

# **Optimalizace trajektorie lakovacího robotu s podporou kamerové detekce**

Vojtěch Pešek

---

Bakalářská práce  
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2024/2025

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Vojtěch Pešek  
Osobní číslo: A23580  
Studijní program: B0714A150006 Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci  
Specializace: Inteligentní systémy s roboty  
Forma studia: Kombinovaná  
Téma práce: Optimalizace trajektorie lakovacího robotu s podporou kamerové detekce  
Téma práce anglicky: Optimization of paint robot trajectories by camera detection

## Zásady pro vypracování

- Definujte cíl práce, zaměřte se na optimalizaci trajektorie lakovacího robotu a eliminaci nepřesností způsobených nejednoznačným upnutím dílu.
- Zpracujte literární rešerši o robotickém lakování průmyslových dílů a možnostech využití kamerového systému pro detekci polohy dílu v přípravku.
- Navrhněte a implementujte metody pro optimalizaci trajektorie robotu využívající kamerový systém k detekci a úpravě souřadného systému podle aktuální polohy dílu.
- Analýzujte navržené metody, jejich účinnost a vhodnost pro průmyslové aplikace.
- Porovnejte efektivitu navržených metod a vyhodnoťte jejich schopnost eliminovat nepřesnosti v lakovacím cyklu.
- Vyhodnoťte praktickou použitelnost navržených metod pro eliminaci nepřesností v automatizovaném lakovacím cyklu a navrhněte doporučení pro jejich implementaci v průmyslových aplikacích.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

**Seznam doporučené literatury:**

1. KALA, Rahul. Autonomous Mobile Robots: Planning, Navigation and Simulation. Elsevier, 2023.
2. KOLÍBAL, Zdeněk, et al. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: VUTUM, 2016.
3. CARBONE, Giuseppe; LARIBI, Med Amine (ed.). Robot Design: From Theory to Service Applications. Springer Nature, 2022.
4. TRACTON, Arthur A. Coatings technology handbook. CRC press, 2005.
5. LAMBOURNE, R. Paint and surface coatings: Theory and practice. Woodhead Publishing Limited William Andrew Publishing, 1999.
6. FOTOVVATI, Behzad; NAMDARI, Navid; DEGHANGHADIKOLAEI, Amir. On coating techniques for surface protection: A review. Journal of Manufacturing and Materials processing, 2019, 3.1: 28.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Stoklásek, Ph.D.**  
Ústav automatizace a řídicí techniky

Datum zadání bakalářské práce: **6. prosince 2024**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2025**

**doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.**  
děkan



**prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.**  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 6. prosince 2024

# PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

## **Beru na vědomí, že**

- odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení bakalářské práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – bakalářskou práci – nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá; neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

## **Prohlašuji, že**

- jsem na bakalářské práci pracoval(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne .....

.....  
podpis autora



## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem rozšíření stávajícího robotického pracoviště určeného pro práškové lakování plechových střešních tašek pomocí integrace systému s 3D kamerou, která přesně detekuje polohu lakovaných dílců. Hlavním cílem je zvýšit přesnost a efektivitu celého lakovacího procesu, zejména v případech, kdy nejsou tašky vždy stejně umístěny.

Práce se zaměřuje na řešení problému nejednoznačného umístění maloformátových plechových střešních tašek a analyzuje možnosti využití moderních technologií k jeho odstranění. Součástí řešení byla detailní analýza dostupných robotických systémů pro lakování a technologií strojového vidění za účelem nalezení nejvhodnější kombinace hardwaru a softwaru pro konkrétní průmyslové nasazení. Do systému byly integrovány robot ABB GoFa CRB1500 a 3D kamera Photoneo MotionCam-3D. Projekt zahrnoval také vytvoření síťového propojení zařízení, konfiguraci lokalizace objektů a podrobnou kalibraci celého systému

Výsledkem práce je adaptivní robotický systém, který dokáže přesně rozpoznat aktuální pozici tašek a v reálném čase automaticky upravit trajektorii robota a optimalizovat vzdálenost lakovací pistole od dílce dle aktuálního natočení. Toto řešení vede ke snížení chyb při lakování, zlepšení kvality finálního produktu a zvýšení bezpečnosti a efektivity provozu. Práce zároveň potvrzuje možnost efektivního využití strojového vidění i v náročných podmínkách práškového lakování a poskytuje doporučení pro další rozvoj této technologie.

Klíčová slova: robotické lakování, kamerový systém, Photoneo, ABB GoFa, strojové vidění, lokalizace, průmyslová automatizace

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis deals with the design and implementation of an extension for an existing robotic workstation dedicated to the powder coating of metal roof tiles. The proposed solution utilizes a 3D camera to accurately determine the precise positioning of coated components, significantly enhancing the accuracy and efficiency of the coating process, particularly in scenarios where components are not consistently positioned

The study specifically addresses the challenge posed by ambiguous placement of small-format metal roof tiles, aiming to eliminate this issue by employing advanced technologies. Part of the solution involved a comprehensive analysis of available robotic coating systems and machine vision technologies to identify the most suitable hardware and software combination for practical industrial deployment. Consequently, the ABB GoFa CRB1500 robot and Photoneo MotionCam-3D camera were integrated into the system, including network configuration, object localization setup, and calibration procedures.

The resulting adaptive system reliably detects the precise positions of the roof tiles and dynamically adjusts the robot's trajectory according to real-time conditions, along with the distance to the tiles according to their angle. This significantly reduces coating errors, enhances product quality, and ensures safer and more efficient operation. Additionally, the thesis demonstrates that machine vision technologies can be effectively applied even in challenging powder coating environments and provides recommendations for future developments.

Keywords: robotic painting, vision system, Photoneo, ABB GoFa, machine vision, localization, industrial automation

Chci poděkovat hlavně svým rodičům, bez nichž bych tu dnes nebyl.



# OBSAH

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÚVOD.....</b>                                          | <b>13</b> |
| <b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>                            | <b>14</b> |
| <b>1 ROBOTICKÉ LAKOVÁNÍ .....</b>                         | <b>15</b> |
| 1.1 HISTORIE A VÝVOJ ROBOTICKÉHO LAKOVÁNÍ.....            | 16        |
| 1.2 VÝROBCI LAKOVACÍCH ROBOTŮ .....                       | 19        |
| 1.2.1 Lakovací roboty ABB .....                           | 19        |
| 1.2.2 Lakovací roboty FANUC .....                         | 21        |
| 1.2.3 Lakovací roboty KUKA .....                          | 22        |
| 1.2.4 Lakovací roboty YASKAWA .....                       | 23        |
| 1.3 PRÁŠKOVÉ LAKOVÁNÍ .....                               | 24        |
| 1.3.1 Technologie práškového lakování.....                | 25        |
| 1.3.2 Práškové lakování: recyklace .....                  | 28        |
| 1.4 BEZPEČNOST V ROBOTICKÉM LAKOVÁNÍ.....                 | 30        |
| <b>2 KAMEROVÉ SYSTÉMY V ROBOTICE .....</b>                | <b>33</b> |
| 2.1 PRINCIPY A TECHNOLOGIE STROJOVÉHO VIDĚNÍ.....         | 34        |
| 2.2 KAMEROVÝ SYSTÉM PHOTONEO .....                        | 35        |
| 2.2.1 Princip funkce kamerového systému Photoneo .....    | 35        |
| 2.2.2 Integrace kamerového systému s robotem .....        | 36        |
| 2.3 DOPADY PRÁŠKOVÉHO LAKOVÁNÍ NA OPTICKÉ SYSTÉMY .....   | 37        |
| 2.3.1 Zastření čoček .....                                | 37        |
| 2.4 KALIBRACE ROBOTU A KAMEROVÉHO SYSTÉMU .....           | 38        |
| 2.4.1 Metody kalibrace a jejich využití .....             | 39        |
| <b>3 OPTIMALIZACE TROJEKTORIÍ LAKOVACÍHO ROBOTY .....</b> | <b>42</b> |
| 3.1 NEJEDNOZNAČNÉ UPNUTÍ DÍLU .....                       | 43        |
| <b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>                            | <b>44</b> |
| <b>4 DEFINICE CÍLE A PROBLEMATIKY .....</b>               | <b>45</b> |
| 4.1 VOLBA KAMEROVÉHO SYSTÉMU .....                        | 48        |
| 4.2 VOLBA ROBOTICKÉHO SYSTÉMU .....                       | 50        |
| <b>5 NASTAVENÍ KAMEROVÉHO SYSTÉMU .....</b>               | <b>52</b> |
| 5.1 NASTAVENÍ POZICE A UPEVNĚNÍ KAMERY .....              | 52        |
| 5.2 NASTAVENÍ KAMERY .....                                | 55        |
| 5.3 NASTAVENÍ LOKALIZACE .....                            | 57        |
| 5.3.1 Nastavení lokalizace dílců.....                     | 58        |
| 5.4 KALIBRACE KAMERY VŮČI ROBOTU .....                    | 59        |
| 5.5 GLOBÁLNÍ NASTAVENÍ SYSTÉMU .....                      | 61        |

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| 5.6      | SPUŠTĚNÍ SYSTÉMU LOKALIZACE .....                        | 61        |
| <b>6</b> | <b>NASTAVENÍ ROBOTICKÉHO SYSTÉMU .....</b>               | <b>63</b> |
| 6.1      | NASTAVENÍ BEZPEČNOSTNÍCH FUNKCÍ ROBOTY .....             | 63        |
| 6.1.1    | Konfigurace bezpečnostních zón.....                      | 64        |
| 6.2      | PROGRAM PRO KOMUNIKACI A ZPRACOVÁNÍ DAT .....            | 65        |
| 6.2.1    | Komunikace.....                                          | 66        |
| 6.2.2    | Zpracování dat.....                                      | 66        |
| 6.2.3    | Kontrola přijatých dat.....                              | 66        |
| 6.2.4    | Optimalizace vzdálenosti lakovací pistole od dílce ..... | 67        |
| 6.3      | OPTIMALIZACE TRAJEKTORIÍ .....                           | 67        |
| <b>7</b> | <b>PRAKTICKÝ TEST.....</b>                               | <b>69</b> |
|          | <b>ZÁVĚR.....</b>                                        | <b>75</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>                   | <b>77</b> |
|          | <b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>                              | <b>82</b> |
|          | <b>SEZNAM TABULEK.....</b>                               | <b>83</b> |
|          | <b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>          | <b>84</b> |

;

## ÚVOD

Robotické lakování je podstatnou součástí dnešního průmyslu. Bez tohoto procesu by byla celá řada produktů nedostupná, nebo by nedosahovala takové kvality, jakou dnes považujeme za standard. Tento technologický postup je dobře popsán v odborné literatuře a nachází široké uplatnění napříč různými průmyslovými odvětvími.

Přestože je robotické lakování rozšířeným a osvědčeným procesem, který se v praxi využívá již po řadu let, stále čelí jednomu zásadnímu a dosud plně nevyřešenému problému. Téměř každá lakovací linka využívá dopravníkový systém pro přísun dílců do lakovací kabiny, a právě zde vzniká významná komplikace.

Aby byl systém ekonomicky dostupný a zároveň dostatečně flexibilní pro různé typy výrobků, není možné současně zajistit jeho absolutní přesnost při pozicování dílců. V důsledku toho se dílce ve chvíli lakování často nenacházejí přesně v očekávané poloze nebo orientaci. Tyto odchylky mohou vést ke snížení kvality nástřiku, zvýšené zmetkovitosti a často si vyžadují dodatečné manuální zásahy či korekce.

Situace je ještě složitější v případech, kdy mají lakované díly komplikovaný tvar, což znemožňuje jejich jednoduché a opakovatelné uchycení. Výsledná přesnost pozicování se tak může dostat pod přijatelnou a bezpečnou hranici pro automatizované lakování.

Jako vhodné řešení této problematiky se nabízí systém, který dokáže na základě reálné detekované pozice dílce upravit trajektorii robotu a optimalizovat ji pro aktuální podmínky. Ideálním kandidátem je využití systému strojového vidění. Právě návrhem, realizací a ověřením takového systému se zabývá tato práce.

## **I    TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 ROBOTICKÉ LAKOVÁNÍ

Robotické lakování zahrnuje aplikaci nátěrových hmot (tekutých laků, barev nebo práškových povlaků) pomocí průmyslových robotů. Tato technologie se rozvíjela za účelem zvýšení kvality, efektivity a bezpečnosti povrchových úprav [5][20]. Existuje řada různých technik povlakování pro ochranu povrchů [1], k nejrozšířenějším patří stříkání barvy, a to díky své univerzálnosti a schopnosti vytvářet rovnoměrné vrstvy ochranného materiálu [1].



Obrázek 1 Automatická robotická lakovna

(zdroj: [33])

## 1.1 Historie a vývoj robotického lakování

První průmyslové lakovací roboty se objevily v 60. letech 20. století. V roce 1969 byl v Norsku uveden do provozu vůbec první komerční robot určený k nástřiku barvy byl systém Trallfa, původně vyvinutý pro automatické lakování koleček ve vlastním závodě za účelem řešení nedostatku pracovníků [30]. Tato inovace umožnila nahradit lidskou obsluhu v lakovně, lakýrníci při ručním stříkání totiž čelí škodlivým výparům rozpouštědel a riziku výbuchu hořlavých aerosolů [5][19]. Robotizace lakování tak byla motivována snahou zlepšit pracovní podmínky, bezpečnost a zároveň zvýšit produktivitu a konzistenci nástřiku [20].

První zmínka o lakovacím robotu však pochází z patentu, jehož autorem byl Willard Lacey George Pollard Jr., Tento patent číslo 2213108 z roku 1934 popsal první jednoduchý robot pro lakování automobilů, nikdy však nebyl využit.

Během 70. a 80. let zaznamenalo robotické lakování rychlý rozmach, zejména v automobilovém průmyslu, který patří k největším odběratelům této technologie [20]. Lakovací roboty dokázaly nanášet práškovou barvu rychleji a rovnoměrněji než lidé, čímž přispěly ke zvýšení rychlosti výroby a k omezení zmetkovitosti. Již v polovině 80. let dosáhly lakovací roboty významného podílu na trhu povrchových úprav, norská firma Trallfa v roce 1985 dodávala asi 50 % všech lakovacích robotů na světě [30]. To svědčí o rychlém přijetí této technologie napříč průmyslem. Kromě automobilového sektoru se robotické nanášení práškové barvy uplatnilo i v dalších odvětvích, například při povrchové úpravě spotřební elektroniky a strojírenských výrobků [30].

Zpočátku byly možnosti programování těchto robotů omezené. První lakovací roboty Trallfa se programovaly tzv. metodou „uč a přehraj“ – zkušený lakýrník ručně vedl stříkací pistoli robota po požadované dráze a robot si tyto pohyby zaznamenal na magnetickou pásku pro opakované provádění [30]. Postupem času však s nástupem výkonnějších počítačů přešlo programování na plně digitální způsob. Od 90. let je standardem offline programování dráhy robota pomocí počítače, což umožňuje simulovat proces lakování ještě před nasazením ve výrobě [16]. Moderní pokročilé algoritmy navíc dokáží optimalizovat lakovací trajektorie tak, aby byla prášková barva nanášena rovnoměrně při minimalizaci doby cyklu a spotřeby barvy [3][4]. Výzkumníci například vyvinuli metody generování optimalizovaných drah postřiku, které zohledňují fyzikální modely rozptylu barvy a požadovanou tloušťku vrstvy [3]. Dále se prosazují digitální dvojčata lakovacích robotů – věrné virtuální modely

lakovacích buněk – umožňující testovat a ladit procesy v simulaci [13]. Tato technologie zvyšuje efektivitu náběhu výroby a umožňuje předvídat výslednou kvalitu nástřiku ještě před reálným lakováním.

Nejnovějším trendem ve vývoji je zapojení kolaborativních robotů a chytrých senzorů do lakovacích aplikací. Vznikají experimentální lakovací buňky, kde spolupracuje člověk a robot – robot provádí rutinní nástřik a člověk dohlíží na kvalitu či provádí složitější úkony, což kombinuje flexibilitu lidské práce s přesností automatu [8]. Aby byla taková součinnost bezpečná, řeší se pokročilé systémy vnímání okolí a bezpečnostní algoritmy pro zastavení robota při přiblížení člověka [10]. Robotické lakování se tak neustále vyvíjí ruku v ruce s obecnými pokroky v robotice a řídicích systémech – od prvotních jednoúčelových strojů k dnešním inteligentním, adaptivním a bezpečným robotickým systémům pro povrchové úpravy.

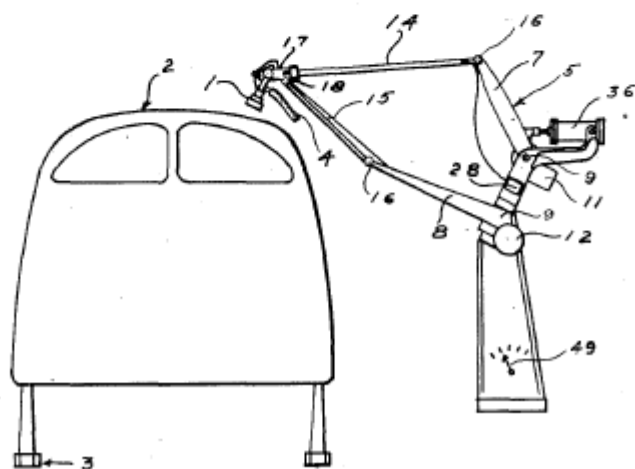
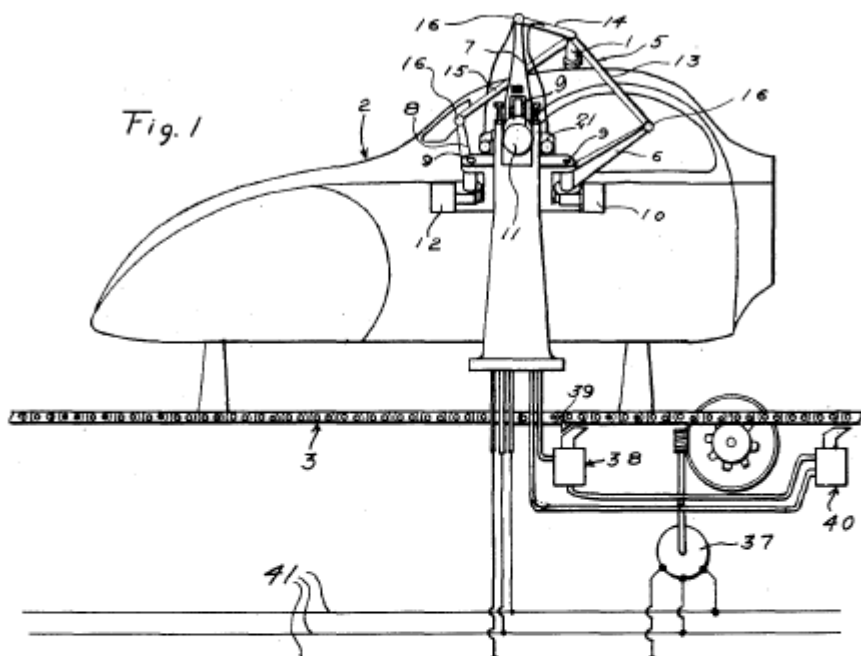
June 16, 1942.

W. L. V. POLLARD

2,286,571

POSITION CONTROLLING APPARATUS

Original Filed April 22, 1938 4 Sheets-Sheet 1



INVENTOR

Willard L. V. Pollard

Obrázek 2 Zmínka o lakovacím robotu, z pozdějšího patentu.

(zdroj: [34])

## 1.2 Výrobci lakovacích robotů

### 1.2.1 Lakovací roboty ABB

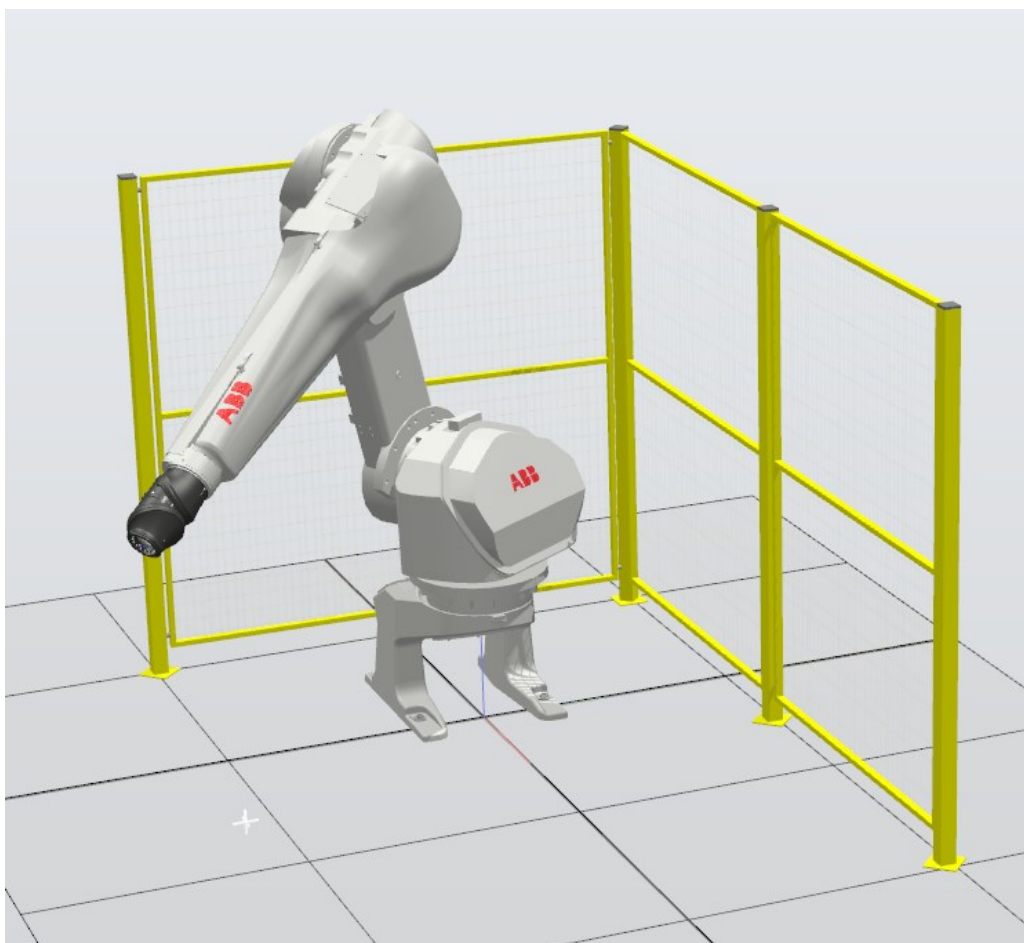
Společnost ABB je považována za jednoho z lídrů v oblasti robotického lakování, a to zejména díky historickému podílu na inovacích v této oblasti. Divize lakovacích robotů ABB má kořeny v již zmíněné firmě Trallfa, švédský koncern ASEA (později ABB) postupně získal majetkový podíl v Trallfě v letech 1985–1988, čímž integroval její lakovací roboty do svého portfolia [30]. Tím ABB převzala technologii prvního lakovacího robota na světě a navázala na ni dalším vývojem. Díky této akvizici držela ABB koncem 80. let dominantní pozici na trhu lakovacích systémů – v té době byl každý druhý prodaný lakovací robot na světě původem od ABB (Trallfa) [30].

ABB od 90. let vyvíjí specializované šestiosé roboty určené přímo pro aplikace nátěrových hmot. Patří sem například řady IRB 5400 a 5500, které jsou uzpůsobeny pro lakování velkých ploch s vysokou přesností a opakovatelností pohybu. Tyto lakovací roboty ABB zahrnují konstrukční úpravy pro práci v lakovacích boxech například zónové krytování a hladké povrchy ramen, aby se na nich neusazovala barva, vnitřní vedení hadic a kabelů dutým zápěstím a v neposlední řadě certifikaci do prostředí s nebezpečím výbuchu dle ATEX (Ex) [2][32]. Splnění přísných norem (např. ČSN EN 60079 [32]) je nutné, protože rozprašovaná rozpouštědla a prach z práškových barev tvoří výbušnou atmosféru. Roboty ABB pro lakování proto využívají pneumaticky nebo elektricky izolované systémy a přetlakové komory v ramenech, aby eliminovaly riziko vznícení hořlavých par [32].

Charakteristickým rysem lakovacích linek ABB je také propracované řízení procesu. Roboty ABB synchronizují vlastní pohyb s ovládáním stříkacího mechanismu tak, aby při změnách rychlosti či směru pohybu byla vždy zachována požadovaná tloušťka nanesené vrstvy [12]. Řídicí systém hlídá načasování otevření trysky a elektrostatického nabíjení částic barvy v závislosti na okamžité poloze ramene [12]. Tento integrovaný přístup klade velké nároky na testování softwaru, ABB proto vyvinulo pokročilé metody automatizovaného testování, například generování testovacích scénářů pomocí technik Constraint Programming, aby ověřila spolehlivost časové synchronizace nástřiku s pohybem robota [12]. Výsledkem jsou vysoce spolehlivé lakovací automaty schopné nonstop provozu v průmyslových podmínkách.

ABB se rovněž zaměřuje na digitální podporu a simulaci lakovacích procesů. Využívá koncepty digitálních dvojčat pro simulaci dráhy robotu a proudění barvy ještě před spuštěním reálné linky [13]. Například při návrhu nové lakovací linky lze ve virtuálním prostředí optimalizovat pohyby několika robotů ABB najednou, předvídat možné kolize nebo hluchá místa v pokrytí barvou a doladit parametry postřiku. Tyto simulace zkracují dobu potřebnou k odladění procesu a minimalizují množství potřebných prototypových nástřiků [13].

Díky dlouhodobým inovacím dosáhly lakovací systémy ABB mimořádného rozšíření v průmyslu. Uvádí se, že na přelomu tisíciletí bylo každé třetí auto na světě a zhruba 70 % všech počítačových skříní nalakováno roboty ABB [30]. Tato statistika potvrzuje vedoucí úlohu ABB v automatizovaném lakování. V současnosti ABB nadále rozvíjí portfolio lakovacích robotů. ABB nabízí jak velké modely pro automobilky, tak kompaktní lakovací roboty pro menší provozy vše se pokročilým softwarovým vybavením pro snadnou integraci do výrobních linek.



Obrázek 3 Lakovací robot ABB IRB5500

*(zdroj: vlastní)*

### 1.2.2 Lakovací roboty FANUC

Japonská firma FANUC uvedla už v 80. letech 20. století své první lakovací roboty řady P, které jsou dodnes používány v automobilových lakovnách po celém světě [2]. Současné modely FANUC, jako např. P-250i, disponují dlouhým dosahem a integrovanými vysokonapěťovými zdroji pro elektrostatické nabíjení barvy, čímž dosahují vysoké efektivity nástřiku při minimálním odpadu barvy [6].



Obrázek 4 Lakovací robot FANUC P-200iA

(zdroj: [35])

### 1.2.3 Lakovací roboty KUKA

Německý výrobce KUKA vyvinul speciální verze svých robotů označované často jako řada „Paint” (např. KUKA KR 30-3 F), které lze montovat na strop lakovací kabiny a které mají zesílenou ochranu proti průniku rozpouštědel do motorů a elektroniky. Také tyto roboty splňují přísné bezpečnostní normy a jsou certifikovány pro výbušná prostředí [32].



Obrázek 5 Lakovací robot KUKA KR 30-3 F

(zdroj: [36])

#### 1.2.4 Lakovací roboty YASKAWA

Japonská společnost Yaskawa nabízí lakovací roboty (řada Motoman), například modelové řady EPX, které jsou nasazeny ve velkém počtu zejména v Asii a v automobilkách Toyota, Nissan a dalších, často v kombinaci s pokročilými dopravníkovými systémy a 3D skenery pro kontrolu kvality nátěru [17][31].



Obrázek 6 Lakovací robota YASKAWA Motoman mpx2600

(zdroj: [37])

### 1.3 Práškové lakování

Práškové lakování je moderní technologie povrchové úpravy, při které se na předmět nanáší jemný práškový pigment s pryskyřičným pojivem a poté se tepelně vytvrzuje do podoby soudržného ochranného filmu. Tato metoda patří mezi nejrozšířenější techniky povrchových ochranných materiálů [1]. Na rozdíl od konvenčních kapalných nátěrů nevyužívá prášková barva žádná organická rozpouštědla, a proto během aplikace prakticky nevznikají emise těkavých organických látek (VOC) [21]. Díky vynikajícím aplikačním vlastnostem a ekologičnosti si práškové lakování získalo široké uplatnění zejména při povrchové úpravě kovových dílů v průmyslu (např. u domácích spotřebičů a v automobilovém sektoru) [21]. V posledních desetiletích zaznamenala tato technologie výrazný rozmach v reakci na zpřísnující se ekologické požadavky na nátěrové hmoty bez rozpouštědel [21]. K hlavním výhodám práškového lakování patří vysoká účinnost využití materiálu, odolnost vzniklých povlaků a minimalizace odpadu díky možnosti recyklace nespotebovaného prášku [7][21]. Vzhledem k těmto přednostem se práškové lakování v řadě aplikací považuje za efektivní a šetrnou alternativu k mokrému lakování.

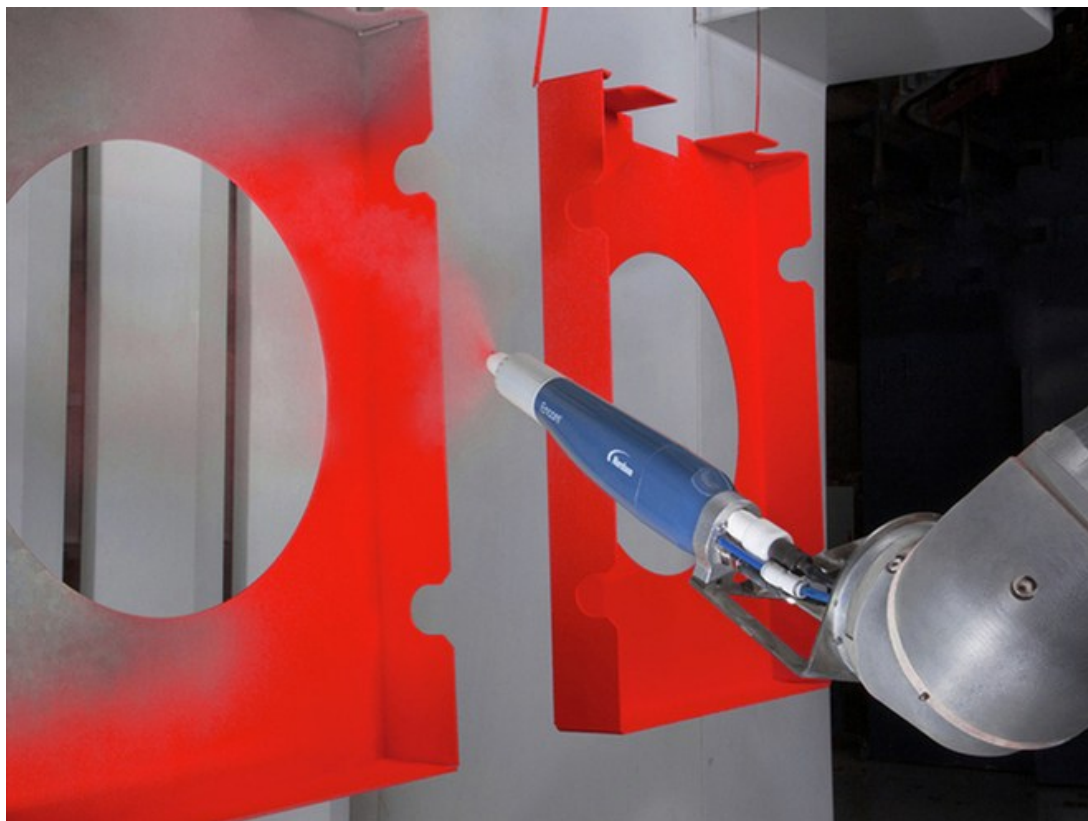
### 1.3.1 Technologie práškového lakování

Proces práškového lakování typicky probíhá elektrostatickým nanášením prášku a následným tepelným vytvrzením povlaku. Nejprve je prášková barva pomocí pistole rozprášena ve formě oblaků jemných částic a nabita vysokým napětím (obvykle koronovým výbojem kolem 60–100 kV) [7]. Nabité částice se elektrostaticky přichytávají na uzemněný povrch lakovaného předmětu a vytvoří na něm rovnoměrnou vrstvu prášku. Tato vrstva je následně zahřata v peci na požadovanou teplotu (typicky 160–200 °C pro termoreaktivní práškové barvy), při níž dochází k roztavení prášku, jeho chemickému vytvrzení (polymerizaci) a přilnutí k podkladu [7]. Po ochlazení vzniká souvislý, hladký a trvanlivý film, který plní jak dekorativní, tak ochrannou funkci (proti korozi, opotřebení apod.) [1]. Alternativně k běžnému elektrostatickému stříkání existuje i fluidní nanášení prášku (fluidní lázeň), kdy se zahřátý díl ponoří do fluidizovaného prášku a ten ulpí na jeho povrchu. Tato metoda se však využívá méně často, jelikož není příliš vhodná pro složitější tvary či automatizované lakování [1].

Práškové barvy jsou nejčastěji formulovány jako termoreaktivní (termosetové) pryskyřice nebo méně často jako termoplasty [21]. Mezi nejrozšířenější termosetové systémy patří epoxidové, polyesterové a hybridní epoxy-polyesterové práškové nátěry [26]. Každý typ má specifické vlastnosti: například čistě epoxidové povlaky vynikají přilnavostí a antikorozií odolností, avšak nejsou dostatečně odolné vůči UV záření, takže se hodí spíše pro vnitřní použití. Naproti tomu polyesterové prášky mají výbornou odolnost proti povětrnosti a UV stabilitu, a proto se často používají pro venkovní aplikace. Hybridní epoxid-polyesterové kompozice pak kombinují výhody obou typů a jsou univerzálně využitelné pro širokou škálu účelů [26]. Typická tloušťka jedné vrstvy práškového povlaku bývá 50–150 µm, čehož lze dosáhnout v jediném nástřiku, práškový povlak tedy dokáže vytvořit silnou krycí vrstvu bez stékání, což u kapalných barev často vyžaduje více vrstev [21]. Experimentální srovnání ukazují, že práškové laky poskytují povlaky s vyšší a rovnoměrnější tloušťkou bez vad, jako jsou potekliny, které se vyskytují u mokrého lakování [21]. Mechanická odolnost takto vytvořených povlaků bývá výborná, v testech odolnosti proti poškrábání snesly práškově lakované panely zátěž >2,5 kg, zatímco u panelů s kapalným lakem se poškrábání projevilo již při menší zátěži [21]. Práškové laky rovněž vykazují vysokou rázovou houževnatost, a přilnavost a pružnost srovnatelnou či lepší, než tradiční nátěry [21]. V případě požadavku na opravu povlaku nebo změnu odstínu je možné nanést novou práškovou vrstvu na starý povlak; studie naznačují, že takové opětovné

přelakování (repainting) nemá negativní vliv na mechanické vlastnosti ani soudržnost původního práškového filmu [24]. Díky tomu lze poškozený povrch opravit další vrstvou prášku, aniž by bylo nutné původní nátěr odstranit, což zvyšuje flexibilitu a životnost povrchové úpravy. Další možnost opravy povrchu je před samotným vytvrzením sfouknout nanesený prášek a nanést jej znovu, čímž se díl neznehodnotí.

Pro aplikaci práškové barvy se využívají automatizované lakovací linky. V nich jsou práškové pistole často upevněny na robotických manipulátorech či na recipkách (vertikálně kmitajících nosičích), které zajišťují rovnoměrné nanesení prášku i na složitější tvary dílů. Robotické lakování práškem umožňuje přesnou kontrolu tloušťky vrstvy a opakovatelnost procesu, zvláště u dílů komplikovaných tvarů nebo při časté obměně lakovaných objektů. Na rozdíl od kapalných nátěrů, kde existuje více způsobů tvorby spreje (např. vysokotlaké bezvzduchové rozprašování nebo nízkotlaké rozprašování se stlačeným vzduchem) [14], využívá práškové lakování vždy elektrostatického nabíjení částic; stlačený vzduch zde slouží jen k unášení prášku a tvarování rozptylu, nikoli k atomizaci kapaliny. Požadovaného krytí se dosahuje zpravidla v jediné vrstvě, kterou lze ihned po vychladnutí expedovat – odpadá tak zdoluhavé zasychání jako u mokrých barev. Standardní práškové barvy vyžadují vypalování při poměrně vysokých teplotách, což limituje použití na tepelně odolné materiály (především kovy). Novější vývoj však přináší práškové laky s nízkoteplotním vytvrzováním, které umožňují snížit teplotu vypalování na cca 120–150 °C [22]. To otevírá možnost aplikace práškového lakování i na citlivější materiály, jako je dřevo (např. MDF desky) nebo plastové díly, a zároveň to snižuje spotřebu energie potřebné k vytvrzení nátěru [22]. Další inovací jsou práškové barvy vytvrzované alternativně pomocí UV záření, jež rovněž dovolují lakování teplotně citlivých substrátů a urychlují celý proces vytvrzení [21]. Celkově vzato poskytuje technologie práškového lakování vysoce kvalitní povrchové úpravy s efektivním využitím materiálu, což ji činí atraktivní pro průmyslové nasazení v automatizovaných lakovacích systémech.



Obrázek 7 Robotické práškové lakování

*(zdroj: [38])*

### 1.3.2 Práškové lakování: recyklace

Jednou z významných výhod práškového lakování je možnost recyklace a opětovného využití přebytečného prášku. Při elektrostatickém stříkání se typicky neuchytí na povrchu dílu veškerý rozprášený prášek – neulpělé částice zůstávají ve vzduchu a tvoří tzv. overspray (přestřík).

V lakovací kabině pro práškové lakování je proto instalován odsávací a filtrační systém, který tento přestřík zachytává. Nejčastěji se používají cyklonové separátory v kombinaci s jemnými filtry, přičemž proud vzduchu unáší nespotřebovaný prášek do cyklonu, kde je odstředivou silou oddělen a shromážděn ve sběrné nádobě, odkud může být vrácen zpět do oběhu [7]. Filtrační jednotky zachytí i nejjemnější částice, takže vyčištěný vzduch může být vrácen do haly nebo bezpečně vypuštěn. Tímto způsobem lze teoreticky recyklovat téměř 100 % neulpělého prášku; v praxi dochází k malým ztrátám (např. ulpěním prášku na filtrech nebo jeho znehodnocením při čištění systému), avšak stále se dosahuje velmi vysoké účinnosti využití materiálu, kdy běžně 95–98 % prášku skončí na lakovaném produktu [7]. Oproti mokrému lakování, kde značná část nátěrové hmoty končí jako odpad (např. rozprášená barva, která mine cíl, nebo odpařená rozpouštědla), produkuje práškový proces minimum odpadních látek. Nedochází ani k únikům škodlivých rozpouštědlových par, protože práškové barvy žádná rozpouštědla neobsahují [21]. Ekologický přínos této technologie je tedy značný – minimalizace emisí VOC a redukce pevného odpadu z lakování přispívá k lepší ochraně ovzduší i snížení zátěže skládek.

Rekuperovaný prášek lze po přefiltrování obvykle smísit s čerstvým práškem a znovu použít pro další lakování, aniž by došlo ke zhoršení kvality povlaku. Důležitá je přitom správná kontrola a údržba systému, prášek nesmí navlhnout či zhrudkovatět a je třeba zabránit kontaminaci barev při výměně prášku. Zejména při lakování jednobarevné velké série se recykluje přímo v procesu, zatímco znečištěný nebo barevně smíšený odpadní prášek se separátně shromažďuje. I pro takto znehodnocený prášek však existují způsoby využití – současné výzkumy se zabývají například jeho přidáváním do polymerních kompozitů jako plniva. Doğan a Kısmet například prokázali, že jemný odpad z práškového lakování lze použít jako výztuž vysokohustotního polyetylenu nebo epoxidových materiálů, čímž se zlepší mechanické a tepelně-izolační vlastnosti výsledných kompozitů [25]. Takovéto alternativní recyklování práškových nátěrových hmot přispívá k cirkulárnímu hospodářství a řeší problém likvidace přebytečného prášku mimo lakovací proces.

Účinná rekuperace ovšem klade vysoké nároky na bezpečnost a ventilaci systému. Koncentrace prachových částic ve vzduchu uvnitř lakovací kabiny musí být udržována pod dolní mezí výbušnosti, aby nedošlo k zapálení oblaků prášku [23]. Proudící vzduch a uzemnění všech vodivých částí zamezují hromadění prášku a vzniku nábojů, které by mohly iniciovat nechtěný výboj. Správně navržený systém tak minimalizuje riziko vznícení nebo výbuchu a umožňuje bezpečné zachycení a návrat prášku do oběhu. Bezpečnostní aspekty tohoto procesu jsou detailněji rozebrány v následující kapitole.



Obrázek 8 Rekuperační cyklónový separátor

(zdroj:[39])

## 1.4 Bezpečnost v robotickém lakování

Provoz robotického lakování klade mimořádný důraz na bezpečnost, a to jak z hlediska ochrany obsluhy před pohyblivými částmi stroje a nebezpečnými látkami, tak z hlediska prevence požáru či výbuchu v lakovacím prostředí. V automatizovaných lakovnách s průmyslovými roboty je běžné, že lakovací kabina tvoří uzavřený prostor, do něhož člověk během chodu zařízení nevstupuje. Tím je zajištěno, že při práci robota nedojde ke kolizi s personálem ani k přímému vystavení člověka škodlivinám (prachu či výparům). Robotické pracoviště je navíc osazeno bezpečnostními prvky (ochranné ploty, světelné závory, bezpečnostní dveře s bloádou), které při otevření okamžitě zastaví pohyb robota, a do jejichž prostoru zároveň nesmí robot vjet. Tyto pasivní bezpečnostní prvky vycházejí z normovaných požadavků na provoz průmyslových robotů (např. ISO 10218-1) a minimalizují riziko úrazu obsluhy za běžných podmínek. Při údržbě, čištění či výměně prášku je nezbytné dodržovat procedury zamknout-označit pro odpojení pohonu robota a vypnutí vysokonapěťových zdrojů, než pracovník vstoupí do kabiny.

Moderní trend v robotice směřuje ke kolaborativním robotům, kteří mohou pracovat souběžně s lidmi bez pevného oddělení prostoru[15]. V kontextu lakování je přímá spolupráce člověka a robota omezená kvůli přítomnosti chemikálií a nutnosti odděleného prostoru, nicméně některé principy kolaborativní bezpečnosti se uplatňují například při ručním navádění robota nebo při programování. Kolaborativní roboty jsou konstruovány s vestavěnými omezeními síly a momentu – pokud dojde ke kontaktu s člověkem, senzory okamžitě detekují odpor a robot se zastaví, aby nepřekročil bezpečné prahy síly definované normou [10]. Scibilia et al. provedli mezilaboratorní testy těchto power-and-force limiting funkcí u různých robotů a potvrdili nutnost standardizovaného zkušební postupu, aby všichni výrobci splnili požadavky bezpečnosti při kolizi člověka s robotem [10]. K zajištění skutečně bezpečného provozu je dále zkoumán pokročilý monitoring a řízení rizik v reálném čase. Například Baek et al. navrhli metodu pro odhad nejistoty senzorů u robotů, která průběžně vyhodnocuje spolehlivost údajů o poloze a síle, a umožňuje tak okamžité přizpůsobení pohybu robota tak, aby nebyly překročeny stanovené bezpečnostní limity [11]. Takové řešení dokáže mapovat zjištěnou nejistotu měření na příslušné bezpečnostní hranice definované normami (např. ISO 13849) a v případě hrozícího překročení automaticky upravit chování systému [11]. Výsledkem těchto opatření je, že i v případě neočekávaných situací (např. nečekaný vstup člověka do pracovního prostoru nebo nepřesnost senzoru) zůstává riziko úrazu minimalizováno. V prostředí lakovacích linek, kde se člověk obvykle

nevyskytuje během automatického cyklu, slouží uvedené principy především jako další vrstva jistoty při programování a údržbě robotů.

Další zásadní oblastí je bezpečnost prostředí vzhledem k použitým hořlavým materiálům. Práškové lakování probíhá ve výbušné prachové atmosféře, jemné částice organického prášku rozptýlené ve vzduchu mohou při určité koncentraci vytvořit směs, která se vznítí od jiskry či horkého povrchu a způsobí výbuch. Studie zkoumající výbušné charakteristiky práškových barev uvádějí, že např. akrylátový práškový lak může dosáhnout maximálního výbuchového tlaku okolo 0,7 MPa a rychlosti nárůstu tlaku až 85 MPa/s, přičemž nejnebezpečnější koncentrace prášku ve vzduchu vykazovala index explozivity zhruba 23 MPa·m/s [23]. Tyto hodnoty dokládají, že práškové nátěrové hmoty představují významné nebezpečí výbuchu prachu, srovnatelné s jinými hořlavými práškovými materiály. Z tohoto důvodu jsou lakovny navrženy a provozovány tak, aby se eliminovaly zdroje zážehu a zabránilo se hromadění prášku ve vzduchu nad bezpečné meze. Všechna elektrická zařízení uvnitř lakovací kabiny (např. motory dopravníků, ventilátory, světla) musí být v nevýbušném provedení dle příslušných norem – v Evropě se uplatňují požadavky směrnice ATEX, konkrétně normy řady ČSN EN 60079 pro zařízení do prostředí s nebezpečím výbuchu [32]. Typicky se v lakovnách klasifikují zóny 21 a 22 pro výbušnou atmosféru prachu, podle četnosti a trvání výskytu prachového oblaku; tomu odpovídá nutnost použití elektrických komponent s odpovídajícím stupněm ochrany (např. krytí proti vniknutí prachu, teplotní třída, jiskrově bezpečná konstrukce) [32]. K zamezení vzniku elektrostatických jisker se veškeré kovové části zařízení pečlivě uzemňují a používají se antistatické materiály na filtrech i dopravních pásích. Samotná prášková pistole a napěťový zdroj jsou konstruovány tak, aby dodávaly řízený korónový výboj s proudy v řádu mikroampérů – tím se nabíjí částice, ale nemůže vzniknout silná jiskra schopná zapálit směs. K prevenci požáru slouží také kontinuální odsávání vzduchu v kabině, které udržuje koncentraci prášku pod kritickou úrovní [23]. V případě použití hořlavých rozpouštědel (u mokrého lakování) by se analogicky řešila ventilace par a klasifikace zón pro hořlavé plyny, avšak práškové lakování tento problém eliminuje tím, že žádné těkavé látky neuvolňuje.

Kromě rizika výbuchu je třeba myslet i na ochranu zdraví obsluhy. Práškové částice mají typicky velikost 10–100  $\mu\text{m}$ , a při vdechnutí mohou dráždit dýchací cesty. Proto je kabina izolována a vzduch filtrovaný, pracovníci provádějící ruční nástřik nebo údržbu kabiny používají osobní ochranné prostředky, jako jsou respirátory a antistatické oděvy. Vzhledem k absenci toxických rozpouštědel a nízkému obsahu těžkých kovů v moderních

práškových barvách je zdravotní riziko při dodržení správných postupů relativně nízké, práškové laky jsou obecně považovány za bezpečné z hlediska expozice (mnohé jsou po vytvrzení schváleny i pro styk s potravinami). Nicméně bezpečnostní normy vyžadují pravidelné hodnocení rizik na pracovišti – provozovatel musí identifikovat všechna potenciální nebezpečí (mechanická, elektrická, chemická) a zavést odpovídající ochranná opatření v souladu s platnými předpisy. V kontextu robotického lakování to znamená kombinaci opatření: důsledné oddělení člověka od nebezpečných zón během provozu robota, robustní konstrukci a testování bezpečnostních funkcí robota [10][11], a zajištění nevýbušného a zdravotně nezávadného pracovního prostředí pro lakování práškovými materiály [23][32]. Při splnění těchto podmínek je robotické práškové lakování vysoce bezpečné a spolehlivé, a to i v náročných průmyslových provozech.

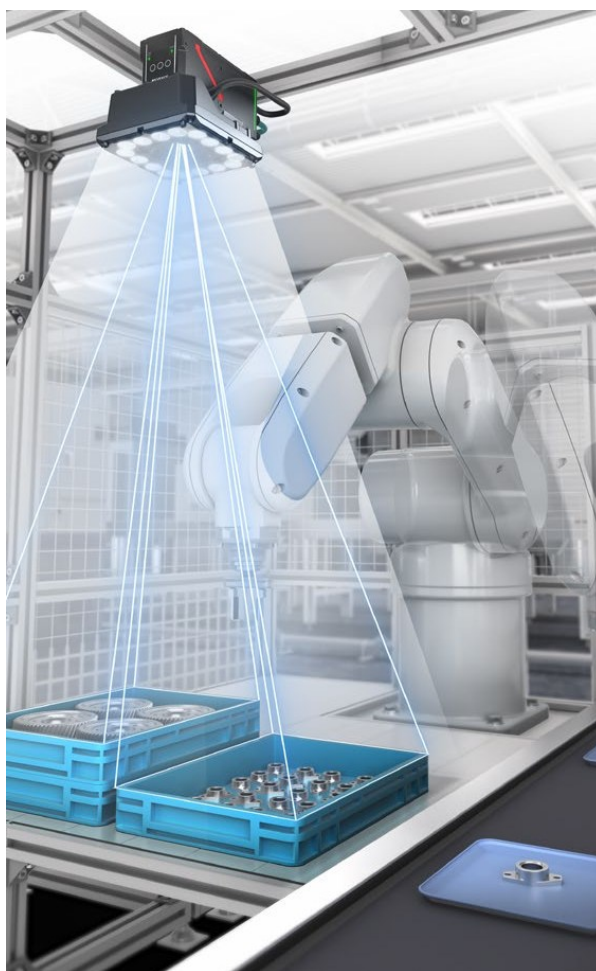
*(zdroj: [40])*



Obrázek 9 Bezpečnostní zámek Euchner využitý v robotické buňce

## 2 KAMEROVÉ SYSTÉMY V ROBOTICE

Moderní průmyslová robotika se stále více spoléhá na kamerové systémy jako klíčovou součást pro orientaci v prostředí a detekci objektů. Strojové vidění umožňuje robotům identifikovat polohu a tvar dílů, na které mají působit, a tím rozšiřuje jejich flexibilitu oproti tradičním „slepým“ robotům bez senzorů [2]. Typickým příkladem je robotická ruka s kamerou, která dokáže najít a uchopit náhodně umístěné objekty na základě počítačového vidění [9]. Problémy klasických algoritmů zpracování obrazu (například založených na segmentaci podle barev nebo hran) však často vedou k omezené přesnosti v komplexních scénách. Současným trendem je proto využití metod hlubokého učení pro analýzu obrazu, které mohou výrazně zvýšit spolehlivost detekce [9].



Obrázek 10 Robotická buňka se strojovým viděním

(zdroj: [41])

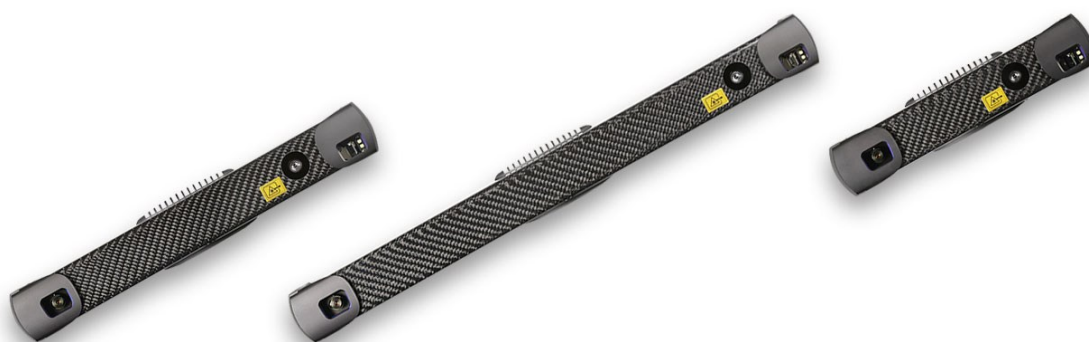
## 2.1 Principy a technologie strojového vidění

Kamerové systémy pro robotiku zahrnují jak 2D kamery poskytující pouze plošný obraz, tak pokročilé 3D senzory schopné vnímat hloubku scény. Získání prostorových informací je zásadní zejména pro aplikace, kde robot potřebuje znát tvar a vzdálenost k povrchu objektu. Klasickým přístupem k získání 3D obrazu je stereoskopické vidění využívající dvě synchronizované kamery k triangulaci hloubky. Alternativou jsou aktivní metody, například kamery s Time-of-Flight měří vzdálenost pomocí délky letu světla a dokáží rychle snímat hluboké mapy, zatímco systémy strukturovaného světla projektují na scénu známý vzor a z jeho deformace odvozují 3D tvar objektů [2]. Při použití více kamer či senzorů je nutná jejich vzájemná kalibrace, aby byly získané 3D body v jedné souřadné soustavě; právě metody pro přesnou kalibraci vícero hloubkových kamer jsou předmětem výzkumu [29]. Zajímavým směrem je též získávání 3D informací z jediné kamery. To je možné buď pohybem kamery okolo snímaného objektu (více pohledů umožní rekonstruovat scénu, případně aplikovat měřicí metody s rotující kamerou [28]), nebo pomocí pokročilých algoritmů, které z jednoho 2D obrazu odhadují hloubková data. Například Gao et al. představili metodu, která za pomoci hlubokého učení detekuje 3D pozice i částečně zakrytých objektů z monokulárního obrazu. Tyto přístupy však zpravidla nedosahují takové přesnosti jako specializované hloubkové senzory a mohou vyžadovat rozsáhlý trénink na datech [27].

Nejnovější 3D kamery pro robotiku kombinují vysoké rozlišení a rychlé snímání, což umožňuje využití i v dynamických podmínkách. Příkladem je průmyslová kamera Photoneo MotionCam-3D, která využívá patentovanou metodu paralelního strukturovaného světla k zachycení celé scény během jediného záběru. Tato technologie prakticky „zmrazí“ pohybující se scénu v čase a poskytne detailní 3D model bez pohybové neostrosti [31]. Kamera MotionCam-3D dokáže snímat objekty pohybující se rychlostí až desítek m/s a generovat velmi přesná mračna bodů [31]. Takový systém je vhodný např. pro zavěšené díly pohybující se na dopravníku, jejichž tvar je potřeba před lakováním rychle naskenovat. Limitací optických 3D senzorů obecně může být lesklý či průhledný povrch objektů, který zkresluje promítané vzory nebo odrazy světla, a také prашné či zakouřené prostředí lakoven. Proto se klade důraz na robustnost kamer (ochrana IP65 apod.) a pokročilé zpracování signálu, které eliminuje šum a rušení [31].

## 2.2 Kamerový systém Photoneo

Photoneo je výrobce 3D kamerových systémů s vysokou přesností a tolerancí vůči pohybu snímaného objektu [31]. Kamerové systémy, zejména řada MotionCam-3D, představují excelentní volbu pro náročná prostředí díky patentované variantě strukturovaného světla [31]. V praxi se často uplatňují ve skladové logistice [27] a v automobilovém průmyslu [17], avšak dosud nebyly integrovány do lakovacího procesu.



Obrázek 11 Kamera Photoneo MotionCam-3D

(zdroj:[31])

### 2.2.1 Princip funkce kamerového systému Photoneo

Funkční princip vychází z patentované technologie Parallel Structured Light, jejímž cílem je minimalizovat artefakty skenu způsobené pohybem objektu [31]. U kamery MotionCam-3D výrobce udává, že kvalitní sken lze získat i při rychlosti objektu až  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  [31].

Po naskenování jsou data přenesena do kontroléru, který je dále zpracovává. Právě fáze zpracování dat zásadně ovlivňuje celkovou užitečnost a přesnost systému [11].

### 2.2.2 Integrace kamerového systému s robotem

Integrace 3D kamerového systému Photoneo s průmyslovým robotem ABB vyžaduje souběžné nastavení obou platforem. Na straně senzoru je nejprve nutné optimalizovat parametry snímání, jako jsou expozice, snímková frekvence, délka zpracování a potlačení artefaktů, a zvolit vhodnou metodu lokalizace. Pro tento proces je vhodné využití softwaru Locator Studio, který umožňuje definovat referenční souřadnou soustavu přímo v kinematice robotu a tím minimalizovat transformační chyby [31]. Alternativní režimy bez CAD-modelu nebo plné vedení robotu prostřednictvím řídicí jednotky Photoneo nacházejí uplatnění zejména při tzv. bin-pickingu a stohování [31].

Přesnost snímání závisí především na pečlivé geometrické kalibraci dvojice kamera a robot. Podle literatury se pro dosažení absolutní chyby transformace pod 0,2 mm doporučuje využít 3D kalibrační terče a iterativní optimalizační algoritmy [6]. Po úspěšné kalibraci se vytvoří komunikační rozhraní mezi výpočetní jednotkou Photoneo a řídicí stanicí ABB. Dodávaný softwarový balíček zajišťuje navázání spojení, přenos matic polohy a orientace a spouštění trajektorií v reálném čase [30].

Konečným výstupem integrace je aplikační program v řídicím systému ABB, který využívá 3D data ke generování optimalizovaných drah lakovací pistole. Přesnost a reprodukovatelnost procesu závisí nejen na kvalitě vstupních dat, ale také na latenci komunikace a dynamických vlastnostech robotu, jež je třeba zohlednit při parametrizaci pracovního cyklu [30].

## 2.3 Dopady práškového lakování na optické systémy

Práškové lakování představuje významnou výzvu pro optické senzory v robotice: suspendované částice o velikosti 3–80  $\mu\text{m}$  (medián  $\approx 18 \mu\text{m}$ ) snižují citlivost kamer a zhoršují kvalitu 3D rekonstrukce. Současně vytvářejí potenciálně výbušnou atmosféru, takže optická zařízení i jejich kabeláž musejí splňovat požadavky normy ČSN EN 60079-0 [23][32].

Povlaky práškových laků po nanesení a vytvrzení mění optické vlastnosti povrchu (odrazivost, rozptyl) a tím ovlivňují přesnost měření. Kamerové systémy proto musí být v procesní komoře chráněny vhodnými kryty s průzory, aktivním ofukem a antistatickými povlaky, jak doporučují bezpečnostní studie výbušných charakteristik práškových laků [23].

### 2.3.1 Zastření čoček

Zastírání čoček jemnými částicemi práškového laku patří k nejzávažnějším problémům při nasazení optických systémů v lakovacích provozech [23]. Náročnost stoupá úměrně s požadavky na ostrost a kvalitu záznamu, protože i drobná kontaminace výrazně snižuje kontrast obrazu. U kamer a projektorů, které při vlastní činnosti nebo při provozu zábleskových světel odvádějí velké množství tepla, je riziko ještě vyšší. Zvýšená teplota podporuje vytvrzení laku přímo na povrchu čoček a takto vytvořená vrstva může vést k trvalému poškození optiky [26].

Pro omezení negativních dopadů se používá ochranný kryt čočky, případně celé kamery nebo senzoru. Kryt sice snižuje přímé usazování částic, avšak jeho povrch je i tak náchylný k hromadění prášku, a proto se běžně kombinuje s trvalým ofukem stlačeným vzduchem, který částice odnáší z kritické zóny [21].

Je-li to možné, doporučuje se umístit kameru mimo lakovací kabinu, kde je kontaminace práškovou barvou minimální. Takové uspořádání zpravidla nepřináší zásadní nevýhody, zvyšuje kvalitu pořízeného snímku a současně snižuje provozní náklady [23]. Při volbě umístění je však nutné zohlednit i intenzitu záblesků používaných při snímání, protože silné světelné pulzy mohou dočasně vyřadit z provozu plamenové detektory, které sledují vnitřní prostor kabiny a vyhodnocují riziko požáru [23].

Práškové částice nepůsobí na optické senzory pouze jako sediment na objektivu. Jejich přítomnost v ovzduší vytváří nepravidelný aerosol, který rozptyluje či odráží laserové a infračervené paprsky a tím vyvolává chyby měření [23]. Tento jev se často projevuje u bezpečnostních optických bran, které v prostředí s vysokou prašností dlouhodobě signalizují přerušení svazku, přestože k reálnému narušení nedošlo. Podobné problémy vznikají i u laserových dálkoměrů a třírozměrných skenerů, kde se rozptýlené částice projevují jako náhodný šum a snižují přesnost rekonstrukce [26].

Koncentraci suspendovaných částic lze snižovat ventilací kabiny a účinnou filtrací, avšak úplná eliminace tohoto vlivu není dosažitelná. V průmyslové praxi se proto častěji nasazují senzory, které jsou vůči prašnému prostředí intrinsicky odolné. Typickým příkladem je bezpečnostní nášlapná podložka, která bez problémů nahrazuje optickou bránu a není ovlivňována vysokou koncentrací prášku [26].

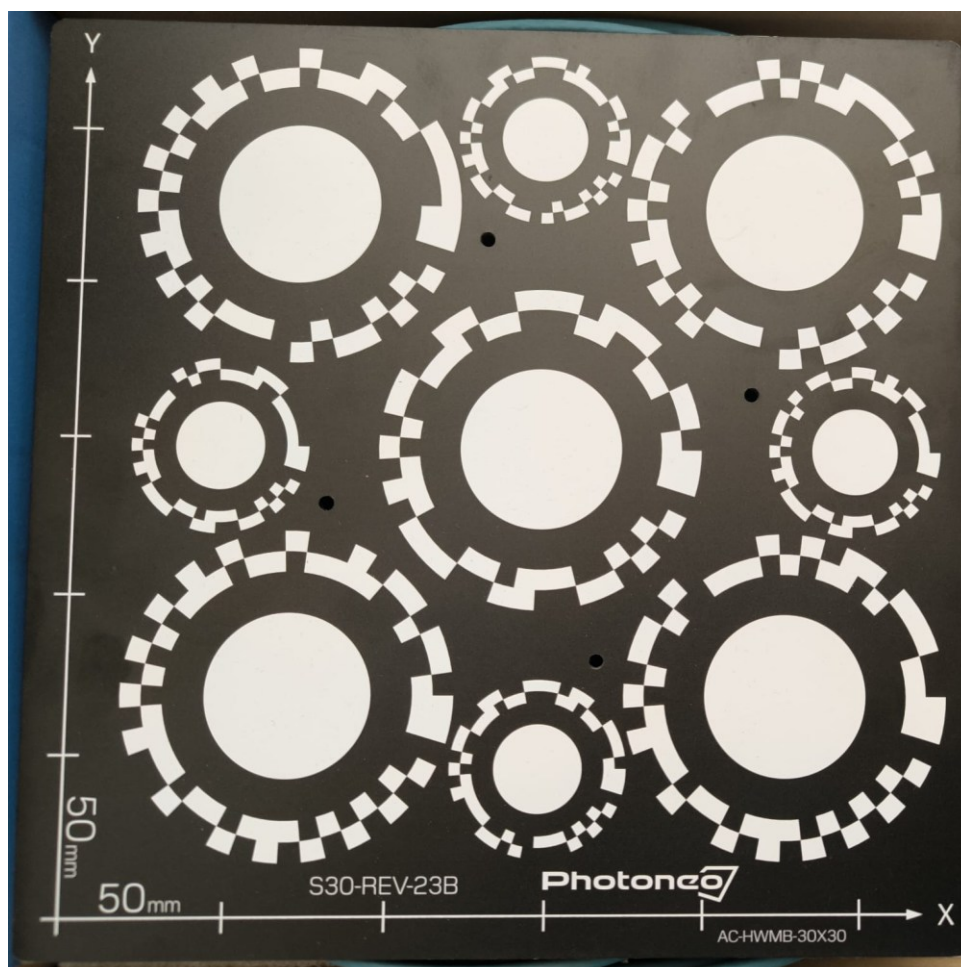
## **2.4 Kalibrace robotu a kamerového systému**

Kalibrace robotu a 3D kamerového systému je zásadním předpokladem správné funkce celého zařízení, protože právě tato kalibrace určuje přesnost měření i časovou synchronizaci mezi oběma prvky [6]. Bez pečlivého vymezení vzájemné polohy a orientace by bylo získané souřadnicové rozhraní nepoužitelné a integrace by selhala [30]. K dispozici je několik kalibračních metod, z nichž každá přináší odlišnou míru přesnosti a pracnosti, volba vhodného postupu závisí na požadovaných tolerancích aplikace a na konstrukci pracoviště [6]. Pro udržení dlouhodobé přesnosti se kalibrace provádí periodicky, protože mechanické opotřebení nebo drobné konstrukční změny mohou postupně zvyšovat chybu transformace [30].

### 2.4.1 Metody kalibrace a jejich využití

Kalibrace souřadnicových systémů kamery a robotu je klíčovým předpokladem pro přesnou lokalizaci a opakovatelnou manipulaci s dílci. Bez ní vzniká geometrická chyba, která se kumuluje v trajektoriích a může vést k defektům nánosu laku nebo ke kolizím. V praxi se u lakovacích buněk nasazují čtyři hlavní strategie, jejichž vhodnost závisí na požadované přesnosti, dynamice procesu a dostupné automatizaci [5].

Nejuniverzálnější postup využívá rozmístění pevně definovaných značek, či značky v zorném poli kamery i v pracovním prostoru robotu, viz Obrázek 12. Při této kalibraci se postupuje tak, že je nejdříve vyfocena tato značka, kamera následně určí její pozici ve svém souřadném systému. Pozice této značky je následně zjištěna i v souřadném systému robotu. Toho se docílí pomocí kalibračního koncového efektoru namontovaného na robotově. Po zjištění obou pozic lze vypočítat transformační matici.



Obrázek 12 Kalibrační vzorec

(zdroj: Vlastní)

Výhodou je vysoká flexibilita při libovolné konfiguraci kamery a snadná recalibrace po servisním zásahu. Nevýhodou je časová náročnost ručního najíždění a citlivost na přesnost definice markeru [13].

Při tzv. hand-eye uspořádání je 3D kamera napevno uchycena na přírubě robotu. Kamera snímá neměnnou kalibrační desku umístěnou v pracovním prostoru a robot v několika pozicích zaznamená relativní polohu kamery vůči desce; algoritmus  $AX = XB$  pak určí transformační vztah „oko-ruka“. Metoda je vysoce přesná a umožňuje kontinuální přepočet trajektorií při pohybu dílce, avšak zvyšuje setrvačnost ramene a vyžaduje tuhou montáž kamery [31].

Pro aplikace, kde se poloha kamery může měnit (vibrace, časté čištění), bývá nejrychlejším řešením kalibrace pomocí kalibračního etalonu (koule známého průměru) připevněného na poslední ose robotu. Po jejím opakovaném nasnímání vypočítá software transformační matici ze souřadnic odvozených z obrazu a souřadnic TCP z řídicí jednotky. Proces lze plně automatizovat a vyžaduje minimum zásahů obsluhy, nicméně chyba může při malém počtu snímků přesáhnout 5 mm a výsledek citlivě závisí na osvětlení i přesnosti sférického etalonu [5].



Obrázek 13 Kalibrační etalon (koule)

(zdroj: vlastní)

V situaci, kdy kamera sleduje dopravník a robot pracuje mimo její FOV (zorné pole), se používají referenční markery přímo na paletě či dopravníkové lince. Kamera určí polohu markeru v translační ose a řadič ABB robotu načte tuto informaci prostřednictvím tzv. conveyor tracking card, takže absolutní poloha markeru vůči robotu nemusí být známa. Robotické programy pak transformují trajektorii na základě aktuální polohy markeru, což umožňuje kompenzovat posun nebo natočení dílce během provozu [30].

Shrneme-li přednosti jednotlivých přístupů, markerová a hand-eye kalibrace dosahují při správném provedení chyby pod 2 mm, a jsou proto vhodné tam, kde je nutná detailní 3D rekonstrukce povrchu. Pro robotické lakování však většinou postačuje přesnost  $\pm 5$  mm; z hlediska poměru nákladů a užitku se proto často upřednostňuje metoda sférického etalonu nebo dopravníkové markery, které lze plně integrovat do automatického cyklu a snadno periodicky opakovat bez odstávky linky [31].

### 3 OPTIMALIZACE TROJEKTORIÍ LAKOVACÍHO ROBOTA

Optimalizace trajektorií lakovacího robotu je zásadní pro dosažení požadované kvality povrchu, vysoké efektivity a splnění taktu výroby. Kvalita nánosu totiž úzce souvisí s tím, zda stříkací tryska sleduje optimální vzdálenost, úhel i rychlost vůči každému bodu lakovaného dílce [3]. Při tvorbě programu se proto zkušený technik musí zajímat jak o detailní znalost geometrie dílu, tak o praktické know-how lakýrníků, kteří upozorní na plochy náchylné k přestříkům či nedostříkům. Současně je nutné zvládnout pokročilé funkce řídicího systému robotu, jako je interpolace orientace nástroje a synchronizaci trysky s přívodem barvy [5].

Prvním krokem je detailní analýza CAD modelu dílce. Ostré hrany, hluboké kapsy a stíněné plochy se označí jako kritické a pro každou z nich se stanoví specifický úhel nástřiku, rychlost průchodu a překryv sousedních drah. Do návrhu se zároveň promítají parametry předřazených operací (předúpravy, sušení).

Nasazení 3D kamerového systému posouvá proces dál. Kamera nejprve nasnímá skutečnou polohu a orientaci zavěšeného dílce a software v reálném čase upraví trasu robotu tak, aby vzdálenost trysky, rychlost i překryvy zůstaly v mezích definovaných optimalizační metodikou. Tímto adaptivním řízením lze bez ručních korekcí lakovat i díly, které nelze nebo není ekonomické uchytit zcela rigidně [19]. Přestože integrace senzoriky zvyšuje počáteční náklady a nároky na kalibraci, výsledkem je program schopný autonomně kompenzovat polohové odchylky dílce na stojánku i na pohybujícím se dopravníku. Výrobce tak získá vyšší kvalitu, nižší spotřebu materiálu a bezpečnější provoz, protože potřeba manuálních zásahů do procesu se výrazně snižuje [3].

### 3.1 Nejednoznačné upnutí dílu

Nejednoznačné upnutí patří k hlavním zdrojům odchylek v robotickém lakování. Jakmile se skutečná poloha obrobku odchýlí od naučené trajektorie, roste riziko kolize trysky s dílcem a objevují se lokální nedostřiky či přestřiky, které snižují jakost povrchu [3]. Tento problém se výrazně prohlubuje v moderních flexibilních linkách, jež musejí obsloužit široké spektrum tvarově rozdílných výrobků v krátkých výrobních sériích. Současný průmysl přitom očekává, že lakovací buňka zvládne rychlou přestavbu bez dlouhých prostojů a s minimální manuální asistencí; jinak klesá produktivita a roste zmetkovitost [19].

Technický limit neleží v kinematických schopnostech robotu ani v principu nanášení nátěru, ale v mechanickém upnutí různorodých dílců. Pro zajištění úplného pokrytí barvou musí být přípravek dostatečně rigidní, ekonomicky přijatelný a univerzální pro dané portfolio. Takové kompromisní řešení je však dosažitelné s omezeními, která se projevují nutností většího přesahu drah nebo sníženou rychlostí cyklu.

Pokud kombinace flexibility a pevného upnutí není realizovatelná, nastupuje zkušený lakýrník, jenž vizuálně identifikuje nedostatečně zalakované oblasti a provádí ruční opravy. Tento krok prodlužuje takt, zvyšuje spotřebu materiálu a omezuje potenciál plné automatizace [3]. Východiskem mohou být adaptivní přípravky, inteligentní 3D inspekce a algoritmy dynamického přepočtu trajektorií, které dokážou kompenzovat drobné odchylky bez manuálního zásahu [19].

## **II PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 DEFINICE CÍLE A PROBLEMATIKY

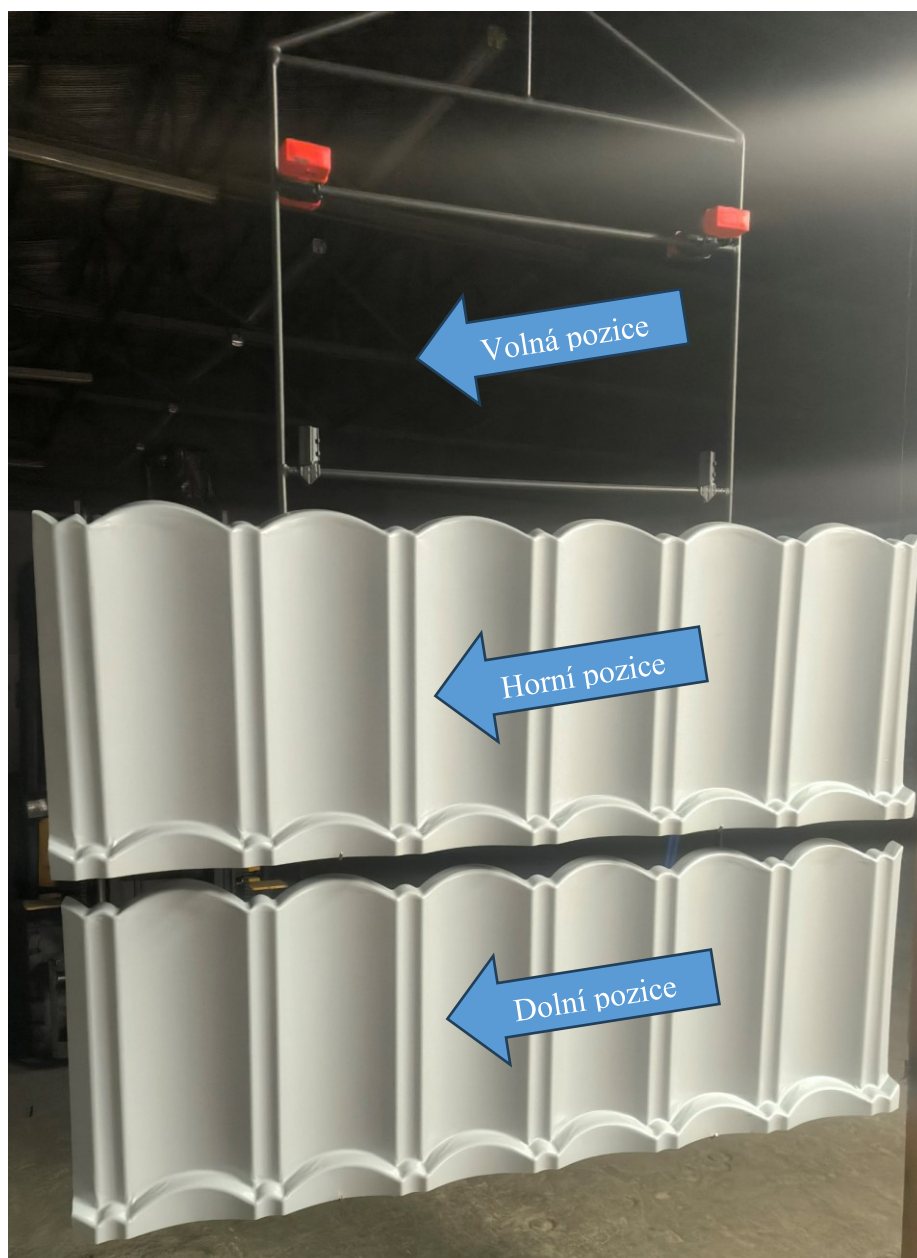
Problematika, která je v rámci této práce řešena, se týká nepřesného a nedostatečně definovaného způsobu uložení dílce, kterým je v tomto konkrétním případě plechová střešní taška. Tato střešní taška má být automaticky lakována práškovou barvou s vysokými nároky na kvalitu výsledného povrchu. Motivací této práce je tedy možnost dosažení vyšší kvality lakování uvedeného typu střešní krytiny a zároveň zvýšení efektivity celého procesu.

Problematika kamerových systémů v kombinaci s robotem je specifikována následovně. Plechové střešní tašky jsou uloženy na závěsných nosičích, které jsou opatřeny háky pro uchycení spodní části tašky a magnety zajišťujícími její přichycení. Tyto nosiče jsou následně unášeny dopravníkovým systémem. Problémem tohoto typu nosiče je skutečnost, že při ručním zavěšování tašek dochází často k nežádoucímu posunutí dílce v ose X ve směru pohybu dopravníku. Rovněž se může stát, že taška je zavěšena výše než v optimální poloze, což je způsobeno poškozením háků nebo jejich nesprávným vložením do nosiče. Nosiče následně procházejí kompletním procesem lakování a poté i vypalovací pecí. Vzhledem k jejich lehké konstrukci často dochází k deformacím vlivem působení vysokých teplot při průchodu pecí. Uvedené faktory způsobují nejednoznačné upnutí dílců. V této práci je předpokládáno, že tyto nosiče nelze nijak upravit.



Obrázek 14 Střešní taška

*(zdroj: vlastní)*



Obrázek 15 Nosič tašek se 2 obsazenými pozicemi

*(zdroj: vlastní)*



Obrázek 16 Robotické pracoviště

*(zdroj: vlastní)*

#### 4.1 Volba kamerového systému

Pro realizaci navrhovaného řešení byla provedena volba vhodného kamerového systému, který musí splňovat požadavky na přesnost, rozlišení a schopnost efektivní integrace do automatizovaného robotického procesu lakování. Na základě analýzy dostupných zařízení byl pro aplikaci zvolen systém MotionCam-3D Color L, jehož technické specifikace jsou uvedeny v Tabulce 1.



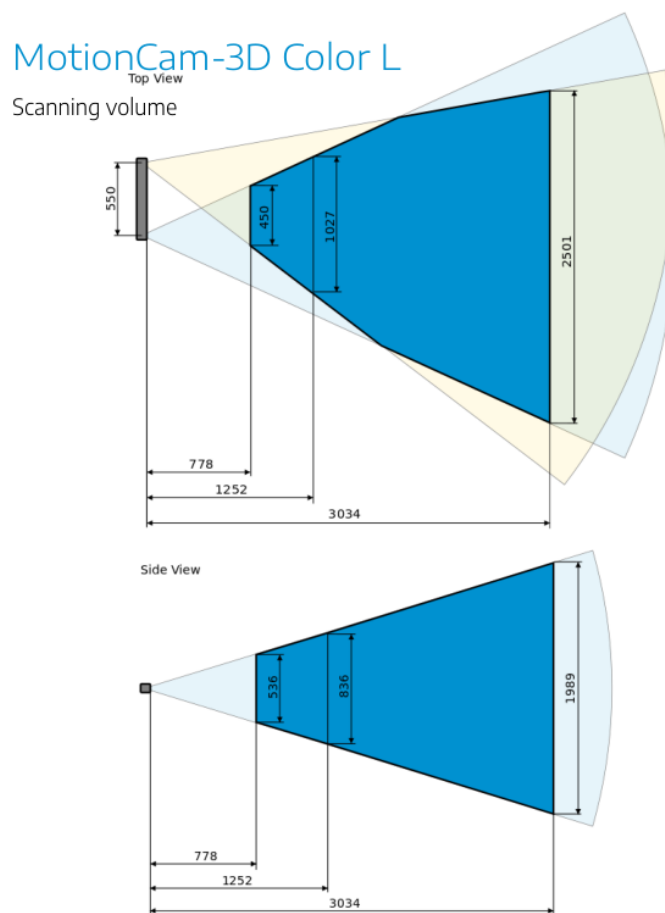
Obrázek 17 Kamera MotionCam-3D Color L

(zdroj: [31])

Tabulka 1 Specifikace kamerového systému

| MotionCam-3D Color L    |                  |
|-------------------------|------------------|
| Rozlišení 3D skenu      | 1 680 x 1 200 px |
| Rozlišení barevné fotky | 2 Mpix           |
| Skenovací vzdálenost    | 778 – 3 034 mm   |
| Kalibrační přesnost     | 0,900 mm         |
| Temporální šum          | 0,100 mm         |
| Maximální FPS*          | 2 fps            |
| Velikost                | 628 x 68 x 85 mm |
| Váha                    | 1 150 g          |

(zdroj: [31])



Obrázek 18 Měřicí objem kamery MotionCam-3D Color L

(zdroj: [31])

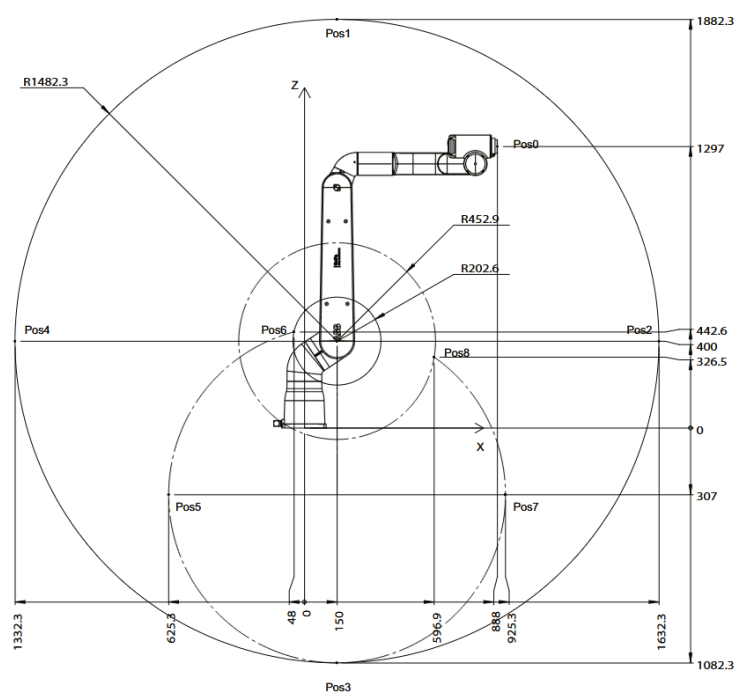
## 4.2 Volba robotického systému

K experimentálnímu ověření navrženého systému v rámci této bakalářské práce byl využit kolaborativní robotický systém ABB GoFa CRB 15000 dostupný ve společnosti zaměstnavatele. V době realizace praktické části bakalářské práce nebyl robot nasazen v jiných aplikacích, a bylo jej proto možné alokovat pro potřeby experimentů. Jeho technické parametry a funkční charakteristiky splňují požadavky definované cílovou aplikací a jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 2 Specifikace robotu GoFa CRB 15000

| GoFa CRB 1500 10        |                     |
|-------------------------|---------------------|
| Dosah                   | 1 520 mm            |
| Nosnost                 | 12 kg               |
| Počet os                | 6                   |
| Stupeň krytí            | IP67                |
| Typ kontroléru          | C30                 |
| Maximální rychlost TCP  | 2 m/s               |
| Maximální zrychlení TCP | 28 m/s <sup>2</sup> |
| Opakovatelnost          | 0,02 mm             |
| Váha                    | 51 kg               |

(zdroj: [30])



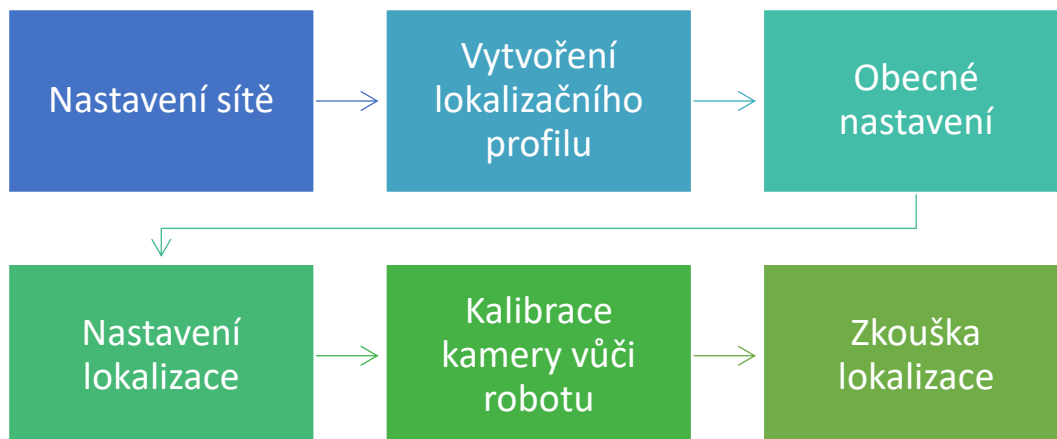
02 GoFa 10 Working range, Side view

Obrázek 19 Pracovní obálka robotu GoFa CRB15000

(zdroj: [31])

## 5 NASTAVENÍ KAMEROVÉHO SYSTÉMU

Nastavení kamerového systému probíhá v definovaných krocích.



### 5.1 Nastavení pozice a upevnění kamery

Kamera byla upevněna na hliníkovou konstrukci prostřednictvím otočného kloubu přišroubovaného do závitu zařízení, čímž byla zajištěna vysoká tuhost montáže a současně možnost přesného nastavení polohy. Během instalace byl identifikován problém s přírodním kabelem vystupujícím ze zadní části kamery - vzhledem k nadměrné délce konektoru a omezené ohebnosti kabelu bylo znemožněno správné vertikální usazení kamery na hliníkovém profilu, v němž docházelo k nežádoucímu ohybu vodiče.

Pozice kamerového systému byla určena jako klíčový parametr jeho funkčnosti. S ohledem na rozměry snímaného držáku s dílci musela být kamera umístěna ve vzdálenosti umožňující zahrnutí celého držáku i všech dílců do zorného pole. Současně bylo nezbytné zvolit odpovídající výšku a úhel upevnění, aby systém Photoneo spolehlivě zachytil všechny kontury tašek. Další omezení byla definována vzájemnou polohou kamery a robota; držák s dílci nesměl být robotem zakrýván a kinematika robota ABB GoFa musela umožnit provedení požadovaných manipulací s taškou.

Na základě výsledků skenování a měřicího objemu kamery viz. Obrázek 18, byla pracovní vzdálenost nastavena na přibližně 2,7 m. Z analýzy snímků vyplynulo, že uvedená vzdálenost převyšuje minimální požadavek na velikost, což se projevilo značnými rezervami ve skenovací oblasti. Tato hodnota byla nicméně upřednostněna, neboť poskytuje vyšší stabilitu systému v situacích, kdy se jednotlivé tašky nacházejí na okraji zorného pole, kde může být jejich tvar hůře vyhodnocován. Současně bylo v této poloze umožněno umístění

robota před kameru, čímž byl zjednodušen kalibrační proces mezi kamerou a robotickým manipulátorem.

Výška kamery byla nastavena tak, aby horní hrana tašky byla situována 1 m pod hranou kamery, a následně byla kamera nakloněna do úhlu zajišťujícího umístění tašek přibližně ve středu zorného pole.

Střed kamery je vůči snímané tašce posunut o 250 mm. Jak je ilustrováno na obr. 20, toto posunutí bylo zvoleno s ohledem na skutečnost, že snímací oblast kamery není symetricky kónická a snímací hlavice je umístěna na levé straně.



Obrázek 20 Upevnění kamerového systému

*(zdroj: vlastní)*

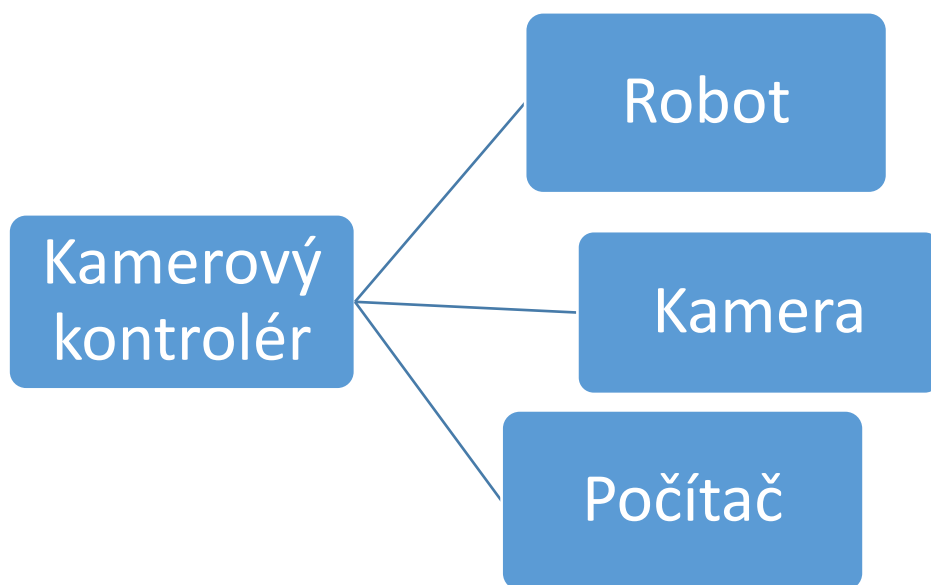


Obrázek 21 Montážní otvor kamery velikosti 3/8"

*(zdroj: vlastní)*

## 5.2 Nastavení kamery

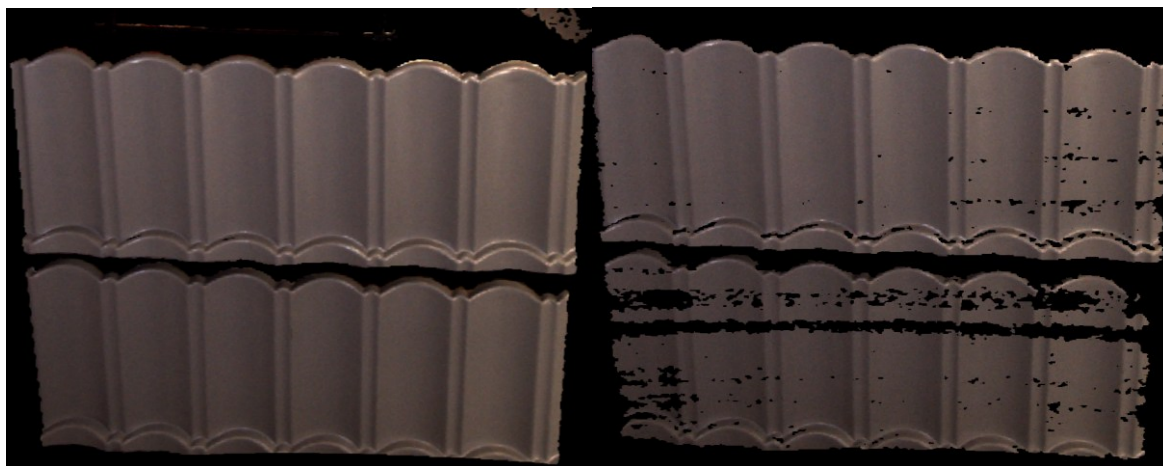
K nastavení kamery byl využit kamerový ovladač, tedy průmyslový počítač s operačním systémem Linux, k němuž byly připojeny klávesnice, myš a monitor. Po spuštění systému a připojení kamery byl nejprve vytvořen účet správce a poté bylo podle manuálu přistoupeno k síťovým nastavením kamerového systému. Prvním krokem bylo nakonfigurování síťových rozhraní. Kamerový ovladač je vybaven několika porty, prostřednictvím nichž komunikuje s různými zařízeními, což zajišťuje vysokou flexibilitu při návrhu topologie. Pro experiment bylo zvoleno nejjednodušší uspořádání, jak je znázorněno na přiloženém schématu. Protože ovladač funguje jako DHCP server, není nutné ručně nastavovat adresy pro rozhraní kamery, avšak manuál doporučuje statické přiřazení z důvodu stability komunikace. Nejprve byla proto zadána statická adresa IPv4 pro rozhraní určené ke komunikaci s kamerami, jež slouží jako záložní kanál pro případ nedostupnosti statického rozhraní IPv6, jehož parametry nelze uživatelsky měnit.



V dialogu síťových nastavení byla dále definována IP adresa robota a ovladače na rozhraní vyhrazeném pro vzájemnou komunikaci; ovladač i robot musely být umístěny v téže podsíti. Pomocí softwaru PhoXi Control v modulu programů ovladače bylo následně navázáno spojení s kamerou a zadána její statická adresa ve shodné podsíti s ovladačem. Po konfiguraci komunikačních rozhraní byla kamera otestována, avšak test byl neúspěšný z důvodu nevhodně zvoleného ethernetového kabelu mezi ovladačem a PoE injektorem, použitý kabel byl příliš starý a nadměrně dlouhý, což způsobovalo nestabilitu linky. Po

náhradě kabelem kategorie 5E, doporučeným výrobcem, byla funkčnost kamery i stabilita spojení úspěšně ověřena.

Následně byly v prostředí PhoXi Control laděny parametry skenování, zejména expozice, délka projekce světelných vzorců, algoritmus a úroveň filtrace. Bylo zjištěno, že výchozí hodnoty jsou ve většině případů dostačující, přesto byla podle doporučení provedena rychlá kalibrace. Tato procedura pořizuje několik snímků s různým nastavením jednoho parametru, z nichž uživatel volí nejostřejší a nejméně zrnitý; poté se analogicky postupuje k dalším parametrům. Po dokončení tohoto postupu byl výsledný snímek mírně vylepšen: hrany byly ostřejší a výskyt nežádoucího šumu na povrchu plechu se snížil.



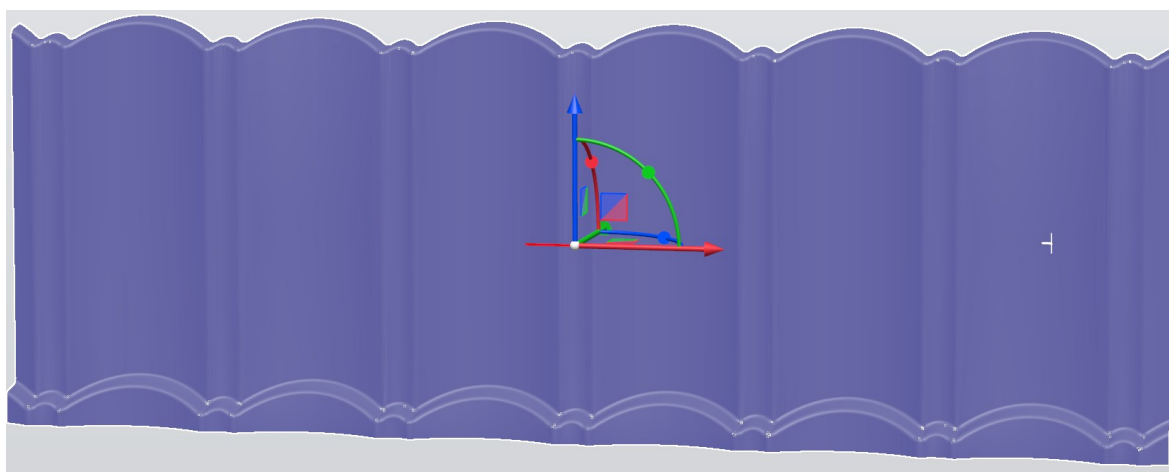
Obrázek 22 Porovnání vhodné a špatné expozice  
(zdroj: vlastní)

### 5.3 Nastavení lokalizace

Nastavení lokalizace představuje proces, v jehož rámci je definován díl, jenž má být v prostoru vyhledán a jehož poloha je pro následné operace klíčová. Správná lokalizace je považována za nezbytný předpoklad dalších kroků práce, a proto je její precizní konfigurace pokládána za zásadní.

V první fázi byla v softwaru Locator Studio na ovladači zvolena konfigurace lokalizace. Vzhledem k dostupnosti více metod bylo upřednostněno řešení vycházející z CAD modelu plechové tašky; alternativou by mohla být lokalizace založená na umělé inteligenci vyžadující ovšem natrénování modelu na obdobných objektech. Po výběru metody byl zadán název a unikátní identifikační číslo konfigurace.

Následně byl do systému importován trojrozměrný model ve formátu STL, jenž byl předtím převeden z formátu OBJ pomocí softwaru Autodesk Fusion 360. Důvod pro tento převod je, že formát STL byl jako jediný podporovaný. Jako počáteční referenční bod modelu byl určen geometrický střed dílce, od něhož jsou odvozovány souřadnice předávané robotu a odesílané do řídicího systému. Tento referenční bod i orientace modelu mohou být v případě potřeby modifikovány, avšak pro danou aplikaci nebyla taková úprava považována za nutnou. Umístění uvedeného bodu je zobrazeno na Obrázku 23, kde červená barva označuje osu X, modrá osu Z a zelená osu Y.



Obrázek 23 Pozice referenčního bodu na dílci

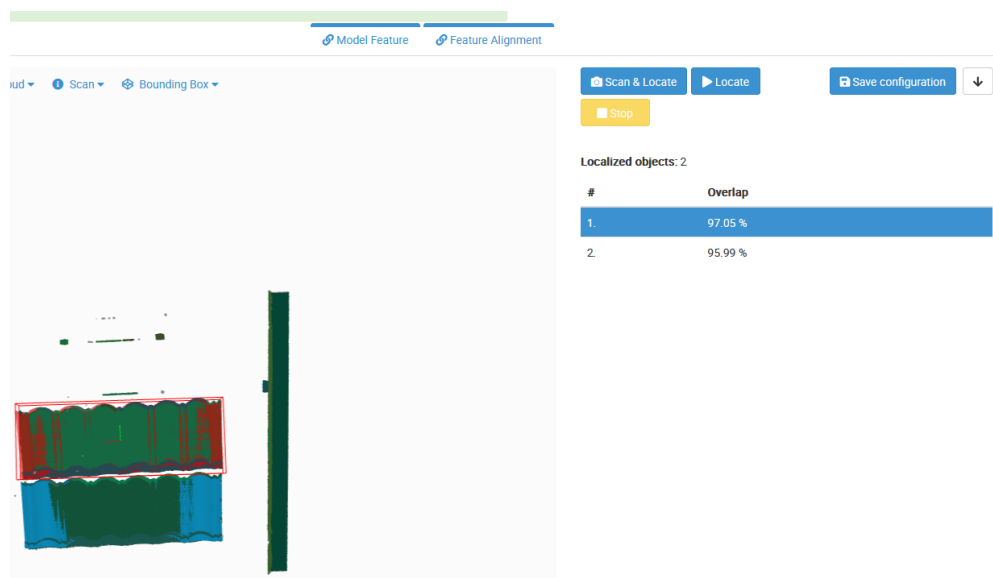
(zdroj: vlastní)

### 5.3.1 Nastavení lokalizace dílců

Po nahrání trojrozměrného modelu bylo přistoupeno k nejnáročnější části konfigurace, kterou představuje samotné nastavení lokalizace dílců. V záložce „Vision System“ byl nejprve vytvořen systém s unikátním identifikačním číslem, názvem a definovaným produktem, jenž má být lokalizován. Následně byla určena kamera, která bude pro snímání používána, a do prostředí byl importován profil pro lokalizaci exportovaný ze softwaru PhoXi Control.

Po zadání všech údajů byl zkonfigurován lokalizační profil, jenž zahrnuje veškeré parametry nezbytné pro vyhledání a umístění 3D modelu v trojrozměrném skenu vytvořeném kamerou.

Pro ověření správnosti konfigurace byly lokalizované objekty umístěny do zorného pole kamery a vyhledávání bylo spuštěno funkcí „Locate“. Výstupem procesu bylo lokalizační skóre doplněné grafickou vizualizací nalezených objektů. Parametry byly následně iterativně laděny v různých orientacích modelu s cílem zvýšit přesnost; vzhledem k tomu, že nebylo nutné dodržovat pevný takt lokalizace, byla upřednostněna maximální kvalita výsledků před rychlostí výpočtu. Poté byl definován omezující tzv. bounding box, který redukuje vyhledávací oblast na zadané hodnoty hloubky, šířky a výšky, čímž byla současně zvýšena přesnost i rychlost zpracování. Po dosažení lokalizačního skóre 97,05 % a 95,99 % byla konfigurace uložena (viz obr. 24).



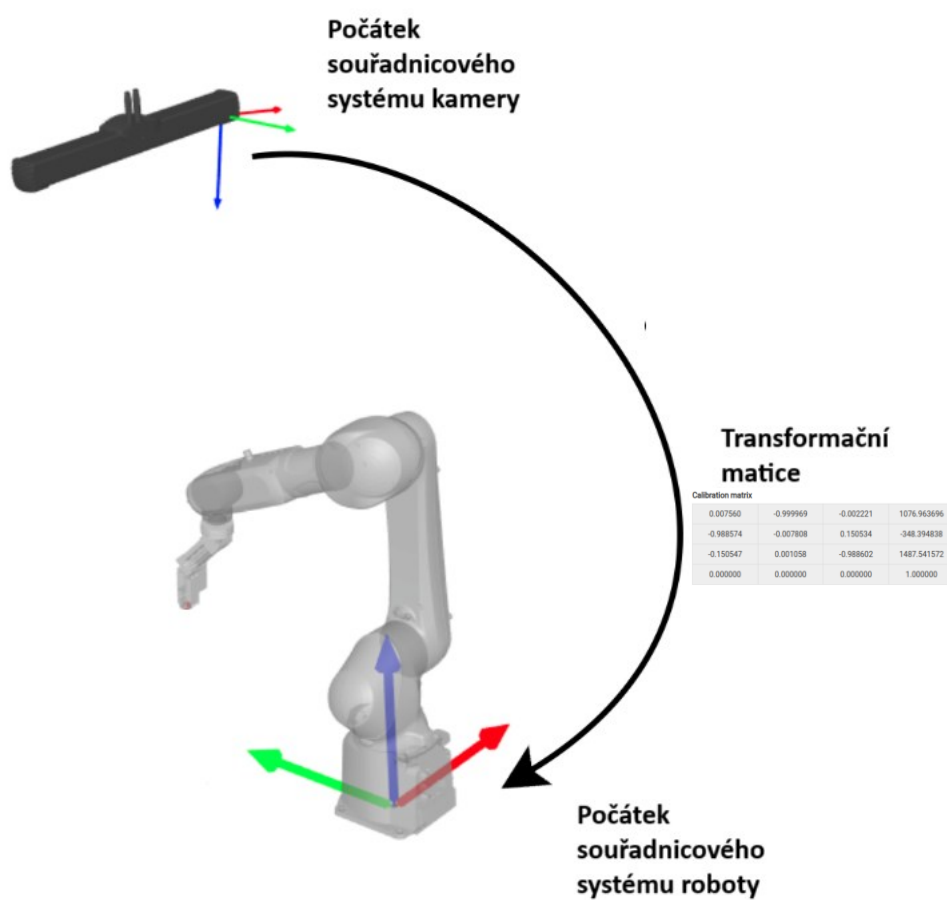
Obrázek 24 Lokalizace dílců

(zdroj: vlastní)

## 5.4 Kalibrace kamery vůči robotu

Kalibrace kamerového systému vůči robotu může být realizována několika metodami; ve všech případech musí být zajištěna pevná a neměnná poloha kamery i manipulátoru. Před stisknutím tlačítka „Start Calibration“ je v hlavní nabídce vybrán konkrétní typ kalibrační procedury. Pro účely tohoto experimentu byly otestovány dvě metody, a to kalibrace využívající kalibrační míček a kalibrace s kalibračním vzorcem. Druhá z uvedených metod, často označovaná jako intrinsická kalibrace, neprokázala požadovanou přesnost. Metoda intrinsická kalibrace je prováděna vložením kalibrační podložky do zorného pole kamery a aktivací funkce „Calibrate“, přičemž souřadnicový systém kamery je odvozen z této podložky a následně je na jejím povrchu vytvořen pracovní rámec robotu prostřednictvím trojbodové kalibrace. Snížená přesnost může být způsobena kumulací chyb v kalibraci kamerového systému a v kalibraci manipulátoru. Bylo zjištěno, že pevnější fixace podložky by přesnost sice navýšila, avšak výsledné souřadnice lokalizovaných objektů by se nacházely v souřadnicovém systému pracovního rámce, což by komplikovalo úpravy trajektorií z důvodu omezené volby os posunu.

Z uvedených důvodů byla preferována kalibrace pomocí kalibračního míčku, označovaná jako extrinsická, při níž jsou souřadnice lokalizovaných objektů transformovány ze souřadného systému kamery do uživatelského rámce vycházejícího ze základny robotu (viz Obrázek 25). Kalibrace vyžaduje plně funkční robotický manipulátor, který je pro tento účel přepnut do režimu ručního ovládání. Kalibrační míček je pevně upnut ke koncové ose; jakýkoli relativní pohyb míčku vůči přírubě během kalibrace by totiž způsobil významnou chybu. Po volbě extrinsické kalibrace a zadání průměru míčku byla procedura inicializována. Manipulátor s míčkem byl pomalu veden v manuálním režimu do zorného pole kamery a první kalibrační bod byl uložen stisknutím „Add Calibration Point“. Do příslušného dialogu byla zanesena konfigurace os a poloha TCP. Postup přidávání bodů v odlišných pozicích byl zopakován desetkrát, čímž byla maximalizována přesnost transformace. U později přidávaných bodů se zobrazovaly odchylky v rozmezí 0,1 mm až 0,7 mm; tyto hodnoty byly akceptovány a kalibrační data byla uložena. Výsledná střední chyba kalibrace činila 0,45 mm a byla považována za vyhovující.



Obrázek 25 Nákres rozdílných souřadnicových systémů a jejich transformace

(zdroj: [31])

## 5.5 Globální nastavení systému

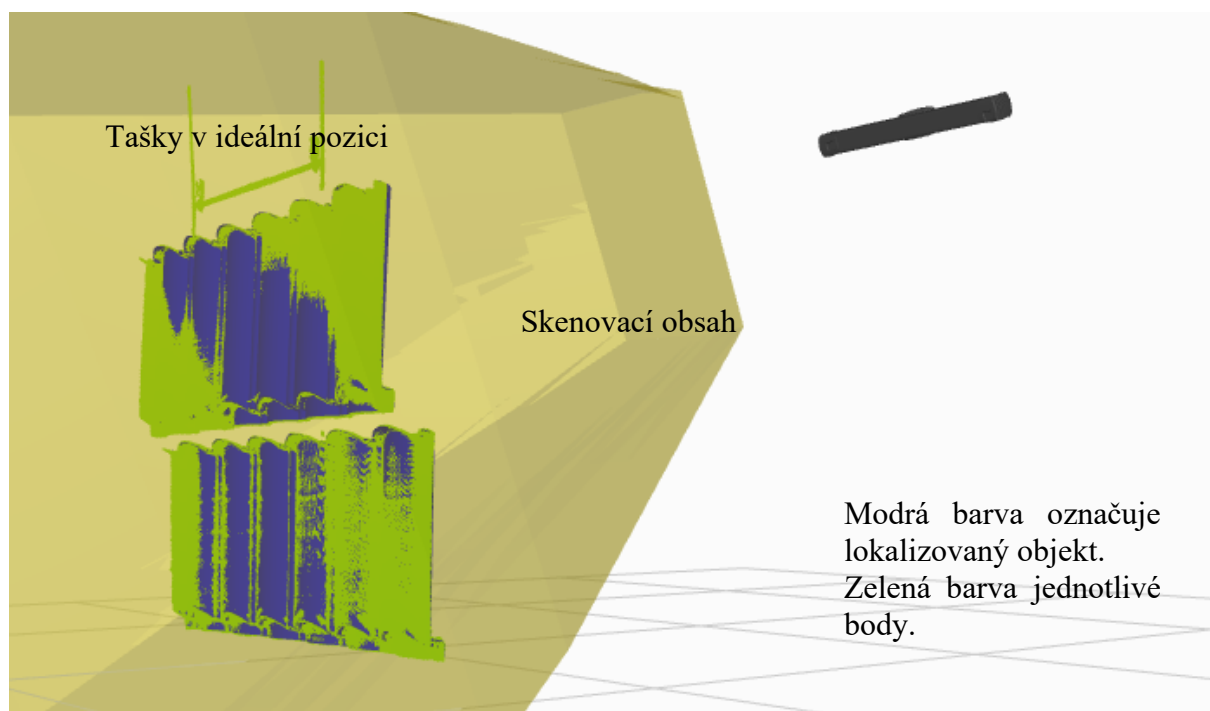
Globální parametry jsou využívány k omezení a přesné konfiguraci procesu lokalizace dílů. Jejich úkolem je zachovat plně odladěnou konfiguraci vyhledávání a současně upravovat pouze data předávaná robotickému systému. V rámci této aplikace byly definovány dvě zásadní položky.

První položkou bylo třídění dílů, které určuje pořadí předávání objektů robotu. Byl zadán směr  $z = +1$ , aby byl nejprve vybírán díl umístěný nejnižší, a následně byly specifikovány směry  $x = +1$  a  $y = -1$ . Tím je zaručeno správné pořadí odesílaných dílů i při nečekaném rozmístění objektů v zorném poli.

Druhou položkou bylo nastavení omezení, jehož účelem je z dalšího zpracování vyřadit díly s nadměrným natočením. Maximální přípustný úhel byl stanoven na  $40^\circ$ , přičemž omezení bylo aplikováno v osách  $Y = +1$ ,  $X = 0$  a  $Z = 0$ . Pokud má být interpretace těchto hodnot jednoznačná, doporučuje se upřesnit, zda představují vektory směrů či příznaky aktivních omezení jednotlivých os.

## 5.6 Spuštění systému lokalizace

Po dokončení konfigurace je systém uložen a následně je spuštěno tzv. „solution“, tedy připravená konfigurace lokalizace. Po jejím aktivování je ověřeno navázání komunikace s robotem a jsou zobrazeny doplňující diagnostické informace. Pro kontrolu parametrů je v záložce „Scan“ aktivována funkce „Scan All“, čímž jsou objekty automaticky lokalizovány a po rozkliknutí každého z nich jsou zobrazeny souřadnice v prostoru. Tím je okamžitě určeno, zda bylo nastavení úspěšné. Po potvrzení správné funkce byly testovány různé orientace tašek, zahrnující jak správné zavěšení, tak i záměrně chybné polohy, a bylo vyhodnoceno, zda byly ve všech případech správně lokalizovány v prostoru.



Obrázek 26 Výsledek lokalizace

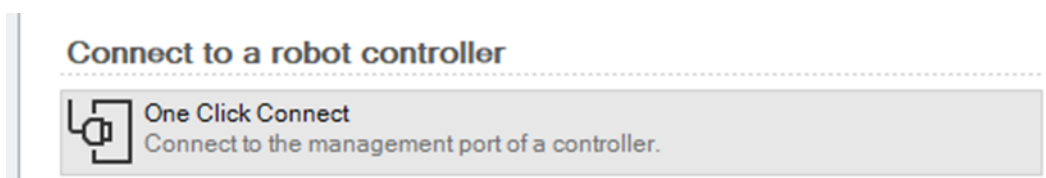
*(zdroj: vlastní)*

## 6 NASTAVENÍ ROBOTICKÉHO SYSTÉMU

Správné nastavení robotického systému ABB GoFa CRB 1500 je nezbytné pro optimální fungování celého systému. Proces zahrnuje postupné kroky od konfigurace řídicí jednotky po výuku jednotlivých trajektorií.

Po zapnutí robotu je nejprve konfigurováno síťové rozhraní a přidělena IP adresa prostřednictvím tzv. teach pendantu, což je dotykové zařízení určené k ovládání a programování robotu. Adresa interní sítě byla nastavena tak, aby odpovídala hodnotě definované v kamerovém ovladači, čímž byla umožněna komunikace mezi kamerovým a robotickým systémem.

Následně byla do řídicího systému přidána základní bezpečnostní konfigurace a následně konfigurace koncového efektoru, která slouží k vizuální kontrole přesnosti manipulace. Počítač byl připojen k programovacímu portu kontroléru a software RobotStudio byl využit k navázání spojení funkcí „One Click Connect“. Po úspěšném připojení byla konfigurace nástroje vložena do hlavního modulu řídicí jednotky. Geometrický model efektoru byl dříve vytvořen v modelovacím prostředí softwaru RobotStudio a virtuálně připojen k robotu. Po nahrání konfigurace do řídicí jednotky byla na teach pendantu spuštěna kalibrace pozice nástroje i jeho těžiště.



Obrázek 27 Funkce one click connect v softwaru RobotStudio

*(zdroj: vlastní)*

### 6.1 Nastavení bezpečnostních funkcí roboty

Pro konfiguraci bezpečnostních parametrů byla na teach pendantu otevřena aplikace SafeMove, která je přístupná z hlavní obrazovky. Při prvním spuštění bylo zjištěno, že pro úpravy je nutné přihlášení s administrátorskými oprávněními, a proto byly použity výchozí přístupové údaje s uživatelským jménem „Admin“ a heslem „robotics“. V prostředí SafeMove bylo umožněno nastavit bezpečnostní dohled nad pohybem robota, vlastnostmi

nástroje a limity rychlosti. V rámci projektu byly definovány bezpečnostní zóny určené pro přechodný a kvazistatický kontakt, které byly součástí výchozí konfigurační šablony. Byly také aktivovány funkce dohledu nad rychlostí nástroje a nad jeho polohou.

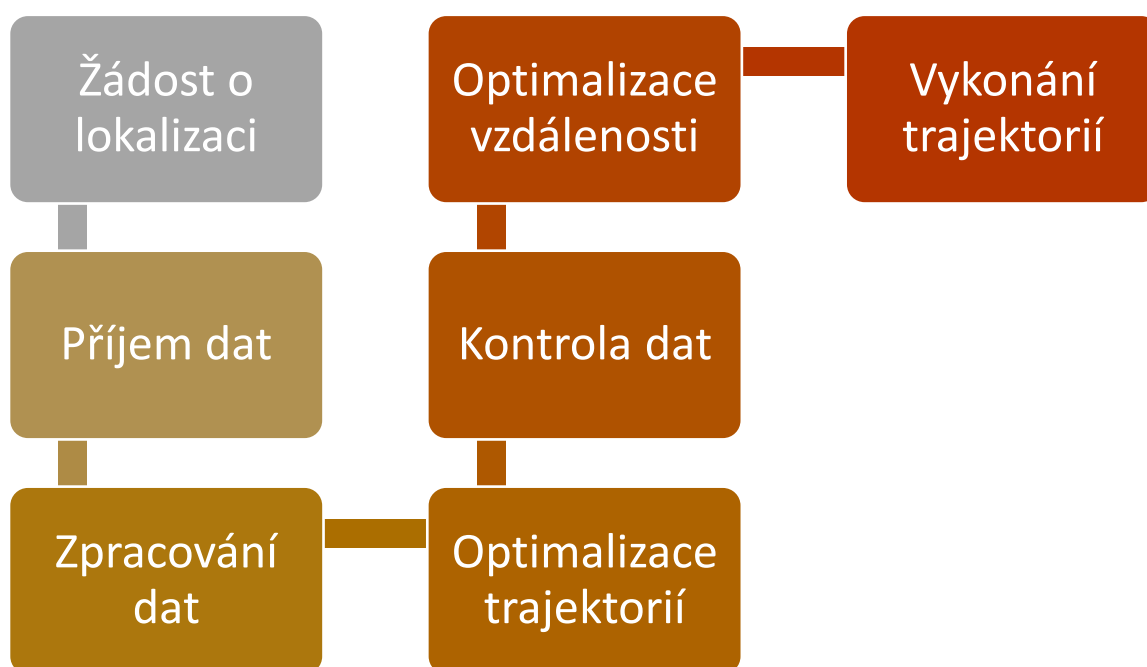
### 6.1.1 Konfigurace bezpečnostních zón

Pro daný úkol byl využit modul pro dohled nad kontaktem s člověkem, jenž je součástí aplikace SafeMove. Na základě charakteru lakovací pistole byl určen typ kontaktu a byly specifikovány vlastnosti nástroje včetně hmotnosti a plochy styku. Limity pro rychlost a sílu nástroje byly nastaveny s ohledem na doporučené hodnoty normy ISO TS 15066, které software automaticky nabízí. Rozměry a poloha bezpečnostních zón byly upraveny tak, aby přesně odpovídaly pracovním prostorovým podmínkám. Při definici složitějších tvarů zón byly přidávány a posunovány vrcholy. Zóna pro přechodný kontakt pokryla celý pracovní prostor robota, zatímco zóna pro kvazistatický kontakt vymezila oblasti s možným rizikem sevření.

Po úpravě parametrů byl proveden proces synchronizace bezpečnostního kontroléru, který se nachází v nabídce Settings – Safety controller. Pro úspěšné dokončení synchronizace byl robot přepnut do manuálního režimu a následně byl přesunut do určených synchronizačních poloh, čímž byla zajištěna správná korelace mezi sledovanou a skutečnou pozicí. V závěrečné fázi byly nastavené bezpečnostní parametry uloženy do řídicí jednotky robota.

## 6.2 Program pro komunikaci a zpracování dat

Komunikace a její následné využití mohou být pro přehlednost rozděleny do několika samostatných částí, které jsou i takto strukturovány v předkládaném kódu. Jednotlivé fáze jsou zobrazeny v následujícím diagramu.



### 6.2.1 Komunikace

Nejprve musí být navázána komunikace s kamerovým systémem a musí být vyžádáno pořízení snímku. Přenos dat z kamery do robotického systému je následně inicializován procedurou `CallAndRecTargets`. V rámci této procedury je prostřednictvím funkce `pho_wait_for_server` ověřována dostupnost serveru na adrese definované konstantou `CameraIP`. Po úspěšném navázání spojení je odeslán požadavek na skenování funkcí `pho_request_scan`, v níž je použit identifikátor `SolutionID` vytvořený v kamerovém systému. Robot poté vyčkává na dokončení skenování prostřednictvím funkce `pho_wait_for_scan_completion`. Jakmile je snímání ukončeno, je vyžádáno zaslání všech detekovaných objektů pomocí funkce `pho_request_get_all_objects`. Tato funkce přijímá identifikátor `SolutionID`, pole `RecTargets` určené k uložení informací o rozpoznaných cílech a proměnnou `NumOfRecTargets` obsahující jejich počet. Údaje o poloze a orientaci detekovaných objektů jsou po přenosu uloženy do pole `RecTargets` datového typu `Robtarget`.

### 6.2.2 Zpracování dat

Po úspěšném přenosu dat z kamerového systému do pole `RecTargets` bylo přistoupeno k jejich zpracování v proceduře `AdjustTargets`. V rámci této procedury je postupně procházeno pole `RecTargets` až do počtu určeného proměnnou `NumOfTargets` a v každé iteraci jsou aktualizována data uložená v poli `RecWobj` typu `wobjdata`. Do atributů `uframe.trans`, které nesou informaci o translaci, a `uframe.rot`, jež popisují rotaci, jsou vždy přiřazeny odpovídající hodnoty převzaté z příslušného prvku pole `RecTargets`. Tímto způsobem jsou pracovní rámce robota průběžně přizpůsobovány aktuálně detekovaným objektům.

### 6.2.3 Kontrola přijatých dat

Kontrola validity zpracovaných dat je realizována v proceduře `CheckRotAndPos`. Tato procedura přijímá mezní hodnoty přípustné rotace kolem os X, Y a Z, zároveň i počet cílů určených ke kontrole. V průběhu zpracování je iterováno přes pole `RecTargets` a u každého prvku je ověřováno, zda jeho rotace – vyhodnocená funkcí `EulerZYX` – a poloha nepřekračují stanovené hranice. Pokud je zaznamenáno překročení kterékoli z limitních hodnot, je do systému zapsána chybová zpráva prostřednictvím `ErrWrite` a běh programu je ukončen příkazem `Stop`. Tímto postupem je zaručeno, že robot pokračuje v práci pouze s daty splňujícími definovaná kritéria a nacházejícími se v bezpečném provozním rozsahu.

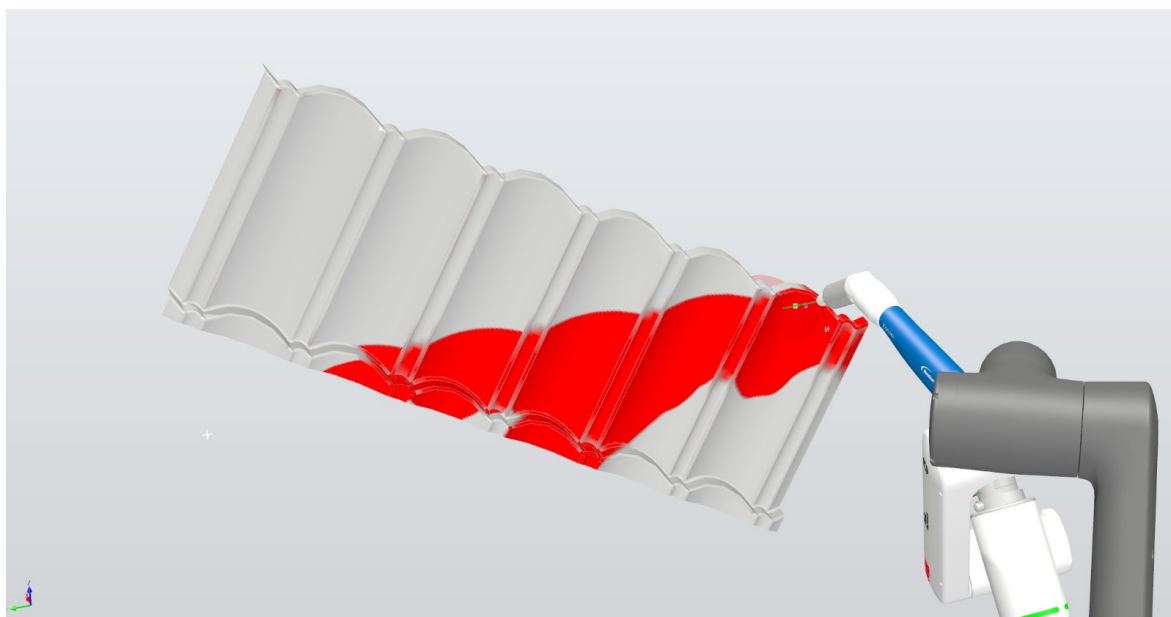
#### 6.2.4 Optimalizace vzdálenosti lakovací pistole od dílce

Optimalizace vzdálenosti lakovací pistole od lakovaného dílce je pro každou trajektorii prováděna ve funkci OptimizeDistance. V této funkci je bod trajektorie posouván v ose y, která je kolmá k povrchu dílce. Výsledná vzdálenost je stanovena na základě rozdílu natočení dílce vůči referenční poloze a koeficientu definovaného uživatelem. Úprava se aplikuje před každým lakovacím pohybem, aby bylo dosaženo optimálního pokrytí i při změně orientace dílce, kdy by trajektorie stříkacího paprsku mohla být ovlivněna gravitací. Posun je prováděn pouze u jednotlivých pohybových segmentů, což umožňuje maximální flexibilitu a současně zachovává stabilitu trajektorie bez rizika kolize hlavice.

### 6.3 Optimalizace trajektorií

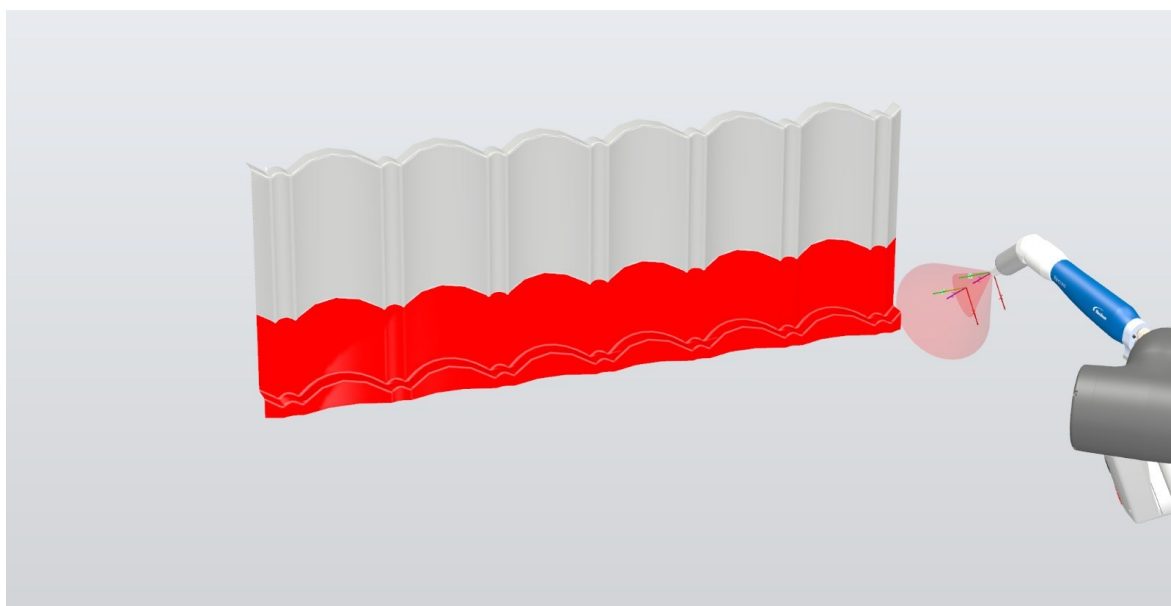
Pro správnou funkci celého systému musí být naučené body uloženy do pracovních objektů, které již obsahují transformační matice přenesené z kamerového systému. Nejprve se importují data s polohami dílců do příslušných pracovních objektů a teprve poté se v těchto objektech učí jednotlivé body. První přenos dat z kamery tedy plní úlohu referenčního kroku. Dílce se umístí co nejpresněji do polohy optimální pro lakování a ponechají se v klidu, aby nedocházelo k pohybu způsobeným volnějším uchycením. Následně je z řídicí jednotky robota odeslána žádost o aktuální souřadnice dílců do řídicí jednotky kamery. Přijaté polohy se zpracují a ověří a v případě správné validace se podle nich dopočítají souřadnice dosud prázdných pracovních objektů. V kódu je vloženo zastavení programu v místě, kde by jinak došlo k projetí dílců, aby bylo možné nové údaje bezpečně uložit, načež je program znovu spuštěn.

Před výpočtem souřadnic je vždy aktivován správný pracovní objekt i nástroj, protože řídicí jednotka převádí naučené body do souřadnicového systému odvozeného z aktuálně vybraného pracovního rámce. Popsaným postupem byly naučeny body pro obě tašky, z nichž každý využívá vlastní pracovní objekt. Po uložení dat byl program spuštěn a vytvořená trajektorie byla zkontrolována. Protože výsledná dráha nevyhovovala požadovaným kritériím, byl postup žádosti o souřadnice opakován a byly upraveny pouze první a třetí bod trajektorie. Po této korekci byla trajektorie znovu ověřena a splnila veškeré požadavky. Pro dodatečnou kontrolu byl jeden z dílců záměrně posunut a program byl znovu spuštěn. Optimalizace trajektorie a vzdálenosti k posunutému dílci proběhla automaticky a systém potvrdil správnou funkci.



Obrázek 28 Znáznornění lakovací trajektorie, která neodpovídá reálné pozici dílce.

*(zdroj: vlastní)*



Obrázek 29 Znáznornění trajektorie optimalizované na dílec.

*(zdroj: vlastní)*

## 7 PRAKTICKÝ TEST

amera byla umístěna do pracovní pozice a následně byla vůči robotu provedena kalibrace. Poté bylo pořízeno patnáct samostatných skenů, jejichž výsledky byly zaznamenány. První dva skeny byly stanoveny jako referenční, protože poloha dílců vůči závěsu zůstala mezi těmito skeny neměnná. Vzhledem k detekci dvou objektů byly jejich souřadnice vyhodnocovány odděleně s ohledem na jejich přiřazení k horní nebo dolní pozici na závěsu.

Ačkoli je závěs konstruován pro uchycení tří tašek, pro potřeby testování byly z důvodu zajištění lepší manipulovatelnosti využity pouze dvě pozice. Lokalizovaná data udávají polohu dílce vzhledem k základně robotu v osách X, Y a Z, orientace je popsána kvaternionem (X,Y,Z,W). Kvaternion je matematický popis rotace v prostoru, kterou popisuje efektivněji a stabilněji než popis Eulerovými úhly; jeho nevýhodou je nečitelnost. Data byla následně zpracována v aplikaci Microsoft Excel. Od hodnot naměřených při dalších skenech byla odečtena průměrná hodnota referenční dvojice, čímž byly získány posuny jednotlivých dílců (viz Obrázek 30). Výsledky byly následně převedeny na milimetry, aby byla usnadněna interpretace.

Stanovení rozdílu orientace vzhledem k referenci vyžaduje práci s kvaterniony, neboť prostý rozdíl mezi jejich složkami nevyjadřuje úhel rotace. Nejprve byl definován rozdílový kvaternion  $Q_d$ , který představuje rotaci potřebnou k přechodu z referenční orientace  $Q_r$  do měřené orientace  $Q_m$ . Tento kvaternion se určí Hamiltonovým součinem.

Rozdílový kvaternion  $Q_d$  se principiálně získá vynásobením měřeného kvaternionu  $Q_m$  inverzním kvaternionem k referenčnímu, tedy  $Q_r^{-1}$ . Matematický vztah pro tento výpočet je

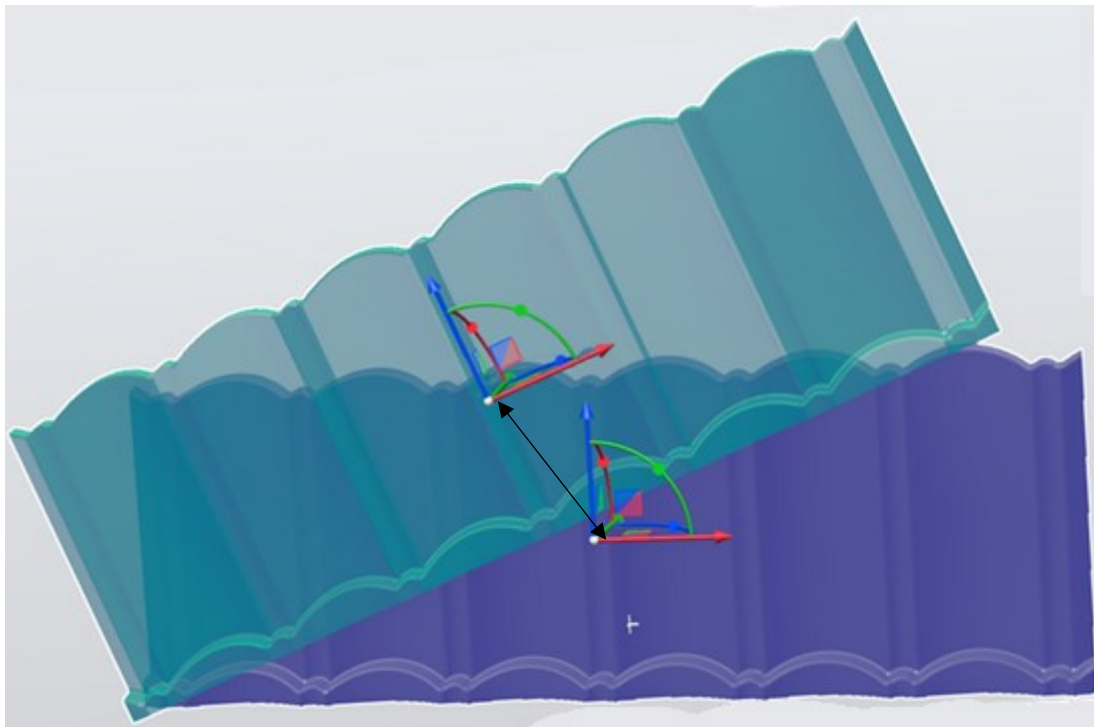
$$Q_d = Q_m * Q_r^{-1}$$

Pro kvaterniony, které popisují rotaci v 3D prostoru (a jsou tedy jednotkové, s normou rovnou 1), platí zjednodušení, že jejich inverze ( $Q_r^{-1}$ ) je rovna jejich matematické konjugaci, značené jako  $Q_r^*$ . Konjugaci kvaternionu  $Q_r$  provedeme jednoduše změnou znaménka u jeho vektorových složek (X, Y, Z), výsledkem je tedy

$$Q_r^* = (W_r, -X_r, -Y_r, -Z_r)$$

Praktický výpočet rozdílu v natočení se tak redukuje na Hamiltonův součin měřeného kvaternionu  $Q_m$  a konjugovaného referenčního kvaternionu  $Q_r^*$ .

$$Q_d = Q_m * Q_r^*$$



Obrázek 30 Posun dílců v prostoru

(zdroj: vlastní)

Tabulka 3 Referenční měření

| Reference | Pozice v m |        |       | Kvaternion |       |       |       |
|-----------|------------|--------|-------|------------|-------|-------|-------|
| Měření č. | X          | Y      | Z     | X          | Y     | Z     | W     |
| 1 horní   | 1,475      | -0,215 | 0,544 | 0,483      | 0,478 | 0,514 | 0,523 |
| 1 dolní   | 1,490      | -0,229 | 0,093 | 0,493      | 0,481 | 0,510 | 0,516 |
| 2 horní   | 1,475      | -0,218 | 0,545 | 0,482      | 0,479 | 0,514 | 0,524 |
| 2 dolní   | 1,490      | -0,233 | 0,093 | 0,492      | 0,481 | 0,509 | 0,516 |

(zdroj: vlastní)

Výpočet skalární složky  $W_d$ : Tato složka se získá kombinací odpovídajících složek a součtem součinů všech složek podle vzorce:

$$W_d = W_m \cdot W_r + X_m \cdot X_r + Y_m \cdot Y_r + Z_m \cdot Z_r$$

Výpočet vektorové složky  $X_d$ : První vektorová složka se vypočítá kombinací skalárních a vektorových částí obou kvaternionů:

$$X_d = -W_m \cdot X_r + X_m \cdot W_r - Y_m \cdot Z_r + Z_m \cdot Y_r$$

Výpočet vektorové složky  $Y_d$ : Druhá vektorová složka se získá podobným způsobem:

$$Y_d = -W_m \cdot Y_r + X_m \cdot Z_r + Y_m \cdot W_r - Z_m \cdot X_r$$

Výpočet vektorové složky  $Z_d$ : Poslední vektorová složka se vypočítá dle vzorce:

$$Z_d = -W_m \cdot Z_r - X_m \cdot Y_r + Y_m \cdot X_r + Z_m \cdot W_r$$

Po dosazení numerických hodnot pro každé ze všech měření natočení  $Q_m$  oproti zvolené referenci  $Q_r$  byl tímto postupem odvozen úplný rozdílový kvaternion  $Q_d = (W_d, X_d, Y_d, Z_d)$ , který přesně kvantifikuje odchylku orientace dílce. Uvedené vzorce byly implementovány v prostředí Microsoft Excel a pro všechna měření byl vypočten příslušný kvaternion.

Pro usnadnění interpretace bylo následně přikročeno k převodu kvaternionu  $Q_d$  na trojici Eulerových úhlů v pořadí rotací Z-Y-X, jež popisuje orientaci objektu postupnými rotacemi kolem os Z, Y a X.

Výpočet rotace kolem osy X:

$$X = \arctan^2 \left( 2 \cdot (W_d \cdot X_d + Y_d \cdot Z_d), 1 - 2 \cdot (X_d^2 + Y_d^2) \right)$$

Výpočet rotace kolem osy Y:

$$Y = \arcsin(2 \cdot (W_d \cdot Y_d - Z_d \cdot X_d))$$

Výpočet úhlu rotace kolem osy Z:

$$Z = \arctan^2 \left( 2 \cdot (W_d \cdot Z_d + X_d \cdot Y_d), 1 - 2 \cdot (Y_d^2 + Z_d^2) \right)$$

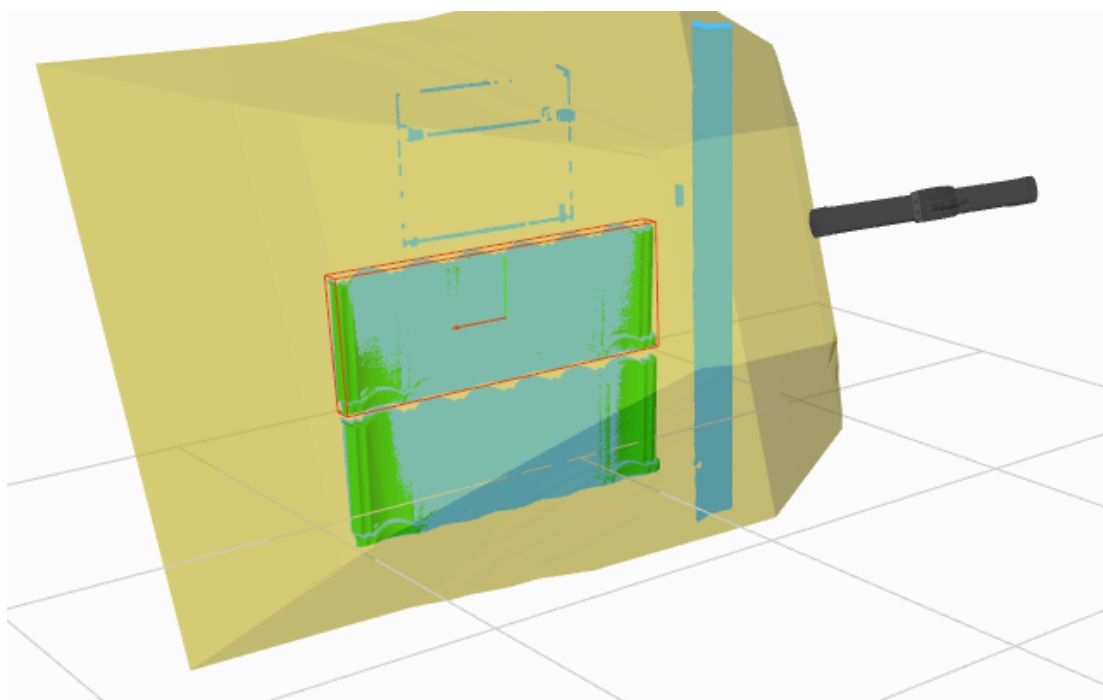
Při analýze bylo rovněž zohledněno omezení spojené s reprezentací prostřednictvím Eulerových úhlů. Pokud se úhel rotace kolem osy Y přiblíží hodnotě  $\pm 90^\circ$ , může dojít k jevu

známému jako gimbal-lock, kdy přestávají být rozlišitelné rotace kolem os X a Z. V rámci provedených měření však tyto kritické hodnoty dosaženy nebyly, takže prezentované výsledky zůstaly jednoznačné. Všechny uvedené přepočty byly implementovány v Microsoft Excelu s využitím vestavěných funkcí ATAN2 a ASIN, a tím byla pro každé měření získána odchylka orientace dílce vůči referenci vyjádřená ve stupních prostřednictvím tří úhlů.

Tabulka 4 Výsledná upravená data

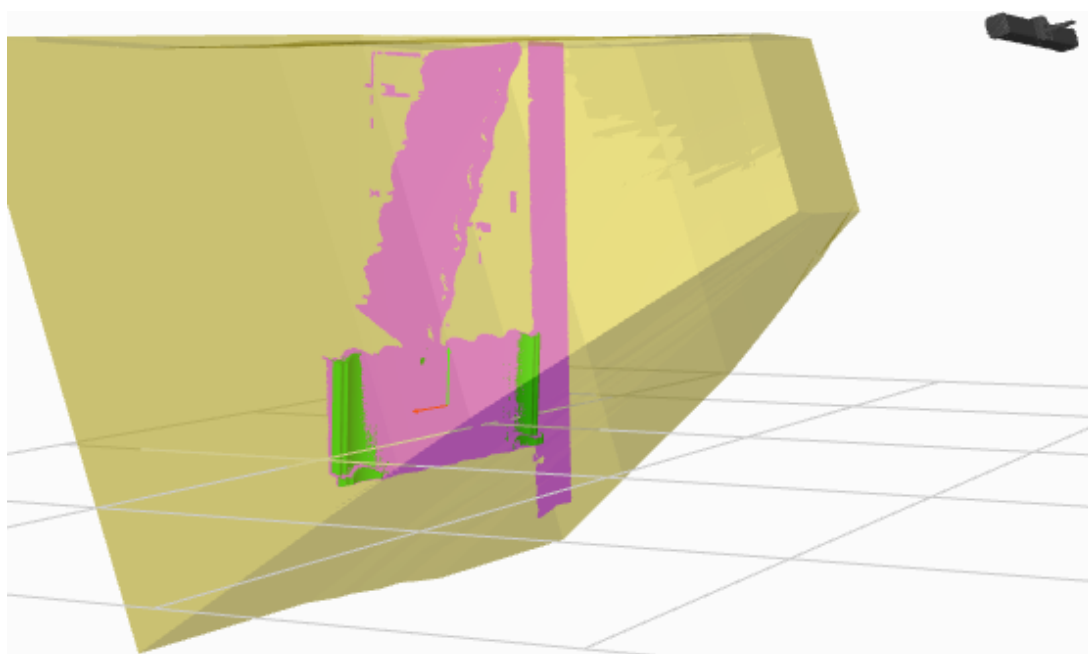
| Měření tašky<br>Č. | Rozdíl pozice vůči<br>referenci (mm) |      |      | Rozdíl úhlu v ose vůči<br>referenci (°) |       |        |
|--------------------|--------------------------------------|------|------|-----------------------------------------|-------|--------|
|                    | X                                    | Y    | Z    | X                                       | Y     | Z      |
| Ok/Nok             |                                      |      |      |                                         |       |        |
| 1 horní            | -4                                   | 10   | 18   | -4,5                                    | 0,4   | 1,8    |
| 1 dolní            | -3                                   | -19  | 0    | -0,5                                    | 0,1   | 2,2    |
| 2 horní            | Měření nebylo úspěšné*               |      |      |                                         |       |        |
| 2 dolní            | 6                                    | -22  | 0    | -0,3                                    | -0,2  | 9,1    |
| 3 horní            | Měření nebylo úspěšné*               |      |      |                                         |       |        |
| 3 dolní            | 8                                    | -10  | 0    | -0,3                                    | -0,3  | -2,1   |
| 4 horní            | -3                                   | -64  | 202  | 31,0                                    | -5,2  | -5,7   |
| 4 dolní            | -13                                  | 9    | 0    | 0,3                                     | 0,4   | -2,3   |
| 5 horní            | 0                                    | 7    | 2    | 2,3                                     | -0,8  | 15,5   |
| 5 dolní            | 58                                   | -141 | -460 | 2,6                                     | -0,8  | 16,4   |
| 6 horní            | 9                                    | -25  | 418  | 178,5                                   | -2,5  | -173,3 |
| 6 dolní            | 27                                   | -149 | -459 | 2,4                                     | -0,3  | 9,4    |
| 7 horní            | -23                                  | 158  | 455  | 0,7                                     | -0,7  | 4,7    |
| 7 dolní            | 19                                   | -137 | -453 | 1,1                                     | -0,2  | 5,1    |
| 8 horní            | -43                                  | 33   | 916  | 16,3                                    | -20,9 | 17,9   |
| 8 dolní            | -14                                  | -21  | -450 | -0,5                                    | 1,1   | -1,6   |
| 9 horní            | -25                                  | 34   | 914  | -1,1                                    | -0,4  | -1,0   |
| 9 dolní            | -1 328                               | 106  | -316 | -33,3                                   | 0,7   | -3,5   |
| 10 horní           | -5                                   | 56   | 915  | 0,8                                     | -0,1  | -179,6 |
| 10 dolní           | 19                                   | -33  | -277 | 31,0                                    | -2,8  | 0,5    |
| 11 horní           | 25                                   | 47   | 913  | 2,0                                     | 1,3   | 168,6  |
| 11 dolní           | 78                                   | 58   | 3    | -179,1                                  | 0,6   | 167,0  |
| 12 horní           | -3                                   | -24  | 432  | 3,4                                     | 1,4   | 6,1    |
| 12 dolní           | 22                                   | 32   | -448 | 178,6                                   | 0,8   | 4,4    |
| 13 horní           | 12                                   | -38  | -19  | 3,4                                     | 1,4   | 6,1    |
| 13 dolní           | 7                                    | 46   | 3    | 178,6                                   | 0,8   | 4,4    |
| 14 horní           | 20                                   | 41   | 1    | -4,0                                    | -0,4  | -2,3   |
| 14 dolní           | 15                                   | 28   | 5    | 0,5                                     | -0,6  | -1,3   |
| 15 horní           | -1                                   | 5    | 178  | 28,6                                    | 1,1   | -12,9  |
| 15 dolní           | 74                                   | 42   | 7    | -171,6                                  | -0,7  | 163,2  |

\*měření nebylo realizováno z důvodu umístění tašky mimo zorné pole



Obrázek 31 Příklad úspěšného měření (měření číslo 1)

*(zdroj: vlastní)*



Obrázek 32 Příklad neúspěšného měření (měření číslo 3)

*(zdroj: vlastní)*

## ZÁVĚR

Předmětem této bakalářské práce bylo rozšíření stávajícího robotického pracoviště pro práškové lakování plechových střešních tašek o kamerový systém, který umožňuje přesnou lokalizaci dílů před samotným lakovacím procesem. V rámci provozu se opakovaně ukazovalo, že ruční zakládání tašek do dopravníku obsluhou není zcela konzistentní, což vedlo ke vzniku odchylek v jejich poloze. Tyto nepřesnosti způsobovaly nesprávné navedení robotické trajektorie a následně chybný nános práškové barvy. Vadně nalakované výrobky musely být následně manuálně dolakovány za kabinou, což mělo negativní dopad na efektivitu výroby i celkové provozní náklady. Cílem práce proto bylo navrhnout a implementovat řešení, které umožní tyto odchylky automaticky detekovat a přizpůsobit trajektorii robota aktuální poloze každého dílu, a tím minimalizovat chybovost lakování.

Navržené řešení spočívá v integraci 3D kamery Photoneo MotionCam-3D do existujícího systému s kolaborativním robotem ABB GoFa CRB 15000. V rámci implementace byla provedena síťová konfigurace, prostorová kalibrace mezi kamerou a robotem a návrh algoritmu pro zpracování obrazových dat, který umožňuje přesné určení polohy jednotlivých tašek. Na základě těchto dat je následně upravena trajektorie robota tak, aby každému dílu odpovídal optimální pohyb stříkací pistole. Výsledný systém je schopen adaptivní reakce na variabilní vstupní podmínky a výrazně přispívá ke zvýšení opakovatelnosti, přesnosti a celkové kvality lakovacího procesu.

Je nutné zdůraznit, že dopravníkový systém použitý pro přísun tašek do lakovací zóny je v provozu již delší dobu a tvoří stabilní součást technologie. Z konstrukčního a ekonomického hlediska není jeho úprava proveditelná, jelikož by vyžadovala rozsáhlé změny a investice řádově převyšující náklady na zavedení kamerového systému. Z tohoto důvodu bylo cílem najít řešení, které se plně přizpůsobí stávající infrastruktuře bez nutnosti zásahu do dopravníkové mechaniky.

Přestože implementace kamerového systému přinesla výrazná zlepšení, nebyla realizace tohoto řešení zcela bez technických komplikací. Mezi nejvýznamnější výzvy patřila nutnost precizní prostorové kalibrace mezi kamerou a robotem, zajištění stabilních světelných podmínek v prostředí s vysokou prašností a eliminace rušivých světelných odrazů. Další obtíž představovala také softwarová integrace systému a zajištění dostatečné rychlosti zpracování obrazových dat, umožňující plynulé řízení robota v reálném čase. Ve srovnání s běžnými robotickými systémy, které spoléhají na pevně definované trajektorie a

předpokládají dokonalou opakovatelnost zakládání, představuje navržené řešení zásadní posun směrem k vyšší flexibilitě, spolehlivosti a provozní stabilitě robotického lakování.

Z praktického hlediska by vedla realizace tohoto systému k odhadovanému snížení zmetkovitosti přibližně o 40 % oproti původnímu stavu a odstranění nutnosti manuálního dodatečného lakování výrobků. Díky tomu se navržené řešení jeví jako technicky i ekonomicky efektivní, a to i pro menší výrobní provozy s omezeným rozpočtem. Svým modulárním charakterem zároveň poskytuje prostor pro budoucí rozšíření, například o automatickou kontrolu kvality povrchu nebo rozpoznávání různých typů dílů bez nutnosti přenastavení systému.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FOTOVVATI, Behzad; NAMDARI, Navid; DEHGHANGHADIKOLAEI, Amir. On coating techniques for surface protection: A review. *Journal of Manufacturing and Materials processing*, 2019, 3.1: 28.
- [2] CARBONE, Giuseppe; LARIBI, Med Amine (ed.). *Robot Design: From Theory to Service Applications*. Springer Nature, 2022.
- [3] D. Gleeson et al., "Generating Optimized Trajectories for Robotic Spray Painting," in *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 19, no. 3, pp. 1380-1391, July 2022, doi: 10.1109/TASE.2022.3156803.
- [4] KALA, Rahul. *Autonomous Mobile Robots: Planning, Navigation and Simulation*. Elsevier, 2023.
- [5] KOLÍBAL, Zdeněk, et al. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: VUTIUM, 2016.
- [6] LAMBOURNE, R. *Paint and surface coatings: Theory and practice*. Woodhead Publishing Limited Willian Andrew Publishing, 1999.
- [7] TRACTON, Arthur A. *Coatings technology handbook*. CRC press, 2005.
- [8] Arrais, R., Costa, C., Ribeiro, P., Rocha, L., Silva, M., & Veiga, G. (2020). On the development of a collaborative robotic system for industrial coating cells. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(3), 853-871. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06167-z>
- [9] Wang, Y., Zhou, Y., Wei, L., & Li, R. (2023). Design of a four-axis robot arm system based on machine vision. *Applied Sciences*, 13(15), 8836. <https://doi.org/10.3390/app13158836>
- [10] Scibilia, A., Valori, M., Pedrocchi, N., Fassi, I., Herbster, S., Behrens, R., ... & Nielsen, K. (2021). Analysis of interlaboratory safety related tests in power and force limited collaborative robots. *Ieee Access*, 9, 80873-80882. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3085109>

- [11] Baek, W., Ledermann, C., & Kröger, T. (2023). Uncertainty estimation for safe human-robot collaboration using conservation measures., 85-102. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22216-0\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22216-0_7)
- [12] Mossige, M., Gotlieb, A., & Meling, H. (2017). Deploying constraint programming for testing abb's painting robots. *Ai Magazine*, 38(2), 94-96. <https://doi.org/10.1609/aimag.v38i2.2723>
- [13] Chancharoen, R., Chaiprabha, K., Wuttisittikulkij, L., Asdornwised, W., Saadi, M., & Phanomchoeng, G. (2022). Digital twin for a collaborative painting robot. *Sensors*, 23(1), 17. <https://doi.org/10.3390/s23010017>
- [14] Ye, Q., Shen, B., Tiedje, O., Bauernhansl, T., & Domnick, J. (2015). Numerical and experimental study of spray coating using air-assisted high-pressure atomizers. *Atomization and Sprays*, 25(8), 643-656. <https://doi.org/10.1615/atomizspr.2015010791>
- [15] Gallala, A., Kumar, A., Hichri, B., & Plapper, P. (2022). Digital twin for human–robot interactions by means of industry 4.0 enabling technologies. *Sensors*, 22(13), 4950. <https://doi.org/10.3390/s22134950>
- [16] Zhou, Z., Xiong, R., Wang, Y., & Zhang, J. (2020). Advanced robot programming: a review. *Current Robotics Reports*, 1(4), 251-258. <https://doi.org/10.1007/s43154-020-00023-4>
- [17] Bai, Z. (2024). Advancements in robotics engineering: transforming industries and society. *Applied and Computational Engineering*, 32(1), 270-274. <https://doi.org/10.54254/2755-2721/32/20230861>
- [18] Li, J. (2015). Design on automatic spraying robot system based on pc-plc network control.. <https://doi.org/10.2991/icetem-15.2015.30> xxx
- [19] Igbokwe, K. and Ikwunze, O. (2022). Design of robotic manipulator for painting purposes in automotive industry. *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, 13(2), 054-059. <https://doi.org/10.30574/gjeta.2022.13.2.0181>
- [20] Karusine, A., Cui, C., Larsey, N., & Tanguy-Nolain, K. (2022). The impact of automation in painting furniture parts. *Open Journal of Applied Sciences*, 12(12), 1995-2003. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2022.1212139>

- [21] Reddy, K., Reddy, V., Sujitha., J., & Pydimalla, M. (2020). Characterization of surface coating techniques for improved performance. *International Journal of Inventive Engineering and Sciences*, 5(9), 1-9. <https://doi.org/10.35940/ijies.i0975.0559207>
- [22] Jiang, R., Haipeng, B., & Ronghui, Z. (2022). Analysis of preparation conditions of low-temperature curing powder coatings based on local clustering algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/1143283>
- [23] Qin, X., Zhang, Y., Shi, J., & Wei, X. (2024). Study on explosion characteristics and mechanism of electrostatic spray powder. *Acs Omega*, 9(17), 19645-19656. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c01724>
- [24] Szala, M. and Kot, E. (2017). Influence of repainting on the mechanical properties, surface topography and microstructure of polyester powder coatings. *Advances in Science and Technology – Research Journal*, 11(2), 159-165. <https://doi.org/10.12913/22998624/69680>
- [25] Doğan, A. and KISMET, Y. (2022). The mechanical and thermal behavior of electrostatic powder coating waste reinforced epoxy composites. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 846-856. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1126615>
- [26] Stojanović, I., Šimunović, V., Alar, V., & Kapor, F. (2018). Experimental evaluation of polyester and epoxy–polyester powder coatings in aggressive media. *Coatings*, 8(3), 98. <https://doi.org/10.3390/coatings8030098>
- [27] Gao, Y., Miao, X., & Zhang, G. (2025). Monocular 3d object detection for occluded targets based on spatial relationships and decoupled depth predictions. *Frontiers in Computer Science*, 6. <https://doi.org/10.3389/fcomp.2024.1382080>
- [28] Dong, S. (2013). Vision measurement scheme using single camera rotation. *Isrn Machine Vision*, 2013, 1-7. <https://doi.org/10.1155/2013/874084>
- [29] Liu, Z., Meng, Z., Gao, N., & Zhang, Z. (2019). Calibration of the relative orientation between multiple depth cameras based on a three-dimensional target. *Sensors*, 19(13), 3008. <https://doi.org/10.3390/s19133008>
- [30] ABB. History of ABB robotics [online]. New.abb.com, 2025 [cit. 2025-04-26]. Dostupné z: <https://new.abb.com/robotics>

- [31] Photoneo. MotionCam-3D Datasheet [online]. 2025 [cit. 2025-04-26]. Dostupné z: <https://www.photoneo.com>
- [32] ČSN EN 60079-0 ed. 3.0 (2019) Elektrická zařízení pro prostředí s výbušnou atmosférou – Všeobecné požadavky [online]. NLF Norm, 2025 [cit. 2025-04-26]. Dostupné z: <https://www.nlfnorm.cz/ehn/4259>
- [33] SURFIN Technology. Automatizace a robotizace lakovací linky výrobního závodu High Voltage Hitachi Energy Czech Republic [online]. [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://www.surfin-tech.cz/reference/roboticke-lakovani/automatizace-a-robotizace-lakovaci-linky-vyrobniho-zavodu-high-voltage-hitachi-energy-czech-republic>
- [34] cyberneticzoo.com. 1934–78 – Spray-paint robot patents – Pollard Jr, Pollard, Roselund and DeVilbiss Comp. – (American) [online]. 2013 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <http://cyberneticzoo.com/early-industrial-robots/1934-78-spray-paint-robot-patents-pollard-jr-pollard-roselund-and-devilbiss-comp-american/>
- [35] FANUC America. Paint Robot – Paint Mate 200iA/5L [online]. [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/paint/paint-mate-200ia-5l-paint-robot>
- [36] KUKA Deutschland GmbH. KR 6 R900 EX [online]. [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://my.kuka.com/s/product/kr-6-r900-ex/01t58000004l6k2AAA?language=cs>
- [37] Yaskawa Electric Corporation. MPX2600 – High-Speed Painting Robot [online]. [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://www.motoman.com/en-us/products/robots/industrial/painting-dispensing/mpx-series/mpx2600>
- [38] Nordson Corporation. Encore Robot Powder Coating Spray Guns [online]. [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://www.nordson.com/en/products/industrial-coating-systems-products/robot-powder-coating-guns>
- [39] WAGNER Industrial Solutions GmbH. Monocyclone EEP [online]. [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://www.wagner-group.com/en/industry/products/powder-coating/product/monocyclone/>
- [40] EUCHNER GmbH + Co. KG. Intelligent safety solutions for automated production [online]. 2022 [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://www.euchner.de/en-us/about-euchner/news/news-details/intelligent-safety-solutions-for-automated-production---12463/>

[41] KEYENCE International (Belgium) NV/SA. [online]. [cit. 2025-05-12]. Dostupné z:  
<https://www.keyence.eu/>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obrázek 1 Automatická robotická lakovna.....                                           | 15 |
| Obrázek 2 Zmínka o lakovacím robotu, z pozdějšího patentu.....                         | 18 |
| Obrázek 3 Lakovací robot ABB IRB5500 .....                                             | 20 |
| Obrázek 4 Lakovací robot FANUC P-200iA.....                                            | 21 |
| Obrázek 5 Lakovací robot KUKA KR 30-3 F .....                                          | 22 |
| Obrázek 6 Lakovací robota YASKAWA Motoman mp2600 .....                                 | 23 |
| Obrázek 7 Robotické práškové lakování .....                                            | 27 |
| Obrázek 8 Rekuperační cyklónový separátor .....                                        | 29 |
| Obrázek 9 Bezpečnostní zámek Euchner využitý v robotické buňce .....                   | 32 |
| Obrázek 10 Robotická buňka se strojovým viděním .....                                  | 33 |
| Obrázek 11 Kamera Photoneo MotionCam-3D.....                                           | 35 |
| Obrázek 12 Kalibrační vzorec.....                                                      | 39 |
| Obrázek 13 Kalibrační etalon (koule).....                                              | 40 |
| Obrázek 14 Střešní taška.....                                                          | 45 |
| Obrázek 15 Nosič tašek se 2 obsazenými pozicemi .....                                  | 46 |
| Obrázek 16 Robotické pracoviště .....                                                  | 47 |
| Obrázek 17 Kamera MotionCam-3D Color L .....                                           | 48 |
| Obrázek 18 Měřicí objem kamery MotionCam-3D Color L .....                              | 49 |
| Obrázek 19 Pracovní obálka robotu GoFa CRB15000.....                                   | 51 |
| Obrázek 20 Upevnění kamerového systému.....                                            | 53 |
| Obrázek 21 Montážní otvor kamery velikosti 3/8" .....                                  | 54 |
| Obrázek 22 Porovnání vhodné a špatné expozice.....                                     | 56 |
| Obrázek 23 Pozice referenčního bodu na dílci .....                                     | 57 |
| Obrázek 24 Lokalizace dílů .....                                                       | 58 |
| Obrázek 25 Nákres rozdílných souřadnicových systému a jejich transformace.....         | 60 |
| Obrázek 26 Výsledek lokalizace.....                                                    | 62 |
| Obrázek 27 Funkce one click connect v softwaru RobotStudio .....                       | 63 |
| Obrázek 28 Znázornění lakovací trajektorie, která neodpovídá reálné pozici dílce. .... | 68 |
| Obrázek 29 Znázornění trajektorie optimalizované na dílec. ....                        | 68 |
| Obrázek 30 Posun dílců v prostoru .....                                                | 70 |
| Obrázek 31 Příklad úspěšného měření (měření číslo 1) .....                             | 74 |
| Obrázek 32 Příklad neúspěšného měření (měření číslo 3).....                            | 74 |

**SEZNAM TABULEK**

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Tabulka 1 Specifikace kamerového systému.....     | 48 |
| Tabulka 2 Specifikace robotu GoFa CRB 15000 ..... | 50 |
| Tabulka 3 Referenční měření.....                  | 70 |
| Tabulka 4 Výsledná upravená data .....            | 73 |

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

|                    |                                                                                    |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| TCP                | Tool center point                                                                  |
| ATEX               | Atmosphère Explosible, evropská směrnice pro provoz zařízení ve výbušném prostředí |
| CAD                | Computer-Aided Design                                                              |
| ČSN                | Česká státní norma                                                                 |
| EN                 | evropská norma                                                                     |
| FOV                | Field Of View                                                                      |
| IP65               | třída krytí ochrany                                                                |
| PoE                | Power over Ethernet                                                                |
| FPS                | Frames Per Second                                                                  |
| 2D                 | dvourozměrný                                                                       |
| 3D                 | trojrozměrný                                                                       |
| $AX=XB$            | transformační rovnice                                                              |
| mm                 | milimetr                                                                           |
| $\mu\text{m}$      | mikrometr                                                                          |
| m/s                | metr za sekundu                                                                    |
| $\text{m/s}^2$     | metr za sekundu na druhou                                                          |
| $^{\circ}\text{C}$ | stupeň Celsia                                                                      |
| kV                 | kilovolt                                                                           |
| MPa                | megapascal                                                                         |
| Q                  | Kvaternion                                                                         |
| W, X, Y, Z         | Složky kvaternionu                                                                 |
| Ex                 | explosion proof                                                                    |
| VOC                | Volatile Organic Compound                                                          |
| x, y, z            | souřadnicové osy v kartézském souřadnicovém systému                                |

---

|      |           |
|------|-----------|
| Mpix | Megapixel |
| px   | pixel     |