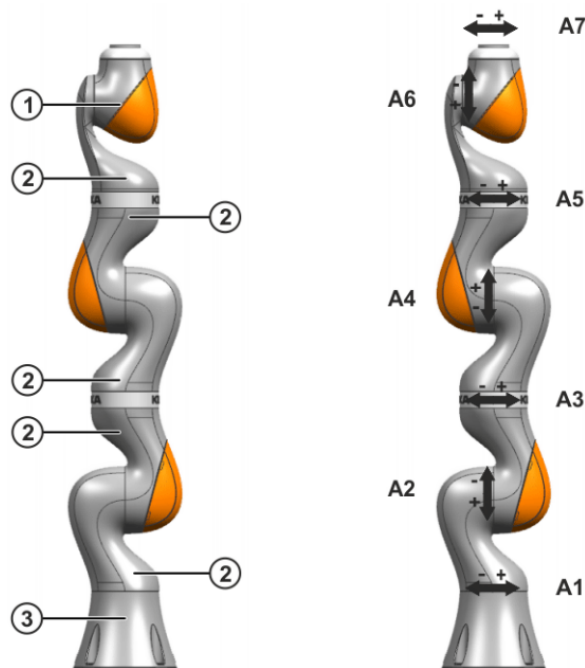
Výsledkem části programu, která se týká zpracování obrazu, je nalezení referenčního obdélníku a jeho parametrů na snímku, viz Obrázek 3.4.

**Obrázek 3.4** Snímek s nalezeným obdélníkem

4 Robot

Jedním z běžných typů průmyslových robotů je robot KUKA [21]. Testování metody navržené v této práci probíhá na modelu robota KUKA LBR IIWA. Jedná se o průmyslové robotické rameno se 7 stupni volnosti, které lze instalovat na mobilní platformy a používat s baterií bez centralizovaného síťového připojení. Každý kloub je vybaven snímačem polohy, senzory točivého momentu na výstupní straně a teplotními čidly, které zabraňují tepelnému přetížení robota [22].

Robot se skládá z následujících hlavních komponent:

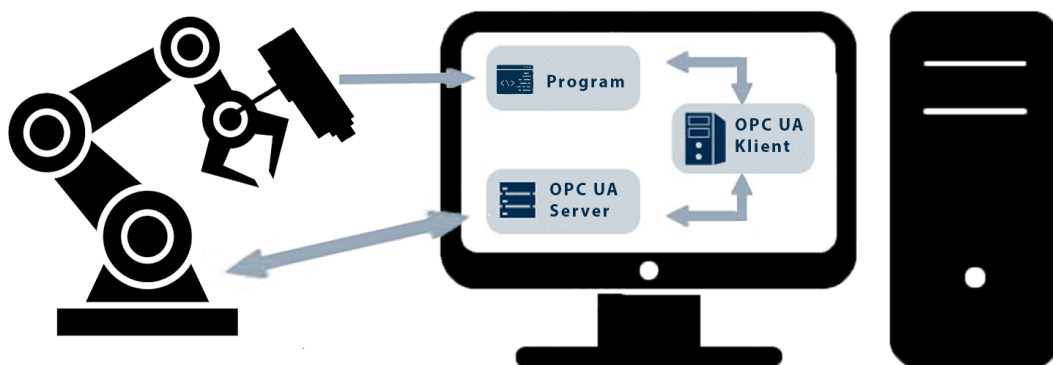


Obrázek 4.1 Hlavní části a osy robota. 1 - In-line zápěstí, 2 - rameno, 3 - základna. A1-A7 umístění motoru [22]

Průmyslové robotické rameno KUKA LBR IIWA je vhodné pro montáž dílů. Používá se také pro další operace vyžadující manipulaci s předměty. Díky vysoké mobilitě a přesnosti řízení je populární v mnoha průmyslových odvětvích.

4.1 Ovládání robota

Ovládání robota je možné v automatickém nebo manuálním módu. Operátor může ovládat robota sám pomocí řídicího panelu KUKA smartPAD. Tento typ řízení se použije před zahájením samotného kalibračního procesu. Přičemž proces kalibrace je v dané práci popsán v Kapitole 5. Před jeho prvním spuštěním musí obsluha zarovnat robota tak, aby byl referenční bod v zorném úhlu kamery a vzdálenost byla v rozmezí 10 až 30 cm. Před spuštěním automatické kalibrace je nutné na ovládacím panelu povolit režim AUT a připojit řídicí jednotku robota k počítači pomocí počítačové sítě. Komunikace programu s robotem je realizovaná prostřednictvím protokolu OPC UA [23], kde server a klient běží na jednom počítači. Klient se po lokální síti připojí k serveru, kde jsou uloženy hodnoty robota, a přečte jeho aktuální souřadnice x , y , z příruby a rotaci kolem osy z . Získané hodnoty jsou posílány do hlavní funkce programu jako argumenty a slouží k výpočtu souřadnic pro následný pohyb robota. Výsledek výpočtu aktualizuje hodnoty ukládané na serveru a také nastavuje lineární mód pohybu robota. Po odeslání dat klient přepne proměnnou *DataReady* na *True*, čímž ohlásí serveru a robotu, že hodnoty souřadnic byly změněny. Po dokončení pohybu robota server opět přejde do čekacího režimu pro další aktualizaci od klienta.



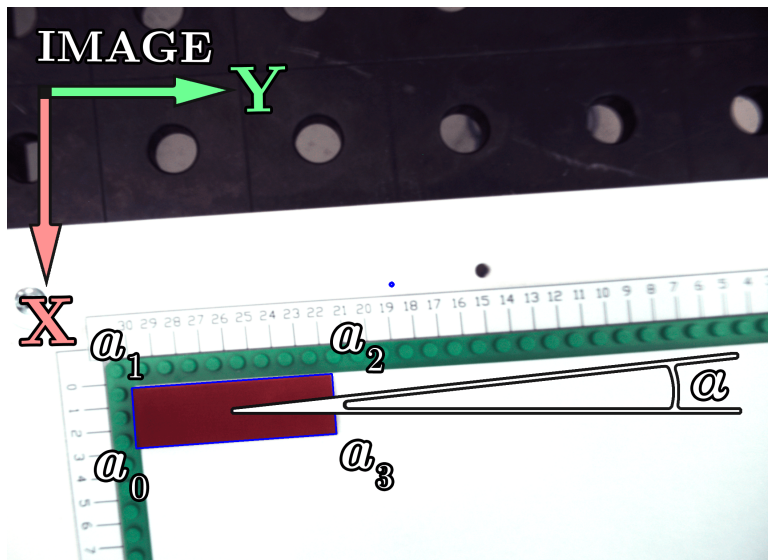
Obrázek 4.2 Schéma vzájemného přenosu dat

5 Algoritmus kalibračního procesu

Přesného určení polohy platformy vůči robotu je dosaženo nastavením příruby s kamerou do určité polohy splňující následující 3 kritéria:

- Optická osa kamery protíná střed orientačního obdélníku.
- Obdélník na zobrazení má vodorovnou orientaci.
- Velikost plochy obdélníku na zobrazení odpovídá referenční hodnotě.

Vektor definující polohu a orientaci příruby v prostoru se skládá ze 6 složek $\mathbf{f}_0 = (x_0, y_0, z_0, A_0, B_0, C_0)$, kde x_0, y_0, z_0 jsou kartézské souřadnice a A_0, B_0, C_0 jsou úhly otáčení ve stupních kolem os Z, Y, X. Dolní index 0 u proměnných znamená aktuální hodnotu, index 1 označuje hodnotu nově vypočítanou. Zarovnání dle příslušných kritérií probíhá v jednotlivých krocích programu, kde každý krok nastavuje jednotlivé složky vektoru \mathbf{f}_1 .



Obrázek 5.1 Souřadnicový systém IMAGE, rohy obdélníku a_0 až a_3 , α je úhel odklonu obdélníku od vodorovné osy

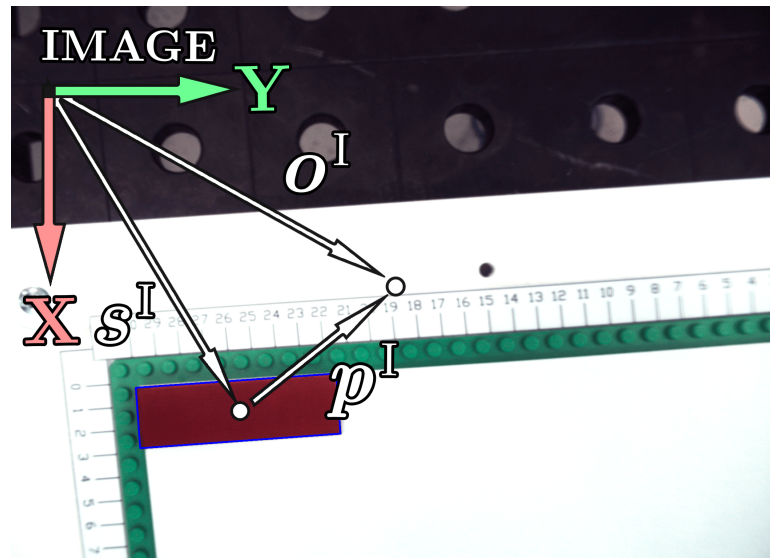
Krok 1 Zarovnání příruby dle rotace kolem osy Z je založeno na výpočtu úhlu natočení obdélníku od vodorovné osy v obraze. Tento krok určuje orientaci celé platformy vůči souřadnicovému systému WORLD. Po zpracování snímku jsou známé souřadnice všech čtyř vrcholů detekovaného obdélníku a_0, a_1, a_2, a_3 , což umožňuje nalézt vektor \mathbf{a}_{12} odpovídající jedné z delších stran. K výpočtu odchylky α je použit vzorec pro nalezení úhlu mezi dvěma vektory. Jeden vektor je \mathbf{a}_{12} a druhý vektor je $\mathbf{r} = (0, 1)$ reprezentující vodorovnou osu.

$$\alpha = \arccos \frac{\mathbf{a}_{12} \mathbf{r}}{\|\mathbf{a}_{12}\| \|\mathbf{r}\|} \quad (2)$$

Nalezený úhel α se přičte k aktuální hodnotě rotace příruby kolem osy Z.

$$A_1 = A_0 + \alpha \quad (3)$$

Krok 2 Cílem následujícího kroku je zarovnání příruby s kamerou v rovině os X a Y, to znamená výpočet souřadnic x_1 a y_1 vektoru \mathbf{f}_1 . Cílem pohybu v této plošině je přemístění kamery tak, aby optická osa kamery protínala střed referenčního obdélníku umístěného na pracovní platformě. Aby se příruba s kamerou přesunula do správné polohy, je potřeba určit, kde se v prostoru nachází střed obdélníku v souřadnicovém systému WORLD. Hledaný vektor polohy středu je $\mathbf{o}^W = (x_1, y_1)$, kde horní index značí souřadnicový systém, ve kterém je umístěn tento vektor. K jeho nalezení se dá použít informace z obrazu. Snímek má vlastní souřadnicový systém IMAGE, jeho orientace je znázorněna na Obrázku 5.2. Souřadnice středu snímku a středu obdélníku jsou známé a vyznačené příslušnými polohovými vektory \mathbf{o}^I a \mathbf{s}^I . Jejich rozdílem je požadovaný vektor posunutí $\mathbf{p}^I = \mathbf{s}^I - \mathbf{o}^I$.

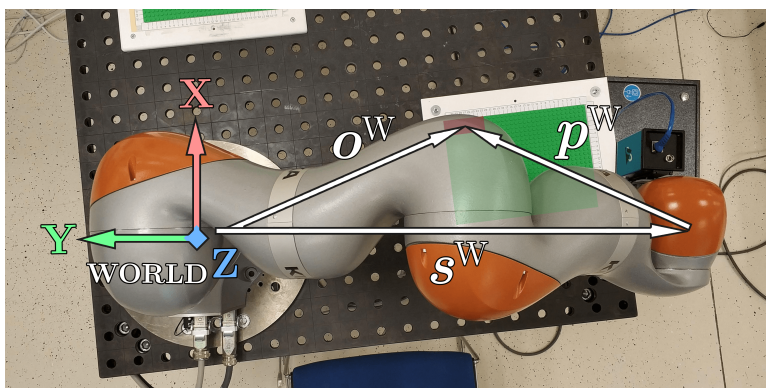


Obrázek 5.2 Souřadnicový systém IMAGE a použité vektory

Nalezený vektor je potřeba převést ze souřadnicové soustavy IMAGE do soustavy WORLD. Transformace mezi nimi je definována měřítkem snímku, tj. násobením skálárem m , a úhlem natočení α z předchozího kroku, což je reprezentované násobením rotační maticí $\mathbf{R}_{z(180-\alpha)}$ kolem osy Z. Měřítka zobrazení odpovídá poměru šířky obdélníku na snímku u^I v pixelech ke skutečné šířce obdélníku $u^W = 65.24$ mm.

$$m = \frac{u^I}{u^W} \quad (4)$$

Pokud je obdélník na snímku umístěn vodorovně, souřadnicový systém IMAGE je otočen o 180° vůči systému WORLD. V případě odchylky obdélníku na snímku od horizontální osy je výrobní platforma otočena o úhel $180^\circ - \alpha$ kolem osy Z v soustavě WORLD.



Obrázek 5.3 Souřadnicový systém WORLD a použité vektory

Hledaný vektor \mathbf{o}^W , který označuje skutečnou polohu středu obdélníku, se dá vypočítat jako součet vektorů aktuální polohy příruby $\mathbf{s}^W = (x_0, y_0)$ a posuvného vektoru \mathbf{p}^W .

$$\mathbf{o}^W = \mathbf{s}^W + \mathbf{p}^W = \mathbf{s}^W + m \mathbf{R}_{(z,180-\alpha)} \mathbf{p}^I \quad (5)$$

Krok 3 Posledním krokem je stanovení polohy platformy na ose Z souřadnicové soustavy WORLD, neboli nastavení souřadnice z_1 vektoru \mathbf{f}_1 . V porovnání s ultrazvukovými senzory vzdálenosti optické přístroje, jako je kamera, nejsou až tak přesné. Stanovení vzdáleností objektu od soustavy čoček kamery je silně ovlivněno nastavením ohniskové vzdálenosti a dalšími okolními vlivy. K vyřešení tohoto problému bylo použito experimentální zjištění závislosti plochy zobrazeného obdélníku na vzdálenosti kamery od platformy.

Na počátku měření byla vzdálenost příruby od platformy nastavena na 100 mm, což odpovídá ploše obdélníku 363110 pixelů. V následujících krocích měření se výška příruby zvětšovala o 20 mm a zaznamenávaly se příslušné hodnoty plochy.

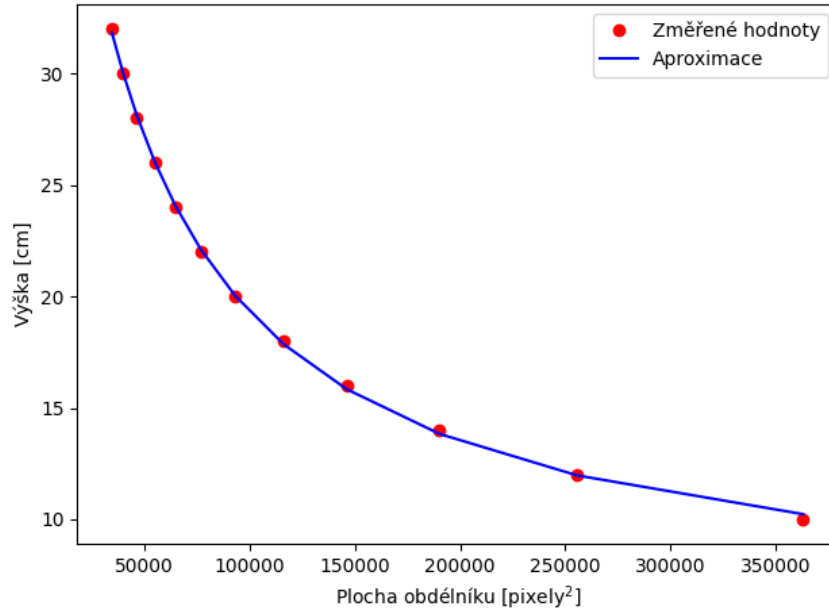
K stanovení závislosti těchto dvou parametrů byla použita aproximace hyperbolické funkce s modelem

$$g(x) = \frac{a}{b(x+c)} + d, \quad (6)$$

kde a , b , c , d jsou parametry, ve výsledku aproximace nabývající hodnoty $a = -8.79 \cdot 10^6$, $b = -4.62$, $c = 3.79 \cdot 10^4$, $d = 5.48$. Aproximace touto funkcí byla zvolena z důvodu, že dle zákonů optické fyziky závislost rozměrů zobrazení na umístění čočky od předmětu je hyperbolická. Změřené hodnoty a aproximační funkce jsou znázorněny na Obrázku 5.4.

Aktuální poloha příruby podél osy Z je určena složkou z_0 vektoru \mathbf{f}_0 a příslušná plocha zobrazeného obdélníku je $S_0^I = u^I \cdot v^I$, kde u^I a v^I jsou šířka a výška. To znamená, že aktuální vzdálenost příruby od plošiny je $l_0^W = g(S_0^I)$. Cílem je vypočítat novou souřadnici z_1 vektoru \mathbf{f}_1 , aby vzdálenost příruby od platformy byla $l_{ref} = 200$ mm.

$$z_1 = z_0 + (l_{ref} - l_0^W) \quad (7)$$



Obrázek 5.4 Graf závislosti vzdálenosti příruby od platformy na velikosti plochy zobrazeného obdélníku

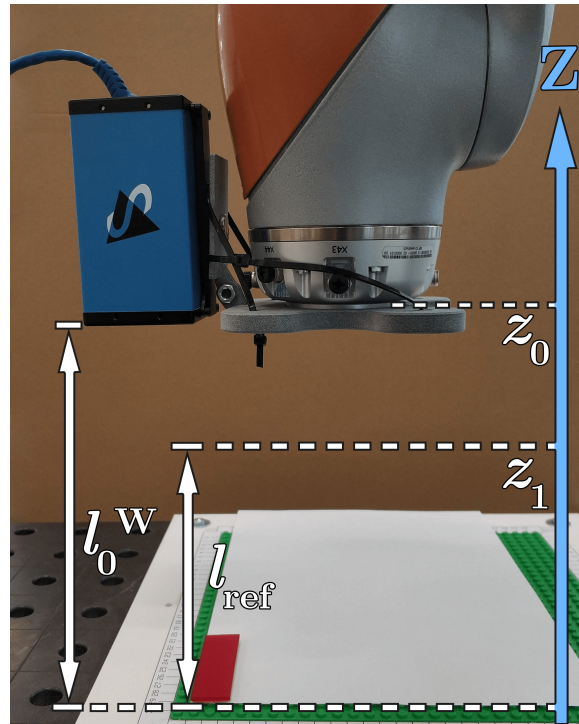
Vypočítaný vektor \mathbf{f}_1 se pošle do robota a ten vykoná příslušný pohyb. Po dokončení pohybu kamera vyfotí aktuální stav, který se zpracuje v dalším cyklu.

Jakmile poloha příruby s kamerou splňuje všechna tři kritéria, je možné vypočítat polohu a orientaci v prostoru hledané báze. Tyto výpočty se provádějí na základě aktuální polohy příruby, tj vektoru \mathbf{f}_0 . Důležité si uvědomit, že nad obdélníkem, jehož dvě strany jsou na kraji platformy, není umístěna samotná příruba, ale kamera, proto souřadnicový systém BASE bude posunut od příruby. Tato odchylka po ose X je $x' = k + 0.5 v^W$ a Y je $y' = 0.5 u^W$, kde u^W a v^W jsou skutečné šířka a výška obdélníku, $k = 107.97$ mm je parametr držáku kamery, vzdálenost optické osy kamery od středu příruby. V případě, že je platforma otočena kolem osy Z, je potřeba přepočítat hodnotu posunu vynásobením matice rotace kolem osy Z o úhel α .

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{(z,\alpha)} \begin{pmatrix} k + 0.5 v^W \\ 0.5 u^W \end{pmatrix} \quad (8)$$

Pak vektor \mathbf{b}^W reprezentuje polohu a orientaci souřadnicového systému BASE vůči WORLD.

$$\mathbf{b}^W = \mathbf{f}_0^W + \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ -l_{ref} \\ \alpha \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 + x' \\ y_0 + y' \\ z_0 - l_{ref} \\ A_0 + \alpha \\ B_0 \\ C_0 \end{pmatrix} \quad (9)$$



Obrázek 5.5 Osa Z souřadnicové soustavy WORLD a použité značení vzdálenosti

Orientace platformy je přesně určena díky primárnímu narovnání otočení podél osy Z a umístění referenčního obdélníku v rohu platformy. Výstupem programu je polohový vektor a orientace nalezené báze \mathbf{b}^W , který se dá pak použít zadáním do řídicího panelu nebo do programu robota.

5.1 Umístění referenčního objektu na platformě

Orientace souřadnicového systému BASE dle osy Z soustavy WORLD může být zadefinována dvěma způsoby:

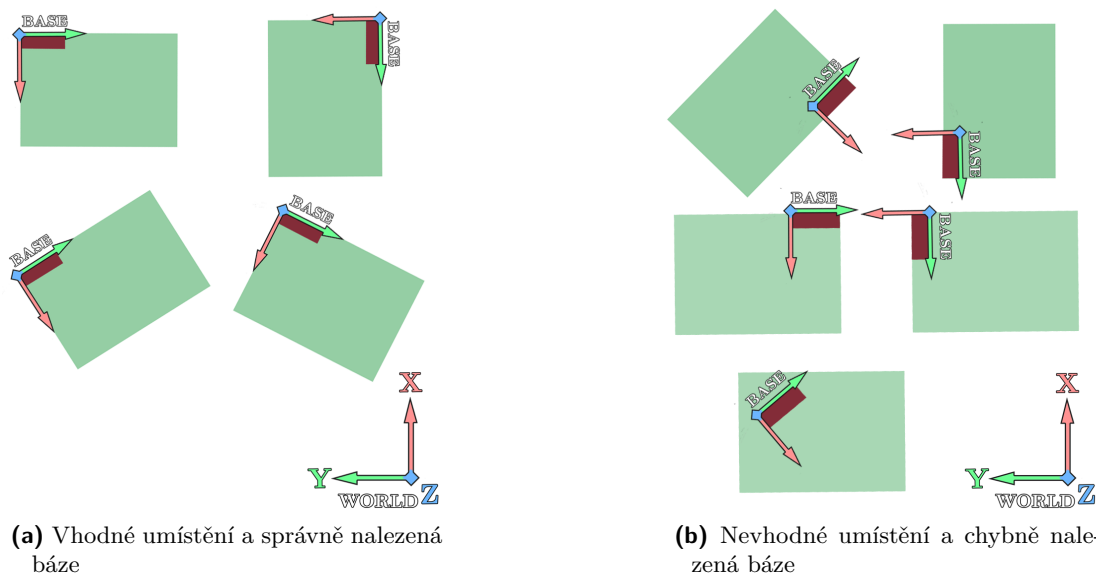
1. *Orientace je zadaná napevno a nemění se.*

Na začátku programu je možnost zadefinovat otočení soustavy BASE kolem osy Z soustavy WORLD, pak bude úkolem programu jen nalezení polohového vektoru.

2. *Rotace je jedním z kalibrovaných parametrů*

Pro tento případ je důležité správné umístění referenčního objektu na základě polohy platformy vzhledem k robotu. Obdélník se musí nacházet v rohu platformy v orientaci označené na Obrázku 5.6a. Zelený obdélník reprezentuje výrobní platformu a červený je referenční objekt. Platforma také může být otočena kolem osy Z o úhel v absolutní hodnotě $|\beta| < 90^\circ$.

V případě, že referenční obdélník bude umístěn jinak, může dojít k chybnému určení orientace souřadnicové soustavy BASE. Příklady takových situací jsou znázorněné na Obrázku 5.6b.



Obrázek 5.6 Příklady umístění referenčního obdélníku na pracovní platformě a následné zadefinování soustavy BASE

5.2 Návod na použití

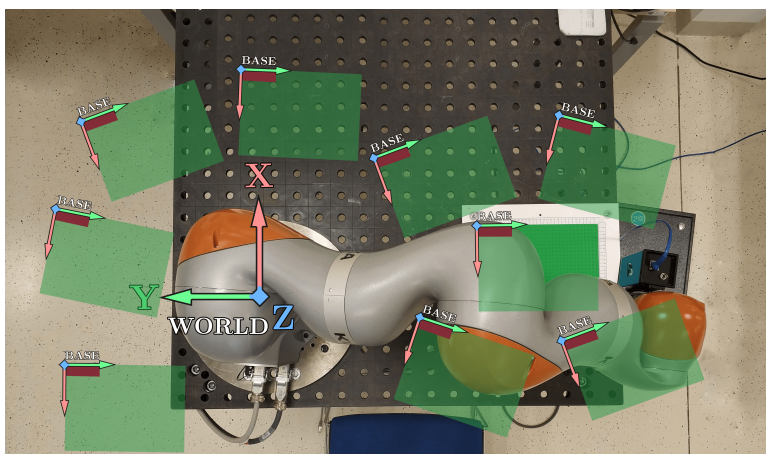
Tato podkapitola slouží jako stručný návod a shrnutí kombinace programu používaných k narovnání robota s následujícím výpočtem soustavy BASE.

1. Kalibrace kamery

Umístěte před kameru kalibrační šachovnici a spusťte program `camera_calibration.py`.

2. Umístění referenčního objektu na platformě

Ke správnému a jednoznačnému definování polohy a orientace souřadnicového systému BASE je třeba spraven umístění obdélníku, které je popsáno v Kapitole 5.1 a znázorněno na Obrázku 5.7.



Obrázek 5.7 Příklady umístění referenčního objektu v závislosti na poloze platformy kolem robota. Zelený obdélník je předpokládaná platforma, červený obdélník je referenční bod.

3. Umístění příruby robota

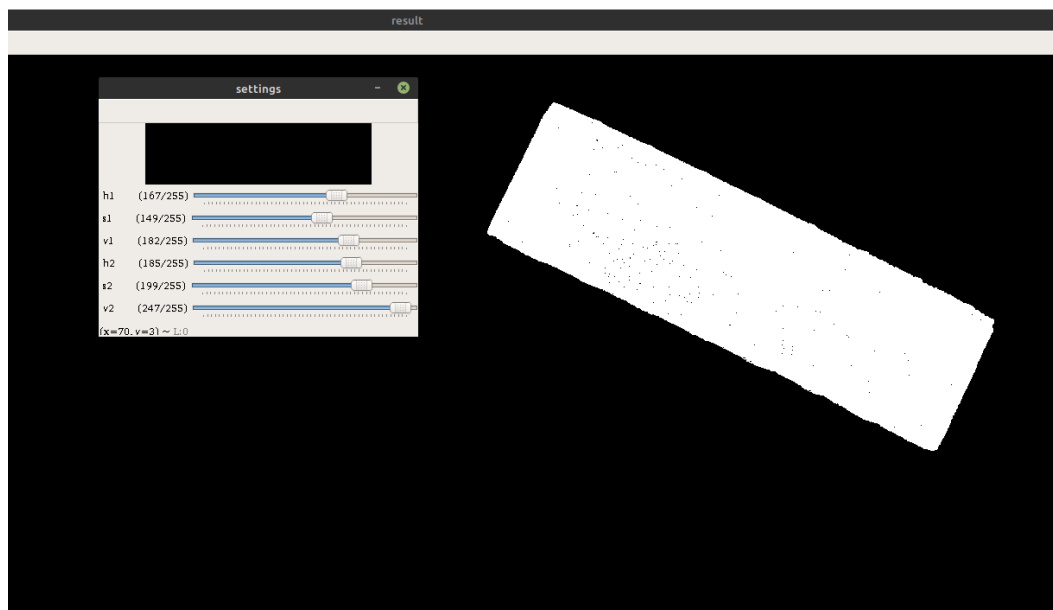
Příruba robota se musí nacházet v takové poloze, aby kalibrační obdélník byl v pozorovacím úhlu kamery a vzdálenost od platformy byla méně než 30 cm.

4. Nastavení prahových hodnot barevného filtru

Spusťte program `filtr.py`. Postupně nastavujte prahové hodnoty přesně v následujícím pořadí $h_2, v_1, s_2, s_1, v_2, h_1$. Posouvejte jezdec, dokud obdélník na snímku nezačne mizet. Ve výsledku by měl být obraz s bílým obdélníkem a černým pozadím jak je to znázorněno na Obrázku 5.8.

5. Kalibrace báze

V kódu programu `base_calibration.py` do proměnných `hsv_max` a `hsv_min` zapíšte prahové hodnoty z předchozího kroku. Kalibrační parametry kamery z bodu 1 nakopírujte do proměn `camera_matrix` a `distortion_coefficients`. Spusťte server `iiwa_server.py` a klienta `Client.py`. Po dokončení kalibrace polohový vektor a orientace souřadnicového systému BASE budou vypsány do konzole.



Obrázek 5.8 Příklad nastavování prahových hodnot

5.3 Testování

Testování kalibračního algoritmu bylo nabíleno na ověření funkčnosti programu, nikoli na stanovení přesnosti metody. Program byl spuštěn 10 krát s různým umístěním platformy kolem robota, jak je to znázorněno na Obrázku 5.7, a různou počáteční polohou příruby. V jednom případě kalibrační program nebyl dokončen kvůli náhlé změně osvětlení, protože algoritmus nebyl schopen rozpoznat umístění referenčního obdélníku na snímku s kamery. V ostatních případech souřadnicový systém BASE byl nalezen správně. Střední doba běhu kalibračního procesu je 28 sekund a počet přemístění příruby je 3. Na základě testování bylo stanoveno, že navařená metoda se hodí k nalezení báze průmyslového robota.

6 Závěr

Cílem práce bylo navrhnout a ověřit koncept kalibrační metody pro nalezení bázi průmyslového robota. V praxi může nalezená báze odpovídat například výrobní platformě nebo krabici ve skladu. Princip metody spočívá v umístění referenčního objektu na potenciální bázi. Tento objekt—v tomto případě červený obdélník—detekuje kamera připevněná k přírubě robota a pomocí něj jsou definované souřadnice báze.

V průběhu práce byly prozkoumány metody počítačového vidění určené k detekci objektů. Ve výsledku byla použita kombinace metod analýzy barev, binarizace, konturování a měření. Na základě prahových hodnot odpovídajících barvě referenčního obdélníku v určitých podmínkách osvětlení je objekt na snímku zvýrazněn pomocí HSV filtru. Následně je obdélník v obraze detekován pomocí nalezených obrysů. Výstupem části zpracování obrazu jsou souřadnice středu obdélníku a jeho rohů na snímku. Nalezené parametry jsou použité k výpočtům nových souřadnic příruby. Kalibrační program pohybuje přírubou, dokud optická osa kamery neprotíná střed referenčního obdélníku a jeho orientace na snímku není vodorovná. Plocha obdélníku v obraze závisí na jeho vzdálenosti od kamery a tedy z měření plochy lze určit vzdálenost příruby od platformy. Z této vzdálenosti a polohy příruby lze vypočítat polohu a orientaci hledané báze.

Výsledkem práce je plně funkční aplikace, která automaticky zarovnává robota do požadované polohy na základě dat z kamery a vypočítá parametry hledané báze. Na základě testování algoritmu se ukázalo, že za předpokladu nastavení správných prahových hodnot a neměnných podmínek osvětlení program funguje bezchybně a správně najde požadovanou bázi. To znamená, že navržená metoda funguje a lze pokračovat v jejím vývoje a zpřesňování. Pro testování přesnosti metody a její následné zlepšení je nutné použití sady dalších přístrojů a dodatečný čas na práci.

Výhodou této metody kalibrace je možnost použití v případě nepřetržitého výrobního procesu a u mobilních robotů. To je umožněno tím, že referenční objekt nevyžaduje mnoho místa a může být na výrobní platformě umístěn spolu s díly nebo může být umístěn na okraji platformy či krabice.

Problém s automatickým fokusem použité kamery během testování omezoval velikosti předmětů, protože se během kalibračního procesu příruba robota musela nacházet v rozmezí 10 až 30 cm nad platformou. Jedním z možných způsobů řešení vzniklého problému je použití jiné kamery s lepší funkcí automatického fokusování pro ostřejší výsledný snímek na větší vzdálenosti.

Díky velkému rozlišení obrazu je výpočetní část algoritmu velice přesná a pohyb příruby se na základě nalezených souřadnic provádí až na úroveň přesnosti samotného robota. Detekce referenčního obdélníku je ovlivňována správným nastavením prahových hodnot barevného filtru. Značný vliv na filtraci obrazu mají odstíny a osvětlení. Zvětšit univerzálnost metody a přizpůsobit ji k práci v prostoru s nestálými podmínkami osvětlení nebo úplně eliminovat potřebu nastavovat hodnoty filtru na základě okolních podmínek je možné umístěním externího osvětlení ke kameře, které by umožnilo regulaci intenzity osvětlení. Dalším způsobem je rozšíření sady metod zpracování obrazu o porovnání se vzorem nebo detekce hran. Možným způsobem detekce by rovněž byla aplikace neuronové sítě. Pečlivě vypracovaný dataset by zachycoval větší část sporných případů souvisejících s vlivem okolních podmínek.

Přidáním dalšího referenčního obdélníku jiné barvy kolmo k již existujícímu umožňuje zbavit se nutné podmínky určité orientace platformy vůči robotu. Kombinace dvou obdélníků umožňuje libovolnou orientaci v ose Z . Chceme-li připustit případ rotace kolem X a Y , je potřeba doplnění dalších referenčních objektů a složitější výpočty k zjištění orientace báze v prostoru.

Literatura

- [1] Vasja Roblek, Maja Meško a Alojz Krapež. “A Complex View of Industry 4.0”. In: *SAGE Open* 6.2 (2016).
- [2] Yang Lu. “Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues”. In: *Journal of Industrial Information Integration* 6 (2017), s. 1–10. ISSN: 2452-414X.
- [3] Jay Lee, Behrad Bagheri a Hung-An Kao. “A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems”. In: *Manufacturing Letters* 3 (2015), s. 18–23. ISSN: 2213-8463.
- [4] P. Marcon et al. “Communication technology for industry 4.0”. In: *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)*. 2017, s. 1694–1697.
- [5] B. Mei et al. “Calibration of a 6-DOF industrial robot considering the actual mechanical structures and CNC system”. In: *2017 International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*. 2017, s. 6–10.
- [6] Wei Jing et al. “Calibration of industry robots with consideration of loading effects using Product-Of-Exponential (POE) and Gaussian Process (GP)”. In: *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2016, s. 4380–4385.
- [7] S.L. Albright R. Benhardt. *Robot Calibration*. Chapman Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, 1993, s. 6.
- [8] Dr. Swati Sharma Bhavin C. Shah Dr. Devendra Nagal. “Coordinate systems for industrial robots”. In: *2016 International Conference on Emerging Technologies in Engineering, Biomedical, Medical and Science (ETEBMS)*. 2016, s. 191–193.
- [9] R. Tsai. “A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses”. In: *IEEE Journal on Robotics and Automation* 3.4 (1987), s. 323–344.
- [10] P. Renaud et al. “Simplifying the kinematic calibration of parallel mechanisms using vision-based metrology”. In: *IEEE Transactions on Robotics* 22.1 (2006), s. 12–22.
- [11] Yan Meng a Hanqi Zhuang. “Autonomous robot calibration using vision technology”. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23.4 (2007), s. 436–446. ISSN: 0736-5845.
- [12] F. Dornaika a R. Horaud. “Simultaneous robot-world and hand-eye calibration”. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 14.4 (1998), s. 617–622.
- [13] G. Campion, P. Fiorini a S. Martelli. “Robot calibration using mobile camera”. In: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*. Sv. 1. 2002, 141–146 vol.1.
- [14] C. S. Gatla et al. “An Automated Method to Calibrate Industrial Robots Using a Virtual Closed Kinematic Chain”. In: *IEEE Transactions on Robotics* 23.6 (2007), s. 1105–1116.

- [15] G. Alici a B. Shirinzadeh. “Enhanced stiffness modeling, identification and characterization for robot manipulators”. In: *IEEE Transactions on Robotics* 21.4 (2005), s. 554–564.
- [16] Gürsel Alici et al. “Prediction of geometric errors of robot manipulators with Particle Swarm Optimisation method”. In: *Robotics and Autonomous Systems* 54.12 (2006), s. 956–966. ISSN: 0921-8890.
- [17] Opencv dev team. “OpenCV 2.4.13.7 documentation”. In: 2019. URL: <https://docs.opencv.org/>.
- [18] NumPy developers. “NumPy Documentation”. In: URL: <https://numpy.org/doc/>.
- [19] LLC The Imaging Source. “DFK Z30GP031 Color Zoom Camera”. In: 2017. URL: https://s1-dl.theimagingsource.com/api/2.5/packages/publications/whitepapers-cameras/wpgigecamerastartup/4df6c%209cb-9fb5-50d0-8b42-82259fd2124b/wpgigecamerastartup_1.0.en_US.pdf.
- [20] The Imaging Source. “Tiscamera 0.11.0 documentation”. In: URL: <https://www.theimagingsource.com/documentation/tiscamera/index.html#>.
- [21] Saeid Mokaram et al. “A ROS-integrated API for the KUKA LBR iiwa collaborative robot”. In: *IFAC-PapersOnLine* 50.1 (2017). 20th IFAC World Congress, s. 15859–15864. ISSN: 2405-8963.
- [22] KUKA Roboter GmbH. “KUKA.RobotSensorInterface (Version: Spe LBR iiwa V3.1)”. In: Pub Spez LBR iiwa en, 2015.
- [23] Wolfgang Mahnke Stefan-Helmut Leitner. *OPC UA – Service-oriented Architecture for Industrial Applications*. ABB Corporate Research Center. Wallstadter Str. 59, 68526 Ladenburg, Germany.