

Možnosti robotického řízení s podporou silově-momentové zpětné vazby

Diplomová práce

<i>Studijní program:</i>	N2612 Elektrotechnika a informatika
<i>Studijní obor:</i>	Mechatronika
<i>Autor práce:</i>	Bc. Šimon Novotný
<i>Vedoucí práce:</i>	doc. Ing. Josef Černohorský, Ph.D. Ústav mechatroniky a technické informatiky
<i>Konzultant práce:</i>	Ing. Daniel Kajzr Ústav mechatroniky a technické informatiky





Zadání diplomové práce

Možnosti robotického řízení s podporou silově-momentové zpětné vazby

Jméno a příjmení: **Bc. Šimon Novotný**
Osobní číslo: M18000167
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Mechatronika
Zadávací katedra: Ústav mechatroniky a technické informatiky
Akademický rok: **2020/2021**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s funkčními principy silově-momentových snímačů.
2. Seznamte s možnostmi řízení robotů za využití silově-momentových snímačů a kamerového vidění.
3. Proveďte rešerši vhodných aplikací využívající silově-momentového řízení.
4. Navrhněte úlohu s využitím silově-momentového snímače.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

dle potřeby dokumentace
40–50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB. *Springer handbook of robotics*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4.
- [2] CRAIG, John J. *Introduction to robotics: mechanics and control*. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005. ISBN 0201-54361-3.
- [3] NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. *Konstrukce robotů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-216-7.

Vedoucí práce:

doc. Ing. Josef Černožorský, Ph.D.
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Konzultant práce:

Ing. Daniel Kajzr
Ústav mechatroniky a technické informatiky

Datum zadání práce:

9. října 2020

Předpokládaný termín odevzdání:

17. května 2021

prof. Ing. Zdeněk Plíva, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Milan Kolář, CSc.
vedoucí ústavu

V Liberci dne 9. října 2020

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

6. ledna 2021

Bc. Šimon Novotný

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat doc. Ing. Josefu Černoorskému, Ph.D. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé diplomové práce.

Abstrakt

Cílem této práce je shrnutí funkčních principů silově-momentových snímačů, silově-momentového řízení a strojového vidění. Byla realizována úloha robotizovaného připojení nabíjecího konektoru k autonomní mobilní platformě s využitím průmyslového robotu, silově-momentového senzoru a strojového vidění. Mobilní platforma nebyla v době realizace k dispozici, proto byla úloha experimentálně realizována na zjednodušeném modelu. V závěru práce jsou zhodnoceny vlastnosti experimentálního řešení.

Klíčová slova: FANUC, průmyslový robot, silově-momentový snímač, strojové vidění

Abstract

The main aim is to summarize the working principles of force-torque sensors, force-torque robot control and machine vision systems. A task of robotic connection of charging connector to an autonomous mobile platform was completed using industrial robot, force-torque sensor, and machine vision. Since the robotic platform was not available at the time of implementation, the task was experimentally completed on a simplified model. The implementation is then evaluated.

Key words: FANUC, industrial robots, force-torque sensor, machine vision

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Silově-momentové řízení.....	12
2.1	Typy silově-momentového řízení	12
2.2	Snímání sil.....	13
2.2.1	Silově momentové snímače	14
3	Strojové vidění.....	16
3.1	Průmyslové kamery.....	16
3.2	Osvětlení	17
3.3	Zpracování dat.....	18
4	Úloha robotizovaného zapojení nabíjecího konektoru	19
4.1	Evropské standardy nabíjení elektromobilů.....	19
4.2	Řešení robotizovaného připojení v různých výzkumných projektech	21
4.3	Výběr komponent pro úlohu	23
4.3.1	Robotický systém.....	23
4.3.2	Lokalizace zásuvky	23
4.3.3	Senzory silové zpětné vazby	24
4.3.4	Řídicí systém.....	24
5	Realizace úlohy.....	26
5.1	Postup programu	28
5.2	Souřadné systémy.....	29
5.3	Lokalizace zásuvky	30
5.3.1	Hardware.....	30
5.3.2	Zpracování obrazových dat.....	32
5.3.3	Postup lokalizace zásuvky	38
5.4	Zapojení konektoru	41
5.4.1	Hardware.....	41

5.4.2	Řídící systém.....	42
5.4.3	Postup zapojení konektoru.....	45
5.5	Omezení experimentálního řešení.....	47
6	Závěr	48
	Použitá literatura	49
	Seznam příloh	51

Seznam obrázků

Obrázek 1: Senzor Axia80-M20 [5]	15
Obrázek 2: Senzor HEX-H [6].....	15
Obrázek 3: Kalibrace kamery s použitím kalibrační mřížky	18
Obrázek 4: Konektor Combo 2 a Type 2 [11]	20
Obrázek 5: Nabíjecí systém Technické Univerzity Graz [14].....	22
Obrázek 6: Volkswagen e-smartConnect [15].....	22
Obrázek 7: Konektor Combo 2.....	26
Obrázek 8: Přípravek se zásuvkou.....	26
Obrázek 9: Robotické stanoviště	27
Obrázek 10: Zásuvka s adaptérem.....	27
Obrázek 11: Zjednodušený postup programu.....	28
Obrázek 12: Souřadný systém User Frame.....	29
Obrázek 13: Souřadný systém nástroje.....	30
Obrázek 14: Umístění kamery a kleští na ramenu robotu	31
Obrázek 15: Umístění dálkového senzoru na efektoru.....	32
Obrázek 16: Schéma 2D Single-view Vision Process [16]	33
Obrázek 17: Kroky nutné pro nastavení vision procesu	34
Obrázek 18: záběr kamery ve startovací pozici	35
Obrázek 19: Umístění kalibrační mřížky.....	35
Obrázek 20: Hledaný vzor	37
Obrázek 21: Úspěšná lokalizace zásuvky	37
Obrázek 22: Omezení 2D vision procesu [16].....	38
Obrázek 23: Pozice zásuvky před zapojením	40
Obrázek 24: Umístění silově-momentového snímače	42

Seznam zdrojových kódů

Zdrojový kód 1: Lokalizace s pomocí vision procesu	38
Zdrojový kód 2: Zajištění správné fotící polohy	40
Zdrojový kód 3: Zarovnání vzdálenosti od kamery.....	41
Zdrojový kód 4: Změna User Frame a druhý vision proces.	41
Zdrojový kód 5: Zapojení konektoru.....	45

1 Úvod

Silová zpětná vazba umožňuje robotu provádět práce, při kterých je nutné řídit síly vznikající při fyzické interakci robotu a prostředí. V průmyslových aplikacích jde například o kompletaci dílů, tvarové obrábění, broušení nebo leštění. V takových aplikacích je nutné udržet síly v určitých mezích, na předepsané hodnotě, nebo dodržet jejich určitý průběh. Pro řízení těchto sil slouží silově-momentové řízení, které umožní korekci dráhy pohybu robotu na základě sil působících na efektor.

Pro měření sil působících na robot se obvykle používá silově-momentový senzor, je ale možné použít i další metody.

Dalším obvyklým senzorem používaným na robotu je kamera. Systémy strojového vidění umožní procesy doplnit například o vizuální kontrolu kvality, identifikaci vad nebo rozpoznání a lokalizaci objektů.

V teoretické části práce je vypracována rešerše možností silově-momentového řízení robotů, způsobů snímání sil působících na rameno robotu a systémů strojového vidění.

V praktické části práce je zpracována úloha robotizovaného připojení nabíjecího konektoru k autonomní mobilní platformě s využitím silově-momentového senzoru a strojového vidění. Jelikož v době realizace práce nebyla mobilní platforma k dispozici, úloha byla realizována na zjednodušeném modelu.

2 Silově-momentové řízení

Řízení sil mezi manipulátorem robotu a prostředím je nutná podmínka pro úspěšné splnění mnoha typů úloh [1]. Obvyklý je požadavek na dodržení určitého limitu síly, aby se předešlo poškození robotu nebo výrobku. Některé výrobní procesy také mohou vyžadovat udržení síly na dané hodnotě po určitou dobu, případně dodržet její přesný průběh.

Řešení takových úloh bez měření sil je možné pouze v případě, že je možné plánovat pohyb robotu s vysokou přesností. Takové plánování vyžaduje přesný kinematický a dynamický model robotu a prostředí. V praxi je získání přesného modelu zejména prostředí obtížné, proto je nutné vznikající síly měřit a pohyb robotu v závislosti na těchto silách upravovat.

Řízení robotu

Řízení pohybu robotu lze obecně rozdělit na dva způsoby: Point to Point (PTP) a Continuous Path (CP).

PTP řízení má definované pouze jednotlivé body koncového bodu, kterých je třeba dosáhnout. CP řízení má navíc definovanou i trajektorii pohybu mezi koncovými body.

Pro řešení úloh s požadavkem řízení sil mezi robotem a prostředím je obecně vhodný CP přístup.

2.1 Typy silově-momentového řízení

Jedním ze základních rozdělení silově-momentového řízení je řízení aktivní a pasivní [1] [2].

Pasivní silové řízení

Při pasivním řízení je trajektorie robotu modifikována externími vlivy díky poddajnosti robotu. Poddajnosti může být způsobena mechanickou strukturou robotu a kloubů, poddajností servomotoru, nebo řídicím softwarem.

Prvky robotu mohou být navrženy přímo s ohledem na pasivní řízení, například měkká ramena s elastickými klouby pro kooperativní roboty nebo elastické efektory pro úlohy typu Peg-in-hole (vlození nebo montáž rotační součásti do otvoru).

Alternativou k mechanické realizaci je softwarová implementace, která úpravou řídicího systému umožňuje částečně rozvolnit chování robotu z hlediska regulace polohy. Příkladem je funkce označována jako *SoftMove* na robotech ABB, nebo funkce *Soft Float* robotů FANUC.

Pasivní řízení nevyžaduje silově-momentový snímač a je levné a rychlé na implementaci. Další výhodou je rychlejší odezva poddajného materiálu na externí sílu než odezva řídicího systému s měřením sil. Nevýhodou je nízká flexibilita způsobená nutností výroby speciálního efektoru pro danou úlohu a riziko vzniku velkých kontaktních sil vzhledem k absenci měření.

Aktivní silové řízení

Při použití aktivního řízení je poddajnosti robotu dána řídicím systémem a obvykle vyžaduje měření kontaktních sil a momentů.

Aktivní řízení nemá již zmíněné nevýhody pasivního řízení, má ale obvykle pomalejší reakce a je dražší na implementaci. Aktivní řízení se obvykle používá v kombinaci s určitou mírou pasivní poddajnosti, aby systém stihl na sílu vznikající při dotyku zareagovat před tím, než síla překročí přípustnou mez.

Aktivní silové řízení lze rozdělit na řízení přímé a nepřímé. Hlavním rozdílem je uzavřenost zpětnovazební regulační smyčky. Nepřímé řízení nemá smyčku uzavřenou, neumožňuje tak řízení síly na určitou hodnotu, pouze zajistí dodržení trajektorie při působení vnějších sil. Naopak přímé řízení regulaci sil umožňuje.

2.2 Snímání sil

Síly lze měřit přímo senzory, nebo nepřímo z dalších snímaných veličin. V průmyslové robotice lze metody snímání rozdělit do tří skupin [3]:

- Silové, nebo silově-momentové snímače. Jedná se o nejčastější způsob měření sil působících na efektor. Tyto snímače jsou obvykle umístěny mezi přírubou robotu a efektozem a slouží k snímání sil působících na nástroj. Typické je použití v oblastech, kde je potřeba snímat a řídit síly s vysokou přesností, například broušení a leštění. Senzory mají výhodu snadné instalace a jsou obvykle velmi přesné, nevýhodou je možnost měření pouze v místě umístění senzoru.

- Momentové senzory umístěné v kloubech robota. Výhodou je možnost určení momentu působícího na každý kloub, nevýhodami jsou komplikovaný design a zvýšené náklady na implementaci.
- Virtuální silový senzor. Tento systém funguje na principu porovnání vypočteného teoretického momentu, který by měl na robot působit, s momentem měřeným. Systém používá například firma Universal Robotics sledováním proudu odebíraného jednotlivými motory. Tento přístup umožňuje měření momentu působícího na každý kloub, vyžaduje ale přesný kinematický model a je složitý na výpočet.

2.2.1 Silově momentové snímače

Silově-momentový snímač je elektronické zařízení určené pro monitorování, detekci a záznam sil a momentů působících na zařízení.

V robotice se obvykle používají šestiosé snímače, které umožňují snímat síly a momenty ve všech osách volnosti objektu.

Snímače se používají zejména pro měření sil působících na efektor robotu. Pro takové měření se snímač umísťuje mezi efektor a přírubu robotu. Senzory lze použít i pro měření sil působících na samotné rameno, zejména pro potřeby bezpečnosti kooperativních robotů. Příkladem jsou kolaborativní roboty firmy FANUC, které jsou umístěny na tenzometrické základně.

Funkční principy silově-momentových snímačů

Silově-momentový senzor obsahuje pružný element mezi součásti, na které chceme snímat síly, a ramenem robotu. Pokud na součást působí síla, pružný element se deformuje předem známým způsobem. Senzory lze rozdělit podle principu snímání této deformace [4]:

Tenzometrické

V silově-momentových snímačích průmyslových robotů je nejběžnější použití tenzometrických snímačů. Tenzometry využívají změny odporu vodiče v závislosti na mechanické deformaci. Pro silově-momentové snímače se používají tenzometry polovodičové. Tyto tenzometry mají vysokou citlivost a linearitu, nevýhodou je jejich náchylnost na poškození přetížením. Pro zamezení poškození je nutné mechanicky omezit možnost deformace tenzometru, to je ale problematické, protože absolutní

výchyvky tenzometru při zátěži jsou minimální. Přesnost tenzometrických snímačů je také ovlivňována elektromagnetickým rušením a změnami teploty.

Příkladem senzoru využívající tenzometry je senzor Axia80-M20 společnosti ATI Industrial Automation.



Obrázek 1: Senzor Axia80-M20 [5]

Piezoelektrické

Piezoelektrické snímače fungují na podobném principu jako tenzometrické. Využívají jevu, kdy krystal generuje elektrické napětí při deformaci. Výhodou je velmi vysoká přesnost, nevýhodou je vysoká cena a nelineární výstup.

Optické

Optické senzory měří vychýlení pružného elementu měřením změny intenzity světla dopadající na fotosenzor. Senzory jsou konstrukčně jednodušší než tenzometrické a jsou výrazně odolnější proti přetížení, protože snímací část je oddělena od deformační části.

Příkladem optického senzoru jsou senzory HEX-H a HEX-E výrobce On Robot.



Obrázek 2: Senzor HEX-H [6]

3 Strojové vidění

S rozvojem a snižováním cen systémů strojového vidění se kamera stala jedním z nejlevnějších senzorů používaných na průmyslovém robotu. Kamery se obvykle používají pro kontrolu kvality, měření, detekci a lokalizaci objektů.

Strojové vidění lze rozdělit na dvourozměrné a trojrozměrné. Dvourozměrné systémy využívají standardní plošné kamery. Příkladem trojrozměrných systémů je výpočet hloubkové informace nafocení zkoumaného objektu z více směrů, nebo využití strukturovaného světla, kdy se objekt osvítl známým vzorem a jeho tvar se stanoví podle deformace vzoru v obrazu [7].

3.1 Průmyslové kamery

Kamer určených pro nasazení v robotice je velké množství, liší se typem snímacího prvku a optikou. V průmyslu se obvykle používají kamery s nižším rozlišením, než je obvyklé u kamer určených pro běžné spotřebitele. Je to zejména z důvodu snížení množství dat generovaných kamerou a tím zjednodušení jejich zpracování. Další možností snížení objemu zpracovávaných dat je využití černobílých kamer.

Pro volbu kamery je nutné přesně vědět jakou scénu bude snímat a jaké jsou na kameru kladené nároky. Mezi základní parametry kamery patří [8]:

- Typ snímače – nejčastěji CCD a CMOS. Výhody CCD snímačů jsou vysoká citlivost a dynamický rozsah. CMOS snímače jsou menší, levnější a díky možnosti vyčítat jednotlivé pixely senzoru mohou být rychlejší a méně energeticky náročné.
- Velikost snímače – větší snímač má při stejném rozlišení větší pixely a tím nižší šum. Velikost má vliv na zorný úhel, větší snímač potřebuje pro dosažení stejného zorného úhlu objektiv s delší ohniskovou vzdáleností.
- Plošné rozlišení snímače – vychází zejména z požadované přesnosti měření.
- Rychlost snímání – je třeba znát rychlost snímaného procesu, pro rychlé procesy je nutné mít odpovídající snímkovací frekvenci.
- Rozsah spektra – kamery jsou nejčastěji konstruované pro snímání viditelné oblasti spektra. Sensory jsou obvykle citlivé i na delší vlnové délky, proto se používá IR-cut filtr, který tuto infračervenou část spektra odfiltruje.
- Barevná škála – kamera může být monochromatická, nebo barevná.

- Rozsah expozičních časů a závěrka – jde o dobu expozice světlocitlivých buněk, obvykle se pohybuje od 0,04 ms do 10 000 ms.
- Komunikační rozhraní, formát výstupních obrazových dat, signály pro řízení kamery – kamera musí být kompatibilní s použitým systémem zpracování obrazu.

Nedílnou součástí běžných průmyslových aplikací je objektiv, který promítá světelné záření na snímač. Objektiv může tvořit jedna čočka, nebo celá optická soustava. Hlavním parametrem pro výběr objektivu je ohnisková vzdálenost, která určuje pro danou velikost čipu úhel záběru.

Kameru je možné umístit dvěma způsoby:

1. Statická kamera na rámu pracoviště. Toto řešení je jednoduché na instalaci, má ale omezený snímací prostor.
2. Kamera na ramenu robotu. Výhodou je možnost snímání většího prostoru změnou polohy kamery.

3.2 Osvětlení

Problematika osvětlení je jednou z klíčových částí, která musí být pro dobrou funkci systémů strojového vidění správně zvolena [8].

Samotný snímač v kameře má spolu s optikou omezené možnosti nastavení, proto je nutné ovlivňovat záření dopadající na snímač pomocí vhodného osvětlení objektu.

O vhodné volbě osvětlení rozhodují vlastnosti tří prvků zařízení:

1. Vlastnosti snímače (rozsah vlnových délek, na které je citlivý, typ, velikost, ...)
2. Vlastnosti snímané scény (odraz záření od povrchu, absorpce a emise záření, ...)
3. Vlastnosti záření (intenzita osvětlení, pozice zdroje, vlnová délka, ...)

Pro volbu osvětlení ve viditelné části spektra je nutné znát především:

- Jaká vlnová délka se bude od povrchu objektu odrážet. Při dopadu záření se část energie absorbuje, absorpce může být ve snímaném spektru stejná, nebo větší v určitých vlnových délkách (barvy objektů).
- Zda bude objekt zrcadlový, nebo difuzní.
- Pokud je objekt transparentní, jaká vlnová délka je více absorbovaná a jaké méně.
- Zda objekt neemituje záření.

- V jaké poloze jsou sledované objekty a objekty pozadí vůči snímači a zdroji záření.

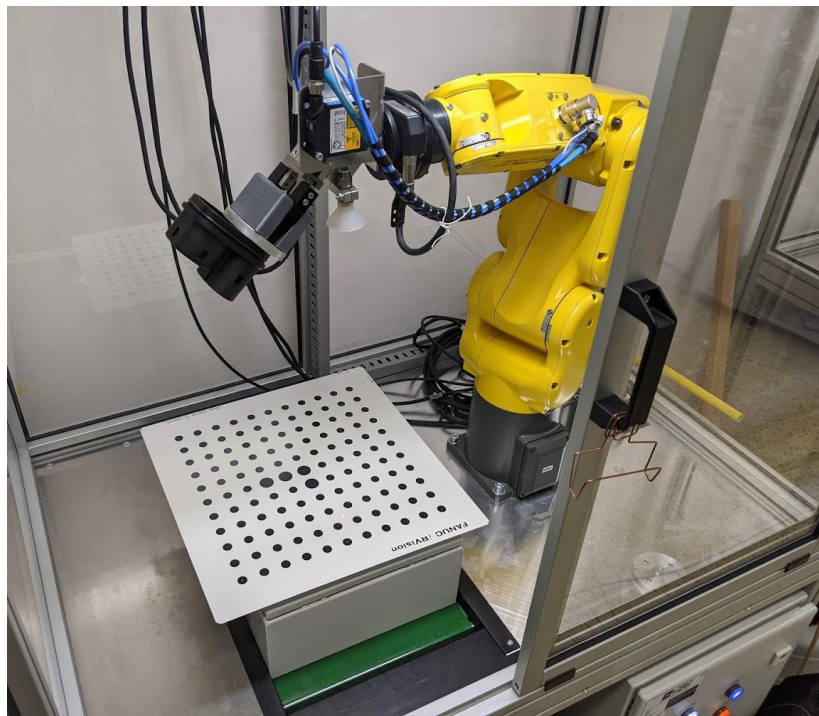
Správná volba osvětlení dokáže velmi zrychlit a zjednodušit analýzu obrazu, případně může rozhodnout, zda je v dané situaci vůbec strojové vidění možné použít.

3.3 Zpracování dat

V průmyslové robotice jsou kamerové systémy obvykle součástí ovládacího software robotu a obsahují připravené funkce pro kalibraci kamery a zpracování obrazu.

Kalibrace

Pro správnou funkci strojového vidění je třeba znát optické parametry kamery a její polohu vůči robotu. Pro kalibraci se obvykle využívá kalibrační obrazec, který je kamerou nasnímán z více pozic. Ze známé polohy kamery a kalibračního obrazce při pořizování snímků je možné určit transformaci mezi obrazcem a kamerou.



Obrázek 3: Kalibrace kamery s použitím kalibrační mřížky

Zejména v servisní robotice může docházet ke změně vzájemné polohy kamery a robotu poměrně často. Proces kalibrace kamery je tak obvykle alespoň částečně automatizovaný [9].

4 Úloha robotizovaného zapojení nabíjecího konektoru

V praktické části práce je řešena úloha robotizovaného připojení nabíjecího konektoru k autonomní mobilní platformě.

Protože cílem úlohy není navržení nového nabíjecího konektoru, je nutné použít jeden z existujících standardů pro nabíjení. Úloha se v praxi nejvíce blíží problému nabíjení elektromobilů, pro výběr vhodných komponent byla provedena rešerše stávajících standardů nabíjení a experimentálních systémů umožňující automatické připojení elektromobilu k nabíječce.

4.1 Evropské standardy nabíjení elektromobilů

Nabíjecí stanice pro elektromobily zahrnují nabíjecí stojan, kabel, zásuvku a zástrčku a ochranné systémy. Konfigurace těchto komponent se může v jednotlivých státech lišit v závislosti na parametrech místní elektrické sítě a místních standardech.

V Evropské unii jsou typy nabíjecích stanic a možnosti dobíjení elektromobilů standardizované [10]:

Nabíjecí stanice

Podle IEC 61851 jsou rozlišovány tři základní kategorie nabíjecích stanic pro elektromobily podle výkonu a doby nabíjení:

1. Nízký výkon: do 3,7 kW, určené pro domácí instalaci a dlouhodobé parkování.
2. Střední výkon: od 3,7 do 22 kW, určené pro domácí a veřejnou instalaci.
3. Vysoký výkon: vyšší než 22kW, určeno pro veřejné instalace.

Norma IEC 61851–1 popisuje čtyři módy nabíjení:

1. Mód 1: pomalé nabíjení ze standardní domácí zásuvky.
2. Mód 2: pomalé nabíjení střídavým proudem z domácí zásuvky se zabudovanou ochranou v kabelu.
3. Mód 3: pomalé, nebo rychlé nabíjení střídavým proudem s využitím jednoho ze standardních konektorů se zabudovaným řídicím a ochranným obvodem v nabíječce.
4. Mód 4: rychlé nabíjení stejnosměrným proudem.

Konektory pro nabíjení elektrických vozidel

Všechny elektromobily prodávané v Evropě musí být vybaveny konektorem Type 2, označovaný také jako Mennekes. Tento konektor má sedm kontaktů a umožňuje třífázové nabíjení s napětím 3×230 V. Maximální výkon pro stanice vybavené neodnímatelným nabíjecím kabelem je 43 kW (63 A). Pro stanice vybavené zásuvkou Type 2 je maximální výkon 22 kW (32 A).

Konektor Type 2 může být rozšířen kontakty pro rychlonabíjení stejnosměrným proudem. Takový konektor je označován jako Combo 2 a je součástí standardu Combined Charging System (CCS). Konektor je rozšířen o dva piny a umožňuje nabíjení výkonem až 350 kW.



Obrázek 4: Konektor Combo 2 a Type 2 [11]

Kabely

Na kabely používané pro nabíjení elektromobilů jsou kladeny vysoké nároky. Kabel musí být schopen bezpečně přenést vysoké proudy (u rychlonabíjení až 500 A) a zároveň musí umožnit co nejsnadnější zapojení nabíjecího konektoru uživatelem. U rychlonabíjení je pro snížení hmotnosti kabelu běžné použití kapalinou chlazených kabelů.

4.2 Řešení robotizovaného připojení v různých výzkumných projektech

Automatické připojení elektromobilu k nabíjecí stanici spojené se systémy, které umožní automatické přistavení dalšího vozidla je jedním z navrhovaných řešení nedostatečné kapacity nabíjecí sítě vzhledem k očekávanému rozšíření elektromobility [12].

Zejména u rychlonabíjecích stanic dochází k zbytečnému zabírání omezeného počtu nabíjecích míst, kdy je elektromobil zcela nabit a čeká na návrat řidiče.

Vzhledem k chybějící standardizaci konektoru určeného pro automatické připojení se navrhovaná řešení soustředí na zapojení jednoho z aktuálně používaných konektorů. Vybrané experimentální systémy jsou popsány v této kapitole.

Nabíjecí systém Technické Univerzity Graz

Systém využívá rameno robotu UR10 s nemodifikovaným konektorem Type 2. Pro lokalizaci zásuvky slouží dvě kamery umístěné vedle ramena robotu. Pro hledání zásuvky v obraze jednotlivých kamer jsou použity funkce pro hledání vzoru softwaru Halcon Machine Vision. Z polohy zásuvky v obou obrazech je pomocí stereo triangulace vypočítána poloha vůči kamerám [13] [14].

Po nalezení polohy zásuvky se robot přesune vysokou rychlostí do polohy vzdálené 0,1 m od zásuvky. Následně se přesune nízkou rychlostí do finální polohy, kdy jsou obě části konektoru zarovnány. Posledním krokem je zapojení konektoru, při kterém jsou monitorovány síly působící na efektor. Monitorování sil je použito z důvodu bezpečnosti, neslouží pro korekci polohy během zapojování.

Po nabití elektromobilu na požadovanou úroveň robot odpojí zásuvku. Předpokládá se, že se od připojení nezměnila poloha součástí, vysunutí je tak realizováno jednoduchým sledováním trajektorie bez využití senzorů.



Obrázek 5: Nabíjecí systém Technické Univerzity Graz [14]

Volkswagen e-smartConnect

Řešení navržené firmou Volkswagen využívá robotické rameno KUKA LBR iiwa. Systém byl navržen tak, aby umožnil automatické zapojení silnějších kabelů, než jaké by zvládl zapojit člověk. Toto by mělo zvýšit uživatelský komfort a umožnit nabíjení vyššími proudy [15].

Proces začíná komunikací automobilu a nabíjecí stanice. Po výměně informací je auto přiřazeno parkovací místo. Pro automatické připojení musí být zásuvka automobilu umístěna ve vymezeném prostoru o velikosti 20 × 20 cm. Lokalizace zásuvky je řešena strojovým viděním s kamerou umístěnou na ramenu robotu.

Návrh dále počítá s automatickým odpojením a odjezdem automobilu po plném nabití. Toto umožní optimální využití dostupných nabíjecích stanic.



Obrázek 6: Volkswagen e-smartConnect [15]

4.3 Výběr komponent pro úlohu

Pro úlohu se předpokládá využití standardů pro nabíjení elektromobilů. Toto umožní použít standardní konektor a běžnou nabíjecí stanici. Volba vhodného konektoru závisí především na požadovaném výkonu nabíjecího systému.

4.3.1 Robotický systém

Pro manipulaci s vybraným konektorem je nutné vybrat vhodný robotický systém. Hlavním parametrem je nosnost robotu, který musí být schopen vyvinout dostatečnou sílu pro zapojení a musí překonat odpor kabelu. Dalším parametrem je dostatečný dosah robotu podle předpokládané přesnosti přistavení platformy.

Bezpečnost

Pokud má být robot umístěn v prostoru, kde je možnost výskytu člověka nebo jiné překážky, je nutné vyřešit otázku bezpečnosti.

Jednou z možností je využití kolaborativního robotu. Tyto roboty zajistí bezpečnost zpomalením, nebo úplným zastavením pohybu, pokud je v blízkosti robotu člověk. Toho lze dosáhnout například instalací senzorů kontaktu na pohyblivé části robotu nebo instalací elastických materiálů pro snížení energie případného nárazu. Nevýhodou kolaborativních robotů proti průmyslovým je nižší nosnost.

Pokud je možné vyloučit přítomnost lidské obsluhy v pracovním prostoru robotu, je možné použít robot průmyslový. Bezpečnost je možné zajistit senzory detekující blízkost překážky, nebo fyzickým oddělením pracovní oblasti, například využitím autonomního přistavení platformy k nabíječce.

4.3.2 Lokalizace zásuvky

Protože se nedá předpokládat přesné přistavení platformy na nabíjecí místo, je nutné zásuvku před zapojením lokalizovat. Úloha je ztížena použitím konektoru, který na sobě nemá žádné speciální značky usnadňující přesné zaměření.

Jednou z možností lokalizace je strojové vidění. Problémem může být nízká přesnost takového systému a problematická funkce za snížené viditelnosti. Z těchto důvodů je vhodné systém kombinovat s dalšími systémy zpětné vazby a kameru použít pouze pro prvotní přiblížení do blízkosti zásuvky.

Kamera

Jako kameru pro systém automatického zapojení lze použít běžnou průmyslovou kameru. Kameru lze připevnit buď na rameno robotu, nebo stacionárně. Stacionární kamera je jednodušší na instalaci, má ale omezený pracovní prostor, kde je možné zásuvku rozpoznat. Kamera na ramenu robotu umožňuje změnu polohy kamery a tím focení z více poloh. Focení z více poloh může sloužit pro snímání většího prostoru nebo zlepšení přesnosti zaměření.

Výběr vhodné kamery závisí na parametrech prostředí, je nutné zvolit zejména dostatečně vysoké rozlišení a vhodné zorné pole. Při použití kamery je také nutné vyřešit osvětlení prostoru.

4.3.3 Senzory silové zpětné vazby

Použití zásuvky, která není konstrukčně upravena pro automatické zapojení, vyžaduje velmi přesnou lokalizaci, nebo systém umožňující změnu pozice a natočení zástrčky při zapojování. Toho lze docílit buď vhodným odpružením efektoru, nebo senzorem síly působící na efektor.

Klasický průmyslový robot bez silově-momentových sensorů je obvykle vybaven systémem detekce nárazu do překážky. Takový systém ale reaguje až na vysoké síly, které by mohly vést k poškození zařízení, pro přesnější řízení je vhodný silově-momentový senzor. Silová zpětná vazba je také nutná při použití kolaborativních robotů pro zaručení bezpečnosti.

Pokud není robot vybaven kamerou a předpokládáme dostatečně přesné přistavení platformy, lze pro samotné vyhledání zásuvky využít pouze silovou zpětnou vazbu. Takové prohledávání prostoru je z důvodu bezpečnosti a omezení síly při kolizi obvykle velmi pomalé, nevyžaduje ale k práci další lokalizační systém.

4.3.4 Řídicí systém

Řídicí systém průmyslového robotu je obvykle vyvinut pro potřeby montáže. Pro realizaci úlohy připojení zásuvky nabíječky je třeba využít souslednost standardních funkcí.

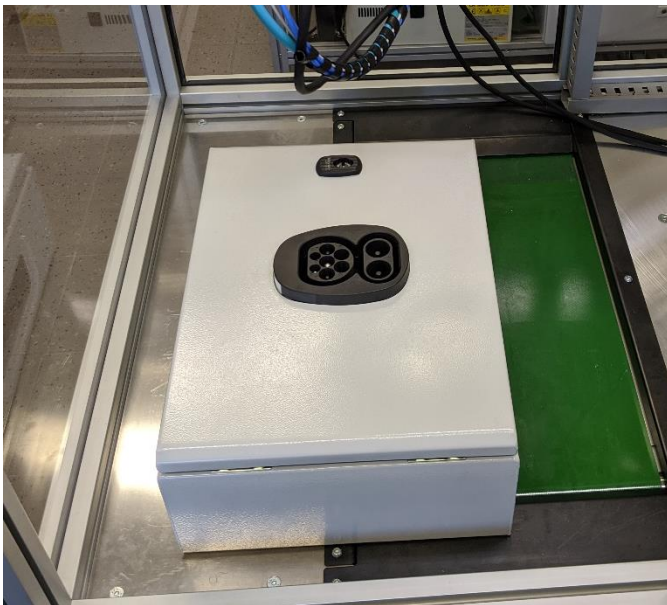
Požadavek na lokalizaci objektu na základě dat z kamery se v průmyslu vyskytuje často, systémy pro lokalizaci a následné řízení robotu do pozice jsou obvykle součástí předpřipravených funkcí systémů pro zpracování obrazu.

V případě využití silově-momentového senzoru je nutné použít řídicí systém, který umožní korekce pohybu na základě měření sil působících na efektor během zapojování. V průmyslu jde o obvyklý problém, řídicí systémy proto obvykle obsahují připravené funkce pro založení různého typu objektu.

5 Realizace úlohy

Automatické připojení bude sloužit pro připojení k mobilní platformě vlastní konstrukce. Jelikož v době realizace nebyla platforma k dispozici, úloha je realizována na robotickém pracovišti a na zjednodušeném modelu se zásuvkou typu Combo 2.

Zásuvka je umístěna v přenosném přípravku, který umožňuje snadnou manipulaci. Použitý robot má omezenou nosnost a nemohl by vyvinout dostatečnou sílu pro zapojení standardní zásuvky, proto je použita zásuvka bez pinů pro přenos elektrické energie.



Obrázek 8: Přípravek se zásuvkou

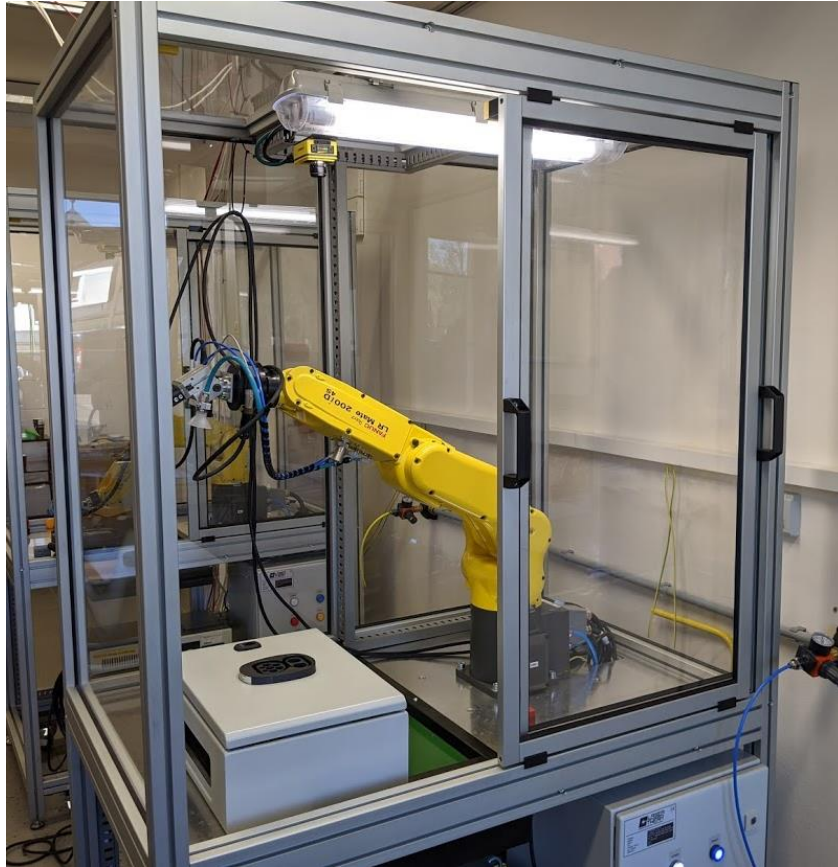


Obrázek 7: Konektor Combo 2

Pro manipulaci se zástrčkou je použit průmyslový robot FANUC LR Mate 200iD. Robot je šestiosý s dosahem odpovídající lidské paži. Maximální nosnost je 7 kg, dosah 717 mm.

Robot je řízen kontrolérem R-30iB Plus. Systém řízení podporuje připojení k dalším robotům, počítačům a dalšímu hardwaru přes ethernet. K ovládání a programování slouží pendant iPendant Touch.

Rameno robotu je umístěno v ochranné kleci, při realizaci tedy nebyla řešena otázka bezpečnosti.



Obrázek 9: Robotické stanoviště

Zástrčka je připevněna na adaptér vytištěný na 3D tiskárně, který umožňuje robotu zástrčku uchopit pneumatickými kleštěmi. K zástrčce není přiveden napájecí kabel z důvodu omezené nosnosti robotu a problematickému vedení kabelu po ramenu.

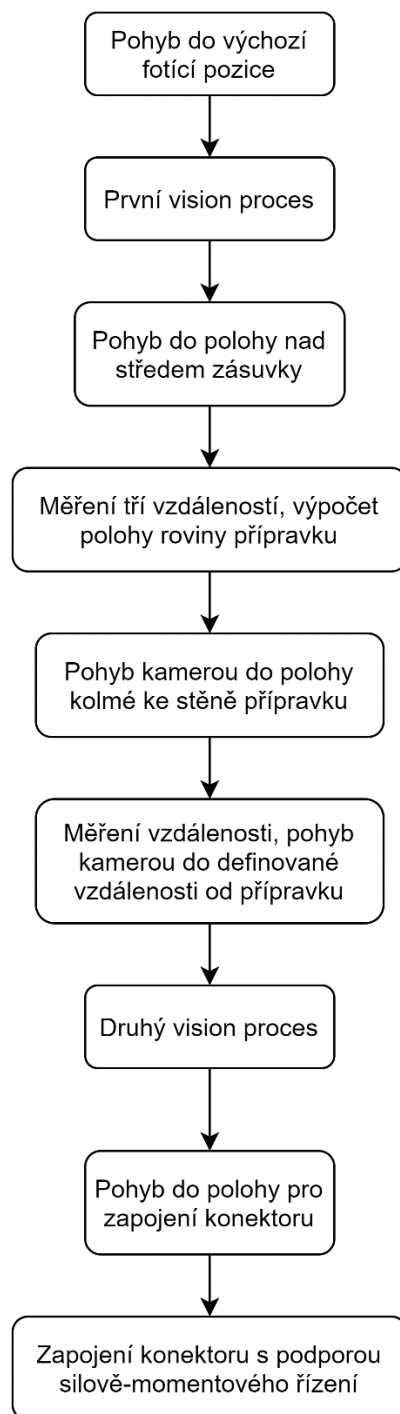


Obrázek 10: Zásuvka s adaptérem

5.1 Postup programu

Samotný problém lze rozdělit na sled několika dílčích úloh. Nejprve je nutné zásuvku lokalizovat, následně přesunout konektor nad zásuvku a zásuvku zapojit.

Pro lokalizaci zásuvky byla zvolena kombinace kamery a dálkového senzoru. Po lokalizaci zásuvky je zástrčka zapojena s podporou silově-momentového řízení.

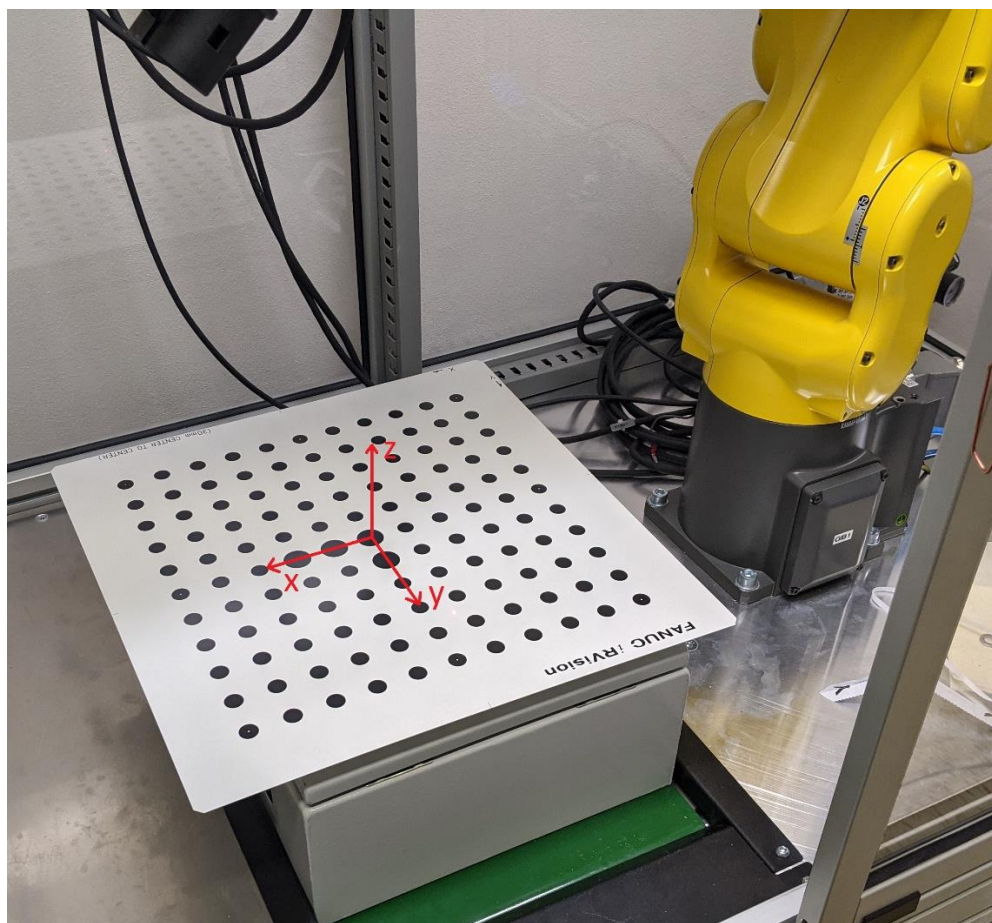


Obrázek 11: Zjednodušený postup programu

5.2 Souřadné systémy

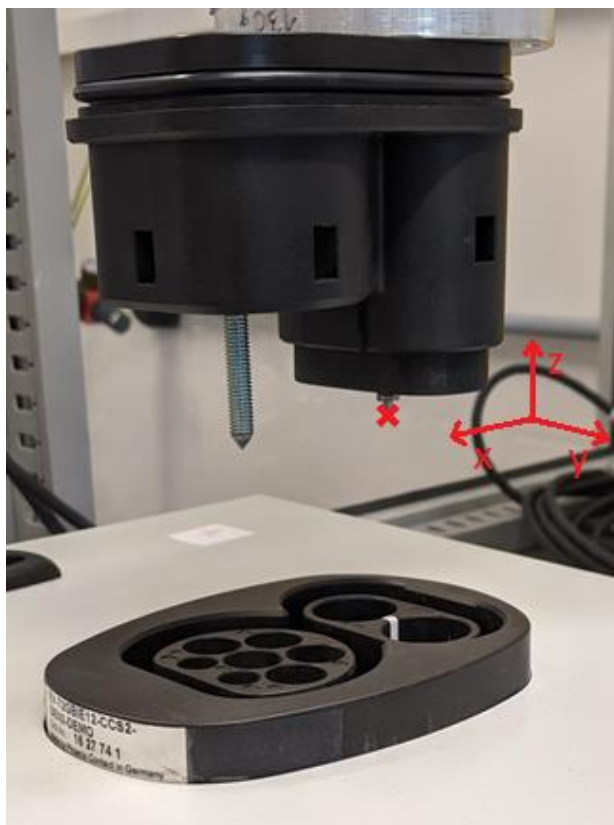
Prvním krokem řešení úlohy je volba souřadných systémů pracovního prostoru a nástroje. V řídicím systému robotu jsou tyto souřadné systémy označeny jako *User Frame* a *Tool Frame*.

User Frame je kartézský souřadný systém, ke kterému jsou vztaženy všechny pohybové instrukce robotu. Speciálním případem je *User Frame 0* označovaný jako *Word Frame*, který je výchozím fixním souřadným systémem robotu. *User Frame* použitý v úloze je definován se stejnou orientací jako *Word Frame*, počátek souřadného systému je umístěn ve středu kalibrační mřížky viz Obrázek 12.



Obrázek 12: Souřadný systém *User Frame*

Tool Frame je souřadný systém definující polohu koncového bodu nástroje vůči poslední šesté ose robotu. Pro úlohu je střed nástroje (zástrčky) definován jako průsečík pinů pro rychlonabíjení stejnosměrným proudem 1 cm nad povrchem viz Obrázek 13.



Obrázek 13: Souřadný systém nástroje

5.3 Lokalizace zásuvky

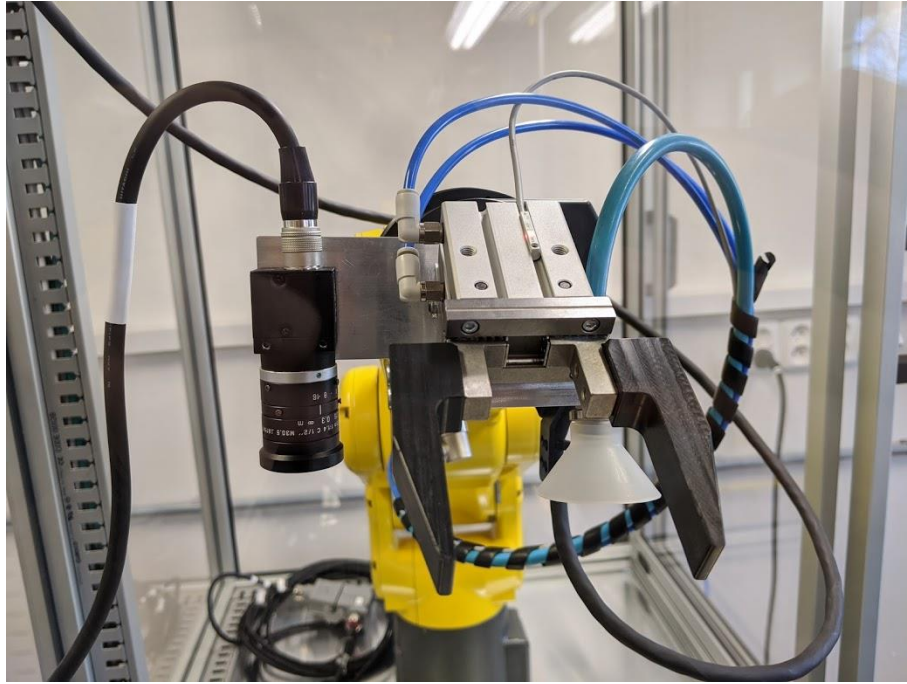
Pro lokalizaci zásuvky je využito strojové vidění v kombinaci s dálkovým senzorem.

5.3.1 Hardware

Kamera

Kamera je umístěna na efektoru robotu. Výhodou proti umístění na rámu buňky je možnost focení z více poloh a tím zlepšení přesnosti lokalizace.

Z konstrukčních důvodů není kamera umístěna v jedné rovině s kleštěmi viz Obrázek 14, rameno robotu musí pro focení kamerou změnit orientaci.



Obrázek 14: Umístění kamery a kleští na ramenu robotu

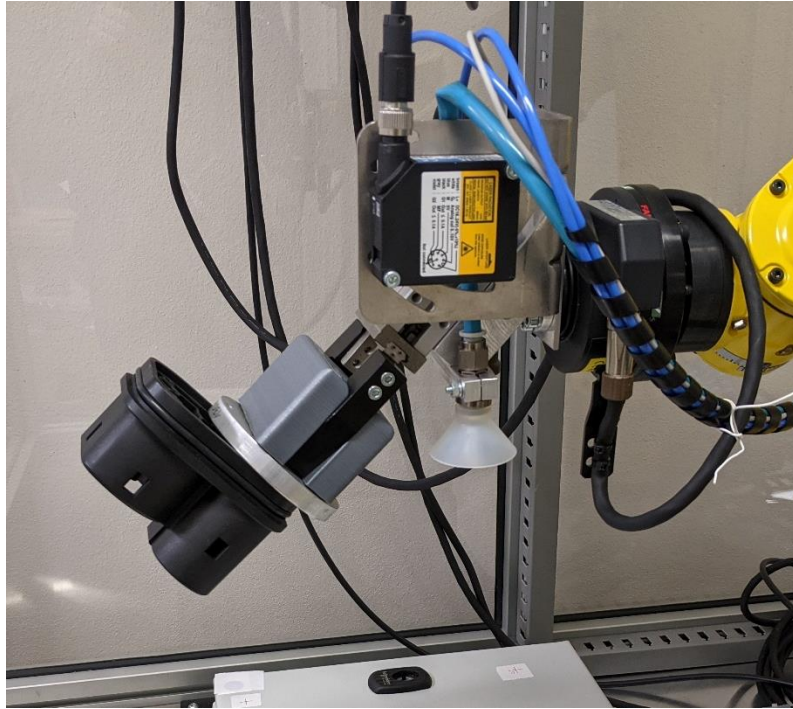
Osvětlení

Samotná zásuvka je dostatečně kontrastní a je matná, problémem jsou odrazy světelných zdrojů od povrchu přípravku. Při realizaci bylo pro funkci dostatečné osvětlení na rámu klece, pro zvýšení přesnosti systému by bylo vhodné umístit světelný zdroj na efektor blízko kamery. Přídavné osvětlení by také umožnilo práci systému ve tmě, například v neosvětlené garáži.

Dálkový senzor

Na efektoru je připevněn dálkový senzor SICK OD2-P250W150I0. Senzor je umístěn ve stejné orientaci jako kamera viz. Obrázek 15.

Senzor umožňuje měření vzdáleností v rozsahu 100–400 mm a je připojen na analogový vstup řídicího systému robotu.



Obrázek 15: Umístění dálkového senzoru na efektoru

5.3.2 Zpracování obrazových dat

Zpracování dat z kamery zajišťuje modul *iRVision*, který je součástí řídicího systému robotu. Jde o plně integrovaný vizuální detekční systém podporující 2D, 2½D a 3D snímání. Systém obsahuje nástroje pro lokalizaci objektů, kalibraci kamery, čtení čárových kódů a další funkce.

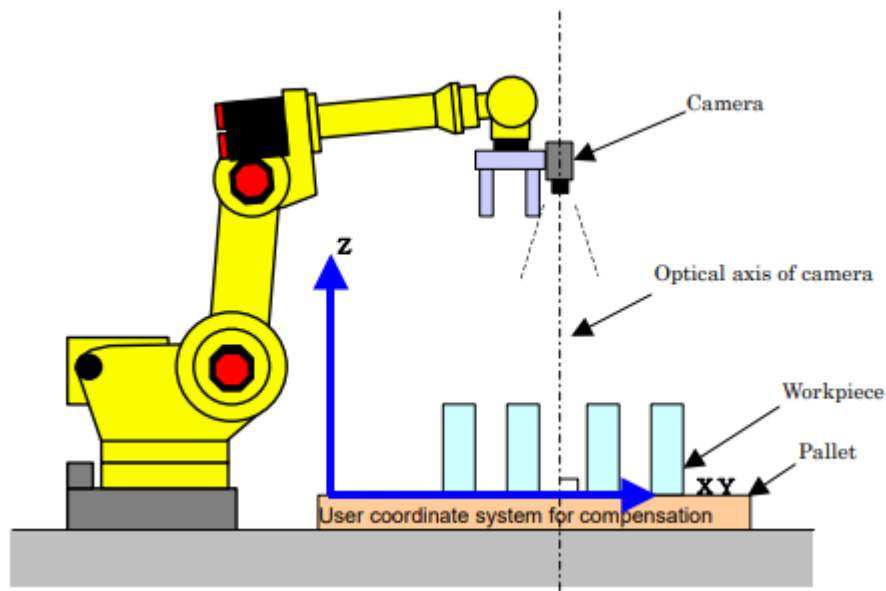
V době realizace práce byla k dispozici pouze 2D kamera byl proto použit 2D vision proces. Lokalizace zásuvky v prostoru byla řešena s pomocí dálkového senzoru.

Modul *iRVision* podporuje následující funkce pro 2D zpracování obrazu:

- *2D Single-view Vision Process* – funkce je navržena tak, aby umožnila uchopení součásti v definovaném místě kompenzací jejího posunu a otočení.
- *2D Multi-view Vision Process* – proces má stejnou funkci jako 2D Single-view Vision Process, je ale určený pro součásti, které se nevejdou do zorného pole kamery a je tedy nutné je fotit z více poloh.
- *Floating Frame Vision Process* – slouží pro měření posunu a otočení součásti v různých polohách kamery za použití jedné kalibrace.
- *Depalletizing Vision Process* – umožní 2½D lokalizaci součásti na paletě. Součást musí být zarovnaná kolmo ke kameře a musí mít známou výšku.

- *Bin-Pick Search Vision Process* – poskytuje informace o poloze součásti na paletě, součást může být v jakékoliv poloze. Proces neumožňuje kompenzaci otočení součásti, efektor musí umožňovat uchopení součásti za jakoukoliv stranu (např. magneticky).
- *3D Tri-View Vision Process* – umožňuje provést 3D kompenzaci polohy velké součásti, například karoserie vozidla. Funguje na principu zaměření třech značek na součásti.

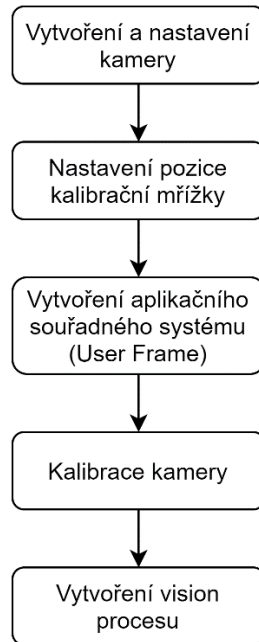
Pro úlohu je použit *2D Single-view Vision Process*. Proces umožní kompenzaci polohy zásuvky ve 2D rovině, vyžaduje ale focení kolmo k rovině kalibrace (X,Y) a v předem definované vzdálenosti (Z).



Obrázek 16: Schéma 2D Single-view Vision Process [16]

Příprava systému na použití

Před použitím vybraného vision procesu je nutné provést sérii kroků nastavení a kalibrace kamery.



Obrázek 17: Kroky nutné pro nastavení vision procesu

Vytvoření kamery

Prvním krokem je pojmenování nové kamery v menu *Vision Setup Tools* a nastavení rozlišení, výchozí doby expozice (lze měnit v jednotlivých vision úlohách) a umístění kamery (zda je fixní, nebo na ramenu robotu).

Nastavení pozice kalibrační mřížky

Pro kalibraci kamery je nejprve nutné určit polohu kalibrační mřížky. První možností je zaměření pozice koncovým bodem nástroje dotykem středů čtyř krajních bodů mřížky. Tato možnost vyžaduje přesně kalibrovaný *Tool Frame* nástroje.

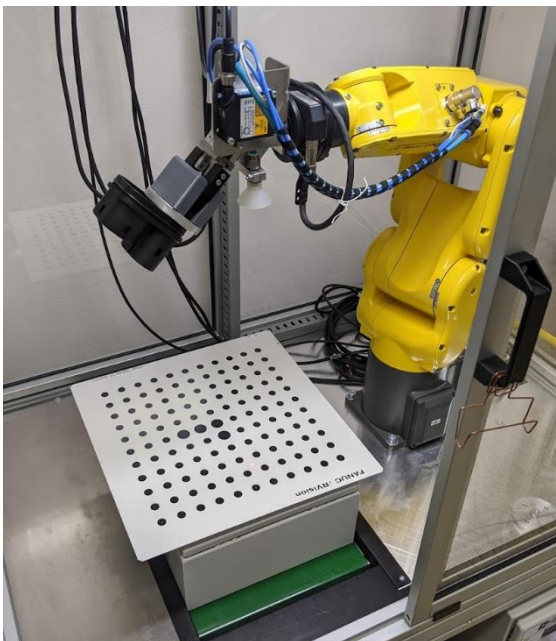
Druhou možností je využití funkce *Automatic Grid Frame Set*. Funkce provede automatické nafocení kalibrační mřížky z několika pozic a určí její polohu. Po dokončení procesu jsou výstupem dva souřadné systémy:

1. *User Frame* s počátkem ve středu kalibrační mřížky.
2. *Tool Frame* kamery.

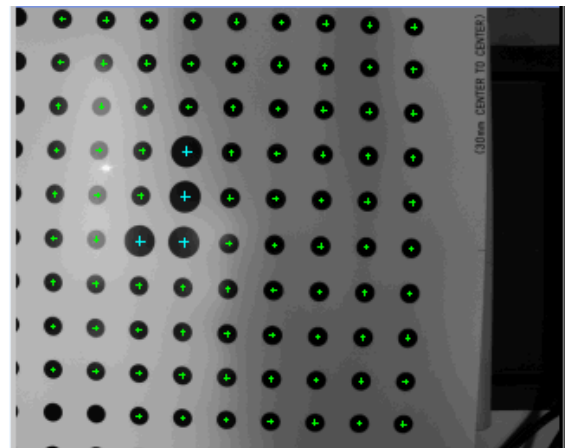
Tato funkce byla použita pro řešení úlohy.

Kalibrační mřížku je nutné umístit rovnoběžně s rovinou, ve které se bude provádět lokalizace objektu. Pro úlohu byla kalibrační mřížka umístěna v rovině horní stěny zásuvky viz Obrázek 19. Orientace mřížky byla zvolena tak, aby odpovídala orientaci *Word Frame*.

Pro kalibrační proces je nutné zvolit správnou velikost použité kalibrační mřížky. Dále se volí startovací pozice, maximální výchylky fotících pozic a maximální posun kamery v ose Z (osa kolmá na kalibrační mřížku). Tyto parametry je nutné uzpůsobit dostupnému prostoru. Kalibrační mřížka nemusí být v záběru kamery celá, musí být ale viditelné větší středové body a mřížka by měla vyplňovat celé zorné pole kamery.



Obrázek 19: Umístění kalibrační mřížky



Obrázek 18: záběr kamery ve startovací pozici

Nastavení aplikačního souřadného systému

Pro aplikaci je třeba vytvořit souřadný systém (*User frame*) ve kterém bude vision proces počítat polohu nalezeného objektu. Rovina XY tohoto souřadného systému musí být rovnoběžná s rovinou na které bude probíhat lokalizace objektu.

V aplikaci je použit souřadný systém kalibrační mřížky.

Kalibrace kamery

Kalibrace kamery je provedena pomocí nástroje *Grid Pattern Calibration Tool*. V nástroji je třeba vybrat správnou velikost kalibrační mřížky (*Grid Spacing*), parametr *Number of Planes* nastavit na 2 a vybrat *User Frame* pozice kalibrační mřížky z předchozího kroku (parametr *Cal. Grid Frame*). Následně je třeba provést focení mřížky ze dvou poloh. Kamera musí být směřována kolmo na plochu mřížky a pozice focení by měly být vůči sobě vzdálené 100-150 mm v ose kolmé na mřížku.

Vytvoření 2D Single-view Vision Process

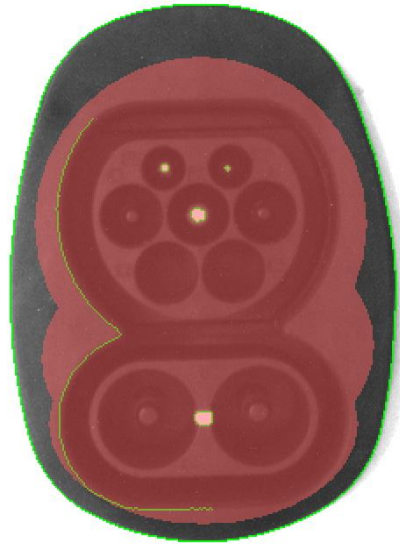
Po nastavení parametrů a kalibraci kamery je možné přejít k vytvoření samotného vision procesu. Pro správnou funkci je nutné zvolit parametry:

- *Camera Calibration* – data kalibrace kamery vytvořené v předchozích krocích.
- *Exposure Time* – doba expozice. Je třeba experimentálně nastavit podle světelných podmínek na pracovišti.
- *App. Z Coordinate* – rozdíl polohy referenčního souřadného systému proti poloze detekované součásti. V úloze je použit souřadný systém kalibrační mřížky umístěné v rovině zásuvky, parametr je tedy nulový.

Pro vision proces je dále třeba vybrat nástroj, který bude zásuvku v obraze detekovat. Pro úlohu byl použit nástroj *GPM Locator Tool*. Nástroj umožní lokalizaci vzoru v obraze s využitím detekce hran.

Jako hledaný vzor byla definována vnější hrana zásuvky, na Obrázek 20 označena zeleně. Vnitřní hrany zásuvky nebyly dobře detekovatelné, proto nebyly pro lokalizaci použity (červená oblast).

Střed hledaného vzoru je zvolen stejným způsobem jako *Tool Frame* zástrčky, tedy střed spojnice pinů pro rychlonabíjení. Střed nalezené zásuvky je označen na Obrázek 21. Zásuvka není symetrická, je tedy možné určit i její otočení.



Obrázek 20: Hledaný vzor



Obrázek 21: Úspěšná lokalizace zásuvky

Lokalizační nástroj poskytuje v případě nalezení hledaného vzoru informace:

- Posunutí v osách X a Y
- Otočení kolem osy Z
- Míra shody
- Velikost
- Poměr stran

Po nastavení hledaného vzoru a požadované míry shody je třeba v nastavení vision procesu zvolit *Snap and Find* a následně zvolit *Set Ref. Pos.* Tím dojde k lokalizaci objektu ve snímku a zaznamenání referenční polohy.

Posledním krokem je napolohování robotu do cílové pozice vůči hledanému dílu a uložení pozice do pozičního registru.

5.3.3 Postup lokalizace zásuvky

Po přípravě systému je postup lokalizace následující:

1. Pohyb robotu do definované fotící polohy.
2. Zavolání vision procesu – dojde k pořízení snímku a vyhledání vzoru.
3. Vyčtení posunutí hledaného objektu vůči referenční poloze.
4. Pohyb do cílové pozice s parametrem posunutí. Tím je zaručeno, že se nástroj bude vždy nacházet ve stejné poloze vůči součásti.

Ukázka kódu:

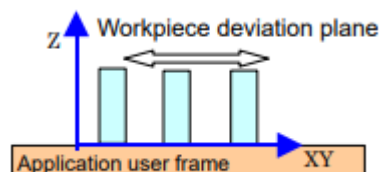
```
5:J PR[7:FotoPos1] 100% FINE
6: VISION RUN_FIND 'CCS2_6MM_SIMON'
7: VISION GET_OFFSET 'CCS2_6MM_SIMON' VR[1] JMP LBL[99]
8:L PR[8:App1] 80mm/sec FINE VOFFSET,VR[1]
```

Zdrojový kód 1: Lokalizace s pomocí vision procesu

Robot nejprve najede do fotící polohy uložené v registru PR[7]. Následně je zavolán vision proces a vyčtený offset je uložen do registru VR[1]. Následuje pohyb robotu do polohy uložené v registru PR[8] s offsetem VR[1].

Řešení omezení 2D procesu

Omezením 2D lokalizace je požadavek na focení ze známé vzdálenosti (Z) a součást se musí nacházet v rovině, ve které byla provedena kalibrace kamery (XY).



Obrázek 22: Omezení 2D vision procesu [16]

V úloze není známá rovina, kde se může zásuvka nacházet a docházelo by tak k příliš velkým chybám měření. Splnění podmínek zaručí sled instrukcí s využitím druhého 2D vision procesu a dálkového senzoru:

1. Pohyb do první fotící polohy. Tato poloha je vybrána tak, aby zorné pole kamery pokrývalo celý prostor, kde se může zásuvka nacházet.
2. Provedení prvního vision procesu. Zásuvka se může nacházet mimo rovinu kalibrace kamery, proto jsou pro parametry míry shody, velikosti a změny poměru stran vzoru nastaveny větší tolerance. Měření není dostatečně přesné pro pokus o zapojení konektoru, je ale dostačující pro určení bodů měření vzdáleností v dalším kroku.
3. Provedení třech měření vzdáleností na ploše kolem zásuvky, ze změřených vzdáleností je vypočteno natočení roviny stěny modelu.
4. Pohyb kamery do polohy se středem z prvního vision procesu, modifikované o úhly natočení zásuvky. Kamera je nyní orientována kolmo k rovině stěny přípravku.
5. Měření vzdálenosti kamery od zásuvky dálkovým senzorem a modifikace aktuální polohy tak, aby byla kamera umístěna v definované vzdálenosti od stěny přípravku. V tuto chvíli je zaručena správná orientace kamery vůči zásuvce pro přesné zaměření. Aby bylo možné spustit druhý vision proces, je aktuální pozice robotu nastavena jako nový *User Frame* ve kterém pokračuje zbytek programu.
6. Provedení druhého vision procesu a pohyb zástrčky do definované pozice nad zásuvkou. Druhý vision proces používá referenční *User Frame* z minulého kroku.

Po provedení těchto kroků je zástrčka v pozici 2 cm nad zásuvkou a je možné přejít ke kroku zapojení.



Obrázek 23: Pozice zásuvky před zapojením

Ukázka kódu vyčtení hodnoty z dálkového senzoru a výpočet roviny:

```
12: R[30:L1_DIST]=.1493*AI[2:2047]
13: R[30:L1_DIST]=R[30:L1_DIST]+10.16
14:
15:L PR[52:VislTarget] 80mm/sec FINE Tool_Offset,PR[50:x70]
16: R[31:L2_DIST]=.1493*AI[2:2047]
17: R[31:L2_DIST]=R[31:L2_DIST]+10.16
18:
19:L PR[52:VislTarget] 80mm/sec FINE Tool_Offset,PR[51:x70 y-70]
20: R[32:L3_DIST]=.1493*AI[2:2047]
21: R[32:L3_DIST]=R[32:L3_DIST]+10.16
22:
23: R[35:tmp]=R[30:L1_DIST]-R[31:L2_DIST]
24: R[35:tmp]=R[35:tmp]/70
25: R[34:ROT_Y]=(ATAN[R[35]])
26:
27: R[35:tmp]=R[31:L2_DIST]-R[32:L3_DIST]
28: R[35:tmp]=R[35:tmp]/70
29: R[33:ROT_X]=(ATAN[R[35]])
30:
31:J PR[52:VislTarget] 100% FINE
32:
33: PR[52,5:VislTarget]=PR[52,5:VislTarget]-R[34:ROT_Y]
34: PR[52,4:VislTarget]=PR[52,4:VislTarget]-R[33:ROT_X]
35:
36:J PR[52:VislTarget] 100% FINE
```

Zdrojový kód 2: Zajištění správné fotící polohy

Program na řádcích 12-21 uloží do registrů R[30], R[31] a R[32] vzdálenosti změřené ve třech polohách definovaných vůči cílové pozici z prvního vision procesu. Na řádcích 23-29 je vypočteno natočení roviny stěny přípravku. Následně je o úhly natočení upravena pozice v registru PR[52].

Kód pro modifikaci aktuální polohy do definované vzdálenosti od přípravku:

```
38: R[35:tmp]=.1493*AI[2:1518]
39: R[35:tmp]=R[35:tmp]+10.16
40: R[36:shift_x]=R[31:L2_DIST]-220
41:
42: PR[52,3:Vis1Target]=PR[52,3:Vis1Target]-R[36:shift_x]
43:L @PR[52:Vis1Target] 80mm/sec FINE
```

Zdrojový kód 3: Zarovnání vzdálenosti od kamery

Nastavení aktuální pozice jako nový *User Frame*, provedení druhého vision procesu a pohyb do polohy pro zapojení konektoru:

```
45: UFRAME_NUM=0
46: PR[4:frame_tmp]=LPOS
47: UFRAME[7]=PR[4:frame_tmp]
48: UFRAME_NUM=7
49: UTOOL_NUM=10
50:
51: VISION RUN_FIND 'CCS2_6MM_SIMON_NEAR'
52: VISION GET_OFFSET 'CCS2_6MM_SIMON_NEAR' VR[2] JMP LBL[98]
53:
54:L PR[9:App2] 80mm/sec FINE VOFFSET,VR[2]
```

Zdrojový kód 4: Změna User Frame a druhý vision proces.

5.4 Zapojení konektoru

Použitý systém strojového vidění není schopný zaručit dostatečnou přesnost lokalizace, proto je zapojení provedeno s podporou silové zpětné vazby. Silově-momentové řízení umožní drobné úpravy polohy a natočení ramena robotu během zapojování podle sil působících na efektor.

5.4.1 Hardware

Pro měření sil působících na zástrčku je mezi efektořem a ramenem robotu instalován silově-momentový senzor. Pro úlohu byl použit senzor FANUC FS-15iA. Jde o šestiosý senzor s maximálním zatížením 15 kg. Senzor je propojen s řídicím systémem robotu.



Obrázek 24: Umístění silově-momentového snímače

5.4.2 Řídící systém

Data ze silově-momentového snímače jsou zpracovávána modulem *Force Control*, který je součástí řídicího systému robotu. Systém obsahuje připravené funkce pro vkládání objektů, mechanickou kompletaci, tvarové obrábění, leštění, broušení a odstraňování otřepů.

Pro potřeby úlohy je třeba využít jednu z funkcí pro založení objektu:

- *Constrant push* – Robot působí konstantní silou proti povrchu. Během této operace robot neprovádí reorientaci.
- *Face Match* – Robot provede reorientaci nástroje, nebo uchopeného objektu tak, aby objekt dosedl celou svou plochou na plochu pracovního prostoru.
- *Bearing Insert, Shaft Insert, Groove Insert, Clutch Insert, Square Insert* – slouží k založení dílů různých tvarů. Robot při zakládání dílu působí konstantní silou a provádí reorientaci uchopeného dílu.
- *Pahase Match Insert* – Slouží pro založení válcové součásti se západkou.
- *Clutch Search, Phase Search, Hole Search* – Poskytují stejnou funkci jako funkce pro vkládání objektů, mají ale povolenou větší odchylku počáteční pozice. Slouží tedy zároveň k nalezení přesné polohy otvoru pro vložení.

Pro zapojení zásuvky byla použita funkce *Square Insert*.

Funkce *Face Match* by mohla během procesu lokalizace zásuvky nahradit měření náklonu roviny dálkovým senzorem. Zarovnaním plochy konce zástrčky s plochou přípravku je možné určit natočení této roviny. Při experimentech byla funkce příliš pomalá, a proto nebyla pro tento účel použita.

Příprava systému na použití

Před použitím vybrané funkce je nutné kalibrovat silově-momentový snímač a nastavit parametry.

Kalibrace silově-momentového snímače

Kalibrace váhy a těžiště nástroje připevněného na silově-momentovém snímači umožní kompenzaci jeho vlivu na měření během provádění funkcí. Pro některé případy není nutné kalibraci provádět, v případě úlohy je těžiště efektoru se zástrčkou umístěno mimo osu snímače a mohlo by měření ovlivnit, proto byla kalibrace provedena.

Kalibrace se provádí pomocí nástroje *Tool Weight&Gravity Center Cal.* Pro nástroj je třeba nastavit tři polohy, ve kterých bude provedeno měření. Doporučené polohy jsou uvedeny v manuálu modulu *Force Control*:

Tabulka 1: Doporučené polohy pro měření váhy a těžiště nástroje [17]

Position Number	Joint (J1,J2,J3,J4,J5,J6) (Unit: deg)	Orientation of robot flange
1	0, 0, 0, 0, -90, 0	-Z axis in world frame coordinate (Downward)
2	0, 0, 0, 0, 0, 0	+X axis in world frame coordinate (Forward)
3	0, 0, 0, 0, 90, 0	+Z axis in world frame coordinate (Upward)
4	0, 0, 0, 90, -90, 0	-Y axis in world frame coordinate (Horizontally)
5	0, 0, 0, -90, -90, 0	+Y axis in world frame coordinate (Horizontally)

Po provedení měření jsou data uložena a je možné je využít v jednotlivých funkcích.

Nastavení parametrů funkce

Každá funkce v systému *Force Control* má dvě úrovně parametrů: základní a pokročilé. Základní parametry použité funkce jsou:

- *Insert direction* – směr pohybu pro zapojení. V úloze jde o směr -Z nástroje zástrčky.
- *Contact F Treshold* – prahová síla při dotyku. Jde o prahovou sílu působící na efektor, která je považována za dotyk se součástí, do které je objekt vkládán. Nastaveno 10 N.
- *Approach Velocity* – rychlost pohybu dokud nedojde k prvnímu dotyku. Nastaveno 7 mm/s.

- *User Frame No* a *Tool Frame No.* – čísla použitých *User Frame* a *Tool Frame*. V programu UF = 7, TP = 10.
- *Insert Force* – síla pro zasunutí. Jde o požadovanou sílu ve směru zasouvání. V úloze musí být síla dostatečně velká, aby překonala odpor při zapojování zásuvky. Nastaveno 30 N
- *Insert Velocity* – rychlost zasouvání po prvním dotyku. Nastaveno 5 mm/s.
- *Insert Depth (Design)* – cílová hloubka. Tento parametr slouží k vyhodnocení za došlo k úplnému zasunutí objektu. V úloze je vzdálenost od začátku procesu (2 cm nad zásuvkou) do úplného zapojení 64 mm.
- *Individual Diff. (+)* a *(-)* – tolerance vyhodnocení dle cílové hloubky ve směru zapojování. V úloze jsou nepřesnosti způsobeny nepřesnostmi v lokalizaci zásuvky a měření vzdálenosti. Nastaveno 10 mm.
- *Pushing Time* – doba po dosažení cílové hloubky, po kterou bude systém působit nastavenou silou. V úloze jde o čas, po kterou bude robot působit silou 30 N po úplném zapojení zásuvky. Nastaveno 1 s.
- *Check Orientation Change* a *Change MAX Limit* – nastavení maximální změny orientace nástroje během procesu. V úloze není limit nastaven.
- *Insert Time MAX Limit* – časový limit procesu. Pokud proces nedosáhne požadované hloubky během časového limitu, předpokládá se, že proces nebyl úspěšný. Nastaveno 30 s.
- *F.Ctrl. Gain Auto Modify* – umožňuje automatickou změnu parametru impedance. V úloze není použito.
- *Force Control Gain* – nastavení parametrů impedance. Nastavení vyšší frekvence umožní rychlejší reakce systému, může ale vést k nestabilitě. V úloze nastaveno 2 Hz.

Pokročilých parametrů je velké množství, v úloze jsou modifikován pouze parametr:

- *Retry Sw* – umožní opakování procesu v případě neúspěchu. Maximální počet opakování je nastaven na 1.

Další pokročilé parametry umožní spuštění sekvence *Force Control* funkcí, detailnější nastavení vyhodnocení úspěchu/neúspěchu, a pokročilé nastavení sil. Při řešení úlohy nebylo nutné tyto parametry měnit z výchozích hodnot.

Parametry byly zvoleny doporučeným postupem:

1. Ověření, zda je objekt možné založit ručně, zda je pevně uchycen v efektoru a zda je výchozí pozice dostatečně přesná.
2. Nastavení *Insert Force* – nastavená síla musí být minimálně 2 N, nesmí způsobit poškození založeného objektu a nesmí překročit maximální možné zatížení silově-momentového senzoru
3. Spuštění programu.
4. V případě neúspěchu:
 - a. Zvýšit parametr *Master Frequency* zhruba o 10 %. Pokud se objeví vibrace, je třeba tento parametr snížit zhruba o 10 % a provést další pokus.
 - b. Zvýšit *Insert Force*
 - c. Zvýšit parametr *Fast Ins. Multiplier*

5.4.3 Postup zapojení konektoru

Nastavení parametrů se provádí v modulu *Force Control* mimo hlavní program. V hlavním programu se funkce zavolá a program pokračuje až po jejím dokončení.

Po dokončení funkce je konektor vypojen posunem v ose *Z User Frame* nástroje zástrčky.

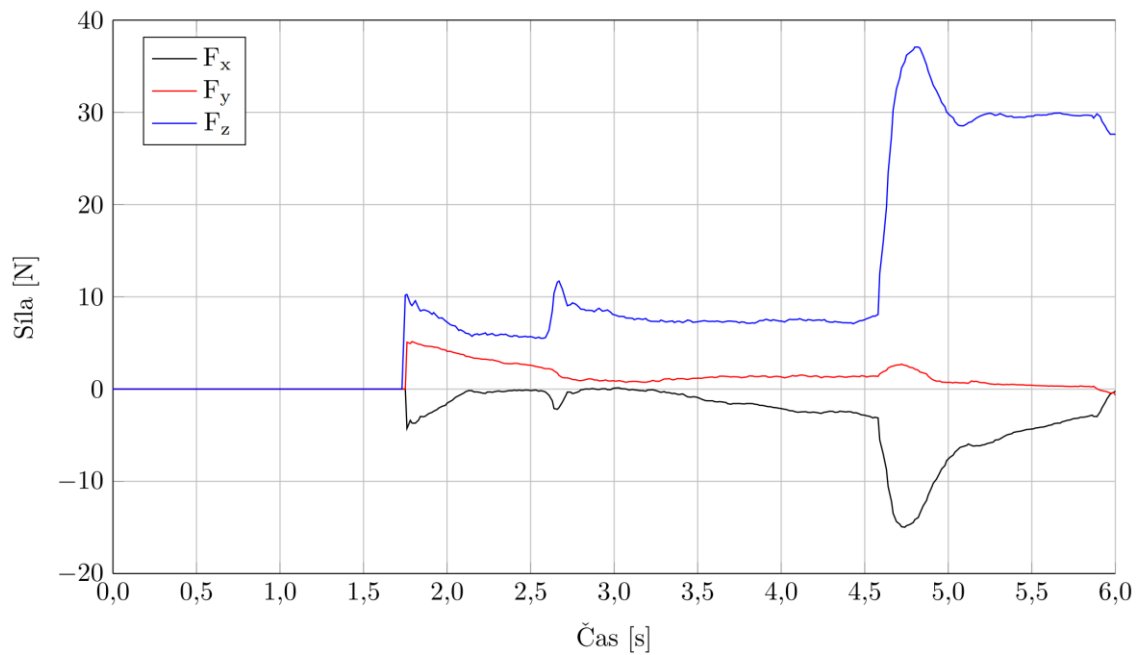
```
56: FORCE_CTRL[4:square_ccs2]
   : ErrorLBL[0]
57:
58: PR[4:frame_tmp]=LPOS
59:L PR[4:frame_tmp] 100mm/sec FINE Tool_Offset,PR[55:z100]
```

Zdrojový kód 5: Zapojení konektoru

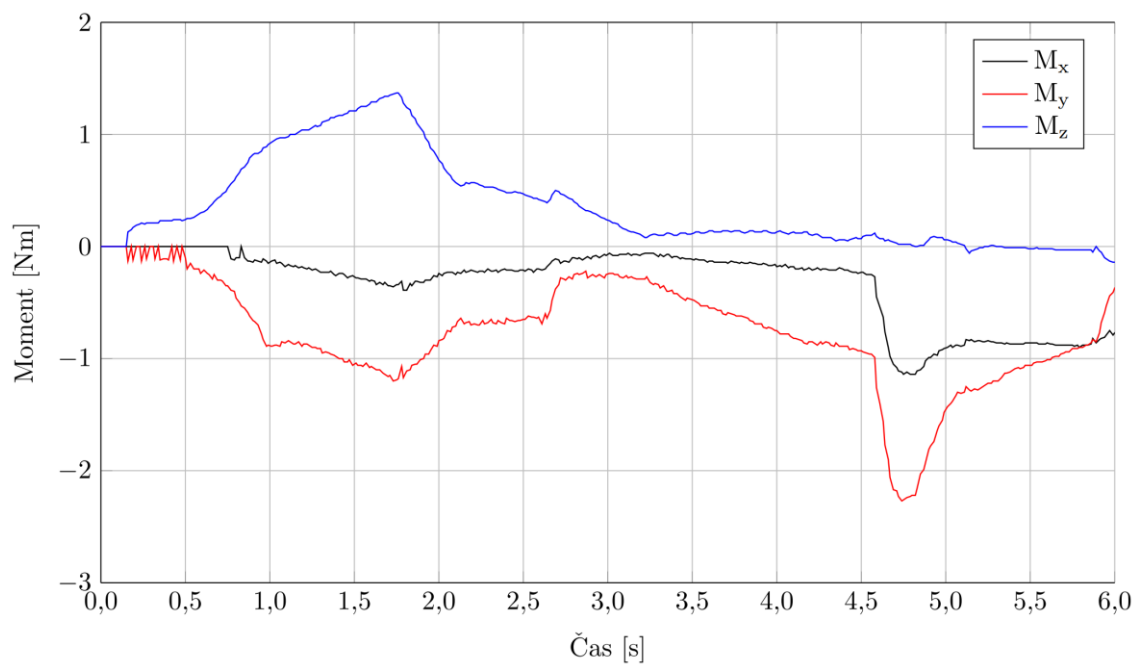
Průběh sil

Modul *Force Control* umožňuje záznam sil a momentů působících na snímač během probíhajícího procesu. Záznam dat může vést k pomalejšímu průběhu procesu, proto se doporučuje ho použít pouze pro ladění parametrů během nastavování procesu.

V následujících grafech je znázorněn průběh sil (F_x , F_y a F_z) a momentů (M_x , M_y a M_z) působících na zástrčku během zapojování po úspěšné vizuální lokalizaci (souřadný systém viz Obrázek 13).



Graf 1: Průběh sil působících na zástrčku během zapojování



Graf 2: Průběh momentů působících na zástrčku během zapojování

Během procesu zasouvání dochází k nárůstu sil a momentů, systém reaguje úpravou polohy a natočení zásuvky. V čase 5 s došlo k úplnému zapojení a systém udržuje nastavenou hodnotu síly 30 N po dobu 1 s.

5.5 Omezení experimentálního řešení

V laboratoři byla ověřena funkčnost systému robotizovaného zapojení nabíjecího konektoru. Systém byl plně funkční, má ale určitá omezení a některé aspekty nebyly otestovány.

Lokalizace zásuvky

Pro experimentální systém byl k dispozici pouze 2D vision systém. Potřeba lokalizace zásuvky v prostoru byla vyřešena použitím dálkového snímače.

Použité řešení je funkční, kombinace systémů ale vede k nepřesnostem v měření. Pro reálné nasazení by byl vhodnější 2½D, nebo 3D systém strojového vidění. Takový systém je dražší, umožní ale lokalizaci zásuvky v jednom kroku s vyšší přesností. Vyšší přesnost lokalizace by mohla umožnit zapojení konektoru bez silově-momentového snímače.

Bezpečnost

Experimentální systém je uzavřen v bezpečnostní kleci, není tedy nutné řešit bezpečnost. Pro nasazení v provozu pro dobíjení mobilní platformy je nutné vybavit pracovní prostor vhodnými bezpečnostními senzory a případně prostor fyzicky oddělit od obsluhy. Pokud je nutná přítomnost obsluhy, je možné použít kolaborativní robot.

Konektory a kabel

Konektory použité pro testování byly bez napájecích pinů z důvodu omezené maximální nosnosti použitého robotu, který by pro konektory s piny nebyl schopný vyvinout dostatečnou sílu pro zapojení. Řešením tohoto problému je použít robot s vyšší nosností.

Testovací konektor byl bez napájecího kabelu, nebylo tedy otestováno chování systému v reakci na síly vznikající od pohybu kabelu. Problematický může být zejména vliv na měření silově-momentového snímače. Řešením je vhodné upevnění kabelu k robotu tak, aby byly nežádoucí síly působící na efektor minimalizovány.

6 Závěr

V úvodní části byla vypracována řešení systémů silově-momentového řízení a strojového vidění. Byly popsány základní principy těchto systémů a používaný hardware.

V rámci práce byla řešena úloha robotizovaného připojení nabíjecího konektoru k autonomní mobilní platformě. Navrhované řešení počítá s využitím nabíjecí stanice a konektoru pro nabíjení elektrických vozidel.

Autonomní mobilní platforma nebyla v době realizace k dispozici, proto byla úloha realizována na zjednodušeném modelu na robotickém pracovišti. Byla ověřena funkčnost lokalizace zásuvky s použitím strojového vidění a možnosti zapojení konektoru Combo 2 průmyslovým robotem za využití silově-momentové zpětné vazby.

Experimentální řešení má několik omezení, která plynou zejména z omezené dostupnosti hardwaru pro testování. Z důvodu omezené nosnosti robotu bylo nutné použít upravený konektor Combo 2 a odstranit napájecí kabel. Použitou 2D kameru bylo pro lokalizaci zásuvky v prostoru nutné doplnit senzorem vzdálenosti, pro úlohu by byla vhodnější 2½D, nebo 3D kamera.

Úloha byla realizována úspěšně, řešením daných omezení je využití vhodnějších komponent, zejména robotu s vyšší nosností a lepšího systému strojového vidění.

Použitá literatura

- [1] SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB. *Springer handbook of robotics*. Berlin: Springer, c2008. ISBN 978-3-540-23957-4.
- [2] YOSHIKAWA, T. Force control of robot manipulators. In: *Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065)* [online]. IEEE, 2000, s. 220-226 [cit. 2020-11-21]. Dostupné z: doi:10.1109/ROBOT.2000.844062
- [3] YEN, Shih-Hsiang, Pei-Chong TANG, Yuan-Chiu LIN a Chyi-Yeu LIN. Development of a Virtual Force Sensor for a Low-Cost Collaborative Robot and Applications to Safety Control. *Sensors* [online]. 2019, 19(11) [cit. 2020-11-22]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s19112603
- [4] TSETSERUKOU, Dzmitry a Susumu TACHI. Torque Sensors for Robot Joint Control. GERARDO, Jose a Senentxu LANCEROS-MENDEZ, ed. *Sensors: Focus on Tactile Force and Stress Sensors* [online]. InTech, 2008, 2008-12-01 [cit. 2020-11-21]. ISBN 978-953-7619-31-2. Dostupné z: doi:10.5772/6614
- [5] *ATI Industrial Automation: F/T Sensor: Axia80-M20* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Axia80-M20
- [6] *ROS Components: HEX Force Sensor On Robot* [online]. [cit. 2020-12-2]. Dostupné z: https://www.roscomponents.com/en/force-sensors/258-hex-force-sensor-on-robot.html#/models-_rb_or_hex_e_c_hex_e_w_compute_box_and_flange_c
- [7] HORNBERG, Alexander, ed. *Handbook of machine vision*. Weinheim: Wiley-VCH, 2006. ISBN 3-527-40584-4.
- [8] HOTAŘ, Vlastimil. *Úvod do problematiky strojového vidění*. V Liberci: Technická univerzita, 2015. ISBN 978-80-7494-156-6.
- [9] ILONEN, J. a V. KYRKI. Robust robot-camera calibration. In: *2011 15th International Conference on Advanced Robotics (ICAR)* [online]. IEEE, 2011, 2011, s. 67-74 [cit. 2020-11-21]. ISBN 978-1-4577-1159-6. Dostupné z: doi:10.1109/ICAR.2011.6088553

- [10] FALVO, Maria Carmen, Danilo SBORDONE, I. Safak BAYRAM a Michael DEVETSIKIOTIS. EV charging stations and modes: International standards. In: *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion* [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 1134-1139 [cit. 2020-04-20]. ISBN 978-1-4799-4749-2. Dostupné z: doi:10.1109/SPEEDAM.2014.6872107
- [11] Combined Charging System. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_Charging_System
- [12] MOULI, Gautham Ram Chandra, Prasanth VENUGOPAL a Pavol BAUER. Future of electric vehicle charging. In: *2017 International Symposium on Power Electronics (Ee)* [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-7 [cit. 2020-03-08]. ISBN 978-1-5386-3502-5. Dostupné z: doi:10.1109/PEE.2017.8171657
- [13] MISEIKIS, Justinas, Matthias RÜTHER, Bernhart WALZEL, Mario HIRZ a Helmut BRUNNER. 3D Vision Guided Robotic Charging Station for Electric and Plug-in Hybrid Vehicles [online]. Graz, 2017 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://arxiv.org/pdf/1703.05381.pdf>. TU Graz.
- [14] DORMEHL, Luke. This robot arm could soon recharge your electric car, no driver effort required. In: DIGITAL TRENDS [online]. 15.8.2019 [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://www.digitaltrends.com/cool-tech/robot-arm-electriccar-charging/>
- [15] KANE, Mark. Volkswagen Develops Automated Quick Charging esmartConnect (w/video). In: INSIDE EVs [online]. [cit. 2020-03-08]. Dostupné z: <https://insideevs.com/news/327736/volkswagen-develops-automated-quickcharging-esmartconnect-w-video/>
- [16] FANUC, iRVision 2D Vision START-UP GUIDANCE. B-82774EN-3/03
- [17] FANUC, Force Sensor OPERATOR'S MANUAL. B-83424EN/02

Seznam příloh

- Elektronická verze práce
- Zdrojový kód programu