



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**VYUŽITÍ METOD STROJOVÉHO VIDĚNÍ
K AUTOMATICKÉ KALIBRACI ROBOTICKÝCH
PRACOVÍŠŤ**

UTILIZATION OF MACHINE VISION METHODS FOR AUTOMATIC CALIBRATION OF ROBOTIC
WORKSTATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Lisník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Juříček

BRNO 2025

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky
Student: **Bc. Petr Lisník**
Studijní program: Aplikovaná informatika a řízení
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. Martin Juříček**
Akademický rok: 2024/25

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Využití metod strojového vidění k automatické kalibraci robotických pracovišť

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Závěrečná práce se zaměří na kritickou problematiku kalibrace robotických pracovišť, což je klíčový aspekt pro dosažení přesnosti a efektivity v automatizovaných výrobních procesech. V rámci této problematiky bude důraz kladen na metody "Hand-eye" kalibrace pro efektivní určení vztahu mezi robotem a kamerou, a to jak v konfiguraci, kdy je kamera upevněna na konstrukci robota, tak v případech, kdy se kamera nachází mimo robota. Součástí práce bude také výběr vhodného kalibračního objektu, který je nezbytný pro úspěšnou implementaci kalibračních metod. V rámci závěrečné práce bude také navrženo uživatelské rozhraní, které zajistí jednoduché a intuitivní ovládání celé aplikace. Předmětem práce bude vytvoření efektivního a autonomního řešení pro přesné kalibrování robotických pracovišť za použití metod strojového vidění, přičemž se předpokládá integrace primárně 2D prostorových dat. Validace daného řešení proběhne na reálném robotickém pracovišti s využitím kolaborativního robota a kamerového systému. Tato praktická implementace umožní ověřit účinnost navržených kalibračních metod v reálných podmínkách.

Závěrečná práce bude realizována ve spolupráci s firmou Intemac Solutions s.r.o., která poskytne potřebné technické vybavení a odborné konzultace k řešené problematice.

Cíle diplomové práce:

- 1) Provedení rešerše a samostudium v oblasti kalibrace robotických pracovišť. Zejména:
 - Prozkoumání a zhodnocení současných metod "Hand-eye" kalibrace, včetně identifikování jejich výhod a nevýhod.
 - Nastudování kalibračních objektů pro kalibraci robotických pracovišť s využitím strojového vidění.
 - Prozkoumání transformačních a souřadnicových systému relevantních k pojednávané oblasti.
- 2) Návrh efektivního řešení pro automatickou kalibraci robotických pracovišť s využitím metod strojového vidění.
- 3) Návrh uživatelské rozhraní pro intuitivní ovládání a správu dat celého systému.
- 4) Validace navrženého řešení na reálném robotickém pracovišti s použitím kolaborativního robota a kamerového systému.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Park FC, Martin BJ. Robot sensor calibration: solving $AX=XB$ on the Euclidean group. IEEE Transactions on Robotics and Automation. 1994 Oct;10(5):717-21.
- [2] Kevin M. Lynch and Frank C. Park, Modern Robotics: Mechanics, Planning, and Control. Cambridge University Press, 2017. ISBN 9781107156302.
- [3] SICILIANO, Bruno a KHATIB, Oussama, ed. Springer handbook of robotics. 2nd edition. Berlin: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-32550-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Zdeněk Hadaš, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem a implementací systému pro automatickou kalibraci robotických pracovišť s využitím metod strojového vidění. Práce nejprve předkládá teoretické základy prostorových transformací, kamerových systémů a různých kalibračních technik, se zaměřením na hand-eye kalibraci, která umožňuje určit přesný vztah mezi souřadnicovým systémem kamery a robotem. Jedná se pouze o kalibraci 2D kamer. Hlavním přínosem práce je vývoj efektivního algoritmu pro automatickou kalibraci, který minimalizuje potřebu manuálních zásahů, a implementace tohoto řešení v podobě uživatelsky přívětivé aplikace s grafickým rozhraním. Navržený systém byl testován na reálném robotickém pracovišti v obou konfiguračních variantách eye-in-hand a eye-to-hand s využitím několika kalibračních metod, přičemž dosažená přesnost kalibrace byla podrobně vyhodnocena pomocí definovaných metrik a validačních testů.

ABSTRACT

The thesis deals with the design and implementation of a system for automatic calibration of robotic workstations using machine vision methods. The thesis first presents the theoretical foundations of spatial transformations, camera systems and various calibration techniques, with a focus on hand-eye calibration, which allows to determine the exact relationship between the coordinate system of the camera and the robot. Only for 2D camera calibration. The main contribution of the work is the development of an efficient algorithm for automatic calibration that minimizes the need for manual intervention and the implementation of this solution in the form of a user-friendly application with a graphical interface. The proposed system was evaluated on a real robotic workstation in both configurations eye-in-hand and eye-to-hand using multiple calibration methods, and the achieved calibration accuracy was evaluated in detail using defined metrics and validation tests.

KLÍČOVÁ SLOVA

hand-eye kalibrace, robotické pracoviště, strojové vidění, automatická kalibrace, kamerový systém, kalibrační vzor, transformační matice

KEYWORDS

hand-eye calibration, robotic workstation, machine vision, automatic calibration, camera system, calibration pattern, transformation matrix



ÚSTAV AUTOMATIZACE
A INFORMATIKY



2025

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LISNÍK, Petr. *Využití metod strojového vidění k automatické kalibraci robotických pracovišť*. Diplomová práce. Martin JUŘÍČEK (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2025.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Martinu Juříčkovi. Zvláštní poděkování patří zaměstnancům výzkumného centra INTEMAC, kteří mi poskytli potřebné zázemí a technické vybavení pro realizaci praktické části práce. Jmenovitě děkuji zejména Ing. Romanu Parákovi, Ph.D. za jeho neocenitelnou odbornou pomoc, inspirativní připomínky a čas, který mi věnoval během celého procesu výzkumu a vývoje. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině za trpělivost, pochopení a neutuchající podporu během celého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 21. 5. 2025

.....

Petr Lisník

OBSAH

1	ÚVOD	9
1.1	Strukturální osnova	10
2	ZÁKLADY PROSTOROVÝCH TRANSFORMACÍ A SOUŘADNICOVÝCH SYSTÉMŮ V PRŮMYSLOVÉ ROBOTICE.....	11
2.1	Reprezentace pozice	11
2.2	Reprezentace orientace	12
2.3	Homogenní transformace	15
2.4	Transformace v robotickém systému	16
2.5	Kinematika robota	17
2.5.1	Přímá kinematika	18
2.5.2	Inverzní kinematika.....	19
3	ZÁKLADY STROJOVÉHO VIDĚNÍ.....	21
3.1	Kamerový systém.....	22
3.2	Kamera a princip snímání obrazu	22
3.2.1	Základní princip snímání obrazu.....	22
3.2.2	Typy kamer a senzorů	24
3.2.3	Technické parametry (průmyslových) kamer	27
3.3	Zpracování obrazu.....	29
3.3.1	Barevný obraz	29
3.3.2	Předzpracování obrazu	30
3.3.3	Detekce a extrakce obrazových prvků	31
4	KALIBRACE ROBOTICKÝCH PRACOVÍŠŤ	35
4.1	Kalibrace robota	35
4.1.1	Kalibrace parametrů kinematického modelu	36
4.1.2	Kalibrace nástroje (TCP)	36
4.2	Kalibrace kamery	37
4.2.1	Matematický model kamery.....	37
4.2.2	Proces kalibrace kamery	40
4.3	Hand-eye kalibrace	41
4.3.1	Konfigurace hand-eye kalibrace	42
4.3.2	Matematická formulace.....	43
4.3.3	Přehled vybraných metod řešení	46
4.3.4	Proces hand-eye kalibrace.....	50
4.4	Kalibrační objekty	51
4.4.1	2D kalibrační vzory.....	52
4.4.2	3D kalibrační objekty.....	54
4.5	Přesnost kalibrace	55
4.5.1	Faktory ovlivňující přesnost kalibrace	55

4.5.2	Metriky přesnosti kalibrace.....	56
5	NÁVRH A IMPLEMENTACE VLASTNÍHO ŘEŠENÍ.....	59
5.1	Algoritmus automatické kalibrace	60
5.1.1	Počáteční nastavení systému	61
5.1.2	Automatické snímání kalibračního vzoru	62
5.1.3	Zpracování snímků.....	64
5.1.4	Výpočet hand-eye kalibrace.....	65
5.1.5	Výstup kalibračního algoritmu.....	66
5.2	Uživatelské rozhraní	67
5.3	Experimentální robotické pracoviště	71
5.3.1	Kolaborativní robot UR10e.....	71
5.3.2	Kamerový systém.....	73
5.3.3	Konstrukční prvky.....	74
5.4	Testování a validace řešení	75
5.4.1	Testování	76
5.4.2	Validace	79
6	ZÁVĚR.....	83
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	85
	PŘÍLOHY	93

1 ÚVOD

Průmyslová robotika představuje jeden ze základních pilířů moderní automatizované výroby, jejíž vývoj směřem k plně digitalizovaným provozům v souladu s konceptem Průmyslu 4.0 stále akceleroje. S rostoucími požadavky na flexibilitu, přesnost a autonomii robotických systémů vyvstává potřeba efektivnějších metod jejich kalibrace, která zajišťuje přesnou prostorovou orientaci robota v pracovním prostředí. Právě problematika kalibrace robotických pracovišť s využitím metod strojového vidění je ústředním tématem této diplomové práce.

Tradiční manuální metody kalibrace robotických pracovišť jsou časově náročné a vyžadují odbornou znalost, což významně zvyšuje související náklady. Tyto procedury jsou navíc náchylné k lidským chybám, což může vést k nepřesnostem v polohování robota a následným problémům. Automatická kalibrace pomocí kamerových systémů představuje moderní přístup, který minimalizuje nutnost manuálních zásahů, zkracuje čas a snižuje náklady potřebné ke kalibraci a zvyšuje její celkovou přesnost a opakovatelnost.

Zvláště důležitá je *hand-eye* kalibrace (kalibrace vztahu mezi robotem a kamerou), která je klíčovým krokem pro integraci vizuálního vnímání do robotických systémů. Tento typ kalibrace umožňuje přesné mapování mezi souřadnicovými systémy kamery a robota, což je nezbytné pro úlohy jako automatické vychystávání objektů, vizuální inspekce nebo přesná montáž podle vizuálních informací.

Vzhledem k rostoucímu počtu robotických instalací v průmyslu [1, 2] je vývoj efektivních kalibračních metod stále naléhavější. Současné trendy směřují k vytváření uživatelsky přívětivých řešení, která nevyžadují hluboké znalosti v oblasti robotiky nebo počítačového vidění, což je přesně cílem této práce – navrhnout a implementovat automatizovaný systém pro kalibraci robotických pracovišť, který dokáže pracovat s různými konfiguracemi kamer v dvourozměrném prostoru.

Hlavními cíli této diplomové práce jsou provedení komplexní rešerše v oblasti kalibrace robotických pracovišť se zaměřením na *hand-eye* kalibraci pomocí metod strojového vidění. Návrh efektivního algoritmu pro automatickou kalibraci robotických pracovišť, který minimalizuje nutnost manuálních zásahů a zajišťuje vysokou přesnost výsledné kalibrace. Implementace navrženého algoritmu v podobě uživatelsky přívětivé aplikace s grafickým rozhraním, validace a testování vyvinutého řešení na reálném robotickém pracovišti s využitím různých konfiguračních variant a kalibračních metod.

Výsledné řešení má praktický přínos jak pro výzkumná pracoviště, tak pro průmyslové aplikace, kde může výrazně usnadnit a zrychlit proces nasazování robotických systémů využívajících strojové vidění.

Tato diplomová práce je zpracována ve spolupráci s výzkumným centrem INTEMAC, které slouží jako výzkumné a inovační centrum v Jihomoravském kraji. Práce navazuje na stávající výzkum v oblasti kamerových systémů a robotiky prováděný v tomto centru a jejím cílem je nejen akademický přínos, ale i podpora rozvoje malých a středních podniků prostřednictvím strategie *Test-Before-Invest*. Tato strategie, podporovaná například v rámci

iniciativy EDIH-DIGIMAT (*European Digital Innovation Hub*), umožňuje firmám otestovat a vyhodnotit nové technologie před jejich plnou implementací do výrobních procesů.

1.1 Strukturální osnova

Pro systematické zpracování tématu je práce rozdělena do následujících kapitol:

Kapitola 2 poskytuje teoretický základ v oblasti prostorových transformací a souřadnicových systémů v průmyslové robotice, které jsou nezbytné pro porozumění problematice kalibrace. Vysvětluje různé metody reprezentace pozice a orientace v prostoru a uvádí matematické vztahy mezi nimi.

Kapitola 3 představuje základy strojového vidění, včetně popisu kamerových systémů, principů snímání obrazu a metod zpracování vizuálních dat. Tato část slouží jako teoretický základ pro následnou kalibraci kamery a detekci kalibračních vzorů.

Kapitola 4 se věnuje samotné kalibraci robotických pracovišť. Podrobně vysvětluje principy kalibrace robota, kamery a zejména *hand-eye* kalibrace. Dále popisuje různé typy kalibračních objektů a metriky pro hodnocení přesnosti kalibrace.

Kapitola 5 představuje praktickou část práce – návrh a implementaci vlastního řešení pro automatickou kalibraci. Popisuje navržený algoritmus, uživatelské rozhraní, experimentální pracoviště a výsledky testování a validace vyvinutého systému.

Kapitola 6 shrnuje dosažené výsledky, diskutuje přínosy a omezení vyvinutého řešení a nastiňuje možné směry dalšího výzkumu a vývoje v této oblasti.

2 ZÁKLADY PROSTOROVÝCH TRANSFORMACÍ A SOUŘADNICOVÝCH SYSTÉMŮ V PRŮMYSLOVÉ ROBOTICE

Robotické systémy vyžadují přesné určení polohy a orientace jednotlivých komponent i objektů v pracovním prostoru. Souřadnicové systémy poskytují matematický rámec pro tuto definici, zatímco transformace mezi nimi umožňují převádět informace z jednoho referenčního systému do druhého. Tento převod je zásadní pro přesné řízení pohybu robota a jeho interakci s okolním prostředím.

Tato kapitola předkládá matematické metody používané pro reprezentaci polohy a orientace v trojrozměrném prostoru. V rámci této práce se pracuje především s kartézským souřadnicovým systémem, který je v robotice nejčastěji používán pro svou intuitivnost a matematickou jednoduchost. Na rozdíl od polárních nebo cylindrických souřadnicových systémů poskytuje kartézský systém lineární metriku a přímočaré výpočty, což je výhodné při řešení úloh kinematiky a plánování pohybu robota. Nejprve jsou analyzovány různé metody reprezentace pozice a orientace, následně je vysvětlen koncept homogenních transformačních matic, které kombinují rotaci a translaci. Na závěr jsou tyto principy aplikovány na robotické systémy, kde jsou popsány souřadnicové systémy typické pro robotická pracoviště a základní principy kinematiky robota.

Formální a ucelený popis těchto konceptů je nezbytným základem pro následnou analýzu kinematiky robotických systémů a implementaci algoritmů pro plánování pohybu a řízení.

Obsah této kapitoly vychází z různých zdrojů, ve kterých jsou obsaženy jak knižní publikace [3–10], vědecké články [11–13], tak disertační práce [14].

2.1 Reprezentace pozice

Pro reprezentaci polohy v trojrozměrném prostoru se obvykle používají vektory, které definují pozici bodu vzhledem k referenčnímu souřadnicovému systému. Vektor polohy je obvykle reprezentován jako sloupcový vektor, který obsahuje souřadnice bodu v daném souřadnicovém systému.

Obecně je vektor polohy v trojrozměrném prostoru zapsán jako:

$$p = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}, \quad (1)$$

kde p_x, p_y, p_z jsou souřadnice bodu na osách x, y, z referenčního souřadnicového systému.

Translace v prostoru

Translace představuje posunutí bodu v prostoru o určitý vektor, aniž by došlo k jakékoli rotaci. Tento posun lze matematicky vyjádřit jako součet původního vektoru polohy a translačního vektoru:

$$p' = p + t, \quad (2)$$

kde t je vektor posunutí:

$$t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Translace je lineární operace a v prostoru se projevuje jako paralelní posunutí celého souřadnicového systému nebo jednotlivých bodů bez změny jejich orientace. V maticovém zápisu se často reprezentuje jako souřadnicový posun v homogenních souřadnicích, což umožňuje její snadnou kombinaci s rotačními transformacemi.

2.2 Reprezentace orientace

Orientace neboli rotace objektu v trojrozměrném prostoru popisuje jeho natočení vzhledem k referenčnímu souřadnicovému systému. Na rozdíl od pozice, která určuje konkrétní bod v prostoru, orientace popisuje, jak je objekt otočen ve vztahu k tomuto systému. Zatímco v 2D prostoru lze orientaci jednoznačně popsat jedním úhlem, v 3D prostoru má tři stupně volnosti.

Orientaci lze reprezentovat několika způsoby, přičemž nejběžnějšími metodami jsou Eulerovy úhly, kvaterniony nebo rotační vektory, které se pak dále převádí na rotační matice. Každá z těchto metod má své specifické vlastnosti a oblasti využití.

Následující podkapitoly se zabývají jednotlivými reprezentacemi orientace, jejich matematickými vlastnostmi a vzájemnými vztahy.

Rotační matice

Rotační matice je jedním z nejpoužívanějších způsobů reprezentace rotace v trojrozměrném prostoru. Jedná se o čtvercovou matici řádu 3, která transformuje vektory při zachování jejich délky a úhlů mezi nimi. Rotační matice může být obecně zapsána jako:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

kde prvky r_{11} až r_{33} určují rotaci v jednotlivých osách a někdy se také označují jako směrové kosiny. Ty se spočítají jako skalární součin bázových vektorů dvou souřadnicových systémů.

Rotace kolem jednotlivých os lze vyjádřit následujícími maticemi:

- Rotace kolem osy x o úhel θ

$$\mathbf{R}_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

- Rotace kolem osy y o úhel θ

$$\mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

- Rotace kolem osy z o úhel θ

$$\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Pro složitější rotace, kde se rotace aplikuje kolem více os, se jednotlivé rotační matice kombinují. Výsledná rotační matice je získána jejich násobením:

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\theta_z) \mathbf{R}_y(\theta_y) \mathbf{R}_x(\theta_x). \quad (8)$$

Rotační matice má několik klíčových vlastností, které ji odlišují od obecných transformačních matic:

- **Ortogonalita** – Sloupce (a také řádky) rotační matice tvoří ortonormální báze vektory, tedy platí:

$$\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{R} \mathbf{R}^T = \mathbf{I}. \quad (9)$$

To znamená, že inverzní matice rotační matice je rovna její transpozici:

$$\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T. \quad (10)$$

- **Determinant** – Absolutní hodnota determinantu rotační matice je vždy rovna 1. To zajišťuje, že rotace nezpůsobuje změnu měřítka nebo zrcadlení souřadnicového systému.
- **Zachování vzdáleností a úhlů** – Při transformaci pomocí rotační matice se zachovávají délky vektorů i úhly mezi nimi, což je klíčové pro fyzikálně správné transformace.

Ze zápisu pomocí rotační matice je pro člověka těžko představitelné, jak je daný systém otočený. Proto se například k vizualizaci na ovládacích panelech častěji používají zbylé zmíněné reprezentace: Eulerovy úhly, kvaterniony nebo rotační vektory. Jejich zápis je sice kratší a jednodušší, ale nejsou vhodné k dalším výpočtům. Proto se převádí právě na rotační matice. Ty jsou součástí transformačních matic, které se dále používají při výpočtu transformace z jednoho souřadného systému do jiného.

Eulerovy úhly

Eulerovy úhly představují jednu ze základních metod pro vyjádření orientace v trojrozměrném prostoru. Pomocí tří postupných rotací kolem předem definovaných os lze orientaci tělesa jednoznačně určit vůči referenčnímu souřadnicovému systému. V praxi se nejčastěji využívají dvě konvence:

- **Klasické Eulerovy úhly** (různé konvence Z-X-Z, Z-Y-Z, Z-Y-X), kde se orientace popisuje třemi úhly ϕ, θ, ψ .
- **Tait-Bryanovy úhly**, kde jsou rotace prováděny kolem tří vzájemně kolmých os (často označovaných jako yaw, pitch a roll).

Při použití konvence Z-X-Z získáme celkovou rotaci ve formě rotační matice jako součin jednotlivých rotací kolem daných os.

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\psi) \mathbf{R}_x(\theta) \mathbf{R}_z(\phi). \quad (11)$$

Výpočet jednotlivých rotačních matic je v rovnicích (5-7).

U Eulerových úhlů se může objevit problém singulárních pozic tzv. *gimbal lock* – stav, kdy dvě rotační osy (například při specifické hodnotě θ) se srovnají a dojde k degeneraci popisu orientace. V takovém případě ztrácí systém jeden stupeň volnosti, což komplikuje jak výpočet, tak interpretaci výsledné orientace. Tato omezení často vedou k preferenci alternativních reprezentací, jako jsou kvaterniony nebo rotační vektor, zejména v aplikacích, kde je třeba zajistit plynulou a jednoznačnou interpolaci orientací.

Rotační vektor

Rotační vektor představuje kompaktní a intuitivní způsob vyjádření orientace tělesa v prostoru. Je definován jako:

$$\vec{v} = \theta \cdot \vec{u}, \quad (12)$$

kde θ vyjadřuje velikost rotace (v radiánech) a $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ je jednotkový vektor určující osu rotace. To vychází z reprezentace úhlu a osy (*axis-angle*), kdy směr vektoru odpovídá orientaci osy rotace a jeho velikost přímo reprezentuje úhel rotace.

Převod rotačního vektoru na rotační matici lze realizovat pomocí Rodriguesova vzorce:

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \sin \theta [\vec{u}]_{\times} + (1 - \cos \theta) [\vec{u}]_{\times}^2, \quad (13)$$

kde $\mathbf{I}$ je jednotková matice a $[\vec{u}]_{\times}$ je křížová (skew-symetrická) matice vektoru $\vec{u}$, která je definována jako:

$$[\vec{u}]_{\times} = \begin{pmatrix} 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{pmatrix}, \quad (14)$$

Rotační vektor nabízí efektivní reprezentaci orientace díky své kompaktnosti, protože používá pouze tři parametry, což snižuje datovou náročnost a eliminuje problém *gimbal lock*, se kterým se setkává například reprezentace pomocí Eulerových úhlů. Navíc lze rotační vektor snadno převést do dalších reprezentací, například do kvaternionů, pomocí vztahu:

$$q = \left[\cos \frac{\theta}{2}, \vec{u} \sin \frac{\theta}{2} \right], \quad (15)$$

Kvaterniony

Podobně jako rotační vektor vychází kvaterniony z *axis-angle* reprezentace, kde rotace v prostoru je určena osou a velikostí otočení kolem ní. Kvaterniony však tuto reprezentaci zobecňují a zapisují ji do čtyřrozměrné formy, která umožňuje efektivnější manipulaci s rotacemi. Kvaternion je čtyřprvkový vektor ve tvaru:

$$q = (q_w, q_x, q_y, q_z) = \left(\cos \frac{\theta}{2}, u_x \sin \frac{\theta}{2}, u_y \sin \frac{\theta}{2}, u_z \sin \frac{\theta}{2} \right), \quad (16)$$

kde θ je úhel rotace a $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ je jednotkový vektor určující osu rotace. Na rozdíl od rotačního vektoru, kde je rotace přímo vyjádřena v kartézských souřadnicích, kvaterniony

využívají speciální algebraickou strukturu odvozenou z rozšíření komplexních čísel, což umožňuje výpočetně efektivní skládání rotací.

Operace skládání dvou rotací se u kvaternionů provádí jejich násobením. Výsledný kvaternion odpovídá rotaci složené ze dvou po sobě následujících otočení, přičemž násobení kvaternionů není komutativní, tedy $q_1 \cdot q_2 \neq q_2 \cdot q_1$, což odráží přirozené chování rotací v prostoru.

Kvaterniony lze také snadno převést na rotační matici (viz tabulka č.1), což umožňuje jejich použití v rámci homogenních transformací. Přestože jejich algebraická struktura může být méně intuitivní než u Eulerových úhlů, jejich matematické vlastnosti je činí vhodnějšími pro stabilní a efektivní práci s orientacemi v prostoru. Proto se široce využívají v robotice, počítačové grafice a navigačních algoritmech.

Tab. 1: Ekvivalentní rotační matice pro různé reprezentace orientace se zkratkami:

$c_\theta := \cos \theta$, $s_\theta := \sin \theta$, $v_\theta := 1 - \cos \theta$, převzato z [10].

Eulerovy úhly Z-Y-X $(\alpha, \beta, \gamma)^T$	$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma \\ s_\alpha c_\beta & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma \end{pmatrix}$
Rotační vektor (axis-angle) $\theta, \vec{u}$	$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} u_x^2 v_\theta + c_\theta & u_x u_y v_\theta - u_z s_\theta & u_x u_z v_\theta + u_y s_\theta \\ u_x u_y v_\theta + u_z s_\theta & u_y^2 v_\theta + c_\theta & u_y u_z v_\theta - u_x s_\theta \\ u_x u_z v_\theta - u_y s_\theta & u_y u_z v_\theta + u_x s_\theta & u_z^2 v_\theta + c_\theta \end{pmatrix}$
Kvaternion (q_w, q_x, q_y, q_z)	$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 1 - 2(q_y^2 + q_z^2) & 2(q_x q_y - q_w q_z) & 2(q_x q_z + q_w q_y) \\ 2(q_x q_y + q_w q_z) & 1 - 2(q_x^2 + q_z^2) & 2(q_y q_z - q_w q_x) \\ 2(q_x q_z - q_w q_y) & 2(q_y q_z + q_w q_x) & 1 - 2(q_x^2 + q_y^2) \end{pmatrix}$

2.3 Homogenní transformace

Homogenní transformace umožňuje jednotné vyjádření posunutí i rotace v prostoru pomocí jediné transformační matice. Zatímco rotační matice popisují pouze změnu orientace a translace pracuje se souřadnicovým posunem, homogenní transformace kombinuje oba tyto pohyby do jedné operace. To zjednodušuje výpočty a umožňuje efektivní řetězení transformací.

Transformace polohy a orientace objektu v prostoru se pak zapisuje pomocí homogenní transformační matice T :

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

kde:

- $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ je rotační matice určující orientaci,
- $\mathbf{t} = (t_x, t_y, t_z)^T$ je translační vektor definující posunutí,
- poslední řádek zajišťuje, že transformace zůstává afinní a umožňuje použití maticového násobení.

Prostorový bod $p = (x, y, z)$ lze reprezentovat v homogenních souřadnicích jako čtyřprvkový vektor:

$$p_h = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Transformace bodu v prostoru se provede maticovým součinem:

$$p'_h = T p_h = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Výsledné souřadnice bodu po transformaci jsou tedy dány vztahem:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + t. \quad (20)$$

Tato formulace umožňuje snadné skládání více transformací násobením transformačních matic. Pokud má například robotická ruka několik kloubů, každé spojení mezi segmenty může být reprezentováno vlastní homogenní transformační maticí. Celková poloha koncového efektoru vzhledem k základně robota se pak získá součinem jednotlivých transformačních matic:

$$T_{total} = T_1 T_2 T_3 \dots T_n. \quad (21)$$

Inverze homogenní transformace

V některých případech je třeba transformaci obrátit, například při přepočtu polohy z nástroje (TCP) do základního souřadnicového systému robota a obráceně. Inverzní homogenní transformace T^{-1} existuje vždy, pokud R je ortogonální matice ($\det(R) = 1$), což u rotačních matic platí. Inverze má tvar:

$$T^{-1} = \begin{pmatrix} R^T & -R^T t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (22)$$

Tato vlastnost je důležitá například v robotické kinematice, kde se často provádí zpětný převod souřadnic mezi různými referenčními rámci. Inverzní transformaci lze také interpretovat jako transformaci opačné rotace a translace v opačném směru.

Díky své univerzálnosti je homogenní transformace klíčovou metodou pro popis pohybu a orientace v prostoru a nachází široké uplatnění v robotice, počítačové grafice a navigačních systémech.

2.4 Transformace v robotickém systému

Při práci s robotickými systémy je nutné přesně definovat souřadnicové systémy, ve kterých jsou vyjadřovány polohy a orientace objektů. Roboty pracují s více souřadnicovými rámci, mezi kterými je třeba provádět transformace, aby bylo možné přesně určit vzájemnou polohu různých částí robota nebo přepočítat souřadnice pracovního nástroje.

Každý robotický systém obsahuje alespoň dva základní typy souřadnicových systémů: globální a lokální.

- **Globální souřadnicový systém** slouží jako hlavní referenční rámec celého systému. Často je pevně spojen s podlahou, montážním stolem nebo jinou pevnou strukturou v pracovním prostoru robota.
- **Lokální souřadnicové systémy** jsou vázány na jednotlivé části robota, jako jsou klouby, koncový efektor nebo pracovní nástroje. Jejich poloha a orientace se mění v závislosti na pohybu robota.

Pro přesné řízení pohybů a polohování nástroje je nutné mezi těmito souřadnicovými systémy provádět transformace. To umožňuje určit polohu koncového efektoru v globálním souřadnicovém systému nebo naopak přepočítat souřadnice bodů z globálního rámce do lokálního souřadnicového systému nástroje.

Transformace mezi souřadnicovými systémy robota

V robotice se nejčastěji pracuje s několika klíčovými souřadnicovými rámci.

- **Bázový souřadnicový systém (BASE)** – reprezentuje výchozí referenční rámec robota, vůči kterému se vztahují všechny ostatní souřadnicové systémy. Tento systém bývá pevně umístěn například v místě uchycení robota k podlaze.
- **Souřadnicový systém nástroje (TCP – Tool Center Point)** – popisuje polohu a orientaci koncového efektoru robota, tedy například svářečského hořáku, chapadla nebo senzoru. Tento systém je zásadní pro řízení úloh robota, protože definování TCP umožňuje zadávat trajektorie v intuitivní podobě z pohledu uživatele.

Poloha TCP vzhledem k BASE se získá řetězením homogenních transformačních matic jednotlivých kloubů robota. Tím se bude více zabývat další kapitola (2.5 Kinematika robota).

Přepočet mezi souřadnicovými systémy

Při práci s robotem je často nutné přepočítávat souřadnice bodů mezi různými referenčními rámci. Pokud je například známa poloha bodu p v souřadnicovém systému TCP a chceme ji vyjádřit v souřadnicovém systému BASE, použijeme homogenní transformaci:

$$p^{BASE} = T_{TCP}^{BASE} \cdot p^{TCP}. \quad (23)$$

Obdobně lze provádět inverzní transformaci, pokud je třeba převést souřadnice z BASE do TCP:

$$p^{TCP} = T_{BASE}^{TCP} \cdot p^{BASE} = (T_{TCP}^{BASE})^{-1} \cdot p^{BASE}. \quad (24)$$

2.5 Kinematika robota

Kinematika robota se zabývá pohybem robotického mechanismu bez ohledu na síly, které jej způsobují. V kontextu průmyslových robotů popisuje vztahy mezi kloubovými úhly a polohou či orientací koncového efektoru. Rozlišujeme dva hlavní typy kinematických výpočtů: přímou kinematiku, kdy zadané kloubové úhly určují polohu TCP, a inverzní kinematiku, která naopak z požadované polohy TCP určuje odpovídající kloubové úhly.

2.5.1 Přímá kinematika

Přímá kinematika se zabývá výpočtem polohy a orientace koncového efektoru robota na základě známých kloubových parametrů. Každý robot se skládá z jednotlivých tuhých těles (článků) spojených klouby, přičemž poloha efektoru je určena konfigurací těchto kloubů.

Matematický popis přímé kinematiky

Pro matematický popis pohybu se využívají homogenní transformační matice, které popisují změny polohy a orientace mezi sousedními články robota. Pokud má robot n stupňů volnosti a označíme transformační matici mezi článkem i a $i - 1$ jako T_i^{i-1} , pak výsledná transformace TCP vzhledem k bázeovému systému je dána součinem:

$$T_{TCP}^{BASE} = T_1^{BASE} \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \dots T_n^{n-1} \cdot T_{TCP}^n. \quad (25)$$

Každá tato matice obsahuje rotační i translační složku odpovídající danému kloubu. Pro zajištění systematického popisu robotické struktury se obvykle využívá Denavit-Hartenbergova (DH) parametrizace. Je důležité nezapomenout na poslední člen T_{TCP}^n , který reprezentuje transformaci mezi posledním článkem robota a samotným nástrojem (efektorem). Tento člen popisuje délku koncového efektoru a jeho orientaci vůči poslednímu článku robota, což je zásadní pro přesné určení skutečné polohy TCP v prostoru.

Denavit-Hartenbergova parametrizace

Denavit-Hartenbergova (DH) parametrizace představuje standardizovaný způsob pro přiřazení souřadnicových systémů jednotlivým článkům robotického manipulátoru a popis transformačních matic mezi těmito články. Tato metoda umožňuje systematicky popsat kinematiku robotického řetězce pomocí minimálního počtu parametrů. Pro každý kloub jsou definovány čtyři DH parametry:

1. **Délka spoje (a_i)** – vzdálenost mezi dvěma sousedními klouby podél osy x_i .
2. **Úhel natočení (α_i)** – úhel mezi osami z_{i-1} a z_i měřený kolem osy x_i .
3. **Posunutí (d_i)** – vzdálenost mezi osami x_{i-1} a x_i podél osy z_{i-1} .
4. **Úhel kloubu (θ_i)** – úhel mezi osami x_{i-1} a x_i měřený kolem osy z_{i-1} .

Tyto parametry jsou uspořádány do homogenní transformační matice ve tvaru:

$$T_i^{i-1} = \begin{pmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Pro úplný popis robotického manipulátoru stačí sestavit tabulku DH parametrů pro všechny klouby, což výrazně zjednodušuje analýzu kinematiky složitých robotických systémů. U rotačních kloubů je θ_i proměnnou hodnotou, zatímco u prizmatických (posuvných) kloubů je proměnnou hodnota d_i . Výsledná transformace od základny k efektoru (TCP) je pak dána součinem všech dílčích transformačních matic (25).

Přímá kinematika jednoznačně určuje polohu koncového efektoru na základě daných kloubových parametrů. Pokud však chceme naopak najít konfiguraci kloubů pro požadovanou

polohu TCP, nemusí existovat jediné řešení – tento problém řeší inverzní kinematika v následující části.

Tab. 2: Ukázka konkrétní DH tabulky pro robota UR10e [15].

ID Kloubu	θ [rad]	a [m]	d [m]	α [rad]
1	0	0	0,1807	$\pi/2$
2	0	-0,6127	0	0
3	0	-0,57155	0	0
4	0	0	0,17412	$\pi/2$
5	0	0	0,11985	$-\pi/2$
6	0	0	0,11655	0

2.5.2 Inverzní kinematika

Inverzní kinematika řeší opačný problém než kinematika přímá – pro zadanou cílovou polohu a orientaci koncového efektoru (TCP) je třeba určit odpovídající kloubové parametry robota. Tento problém je obecně složitější než přímá kinematika, protože řešení nemusí být jednoznačné a v některých případech nemusí existovat vůbec.

V závislosti na konstrukci robota a jeho stupních volnosti může mít inverzní kinematika:

- **Jedno řešení** – typické pro roboty s přesně definovanou geometrií a minimálním počtem stupňů volnosti potřebným k dosažení dané pozice.
- **Více řešení** – běžné u robotů více stupni volnosti, kde existuje více různých konfigurací, které vedou ke stejné poloze TCP.
- **Žádné řešení** – pokud je požadovaná poloha mimo pracovní oblast robota nebo pokud omezení kloubů neumožňují dosažení dané konfigurace.

Matematický popis inverzní kinematiky

Inverzní kinematika spočívá v nalezení vektoru kloubových parametrů

$$q = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n), \quad (27)$$

pro který platí vztah:

$$T_{TCP}^{BASE}(q) = T_{required}^{BASE}, \quad (28)$$

kde $T_{TCP}^{BASE}(q)$ představuje transformační matici vypočítanou z přímé kinematiky a $T_{required}^{BASE}$ je požadovaná poloha a orientace TCP. Cílem inverzní kinematiky je určit takové hodnoty q , které zajistí splnění této rovnice.

Přístupů k řešení inverzní kinematiky je několik: analytické metody, numerické metody, hybridní metody nebo metody s využitím strojového učení.

Analytické metody

Vycházejí z geometrických a algebraických vlastností robota a snaží se najít explicitní vztahy mezi polohou efektoru a hodnotami kloubových proměnných. Tyto metody jsou výpočetně

efektivní a poskytují přesná řešení bez nutnosti iterativních výpočtů, ale lze je použít pouze pro specifické struktury robotů.

Numerické metody

Numerické metody se používají v případech, kdy nelze nalézt explicitní analytické řešení. Pracují iterativně a postupně upravují kloubové úhly tak, aby se TCP co nejvíce přiblížil k požadované poloze. Tyto metody jsou univerzální a aplikovatelné na širokou škálu robotických mechanismů, avšak mohou být výpočetně náročnější. Mezi často používané numerické metody patří:

- **Metody využívající Jakobián** – Jakobián popisuje vztah mezi změnou kloubových úhlů a pohybem TCP. Invertováním nebo aproximací Jakobiánu lze iterativně upravovat kloubové úhly tak, aby TCP konvergoval k cílové poloze.
- **Newton-Raphsonova metoda** – využívá parciálních derivací k nalezení nulových bodů funkce popisující chybu v poloze TCP. Poskytuje rychlou konvergenci, ale vyžaduje dobrý počáteční odhad.
- **Cyclic Coordinate Descent (CCD)** – jednoduchá heuristická metoda, která upravuje kloubové úhly postupně od koncového efektoru směrem k základně, čímž přibližuje TCP k cíli. Je výpočetně nenáročná a vhodná pro roboty s vysokým stupněm volnosti, ale nemusí vždy vést k optimálnímu řešení.
- **Damped Least Squares (DLS)/Levenberg-Marquardtova metoda** – rozšíření pseudoinverze Jakobiánu, které přidává tlumicí člen pro zvýšení stability v blízkosti singulárních konfigurací. Zabraňuje nestabilním skokům v kloubových úhlech a zlepšuje numerickou robustnost.

Hybridní metody

Hybridní metody kombinují výhody analytických a numerických přístupů k inverzní kinematice. Typicky využívají analytická řešení pro jednodušší části mechanismu a numerické metody pro složitější konfigurace nebo situace, kdy analytické řešení neexistuje. Tento přístup zlepšuje výpočetní efektivitu, zvyšuje stabilitu a umožňuje řešit úlohy s omezeními či redundancí robota.

Metody s využitím strojového učení

Metody založené na strojovém učení využívají neuronové sítě, regresní modely nebo posilované učení k aproximaci řešení inverzní kinematiky. Tyto metody intuitivně řeší problém redundance a singularit, ale často vyžadují rozsáhlá trénovací data a mohou mít vysoké výpočetní nároky, což omezuje jejich použitelnost v řízení v reálném čase.

3 ZÁKLADY STROJOVÉHO VIDĚNÍ

Strojové vidění je velmi rozsáhlá a technicky komplexní oblast, která zahrnuje disciplíny jako optika, snímání a zpracování obrazových dat, kalibrace kamer a interpretace vizuálních informací. Tato kapitola si klade za cíl představit pouze základní principy a pojmy, které jsou důležité pro porozumění a implementaci praktické části práce.

Strojové vidění (*machine vision*) je oblast, která se zabývá získáváním, zpracováním a interpretací obrazových dat s cílem extrahovat užitečné informace pro další automatizované rozhodování. Umožňuje strojům „vidět“ a „vnímat“ své okolí podobným způsobem, jakým to dělají lidé – i když principy a technické prostředky jsou odlišné.

Na rozdíl od lidského vnímání, které je založeno na biologických principech, strojové vidění využívá přesné matematické algoritmy a výpočetní techniky k systematickému zpracování obrazových informací. Tento přístup umožňuje strojům provádět rychlé a konzistentní vyhodnocení bez vlivu únavy, subjektivního hodnocení nebo individuálních odchylek.

Typickými vstupy pro systémy strojového vidění jsou snímky získané z kamer nebo jiných optických senzorů, které jsou následně analyzovány pro účely identifikace objektů, měření rozměrů, sledování pohybu, rozpoznávání tvarů, kontrolu kvality a mnohé další úlohy.

Strojové vidění nachází uplatnění zejména v průmyslové automatizaci, kde slouží k vizuální kontrole výrobků, měření rozměrů, detekci vad nebo navigaci robotů. Používá se také v logistice (např. čtení čárových a QR kódů), dopravních systémech (sledování vozidel, kontrola dopravních značek), zemědělství (monitoring plodin), a v mnoha dalších oblastech, kde je třeba automatizovaně vyhodnocovat vizuální informace s vysokou přesností a opakovatelností. Díky pokroku v oblasti výpočetní techniky, kamerových senzorů a algoritmů zpracování obrazu se strojové vidění stává stále dostupnějším a výkonnějším nástrojem pro nasazení v reálném prostředí.

Je také důležité nezaměňovat strojové vidění s počítačovým viděním (*computer vision*). Strojové vidění a počítačové vidění jsou dva příbuzné, ale odlišné přístupy k analýze a zpracování obrazových dat. Strojové vidění je primárně zaměřeno na průmyslové a technické aplikace, kde se používá především v kontrole kvality, automatizaci a strojírenství. Specializuje se na přesně definované úlohy, jako je měření, detekce vad a kontrola výrobků [16, 17]. Využívá k tomu speciálně navržené hardwarové a softwarové systémy.

Oproti tomu počítačové vidění představuje širší oblast, která se snaží napodobit lidské vidění a porozumění obrazu. Nachází uplatnění v mnoha oborech včetně robotiky, autonomních vozidel, medicíny a rozpoznávání obličejů. Využívá pokročilé algoritmy strojového učení a neuronových sítí k řešení komplexních úloh, jako je rozpoznávání objektů, segmentace obrazu a interpretace vizuálních scén.

Obsah této kapitoly vychází z různých zdrojů, ve kterých jsou obsaženy primárně knižní publikace [18–26].

3.1 Kamerový systém

Kamerový systém ve strojovém vidění představuje komplexní sestavu vzájemně propojených komponent, jejichž správná konfigurace je klíčová pro úspěšnou aplikaci. Základními prvky tohoto systému jsou:

Kamera

Zařízení, které převádí světelnou informaci na elektrický signál. Skládá se z těla kamery obsahujícího obrazový snímač (CCD nebo CMOS) a obvodů pro zpracování signálu. Kvalita kamery je určena především vlastnostmi snímače, jako je velikost, citlivost, dynamický rozsah a šumové charakteristiky.

Objektiv

Optický prvek, který slouží k soustředění světla na obrazový senzor a významně ovlivňuje kvalitu výsledného obrazu. Klíčovými parametry objektivu jsou například ohnisková vzdálenost nebo clonové číslo. Pro průmyslové aplikace se často používají specializované objektivy s pevně danou ohniskovou vzdáleností a minimální distorzí.

Osvětlení

Často podceňovaná, ale kritická součást kamerového systému. Správné osvětlení scény může výrazně zjednodušit následné zpracování obrazu a zvýšit spolehlivost detekce. Používají se různé typy osvětlení: přední osvětlení, zadní osvětlení, difuzní kopulové osvětlení, tmavé pole a další.

Snímaný předmět

Předmět zájmu a jeho vlastnosti (materiál, povrchová úprava, barva, tvar) musí být zohledněny při návrhu kamerového systému. Lesklé, průhledné nebo velmi tmavé povrchy představují specifické výzvy pro systémy strojového vidění.

Výpočetní jednotka

Zahrnuje výpočetní hardware i software pro zpracování obrazových dat a implementaci algoritmů strojového vidění. Co se týče hardwaru, tak může jít o vestavěný systém přímo součástí kamery (tzv. *smart camera*), připojený počítač nebo řídicí systém. Software pro zpracování obrazu a řízení celého systému je finálním prvkem kamerového systému. Zahrnuje nástroje a metody pro kalibraci, zpracování obrazu, analýzu a interpretaci dat a komunikaci s nadřazenými systémy.

3.2 Kamera a princip snímání obrazu

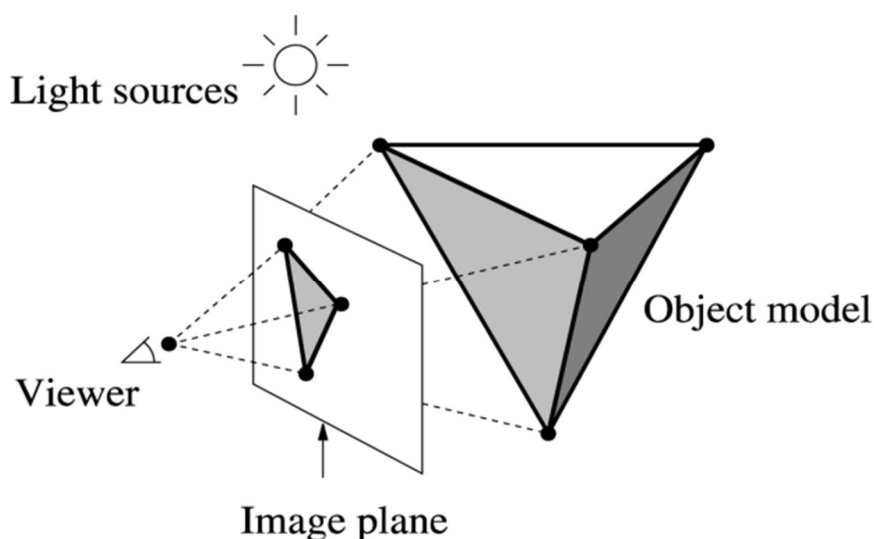
3.2.1 Základní princip snímání obrazu

Hlavním úkolem klasické kamery ve strojovém vidění je zachytit vizuální informaci o trojrozměrném (3D) světě a převést ji do dvourozměrné (2D) digitální podoby, která může být dále analyzována a zpracována výpočetními prostředky. Tento proces zahrnuje několik navazujících kroků – od zachycení světla až po digitalizaci obrazu.

Projekce 3D scény na 2D obraz

Světlo, které dopadá na povrch objektů ve scéně, je částečně odraženo a následně vstupuje do kamery přes její optickou soustavu – obvykle objektiv tvořený jednou nebo více čočkami. Cílem této soustavy je zaostřit světlo přicházející z jednotlivých směrů tak, aby se paprsky z jednoho bodu ve scéně protínaly v jediném bodě na snímáči. Tím vzniká projekce 3D bodu do 2D obrazové roviny.

Výsledný obraz je tedy ploché znázornění prostorové scény, kde jsou informace o vzdálenosti (hloubce) zakódovány nepřímou – například velikostí objektů, perspektivní deformací nebo rozmazáním.



Obr. 1: Projekce 3D objektu do 2D obrazu [27]

Proces zachycení a digitalizace obrazu

Celý proces snímání obrazu lze rozdělit do několika navazujících kroků:

1. Zachycení světla

Světlo odražené nebo emitované objekty ve scéně je zachyceno optickým systémem kamery. Množství světla vstupujícího do kamery je regulováno:

- **clonou (aperturou)** - mechanickým otvorem, jehož průměr určuje množství procházejícího světla,
- **expozičním časem** - dobou, po kterou je senzor vystaven světlu,
- případnými **optickými filtry**, které mohou selektivně propouštět určité vlnové délky světla.

2. Fokuse a formování obrazu

Světelné paprsky procházejí soustavou čoček v objektivu, kde jsou lámány podle zákonů geometrické optiky. Hlavní funkcí tohoto optického systému je:

- soustředit paprsky tak, aby vytvořily ostrý obraz na rovině senzoru,
- korigovat optické vady (aberrace), které by jinak degradovaly kvalitu obrazu,
- umožnit zaostření na objekty v různých vzdálenostech.

Objektiv lze charakterizovat jeho ohniskovou vzdáleností, která určuje zorný úhel a zvětšení. Zaostření lze dosáhnout více způsoby, například změnou vzdálenosti mezi objektivem a senzorem nebo mezi jednotlivými optickými členy.

3. Projekce na světlocitlivý senzor

Světlo fokusované objektivem dopadá na světlocitlivý senzor umístěný v ohniskové rovině. Senzor se skládá z matice fotocitlivých elementů (pixelů), které převádějí dopadající fotony na elektrický náboj. Tento proces je založen na fotoelektrickém jevu, kdy foton dodá energii potřebnou k excitaci elektronu.

Každý pixel senzoru zaznamenává intenzitu světla, které na něj dopadá. Pokud je cílem zachytit barevný obraz, je třeba zaznamenat nejen celkovou intenzitu, ale i spektrální složení dopadajícího světla. V praxi se to obvykle řeší jedním ze dvou způsobů. Nejčastěji používaný přístup je použití Bayerovy masky, což je barevný filtr umístěný nad senzorem, který zajišťuje, že každý pixel snímá pouze jednu ze tří barevných složek (červenou, zelenou nebo modrou). Zbylé složky jsou následně dopočítány pomocí interpolace z okolních pixelů. Alternativním řešením je tříčipový systém, kde je světlo pomocí optického hranolu rozděleno na tři spektrální složky a každá z nich je snímána vlastním senzorem.

4. Digitalizace signálu

Elektrický náboj generovaný na senzoru je převeden na digitální hodnoty sekvencí elektronických procesů:

- **Přenos náboje** - odlišný v závislosti na technologii senzoru (CCD nebo CMOS).
- **Zesílení (amplifikace)** - úprava úrovně signálu podle nastavené citlivosti (ISO).
- **Analogově-digitální převod** - kvantizace spojitého signálu do diskrétních úrovní.
- **Digitální post-processing** - základní úpravy jako vyvážení bílé, redukce šumu a gama korekce.

Výsledkem tohoto procesu je digitální obraz - dvourozměrná matice číselných hodnot, kde každá hodnota reprezentuje jas příslušného pixelu. U barevného obrazu jsou pro každý pixel typicky uloženy tři hodnoty odpovídající intenzitám základních barev (červená, zelená, modrá).

Tato digitální reprezentace je základem pro veškeré další operace strojového vidění, od jednoduché analýzy obrazu až po komplexní rozpoznávání objektů, měření a 3D rekonstrukci.

3.2.2 Typy kamer a senzorů

Kvalita a vhodnost kamerového systému ve strojovém vidění do značné míry závisí na použitém obrazovém senzoru a konstrukci kamery. Dva nejrozšířenější typy snímačů jsou CCD (*Charge-Coupled Device*) a CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*). Oba slouží ke stejnému účelu, převádějí dopadající světlo na elektrický signál, ale liší se principem čtení dat, konstrukcí, výkonem i cenou.

Technologie obrazových snímačů

CCD senzory (*Charge-Coupled Device*)

CCD senzor představuje jednu ze základních technologií pro snímání obrazu v digitálních kamerách. Princip funkce CCD senzoru spočívá v několika navazujících procesech. Každý pixel CCD senzoru obsahuje fotodiodu, která při dopadu světla generuje elektrický náboj v procesu fotoelektrické konverze. Množství generovaného náboje je přímo úměrné intenzitě dopadajícího světla. Během expozice se tento náboj hromadí v potenciálových jámách (tzv. *pixel wells*) vytvořených v polovodičovém substrátu. Po skončení expozice se náboje systematicky přesouvají přes sousední pixely pomocí posuvného registru - tento proces je analogický přelévání vody mezi nádobami, kdy náboj z každého pixelu se postupně přesouvá k okraji senzoru. Na okraji senzoru je náboj zesílen a následně převeden na digitální hodnotu pomocí analogově-digitálního převodníku, čímž se dokončí proces získání digitálního obrazu.

Výhody CCD senzorů:

- vysoká kvalita obrazu,
- nízký šum,
- vyšší citlivost na světlo (lepší výkon při nízkém osvětlení).

Nevýhody CCD senzorů:

- vyšší spotřeba energie,
- nižší rychlost čtení dat,
- možnost tzv. bloomingu (přelévání náboje do sousedních pixelů při přexpozici),
- složitější a dražší výrobní proces (vyšší cena).

CMOS senzory (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*)

CMOS senzory představují novější alternativu k CCD. Jejich princip funkce se v několika klíčových aspektech liší. Podobně jako u CCD, každý pixel obsahuje fotocitlivý element, který generuje elektrický náboj při dopadu světla v procesu fotoelektrické konverze. Na rozdíl od CCD však každý pixel CMOS senzoru obsahuje vlastní zesilovač a často i další elektroniku pro zpracování signálu, což umožňuje zesílení přímo na úrovni pixelu. Další významný rozdíl spočívá v tom, že náboj není přesouván přes sousední pixely, ale čten přímo z každého pixelu paralelně. Toto umožňuje adresovat jednotlivé pixely nezávisle, což je výhodné pro mnoho aplikací. A/D převod může být realizován pro každý pixel, každý řádek, nebo pro celý senzor, v závislosti na konkrétní architektuře CMOS senzoru. Tato integrace zpracování signálu přímo na čipu přináší výhody v rychlosti, spotřebě energie a flexibilitě.

Výhody CMOS senzorů:

- nízká spotřeba energie,
- vyšší rychlost čtení dat (vyšší snímkovací frekvence),
- levnější výroba a menší rozměry,
- odolnost proti bloomingu.

Nevýhody CMOS senzorů:

- historicky nižší kvalita obrazu a vyšší šum (modernější CMOS senzory tento rozdíl významně zmenšily),

- nižší *fill factor* (menší část plochy pixelu je fotocitlivá kvůli přítomnosti elektroniky).

V posledních letech došlo k významnému zlepšení CMOS technologie, která nyní dominuje trhu s digitálními kamerami. Moderní CMOS senzory dosahují kvality srovnatelné nebo překonávající CCD při zachování svých výhod v rychlosti a energetické účinnosti.

Typy kamer podle určení

Průmyslové kamery

Průmyslové kamery jsou navrženy pro použití v automatizaci, kontrole kvality, měření a dalších průmyslových aplikacích. Tyto kamery jsou klíčovým prvkem v systémech strojového vidění a vyznačují se následujícími vlastnostmi:

- **Robustní konstrukce** - odolnost vůči prachu, vibracím a širokému rozsahu teplot.
- **Standardizovaná rozhraní** - typicky GigE Vision, USB3 Vision, Camera Link, CoaXPress.
- **Vysoká spolehlivost** - dlouhodobá stabilita parametrů a nízká poruchovost.
- **Precizní synchronizace** - možnost přesného časování a triggering.
- **Konfigurovatelnost** - široké možnosti nastavení parametrů snímání.
- **Kompaktní rozměry a modularita** - modulární design umožňující integraci do strojů a linek, používání standardů (např. *C-mount*, *CS-mount*).

Z hlediska snímače se průmyslové kamery dělí na:

- **Černobílé (monochromatické)** - vyšší rozlišení a citlivost.
- **Barevné** - využívají Bayerovu masku nebo tři samostatné senzory.
- **Multispektrální/hyperspektrální** - snímají v několika různých spektrálních pásmech.

Vědecké a medicínské kamery

Specializované kamery optimalizované pro výzkumné a diagnostické účely:

- Extrémně vysoká citlivost (detekce jednotlivých fotonů).
- Chlazené senzory pro redukci termálního šumu.
- Vysoký dynamický rozsah (16+ bitů na pixel).

Vysokorychlostní kamery

Určeny pro zachycení velmi rychlých dějů:

- Extrémně vysoké snímkové frekvence (stovky až miliony fps).
- Speciální paměťové architektury pro kontinuální záznam.
- Synchronizace s externími událostmi.

3D kamery a senzory hloubky

Pro měření vzdálenosti a 3D rekonstrukci scény:

- Stereo kamery využívající triangulaci.
- Strukturované světlo s projekcí známého vzoru.
- *Time-of-Flight* (ToF) měřící dobu letu světelného pulzu.
- LIDAR pro přesné laserové skenování prostoru.

Specializované technologie snímačů

BSI (*Back-Side Illuminated*) senzory

U této technologie dopadá světlo na zadní stranu čipu, což zvyšuje množství zachyceného světla, protože elektronika nezakrývá fotocitlivou oblast. Výsledkem je vyšší citlivost a nižší šum, zejména při nízkém osvětlení.

Spektrální senzory

- NIR (*Near-Infrared*) - citlivé v blízké infračervené oblasti.
- SWIR (*Short-Wave Infrared*) - snímání v krátkovlnné infračervené oblasti.
- Multispektrální - několik diskrétních spektrálních pásem.
- Hyperspektrální - kontinuální spektrální informace pro každý pixel.

3.2.3 Technické parametry (průmyslových) kamer

Výběr vhodné kamery pro konkrétní úlohu strojového vidění není triviální – vyžaduje pečlivé zohlednění řady technických parametrů, které ovlivňují kvalitu obrazu, rychlost snímání, světelné podmínky i spolehlivost v provozních podmínkách. Níže jsou popsány některé klíčové vlastnosti kamer, které je třeba brát v úvahu při návrhu kamerového systému.

Rozlišení a velikost pixelu

Rozlišení a velikost pixelu jsou klíčovými parametry určujícími kvalitu obrazu kamery. Rozlišení představuje počet pixelů v horizontálním a vertikálním směru (např. 1920×1080) a definuje množství zachytitelných detailů. Megapixel (MP) vyjadřuje celkový počet pixelů v milionech. Průmyslové kamery nabízejí rozlišení od méně než 1 MP pro jednoduché aplikace až po více než 20 MP pro úlohy vyžadující vysokou přesnost.

Velikost pixelu udává fyzický rozměr jednoho pixelu na senzoru (typicky $1,4\text{--}9\ \mu\text{m}$). Menší pixely umožňují vyšší rozlišení při stejné velikosti senzoru, ale snižují citlivost a zvyšují šum při nízkém osvětlení. Větší pixely naopak poskytují lepší světelnou citlivost a dynamický rozsah, ale omezují maximální rozlišení.

Fyzické rozměry obrazového snímače (velikost senzoru) jsou často vyjádřeny ve formátu odpovídajícím historickým TV kamerám (např. $1/3''$, $1/2''$, $2/3''$) nebo přímo v milimetrech. Větší senzory poskytují lepší kvalitu obrazu, ale vyžadují větší a dražší optiku.

Mezi velikostí senzoru, velikostí pixelu a rozlišením existuje přímý matematický vztah. Lze jej vyjádřit následující rovnicí:

$$L [\text{mm}] = \frac{p [\mu\text{m}] * N}{1000}, \quad (29)$$

kde:

- L je fyzická velikost senzoru v dané ose,
- p je velikost jednoho pixelu,
- N je počet pixelů v dané ose.

Tento vztah je důležitý při návrhu systému strojového vidění, jelikož ovlivňuje výběr objektivu, zorné pole a celkovou kvalitu obrazu. S rostoucími požadavky na přesnost v průmyslových

aplikacích je trendem vývoj senzorů s optimalizovanou velikostí pixelů, které nabízejí dobrou rovnováhu mezi rozlišením, citlivostí a cenou.

Snímková frekvence (fps)

Snímková frekvence (*frame rate*) udává počet celých snímků, které kamera dokáže zachytit za jednu sekundu. Vyjadřuje se v jednotkách fps (*frames per second*). Standardní hodnoty se pohybují od 25-30 fps pro běžné aplikace přes 50-60 fps pro plynulé zachycení rychlejších pohybů až po 100+ fps pro vysokorychlostní snímání.

Maximální snímkovou frekvenci ovlivňuje několik faktorů: rozlišení senzoru (vyšší rozlišení typicky snižuje maximální fps), výpočetní výkon a propustnost rozhraní (omezení přenosu dat), expoziční čas (minimální expoziční čas stanovuje teoretický horní limit fps) a technologie čtení senzoru (*Global vs. Rolling shutter*).

Typ snímání pixelů má vliv na přesnost zachycení pohybujících se objektů. *Rolling shutter* snímá řádky po sobě, což může způsobit deformace při pohybu (např. šikmé hrany). *Global shutter* zachytí celý obraz najednou, což je výhodné pro dynamické scény, ale je technologicky náročnější a dražší.

Při nastavování snímkové frekvence je třeba zvažovat kompromisy - vysoký fps může vyžadovat omezení rozlišení nebo oblasti zájmu (ROI - *region of interest*) a maximální fps je často nepřímě úměrný kvalitě obrazu a dynamickému rozsahu.

Zorné pole (*Field of View*)

Zorné pole (FOV) definuje oblast scény, kterou kamera zachycuje, jinými slovy určuje, jak velkou oblast kamera "vidí" v dané (pracovní) vzdálenosti od snímače. Je určeno kombinací velikosti senzoru a ohniskové vzdálenosti objektivu.

Zorné pole může být široké (např. pro přehledovou detekci) nebo úzké (pro detailní kontrolu malé části scény). Pracovní vzdálenost představuje vzdálenost od přední čočky objektivu k objektu a spolu s úhlem zorného pole určuje skutečnou velikost snímané oblasti. Mezi hlavní faktory ovlivňující FOV patří ohnisková vzdálenost objektivu (kratší poskytuje širší FOV), velikost senzoru (větší senzor při stejné ohniskové vzdálenosti poskytuje širší FOV) a přítomnost mezikroužků nebo telekonvertorů.

FOV má přímý dopad na velikost scény, kterou je kamera schopna pokrýt, a spolu s rozlišením senzoru určuje prostorové rozlišení – tedy kolik milimetrů ve scéně odpovídá jednomu pixelu.

Hloubka ostrosti (*Depth of Field*)

Hloubka ostrosti (DOF) označuje rozsah vzdáleností před objektivem (před a za rovinou zaostření), ve kterém zůstává obraz ostrý. Je ovlivněna několika faktory:

- **clonovým číslem (f)** – vyšší hodnota zvyšuje hloubku ostrosti, ale snižuje množství světla,
- **ohniskovou vzdáleností** – kratší ohniskové vzdálenosti mají přirozeně větší hloubku ostrosti,
- **velikostí senzoru** – menší senzory mají větší hloubku ostrosti při stejném úhlu záběru,
- **vzdáleností objektu** – čím je objekt dále, tím je hloubka ostrosti větší.

Při potřebě ostrého obrazu v celé scéně (např. měření výšky objektů) je nutné hloubku ostroty optimalizovat volbou vhodného objektivu a clony.

Spektrální citlivost

Spektrální citlivost popisuje schopnost senzoru reagovat na světlo různých vlnových délek. Většina kamer je citlivá na viditelné spektrum světla (cca 400–700 nm), ale některé senzory jsou schopny snímat i mimo něj – např. v blízkém infračerveném (NIR, cca 800–1100 nm) nebo ultrafialovém (UV, cca 200–400 nm) spektru. Využití těchto oblastí je běžné v aplikacích, kde se vizuální kontrast ve viditelném světle nevyskytuje – např. pro kontrolu potisků, detekci teplotních rozdílů nebo analýzu povrchových vrstev.

Některé kamery mají *IR-cut* filtr, který blokuje infračervené záření – ten lze v některých případech odstranit pro rozšíření spektrálního rozsahu, ale za cenu možného zkreslení barev v obraze.

Další parametry

- **Dynamický rozsah** – udává schopnost kamery zachytit detaily v jasných i tmavých oblastech obrazu současně. Je měřen jako poměr mezi nejsvětlejším a nejtmavším detekovatelným signálem (často v dB).
- **Odstup signálu od šumu** (*Signal-to-Noise Ratio*, SNR) - poměr užitečného signálu k šumu, který indikuje kvalitu obrazu zejména při nízkém osvětlení.

3.3 Zpracování obrazu

Zpracování obrazu představuje velmi rozsáhlou oblast počítačového vidění, která zahrnuje mnoho různých technik a postupů. V této podkapitole se zaměříme pouze na základní principy a metody, které jsou relevantní pro praktickou část diplomové práce zabývající se kalibrací robotického pracoviště pomocí kamerového systému. Přestože existuje mnoho pokročilých technik počítačového vidění, zde budou popsány především ty, které jsou klíčové pro úspěšnou implementaci kamerové kalibrace a určení prostorové polohy objektů v robotickém pracovišti.

3.3.1 Barevný obraz

Digitální kamery běžně zaznamenávají obraz ve formě barevného snímku, kde každý pixel nese informaci o intenzitě světla ve třech barevných složkách – červené (R), zelené (G) a modré (B). Tyto tři kanály tvoří základní RGB barevný model, který odpovídá způsobu, jakým vnímá barvy lidské oko.

Barevný obraz je tedy reprezentován jako třírozměrné pole hodnot: šířka $\times$ výška $\times$ 3 kanály. Každý kanál může být uložen s různou bitovou hloubkou (např. 8bit, 16bit), přičemž 8bitové zobrazení umožňuje 256 odstínů na kanál, tedy více než 16 milionů možných barev.

V některých aplikacích je barevná informace klíčová – například při detekci objektů podle barvy [28, 29], rozlišení nebo třídění produktů [30, 31]. Pro tyto účely se RGB model často převádí na jiné barevné prostory, které lépe odpovídají vnímání barvy nebo oddělují barevnou složku od intenzity. Typickým příkladem je barevný model HSV (*Hue*, *Saturation*, *Value*), který reprezentuje barvu pomocí tří složek – odstín (barva), sytost (intenzita barvy) a hodnota

(jas). Díky jeho menší citlivosti na změny světelných podmínek je vhodnější pro detekci barev v obraze.

Pro další zpracování obrazu není nutné – a v některých případech ani výhodné – pracovat s barevným snímkem. V mnoha algoritmech se pracuje pouze s jasovou informací, proto se obraz nejprve převádí na odstíny šedi (*grayscale*), kde je každý pixel reprezentován jedinou hodnotou jasu. Tento převod se provádí váženým průměrem jednotlivých barevných složek, typicky podle vzorce:

$$Y = 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B , \quad (30)$$

kde:

- Y je výsledná jasová hodnota,
- R, G, B jsou hodnoty červené, zelené a modré složky (např. v rozsahu 0–255).

Tento výpočet reflektuje různé vnímání jednotlivých barev lidským okem – nejcitlivější jsme na zelenou, naopak modrá má menší vliv na výsledný jas.

Volba barevného prostoru a způsob reprezentace obrazu vždy závisí na konkrétní úloze. Někdy je práce v odstínech šedi zcela dostačující a výpočetně výhodnější, jindy je nezbytné zachovat plnou barevnou informaci pro přesnou detekci nebo klasifikaci.

3.3.2 Předzpracování obrazu

Předzpracování obrazu hraje zásadní roli v systému strojového vidění. Kvalitně připravený obraz zvyšuje přesnost a spolehlivost navazujících algoritmů – například při detekci objektů, vyhledávání hran, segmentaci nebo kalibraci. Obzvláště v průmyslových aplikacích, kde je obraz často zatížen šumem, proměnlivým osvětlením nebo odrazy, je předzpracování nezbytné pro dosažení stabilních a reprodukovatelných výsledků.

Mezi nejčastější úpravy patří vyrovnaní jasu a kontrastu nebo filtrace šum. Následující části stručně popisují základní techniky.

Úprava (vyrovnaní) jasu a kontrastu

Nejjednodušší technika úpravy kontrastu a jasu spočívá v lineární transformaci hodnot pixelů:

$$g(x, y) = \alpha \cdot f(x, y) + \beta , \quad (31)$$

kde:

- $f(x, y)$ je původní hodnota pixelu,
- $g(x, y)$ je nová hodnota,
- α je koeficient kontrastu,
- β je koeficient jasu.

Tato rychlá metoda umožňuje jednoduché zvýšení nebo snížení jasu a kontrastu celého obrazu, ale není adaptivní.

Pro obrazy s úzkým dynamickým rozsahem se často používá ekvalizace histogramu, která rozloží intenzity pixelů rovnoměrněji, čímž zvyšuje globální kontrast. Pokud je nutné upravit kontrast lokálně, používá se adaptivní ekvalizace histogramu (např. CLAHE), která provádí úpravy v menších částech obrazu.

Další metodou je gamma korekce, která upravuje jas nelineárně podle vztahu:

$$g(x, y) = c \cdot f(x, y)^\gamma, \quad (32)$$

kde:

- γ je exponent gamma ($\gamma < 1$ zvyšuje jas tmavých oblastí, $\gamma > 1$ zvýrazňuje světlé oblasti),
- c je konstanta (obvykle nastavena tak, aby zůstala zachována maxima).

Tato metoda umožňuje nelineární úpravu jasu, která lépe odpovídá lidskému vnímání a může zlepšit viditelnost detailů v tmavých nebo světlých oblastech obrazu.

Filtrace a potlačení šumu

Šum v obraze může významně ovlivnit přesnost detekce hran, kalibrace nebo rozpoznávání. Pro jeho potlačení se používají různé typy filtrů:

- **Gaussův filtr** – jemně rozmazá obraz a účinně potlačí vysokofrekvenční šum. Filtr pracuje na principu váženého průměru okolních pixelů, přičemž váhy klesají se vzdáleností od středu. Je vhodný pro hladké struktury, ale může rozmazat i jemné hrany.
- **Mediánový filtr** nahrazuje každý pixel mediánem z okolních hodnot. Je velmi účinný při odstranění impulzního šumu typu „salt and pepper“ a zároveň dobře zachovává ostré přechody a kontury. Vzhledem ke své nelineární povaze není vhodný pro potlačení gaussovského šumu, ale exceluje v prostředích s náhodnými výpadky intenzit.
- **Bilaterální filtr** kombinuje prostorové vyhlazení s filtrací podle intenzity. Zachovává hrany i jemné detaily, protože bere v úvahu nejen vzdálenost mezi pixely, ale i rozdíl jejich intenzit. Je vhodný pro scény s jemnými texturami, ale kvůli své výpočetní náročnosti se používá spíše tam, kde je klíčové zachovat strukturu obrazu.

3.3.3 Detekce a extrakce obrazových prvků

Prahování obrazu

Prahování je základní technika pro převod šedotónového obrazu na binární obraz (černobílý), kde jsou pixely rozděleny podle své intenzity do dvou kategorií: objekt (1) a pozadí (0). Často se používá jako první krok segmentace – tedy oddělení oblastí zájmu od zbytku obrazu.

Nejběžnější varianty:

- **Globální prahování** – používá jeden pevný práh T pro celý obraz. Hodí se pro snímky s rovnoměrným osvětlením.

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & f(x, y) > T \\ 0, & \text{jinak} \end{cases}, \quad (33)$$

- **Otsuova metoda** – automaticky najde optimální prahovací hodnotu tak, aby minimalizovala rozptyl intenzit uvnitř tříd (objekt/pozadí). Funguje dobře na obrazech s výrazným kontrastem.
- **Adaptivní prahování** – vypočítává práh lokálně v okolí každého pixelu (např. pomocí průměru nebo gaussovské váhy). Je vhodné při nerovnoměrném osvětlení, stínech nebo odrazech.

Výsledný binární obraz bývá výchozím podkladem pro detekci kontur, extrakci tvarů nebo hledání specifických značek.

Detekce hran

Hrany v obraze představují oblasti s výraznou změnou intenzity – typicky přechod mezi různými objekty, materiály nebo strukturami. Detekce hran je základní operace, která umožňuje zvýraznit hranice objektů a vytváří výchozí data pro mnoho dalších algoritmů.

Mezi nejčastěji používané operátory pro detekci hran patří:

- **Sobelův operátor** [32] – používá dvě konvoluční jádra k odhadu změny intenzity ve směru os x a y . Výsledkem je gradientová mapa, která zvýrazní hrany v daných směrech.
- **Prewittův a Robertsův operátor** [33] – jednodušší a méně přesné alternativy Sobelova operátoru. Vhodné pro méně náročné aplikace.
- **Laplacián (*Laplacian of Gaussian - LoG*)** [34] – kombinuje rozostření Gaussovým filtrem a výpočet druhé derivace intenzity. Dobře detekuje tenké hrany, ale je citlivý na šum.
- **Cannyho detektor hran** [35] – považován za jeden z nejrobustnějších a nejpoužívanějších detektorů. Zahrnuje více kroků:
 1. gaussovo rozostření (potlačení šumu),
 2. výpočet gradientu intenzity,
 3. potlačení ne-maxim,
 4. dvojité prahování a spojování hran.

Cannyho metoda poskytuje tenké, spojitě a dobře lokalizované hrany.

Detekce rohů

Rohy (nebo také body se silnou změnou intenzity ve více směrech) představují v obraze lokálně výrazné body, které jsou dobře identifikovatelné a stabilní při transformacích. Jsou velmi důležité pro sledování pohybu, porovnávání snímků, kalibraci kamery nebo rekonstrukci 3D scény.

Zatímco hrana je oblast s výraznou změnou intenzity v jednom směru, roh je místo, kde se střetávají dvě hrany, a tedy dochází ke změně intenzity ve více směrech současně.

Mezi nejznámější metody detekce rohů patří:

- **Harrisův rohový detektor** [36] – jedna z prvních a dodnes hojně používaných metod. Využívá analýzu změn v okolí bodu při malém posunu okna. Výsledkem je rohová odpověď, podle níž se určují významné body. Je rychlý a stabilní, ale neškálově invariantní.
- **Shi-Tomasi** [37] – vylepšení Harrisova detektoru, které volí jako měřítko nejmenší vlastní číslo matice změn. Poskytuje spolehlivé a dobře lokalizované body vhodné pro sledování v čase.
- **FAST (*Features from Accelerated Segment Test*)** [38] – extrémně rychlý detektor, často používaný v reálném čase (např. ve SLAM algoritmech). Testuje jas pixelů kolem kruhu a hledá oblasti s náhlým přechodem. V základní verzi není rotačně ani škálově invariantní.

- **ORB (*O*riented *F*AST and *R*otated *B*RIEF)** [39] – moderní kombinace detekce (FAST) a popisu (BRIEF), která poskytuje škálově a rotačně invariantní klíčové body. Vhodné pro párování bodů mezi snímky.

Výstupem rohové detekce je množina bodů, které lze dále použít jako referenční body pro sledování, porovnávání nebo výpočet pozice.

Detekce kontur, tvarů a objektů

Kontury představují souvislé linie nebo křivky, které vymezují hranice objektů v obraze. Na rozdíl od detekce hran, která poskytuje pouze mapu změn intenzity, detekce kontur vrací strukturovanou reprezentaci hranic – tedy spojené body tvořící uzavřené nebo otevřené tvary. Kontury se využívají k analýze tvaru, výpočtu plochy, určení obvodu nebo při samotné detekci objektů.

Detekce kontur se obvykle provádí nad binárním obrazem, získaným např. prahováním nebo segmentací. Nejčastěji používanou metodou je algoritmus Suzuki-Abe [40], který analyzuje spojitě oblasti v obraze a extrahuje jejich hranice.

Metoda podporuje různé režimy detekce:

- všechny kontury včetně vnořených (hierarchická struktura),
- pouze vnější kontury,
- výstup ve formě přímkové nebo kubické aproximace.

Nad detekovanými konturami lze dále provádět analýzu, jako například:

- výpočet plochy a obvodu kontury,
- určení těžiště,
- porovnání shody tvaru (např. pomocí Huových invariantních momentů).

Pro zjednodušení tvaru kontury a snížení počtu bodů se často používá Ramer–Douglas–Peuckerův algoritmus. Ten slouží k aproximaci zakřivené linie pomocí přímek tak, aby celkový tvar zůstal zachován s minimální odchylkou. Výsledkem je kompaktní reprezentace kontury vhodná pro další geometrickou analýzu.

Detekce čar a kružnic

Pro hledání základních geometrických útvarů v obraze, jako jsou přímky nebo kružnice, se využívá zejména Houghova transformace:

- **Houghova transformace pro přímky** – převádí body v binárním obraze do parametrického prostoru (ρ, θ) , kde se identifikují shluky odpovídající přímkám. Tato metoda je robustní i vůči přerušeným nebo neúplným liniím.
- **Houghova transformace pro kružnice** – detekuje kruhové tvary na základě předem daného nebo odhadovaného poloměru. Funguje dobře i při částečném zakrytí kružnice a je vhodná pro detekci otvorů, šroubů nebo válcových objektů.

Využití neuronových sítí při detekci objektů

Vedle klasických geometrických metod se v moderních systémech strojového vidění stále častěji uplatňují metody založené na neuronových sítích. Pomocí trénovaných modelů (např. CNN – *Convolutional Neural Networks*) lze detekovat a klasifikovat objekty s vysokou přesností i v podmínkách, kde tradiční algoritmy selhávají.

Znamé architektury jako YOLO (*You Only Look Once*), SSD (*Single Shot Detector*) nebo *Faster R-CNN* umožňují rozpoznání více objektů v jednom snímku v reálném čase. Na rozdíl od geometrických metod nevyžadují explicitní popis tvaru, ale pracují na základě naučených vzorů. Použití neuronových sítí je však podmíněno dostupností dostatečně velkého a reprezentativního trénovacího datasetu a vyžaduje vyšší výpočetní výkon. Hodí se tedy především pro úlohy, kde se objevují složitější nebo různorodé objekty, jejichž tvary nelze jednoduše popsat analyticky.

V posledních letech se vedle konvolučních sítí stále více prosazují také tzv. *vision transformers* (ViT) [41–43], které původně vychází z architektury transformerů známé z oblasti zpracování přirozeného jazyka (např. BERT, GPT). Vision transformers zpracovávají obraz jako posloupnost malých obrazových bloků (*patches*) a využívají mechanismus *self-attention* k modelování vzájemných vztahů mezi různými částmi obrazu. Díky tomu jsou schopny zachytit globální kontext efektivněji než klasické CNN.

Modely jako ViT (*Vision Transformer*), DETR (*DEtection TRansformer*) nebo jejich pokročilé varianty (např. *Swin Transformer*) dosahují špičkových výsledků v úlohách detekce, segmentace a rozpoznávání objektů. Jsou však výpočetně náročnější a často vyžadují předtrénování na rozsáhlých datech (např. ImageNet-21k).

Přestože jsou vision transformers teprve na vzestupu, již dnes se uplatňují v průmyslových aplikacích, kde je požadována vysoká přesnost, robustnost vůči šumu a schopnost zpracovávat složité scény s mnoha objekty.

4 KALIBRACE ROBOTICKÝCH PRACOVÍŠŤ

Kalibrace robotického pracoviště představuje klíčový krok při zavádění systémů strojového vidění do prostředí průmyslové automatizace. Aby mohl robot přesně reagovat na informace získané kamerou, je nezbytné sladit různé souřadnicové systémy, které se v rámci pracoviště používají – tedy především souřadnicový systém robota, kamery a případně i dalších nástrojů nebo kalibračních objektů.

Cílem kalibrace je určit přesné transformační vztahy mezi těmito systémy tak, aby bylo možné převést bod zjištěný v obraze kamery do souřadnic robota a naopak. Bez této znalosti by nebylo možné správně řídit pohyb efektoru na základě vizuální informace z kamerového systému.

Komplexní kalibrace robotického pracoviště zahrnuje několik vzájemně propojených procesů. Prvním krokem je obvykle kalibrace samotného robota, která zajišťuje, že robot dosahuje požadovaných pozic s vysokou přesností a opakovatelností. Současně je třeba provést kalibraci kamerového systému, což zahrnuje určení vnitřních parametrů kamery (ohnisková vzdálenost, hlavní bod, zkreslení) a také její pozice v prostoru. Klíčovou částí je pak tzv. *hand-eye* kalibrace, která stanovuje transformační vztah mezi souřadným systémem koncového efektoru robota a souřadným systémem kamery, ať už je kamera umístěna přímo na robotovi (*eye-in-hand*) nebo mimo něj (*eye-to-hand*).

Výsledkem úspěšné kalibrace je robotické pracoviště, kde robot dokáže přesně manipulovat s objekty na základě informací získaných z kamerového systému. To otevírá cestu k realizaci pokročilých aplikací jako je bin-picking (vybírání náhodně umístěných objektů), vizuálně řízená montáž nebo flexibilní manipulace s objekty proměnlivých tvarů a velikostí.

Tato kapitola se zaměřuje na jednotlivé aspekty kalibrace robotického pracoviště, od základních principů kalibrace robota a kamery, přes specifické metody *hand-eye* kalibrace, až po analýzu různých kalibračních vzorů a objektů. Důraz je kladen na praktické aspekty kalibrace, které jsou relevantní pro experimentální část této diplomové práce.

Tato kapitola byla vypracována primárně z vědeckých článků zabývajících se daným tématem [44–73].

4.1 Kalibrace robota

Kalibrace průmyslového/kolaborativního robota je proces, který slouží ke zpřesnění jeho prostorového chování tak, aby vykazoval co nejmenší odchylky mezi požadovanou a skutečnou polohou koncového efektoru. Přestože většina moderních robotů je z výroby dodávána již zkalibrovaná, porozumění principům kalibrace je důležité pro posouzení přesnosti celého systému a správnou integraci robota do robotického pracoviště.

Účelem kalibrace robota je sladění matematického modelu robota s jeho reálnou mechanickou strukturou. Tím se zajišťuje, že výpočty přímé a inverzní kinematiky budou přesně odpovídat skutečnému pohybu. Kalibrace tedy není o změně řízení robota jako

takového, ale o zpřesnění geometrických parametrů, na kterých jsou výpočty pohybových trajektorií založeny.

Mezi hlavní důvody pro provádění kalibrace patří výrobní odchylky, montážní nepřesnosti nebo opotřebení komponent. V závislosti na požadované přesnosti aplikace může mít kalibrace významný vliv na výslednou kvalitu a opakovatelnost úkolu, zejména v úlohách s vizuální zpětnou vazbou nebo jemnou manipulací.

4.1.1 Kalibrace parametrů kinematického modelu

Kalibrace kinematického modelu se zaměřuje na určení přesných geometrických parametrů, jako jsou délky ramen, orientace kloubových os nebo polohy přírub. Tyto parametry jsou obvykle popsány pomocí Denavit-Hartenbergova modelu [11] nebo jiných kinematických formalismů. Postup kalibrace zahrnuje:

- měření skutečných poloh koncového efektoru v různých konfiguracích,
- porovnání těchto hodnot s vypočítanými polohami podle aktuálního modelu,
- optimalizaci geometrických parametrů tak, aby se minimalizovala výsledná chyba.

Měření se provádí pomocí vysoce přesných externích zařízení, jako jsou laserové trackery, optické sledovací systémy nebo 3D měřicí ramena. Pro robustní výsledek je vhodné měřit ve větším počtu různorodých konfigurací v celém pracovním prostoru robota.

Typy kalibrace dle rozsahu

Podle hloubky zásahu do modelu a typu uvažovaných nepřesností lze kalibraci robota rozdělit do tří úrovní, jak ji navrhli Roth, Mooring a Ravani [45] v rámci hierarchického modelu:

- **Kalibrace na úrovni kloubů (*Joint level calibration*)**
V této úrovni je cílem zpřesnit vztah mezi výstupem snímače a skutečnou fyzickou polohou kloubu. Typicky jde o kompenzaci offsetů po výměně motoru nebo enkodéru. Provádí se běžně jako součást servisu.
- **Kalibrace kinematického modelu (*Kinematic model calibration*)**
Tento typ kalibrace zohledňuje nepřesnosti v délce ramen, orientaci os či sestavení konstrukce. Předpokládá ideálně tuhá tělesa a bezvúlové spoje. Jedná se o nejčastější typ kalibrace, prováděný jak výrobcí, tak uživateli ve specifických aplikacích.
- **Nekinematická (negeometrická) kalibrace (*Nongeometric calibration*)**
Nejvyšší úroveň kalibrace, která bere v úvahu i efekty jako jsou vůle v kloubech, pružnost ramen, teplotní roztažnost nebo třecí síly. Používá se výhradně ve výzkumných či vysoce přesných aplikacích, kde se tyto faktory významně projevují.

4.1.2 Kalibrace nástroje (TCP)

Součástí kalibrace robota bývá také určení přesné polohy a orientace nástroje (TCP), který je uchycen na přírubě koncového článku robota. Tato kalibrace je klíčová pro přesné řízení trajektorie nástroje a měla by se provádět vždy při výměně nástroje nebo jeho přestavení.

Existuje několik metod TCP kalibrace. Jedna z nejčastějších je tzv. metoda více bodů, kdy se robot navede do stejného fyzického bodu v prostoru z různých orientací. Na základě rozdílů v polohách příruby se vypočítá přesná poloha TCP vzhledem k přírubě. Alternativně

Lze využít i speciální kalibrační přípravky, které umožňují přesné ustavení nástroje do definované pozice. Tím se zajistí konzistentní definice nástroje v robotickém řídicím systému.

4.2 Kalibrace kamery

Kalibrace kamery je zásadním krokem při zavádění strojového vidění do robotického systému. Umožňuje určit, jak kamera ve skutečnosti promítá trojrozměrné body z reálné scény na svůj obrazový senzor. Tento vztah bývá u každého zařízení odlišný v závislosti na konstrukci objektivu, rozlišení senzoru, přesnosti výroby a dalších optických vlastnostech.

Cílem kalibrace je získat matematický model kamery, který umožní přesně interpretovat nebo naopak rekonstruovat prostorové informace z dvourozměrného obrazu. Jen díky tomuto modelu je možné z obrazových dat spolehlivě odhadovat polohu objektů, měřit vzdálenosti, nebo navádět robota pomocí kamerových dat. Bez kalibrace by se při těchto úlohách vyskytovaly systematické chyby, způsobené zkreslením nebo nepřesným vyjádřením geometrie projekce.

V rámci kalibrace se určují tzv. vnitřní (intrinsické) a vnější (extrinsické) parametry kamery. Dle složitosti použitého modelu lze také určit koeficienty popisující optické zkreslení čoček. Kalibrace se obvykle provádí experimentálně – snímáním kalibračního vzoru s přesně známou geometrií (např. šachovnice) v různých pozicích a následným výpočtem parametrů z odpovídajících obrazových a prostorových bodů. Lze použít různé metody, nejčastěji se však používá tzv. Zhangova metoda [71], která je implementovaná v řadě knihoven (např. OpenCV, MATLAB apod.).

Tato kapitola se podrobně věnuje jednotlivým částem kamerového modelu, vysvětluje význam jeho parametrů, popisuje průběh kalibrace a výstupy, které jsou dále využívány při prostorové interpretaci obrazu nebo navazující *hand-eye* kalibraci.

4.2.1 Matematický model kamery

Matematický model kamery popisuje, jak jsou body z trojrozměrného prostoru zobrazovány do dvourozměrného obrazového prostoru kamery. Tento model tvoří základ pro celou řadu úloh strojového vidění – od kalibrace přes určování pozice objektu až po 3D rekonstrukci.

Východiskem matematického modelu je tzv. dírková komora (*pinhole model* nebo *camera obscura*), který představuje ideální kameru bez optických vad. Tento jednoduchý model si lze představit jako neprůhlednou komoru s malým otvorem (*pinhole*), přes který prochází světelné paprsky a vytvářejí na protilehlé stěně převrácený obraz scény. Pinhole model popisuje geometrickou transformaci mezi body ve světových souřadnicích a jejich projekci na snímáč. Jednoduchý model je na obrázku 2.

Základem je tzv. projekční transformace, která převádí prostorový bod $P = (X, Y, Z)$ ve světových souřadnicích na bod $p = (u, v)$ v obrazových souřadnicích. Celý proces lze rozdělit na tři hlavní části:

1. Transformace ze světových do kamerových souřadnic

Prostorový bod je nejprve převeden ze světového souřadnicového systému do souřadného systému kamery pomocí rotační matice R a translačního vektoru t :

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} + t, \quad (34)$$

kde:

- (X, Y, Z) jsou souřadnice bodu ve světovém souřadnicovém systému někdy označováno jako (X_w, Y_w, Z_w)
- (X_c, Y_c, Z_c) jsou souřadnice bodu v systému kamery

Tato část popisuje vnější (extrinsecké) parametry kamery, tedy její pozici a orientaci vůči scéně.

2. Projekce na obrazovou rovinu

Bod v kamerových souřadnicích se následně promítne do roviny snímáče pomocí perspektivní centrální projekce, podle modelu pinhole kamery:

$$x = \frac{X_c}{Z_c}, \quad y = \frac{Y_c}{Z_c}, \quad (35)$$

Výsledkem jsou normované obrazové souřadnice, které by odpovídaly ideální kameře bez zkreslení a s jednotkovou ohniskovou vzdáleností.

3. Převod na obrazové souřadnice (pixely)

Normované souřadnice (x, y) jsou nakonec převedeny na skutečné obrazové souřadnice (u, v) pomocí kamerové matice K (někdy označované taky A), která reprezentuje vnitřní (intrinsecké) parametry kamery:

$$K = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (36)$$

kde:

- f_x, f_y jsou ohniskové vzdálenosti v pixelech ve směru os x a y ,
- c_x, c_y jsou souřadnice hlavního bodu – tedy průsečíku optické osy s rovinou senzoru

Celkový zápis

Celý transformační řetězec lze zapsat takto:

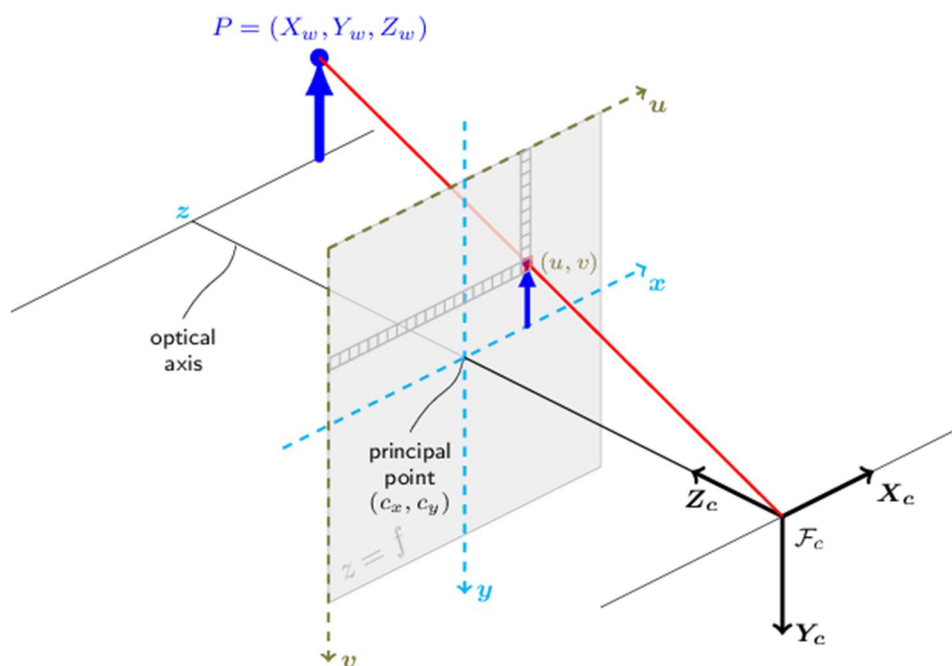
$$s \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = K \cdot [R \quad t] \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (37)$$

kde s je měřítkový faktor.

Zjednodušený zápis zohledňující pouze vnitřní parametry:

$$s \cdot \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} = K \cdot \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix}. \quad (38)$$

Tento rovnicový zápis tvoří jádro matematického modelu kamery. Popisuje celý proces snímání od prostorového bodu ve scéně až po jeho umístění na obrazovém snímáči. V praxi se však tento model ještě rozšiřuje o model zkreslení, který zohledňuje odchylky způsobené čočkami.



Obr. 2: Model dírkové komory (*pinhole camera model*) [26]

Optické zkreslení

Reálné čočky kamery se od ideálního pinhole modelu vždy určitým způsobem odchylují. Tyto odchylky způsobují, že body ve scéně nejsou promítány přesně podle matematického modelu, ale dochází k optickému zkreslení obrazu. Pokud má být projekce přesná (např. při 3D rekonstrukci, měření rozměrů nebo určování pozice objektů), je nutné tyto odchylky zohlednit a kompenzovat je. Zkreslení se obvykle dělí do dvou hlavních kategorií:

Radiální zkreslení

Radiální zkreslení (*radial distortion*) vzniká v důsledku zakřivení čoček a je nejvýraznější v okrajových částech obrazu. Projevuje se dvěma způsoby:

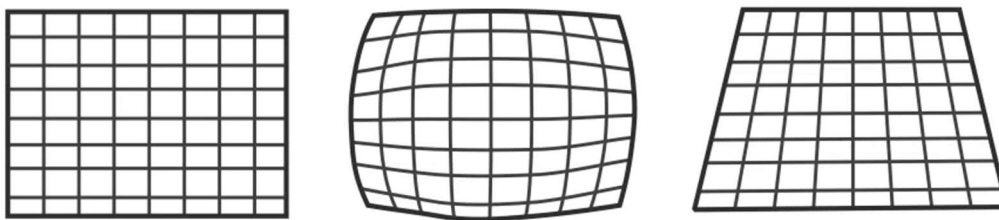
- **soudkovité (*barrel*)** – rovné čáry se „vyboulí“ směrem ven, typické pro širokoúhlé objektivy,
- **poduškovité (*pincushion*)** – čáry se prohnu směrem dovnitř, typické pro teleobjektivy.

Radiální zkreslení se modeluje pomocí koeficientů $k_1, k_2, k_3, \dots$ a vztahuje se k vzdálenosti bodu od optického středu:

$$x_{dist} = x \cdot (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6), \quad (39)$$

$$y_{dist} = y \cdot (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6). \quad (40)$$

kde $r^2 = x^2 + y^2$ představuje druhou mocninu vzdálenosti bodu od středu obrazu.



Obr. 3: Originální obraz (vlevo), radiální soudkovité zkreslení a tangenciální zkreslení (vpravo) [74]

Tangenciální zkreslení

Tangenciální zkreslení (*tangential distortion*) vzniká, pokud optická osa není přesně kolmá na snímač. Projevuje se jako mírný posun nebo zkroucení obrazu.

Modeluje se pomocí koeficientů p_1, p_2 :

$$x_{dist} = x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)], \quad (41)$$

$$y_{dist} = y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy]. \quad (42)$$

V praxi se obvykle používá kombinovaný model zkreslení, který zahrnuje jak radiální, tak tangenciální složky. Tyto parametry se určují v rámci kalibrace kamery, a poté se používají ke korekci (rektifikaci) obrazu, tedy převodu zkresleného obrazu na „ideální“ nezkraslený.

4.2.2 Proces kalibrace kamery

Kalibrace kamery obvykle zahrnuje následující kroky:

1. **Sběr kalibračních dat** - zachycení série snímků kalibračního vzoru z různých úhlů a vzdáleností. Různé vzdálenosti nejsou podmínkou, neboť v případě kamery s objektivem s fixní ohniskovou vzdáleností by mohlo docházet k rozostření snímaného vzoru (bez manuálního doostření). Je důležité zajistit dobré pokrytí celého zorného pole kamery a ostrost kalibračního vzoru na jednotlivých snímcích.
2. **Detekce význačných bodů** - identifikace rohů nebo jiných význačných bodů na kalibračním vzoru v každém snímku. Význačné body se liší podle použitého vzoru. Využití algoritmů a metod zmíněných v kapitole 3.3 Zpracování obrazu.
3. **Výpočet parametrů kamery** - pomocí optimalizačních metod jsou vypočítány parametry kamery, které nejlépe vysvětlují pozorované projekce význačných bodů.
4. **Vyhodnocení přesnosti kalibrace** - typicky pomocí reprojekční chyby, která udává rozdíl mezi skutečnou a předpokládanou pozicí bodů v obraze. Výpočet přesnosti kalibrace, reprojekční chyby, se nachází v kapitole 4.5 Přesnost kalibrace.

Zhangova metoda kalibrace kamery

Zhangova metoda [71], představená Zhengyou Zhangem v roce 2000, je dnes jednou z nejpoužívanějších metod pro kalibraci kamer. Její výhodou je jednoduchá příprava, flexibilita a vysoká přesnost. Nevyžaduje žádné speciální zařízení – postačí rovinný kalibrační objekt se známou geometrií, typicky šachovnicový vzor, který je snímán kamerou z různých pozic a úhlů.

Základní princip metody spočívá ve využití několika snímků rovinného vzoru, ze kterých je odhadována homografie mezi rovinou vzoru a obrazovou rovinou kamery. Homografie je

3×3 projektivní transformace, která popisuje, jak se body roviny ve světě (v daném případě šachovnice) promítají do obrazu kamery.

Pro každý snímek kalibračního vzoru je vypočtena matice homografie H , která je následně použita k odhadu vnitřních (intrinsických) parametrů kamery, tj. ohniskových vzdáleností f_x, f_y , souřadnic hlavního bodu (c_x, c_y) a případně zkosení pixelů s .

Jakmile jsou vnitřní parametry známy, je možné pro každý snímek určit vnější (extrinsické) parametry kamery, tedy rotaci R a translaci t , které určují pozici kamery vzhledem k rovině vzoru. Zde se uvažuje, že souřadnicový systém vzoru určuje souřadnicový systém celé scény. V rámci této kalibrace hraje roli pouze kamera a kalibrační vzor, nic dalšího.

Posledním krokem je nelineární optimalizace všech parametrů, jak vnitřních, tak vnějších, s cílem minimalizovat reprojekční chybu, tj. rozdíl mezi skutečnými detekovanými body v obraze a body zpětně promítnutými z 3D modelu vzoru pomocí odhadnutých parametrů kamery. Tato optimalizace se obvykle provádí metodou *Levenberg–Marquardt*.

Zhangova metoda implicitně předpokládá, že všechny body leží v jedné rovině (rovina kalibračního vzoru), což významně zjednodušuje výpočetní proces. Přesto dokáže poskytovat velmi přesné výsledky a je vhodná jak pro kamery s fixním, tak i s proměnným ohniskem (např. zoom objektiv), pokud se během kalibrace ohnisková vzdálenost mění.

Výsledek kalibrace

Shrnutí jednotlivých parametrů, které získám kalibrací kamery:

Vnitřní parametry:

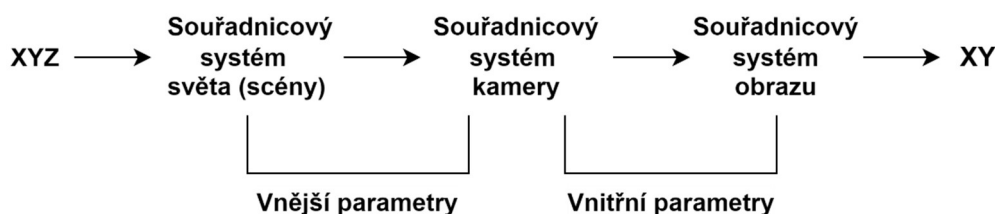
- kamerová matice K (36),
- koeficienty zkreslení $D = k_1, k_2, p_1, p_2, k_3$ (39-42).

V některých aplikacích se používají i dodatečné koeficienty pro přesnější modelování zkreslení, zejména u širokoúhlých nebo tzv. *fish-eye* objektivů.

Vnější parametry (pro každý snímek):

- rotační matice R ,
- translační vektor t .

Tyto parametry určují pozici a orientaci kamery vzhledem ke kalibračnímu vzoru.



Obr. 4: Schématické znázornění projekce pomocí parametrů kamery [74]

4.3 Hand-eye kalibrace

Hand-eye kalibrace je zásadní součástí systémů, které kombinují průmyslového robota a kameru, přičemž jejich souřadnicové systémy nejsou z výroby pevně propojené. Cílem této

kalibrace je určit přesnou transformaci mezi souřadnicovým systémem kamery a souřadnicovým systémem robota, typicky nástroje (TCP) nebo přímo základny, v závislosti na způsobu umístění kamery. Existují dva hlavní scénáře:

- Konfigurace *eye-in-hand* - kamera je pevně připojena na koncovém efektoru robota.
- Konfigurace *eye-to-hand* - kamera je umístěna staticky v okolí robota.

V obou případech je však nutné přesně znát vzájemnou polohu kamery a robota, aby bylo možné převádět souřadnice detekovaných objektů mezi obrazem a robotickým světem. Bez této znalosti by robot nebyl schopen reagovat na vizuální vstupy, což by znemožnilo celou řadu úloh jako je vizuální navádění, vychystávání, inspekce nebo montáže.

Hand-eye kalibrace tedy zajišťuje správný přenos informací z kamerového systému do systému robota. Matematicky se řeší jako transformační úloha označovaná rovnicí $AX = XB$ (případně $AX = ZB$), kde A a B jsou známé polohy/pohyby (měřené robotem a detekované kamerou) a X je neznámá transformace mezi nimi. Existuje řada variant a algoritmů řešení, které budou dále vysvětleny.

Tato kapitola podrobně rozebírá principy *hand-eye* kalibrace, její matematickou formulaci, používané metody, požadavky na měření i praktické aspekty jejího provedení.

4.3.1 Konfigurace hand-eye kalibrace

Při integraci kamery do robotického systému hraje zásadní roli její umístění vůči robotu. Toto uspořádání určuje, jaký typ transformace bude potřeba spočítat při kalibraci a jakým způsobem bude systém zpracovávat vizuální informace. Obvykle se rozlišují dvě základní konfigurace:

***Eye-in-hand* konfigurace**

V konfiguraci *eye-in-hand* (někdy také označované jako *camera-in-hand*) je kamera fyzicky připevněna přímo na konci robotického ramena, obvykle přímo u nástroje (TCP). Kamera se tedy pohybuje spolu s koncovým efektozem a pozorovaná scéna se mění v závislosti na pohybu a aktuální poloze robota.

Výhody *eye-in-hand* konfigurace:

- vysoká přesnost v bezprostřední blízkosti manipulace,
- možnost detailního snímání objektů manipulace,
- schopnost přizpůsobit pohled podle aktuální pozice robota,
- vhodná pro aplikace vizuální inspekce nebo přesného navádění.

Nevýhody:

- omezený přehled o celém pracovním prostoru,
- omezení pohybu robota kvůli kabeláži a pozici kamery,
- vyšší nároky na hmotnost a rozměry koncového efektoru.

***Eye-to-hand* konfigurace**

V konfiguraci *eye-to-hand* je kamera stacionární - umístěna v pevné pozici v okolí robotického pracoviště. Toto uspořádání poskytuje pohled na scénu, který je nezávislý na pohybu robota. Zorné pole kamery obvykle pokrývá větší část nebo celé pracoviště (včetně robota), ale nemusí tomu tak vždy být. V případě, že má kamery za úkol přesně lokalizovat objekty v dané prostoru

(např. na dopravním pásu), tak nemusí nutně zabírat robota ani celé pracoviště, stačí když snímá pouze oblast, kde se nachází sledované objekty.

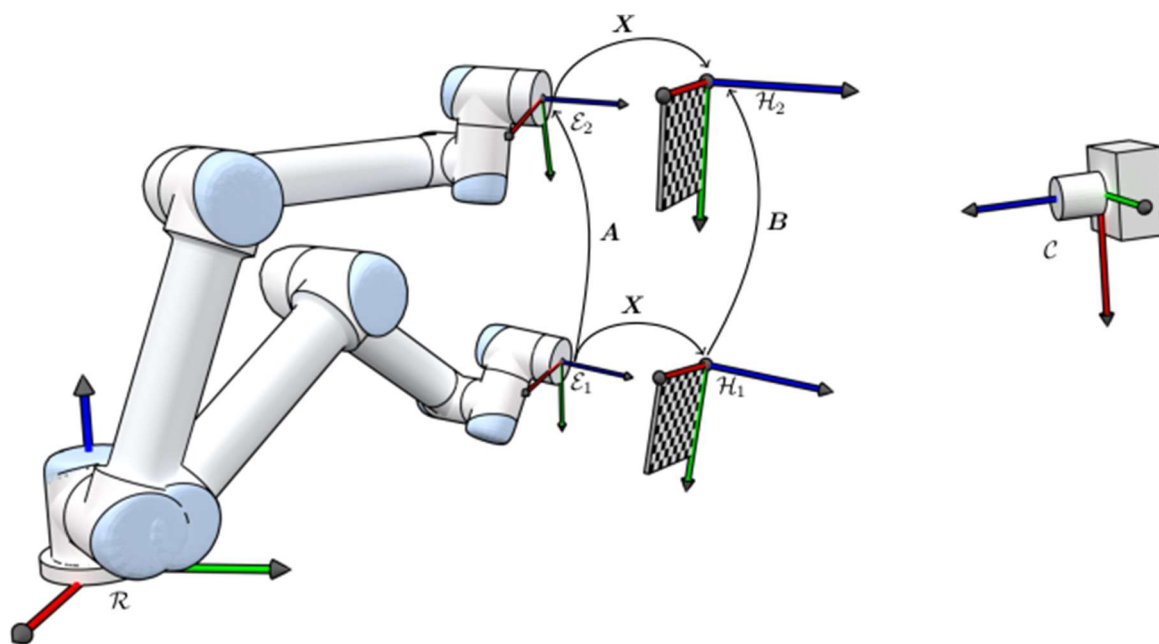
Výhody *eye-to-hand* konfigurace:

- možnost sledovat současně robota i okolní objekty,
- možnost využít robota k manipulaci s objektem v zorném poli kamery (např. při vizuální kontrole),
- není omezena mechanickým pohybem robota,
- jednodušší kabeláž a konstrukce.

Nevýhody:

- odhad pozice objektů je závislý na kvalitě kalibrace a přesnosti modelu,
- omezená viditelnost některých oblastí nebo objektů při zakrytí.

Na obrázcích 5 a 6 je znázorněno schéma robotického pracoviště pro hand-eye kalibraci. Je zde zobrazeno robotické rameno ve dvou různých polohách s popisem odovídajícím matematické formulaci problému hand-eye kalibrace pomocí rovnice $AX = XB$. Základnu robota představuje souřadnicový systém označený jako R . Souřadnicový systém koncového bodu robota je označen ε , vlastní lokální systém kalibračního vzoru je H a systém kamery je C . Jednotlivé polohy jsou označeny indexy, v případě konfigurace *eye-to-hand* (obr 5) jsou to ε_1 a ε_2 , H_1 a H_2 . Pro *eye-in-hand* (obr 6) to jsou to ε_1 a ε_2 , C_1 a C_2 .



Obr. 5: Konfigurace *eye-to-hand* kalibrace [75]

4.3.2 Matematická formulace

Hand-eye kalibrace je matematicky formulována jako úloha nalezení neznámé rigidní transformace mezi souřadnicovým systémem kamery a robotem (typicky TCP nebo základna), na základě měřených pohybů obou těchto částí. Cílem je určit matici X , která popisuje pevný vztah mezi kamerou a robotem v dané konfiguraci.

Je důležité zdůraznit, že samotná matematická formulace problému je nezávislá na konfiguraci systému (*eye-in-hand* nebo *eye-to-hand*). Z pohledu výpočtu zůstává úloha vždy hledáním rigidní transformace X (případně Y, Z), mění se pouze význam jednotlivých transformačních matic. V jednoduché konfiguraci *eye-in-hand* transformace X popisuje vztah mezi efektem robota a kamerou, zatímco v konfiguraci *eye-to-hand* reprezentuje vztah mezi kamerou a základnou robota (případně mezi efektem a kalibračním objektem). Matematická podstata úlohy se však nemění, vždy jde o určení pevné prostorové transformace mezi dvěma souřadnicovými systémy na základě známých pohybů.

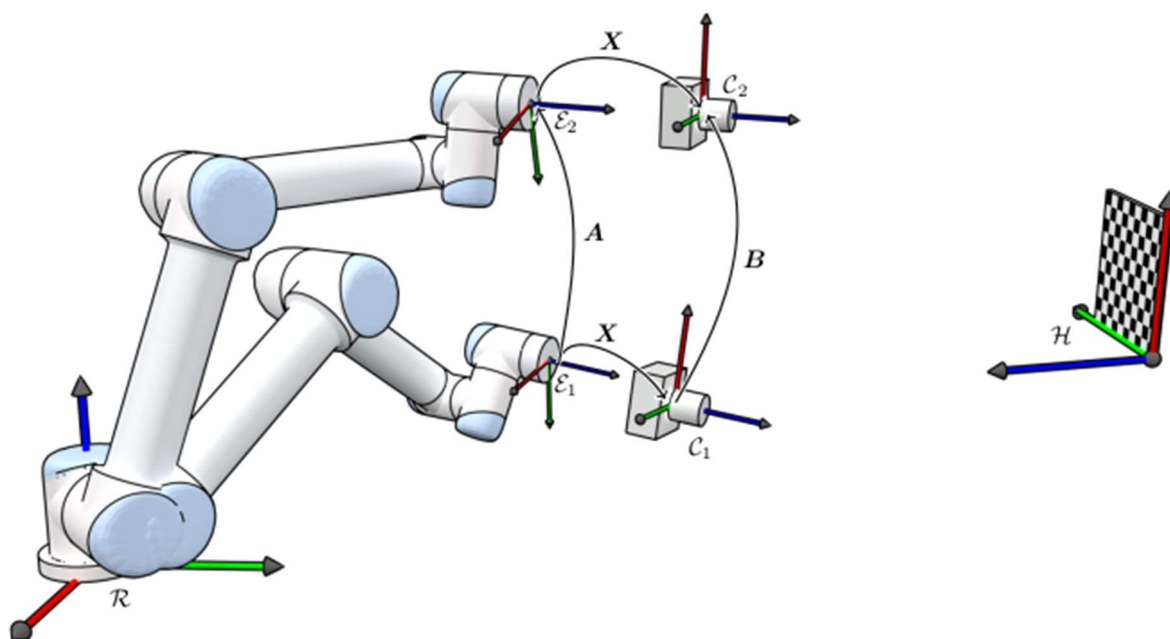
Existují čtyři základní formulace problému *hand-eye* kalibrace:

- $AX = XB$,
- $AX = ZB$,
- přístup založený na **minimalizaci reprojekční chyby**,
- $AXB = YCZ$, který se používá při synchronizované kalibraci dvou robotických ramen.

První dvě formulace ($AX = XB$ a $AX = ZB$) vycházejí z rozdílových pohybů kamery a robota a jsou nejčastěji používány v praxi. V této práci budou podrobněji rozebrány, protože přímo odpovídají běžným experimentálním konfiguracím s jedním robotem a jednou kamerou.

Třetí přístup, založený na minimalizaci reprojekční chyby, se výrazně liší, protože neoperuje přímo s transformačními maticemi, ale s obrazovými body. Optimalizuje výslednou chybu v obraze po zpětné projekci z 3D prostoru. Tento přístup bývá výpočetně náročnější a je citlivý na počáteční podmínky při optimalizaci.

Poslední rovnice, $AXB = YCZ$, se používá ve specifických případech, kdy jsou do systému zapojeny dvě robotická ramena, jejichž vzájemná konfigurace je rovněž neznámá. Umožňuje tak simultánně kalibrovat více zařízení v jednom systému a zjistit jejich vzájemnou polohu, například při spolupráci více robotů v montážní buňce.



Obr. 6: Konfigurace *eye-in-hand* kalibrace [75]

Rovnice $AX = XB$

Jedním z nejrozšířenějších přístupů k *hand-eye* kalibraci je formulace ve tvaru rovnice:

$$AX = XB, \quad (43)$$

kde:

- A je známá transformace pohybu robota (TCP) mezi dvěma pozicemi,
- B je známá transformace pohybu kamery mezi dvěma snímky,
- X je hledaná rigidní transformace mezi robotem (TCP) a kamerou.

Tato rovnice vyjadřuje podmínku, že pohyb, který kamera zaznamená mezi dvěma snímky, odpovídá pohybu robota, převedenému přes pevnou transformaci X . Jinými slovy, trajektorie kamery musí být konzistentní s trajektorií robota (TCP), pokud jsou propojeny transformací X .

V souladu s obrázkem **XX** lze definovat:

$$A = A_2^{-1}A_1 = \begin{bmatrix} R_A & t_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (44)$$

$$B = B_2B_1^{-1} = \begin{bmatrix} R_B & t_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (45)$$

$$X = \begin{bmatrix} R_X & t_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (46)$$

Přístupy k řešení rovnice $AX = XB$ lze rozdělit do dvou hlavních kategorií:

- Metody, které řeší odděleně rotaci a až poté translaci (*separable solution*):
 - $R_A R_X = R_X R_B$,
 - $R_A t_X - t_X = R_X t_B - t_A$.
- Simultánní metody (*simultaneous solution*) řeší rotaci i translaci současně jako jeden celek.

Rovnice $AX = ZB$

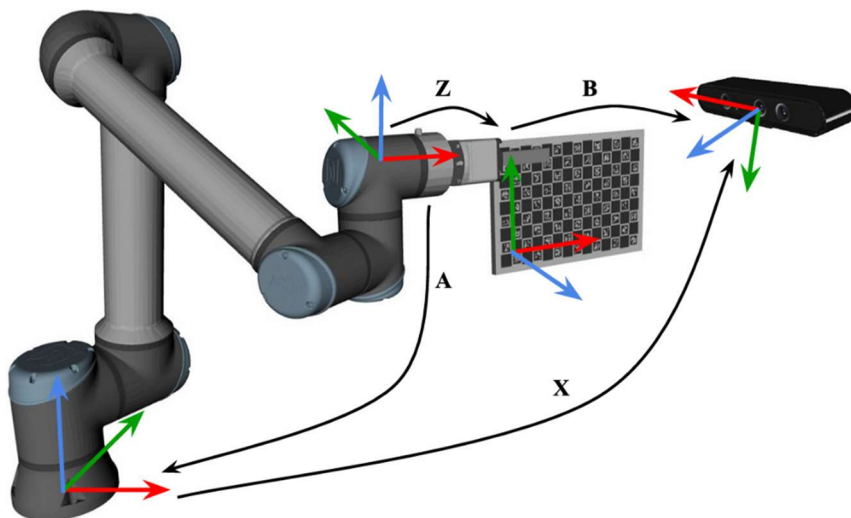
Druhým častým přístupem tzv. robot-svět kalibrace (*Robot-world/hand-eye calibration*) je formulace ve tvaru rovnice:

$$AX = ZB, \quad (47)$$

kde:

- A je známá transformace robota mezi základnou a efektem,
- B je známá transformace mezi kamerou a kalibračním vzorem,
- X je hledaná rigidní transformace mezi kamerou a základnou robota,
- Z je hledaná rigidní transformace mezi efektem a kalibračním objektem.

Tato rovnice rozděluje původní problém do dvou částí: transformace mezi kamerou a bází robota (X) a mezi efektem a kalibračním objektem (Z). Používá se zejména v *eye-to-hand* konfiguracích s fixní kamerou, kde kalibrace zahrnuje i vztah k základně robota, jak je možné vidět na schématu níže.



Obr. 7: Robot-world/hand-eye kalibrace [70]

Explicitně můžeme psát:

$$A = A_2^{-1} A_1 = \begin{bmatrix} R_A & t_A \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (48)$$

$$B = B_2 B_1^{-1} = \begin{bmatrix} R_B & t_B \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (49)$$

$$X = \begin{bmatrix} R_X & t_X \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (50)$$

$$Z = \begin{bmatrix} R_Z & t_Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (51)$$

Přístupy k řešení jsou stejné jak u předchozí rovnice:

- Metody s odděleným řešením rotace a translace:
 - $R_A R_X = R_Z R_B$,
 - $R_A t_X - t_X = R_Z t_B - t_Z$.
- Simultánní metody

4.3.3 Přehled vybraných metod řešení

Existuje velké množství algoritmů a numerických metod pro řešení problému *hand-eye* kalibrace. Tyto metody se liší matematickým přístupem, reprezentací rotace, způsobem optimalizace, numerickou stabilitou i citlivostí na šum. V této kapitole budou představeny čtyři reprezentativní metody, které patří mezi nejznámější a nejčastěji používané v praxi, odborné literatuře i při srovnávacích analýzách nových metod (tzv. *benchmarking*) [56, 70, 72]. Metody jsou pojmenovány podle jejich autorů.

U každé metody je uvedeno, zda je primárně určena pro řešení rovnice $AX = XB$ nebo $AX = ZB$. Není to však pravidlem, řada moderních algoritmů vychází z původních metod a dále je rozšiřuje tak, že je lze s určitými úpravami použít i pro druhou variantu problému.

Metoda Tsai a Lenz

Metoda Tsai a Lenz (1989) [68] je jednou z nejznámějších metod řešení úlohy *hand-eye* kalibrace, tedy odhadu transformační matice mezi souřadným systémem kamery (*eye*)

a souřadným systémem efektoru robota (*hand*). Tato metoda nabízí oddělitelné řešení úlohy, nejprve řeší rotaci a následně translaci. Primárně pro $AX = XB$.

Metoda je založena na reprezentaci rotace pomocí rotační osy a úhlu (angle-axis representation). Hledaná rotační matice R_X , která vyjadřuje rotaci mezi soustavami, je popsána jako:

$$R_X \Rightarrow (\vec{n}_X, \theta_X), \quad (52)$$

kde:

- n_X je jednotkový vektor rotační osy,
- θ_X je úhel rotace kolem této osy.

K určení n_X a θ_X metoda využívá informace z několika pohybů robota. Pro každý pohyb je známá rotační osa v souřadném systému kamery n_A a efektoru n_B . Pak lze vypočítat:

$$[\vec{n}_A + \vec{n}_B]_{\times} \vec{n}'_X = \vec{n}_A - \vec{n}_B \vec{n}_X = \frac{2\vec{n}'_X}{\sqrt{1 + \|\vec{n}'_X\|^2}}, \quad (53)$$

$$\theta_X = 2 \tan^{-1}(\|\vec{n}'_X\|). \quad (54)$$

Poté lze získat rotační matici R_X pomocí vztahu:

$$R_X = \left(1 - \frac{\|\vec{n}_X\|^2}{2}\right) \cdot I + 0,5 \left[\vec{n}_X \cdot \vec{n}_X^T + \left(\sqrt{4 - \|\vec{n}_X\|^2}\right) [\vec{n}_X]_{\times} \right], \quad (55)$$

kde:

- I je jednotková matice,
- $[\vec{n}_X]_{\times}$ je křížová matice (14).

Hlavní výhodou této metody je, že redukuje úlohu na řešení lineární soustavy rovnic s pevně daným počtem, zatímco starší metody vyžadovaly čím dál více rovnic s rostoucím počtem měření. Po určení rotace se translace t_X spočítá samostatně pomocí další lineární soustavy rovnic.

Metoda Park a Martin

Metoda Park a Martin (1994) [50] představuje výpočetně efektivnější a lineárnější přístup k řešení úlohy *hand-eye* kalibrace. Jedná se opět o metodu, která řeší rotaci a translaci odděleně a je primárně určena pro úlohu $AX = XB$. Autoři použili parametrizaci rotace prostřednictvím Lieovy algebry, která umožňuje převést rotace z jejich maticového vyjádření na vektorovou reprezentaci. Tento převod je realizován pomocí logaritmu rotační matice, což znamená mapování z grupy rotačních matic (označované $SO(3)$) do odpovídající Lieovy algebry (označované $so(3)$). Zatímco $SO(3)$ představuje množinu všech 3×3 ortogonálních matic, Lieova algebra $so(3)$ odpovídá jejich algebraickému vyjádření ve formě 3×1 vektorů.

Logaritmus rotace R je definován vztahem:

$$\log R = \frac{\theta}{2 \sin \theta} (R - R^T), \quad (56)$$

kde θ je úhel rotace určený ze vztahu $1 + 2 \cos \theta = \text{tr}(R)$, $\text{tr}(R)$ je stopa matice R .

Díky tomuto přístupu lze úlohu kalibrace vyjádřit jako soustavu lineárních rovnic:

$$R_X \beta_i = \alpha_i, \quad (57)$$

kde:

$$\alpha_i = \log \mathbf{R}_A, \quad \beta_i = \log \mathbf{R}_B. \quad (58)$$

Matice $\mathbf{R}_X$ je následně spočítána metodou minimálních čtverců:

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^N \beta_i \alpha_i^T, \quad (59)$$

$$\mathbf{R}_X = (\mathbf{M}^T \mathbf{M})^{-\frac{1}{2}} \cdot \mathbf{M}^T, \quad (60)$$

kde N je počet měření.

Metoda je odolná vůči šumu a výpočetně efektivní, protože redukuje problém na lineární systém rovnic, ale pokud vstupní matice $\mathbf{R}_A$ nebo $\mathbf{R}_B$ nejsou přesně rigidní (např. obsahují chyby měření), nemusí být možné logaritmus spočítat.

Metoda Daniilidis a Bayro-Corrochano

Metoda Daniilidise a Bayro-Corrochana (1996) [55] představuje přístup k *hand-eye* kalibraci založený na duálních kvaternionech. Autoři nabízejí algebraickou interpretaci šroubového pohybu pomocí této reprezentace. Simultánní metoda pro úlohu $\mathbf{AX} = \mathbf{XB}$.

Pro daný jednotkový kvaternion $q(q_0, \vec{q})$, který popisuje rotaci v tuhé transformaci, je jeho duální kvaternion vyjádřen jako:

$$q'(q'_0, \vec{q}') = \frac{1}{2} t q, \quad (61)$$

kde t je vektor translace. Tento vztah propojuje rotaci a translaci do jedné matematické entity.

Pouze pomocí vektorové části duální reprezentace pro kameru a robota lze kalibrační rovnici přepsat do matic, které popisují vztah mezi známými a neznámými kvaterniony:

$$\begin{pmatrix} \vec{a} - \vec{b} & [\vec{a} + \vec{b}]_{\times} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 3} \\ \vec{a}' - \vec{b}' & [\vec{a}' + \vec{b}']_{\times} & \vec{a} - \vec{b} & [\vec{a} + \vec{b}]_{\times} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_X \\ q'_X \end{pmatrix} = 0, \quad (62)$$

Řešení rovnice je založeno na nalezení nulového prostoru této matice – konkrétně dvou singulárních vektorů $\vec{u}_1^T = (\vec{v}_1^T, \vec{w}_1^T)$ a $\vec{u}_2^T = (\vec{v}_2^T, \vec{w}_2^T)$, které rozepíší řešení jako lineární kombinaci:

$$\begin{pmatrix} q_X \\ q'_X \end{pmatrix} = \lambda_1 \begin{pmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{w}_1 \end{pmatrix} + \lambda_2 \begin{pmatrix} \vec{v}_2 \\ \vec{w}_2 \end{pmatrix}, \quad (63)$$

Aby byl výsledný kvaternion opravdu jednotkový duální kvaternion, je nutné přidat omezení:

$$q_X^T q_X = 1, \quad q_X^T q'_X = 0. \quad (64)$$

Tato dvě omezení vedou na dvojici kvadratických rovnic pro λ_1 a λ_2 , které lze následně vyřešit a určit tak výsledný kvaternion q_X a jeho duální část q'_X .

Metoda Li a kol.

Modernější metoda simultánního řešení *hand-eye* kalibrace z roku 2010 [47]. Lze použít pro oba dva druhy rovnice, primárně pro $\mathbf{AX} = \mathbf{ZB}$. Využívá Kroneckerova součinu k převodu rovnice na lineární tvar a používá vztah mezi vektorizací matice a právě Kroneckerovým součinem.

Metoda je simultánní, ale první je nutné provést separaci, jednotlivé rovnice vectorizovat a pak spojit zpět dohromady. Vztah vektorizace a Kroneckerova součinu, lze vidět na vektorizaci jednotlivých stran rovnice s rotačními maticemi:

$$\text{vec}(\mathbf{R}_A \mathbf{R}_X) = (\mathbf{R}_A \otimes \mathbf{I}) \cdot \text{vec}(\mathbf{R}_X) , \quad (65)$$

$$\text{vec}(\mathbf{R}_Z \mathbf{R}_B) = (\mathbf{I} \otimes \mathbf{R}_B^T) \cdot \text{vec}(\mathbf{R}_Z) , \quad (66)$$

kde:

- $\text{vec}()$ je vektorizace matic,
- $\otimes$ je Kroneckerův součin.

Maticový zápis rotační i translační části, včetně spojení do jedné rovnice:

$$[\mathbf{R}_A \otimes \mathbf{I} \quad -\mathbf{I} \otimes \mathbf{R}_B^T] \begin{bmatrix} \text{vec}(\mathbf{R}_X) \\ \text{vec}(\mathbf{R}_Z) \end{bmatrix} = 0 , \quad (67)$$

$$[\mathbf{I} \otimes \mathbf{t}_B^T \quad -\mathbf{R}_A \quad \mathbf{I}] \begin{bmatrix} \text{vec}(\mathbf{R}_X) \\ t_X \\ t_Z \end{bmatrix} = t_A , \quad (68)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_A \otimes \mathbf{I} & -\mathbf{I} \otimes \mathbf{R}_B^T & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{I} \otimes \mathbf{t}_B^T & -\mathbf{R}_A & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{vec}(\mathbf{R}_X) \\ \text{vec}(\mathbf{R}_Z) \\ t_X \\ t_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ t_A \end{bmatrix} . \quad (69)$$

Tento lineární systém (69) lze vyřešit například metodou nejmenších čtverců, ale je nutné si dát pozor na to, aby rotační matice byly ortogonální.

Další metody

Výše v této kapitole byly představeny vybrané klasické i pokročilejší algoritmy pro řešení problému *hand-eye* kalibrace, které reprezentují základní směry v řešení rovnic $AX = XB$ nebo $AX = ZB$. Popisované metody zahrnují jak separační přístupy, tak simultánní řešení.

Je však třeba zdůraznit, že v odborné literatuře existuje celá řada dalších metod. Některé z nich na výše zmíněné algoritmy navazují, rozšiřují je nebo kombinují více přístupů dohromady. Mezi další často citované metody patří například:

- Horaud a kol. [57],
- Shah [44],
- Strobl a Hirzinger [76],
- Chou a Kamel [77],
- Lu a kol. [78],
- Andreff a kol. [53],
- Zhuang a kol. [79].

V poslední době se také objevují přístupy založené na strojovém učení, zejména neuronových sítích [80], které se snaží naučit vztah mezi pozorovanými pohyby kamery a robota přímo z dat. Ačkoli tyto metody představují zajímavou alternativu a vykazují dobré výsledky v některých simulovaných prostředích, jejich širší praktické využití je zatím omezené zejména kvůli potřebě rozsáhlých trénovacích dat, nižší transparentnosti a větší výpočetní náročnosti.

4.3.4 Proces hand-eye kalibrace

Sběr dat pro kalibraci

Proces hand-eye kalibrace vyžaduje sběr dat ve formě párů transformačních matic. Pro úspěšnou kalibraci je nutné získat dostatečné množství měření (typicky 10-20 pozic) pomocí následujícího postupu:

1. Přesun robota do různých pozic:

- Manuálně (přímé navádění operátorem)
- Automaticky (předem naprogramovaná sekvence pohybů)

2. Záznam transformace robota:

- Pro každou pozici se zaznamenává transformační matice koncového efektoru vůči bázi robota (jednotlivé transformace A_i)

3. Pořízení snímku kalibračního vzoru:

- V každé pozici se pořídí snímek kalibračního vzoru
- Je nutné zajistit, aby kalibrační vzor byl v obraze detekovatelný

4. Detekce a výpočet pozice kalibračního vzoru:

- Detekce vzoru v obraze (2D)
- Výpočet pozice (3D) vůči kameře

Pohyby robota při kalibraci

Při kalibraci robota je zásadní věnovat pozornost volbě jeho pohybů, protože mají přímý vliv na kvalitu a přesnost výsledné kalibrace. Je potřeba kombinovat rotační i translační pohyby, aby se získaly dostatečně rozmanité informace o chování systému. Zásadní je také zajistit, aby rotace probíhaly kolem různých os, nejen kolem jediné, což pomáhá lépe pokrýt všechny stupně volnosti. Dále je vhodné využívat pohyby v různých částech pracovního prostoru robota, aby kalibrace byla reprezentativní pro celé jeho pracovní pole a neomezovala se jen na úzkou oblast.

Detekce kalibračního vzoru

Detekce význačných bodů je úplně stejná jako při kalibraci kamery. Využívají se algoritmy a metody zmíněné v kapitole 3.3 Zpracování obrazu.

Výpočet pozice kalibračního vzoru – metoda PnP

Metoda *Perspective-n-Point* (PnP) je klíčová úloha v oblasti počítačového vidění a robotiky, jejímž cílem je v tomto případě odhadnout polohu kamerového systému vzhledem ke kalibračnímu vzoru. Úloha je definována tak, že na základě známých 3D souřadnic bodů v souřadném systému kalibračního vzoru a jejich odpovídajících 2D projekcí v obraze kamery hledáme takovou pozici a orientaci kamery, která odpovídá této projekci.

K vyřešení této úlohy je zapotřebí minimálně tří bodů, které neleží na jedné přímce, protože jinak je poloha kamery geometricky nejednoznačná. Obecně platí, že čím více bodů je k dispozici, tím vyšší přesnost lze dosáhnout a tím lépe lze odolávat případným chybám v detekci bodů nebo šumu v datech.

Úloha PnP může být řešena více způsoby, přičemž jednotlivé metody se liší zejména počtem potřebných bodů, přesností a výpočetní náročností.

Jednou z nejznámějších variant je tzv. P3P metoda, která využívá právě tři body. Tato metoda je čistě geometrická a poskytuje až čtyři možné řešení, z nichž je nutné následně vybrat to, které odpovídá skutečné poloze kamery. Pro odolnost vůči chybám a vyšší přesnost se však v praxi často využívají algoritmy, které pracují s větším počtem bodů. Mezi ně patří například EPnP (*Efficient PnP*), který efektivně zpracovává i desítky bodů a dosahuje dobré rovnováhy mezi rychlostí a přesností.

Dalším přístupem jsou iterativní metody, které hledají optimální řešení opakovaným minimalizováním chyby mezi předpokládanou a skutečnou projekcí bodů. Tyto metody jsou výpočetně náročnější, ale poskytují vyšší přesnost, zejména v přítomnosti šumu.

Aby byla metoda odolná vůči nesprávně spárovaným bodům nebo chybám při detekci, využívají se také robustní postupy založené na principu *RANSAC*. Ty umožňují ignorovat tzv. „outliery“ – tedy body, které by jinak výrazně zkreslily výsledek.

Sestavení párů transformačních matic

Pro každou zaznamenanou pozici robota při kalibraci získáme dvojici transformačních matic:

- matice A_i : transformace robota,
- matice B_i : transformace kalibračního vzoru vůči kameře.

Tyto páry transformačních matic následně slouží jako vstupní data pro výše popsané metody řešení. Jejich řešením je hledaná *hand-eye* transformace X , která vyjadřuje pevný vztah mezi robotem a kamerou.

4.4 Kalibrační objekty

Pro úspěšnou kalibraci robotických pracovišť, zejména při kalibraci kamerového systému a provádění *hand-eye* kalibrace, je klíčové použití vhodných kalibračních objektů. Tyto objekty, často označované také jako kalibrační vzory, představují fyzické struktury s definovanými geometrickými vlastnostmi. Musí být navrženy tak, aby byly snadno a spolehlivě detekovatelné algoritmy strojového vidění a zároveň je důležité, aby jejich geometrie byla známá s vysokou přesností. Účelem jejich použití je umožnit kamerovým systémům extrakci známých referenčních bodů a tím zpřesnit odhad vnitřních i vnějších parametrů.

Obecně může být kalibračním objektem v podstatě jakýkoli prvek splňující výše uvedené požadavky na přesnost a detekovatelnost. V praxi jsou běžně využívány standardizované vzory, nicméně uživatelé si mohou navrhnout i vlastní kalibrační objekty, a to jak ve 2D, tak ve 3D provedení, přizpůsobené specifickým potřebám dané aplikace.

V této kapitole se zaměříme především na dvojrozměrné (2D) kalibrační vzory, které jsou v praxi nejrozšířenější díky své dostupnosti, snadné výrobě a robustním algoritmům pro jejich detekci. 2D vzory se dají použít jak při kalibraci kamery, tak u *hand-eye* kalibrace. V závěru kapitoly krátce zmíníme i trojrozměrné (3D) kalibrační objekty, které nacházejí uplatnění ve specifických aplikacích vyžadujících vyšší přesnost kalibrace.

4.4.1 2D kalibrační vzory

Existuje řada různých typů rovinných vzorů, které se liší svou strukturou, způsobem detekce i vhodností pro konkrétní aplikace. Níže jsou uvedeny nejpoužívanější z nich.

Šachovnicový vzor

Šachovnicový vzor (*checkerboard pattern*) je jedním z nejpoužívanějších kalibračních vzorů pro kamery a strojové vidění obecně. Jedná se o pravidelnou síť černých a bílých čtverců, přičemž pro kalibraci jsou typicky využívány rohové body mezi sousedními čtverci. Tyto rohy tvoří výrazné a snadno detekovatelné body, které lze s vysokou přesností lokalizovat v obraze.

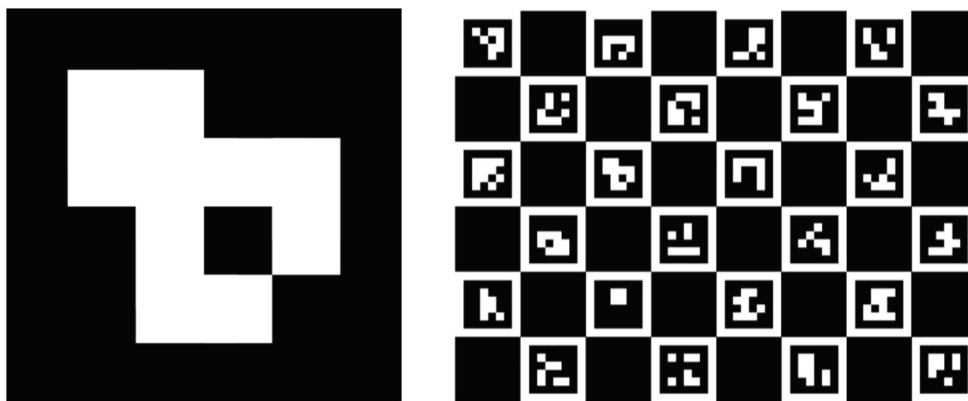
Šachovnicový vzor je definován počtem vnitřních rohů v horizontálním a vertikálním směru a fyzickou velikostí čtverců. Pro kalibraci je nutné znát přesné fyzické rozměry jednotlivých čtverců. Běžně se používají šachovnice s 9×6 nebo 10×7 vnitřními rohy. Vzor může být dále doplněn o další jednoduché prvky, které slouží k určení natočení šachovnice.

ArUco značky

ArUco značky (markery) [61] představují moderní typ kalibračního vzoru založeného na čtvercových binárních markerech s unikátní vnitřní strukturou. Každý marker obsahuje černý čtvercový rámeček, uvnitř kterého je zakódován binární identifikátor. Díky tomu je možné nejen detekovat polohu a orientaci markeru v obraze, ale také jej jednoznačně identifikovat mezi více vzory současně.

Hlavní výhodou ArUco značek je jejich schopnost poskytovat jak vizuální referenční body pro geometrickou kalibraci, tak i informaci o identitě jednotlivých markerů. To umožňuje použití většího množství markerů ve scéně najednou, což zvyšuje robustnost kalibrace a umožňuje pracovat i v případě částečného zakrytí některých částí vzoru. Další předností je, že při správném rozložení markerů lze efektivně pokrýt velkou oblast a zvýšit tak přesnost výsledné kalibrace, zejména při větších vzdálenostech kamery od vzoru.

V praxi se ArUco značky využívají jak pro kalibraci kamer a robotických systémů, tak i pro sledování pohybu objektů v prostoru nebo určování pozice robotů v rozsáhlých scénách. Stejně jako u šachovnicových vzorů je klíčové přesné změření rozměrů jednotlivých markerů, protože tyto rozměry tvoří základ pro výpočet reálné polohy v prostoru.



Obr. 8: ArUco marker a ChArUco vzor [81, 82]

ChArUco vzor

ChArUco vzor představuje kombinaci klasické šachovnice a ArUco markerů, spojuje tak výhody obou těchto přístupů. Jedná se o šachovnicový vzor, kde jsou všechny bílé čtverce nahrazeny individuálními ArUco značkami. Díky tomu lze využít přesné lokalizace rohů typické pro šachovnicový vzor a zároveň těžit z identifikace jednotlivých polí pomocí unikátních ArUco kódů.

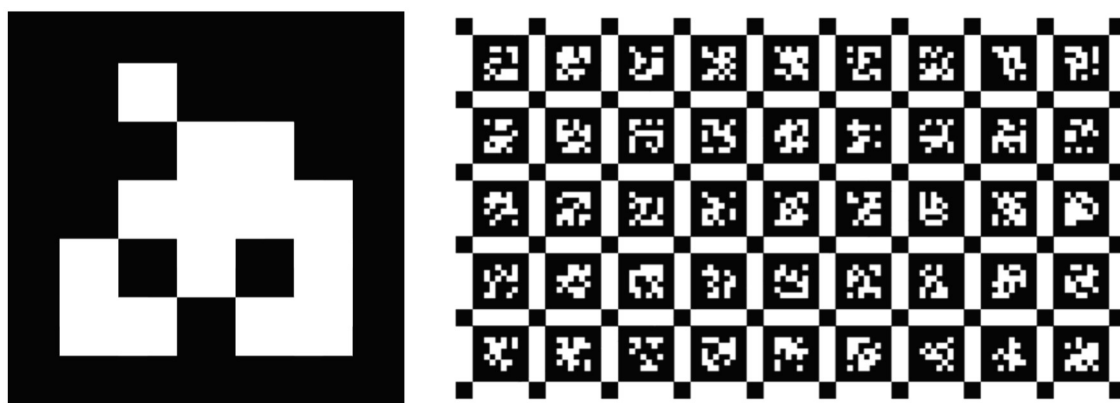
Použití ChArUco vzoru přináší zvýšenou robustnost kalibrace, zejména v případech, kdy není možné zachytit celý vzor v jednom snímku. Jelikož každý ArUco marker nese svou vlastní identitu, lze i při částečném zakrytí nebo omezeném zorném poli určit polohu a orientaci vzoru. Algoritmy detekce nejprve rozpoznávají jednotlivé ArUco značky a následně zpřesní pozici rohů pomocí známé geometrie šachovnice.

AprilTag značky

AprilTag značky [62, 63] tvoří alternativní systém k ArUco markerům, navržený s důrazem na vyšší robustnost detekce v náročných podmínkách. Stejně jako ArUco se jedná o čtvercové binární markery, které obsahují zakódovanou unikátní informaci. Hlavním rozdílem je optimalizace struktury značek tak, aby byly odolnější vůči perspektivním deformacím, šumu a změnám osvětlení.

AprilTag systém je navržen tak, aby minimalizoval chyby při rozpoznávání, a to jak falešné pozitivní detekce, tak chybné identifikace značek. Detekční algoritmy AprilTagů využívají pokročilé metody analýzy hran a geometrie obrazu, což zajišťuje spolehlivé nalezení markeru i v případech, kdy je částečně zakrytý, deformovaný nebo snímán pod velkým úhlem. Jednotlivé AprilTagy lze navíc uspořádat do pravidelné mřížky, čímž vzniká vzor označovaný jako AprilGrid nebo také Kalibr mřížka.

Nevýhodou použití AprilTagů je vyšší výpočetní náročnost detekčních algoritmů ve srovnání s ArUco markery, což může být limitující zejména na zařízeních s omezeným výpočetním výkonem.



Obr. 9: AprilTag marker a mřížka Kalibr [81, 82]

Kruhové vzory

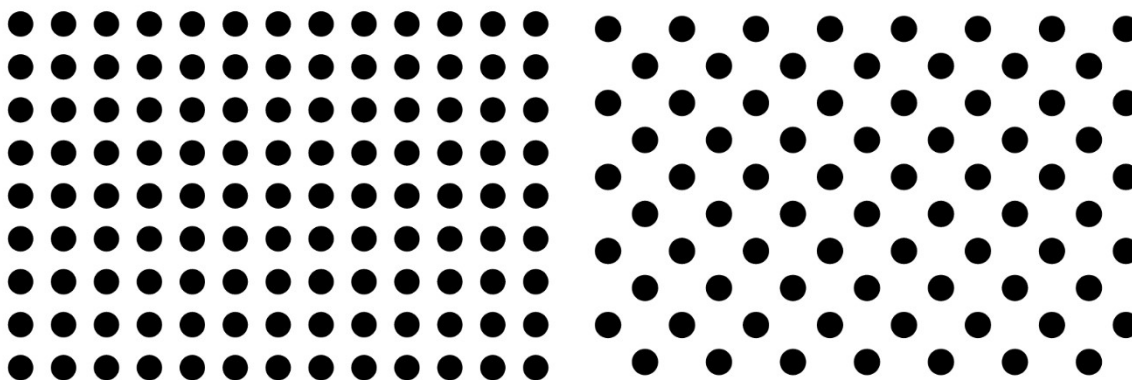
Kruhové vzory (*Circle grid pattern*) představují alternativu k šachovnicovým a čtvercovým kalibračním vzorům. Jsou tvořeny soustavou pravidelně rozmístěných kruhů na kontrastním

pozadí, které slouží jako referenční body pro kalibraci. Díky své specifické geometrii jsou kruhové vzory zvláště vhodné pro případy, kdy je detekce rohů problematická, například při silném zkreslení objektivu nebo při nízkém rozlišení obrazu.

Existují dvě hlavní varianty kruhových vzorů – symetrické a asymetrické uspořádání. V symetrickém kruhovém vzoru jsou kruhy rozmístěny do pravidelné pravoúhlé mřížky, podobně jako u šachovnice. Tento typ je vhodný pro standardní kalibrační úlohy, kde je požadována jednoduchá a opakovatelná geometrie vzoru.

V asymetrickém kruhovém vzoru jsou kruhy rozmístěny tak, že řady střídavě obsahují různé počty bodů, například střídavě 8 a 7 kruhů v řadě dle obrázku 10. Toto uspořádání zvyšuje jednoznačnost detekce, protože každá část vzoru má unikátní lokální geometrii. Díky tomu je asymetrický vzor odolnější vůči chybám při automatické detekci, zejména pokud je snímán pouze částečný výřez vzoru.

Výhodou kruhových vzorů je vyšší spolehlivost detekce bodů při širokoúhlém nebo deformovaném zobrazení. Kruhy zůstávají dobře rozpoznatelné i při perspektivních deformacích, a jejich střed lze určit s vysokou subpixelovou přesností. Navíc díky absenci ostrých rohů jsou kruhové vzory méně citlivé na odlesky a světelné šумы.



Obr. 10: Kruhové vzory, vlevo symetrické a vpravo asymetrické uspořádání [82]

4.4.2 3D kalibrační objekty

Pro specifické aplikace, zejména v oblasti 3D strojového vidění, kalibrace LIDARů, stereo kamer nebo robotických systémů vyžadujících prostorovou přesnost, se využívají i trojrozměrné (3D) kalibrační objekty.

Nejběžnějšími typy 3D kalibračních objektů jsou kalibrační koule, kalibrační kostky nebo 3D mřížky. Kalibrační koule, často s velmi přesně definovaným průměrem, umožňují spolehlivou detekci i při částečném zakrytí nebo v prostředích s vyšší mírou šumu. Kalibrační kostky a mřížky využívají přesně definované hrany a rohové body, které slouží jako referenční body v prostoru a zároveň mohou na sobě mít umístěny 2D kalibrační vzory, pro zvýšení přesnosti kalibrace.

Výhodou 3D kalibračních objektů je schopnost zachytit informace nejen o poloze a orientaci, ale i o hloubce a prostorovém rozložení scény. To umožňuje provádět přesné

víceúrovňové kalibrace, například v robotických buňkách se systémy více kamer a ve spojení s LIDAR senzory.

Na druhou stranu je použití 3D kalibračních objektů náročnější jak z hlediska výroby, tak z hlediska softwarového zpracování. Detekce prostorových struktur vyžaduje pokročilejší algoritmy a vyšší přesnost při měření geometrických parametrů objektu.

Vzhledem k těmto nárokům se 3D kalibrační objekty používají především tam, kde 2D vzory již neposkytují dostatečnou přesnost nebo kde je potřeba zohlednit prostorové informace pro následné aplikace



Obr. 11: Jednoduchá kalibrační kostka [83]

4.5 Přesnost kalibrace

Přesnost kalibrace je klíčovým parametrem, který určuje kvalitu a spolehlivost výsledků dosažených při kalibraci robotických pracovišť. V kontextu kalibrace kamer, robotů nebo celých systémů jde o míru shody mezi reálným chováním systému a jeho matematickým modelem odvozeným na základě kalibračních měření. Vysoce přesná kalibrace je nezbytná pro aplikace, kde je požadována vysoká úroveň prostorové přesnosti, například při robotickém uchopování, montáži nebo v metrologických úlohách.

Výsledná přesnost kalibrace přímo ovlivňuje celkovou přesnost lokalizace, navigace a manipulace v robotických systémech. Nedostatečně přesná kalibrace se může projevit například chybnou pozicí uchopeného objektu, nesprávnou trajektorií robota nebo sníženou kvalitou výsledných měření v kamerových systémech.

4.5.1 Faktory ovlivňující přesnost kalibrace

Výslednou přesnost kalibrace ovlivňuje řada faktorů, z nichž některé souvisí s fyzickými vlastnostmi použitých kalibračních objektů, jiné pak se samotným procesem sběru a zpracování dat.

Kvalita a rozlišení kamerového systému

Kamery s vyšším rozlišením umožňují přesnější detekci kalibračních vzorů. Kromě rozlišení hrají významnou roli i šum senzoru a optické vady objektivu, především radiální a tangenciální distorze, které musí být správně kompenzovány.

Volba kalibračního vzoru

Typ, velikost a přesnost výroby kalibračního vzoru přímo ovlivňují výslednou přesnost. Šachovnicové vzory poskytují vysokou přesnost detekce rohů, zatímco markery typu AprilTag nebo ArUco nabízejí lepší robustnost. Nepřesnost tisku nebo deformace podkladu mohou zavést systematické chyby.

Počet a rozložení kalibračních snímků

Pro optimální kalibraci je důležité pořizovat snímky z různých úhlů a vzdáleností pokrývajících celý pracovní prostor (zorné pole kamery). U *hand-eye* kalibrace je zásadní vhodné rozložení kalibračních pozic robota zahrnující různé orientace koncového efektoru a natočení jednotlivých kloubů.

Světelné podmínky

Nerovnoměrné osvětlení, odlesky nebo stíny způsobují nepřesnou detekci kalibračních vzorů. Ideální je difúzní, rovnoměrné osvětlení, které zůstává stabilní během celého kalibračního procesu.

Stabilita montáže kamery

Mechanická stabilita upevnění kamery je kritickým faktorem zejména pro *hand-eye* kalibraci. Jakékoliv vibrace nebo nechtěný pohyb kamery zavádí chyby do kalibračního procesu a může vyžadovat rekalibraci.

Přesnost robota

Chyby v kinematickém modelu robota, vůle v kloubech nebo nepřesnosti v enkodérech způsobují rozdíly mezi nominální a skutečnou pozicí koncového efektoru, což negativně ovlivňuje *hand-eye* kalibraci.

Algoritmy zpracování obrazu a kalibrace

Moderní algoritmy využívající sub-pixelovou detekci výrazně zvyšují přesnost určení významných bodů v obraze. Volba optimalizační metody (např. *Levenberg-Marquardt*) a použití robustních statistických postupů pomáhá eliminovat vliv chybných detekcí.

Environmentální faktory

Změny teploty mohou ovlivňovat mechanické vlastnosti robotického systému i optické vlastnosti kamery. V průmyslovém prostředí je třeba počítat také s vlivem prachu, vibrací nebo elektromagnetického rušení.

4.5.2 Metriky přesnosti kalibrace

Pro objektivní hodnocení kvality kalibrace je nezbytné využívat vhodné metriky, které kvantifikují míru shody mezi modelovými předpoklady a reálným chováním systému. V této části jsou uvedeny nejběžněji používané metody pro vyhodnocení přesnosti kalibrace kamer i *hand-eye* kalibrace.

Reprojekční chyba – kalibrace kamery

Základní metrikou používanou pro hodnocení přesnosti kalibrace kamery je reprojekční chyba. Tato chyba vyjadřuje průměrnou vzdálenost mezi reálnými detekovanými body na snímcích

a teoretickými polohami těchto bodů, jak by měly být promítnuty na základě vypočítaných kalibračních parametrů.

Výpočet reprojekční chyby se provádí pro všechny snímky a všechny body. Obvykle se udává jako průměrná chyba (*mean error*), ale může se udávat i jinými způsoby, například jako medián.

Průměrná reprojekční chyba e v pixelech je definována jako:

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|p_i - \hat{p}_i\|, \quad (70)$$

kde:

- N je počet detekovaných bodů,
- p_i je detekovaná poloha bodu v obraze,
- $\hat{p}_i$ je poloha bodu predikovaná modelem kamery.

Interpretace reprojekční chyby je jednoduchá: čím nižší je hodnota chyby, tím přesnější je odhad vnitřních parametrů kamery. Typicky se za dobrou kalibraci považuje reprojekční chyba nižší než 1 pixel. Je však třeba mít na paměti, že velmi nízká reprojekční chyba neznámá automaticky perfektní prostorovou přesnost – je pouze indikátorem kvality fitování modelu na naměřená data.

Translační chyba - *hand-eye* kalibrace

Translační chyba představuje důležitou metriku pro hodnocení přesnosti *hand-eye* kalibrace, která kvantifikuje, jak dobře kalibrační transformace zachovává prostorové vztahy mezi pohyby robota a kamery.

Translační chybu při *hand-eye* kalibraci lze definovat jako průměrnou kvadratickou odchylku mezi transformacemi pohybů robota a kamery při aplikaci vypočtené *hand-eye* transformace. Matematicky je e_T vyjádřena vztahem:

$$e_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|R_A^i t_X^i + t_A^i - R_X^i t_B^i - t_X^i\|^2, \quad (71)$$

kde:

- R_X a t_X jsou rotační matice a translační vektor získané z *hand-eye* kalibrace,
- R_A a t_A jsou rotační matice a translační vektory pohybů robotického ramene,
- R_B a t_B jsou rotační matice a translační vektory odpovídajících pohybů kamery,
- n je počet párů transformací použitých pro výpočet chyby.

Lze si všimnout, že se R_B v (71) nenachází. R_B je natočení vzoru vůči kameře, proto není při výpočtu translační chyby potřeba a je použito až v (72).

Translační chyba se udává v jednotkách délky na druhou (typicky mm²) a nižší hodnota indikuje přesnější kalibraci. Při dokonalé kalibraci by výraz uvnitř normy byl nulový pro každý pár transformací, což by znamenalo, že transformace přesně zachovává prostorové vztahy.

V praxi jsou hodnoty blízké nule žádoucí, ale konkrétní přijatelné hodnoty závisí na požadované přesnosti aplikace.

Rotační chyba - *hand-eye* kalibrace

Rotační chyba je další klíčovou metrikou pro vyhodnocení přesnosti *hand-eye* kalibrace. Zatímco translační chyba hodnotí přesnost pozičního mapování, rotační chyba se zaměřuje na přesnost orientačního mapování mezi souřadnicovými systémy.

Rotační chyba e_R je definována jako průměrná kvadratická hodnota úhlu osy rotace potřebného k zarovnání předpokládané a skutečné orientace:

$$e_R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|\theta(\Delta R^i)\|^2, \quad (72)$$

kde:

- n je počet párů transformací použitých pro výpočet chyby,
- $\theta(\Delta R)$ označuje převod rotační matice ΔR do reprezentace osa-úhel,
- ΔR je matice odchylky rotace definovaná jako:

$$\Delta R = (R_A R_X)^{-1} R_X R_B. \quad (73)$$

Funkce $\theta(\Delta R)$ extrahuje z rotační matice ΔR úhel rotace, který je potřebný k transformaci z jedné orientace do druhé. Tento úhel reprezentuje míru neshody mezi očekávanou a skutečnou rotací.

Rotační chyba je měřena v radiánech na druhou (nebo stupních na druhou) a nižší hodnota indikuje přesnější kalibraci orientace. V ideálním případě, kdy kalibrace přesně zachycuje rotační vztah mezi robotem a kamerou, by ΔR byla identická matice a úhel θ by byl nulový.

Absolutní poziční chyba

Absolutní poziční chyba představuje jednu z nejdůležitějších a nejintuitivnějších metrik pro hodnocení přesnosti celého kalibračního řetězce robotického pracoviště. Tato metrika přímo porovnává skutečnou fyzickou polohu objektu v reálném světě s jeho detekovanou polohou získanou z kamerového systému a následně transformovanou do světových souřadnic.

Absolutní poziční chyba e_{abs} může být definována jako:

$$e_{abs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|P_{real}^i - P_{det}^i\|_2, \quad (74)$$

kde:

- P_{real} je skutečná pozice objektu ve světovém souřadnicovém systému (například změřená pomocí přesného měřicího zařízení),
- P_{det} je pozice objektu detekovaná kamerou a transformovaná do světového souřadnicového systému pomocí kalibrovaných transformací,
- n je počet měření.

Absolutní poziční chyba je klíčová metrika, která v milimetrech přímo vyjadřuje celkovou přesnost robotického systému, protože zahrnuje chyby z kalibrace kamery, *hand-eye* kalibrace, robota i detekce objektů. Měří se s pomocí přesných referenčních zařízení, na testovacích bodech pokrývajících pracovní prostor, a její hodnocení (např. průměr, medián nebo maximum) ukazuje, zda systém splňuje požadavky aplikace.

5 NÁVRH A IMPLEMENTACE VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

Praktická část této diplomové práce se zaměřuje na návrh a implementaci systému pro automatickou kalibraci robotických pracovišť s využitím metod strojového vidění. V souladu se zadáním bylo cílem vytvořit efektivní a autonomní řešení, které umožní přesné kalibrování robotických pracovišť pomocí hand-eye kalibrace, a to jak v konfiguraci s kamerou upevněnou na konstrukci robota (*eye-in-hand*), tak i v případech, kdy se kamera nachází mimo robota (*eye-to-hand*).

V oblasti automatické kalibrace robotických pracovišť s využitím strojového vidění existuje několik dostupných řešení. Významnou platformou je *Robot Operating System* (ROS), který nabízí několik balíčků zaměřených na kalibraci kamer a hand-eye kalibraci [84]. Tyto open-source nástroje poskytují implementace různých kalibračních metod a intuitivní rozhraní, avšak často vyžadují pokročilejší znalosti ROS ekosystému a nemusí být vždy jednoduché je integrovat do stávajících průmyslových systémů. Vedle toho většina významných výrobců kamerových systémů (nebo intergrátorů), jako jsou například Cognex nebo Keyence, vyvinula svá proprietární řešení pro kalibraci. Tato řešení jsou obvykle dostupná jako součást placených softwarových balíčků a jsou optimalizována specificky pro hardware daného výrobce, což omezuje jejich univerzální použitelnost. Z těchto důvodů je vývoj vlastního, nezávislého a otevřeného řešení pro automatickou kalibraci, které by bylo snadno adaptovatelné na různé robotické platformy, stále aktuálním a hodnotným přínosem v této oblasti.

Tato kapitola popisuje kompletní proces vývoje kalibrační aplikace, která byla realizována ve spolupráci s firmou INTEMAC. Společnost poskytla nezbytné technické vybavení včetně kolaborativního robota a kamerového systému, což umožnilo praktickou implementaci a validaci navrženého řešení v reálných podmínkách.

Praktická implementace automatické kalibrace je strukturována do následujících částí:

1. **Algoritmus automatické kalibrace** - komplexní postup zahrnující návrh strategií pro automatické generování optimálních pohybů robota při sběru kalibračních dat, kalibraci kamery, implementaci algoritmů pro výpočet *hand-eye* kalibrace, výběr vhodného kalibračního objektu a implementaci metod pro detekci kalibračního vzoru.
2. **Uživatelské rozhraní** - vytvoření intuitivního grafického rozhraní pro ovládání celého kalibračního procesu, které umožňuje nastavení parametrů, sledování průběhu kalibrace a vizualizaci výsledků. Součástí je popis použitých technologií a knihoven pro vývoj GUI (*Graphical User Interface*).
3. **Experimentální robotické pracoviště** - detailní popis použitého hardwarového vybavení, zahrnující specifikaci kolaborativního robota, jeho řízení a experimentální zjištění kalibračních parametrů, dále parametry použité kamery, objektivu a osvětlení, popis navržených a vytištěných 3D dílů pro upevnění komponent a vytvoření testovacích scénářů.
4. **Testování a validace řešení** - experimentální ověření funkčnosti a přesnosti vyvinutého kalibračního řešení, zahrnující návrh testovacích programů, metodiku

hodnocení přesnosti kalibrace pomocí definovaných metrik a porovnání účinnosti různých kalibračních metod v reálných podmínkách.

Výsledkem praktické části je ucelené softwarové řešení implementované v programovacím jazyce Python, které umožňuje automatickou kalibraci robotických pracovišť s využitím strojového vidění. Celá aplikace je postavena na základních, volně dostupných a *open-source* knihovnách, jako jsou například OpenCV pro zpracování obrazu a počítačové vidění, PySide pro vytvoření grafického uživatelského rozhraní nebo NumPy pro efektivní matematické výpočty. Vyvinutá aplikace poskytuje výrazné zefektivnění a zkrácení procesu kalibrace oproti manuálním metodám. V následujících podkapitolách budou podrobně popsány jednotlivé komponenty systému, implementační detaily a výsledky experimentálního ověření vyvinutého řešení.

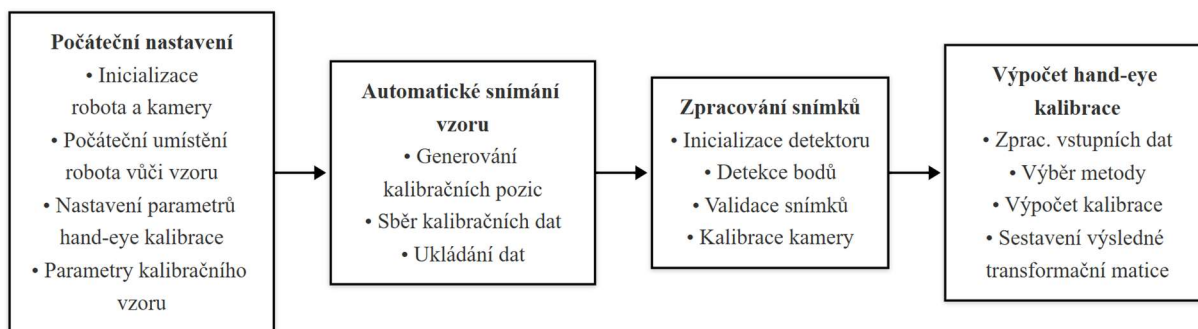
5.1 Algoritmus automatické kalibrace

Tato kapitola popisuje návrh a implementaci algoritmu pro automatickou kalibraci robotických pracovišť pomocí metod strojového vidění. Proces automatické kalibrace je klíčovým přínosem této práce, neboť eliminuje potřebu manuálních zásahů při kalibraci robotického pracoviště a zajišťuje opakovatelné výsledky. Navržený algoritmus řeší kompletní postup od inicializace systému, přes sběr kalibračních dat a jejich zpracování, až po výpočet *hand-eye* kalibrace, která propojuje souřadnicové systémy kamery a robota.

Před popisem jednotlivých kroků algoritmu je vhodné představit celkový proces kalibrace, který je znázorněn na diagramu níže. Proces automatické kalibrace zahrnuje následující hlavní kroky:

1. **Počáteční nastavení systému** - konfigurace parametrů kalibrace na základě požadovaných vstupů, inicializace komunikace s robotem a kamerovým systémem.
2. **Automatické snímání kalibračního vzoru** - generování trajektorie robota a pořízení sekvence snímků kalibračního vzoru z různých pozic a orientací.
3. **Zpracování snímků** - detekce kalibračního vzoru v pořízených snímcích a výpočet pozice vzoru vzhledem ke kameře.
4. **Výpočet hand-eye kalibrace** - aplikace algoritmů *hand-eye* kalibrace na získaná data a vyhodnocení přesnosti.

Jednotlivé kroky jsou detailně popsány v následujících podkapitolách.



Obr. 12: Diagram algoritmu automatické kalibrace

5.1.1 Počáteční nastavení systému

Počáteční nastavení systému představuje první fázi celého kalibračního procesu. Tuto fázi můžeme rozdělit na více částí: inicializace robota a kamery, počáteční umístění robota vůči kalibračnímu vzoru a nastavení parametrů pro *hand-eye* kalibraci.

Inicializace robota a kamery

Tato část se zaměřuje na navázání komunikace s fyzickými komponenty systému a jejich přípravu pro kalibrační proces.

Co se týče robota, tak se to může lišit v závislosti na zvoleném komunikačním protokolu. V rámci této práce se jedná pouze o připojení robota do sítě, kde mu je přidělena IP adresa pomocí DHCP serveru nebo se nastaví statická adresa. Tuto adresu stačí poté správně nastavit v systému (programu) pro kalibraci. Poté jen ověření, že komunikace je dostupná a funkční.

Při inicializaci kamery je navázání komunikace velmi podobné. Opět správné nastavení IP adresy a ověření komunikace. V rámci tohoto kroku je nutné ještě nastavit základní parametry kamery, jako je rozlišení, snímkovací frekvence, expoziční čas a podobně. To je nutné udělat manuálně podle prostředí a pracovních podmínek.

Posledním krokem je počáteční umístění robota vůči kalibračnímu vzoru. Kalibrační vzor musí být umístěn tak, aby byl ideálně uprostřed zorného pole a kolmo ke kameře pro dosažení lepších výsledků. Neměl by být ani moc daleko ani moc blízko. Zde je nutné dbát na bezpečnost, neboť se předpokládá, že kalibrace bude probíhat v prostoru, který není nijak významně omezen a robot má kolem sebe dostatek prostoru. Ke snížení bezpečnostního rizika byl při praktickém testování využit kolaborativní robot.

Parametry hand-eye kalibrace

Druhou klíčovou částí počátečního nastavení je konfigurace parametrů pro kalibrační proces. Tyto parametry určují, jakým způsobem bude kalibrace probíhat a jaké metody budou použity při výpočtu.

- **Konfigurace** – zda se nachází kamera připevněna na robota (*eye-in-hand*) nebo je umístěna staticky v okolí robota (*eye-to-hand*).
- **Přídavné osvětlení** – zda se má použít přídavné osvětlení
- **Parametry kalibračního vzoru ChArUco** – je nutné definovat fyzické rozměry vzoru, velikost šachovnicových polí, velikost ArUco markerů a slovník daných markerů. ChArUco je jediný implementovaný vzor, díky jeho výhodám spojeným s propojením šachovnice s ArUco markery. ArUco markery jsou dále použity při testování.
- **Volba kalibrační metody** – výběr kalibrační metody, která bude použita pro výpočet hand-eye kalibrace.
- **Počet a poloha kalibračních pozic, odhad vzdálenosti kamery od kalibračního vzoru, odhad směru osy kamery (kalibračního vzoru) vůči robotu** – parametry potřebné pro vygenerování jednotlivých poloh robota, ve kterých se budou pořizovat kalibrační snímky.
- **Kinematický model robota** – tento parametr není nutný, ale v rámci této práce slouží ke zvýšení univerzálnosti výsledného řešení. Pozice robota se počítá pomocí dopředné kinematiky z úhlů natočení jednotlivých kloubů. Výsledná *hand-eye* kalibrace se potom

neváže na konkrétní nástroj, ale váže se ke koncovému bodu robota, kterým je nejčastěji příruba a je možné se tak vyhnout případné chybě při špatné kalibraci nástroje.

V případě, že je vše nastaveno, tak je možné se přesunout dále k automatickému snímání kalibračního vzoru.

5.1.2 Automatické snímání kalibračního vzoru

Automatické snímání kalibračního vzoru představuje klíčovou fází celého procesu kalibrace, během které jsou shromážděna data nezbytná pro výpočet *hand-eye* transformace. Tato fáze zahrnuje systematické generování kalibračních pozic, následný sběr obrazových dat a polohových informací robota pro každou pozici a jejich ukládání.

Generování kalibračních pozic

Pro dosažení přesné *hand-eye* kalibrace je zásadní kvalitní a dobře distribuovaná sada kalibračních pozic. Implementovaný algoritmus generuje tyto pozice systematicky s cílem zajistit optimální pokrytí zorného pole a různorodost pohledů na kalibrační vzor.

Algoritmus pro generování kalibračních pozic pracuje s následujícími vstupními parametry:

- **Odhad vzdálenosti kamery od kalibračního vzoru** - vzdálenost, kterou je třeba zachovat mezi kamerou a vzorem pro zajištění optimálního zaostření.
- **Odhad směru osy kamery (kalibračního vzoru)** - směrový vektor určující orientaci kamery vůči kalibračnímu vzoru (např. $[0,0,1]$ pro osu Z).
- **Parametry pro generování bodů na kružnici** - poloměr kružnice a počet bodů.
- **Parametry kalibračního vzoru** - reálné rozměry vzoru a jeho velikost v pixelech na snímku. Přibližná velikost v pixelech získaná díky pomocnému obdélníku v obraze pro počáteční zarovnání.
- **Parametry obrazu** - rozlišení kamery (velikost obrazu) a aktuální pozice kalibračního vzoru v obraze.

Algoritmus začíná počáteční pozicí, která odpovídá základnímu zarovnání kamery s kalibračním vzorem při inicializaci. Dále generuje pozice ve dvou kategoriích:

1. Pozice v rovině

Pro zajištění základního pokrytí obrazového pole jsou generovány pozice, které zachovávají stejnou vzdálenost od vzoru, ale mění jeho umístění v obraze. Algoritmus systematicky vytváří 8 pozic kolem středové pozice: levý horní roh, pravý horní roh, levý dolní roh, pravý dolní roh, střed horní strany, střed dolní strany, střed levé strany, střed pravé strany.

Tyto pozice jsou vypočítány na základě rozměrů kalibračního vzoru, jeho aktuální pozice v obraze a rozlišení kamery. Algoritmus automaticky určuje maximální možný posun v obraze tak, aby byl kalibrační vzor stále plně viditelný. Výpočet je založen na poměru vypočítaném z reálné velikosti vzoru a jeho rozměrů v pixelech a maximálním možným posunu v pixelech tak, aby vzor zůstal v zorném poli.

2. Pozice na kružnici

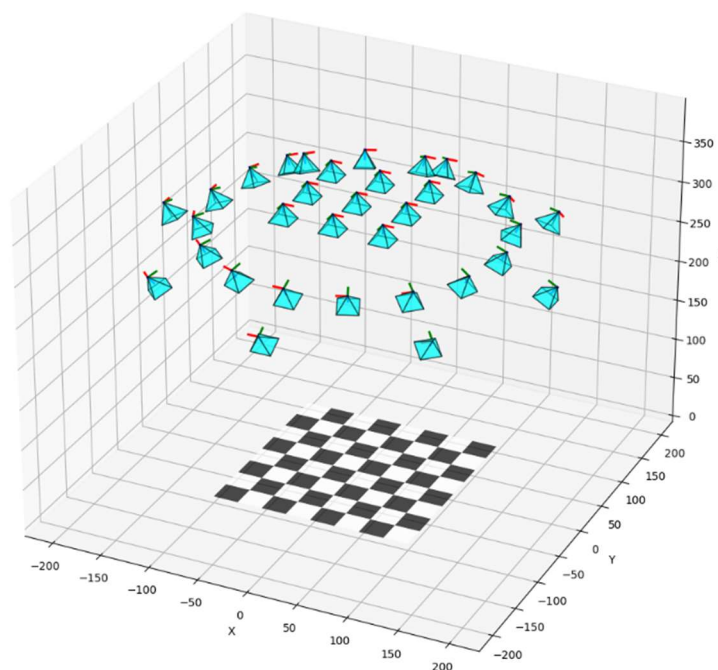
Pro zajištění prostorové různorodosti kalibračních dat algoritmus generuje pozice na kružnici se středem nad kalibračním vzorem. Tyto pozice umožňují zachytit vzor z různých pohledových úhlů.

Při generování bodů na kružnici algoritmus:

- vytvoří body rovnoměrně rozložené na kružnici s daným poloměrem,
- transformuje tyto body do roviny kolmé k ose kamery,
- pro každý bod vypočítá směrový vektor, který směřuje od bodu k vrcholu pomyslného kužele, kterým je dle konfigurace vzor nebo kamera.

Tyto pozice zajišťují, že kalibrační vzor je snímán z různých úhlů, zatímco kamera udržuje konstantní vzdálenost od cílového objektu pro udržení optimálního zaostření.

Implementovaný algoritmus generuje pozice pro obě konfigurační varianty, přičemž v případě *eye-in-hand* konfigurace pozice definují, kam se má robot pohybovat s kamerou vzhledem ke statickému kalibračnímu vzoru, zatímco u *eye-to-hand* konfigurace pozice určují, kam se má robot pohybovat s kalibračním vzorem vzhledem ke statické kameře. V obou případech se používá stejná matematická metoda, mění se pouze interpretace výsledných transformačních matic a směrový vektor osy.



Obr. 13: Znázornění vygenerovaných kalibračních pozic pro snímání obrazu

Sběr kalibračních dat

Po vygenerování sekvence kalibračních pozic následuje systematický sběr dat, který zahrnuje pohyb robota do každé pozice a zaznamenání příslušných dat. Následující postup sběru dat, probíhá stále dokola, dokud nejsou navštíveny všechny vygenerované pozice.

1. Pohyb robota do dané pozice a stabilizace (časová prodleva pro úplné zastavení).
2. Zaznamenání pozice robota.
3. Pořízení snímku.

Ukládání kalibračních dat

V průběhu sběru dat jsou ukládány následující informace:

- Snímky z kamery – ukládání ve standardním formátu PNG s bezztrátovou kompresí pro zachování detailů důležitých pro přesnou detekci kalibračního vzoru.
- Pozice TCP robota.
- Natočení jednotlivých kloubů robota.

Z jednotlivých natočení kloubů je dále spočítána poloha koncového bodu robota (ne TCP) pomocí kinematického modelu robota. Všechny polohy robota (TCP i koncový bod) jsou uloženy ve formě transformačních matic 4x4 v binárním formátu .npz pomocí NumPy.

Výsledná kompletní datová sada je tvořena následujícími daty:

- snímky z kamery,
- pozice kalibračního vzoru (doplněna v dalším kroku při zpracování snímků),
- natočení jednotlivých kloubů,
- poloha TCP,
- poloha koncového bodu.

5.1.3 Zpracování snímků

Po úspěšném shromáždění kalibračních dat následuje kritická fáze zpracování pořízených snímků. Tato část kalibračního procesu se zaměřuje na detekci kalibračního vzoru na jednotlivých snímcích a výpočet jeho pozice a orientace vzhledem ke kameře. Přesnost celé kalibrace významně závisí na kvalitě tohoto zpracování.

Jak již bylo zmíněno při počátečním nastavení, v algoritmu je implementována pouze detekce ChArUco vzoru. Jedním z hlavních důvodů, proč byl vybrán právě tento vzor, je možnost využít již hotového specializovaného detektoru ChArUco vzoru z knihovny OpenCV. Postup při zpracování snímků je následující:

1. **Inicializace detektoru** – detektor je konfigurován podle parametrů reálného kalibračního vzoru, jeho rozměrů, počtu čtverců a použitého slovníku pro ArUco markery. Dále je možnost nastavit různé parametry samotného zpracování obrazu při detekci, jako například adaptivní prahování, minimální vzdálenost od okraje obrazu, maximální počet opravených bitů v markeru a plno dalších parametrů.
2. **Detekce význačných bodů** – pro každý snímek detektor identifikuje 2 typy význačných bodů. Prvním typem jsou rohy šachovnicového vzoru a druhým typem jsou polohy ArUco markerů.
3. **Výběr validních snímků** - po detekci je provedena kontrola, zda bylo nalezeno dostatečné množství rohů a identifikátorů pro pokračování kalibračního procesu. Snímky, na kterých není kalibrační vzor dostatečně detekován, jsou vyřazeny z dalšího zpracování.
4. **Kalibrace kamery** - po výběru validních snímků následuje samotná kalibrace kamery. Nejdůležitějšími vstupními parametry jsou detekované význačné body, jejich poloha v souřadnicovém systému vzoru a velikost obrazu. Kalibrace funguje na principu Zhangovy metody popsané v teoretické části, v OpenCV implementovaná pod názvem

calibrateCameraCharuco. Výstupem jsou vnitřní parametry kamery, což je matice kamery K a koeficienty zkreslení, a dále pro každý snímek také vnější parametry, což je pozice a orientace kalibračního vzoru vzhledem ke kameře. Tyto vnější parametry jsou převedeny na transformační matice a uloženy, aby doplnily kompletní datovou sadu pro tuto kalibraci. V případě, že je již k dispozici zkalibrovaná kamera, tak se tento krok zjednoduší pouze na výpočet vnější parametrů. K tomu se nejčastěji využívá metoda PnP také popsaná v teoretické části.

5.1.4 Výpočet hand-eye kalibrace

Po úspěšném sběru a zpracování kalibračních dat následuje klíčová fáze celého kalibračního procesu - výpočet *hand-eye* kalibrace. Tento výpočet stanovuje prostorový vztah mezi souřadnicovým systémem kamery a souřadnicovým systémem robota, což je nezbytné pro přesnou integraci vizuálních dat do řízení robotického systému.

Výpočet *hand-eye* kalibrace je implementován s využitím knihovny OpenCV, která nabízí několik metod pro řešení této úlohy. Algoritmus pracuje s transformačními maticemi shromážděnými v předchozích fázích kalibračního procesu, konkrétně s maticemi popisujícími pozici robota a pozici kalibračního vzoru vzhledem ke kameře.

Implementovaný algoritmus podporuje oba dva konfigurační režimy, *eye-in-hand* i *eye-to-hand*, přičemž postup výpočtu je pro oba režimy velmi podobný, liší se pouze interpretací vstupních a výstupních transformací.

Pro *eye-in-hand* konfiguraci, kdy je kamera umístěna na efektoru robota, algoritmus pracuje následovně:

1. **Příjem vstupních dat** - algoritmus přijímá seznam transformačních matic robota a seznam transformačních matic objektu. Tyto matice jsou získány v předchozích fázích kalibračního procesu.
2. **Dekompozice transformačních matic** - 4×4 transformační matice jsou rozloženy na rotační komponenty (3×3 matice) a translační komponenty (3×1 vektory), což je formát vyžadovaný kalibračními funkcemi OpenCV. V případě potřeby jsou také vypočteny inverzní transformace.
3. **Výběr kalibrační metody** - algoritmus umožňuje volbu různých kalibračních metod implementovaných v OpenCV. Celkem je implementováno 7 metod a lze je rozdělit do dvou kategorií:
 - **Standardní hand-eye kalibrace** – což jsou metody řešení rovnice $AX = XB$, zde patří Tsai-Lenz, Park a Martin, Horaud a kol., Andreff a kol., Daniilidis a Bayro-Corrochano.
 - **Robot-world/hand-eye kalibrace** – řešení rovnice $AX = ZB$, zde jsou metody Li a kol., Shah.
4. **Aplikace kalibrační metody** – na základě zvolené metody je volána příslušná funkce *calibrateHandEye* nebo *calibrateRobotWorldHandEye*. Zde je důležité přesně vědět, co vyjadřují vstupní transformace a správně dosadit do zvolené funkce.
5. **Sestavení výsledné transformační matice/rotačního vektoru** - z výsledků kalibračního výpočtu (rotační matice a translační vektor) je sestavena homogenní

transformační matice 4×4 nebo rotační vektor, což plně popisuje hledanou *hand-eye* transformaci ze souřadnicového systému kamery do systému robota (vůči koncovému bodu nebo efektoru).

Pro *eye-to-hand* konfiguraci, kdy je kamera umístěna staticky v pracovním prostoru, je postup téměř identický, liší se pouze interpretací vstupních transformací a výsledného řešení. V tomto případě hledáme transformaci mezi bází robota a kamerou, nikoli mezi efektozem a kamerou.

Výpočet *hand-eye* kalibrace představuje poslední krok kalibračního procesu, kdy jsou data shromážděná v předchozích fázích využita k nalezení klíčového prostorového vztahu mezi kamerou a robotem. Dalším krokem už je pouze testování a validace nalezeného řešení.

5.1.5 Výstup kalibračního algoritmu

Výsledkem celého kalibračního procesu je sada parametrů, které komplexně popisují prostorový vztah mezi kamerou a robotem, včetně vnitřních parametrů kamery. Tyto parametry jsou uloženy ve strukturovaném formátu YAML, který zajišťuje snadnou čitelnost a přenositelnost výsledků.

```
X_matrix:
- [0.999838, -0.012696, 0.012790, 0.000554]
- [0.012655, 0.999915, 0.003267, -0.132615]
- [-0.012830, -0.003104, 0.999913, 0.068260]
- [0.000000, 0.000000, 0.000000, 1.000000]
calibration_config: 0
calibration_method: TSAI
camera_matrix:
- [3014.002117, 0.000000, 1249.808585]
- [0.000000, 3013.175681, 1006.202445]
- [0.000000, 0.000000, 1.000000]
dist_coeffs:
- [-0.120426, 0.222168, -0.000618, 0.000161, -0.298426]
position_vector:
- [0.000554, -0.132615, 0.068260, -0.003186, 0.012811, 0.012677]
```

Výstup kalibrace obsahuje následující klíčové komponenty:

- **Matice X** - transformační matice popisující prostorový vztah mezi kamerou a robotem. V případě *eye-in-hand* konfigurace jde o transformaci z kamery do koncového efektoru, u *eye-to-hand* konfigurace o transformaci z kamery do báze robota.
- **Konfigurace** - hodnota indikující konfigurační režim, který byl použit při kalibraci (0 pro *eye-in-hand*, 1 pro *eye-to-hand*).
- **Kalibrační metoda** - název metody, která byla použita pro výpočet *hand-eye* kalibrace.
- **Matice kamery** - matice vnitřních parametrů kamery (*intrinsic matrix*), která zahrnuje ohniskové vzdálenosti a polohu hlavního bodu kamery.
- **Koeficienty zkreslení** - vektor koeficientů zkreslení, který umožňuje kompenzovat radiální a tangenciální zkreslení způsobené optikou kamery.

- **Vektor pozice** - 6-prvkový vektor (ve formátu osa-úhel), který představuje kompaktní reprezentaci transformační matice X .

Popsaný algoritmus automatické kalibrace robotických pracovišť představuje komplexní a systematický přístup k řešení kritického problému *hand-eye* kalibrace. Celý proces postupuje od počátečního nastavení systému přes automatické snímání kalibračního vzoru a zpracování snímků až po finální výpočet transformační matice mezi kamerou a robotem. Hlavní výhodou automatizovaného přístupu oproti manuální kalibraci je výrazné zvýšení opakovatelnosti a spolehlivosti celého procesu. Zatímco manuální kalibrace je náchylná k lidským chybám, časově náročná a často závislá na zkušenostech operátora, automatizovaný algoritmus zajišťuje konzistentní výsledky s minimálními nároky na zásah uživatele. Automatická kalibrace tak představuje klíčový krok k efektivnímu nasazení robotických systémů s vizuální zpětnou vazbou v průmyslovém prostředí.

5.2 Uživatelské rozhraní

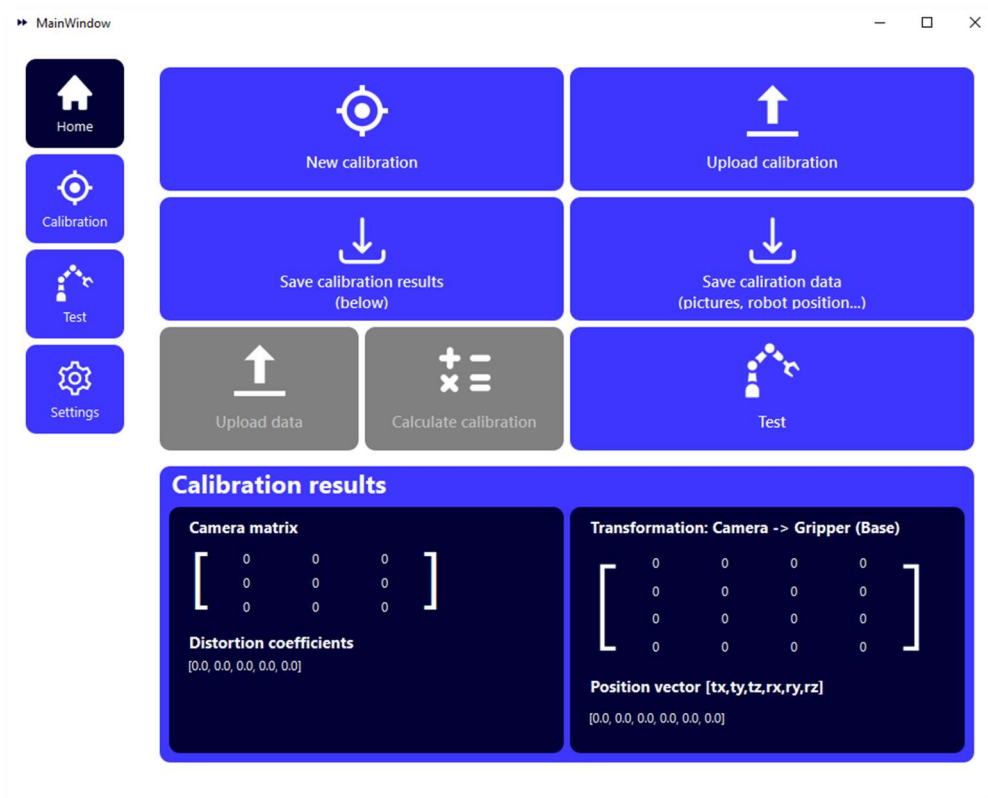
Nedílnou součástí vyvinutého řešení pro automatickou kalibraci robotických pracovišť je přehledné a intuitivní uživatelské rozhraní, které zpřístupňuje všechny funkce kalibračního systému koncovému uživateli. Tato kapitola popisuje návrh, strukturu a implementaci grafického uživatelského rozhraní (GUI), které bylo vytvořeno s důrazem na jednoduchost ovládání, přehlednost a logické uspořádání kalibračního procesu.

Uživatelské rozhraní bylo implementováno v programovacím jazyce Python s využitím knihovny PySide6, což je oficiální vazba (*binding*) Qt frameworku pro jazyk Python. Tato volba umožnila vytvořit moderní, částečně responzivní a platformně nezávislé uživatelské rozhraní, které integruje funkcionality kalibračního systému.

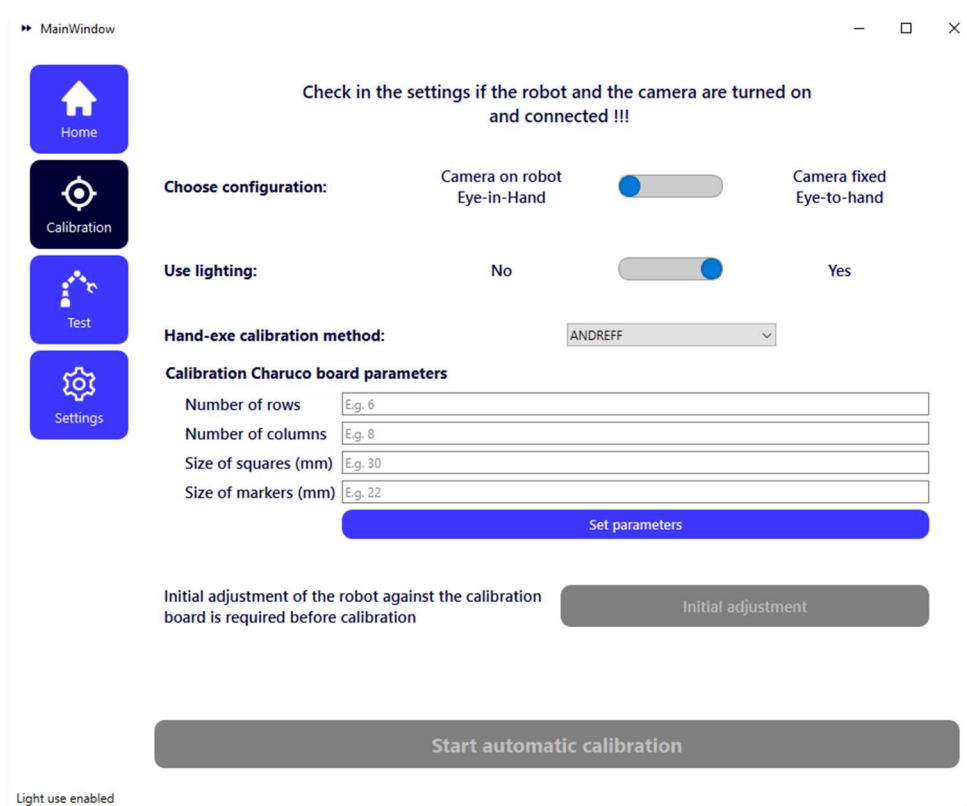
Struktura uživatelského rozhraní

Uživatelské rozhraní je rozděleno do čtyř hlavních sekcí (stránek):

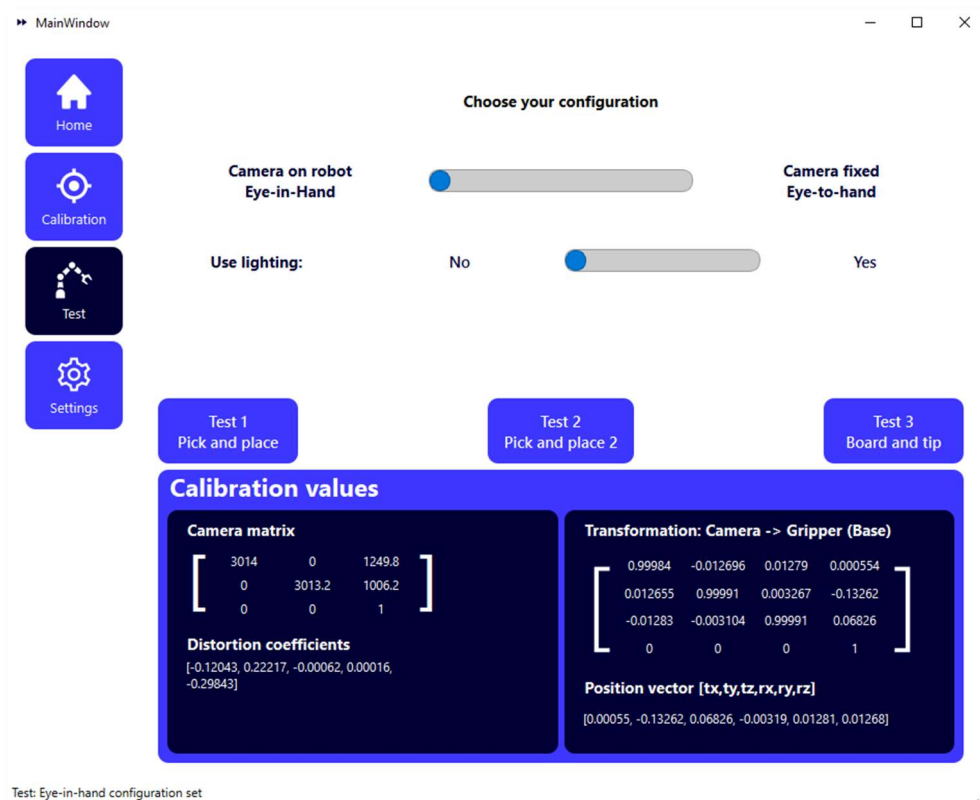
- **Domovská stránka (Home)** - nabízí přístup k základním funkcím aplikace a zobrazuje výsledek kalibrace.
- **Kalibrační stránka (Calibration)** - poskytuje kompletní sadu nástrojů pro nastavení a provedení kalibračního procesu. Je navržena tak, aby uživatele logicky provedla kroky nutnými pro úspěšnou kalibraci. Od výběru konfigurace až po tlačítko pro spuštění automatické kalibrace.
- **Testovací stránka (Test)** - poskytuje nástroje pro ověření funkčnosti kalibrace. Jsou zde například implementované úlohy typu *pick-and-place*, které budou dále popsány v kapitole 5.4 Testování a validace řešení.
- **Nastavení (Settings)** - poskytuje přístup k základním konfiguračním parametrům systému a nástrojům pro ovládání hardwaru. Zde se nastavuje například IP adresa robota, ověření komunikace s robotem, ovládání napájení kamery se světlem a podobně.



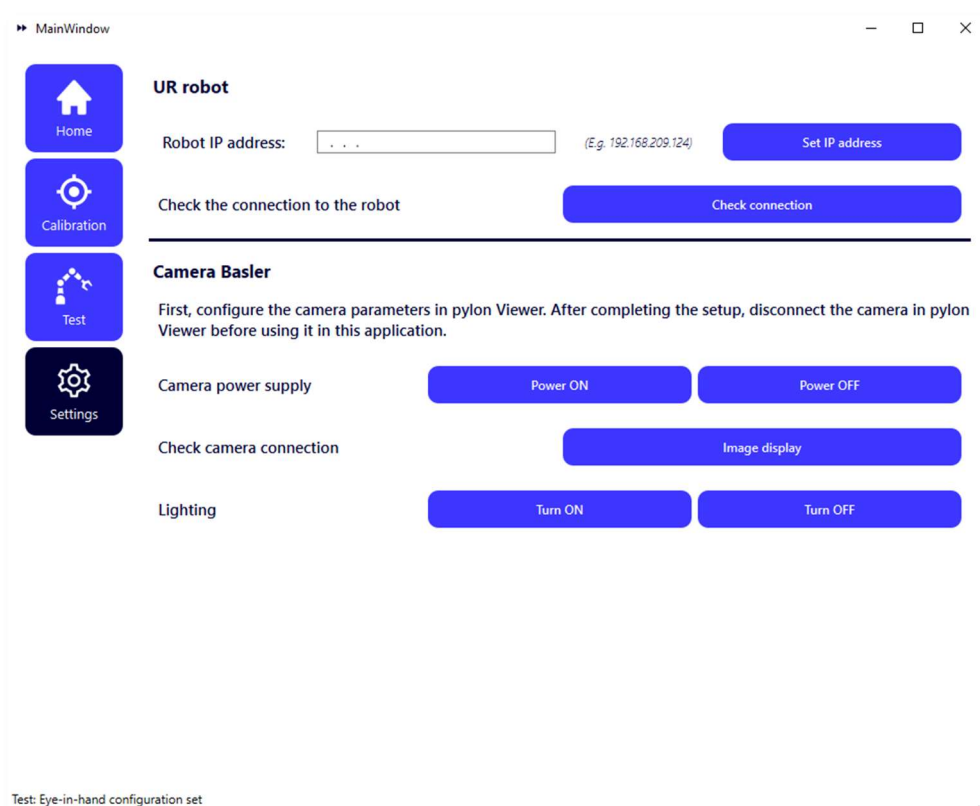
Obr. 14: Úvodní domovská stránka uživatelského rozhraní



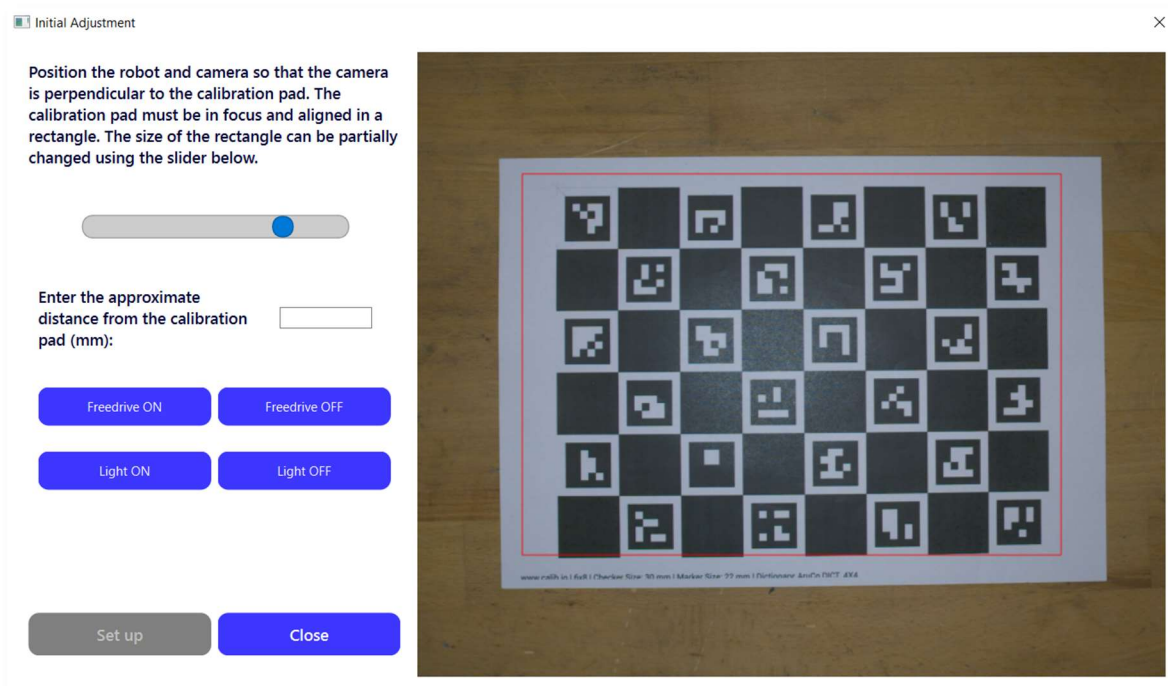
Obr. 15: Kalibrační stránka uživatelského rozhraní



Obr. 16: Testovací stránka (již s hodnotami po kalibraci)



Obr. 17: Stránka nastavení

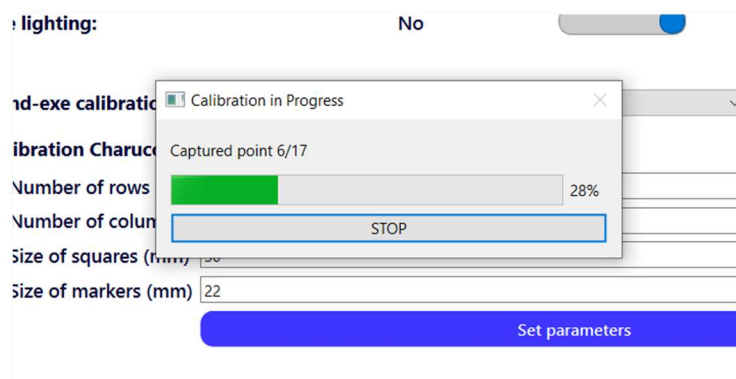


Obr. 18: Průběh kalibrace – počáteční zarovnání

Funkce a vlastnosti aplikace

Pro usnadnění orientace uživatele v procesu kalibrace jsou implementovány validační mechanismy, které zajišťují, že všechna potřebná nastavení jsou zadána před umožněním zahájení kalibrace. To minimalizuje riziko selhání kalibrace kvůli chybějícím nebo neplatným parametrům.

Aplikace zajišťuje komplexní komunikaci s uživatelem prostřednictvím několika systémů zpětné vazby, včetně stavové lišty s textovými oznámeními, dialogových oken pro důležitá sdělení, vizuálních indikátorů dostupnosti funkcí a průběhových dialogů pro sledování dlouhých operací. Veškeré činnosti jsou zaznamenávány do logu pro diagnostické účely. Uživatelské rozhraní také nabízí správu kalibračních dat umožňující export a import výsledků ve formátu YAML i kompletních datových sad.



Obr. 19: Indikátor průběhu kalibrace

5.3 Experimentální robotické pracoviště

Praktická část diplomové práce byla realizována na experimentálním robotickém pracovišti ve společnosti INTEMAC. Tato společnost, která funguje jako výzkumné a vývojové centrum v Jihomoravském kraji, poskytla nezbytné technické vybavení a zázemí pro implementaci a validaci navrhovaného řešení. Diplomová práce byla provedena v rámci interního projektu Visual Inspection Cell 4.0, což je robotické pracoviště pro manipulaci a vizuální kontrolu výrobků. Následující kapitola popisuje detailní specifikaci jednotlivých komponent pracoviště, jejich konfiguraci a vzájemné propojení.



Obr. 20: Robotické pracoviště v konfiguraci *eye-in-hand* (vpravo) a *eye-to-hand* (vlevo)

5.3.1 Kolaborativní robot UR10e

Klíčovou komponentou experimentálního pracoviště je kolaborativní robot Universal Robots UR10e. Tento robot byl zvolen pro implementaci díky své flexibilitě, snadnému programování a široké podpoře komunikačních protokolů.

Řízení robota

Pro komunikaci s robotem byla primárně využita knihovna `ur_rtde` [85] využívající *Real-Time Data Exchange*. Tato knihovna umožňuje přímé řízení robota v reálném čase prostřednictvím ethernetového připojení a poskytuje komplexní API pro kontrolu pohybu, čtení stavových informací nebo ovládání digitálních vstupů a výstupů robota.

Vedle hlavní implementace pomocí `ur_rtde` byla v rámci spolupráce na stejném robotickém pracovišti testována i alternativní metoda řízení. Tato varianta byla vyvinuta kolegou Filipem Rusnákem v rámci jeho diplomové práce "Návrh funkčního bloku pro pokročilé řízení kolaborativních robotů Universal Robots s využitím Siemens TIA Portal".

Koncový efektor

Jako koncový efektor byly na robotu UR10e využívány dva různé nástroje podle potřeb konkrétní operace. Prvním z nich byl elektrický úchopný modul Robotiq 2F-85, adaptivní

dvouprstý gripper, který byl používán při manipulaci s kalibračním vzorem nebo v rámci testování. Druhým nástrojem byl kalibrační hrot s přesně definovaným špičatým zakončením, který sloužil pro měření referenčních bodů. Volba mezi těmito dvěma koncovými efekty závisela na aktuálně prováděné úloze - gripper byl využíván při manipulačních operacích, zatímco kalibrační hrot při přesném určování pozice a orientace v prostoru.

Kalibrační parametry robota - experiment

V rámci této diplomové práce byl proveden experiment zaměřený na ověření kalibračních parametrů robota. Cílem bylo zjistit, zda se skutečné geometrické parametry kinematického modelu robota shodují s hodnotami uloženými v konfiguračních souborech.

Postup byl následující: robot byl naveden do několika různých poloh s různými kombinacemi natočení jednotlivých kloubů. V každé pozici byly zaznamenány hodnoty kloubových úhlů a odpovídající poloha koncového efektoru (TCP). Na základě těchto úhlů byla poté pomocí známé DH tabulky dopočítána očekávaná poloha TCP.

Při porovnání vypočtené a skutečně naměřené polohy se ukázalo, že výsledky nejsou zcela shodné, což naznačuje přítomnost kalibračních odchylek. Tyto odchylky od ideálních výrobních parametrů jsou u robotů značky UR popsány tzv. kalibračními parametry, které upravují standardní DH model pro konkrétní kus robota.

Pomocí metody nejmenších čtverců byly tyto parametry odhadnuty tak, aby co nejlépe odpovídaly naměřeným hodnotám. Jak ukazuje tabulka č. 3, výsledné parametry jsou téměř totožné s uloženými hodnotami od výrobce, což potvrzuje úspěšnost provedeného experimentu.

Tab. 3: Porovnání kalibračních parametrů z experimentu vůči uloženým hodnotám v robotu.

Kalibrační parametry		$\Delta \theta [rad]$	$\Delta a [m]$	$\Delta d [m]$	$\Delta \alpha [rad]$
Experiment	K. 1	-3.755525e-08	1.603927e-05	-0.000252	-0.000458
	K. 2	0.999152	0.281339	323.491217	0.001592
	K. 3	-1.200763	0.011924	-344.390322	0.005473
	K. 4	0.201611	6.236643e-06	20.898998	-0.000908
	K. 5	9.311251e-07	-2.514754e-05	-6.346520e-05	0.000931
	K. 6	9.140679e-08	1.608081e-12	-0.001037	-3.612687e-13
Robot	K. 1	-3.755843e-08	1.603928e-05	-0.000252	-0.000458
	K. 2	0.999152	0.281339	323.491217	0.001592
	K. 3	-1.200763	0.011923	-344.390322	0.005473
	K. 4	0.201611	6.236643e-06	20.898998	-0.000908
	K. 5	9.311243e-07	-2.514754e-05	-6.346520e-05	0.000931
	K. 6	9.140683e-08	0	-0.001037	0

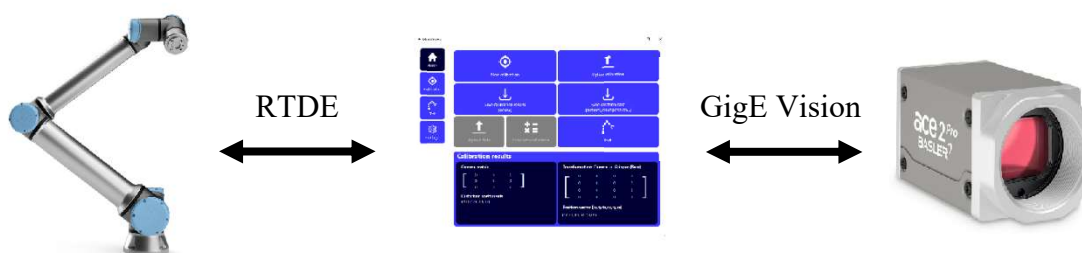
5.3.2 Kamerový systém

Pro účely vizuální kalibrace byl použit průmyslový kamerový systém skládající se z několika následujících komponent:

Kamera Basler ace 2 R a2A2448-23gcPRO

Pro vizuální část kalibračního systému byla použita průmyslová kamera Basler ace 2 R a2A2448-23gcPRO s CMOS senzorem Sony IMX547 o rozlišení 2448×2048 pixelů (5,0 MPx) a velikostí pixelu $2,74 \times 2,74 \mu\text{m}$. Kamera využívá rozhraní GigE Vision pro přenos dat pomocí ethernetového připojení do počítače. Napájení kamery je zajištěno díky digitálnímu výstupu z řídicí skříně robota. K počátečnímu nastavení a konfiguraci kamery byl využit software *Pylon Viewer*, který poskytuje uživatelsky přívětivé rozhraní pro ladění parametrů jako expoziční čas nebo vyvážení bílé. Pro integraci kamery do kalibračního systému byla použita knihovna *pypylon*, což je Python wrapper pro *Basler pylon SDK*, který umožňuje plnou programovou kontrolu nad kamerou včetně získávání snímků a úpravy parametrů za běhu aplikace.

Porovnání změřené kamerové matice K s teoreticky předpokládanými hodnotami ukazuje dobrou shodu mezi experimentálními výsledky a výrobními parametry. Naměřená ohnisková vzdálenost (3014,00 px a 3013,18 px) je jen mírně vyšší než teoreticky vypočtená hodnota (2920 px), což představuje odchylku přibližně 3 %. Tato drobná odlišnost je zcela v rámci očekávané tolerance, neboť teoretická hodnota nezohledňuje drobné odchylky výrobního procesu objektivu a jeho přesné umístění vůči senzoru. Podobně pozice hlavního bodu [1249,81; 1006,20] odpovídá s vysokou přesností očekávaným hodnotám [1224; 1024], s maximální odchylkou pouze 26 pixelů, což při rozlišení senzoru 2448×2048 pixelů představuje velmi malou procentuální odchylku (přibližně 1 %). Tyto mírné variace jsou běžným jevem při kalibraci kamerových systémů.



Obr. 21: Schéma komunikace v rámci pracoviště [86, 87]

Objektiv

Pro tento projekt byl využit jednoduchý objektiv s ohniskovou vzdáleností 8 mm. Tento objektiv byl zvolen jako kompromis mezi širokým zorným polem a minimálním geometrickým zkreslením, které by mohlo negativně ovlivnit přesnost kalibrace.

Osvětlení

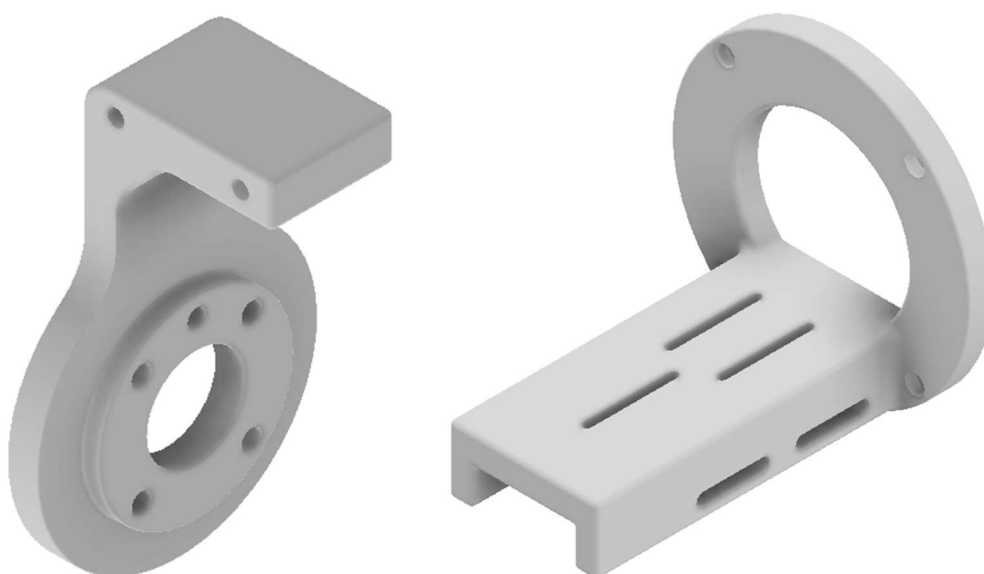
Pro zajištění konzistentních světelných podmínek během kalibrace bylo použito kruhové LED osvětlení. Toto osvětlení bylo připevněno kolem objektivu kamery a poskytovalo rovnoměrné

rozptýlené světlo, které minimalizovalo vznik odlesků a stínů na kalibračním vzoru. Osvětlení bylo ovládáno přes digitální výstup robota, což umožnilo jeho automatické řízení během kalibračního procesu.

5.3.3 Konstrukční prvky

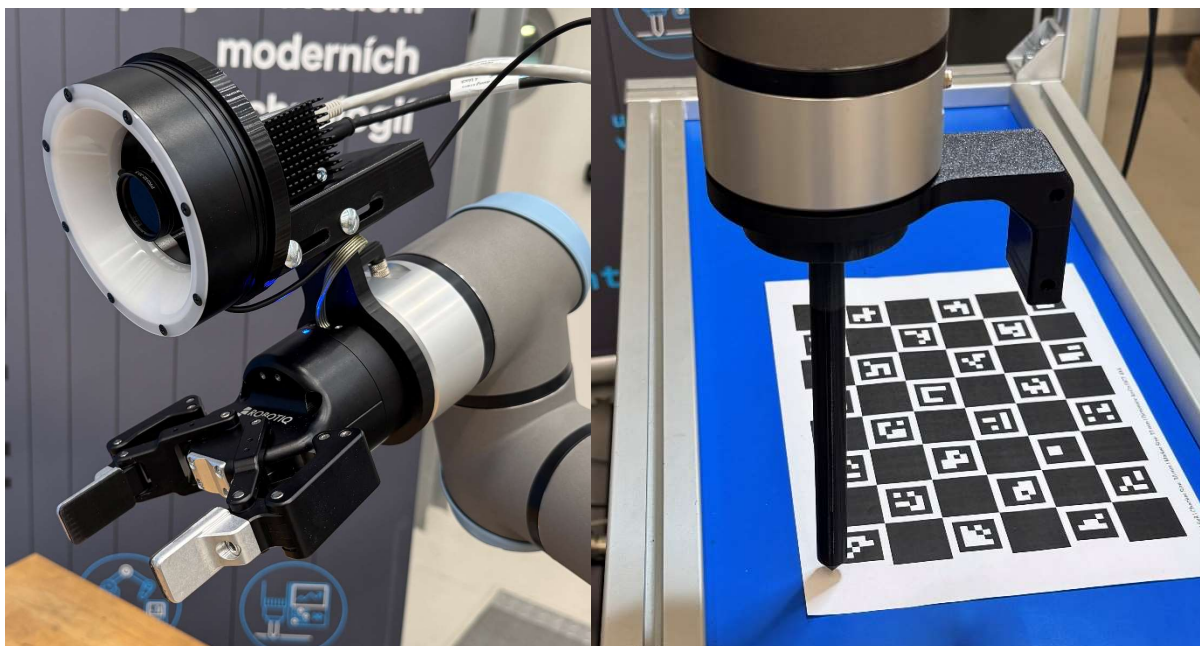
Pro účely experimentů (pro obě konfigurace *eye-in-hand* i *eye-to-hand*) musely být navrženy a vyrobeny speciální držáky pro uchycení kamery, osvětlení, kabelů a díly určené k provádění testů. Díly byly navrženy v softwaru Inventor a následně vytištěny na 3D tiskárně. Mezi vyrobené komponenty patří:

- univerzální díl na spojení kamery s osvětlením,
- držák kamery pro *eye-in-hand* konfiguraci - umožňující připevnění kamery přímo na přírubu robota,
- statický držák na připevnění kamery k hliníkové konstrukci,
- držák pro uchycení kabelů na tělo robota,
- manipulační kostky,
- forma pro ukládání kostek,
- kalibrační hrot.



Obr. 22: Držák kamery pro *eye-in-hand* konfiguraci (vlevo) a univerzální díl na spojení kamery s osvětlením (vpravo)

Popsané experimentální pracoviště poskytlo vhodnou platformu pro implementaci, testování a validaci navrženého systému automatické kalibrace robotických pracovišť pomocí metod strojového vidění. Díky modulárnímu přístupu a flexibilitě jednotlivých komponent bylo možné efektivně experimentovat s různými konfiguracemi a kalibračními metodami.



Obr. 23: Konfigurace s kamerou na robotu (vlevo) a s kalibračním hrotem (vpravo)

5.4 Testování a validace řešení

Praktická implementace systému pro automatickou kalibraci robotických pracovišť s využitím metod strojového vidění vyžaduje důkladné testování pro ověření funkčnosti a spolehlivosti vyvinutého řešení. Tato kapitola popisuje testovací metodiku a jednotlivé testy a metriky navržené pro validaci kalibračního systému v reálných podmínkách.

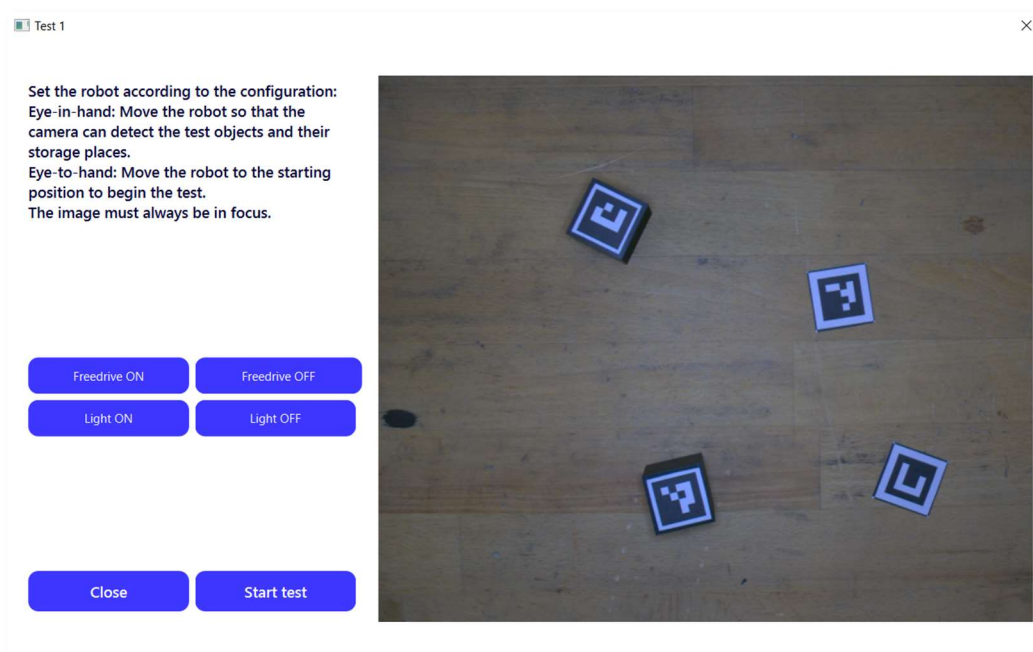


Obr. 24: Fotografie z průběhu kalibrace na pracovišti před testováním

5.4.1 Testování

Testovací metodika byla navržena tak, aby komplexně ověřila funkčnost a přesnost vyvinutého kalibračního řešení. Testování bylo zaměřeno na ověření celého procesu od kalibrace až po využití získaných parametrů v praktických úlohách manipulace s objekty. Pro účely testování byly definovány tři úlohy, které simulují aplikace strojového vidění v robotice. Pracoviště bylo vybaveno potřebnými testovacími objekty, jako jsou kostky s ArUco markery, forma pro umístění kostek a kalibrační ChArUco vzor.

Testování bylo prováděno v obou konfiguracích systému, jak s kamerou upevněnou na robotu (*eye-in-hand*), tak i s kamerou umístěnou staticky v prostoru (*eye-to-hand*), aby byla ověřena funkčnost a přesnost kalibrace v obou těchto případech.



Obr. 25: Inicializace v GUI: Test 1

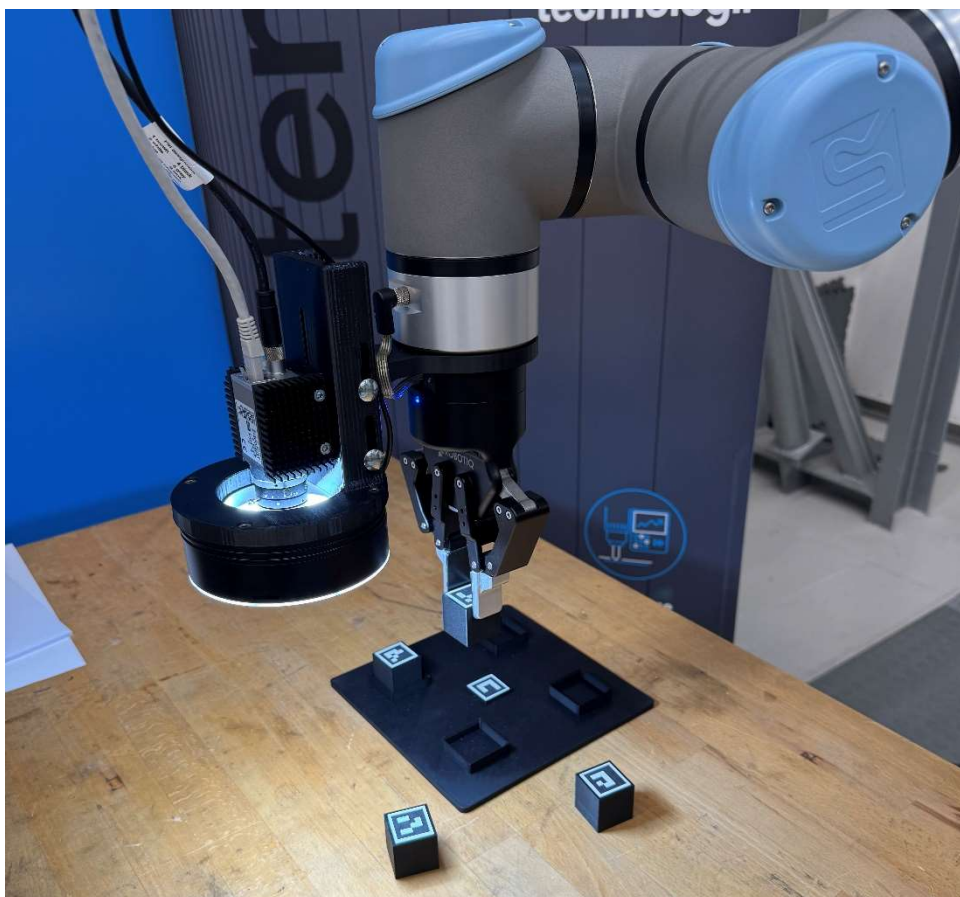
Test 1: Přemístění kostek podle ID markerů

První test byl navržen jako úloha typu pick-and-place, při níž robot identifikuje, uchopuje a přemísťuje kostky s nalepenými ArUco markery na cílové pozice označené jinými, předem přiřazenými ID. V pracovním prostoru se nachází několik kostek (obvykle 3–5), z nichž každá je opatřena unikátním ArUco markerem. Na podložce jsou umístěny cílové značky s jinými ID, přičemž existuje známé mapování mezi každou kostkou a její odpovídající cílovou pozicí (například kostka s ID 1 patří na pozici označenou markerem s ID 11). Úkolem robota je detekovat jednotlivé kostky, určit jejich pozici, uchopit je a přesně přemístit na příslušné místo podle této předem definované logiky.

Postup testu:

1. Systém nejprve provede detekci všech ArUco markerů v pracovním prostoru a rozliší, které patří kostkám a které jsou cílové.
2. Pro každou kostku systém identifikuje odpovídající cílovou pozici podle ID markeru.

3. Robot se postupně přesune ke každé kostce, přičemž musí zvolit vhodnou orientaci chapadla pro uchopení.
4. Po uchopení kostky, robot kostku přemístí na odpovídající cílovou pozici a umístí ji na marker.
5. Celý proces se opakuje pro všechny dostupné kostky.



Obr. 26: Test 2: Manipulace s kostkami na formě

Test 2: Manipulace s kostkami na formě

Druhý test byl navržen jako simulace průmyslového scénáře, v němž robot manipuluje s objekty v rámci pracovního stanoviště – konkrétně formy – jejíž poloha v pracovním prostoru se může měnit. Forma je opatřena jedním ArUco markerem, který slouží k definování jejího lokálního souřadnicového systému. V rámci této formy jsou předem určeny čtyři pozice pro umístění kostek, přičemž jejich souřadnice jsou definovány jako relativní transformace vůči markeru formy. V okolí formy jsou volně rozmístěny kostky, každá označená vlastním ArUco markerem. Úkolem robota je rozpoznat aktuální polohu formy, vypočítat cílové pozice jednotlivých otvorů na základě relativních transformací a následně přesně přemístit kostky do správných pozic v rámci formy.

Postup testu:

1. Systém nejprve detekuje marker na formě a určí její pozici a orientaci v prostoru.
2. Následně systém vypočítá absolutní pozice všech čtyř umísťovacích míst na formě jako relativní transformace vůči hlavnímu markeru.

3. Poté systém detekuje kostky s markery v pracovním prostoru.
4. Robot postupně uchopuje jednotlivé kostky a umísťuje je na vypočítané pozice na formě.
5. Proces se opakuje, dokud nejsou všechny pozice na formě obsazeny nebo dokud nejsou využity všechny dostupné kostky.

Prevence kolizí s kamerou při uchopování objektů

V rámci testování bylo nutné řešit problém potenciálních kolizí mezi robotickým ramenem a okolím – zejména kamerou, která byla v konfiguraci *eye-in-hand* umístěna přímo na nástroji robota. V některých případech byla detekovaná pozice a orientace markeru (např. na kostce) nevhodná pro přímé uchopení – například by vedla k takové trajektorii, při níž by robot mohl narazit do stolu nebo by mohlo dojít k přetočení některých kloubů poškození vlastní kamery.

Aby se těmito situacím předešlo, byl navržen algoritmus, který pro každý detekovaný objekt vygeneroval více možných orientací uchopení. Následně byla vybrána ta orientace, která byla nejbližší aktuálnímu stavu robota. Tímto způsobem se minimalizovala potřebná změna orientace TCP a zároveň se snížilo riziko nebezpečného manévru. Tento přístup vedl nejen ke zvýšení bezpečnosti celého systému, ale i ke zrychlení cyklů uchopení, protože robot nebyl nucen provádět zbytečně rozsáhlé rotační pohyby.

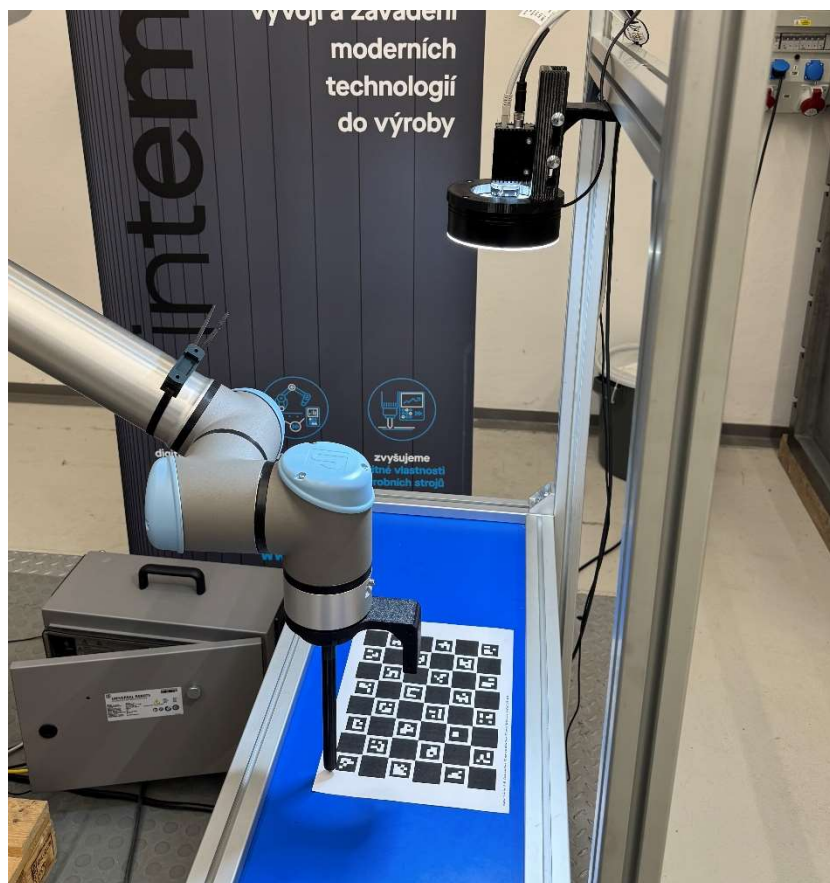
Test 3: Přesné polohování s kalibračním hrotem

Třetí test byl zaměřen na přímé ověření přesnosti celkové kalibrace robotického systému. K efektoru robota byl připevněn kalibrační hrot, který sloužil k přesnému fyzickému dosažení definovaného bodu v prostoru. V pracovní oblasti byl umístěn ChArUco kalibrační vzor, jehož poloha a orientace byla detekována pomocí kamery. Úkolem robota bylo na základě této vizuální detekce přesně navést hrot na levý horní roh vzoru. Tato úloha sloužila jako praktický test celkové přesnosti všech předcházejících kroků – kalibrace kamery, *hand-eye* kalibrace i algoritmu pro určení pozice vzoru v prostoru.

Postup testu:

1. Systém detekuje ChArUco vzor v obraze a identifikuje jeho levý horní roh.
2. Následně systém vypočítá 3D pozici tohoto rohu v souřadnicovém systému kamery.
3. Pomocí *hand-eye* kalibrace je tato pozice transformována do souřadnicového systému robota.
4. Robot se přemístí tak, aby kalibrační hrot směřoval přesně k vypočítané pozici rohu.
5. Přesnost polohování je vizuálně ověřena.

Význam tohoto testu spočívá především v tom, že na rozdíl od předchozích úloh, které ověřují přesnost systému pouze nepřímou (úspěšností manipulace s objekty), zde dochází k přímému měření přesnosti – tedy k vyhodnocení toho, jak přesně robot skutečně dosáhne předem definovaného bodu v prostoru. Výhodou je také použití jednoznačného referenčního bodu – levý horní roh ChArUco vzoru je ostře definovaný a snadno detekovatelný, což umožňuje objektivní a opakovatelné vyhodnocení výsledné polohové chyby. Tento test tak poskytuje cennou zpětnou vazbu o celkové přesnosti kalibrace a navazujících transformačních výpočtů.



Obr. 27: Test 3: Přesné polohování s kalibračním hrotem

Shrnutí výsledků testování

Všechny navržené testy funkčnosti byly úspěšně realizovány na experimentálním robotickém pracovišti a proběhly s přijatelnými nepřesnostmi, které odpovídají očekáváním pro daný typ aplikace. Implementovaný systém automatické kalibrace prokázal schopnost přesného určení transformace mezi kamerou a robotem, což umožnilo spolehlivou manipulaci s objekty v pracovním prostoru. Test přemístění kostek podle ID markerů demonstroval robustnost detekce a přesnost uchopování i při různých orientacích objektů. Test manipulace s kostkami na formě potvrdil schopnost systému pracovat s relativními transformacemi, což je klíčové pro adaptabilní robotické pracoviště. V testu s kalibračním hrotem byla ověřena absolutní přesnost polohování, která splňuje požadavky pro průmyslové aplikace typu *pick-and-place*.

5.4.2 Validace

Po implementaci a otestování systému pro automatickou kalibraci robotických pracovišť bylo nezbytné provést objektivní vyhodnocení dosažené přesnosti a spolehlivosti kalibrace. Za tímto účelem byla navržena ucelená metodika validace, která zahrnuje měření různých typů chyb v jednotlivých krocích kalibračního řetězce. Validace byla provedena pro obě hlavní konfigurační varianty systému – *eye-in-hand* a *eye-to-hand* – a s využitím různých kalibračních metod, aby bylo možné porovnat jejich výkonnost a posoudit jejich vliv na výslednou přesnost systému. Tato kapitola popisuje použitý validační přístup a prezentuje naměřené výsledky včetně analýzy klíčových metrik, které byly definovány v teoretické části práce v kapitole 4.5.2.

Reprojekční chyba kalibrace kamery

Reprojekční chyba představuje základní metriku pro hodnocení přesnosti kalibrace kamery. Měří průměrnou vzdálenost mezi detekovanými body v obraze a jejich zpětnou projekcí pomocí vypočítaných kalibračních parametrů. Tato chyba je měřena v pixelech a nižší hodnota indikuje přesnější kalibraci.

V tabulce níže můžete vidět vypočtenou reprojekční chybu pro různé datové sady. Datové sady se liší v počtu snímků i v konfiguraci. Průměrná chyba se pohybuje pod hodnotou 0,5 pixelu, takže kalibraci kamery lze hodnotit jako úspěšnou.

Tab. 4: Reprojekční chyba.

Datová sada	Sada 1	Sada 2	Sada 3	Sada 4	Průměr
Reprojekční chyba [px]	0.4944	0.4506	0.3159	0.3793	0.4101

Translační a rotační chyba hand-eye kalibrace

Tyto metriky hodnotí přesnost hand-eye transformace jako takové. Translační chyba vyjadřuje odchylku v pozici a je měřena v milimetrech čtverečních (mm^2), zatímco rotační chyba vyjadřuje odchylku v orientaci a je měřena v radiánech čtverečních (rad^2).

Absolutní poziční chyba

Absolutní poziční chyba měří rozdíl mezi požadovanou a skutečnou pozicí koncového efektoru robota při dosahování cílového bodu. Tato metrika byla odpovídá třetímu testu s kalibračním hrotem, kde robot měl za úkol umístit hrot přesně na definovaný bod (levý horní roh ChArUco vzoru). Požadovaná hodnota, neboli přesná pozice kalibračního vzoru byla změřena právě pomocí robota s namontovaným kalibračním hrotem. Tento hrot byl zkalibrován pomocí zmíněné 4-bodové kalibrace TCP. V tabulce č. 5 lze vidět porovnání jednotlivých metod *hand-eye* kalibrace.

Tab. 5: Porovnání metod *hand-eye* kalibrace.

Metoda	Translační chyba [mm^2]	Rotační chyba [rad^2]	Absolutní chyba [mm]
Tsai a Lenz	1.35059	0.00251	0.84899
Park a Martin	1.34999	0.00252	0.85045
Horaud a kol.	1.34966	0.00251	0.84978
Andreff a kol.	4.51648	0.00252	4.38497
Daniilidis	1.34453	0.00252	0.96657
Li a kol.	14.72959	0.00252	7.50279
Shah	2.57402	0.00251	2.50447

Z výsledků porovnání metod *hand-eye* kalibrace je patrné, že metody Tsai a Lenz, Park a Martin, Horaud a kol. a Daniilidis dosahují podobných a nejlepších výsledků s translační chybou okolo 1,35 mm² a absolutní chybou pod 1 mm. Metody Andreff, Li a kol. a Shah vykazují výrazně horší přesnost, přičemž Li a kol. s chybou 14,73 mm² a absolutní chybou 7,50 mm je nejméně přesná. Zajímavé je, že rotační chyba je u všech metod téměř identická (cca 0,00252 rad²), což naznačuje, že hlavní rozdíly mezi metodami jsou v přesnosti translační komponenty. Pro praktické aplikace vyžadující vysokou přesnost jsou tedy nejvhodnější první tři zmíněné metody.

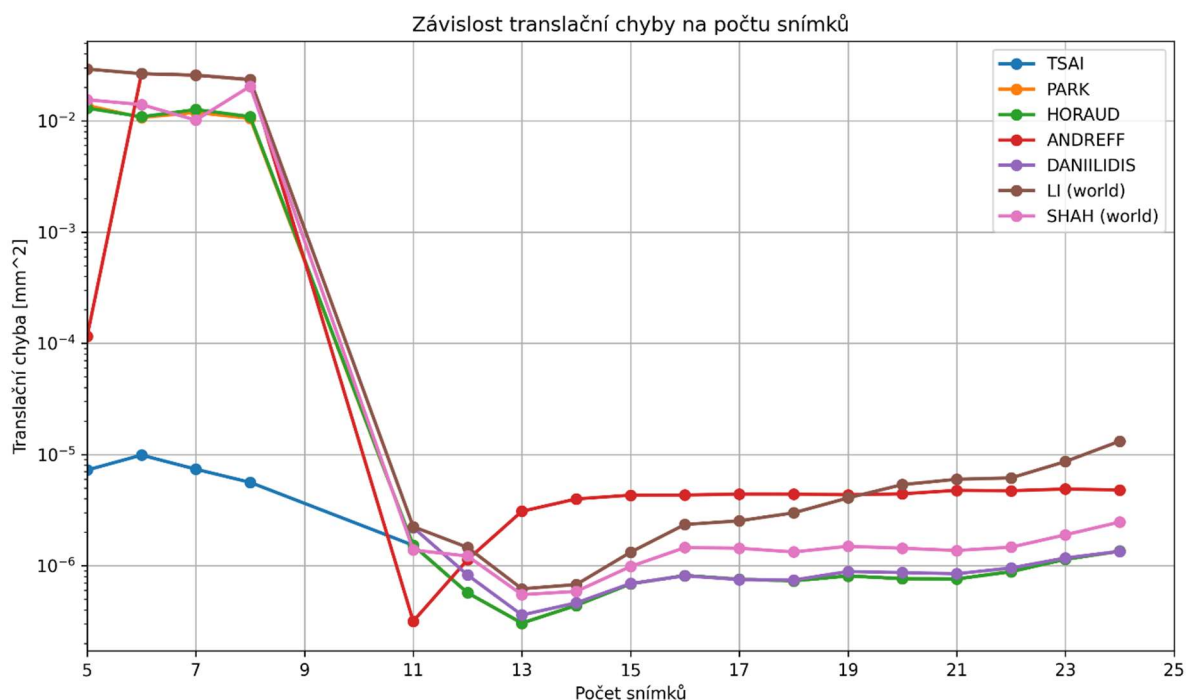
Vlivu počtu kalibračních snímků na přesnost kalibrace

Jedním z klíčových faktorů ovlivňujících přesnost kalibrace je počet použitých kalibračních snímků. Pro analýzu tohoto vlivu byl proveden experiment, ve kterém byla kalibrace počítána opakovaně s postupně se zvyšujícím počtem kalibračních poloh. Výsledky tohoto experimentu jsou zobrazeny na grafech na obrázcích 28, 29 a 30, které ukazují závislost translační, rotační a absolutní chyby na počtu použitých kalibračních snímků.

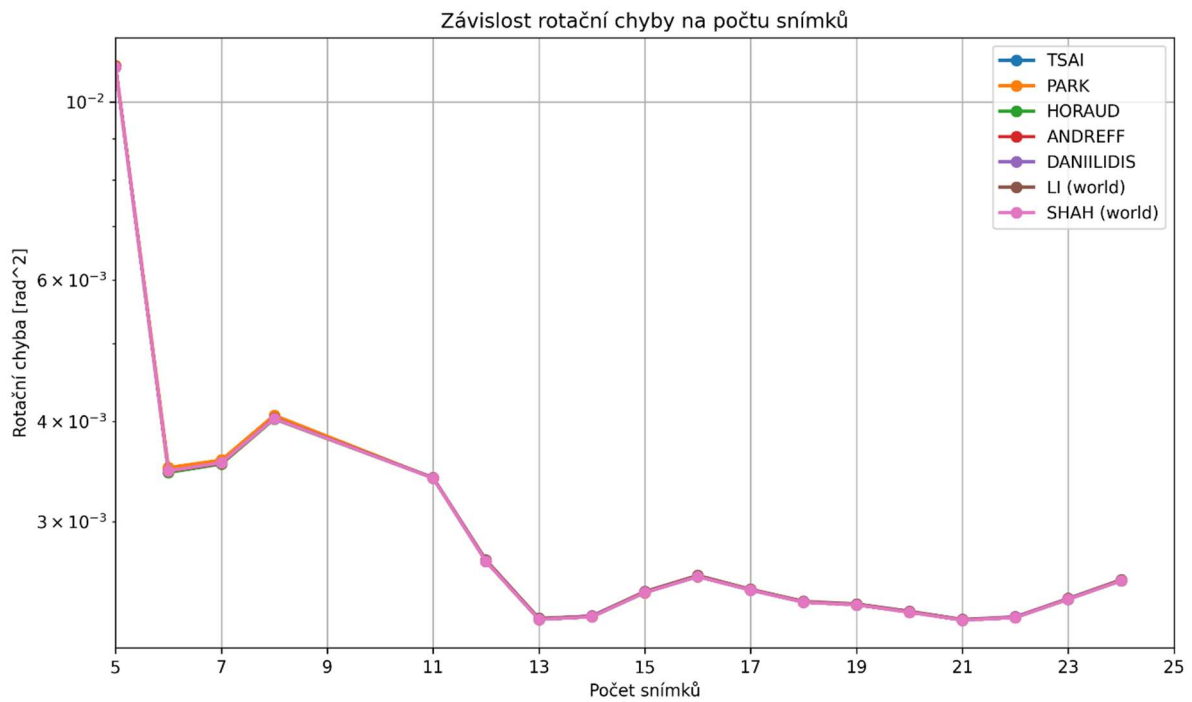
Z grafů je zřejmé, že všechny implementované metody vykazují podobný trend, kdy s rostoucím počtem kalibračních snímků přesnost kalibrace nejprve výrazně roste (chyba klesá), dokud není dosaženo určitého optimálního počtu snímků. Po dosažení tohoto optimálního počtu se již přesnost kalibrace výrazně nezlepšuje.

Na základě provedených experimentů lze konstatovat, že minimální počet kalibračních snímků pro všechny testované metody je přibližně 13.

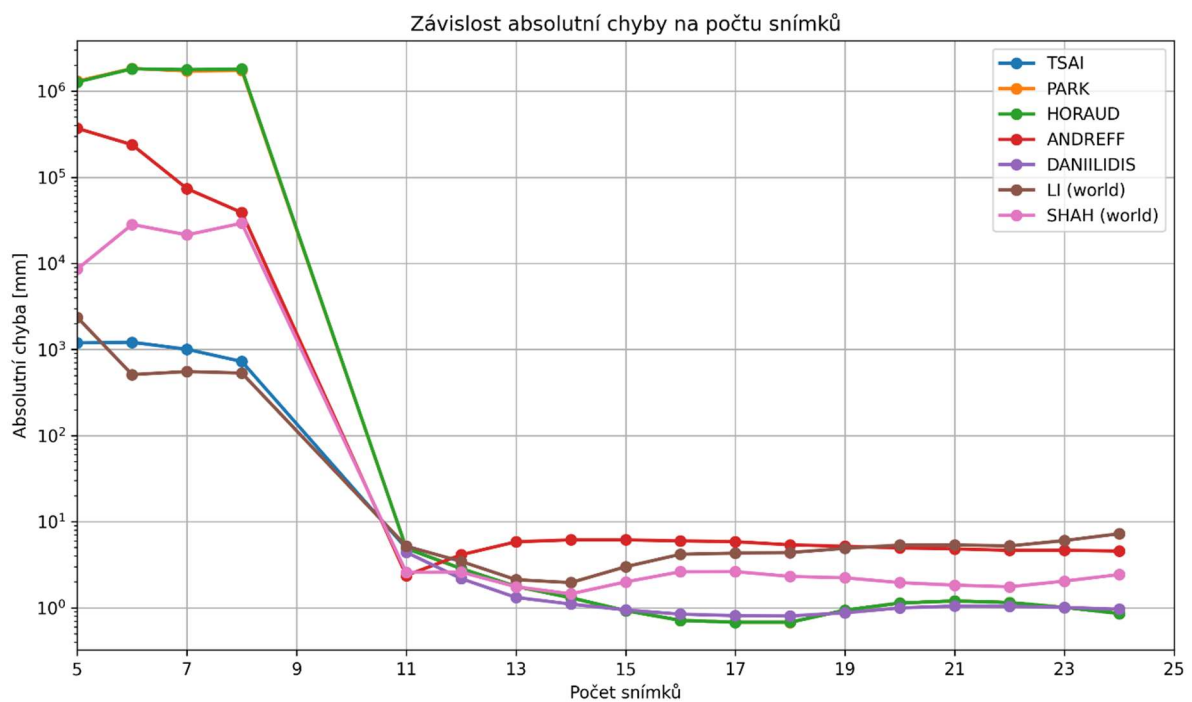
Je důležité poznamenat, že osa Y je v logaritmickém měřítku, což umožňuje lépe vizualizovat rozdíly v hodnotách chyb, které se pohybují v širokém rozsahu.



Obr. 28: Závislost translační chyby na počtu snímků



Obr. 29: Závislost rotační chyby na počtu snímků



Obr. 30: Závislost absolutní chyby na počtu snímků

6 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zaměřila na kritickou problematiku kalibrace robotických pracovišť, která představuje jeden z klíčových aspektů pro dosažení vysoké přesnosti a efektivity v průmyslových automatizovaných procesech. Hlavním přínosem práce bylo navržení, implementace a validace komplexního systému pro automatickou kalibraci robotických pracovišť s využitím metod strojového vidění, a to jak v konfiguraci s kamerou upevněnou na konstrukci robota (*eye-in-hand*), tak i v případech, kdy se kamera nachází mimo robot (*eye-to-hand*).

V teoretické části práce byly podrobně popsány matematické základy prostorových transformací a souřadnicových systémů v průmyslové robotice, principy strojového vidění včetně zpracování obrazu a detekce kalibračních objektů, a v neposlední řadě komplexní popis kalibrace robotických pracovišť s důrazem na *hand-eye* kalibraci. Teoretická část poskytla nezbytný základ pro následnou praktickou implementaci, přičemž značná pozornost byla věnována rozboru různých kalibračních metod, jejich matematickým formulacím a způsobům výpočtu.

Praktická část práce přinesla ucelené softwarové řešení implementované v programovacím jazyce Python, které umožňuje plně automatizovanou kalibraci robotického pracoviště. Navržený algoritmus automatické kalibrace pokrývá celý proces od inicializace systému přes automatické snímání kalibračního vzoru a zpracování snímků až po finální výpočet transformační matice mezi kamerou a robotem. Zásadním přínosem implementovaného řešení je jeho schopnost automaticky generovat kalibrační pohyby a pozice, které zajišťují robustní a přesnou kalibraci bez nutnosti manuálních zásahů ze strany operátora.

Důležitým aspektem práce bylo vytvoření intuitivního grafického uživatelského rozhraní, které zpřístupňuje komplexní kalibrační procesy i pro uživatele bez hlubších znalostí problematiky. Implementované rozhraní poskytuje přehlednou vizualizaci kalibračních dat, průběžné informace o procesu kalibrace a umožňuje snadné nastavení všech potřebných parametrů pro různé konfigurační varianty.

Experimentální ověření a validace vyvinutého systému bylo provedeno na reálném robotickém pracovišti vybaveném kolaborativním robotem UR10e a průmyslovou kamerou Basler. Pro hodnocení přesnosti kalibrace byly navrženy a implementovány tři testovací úlohy: přemístění kostek podle ID markerů, manipulace s kostkami na formě a přesné polohování s kalibračním hrotem. Tyto testy prokázaly funkčnost a praktickou použitelnost vyvinutého řešení v reálných podmínkách.

Podstatným přínosem implementovaného systému je jeho modulární architektura, která umožňuje snadnou adaptaci na různé typy průmyslových či kolaborativních robotů a kamerových systémů při dodržení určitých implementačních zásad. Tato modularita byla potvrzena i během implementace alternativního způsobu řízení robota. Díky tomuto přístupu je vyvinuté řešení potenciálně využitelné v širokém spektru průmyslových aplikací bez ohledu na konkrétní hardwarovou konfiguraci.

Experimentální výsledky ukázaly, že z implementovaných kalibračních metod dosahují nejlepší přesnosti metody Tsai a Lenz, Park a Martin, Horaud a kol. a Daniilidis, které

vykazovaly translační chybu okolo $1,35 \text{ mm}^2$ a absolutní chybu pod 1 mm . Naopak metody Andreff, Li a kol. a Shah se projeví jako výrazně méně přesné, přičemž metoda Li a kol. s chybou $14,73 \text{ mm}^2$ a absolutní chybou $7,50 \text{ mm}$ byla nejméně přesná ze všech testovaných metod. Zajímavým poznatkem bylo, že rotační chyba byla u všech metod téměř identická (přibližně $0,00252 \text{ rad}^2$), což naznačuje, že hlavní rozdíly mezi jednotlivými metodami jsou v přesnosti translační komponenty.

Důležitou částí validace bylo také určení optimálního počtu kalibračních snímků potřebných pro dosažení požadované přesnosti. Přesnost kalibrace se s narůstajícím počtem snímků dále zlepšuje, avšak míra zlepšení postupně klesá a při určitém počtu snímků se již nemusí výrazně projevit. Zásadní však není jen počet snímků, ale také jejich různorodost – jednotlivé snímky musí zachycovat odlišné pohledy na scénu, aby kalibrace byla co nejpresnější.

I přes dosažené úspěchy nabízí práce několik směrů pro další vývoj a rozšíření. Jedním z možných směrů je implementace podpory pro další typy kalibračních vzorů, což by zvýšilo flexibilitu systému v různých průmyslových podmínkách. Dalším potenciálním rozšířením je možnost detailnějšího nastavení parametrů kalibračního procesu, což by umožnilo ještě přesnější adaptaci na specifické požadavky konkrétních aplikací.

V kontextu celého robotického pracoviště, jako je například pracoviště Visual Inspection Cell 4.0, na kterém byla práce realizována, by bylo přínosné zvážit transformaci aplikace do podoby webové služby. Takové řešení by umožnilo snadnější integraci s dalšími komponentami robotické buňky a centrální ovládání z jednotné platformy. Tím by se dále zvýšila uživatelská přívětivost a efektivita celého systému v produkčním prostředí.

Zajímavým směrem dalšího vývoje by mohlo být také rozšíření systému o adaptivní metody kalibrace, které by průběžně optimalizovaly kalibrační parametry na základě zpětné vazby z reálného provozu. To by umožnilo kompenzovat případné driftы v kalibraci způsobené změnami okolních podmínek nebo opotřebením mechanických komponent.

Závěrem lze konstatovat, že vyvinutý systém pro automatickou kalibraci robotických pracovišť představuje komplexní a prakticky použitelné řešení, které významně zjednodušuje a zefektivňuje proces kalibrace oproti tradičním manuálním přístupům. Modulární architektura, intuitivní uživatelské rozhraní a experimentálně ověřená přesnost činí z tohoto systému potenciálně cenný nástroj pro průmyslové aplikace využívající robotické systémy v kombinaci se strojovým viděním.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PANGARKAR, Tajammul. Robot Statistics and Facts (2025). *Market.us Scoop* [online]. 14. leden 2025 [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: <https://scoop.market.us/robot-statistics/>
- [2] ROBOTICS, IFR International Federation of. Record of 4 Million Robots in Factories Worldwide. *IFR International Federation of Robotics* [online]. [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-of-4-million-robots-working-in-factories-worldwide>
- [3] MURRAY, Richard M., Zexiang LI a Shankar SASTRY. *A mathematical introduction to robotic manipulation*. Boca Raton: CRC Press, 1994. ISBN 978-0-8493-7981-9.
- [4] DOMBRE, Etienne a Wisama KHALIL, ed. *Modeling, performance analysis and control of robot manipulators* [online]. London Newport Beach, CA: ISTE, 2007. Control systems, robotics and manufacturing series. ISBN 978-0-470-61228-6. Dostupné z: doi:10.1002/9780470612286
- [5] LYNCH, Kevin M. a Frank C. PARK. *Modern robotics: mechanics, planning, and control*. Cambridge: Cambridge university press, 2017. ISBN 978-1-107-15630-2.
- [6] SPONG, Mark W., Seth HUTCHINSON a M. VIDYASAGAR. *Robot modeling and control*. Second edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2020. ISBN 978-1-119-52399-4.
- [7] CORKE, Peter I. *Robotics, vision and control: fundamental algorithms in Python*. 3rd edition. Cham: Springer, 2023. Springer tracts in advanced robotics, volume 146. ISBN 978-3-031-06468-5.
- [8] SICILIANO, Bruno. *Robotics: Modelling, Planning and Control*. London: Springer London, Limited, 2010. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. ISBN 978-1-84628-641-4.
- [9] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. První vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [10] SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB. *Springer handbook of robotics*. 2nd edition. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2016. ISBN 978-3-319-32550-7.
- [11] DENAVIT, J. a R. S. HARTENBERG. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics* [online]. 1955, **22**(2), 215–221. ISSN 0021-8936, 1528-9036. Dostupné z: doi:10.1115/1.4011045
- [12] DIEBEL, James. Representing Attitude: Euler Angles, Unit Quaternions, and Rotation Vectors. *ResearchGate* [online]. nedatováno [vid. 2025-04-27]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/215458871_Representing_Attitude_Euler_Angles_Unit_Quaternions_and_Rotation_Vectors

- [13] EVANS, Philip R. Rotations and rotation matrices. *Acta Crystallographica Section D Biological Crystallography* [online]. 2001, **57**(10), 1355–1359. ISSN 0907-4449. Dostupné z: doi:10.1107/S0907444901012410
- [14] PARÁK, Roman. *Design of Advanced Methods in the Field of Industrial Robotics fitting into the Concept of Industry 4.0*. [online]. Brno, 2024 [vid. 2025-04-30]. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/249653>
- [15] *Universal Robots - DH Parameters for calculations of kinematics and dynamics* [online]. [vid. 2025-05-14]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/articles/ur/application-installation/dh-parameters-for-calculations-of-kinematics-and-dynamics/>
- [16] REYNA, Mark, Guadalupe DELGADO, Aditya AKUNDI, Sergio LUNA a Erik CHUMACERO. Product Digital Quality Inspection using Machine Vision Systems – A Categorical Review. In: *2022 17th Annual System of Systems Engineering Conference (SOSE): 2022 17th Annual System of Systems Engineering Conference (SOSE)* [online]. Rochester, NY, USA: IEEE, 2022, s. 37–42 [vid. 2025-05-18]. ISBN 978-1-66549-623-0. Dostupné z: doi:10.1109/SOSE55472.2022.9812687
- [17] KLINIEAM, Kanokwan a Panee NOIYING. A Machine Vision Approach for Copper Plating Quality Control System Development. In: *2021 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovation Electricals and Electronics (RI2C): 2021 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovation Electricals and Electronics (RI2C)* [online]. Bangkok, Thailand: IEEE, 2021, s. 317–320 [vid. 2025-05-18]. ISBN 978-1-66540-300-9. Dostupné z: doi:10.1109/RI2C51727.2021.9559816
- [18] SZELISKI, R. *Computer Vision: Algorithms and Applications* [online]. B.m.: Springer London, 2010. Texts in Computer Science. ISBN 978-1-84882-935-0. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=bXzAlkODwa8C>
- [19] HORNBERG, Alexander, ed. *Handbook of Machine and Computer Vision: The Guide for Developers and Users*. 2. überarb. u. aktualis. Auflage. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. ISBN 978-3-527-41343-0.
- [20] ŠONKA, Milan, Václav HLAVÁČ a Roger BOYLE. *Image processing, analysis, and machine vision*. 4. ed. Stamford, Conn.: Cengage Learning, 2015. ISBN 978-1-133-59360-7.
- [21] PETROU, Maria a Costas PETROU. *Image processing: the fundamentals*. 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2010. ISBN 978-0-470-74586-1.
- [22] BRADSKI, Gary R. a Adrian KAEHLER. *Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library*. 1. ed., [Nachdr.]. Beijing: O'Reilly, 2011. Software that sees. ISBN 978-0-596-51613-0.
- [23] SNYDER, Wesley E. a Hairong QI. *Machine vision*. Cambridge: Cambridge university press, 2010. ISBN 978-0-521-16981-3.
- [24] STEGER, Carsten, Markus ULRICH a Christian WIEDEMANN, ed. *Machine vision algorithms and applications*. Second completely revised and enlarged edition. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, 2018. ISBN 978-3-527-81290-5.

- [25] BATCHELOR, Bruce G. *Machine vision handbook*. London New York: Springer, 2012. Springer reference. ISBN 978-1-84996-169-1.
- [26] OpenCV - Open Computer Vision Library. *OpenCV* [online]. [vid. 2025-04-26]. Dostupné z: <https://opencv.org/>
- [27] Computer Science Department. *College of Computing & Informatics* [online]. 26. březen 2025 [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: <https://drexel.edu/cc/academics/computer-science-department/>
- [28] LIU, Guanghui, Chunlin ZHANG, Qing GUO a Fangyi WAN. Automatic Color Recognition Technology of UAV Based on Machine Vision. In: *2019 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC): 2019 International Conference on Sensing, Diagnostics, Prognostics, and Control (SDPC)* [online]. Beijing, China: IEEE, 2019, s. 220–225 [vid. 2025-05-18]. ISBN 978-1-72810-199-6. Dostupné z: doi:10.1109/SDPC.2019.00047
- [29] FITRIANA, A. N., K. MUTIJARSA a W. ADIPRAWITA. Color-based segmentation and feature detection for ball and goal post on mobile soccer robot game field. In: *2016 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI): 2016 International Conference on Information Technology Systems and Innovation (ICITSI)* [online]. Bandung - Bali, Indonesia: IEEE, 2016, s. 1–4 [vid. 2025-05-18]. ISBN 978-1-5090-2449-0. Dostupné z: doi:10.1109/ICITSI.2016.7858232
- [30] ZHANG, Wenbin, Chengliang ZHANG, Chengbin LI a He ZHANG. Object color recognition and sorting robot based on OpenCV and machine vision. In: *2020 IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT): 2020 IEEE 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies (ICMIMT)* [online]. Cape town, South Africa: IEEE, 2020, s. 125–129 [vid. 2025-05-18]. ISBN 978-1-72815-332-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICMIMT49010.2020.9041220
- [31] PERUMAL, P., B. MATHIVANAN a K. DEEPA. Color based Product Sorting Machine using Raspberry Pi. In: *2024 5th International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC): 2024 5th International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)* [online]. Trichy, India: IEEE, 2024, s. 1896–1900 [vid. 2025-05-18]. ISBN 9798331504403. Dostupné z: doi:10.1109/ICOSEC61587.2024.10722515
- [32] SOBEL, Irwin a Gary FELDMAN. A 3×3 isotropic gradient operator for image processing. *Pattern Classification and Scene Analysis*. 1973, 271–272.
- [33] PREWITT, Judith MS a OTHERS. Object enhancement and extraction. *Picture processing and Psychopictorics*. 1970, **10**(1), 15–19.
- [34] Theory of edge detection. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* [online]. 1980, **207**(1167), 187–217. ISSN 0080-4649, 2053-9193. Dostupné z: doi:10.1098/rspb.1980.0020
- [35] CANNY, John. A Computational Approach to Edge Detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 1986, **PAMI-8**(6), 679–698. ISSN 0162-8828. Dostupné z: doi:10.1109/TPAMI.1986.4767851

- [36] HARRIS, C. a M. STEPHENS. A Combined Corner and Edge Detector. In: *Alvey Vision Conference 1988: Proceedings of the Alvey Vision Conference 1988* [online]. Manchester: Alvey Vision Club, 1988, s. 23.1-23.6 [vid. 2025-05-18]. Dostupné z: doi:10.5244/C.2.23
- [37] JIANBO SHI a TOMASI. Good features to track. In: *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition CVPR-94* [online]. Seattle, WA, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1994, s. 593–600 [vid. 2025-05-18]. ISBN 978-0-8186-5825-9. Dostupné z: doi:10.1109/CVPR.1994.323794
- [38] ROSTEN, Edward a Tom DRUMMOND. Machine Learning for High-Speed Corner Detection. In: Aleš LEONARDIS, Horst BISCHOF a Axel PINZ, ed. *Computer Vision – ECCV 2006* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006 [vid. 2025-05-18], Lecture Notes in Computer Science, s. 430–443. ISBN 978-3-540-33832-1. Dostupné z: doi:10.1007/11744023_34
- [39] RUBLEE, Ethan, Vincent RABAUD, Kurt KONOLIGE a Gary BRADSKI. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF. In: *2011 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV): 2011 International Conference on Computer Vision* [online]. Barcelona, Spain: IEEE, 2011, s. 2564–2571 [vid. 2025-05-18]. ISBN 978-1-4577-1102-2. Dostupné z: doi:10.1109/ICCV.2011.6126544
- [40] SUZUKI, Satoshi a Keiichi ABE. Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* [online]. 1985, **30**(1), 32–46. ISSN 0734189X. Dostupné z: doi:10.1016/0734-189X(85)90016-7
- [41] RAMACHANDRAN, Prajit, Niki PARMAR, Ashish VASWANI, Irwan BELLO, Anselm LEVSKAYA a Jonathon SHLENS. *Stand-Alone Self-Attention in Vision Models* [online]. B.m.: arXiv. 2019 [vid. 2025-05-19]. Dostupné z: doi:10.48550/ARXIV.1906.05909
- [42] VASWANI, Ashish, Noam SHAZEER, Niki PARMAR, Jakob USZKOREIT, Llion JONES, Aidan N. GOMEZ, Lukasz KAISER a Illia POLOSUKHIN. *Attention Is All You Need* [online]. B.m.: arXiv. 2017 [vid. 2025-05-19]. Dostupné z: doi:10.48550/ARXIV.1706.03762
- [43] HAN, Kai, Yunhe WANG, Hanting CHEN, Xinghao CHEN, Jianyuan GUO, Zhenhua LIU, Yehui TANG, An XIAO, Chunjing XU, Yixing XU, Zhaohui YANG, Yiman ZHANG a Dacheng TAO. A Survey on Vision Transformer. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2023, **45**(1), 87–110. ISSN 0162-8828, 2160-9292, 1939-3539. Dostupné z: doi:10.1109/TPAMI.2022.3152247
- [44] SHAH, Mili. Solving the Robot-World/Hand-Eye Calibration Problem Using the Kronecker Product. *Journal of Mechanisms and Robotics* [online]. 2013, **5**(3) [vid. 2025-05-01]. ISSN 1942-4302, 1942-4310. Dostupné z: doi:10.1115/1.4024473
- [45] MOORING, Benjamin W., Zvi S. ROTH a Morris R. DRIELS. *Fundamentals of manipulator calibration*. New York, NY: Wiley, 1991. A Wiley-Interscience publication. ISBN 978-0-471-50864-9.
- [46] TABB, Amy a Khalil M. AHMAD YOUSEF. Solving the robot-world hand-eye(s) calibration problem with iterative methods. *Machine Vision and Applications* [online].

- 2017, **28**(5–6), 569–590. ISSN 0932-8092, 1432-1769. Dostupné z: doi:10.1007/s00138-017-0841-7
- [47] LI, Ai Guo, Lin WANG a Defeng WU. Simultaneous robot-world and hand-eye calibration using dual-quaternions and Kronecker product. *International Journal of Physical Sciences*. 2010, **5**, 1530–1536.
- [48] DORNAIKA, F. a R. HORAUD. Simultaneous robot-world and hand-eye calibration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* [online]. 1998, **14**(4), 617–622. ISSN 1042-296X. Dostupné z: doi:10.1109/70.704233
- [49] GENG, Pengxiu, Xiaolong JIA, Dongyang BIE a Yanding QIN. Robot-camera and Hand-target Calibration in Eye-to-hand Navigation System. In: *2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO): 2022 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)* [online]. Jinghong, China: IEEE, 2022, s. 656–661 [vid. 2025-05-01]. Dostupné z: doi:10.1109/robio55434.2022.10011875
- [50] PARK, F.C. a B.J. MARTIN. Robot sensor calibration: solving $AX=XB$ on the Euclidean group. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* [online]. 1994, **10**(5), 717–721. ISSN 1042-296X. Dostupné z: doi:10.1109/70.326576
- [51] LIN, Wenwei, Peidong LIANG, Guantai LUO, Ziyang ZHAO a Chentao ZHANG. Research of Online Hand–Eye Calibration Method Based on ChArUco Board. *Sensors* [online]. 2022, **22**(10), 3805. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s22103805
- [52] TABB, Amy a Khalil M. AHMAD YOUSEF. Parameterizations for reducing camera reprojection error for robot-world hand-eye calibration. In: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* [online]. Hamburg: IEEE, 2015, s. 3030–3037 [vid. 2025-05-04]. ISBN 978-1-4799-9994-1. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2015.7353795
- [53] ANDREFF, N., R. HORAUD a B. ESPIAU. On-line hand-eye calibration. In: *Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling: Second International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No.PR00062)* [online]. Ottawa, Ont., Canada: IEEE Comput. Soc, nedatováno, s. 430–436 [vid. 2025-05-01]. Dostupné z: doi:10.1109/im.1999.805374
- [54] ALI, Ihtisham, Olli SUOMINEN, Atanas GOTCHEV a Emilio Ruiz MORALES. Methods for Simultaneous Robot-World-Hand–Eye Calibration: A Comparative Study. *Sensors* [online]. 2019, **19**(12), 2837. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19122837
- [55] DANIILIDIS, Konstantinos. Hand-Eye Calibration Using Dual Quaternions. *The International Journal of Robotics Research* [online]. 1999, **18**(3), 286–298. ISSN 0278-3649, 1741-3176. Dostupné z: doi:10.1177/02783649922066213
- [56] SARABANDI, Soheil, Josep M. PORTA a Federico THOMAS. Hand-Eye Calibration Made Easy Through a Closed-Form Two-Stage Method. *IEEE Robotics and Automation Letters* [online]. 2022, **7**(2), 3679–3686. ISSN 2377-3766, 2377-3774. Dostupné z: doi:10.1109/LRA.2022.3146943

- [57] HORAUD, Radu a Fadi DORNAIKA. Hand-Eye Calibration. *The International Journal of Robotics Research* [online]. 1995, **14**(3), 195–210. ISSN 0278-3649, 1741-3176. Dostupné z: doi:10.1177/027836499501400301
- [58] PAGANI, Roberto, Cristina NUZZI, Marco GHIDELLI, Alberto BORBONI, Matteo LANCINI a Giovanni LEGNANI. Cobot User Frame Calibration: Evaluation and Comparison between Positioning Repeatability Performances Achieved by Traditional and Vision-Based Methods. *Robotics* [online]. 2021, **10**(1), 45. ISSN 2218-6581. Dostupné z: doi:10.3390/robotics10010045
- [59] KUCAROV, Marianna Dimitrova, Mátyás TAKÁCS, Béla MOLNÁR a Miklos KOZLOVSZKY. Calibration of Robotic Arm for Workstation Installation in Changing Environment - Comparison of Manual, Mechanic, and Automatic Calibration. In: *2023 IEEE 17th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI): 2023 IEEE 17th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)* [online]. Timisoara, Romania: IEEE, 2023, s. 000593–000598 [vid. 2025-04-28]. ISBN 9798350321104. Dostupné z: doi:10.1109/SACI58269.2023.10158581
- [60] KARAN, Branko a Miomir VUKOBRATOVIC. Calibration and accuracy of manipulation robot models—An overview. *Mechanism and Machine Theory*. 1994, **29**, 479–500.
- [61] GARRIDO-JURADO, S., R. MUÑOZ-SALINAS, F.J. MADRID-CUEVAS a M.J. MARÍN-JIMÉNEZ. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition* [online]. 2014, **47**(6), 2280–2292. ISSN 00313203. Dostupné z: doi:10.1016/j.patcog.2014.01.005
- [62] OLSON, Edwin. AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA): 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. Shanghai, China: IEEE, 2011, s. 3400–3407 [vid. 2025-04-28]. ISBN 978-1-61284-386-5. Dostupné z: doi:10.1109/ICRA.2011.5979561
- [63] WANG, John a Edwin OLSON. AprilTag 2: Efficient and robust fiducial detection. In: *2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS): 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* [online]. Daejeon, South Korea: IEEE, 2016, s. 4193–4198 [vid. 2025-04-28]. ISBN 978-1-5090-3762-9. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2016.7759617
- [64] SHAH, Mili, Roger EASTMAN a Tsai HONG. An overview of robot-sensor calibration methods for evaluation of perception systems. In: *Performance Metrics for Intelligent Systems (PerMIS) Workshop* [online]. 2012, s. 15–20. Dostupné z: doi:10.1145/2393091.2393095
- [65] JIANG, Jianfeng, Xiao LUO, Qingsheng LUO, Lijun QIAO a Minghao LI. An overview of hand-eye calibration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2022, **119**(1–2), 77–97. ISSN 0268-3768, 1433-3015. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-021-08233-6

- [66] ENEBUSE, Ikenna, Babul K. S. M. Kader IBRAHIM, Mathias FOO, Ranveer S. MATHARU a Hafiz AHMED. Accuracy evaluation of hand-eye calibration techniques for vision-guided robots. *PLOS ONE* [online]. 2022, **17**(10), e0273261. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0273261
- [67] NUBIOLA, Albert a Ilian A. BONEV. Absolute calibration of an ABB IRB 1600 robot using a laser tracker. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2013, **29**(1), 236–245. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/j.rcim.2012.06.004
- [68] TSAI, R.Y. a R.K. LENZ. A new technique for fully autonomous and efficient 3D robotics hand/eye calibration. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* [online]. 1989, **5**(3), 345–358. ISSN 1042-296X. Dostupné z: doi:10.1109/70.34770
- [69] QIU, Shuwei, Miaomiao WANG a Mehrdad R. KERMANI. A Modern Solution for an Old Calibration Problem. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* [online]. 2021, **24**(3), 28–35. ISSN 1094-6969, 1941-0123. Dostupné z: doi:10.1109/mim.2021.9436097
- [70] PEDROSA, Eurico, Miguel OLIVEIRA, Nuno LAU a Vitor SANTOS. A General Approach to Hand-Eye Calibration Through the Optimization of Atomic Transformations. *IEEE Transactions on Robotics* [online]. 2021, **37**(5), 1619–1633. ISSN 1552-3098, 1941-0468. Dostupné z: doi:10.1109/tro.2021.3062306
- [71] ZHANG, Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* [online]. 2000, **22**(11), 1330–1334. ISSN 01628828. Dostupné z: doi:10.1109/34.888718
- [72] ENEBUSE, Ikenna, Mathias FOO, Babul Salam Ksm Kader IBRAHIM, Hafiz AHMED, Fhon SUPMAK a Odongo Steven EYOB. A Comparative Review of Hand-Eye Calibration Techniques for Vision Guided Robots. *IEEE Access* [online]. 2021, **9**, 113143–113155. ISSN 2169-3536. Dostupné z: doi:10.1109/ACCESS.2021.3104514
- [73] DU, Shan, Jianhua ZHANG a Xiaoling LV. Automatic Analysis of Calibration Board Image Orientation for Online Hand-Eye Calibration. In: Haibin YU, Jinguo LIU, Lianqing LIU, Zhaojie JU, Yuwang LIU a Dalin ZHOU, ed. *Intelligent Robotics and Applications* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2019 [vid. 2025-05-19], Lecture Notes in Computer Science, s. 577–589. ISBN 978-3-030-27540-2. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-030-27541-9_47
- [74] CalibrateCamera() OpenCV in Python. *GeeksforGeeks* [online]. 15:27:21+00:00 [vid. 2025-05-15]. Dostupné z: <https://www.geeksforgeeks.org/calibratecamera-opencv-in-python/>
- [75] *Robot camera calibration* [online]. [vid. 2025-05-14]. Dostupné z: https://www.torsteinmyhre.name/snippets/robcam_calibration.html
- [76] STROBL, Klaus a Gerd HIRZINGER. Optimal Hand-Eye Calibration. In: *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems: 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* [online]. Beijing, China: IEEE, 2006, s. 4647–4653 [vid. 2025-05-14]. ISBN 978-1-4244-0258-8. Dostupné z: doi:10.1109/IROS.2006.282250

- [77] CHOU, Jack C. K. a M. KAMEL. Finding the Position and Orientation of a Sensor on a Robot Manipulator Using Quaternions. *The International Journal of Robotics Research* [online]. 1991, **10**(3), 240–254. ISSN 0278-3649, 1741-3176. Dostupné z: doi:10.1177/027836499101000305
- [78] LU, C.-P., E. MJOLSNESS a G.D. HAGER. Online computation of exterior orientation with application to hand-eye calibration. *Mathematical and Computer Modelling* [online]. 1996, **24**(5–6), 121–143. ISSN 08957177. Dostupné z: doi:10.1016/0895-7177(96)00118-5
- [79] HANQI ZHUANG, Z.S. ROTH a R. SUDHAKAR. Simultaneous robot/world and tool/flange calibration by solving homogeneous transformation equations of the form $AX=YB$. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* [online]. 1994, **10**(4), 549–554. ISSN 1042296X. Dostupné z: doi:10.1109/70.313105
- [80] HUA, Jiang a Liangcai ZENG. Hand–Eye Calibration Algorithm Based on an Optimized Neural Network. *Actuators* [online]. 2021, **10**(4), 85. ISSN 2076-0825. Dostupné z: doi:10.3390/act10040085
- [81] *Online ArUco markers generator* [online]. [vid. 2025-05-14]. Dostupné z: <https://chev.me/arucogen/>
- [82] Camera Calibration Pattern Generator. *calib.io* [online]. [vid. 2025-05-14]. Dostupné z: <https://calib.io/pages/camera-calibration-pattern-generator>
- [83] *3d-printing calibration cube | 3D CAD Model Library | GrabCAD* [online]. [vid. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/3d-printing-calibration-cube-1>
- [84] *ensenso_driver/Tutorials/HandEyeCalibration - ROS Wiki* [online]. [vid. 2025-05-19]. Dostupné z: https://wiki.ros.org/ensenso_driver/Tutorials/HandEyeCalibration
- [85] *Universal Robots RTDE C++ Interface — ur_rtde 1.6.0 documentation* [online]. [vid. 2025-04-27]. Dostupné z: https://sdurobotics.gitlab.io/ur_rtde/index.html
- [86] *UR10e Medium-sized, versatile cobot* [online]. [vid. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/products/ur10e/>, <https://www.universal-robots.com/products/ur10e/>
- [87] *a2A2448-23gcPRO | Basler AG* [online]. [vid. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/shop/a2a2448-23gcpro/>

PŘÍLOHY

Uživatelská dokumentace k programu – *user_documentation.pdf*

Odkaz na fotografie a videa z průběhu testování – *odkaz_foto_videa.txt*