

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: Průmyslové inženýrství a management
N0715A270012

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Systemy strojového vidění a jejich využití v průmyslové robotice

Autor: Bc. Jakub MÜLLER
Vedoucí práce: Ing. Tomáš BROUM, Ph.D.

Akademický rok 2021/2022

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jakub MÜLLER**
Osobní číslo: **S19N0146P**
Studijní program: **N0715A270012 Průmyslové inženýrství a management**
Téma práce: **Systémy strojového vidění a jejich využití v průmyslové robotice**
Zadávací katedra: **Katedra průmyslového inženýrství a managementu**

Zásady pro vypracování

1. Systémy strojového vidění
2. Využití systémů strojového vidění v průmyslové robotice
3. Použití vybraného systému strojového vidění pro práci kolaborativního robota
4. Vyhodnocení

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **0**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

1. HOTAŘ, Vlastimil. *Úvod do problematiky strojového vidění*. 1. vydání. Liberec: Technická univerzita, 2015. ISBN 978-80-7494-156-6.
2. CHLEBNÝ, Jan a kol. *Automatizace a automatizační technika: Prostředky automatizační techniky*. Brno: Computer Press, 2014. ISBN 978-80-251-3747-5.
3. KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Broum, Ph.D.**
Katedra průmyslového inženýrství a managementu

Konzultant diplomové práce: **Ing. Michael Froněk**
ARC-Robotics s.r.o., Plzeň

Datum zadání diplomové práce: **20. září 2021**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2022**

L.S.

Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

Doc. Ing. Michal Šimon, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 20. září 2021

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Chtěl bych poděkovat Ing. Tomáši Broumovi, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce a Ing. Michaelu Froňkovi, konzultantovi mé diplomové práce za cenné rady a trpělivost. Rovněž bych chtěl poděkovat všem, kteří mi radou, podporou a cennými zkušenostmi umožnili dokončit práci.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Müller	Jméno Jakub		
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270012 Průmyslové inženýrství a management			
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Broum, Ph.D.	Jméno Tomáš		
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KPV			
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte	
NÁZEV PRÁCE	Systémy strojového vidění a jejich využití v průmyslové robotice			

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KPV	ROK ODEVZD.	2022
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	70	TEXTOVÁ ČÁST	70	GRAFICKÁ ČÁST	0
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce pojednává o systémech strojového vidění a jejich využití v průmyslové robotice. V teoretické části jsou popsány systémy strojového vidění a úvod do průmyslové robotiky. V praktické části je popsána tvorba programu s využitím procesů vidění a provedeno několik experimentů. V závěru je experiment otestován, vyhodnocen a popsán z pohledu možného využití.
KLÍČOVÁ SLOVA	Automatizace, systémy strojního vidění, průmyslová robotika, kolaborativní roboti, proces vidění

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Müller	Name Jakub		
STUDY PROGRAMME	N0715A270012 Department of Industrial Engineering and Management			
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Broum, Ph.D.	Name Tomáš		
INSTITUTION	ZČU - FST - KPV			
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable	
TITLE OF THE WORK	Machine vision systems and their use in industrial robotics			

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Industrial Engineering and Management	SUBMITTED IN	2022
----------------	------------------------	-------------------	---------------------------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	70	TEXT PART	70	GRAPHICAL PART	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis deals with machine vision systems and their use in industrial robotics. The theoretical part describes machine vision systems and an introduction to industrial robotics. In the practical part, the design of the program using vision processes is described and several experiments are performed. Finally, the experiment is tested, evaluated and described in terms of possible applications.
KEY WORDS	Automation, machine vision systems, industrial robotics, collaborative robots, vision process

Obsah

Úvod.....	11
1 Systémy strojového vidění.....	12
1.1 Historie.....	13
1.2 Základní kategorie systémů strojového vidění.....	13
1.3 Kamerové systémy – senzory a parametry.....	16
1.3.1 Parametry kamerových systémů.....	16
1.3.2 Kamerové senzory.....	17
1.4 Moderní trendy v oblasti strojového vidění.....	19
2 Využití systémů strojového vidění v průmyslové robotice.....	23
2.1 Robotika.....	23
2.2 Průmyslový robot.....	27
2.2.1 Typy průmyslových robotů:.....	31
2.2.2 Kolaborativní robot.....	35
2.3 Příklady aplikovaných řešení snímacích senzorů v praxi.....	37
2.3.1 2D kamerová kontrola natočení výrobku v automotive průmyslu.....	37
2.3.2 Navádění robota na hliníkový profil pomocí 3D kamery.....	38
2.3.3 3D bin-picking ocelových hřídelek.....	39
2.3.4 Čtení QR kódu.....	40
3 Použití 2D kamery pro práci kolaborativního robota.....	41
3.1 Pracoviště.....	41
3.1.1 Kolaborativní robot.....	41
3.1.2 Kamerový systém.....	44
3.2 Popis experimentu.....	44
3.3 Nastavení kamerového systému.....	47
3.4 Programování kolaborativního robota.....	52
3.4.1 Základní příkazy pro programování kolaborativního robota Fanuc.....	52
3.4.2 Hierarchie programů.....	53
3.4.3 Ukázka hlavního programu v programovacím jazyku KAREL.....	54
3.4.4 Vytvořené programy.....	55
4 Vyhodnocení experimentů.....	60
4.1 Experiment 1: Sestavení objektů do výsledné sestavy.....	60
4.2 Experiment 2: Rozpoznání a uchopení objektů.....	61
4.3 Experiment 3: Osvětlení pracoviště.....	63
4.4 Využití experimentu.....	64
5 Závěr.....	65

Seznam obrázků

Obrázek 1.1 - Systém strojového vidění [3]	12
Obrázek 1.2 – Historie počítačového vidění [7]	13
Obrázek 1.3 - Kamerový senzor [17].....	14
Obrázek 1.4 - Inteligentní kamera [18].....	15
Obrázek 1.5 - PC systém [19].....	15
Obrázek 1.6 - Porovnání hardware [6].....	16
Obrázek 1.7 - CCD senzor [9]	18
Obrázek 1.8 - CMOS senzor [9]	19
Obrázek 1.9 - Umělá inteligence, Strojové učení a Hluboké učení [15]	20
Obrázek 1.10 - Tekuté čočky – Vypnuto [8]	21
Obrázek 1.11 - Tekuté čočky – Zapnuto [8].....	22
Obrázek 2.1 - R2-D2 robot [20].....	23
Obrázek 2.2 - Lékařský robot [27].....	24
Obrázek 2.3 - Výzkumný robot [28].....	25
Obrázek 2.4 - Bezpečnostní robot [29].....	25
Obrázek 2.5 - Nano robot [31].....	25
Obrázek 2.6 - Humanoidní robot [32].....	26
Obrázek 2.7 - Létací robot [33].....	26
Obrázek 2.8 - Plovoucí robot [34]	26
Obrázek 2.9 - Hybridní robot [35]	27
Obrázek 2.10 - Možný vývoj robotů [21]	27
Obrázek 2.11 - Pendant Kuka [30]	29
Obrázek 2.12 - Typy uchopení [36].....	30
Obrázek 2.13 - Dvoučelist'ové paralelní chapadlo [37]	30
Obrázek 2.14 - Kolaborativní chapadlo [38]	31
Obrázek 2.15 - FANUC LR Mate [40]	31
Obrázek 2.16 - FANUC M1 [40].....	32
Obrázek 2.17 - FANUC SR-3iA [40]	32
Obrázek 2.18 - FANUC M410 [40].....	33
Obrázek 2.19 - FANUC Svařování elektrickým obloukem [40]	33
Obrázek 2.20 - FANUC P-350iA/45 [40].....	34
Obrázek 2.21 - Kolaborativní robot CRX-10iA [40].....	34
Obrázek 2.22 - ABB robot Yumi [49]	36
Obrázek 2.23 - Využití kolaborativních robotů, 2019 [50]	37
Obrázek 2.24 - 2D kamera	38
Obrázek 2.25 – 3D kamera	38
Obrázek 2.26 – Bin-picking.....	39
Obrázek 2.27 – Čtečka QR kódu	40
Obrázek 3.1 - Pracoviště kolaborativního robota	41
Obrázek 3.2 - Jednotlivý klouby robota [53]	42
Obrázek 3.3 - Řídící jednotka	43
Obrázek 3.4 – iPedant	43
Obrázek 3.5 - Kolaborativní chapadlo a 2D kamera.....	43
Obrázek 3.6 - Prostředí iRVsion.....	44
Obrázek 3.7 - Podstava	45
Obrázek 3.8 - Objekty 1, 2 a 3	45
Obrázek 3.9 - Proces vidění – Zadání garáže nebo domu.....	45
Obrázek 3.10 - Rozvržení pater dům	46
Obrázek 3.11 - Výsledná sestava domu	46

Obrázek 3.12 - Rozvržení pater garáž.....	47
Obrázek 3.13 - Nastavení procesu podstava	48
Obrázek 3.14 - Snap Tool podstavy.....	48
Obrázek 3.15 - GPM podstavy.....	49
Obrázek 3.16 - GPM, dokončení nastavení podstavy	49
Obrázek 3.17 - GPM objekt 1	50
Obrázek 3.18 - GPM objekt 2 I.....	50
Obrázek 3.19 - GPM objekt 2 II	51
Obrázek 3.20 - GPM objekt 3	51
Obrázek 3.21 - Pohybové instrukce [58]	52
Obrázek 3.22 - Hierarchie programů	54
Obrázek 3.23 - Program "DP_Hlavni".....	55
Obrázek 3.24 - Diagram "DP_Hlavni"	56
Obrázek 3.25 - Diagram "DP_DUM" a "DP_GARAZ"	56
Obrázek 3.26 - Diagram "DP_1" a "DP_3"	57
Obrázek 3.27 - Diagram "DP_2"	57
Obrázek 3.28 - Diagram "DP_1" a "DP_3" preuchopení	58
Obrázek 3.29 - Diagram "DP_2" preuchopení.....	58
Obrázek 3.30 - Diagram "DP_Podstava"	59
Obrázek 4.1 - Skóre objektů v zorném poli kamery	61
Obrázek 4.2 - Objekt 3 s posunutým středem.....	62
Obrázek 4.3 - Osvětlení pracoviště	63
Obrázek 4.4 - Luxmetr	63

Seznam tabulek

Tabulka 2.1 - Sortiment FANUC	35
Tabulka 2.2 - Výrobci kolaborativních robotů	36
Tabulka 3.1 - Technické informace [52].....	42
Tabulka 3.2 - Příkazy využité při programování	53
Tabulka 4.1 - Chybovost sestavení	60
Tabulka 4.2 - Chybovost uchopení	61
Tabulka 4.3 - Tabulka hodnot osvětlení	63

Seznam zkratk

PLC	Programmable logic controller
CCD	Charge coupled device
CMOS	Complementary metal oxide semiconductor
TTL	Transistor-Transistor logic
PC	Portable computer
MMI	Man machine interface
PAL	Phase alternate line
IP	Síťová kamera
HD	High definiton
Lx	Lux

Úvod

Diplomová práce pojednává o systémech strojového vidění a jejich použití v průmyslové robotice. Cílem diplomové práce je přiblížení problematiky strojového vidění u kolaborativních robotů, úspěšné zpracování úlohy při využití systému strojového vidění v laboratoři na Západočeské univerzitě a vyhodnocení.

Roboti a kolaborativní roboti se postupně dostávají do všech odvětví výrobního průmyslu. V této práci se bude využívat kolaborativního robota. Základní definicí kolaborativního robota: Robot, který může spolupracovat s člověkem bez bezpečnostního oplocení (klec). Tuto spolupráci umožňují čidla robota, která tak brání ve střetu s člověkem. Pro automatizaci kolaborativních robotů je zapotřebí „vidět“. Tuto technologie vidění poskytují systémy strojového vidění.

Strojové vidění využívá kameru nebo více kamer pro kontrolu a analýzu objektů automatickým způsobem. Data získána z kamery jsou zpracovány v řídicím systému s možností automaticky adaptovat pohybovou úlohu. V budoucnosti mohou být tyto systémy v kombinaci s kolaborativními roboty plnou náhradou lidské pracovní síly.

První část rešerše se zaměřuje na jednotlivé systémy strojového vidění. Strojové vidění je základ této práce, a tudíž se tomu věnuje celá jedna kapitola. Kapitola obsahuje určení správné definice, historie, typy kamer a trendy ve strojovém vidění.

Druhá část rešerše obsahuje úvod do robotiky jako je základní rozdělení robotů, podrobný popis kolaborativního robota a výrobců kolaborativních robotů. Závěr druhé části se zaměřuje na využití a příklady jednotlivých systémů strojového vidění přímo z praxe.

K praktické části byly vytisknuty objekty a podstava na 3D tiskárně. Objekty a podstava slouží jako stavebnice pro praktickou část. Cílem úlohy je, aby proces vidění dokázal načíst typ úlohy, souřadnice podstavy a následně sestavil celou úlohu. Systém skrze proces vidění dokáže odebírat a skládat objekty na podstavu po celém zorném poli kamery.

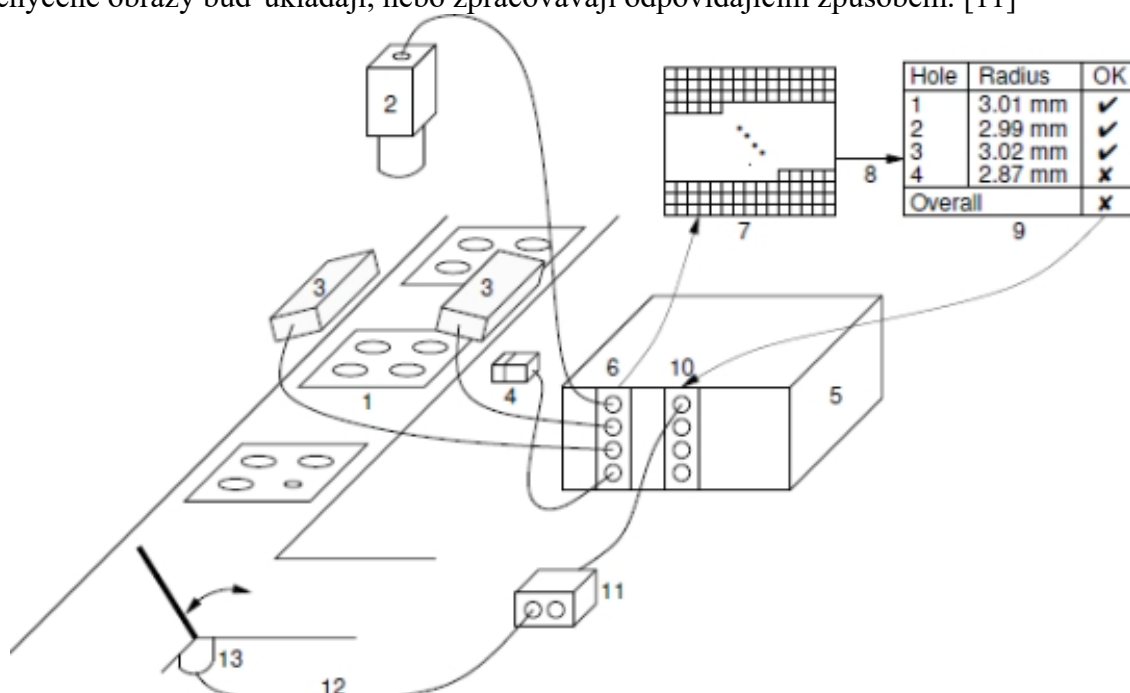
Závěrem práce je vyhodnocení experimentu z pohledu úspěšnosti sestavování a uchopení jednotlivých objektů. U vyhodnocení je zahrnut také vliv osvětlení na systém a případné využití systému v praxi.

1 Systémy strojového vidění

Tato kapitola se týká základního popisu a úvodu do strojového vidění. Strojové vidění pomáhá spolehlivě a důsledně řešit složité průmyslové úkoly. Definice strojového vidění podle Automated Imaging Association zahrnuje všechny průmyslové i neprůmyslové aplikace, u kterých kombinace hardwaru a softwaru poskytuje zařízením provozní pokyny při provádění činností na základě snímání a zpracování obrazu. [1]

Definice podle Robotics Tomorrow: Strojové vidění je schopnost počítače vnímat prostředí. Používá se jedna nebo více kamer s analogově-digitálním převodem a digitálním zpracováním signálu. Obrazová data jsou odesílána do počítače nebo řídicí jednotky robota. [10]

Definice podle Techopedia: Systém strojového vidění je typ technologie, která umožňuje počítačovému zařízení kontrolovat, vyhodnocovat a identifikovat statické nebo pohyblivé obrazy. Jedná se o obor počítačového vidění a je dosti podobný sledovacím kamerám, ale poskytuje automatické snímání, vyhodnocování a schopnosti obrazu. Systém strojového vidění především umožňuje počítači rozpoznávat a vyhodnocovat obrazy. Je podobný technologii rozpoznávání hlasu, ale místo toho používá obrázky. Systém strojového vidění se obvykle skládá z digitálních kamer a hardwaru a softwaru pro zpracování obrazu. Kamera na předním konci snímá obrazy z prostředí nebo ze zaměřeného objektu a poté je odesílá do systému zpracování. V závislosti na konstrukci nebo potřebě systému strojového vidění se zachycené obrazy buď ukládají, nebo zpracovávají odpovídajícím způsobem. [11]

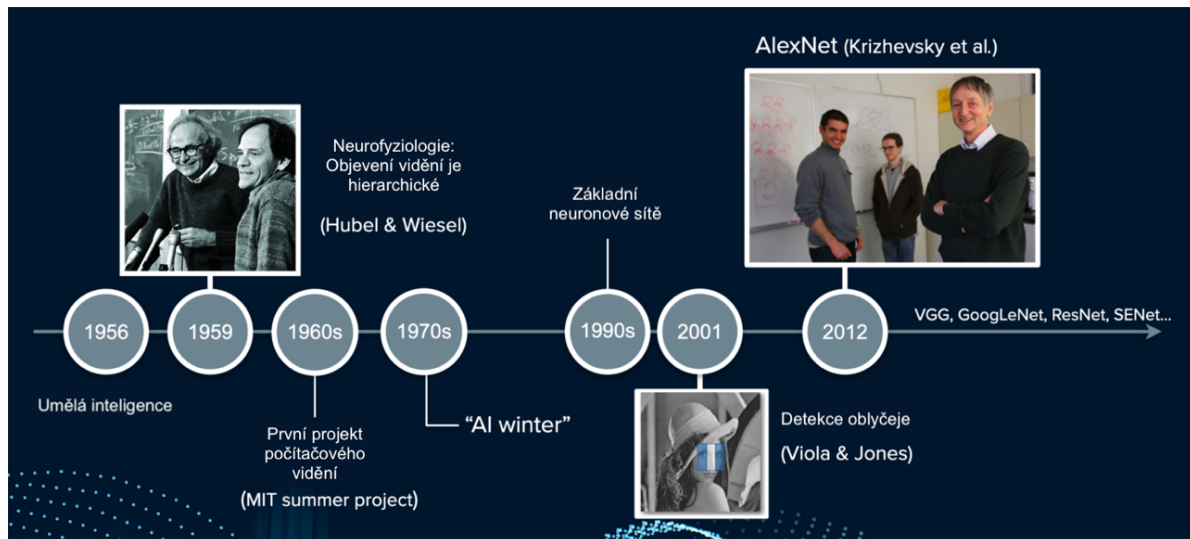


Obrázek 1.1 - Systém strojového vidění [3]

Na obrázku 1.1 lze vidět základní schéma systému strojového vidění. Obraz objektu (1) je pořízen kamerou (2). Objekt je osvětlen osvětlovačem (3) a pořízení obrazu spouští fotoelektrický spínač (4). Počítač (5) pořizuje obraz prostřednictvím rozhraní kamera-počítač (6). Fotoelektrický spínač je připojen ke snímacímu zařízení. Snímací zařízení spouští osvětlení. Ovladač zařízení sestává obraz (7) v paměti počítače. Software strojového vidění (8) kontroluje objekty a vrací vyhodnocení objektů (9). Výsledek vyhodnocení je prostřednictvím digitálního rozhraní (10) sdělen PLC (11). PLC řídí pohon (13) prostřednictvím sběrnice rozhraní (12). [3]

1.1 Historie

Počátky strojového vidění začaly v sedmdesátých letech dvacátého století. Výpočetní technika umožňovala práci s takovými objemy dat, které dokázaly nést obrazovou informaci. Obor dostal název „computer vision“. V dnešní době je tento název využíván obecně pro systémy, které pracují automaticky na základě informací získaných ze zpracování obrazu z kamery. V průmyslové výrobě se využívá termín „machine vision“ tedy strojové vidění. [1]



Obrázek 1.2 – Historie počítačového vidění [7]

Na obrázku 1.2 jsou uvedeny milníky historie strojového vidění. Termín umělá inteligence (artificial intelligence) byl prvně použitý na konferenci roku 1956. Velkým objevem bylo roku 1959 v neurofyziologii, že vidění je hierarchické. To znamená, že když vidíte nějaký objekt, vaše jednoduché buňky, které mají na starosti nízkou úroveň vizuálního zpracování, nejprve identifikují hrany nebo určují orientaci hran, a pak složitější buňky přijmou barvy a základní 2D tvary. Nakonec ještě složitější buňky budou provádět vizuální zpracování na vysoké úrovni, jako je rozpoznávání složitých rysů nebo integrace informací. Na základě těchto poznatků o hierarchii vidění plánovali vědci, kteří toužili realizovat umělou inteligenci, vytvořit tento mechanismus v digitální podobě, aby mohli robotům poskytnout "vidění" (ve skutečnosti velmi náročný úkol). [7]

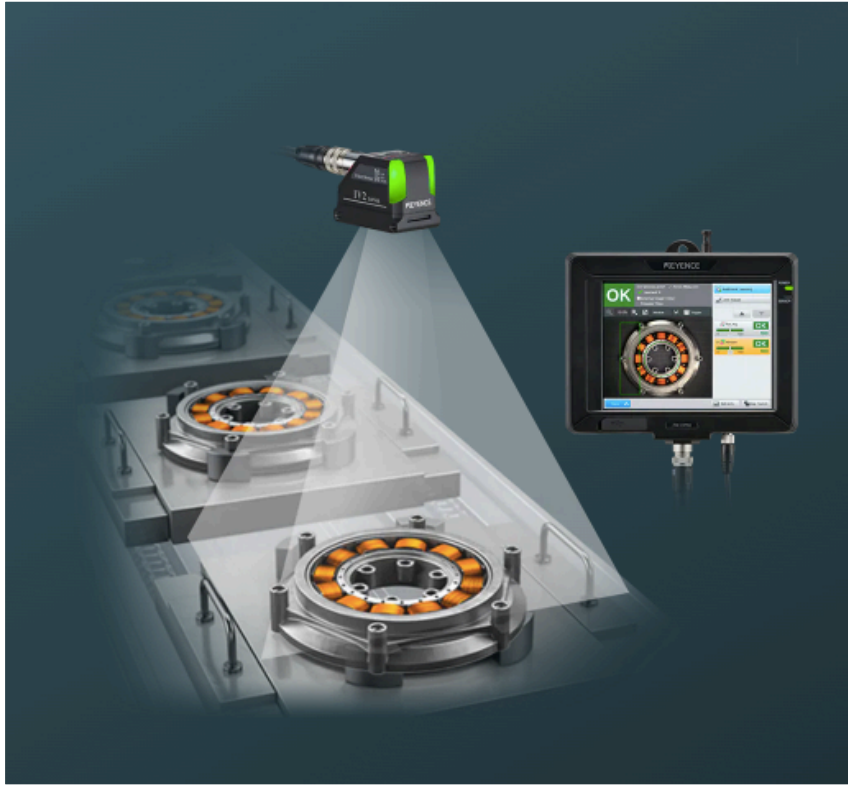
„Letní projekt“ byl první projekt počítačového vidění pro studenty prvního ročníku na MIT v roce 1966. Cílem bylo připojit kameru k počítači a nechat počítač popsat, co „vidí“, ale tento projekt byl bez úspěchu. „Zlatý věk“, probíhající v 50. – 70. letech přinesl plno konceptů umělé inteligence a vytvořil ve veřejnosti velká očekávání, avšak očekávání se nenaplnila. V 70. letech přišel útlum umělé inteligence zapříčiněný nedostatkem finančních i technických prostředků. Navzdory pomalému postupu výzkumu byly na přelomu 80. a 90. let vyvinuty základní neuronové sítě. V roce 2001 navrhli Viola & Jones detekci obličejů. [7]

1.2 Základní kategorie systémů strojového vidění

Rozděluje čtyři kategorie systémů strojového vidění. Většinou je možné použít různou výpočetní techniku a jednotlivé části různě kombinovat. Každá ze čtyř skupin rozdělení systémů strojového vidění se zaměřuje na určitou skupinu úloh.

Kamerový senzor

Využívá se jako nejjednodušší prostředek strojového vidění, jelikož snímá pomocí kamery (Obrázek 1.3). Systém bývá integrován do jednoho pouzdra. Tento typ má omezený digitální počet vstupů a výstupů. Standardní tranzistorové výstupy PNP nebo NPN, které obsahují ochranu proti přepólování. Tento systém strojového vidění slouží k vytvoření velmi snadného systému pro použití, což znamená i některá omezení systému (softwarová, komunikační, použití a I/O). [6]



Obrázek 1.3 - Kamerový senzor [17]

Inteligentní kamera

Inteligentní kamera je kompletní systém strojového vidění. Inteligentní kamera obsahuje jak vlastní kameru, tak i jednočipový mikropočítač, který slouží jako vyhodnocovací jednotka (Obrázek 1.4). Program se ukládá do paměti typu flash (rychlejší ukládání). Trendem u inteligentních kamer je jejich miniaturizace, která nutí výrobce ustupovat od standardů. Pro digitální vstupy a výstupy se využívají PNP, NPN nebo TTL, které pro připojení k výrobnímu procesu potřebují ještě galvanicky oddělený převodník úrovní. Jako komunikační zařízení se využívá klasický počítač (MMI), který umožňuje kameru programovat. Pokud MMI tedy počítač zobrazuje obraz snímáný kamerou v reálném čase vede to k lepšímu vývoji dané úlohy. Inteligentní kamery patří k jednomu z nejpoužívanějších způsobů a jejich nabídka stále roste. [6]



Obrázek 1.4 - Inteligentní kamera [18]

PC systémy

PC systémy využívají místo vyhodnocovací jednotky operační systém (Obrázek 1.5). Tento systém umožňuje připojení více kamer. Výkon zařízení se určuje pořízeným počítačem. Zásuvné karty slouží pro přidání vstupů a výstupů. Pro využití PC systému jako systému strojového vidění je zapotřebí speciální aplikace. Aplikace poté musí být kompatibilní se zásuvnými kartami, většinou se prodává celé v jednom balíčku. Systém PC stál na počátku systémového vidění, avšak v posledních letech začíná ustupovat inteligentním kamerám je tomu kvůli tomu, že inteligentní kamery mají podobný výkon jako počítač. [6]



Obrázek 1.5 - PC systém [19]

Zákaznické systémy

Jak už lze vidět z názvu do této kategorie patří systémy dělané na míru. Většinou jsou tyto systémy vyžadovány na místech, kde je zapotřebí vysoké rychlosti, speciálních algoritmů nebo speciálních kamer. Tento systém nelze porovnávat s předešlými systémy, jelikož zde si přistupuje k úplně podřízenosti požadavků zákazníka. [6]

Výhody a nevýhody jednotlivých systémů

Krátké shrnutí jednotlivých systémů s uvedenými výhodami a nevýhodami (Obrázek 1.6). Nejjednodušší a nejlevnější systém je kamerový senzor. Nejvíce univerzální systém je z hlediska výkonnosti, ceny, dostupnosti a funkčnosti inteligentní kamera.

Kamerový senzor	kompaktnost, zjednodušený hardware, omezené softwarové nástroje, omezené I/O, omezené komunikační možnosti, omezená třída použití, nižší cena
Inteligentní kamera	kompaktnost, výkonný mikroprocesor, univerzální softwarové nástroje, více I/O, vyšší komunikační možnosti, široké možnosti použití, vyšší cena
PC systém	modularita, možnost více kamer, výkonný hardware PC, možnosti rozšíření, univerzální softwarové nástroje, široké komunikační možnosti, široké možnosti využití, vyšší cena
Zákaznický systém	nepatří do žádné z předchozích tříd, úplná podřízenost požadavkům zákazníka, speciální použití, vysoká cena

Obrázek 1.6 - Porovnání hardware [6]

1.3 Kamerové systémy – senzory a parametry

Tato kapitola se soustředí na uvedení základních parametrů kamerových systémů a jednotlivých typů kamerových senzorů.

1.3.1 Parametry kamerových systémů

Dvěma důležitými parametry každého systému strojového vidění jsou citlivost a rozlišení. Citlivost je schopnost přístroje vidět při slabém světle nebo detekovat slabé impulsy na neviditelných vlnových délkách. Rozlišení je míra, do jaké je stroj schopen rozlišit jednotlivé objekty. Čím lepší je rozlišení, tím užší je zorné pole. Citlivost a rozlišovací schopnost jsou vzájemně závislé. Při zachování všech ostatních faktorů platí, že zvýšení citlivosti snižuje rozlišovací schopnost a zlepšení rozlišovací schopnosti snižuje citlivost. [2]

Světelná citlivost

Světelná citlivost se udává v Luxech (Lx). Každá kamera má svoje limity, za kterých je schopna snímat obraz. Příklady intenzity světla v Lx: obývací pokoj (50), kancelář (150), nákupní centrum (1000) a odpolední slunce (100000).

Rozlišení

Rozlišení u analogových kamer je omezení možnostmi obrazového formátu PAL, což je rozlišení 704 x 576 obrazových bodů. IP kamery jsou plně digitální a jejich rozlišení je omezeno v podstatě jen možnostmi použité technologie. Nejpoužívanější rozlišení u IP kamer je Full HD (High Definiton). Jedná se o kamery s rozlišením 1920 x 1080 pixelů. Toto rozlišení již umožňuje sledování detailů při využívání digitálního zoomu (přiblížení). Dalším rozlišením je HD, které má 1280 x 720 pixelů. [14]

Dalšími parametry kamerových systémů jsou: [14]

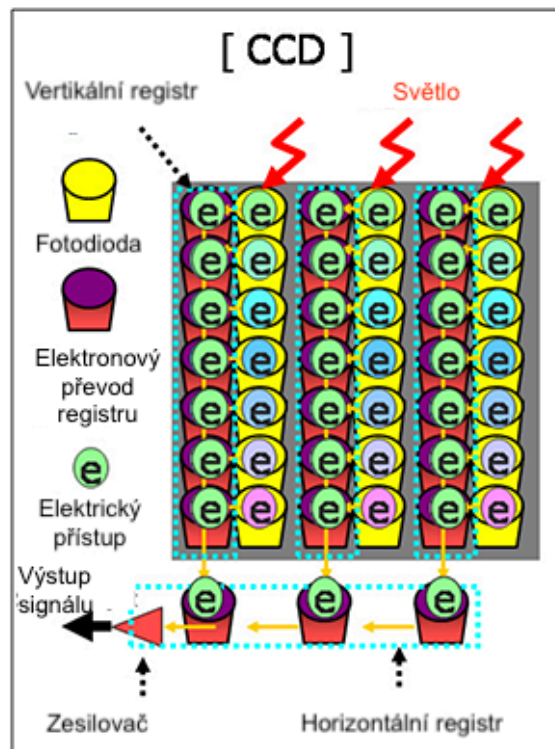
- Senzory
- IR přísvit – infračervené světlo pro noční přísvisvení snímaných prostor
- Den/Noc – funkce barevných kamer, které dokážou přepnout do černobílého módu (noční mód)
- Defog – nástroj pro digitální potlačení nepříznivých vlivů počasí
- Napájení kamer
- Automatické vyrovnání bílé – správné vyobrazení (změna barevné teploty osvětlení)
- Automatická elektronická uzávěrka – rychlost senzoru v závislosti na osvětlení scény
- Automatické nastavení zesílení – elektronický obvod, který udržuje konstantní úroveň výstupního signálu
- Redukce šumu – redukční filtr, který odstraňuje šum z obrazu
- Kompenzace vlivu protisvětla – eliminuje silné zdroje protisvětla (např. světlometry automobilů)
- Detekce pohybu – umístění detekčních okének v obrazu
- Maskování privátních zón – neprůhledná pole v obrazu
- Rybí oko – širokoúhlý objektiv
- Objektiv – parametry objektivů:
 - Fixní, Ohnisková vzdálenost, Clona, Hloubka ostrosti a Optický a digitální zoom

1.3.2 Kamerové senzory

Účelem kamery je vytvořit obraz ze světla, které objektiv soustředí do obrazové roviny. Nejdůležitější částí je digitální snímač. Máme dvě hlavní technologie snímačů: CCD a CMOS. CMOS a CCD jsou polovodičová zařízení, která slouží jako „elektronické oči“. Liší se způsobem čtení signálu. [3]

CCD senzor

CCD snímače jsou složité elektronické součástky, které se skládají z několika polí polovodičových prvků citlivých na světlo. V jednoduchosti CCD senzory fungují jako soustava kondenzátorů, z nichž každý nese elektrický náboj odpovídající intenzitě světla pixelu. Řídící obvod způsobí, že každý kondenzátor přenesou svůj obsah na sousední kondenzátor. Poslední kondenzátor v poli odevzdá svůj náboj do nábojového zesilovače. Tento systém se nazývá „kbelíkový způsob přenosu dat“ (Obrázek 1.7). [3]



Obrázek 1.7 - CCD senzor [9]

CCD senzory mají čtyři základní technologie čtení: Line sensor, Full frame array sensor, Frame transfer sensor a Interline transfer sensor. Mezi nejpoužívanější technologie z těchto čtyř patří Frame transfer a Interline transfer sensor.

Výhody:

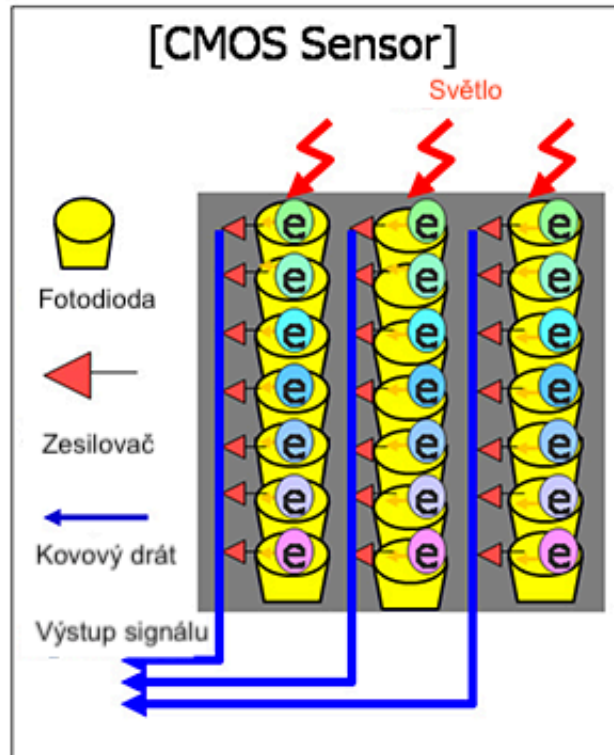
- Vyšší citlivost a nižší šum díky lepšímu využití povrchu
- Jednodušší struktura → méně vadných pixelů
- Lepší homogenita obrazu díky centrálnímu A/D (analogový → digitální) převodníku

Nevýhody:

- Pomalejší čtení, digitalizuje pouze jeden centrální A/D převodník
- Není možný přímý přístup k pixelům, protože musí být načítán sériově
- Složitější uspořádání kamery → dražší kamery
- Vyšší spotřeba energie celé kamery
- Větší rozmazání a blooming efekt (kolem světlých zdrojů vznikají flíčky) při přeexponování ve srovnání s CMOS [12]

CMOS senzor

CMOS má pro každý pixel fotodiodu a tranzistorový spínač, což umožňuje zesilovat signály pixelů samostatně. Ovládním matice přepínačů lze k signálům pixelů přistupovat přímo nebo postupně, a to mnohem vyšší rychlostí než snímače CCD. Zesilovač pro každý pixel snižuje šum, který vzniká při čtení elektrických signálů převedených ze zachyceného světla (Obrázek 1.8). [3]



Obrázek 1.8 - CMOS senzor [9]

Výhody:

- Výrazně nižší spotřeba energie
- Menší velikost fotoaparátu
- Velmi vysoká snímková frekvence ve srovnání s CCD ve stejné velikosti
- Flexibilní čtení díky přímému adresování jednotlivých pixelů
- Výrazně omezený blooming
- Vyšší citlivost v oblasti NIR (blízké infračervené záření)

Nevýhody:

- Větší rozdíly v citlivosti jednotlivých pixel v závislosti na výrobní toleranci
- Výrazně nižší fill factor (poměr světlocitlivé plochy k celé ploše pixelů) [13]

1.4 Moderní trendy v oblasti strojového vidění

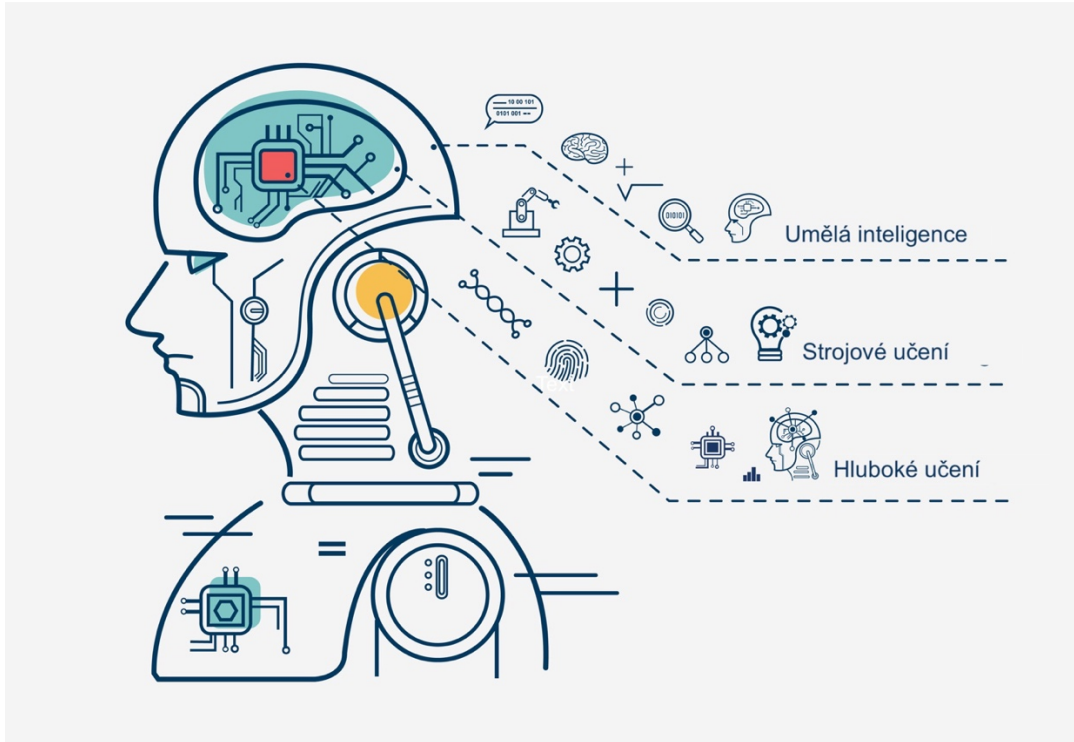
Technologický pokrok v oblasti strojového vidění pokračuje velmi rychle a otevírá stále více možností. Jako každá průmyslová inovace začalo být strojové vidění rozvíjeno, teprve až když došlo k souběhu poptávky s možnostmi technické realizace.

Neviditelné zobrazování

Neviditelné zobrazování zahrnuje termální vidění a dlouhovlnné infračervené vidění. Tento typ strojového vidění se stává dostupnější a levnější pro zákazníky díky mnohostrannému využití. [5]

Hluboké učení

Hluboké učení ve spojení s umělou inteligencí a strojovým učení umožňuje strojovému vidění strojů se automaticky přizpůsobit různým typům výrobních situací (Obrázek 1.9). Hluboké učení se využívá především u kontrolních systémů. Dalším využitím hlubokého učení jsou překladače jazyků a virtuální asistenti (Siri, Alexa, ...). [5]



Obrázek 1.9 - Umělá inteligence, Strojové učení a Hluboké učení [15]

3D zobrazování

3D zobrazování se využívá v několika průmyslových odvětvích např. navádění robotů a detekce povrchů. Také nabízí výrobním odvětvím inovativní způsob, jak zlepšit logistiku a snížit náklady v rámci dodavatelského řetězce. [5]

Základní metody:

- Laserová triangulace
- Geometrický proces stereovidění
- Projekce světelných pruhů
- Stínování pomocí tvaru
- Interferometrie bílým světlem

Laserová triangulace sonduje objekt čárovým laserem, čímž vytváří přesnou světelnou čáru, kterou objekt prochází. Kamera je umístěna pod přesným úhlem k laserovému zářiči a zaznamenává odchylky laserové linie podle geometrie objektu. To umožňuje měřit odchylky laserových linií v libovolném okamžiku. Během měření odchylek se vytváří řada profilů, z nichž se vytvoří trojrozměrný obraz. Odchylku od nedeformovaného laserového paprsku použijeme pro určení výšky objektu.

Geometrický proces stereovidění je založen na použití dvou kamer. Dvě kamery se používají podobně jako je funkce očí u člověka. Pomocí techniky triangulace je pak možné ze dvou 2D snímků vypočítat trojrozměrný obraz. [16]

Na triangulační metodě je také založena projekce světelných pruhů. U této metody se na rozdíl od laserové triangulace nebo stereovidění vyžaduje 3D zpracování objektu pouze pro statické objekty.

Stínování pomocí tvaru je další metodou 3D zobrazování. Kamera pořídí tři nebo čtyři snímky povrchu v odstínech šedi při osvětlení z různých prostorových směrů. V závislosti na rozdílech mezi hodnotami šedi (stínování) lze vypočítat obrazy povrchu odrážející prostorovou strukturu i texturu. Tato technika se používá především pro kontrolu povrchu, jelikož nedokáže určit přesné hodnoty výšky. Informace o sklonu je první prostorová derivace výšky a zakřivení je druhá prostorová derivace výšky.

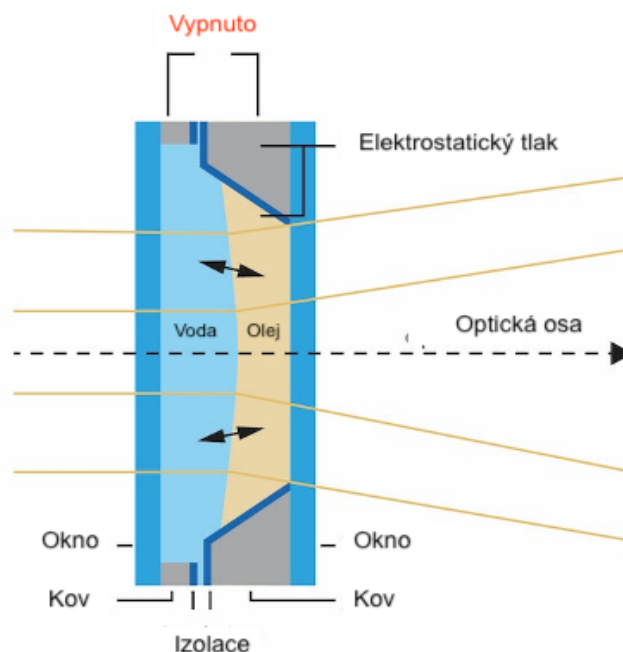
Při interferometrii bílým světlem je objekt osvětlen bílým světlem. Rozdělovač paprsků rozdělí paprsek na referenční (odražený od referenčního zrcadla) a na objektový paprsek (dopadá na objekt). Oba světelné paprsky se poté odrazí a opět kolimují v monochromatické kameře. Vertikální snímání objektu poskytuje 2D interferogram, který je základem pro výpočet 3D obrazu. [16]

Dalšími metodami jsou:

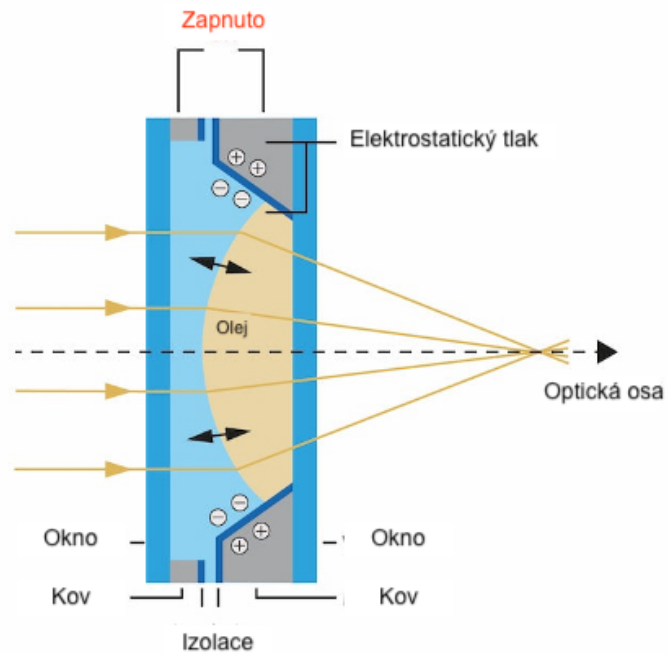
- Kamery s časem letu
- Formáty obrázků [16]

Tekuté čočky

Technologie tekutých čoček se rychle zavádí do technologie strojového vidění, aby se zlepšila jasnost vidění a rychlost zobrazování. Tekuté čočky umožňují okamžité změny zaostření vyvolané změnou napětí nebo výkonu (Obrázek 1.10 a Obrázek 1.11). [5]



Obrázek 1.10 - Tekuté čočky – Vypnuto [8]



Obrázek 1.11 - Tekuté čočky – Zapnuto [8]

V kapitole byly uvedeny systémy strojového vidění. V následující kapitole bude uvedeno využití strojového vidění v průmyslové robotice.

2 Využití systémů strojového vidění v průmyslové robotice

Tato kapitola se zabývá úvodem do průmyslové robotiky, seznámení se základními typy robotů a příklady z praxe robotů využívajících strojové vidění. Jedním z příkladů strojového vidění v praxi je vizuální kontrol výrobků. Ve mnoha odvětvích existuje velké množství výrobků, které se montují ručně a při jejichž správné montáži záleží na zručnosti obsluhy. Výrobky jsou často vizuálně kontrolovány jiným pracovníkem v rámci procesu kontroly kvality. Instalace systému, který převezme kontrolu může výrazně snížit pravděpodobnost, že se k zákazníkovi dostane vadný výrobek. Použití kamery, do které byly nahrány montážní pokyny. Pracovník se řídí pokyny, které se zobrazují na monitoru. Každý úkon systém vyhodnotí a porovná se svým uloženým vzorem. Na základě správného vyhodnocení může pracovník pokračovat k dalšímu úkonu. Každá chyba lze zaznamenat a použít pro analýzu. [4]

Automatizované kontrolní systémy mohou být přímo napojeny na vyřazovací mechanismus. Výrobky se kontrolují vysokou rychlostí. Podobný průběh kontroly využívají inteligentní kamery, které automaticky posílají informaci do vyřazovacího mechanismu. Nutností je kvalitní integrace systému. [4]

Přepravní a obalový průmysl je také stále více zatěžován. Jedním z řešení zrychlení je strojové vidění zavedené do logistiky. Logistická řešení se strojovým viděním, včetně samonaváděcích robotů zlepšují odpovědnost za balíky a dobu přepravy. [5]

V diplomové práci bude strojové vidění využito jako „oči“ pro kolaborativního robota. Strojové vidění je velký pojem v robotice, a proto součástí teoretické části je také úvod do robotiky.

2.1 Robotika

Robotika je interdisciplinární odvětví vědy a techniky, které se zabývá návrhem, konstrukcí a používáním mechanických robotů.

Robotika je průsečíkem vědy, techniky a technologie, která vytváří roboty. Roboti nahrazují nebo kopírují lidské činnosti a získávají intelektuální a mechanické schopnosti, které by se například v budoucnu mohly přibližovat robotu R2-D2 (robot z filmové série Star Wars, Obrázek 2.1).



Obrázek 2.1 - R2-D2 robot [20]

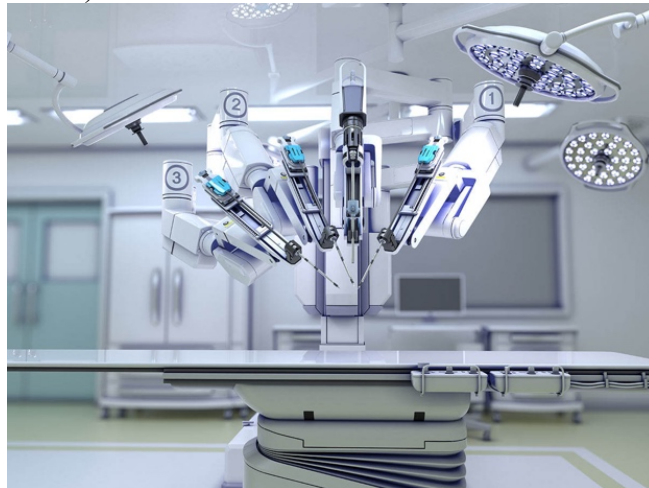
S pokrokem se rozšiřuje i termín robotika a spadá pod tento termín stále více věcí a činností. V automobilových továrnách se k roku 2005 nacházelo při montáži automobilů 90 % všech robotů. Tyto roboti se skládají především z mechanických ramen, jejichž úkolem je svařovat nebo šroubovat určité části automobilu. V dnešní době definice robotiky zahrnuje

vývoj, tvorbu a používání robotů, kteří pomáhají při prosazování práva, zkoumají nejnáročnější podmínky na zemi a kteří pomáhají ve všech oblastech zdravotní péče. Robotika vykonává mnoho různých úkolů v mnoha oborech a počet pracovních míst svěřených robotům neustále roste. Každý robot má jedinečné vlastnosti, velmi se liší velikostí, tvarem a schopnostmi. Následující vlastnosti platí pro všechny roboty: [51] [22]

- 1) Roboti se všichni skládají z nějakého druhu mechanické konstrukce. Mechanický aspekt robota mu pomáhá plnit úkoly v prostředí, pro které je určen. Například kola vozítka Mars 2020 Rover jsou individuálně poháněna motorem a vyrobena z titanových trubek, které mu pomáhají pevně držet v drsném terénu rudé planety.
- 2) Roboti potřebují elektrické komponenty, které řídí a pohánějí stroje. K napájení velké většiny robotů je v podstatě zapotřebí elektrický proud (například baterie).
- 3) Roboti obsahují alespoň určitou úroveň počítačového programování. Bez souboru kódů, které mu říkají, co má dělat, by robot byl jen dalším kusem jednoduchého stroje. Vložení programu do robota mu dává schopnost vědět, kdy a jak má úkol provést.

Hlavní typy robotů: [21]

- Průmyslový – používají se ve výrobním prostředí
- Domácí – každodenní úkoly v domácnosti (vysavač, čistič bazénů, zametač, ...)
- Vojenský – roboti pro zneškodňování bomb, různé dopravní roboty a průzkumné drony
- Vesmírný – pohyb po povrchu na jiné planetě, hvězdě a vědecké experimenty
- Zábavní – snaha o vyvolání pocitu smíchu, překvapení nebo úžasu
- Mikro – roboti, kteří mají rozměry v mikrometrovém měřítku a roboti, kteří mohou pracovat s mikrometrovým rozlišením (podobný nano robotům)
- Vzdělávací – 3D tiskárny, programovací sady od společnosti Lego
- Lékařský – v lékařství se stále častěji používají roboti pro operace, rehabilitaci a výcvik (Obrázek 2.2)



Obrázek 2.2 - Lékařský robot [27]

- Výzkumný – primárně určení k tomu, aby pomáhali výzkumníkům při výzkumu (mohou pracovat jako asistenti) (Obrázek 2.3)



Obrázek 2.3 - Výzkumný robot [28]

- Bezpečnostní – sledování a střežení velkých civilních objektů (např. elektrárny) (Obrázek 2.4)



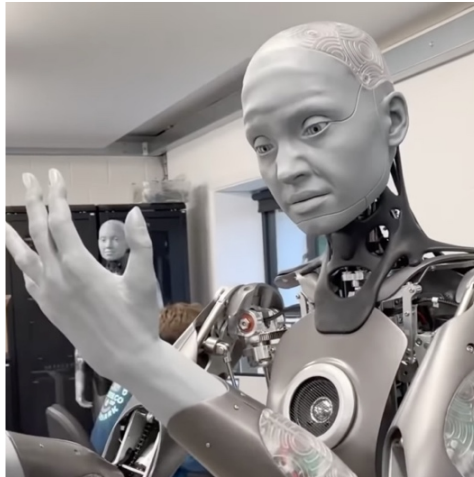
Obrázek 2.4 - Bezpečnostní robot [29]

- Nano – stejně jako mikro akorát v nanometrovém měřítku (Obrázek 2.5)



Obrázek 2.5 - Nano robot [31]

- Humanoidní – nejvíce podobný člověku, hlavních součástí humanoidního robota jsou senzory (Obrázek 2.6)



Obrázek 2.6 - Humanoidní robot [32]

- Létací – létající roboti patří mezi nejoblíbenějšími typy robotů (Obrázek 2.7)



Obrázek 2.7 - Létací robot [33]

- Plovoucí – tyto roboti mohou mít podobu hmyzu, ryby nebo velkého plazícího se hada (vykonávají podobný pohyb jako hadi ve vodě) (Obrázek 2.8)



Obrázek 2.8 - Plovoucí robot [34]

- Hybridní – nejvíce podobný humanoidním, snaha o největší podobu člověku a zároveň splnění všech požadovaných funkcí (Obrázek 2.9)



Obrázek 2.9 - Hybridní robot [35]

V blízké budoucnosti budou roboti díky umělé inteligenci a softwaru chytřejší, flexibilnější a energeticky účinnější (Obrázek 2.10). Budou nadále přijímat náročnější úkoly a pomáhat zajišťovat globální řetězce. [22]



Obrázek 2.10 - Možný vývoj robotů [21]

Diplomová práce se zabývá průmyslovými roboty, a to konkrétně kolaborativními roboty. Kolaborativní robot vybavený kamerou (strojové vidění) bude využit v praktické části. Nejprve se práce soustředí na úvod do průmyslových robotů s následným detailnějším popisem kolaborativních robotů.

2.2 Průmyslový robot

Průmysloví roboti pracují na pozicích, kde provádí nebezpečné, špinavé a/nebo opakující se úkoly se stálou přesností a precizností. Stále častěji se používají v různých průmyslových odvětvích a aplikacích. Nabídka průmyslových robotů je velmi široká, přičemž nejčastějšími rozlišovacími znaky jsou dosah, nosnost a počet os pohybu jejich kloubového ramene.

Kombinace programovacího softwaru a ovládacích prvků řídí činnost robota. Automatizovaná funkce zajišťuje možnost pracovat o víkendech, s nebezpečnými materiály i v náročných podmínkách. Robotická technologie také nahrazuje náročné činnosti, které by mohly způsobit poranění pracovníků. Průmysloví roboti zvyšují produktivitu a ziskovost.

Nejčastěji se využívají šestiosé kloubové roboty, kteří se nejvíce přibližují pohybům člověka. Motory řídí otáčení každé osy, což umožňuje větší přesnost a rychlost. Hlavní tělo robota s podlahou spojuje první otočný kloub. Na hlavní tělo robota je připojeno rameno pomocí dalšího otočného kloubu. Třetí otočný kloub spojuje rameno s ramenem robota

(paže). Na konci paže je umístěn poslední kloub, který spojuje paži s koncovým efektořem (zápěstí). Každý robot má svoji funkční obálku, ve které je schopen operovat. Kloubové roboti jsou v této obálce omezeni pouze napájecími a datovými kabely (nové architektury řeší tento problém interně a tím robotické rameno může využít celé pole dosahu). [23] [39]

Hlavní dílčí komponenty u průmyslového robota jsou následující:

Motory

Motory robotů výrazně ovlivňují kvalitu průmyslového robota by měly splňovat tyto základní parametry:

- Plynulý rozběh a brždění
- Vysoká přesnost polohování
- Dostatečná polohová tuhost
- Minimální moment setrvačnosti
- Vysoký měrný výkon
- Vhodné rozměry

Maximální rychlost je v současné době okolo 5 m/s. Manipulační rychlost záleží i na hmotnostní zátěži (roboti s menší nosností se mohou pohybovat rychleji). U motorů je také požadován plynulý chod, a to ze dvou důvodů. Za prvé kvůli bezpečnosti držení objektu koncovým efektořem. Při plynulém chodu je zapotřebí menší úchopná síla. Druhý důvod je přesnost při najetí na koncovou polohu. Plynulý chod zmírňuje kmitání koncového efektořu, které by způsobovalo problém při najetí do koncové polohy. V případě řízení pohonů (servopohonů) se využívají dva typy:

- Hydraulický
- Elektrický

Hydraulický servopohon je určen pro manipulátory s vysokou nosností nebo velkým pracovním prostorem. Hydraulický pohon disponuje vysokou dynamikou a velmi vysokým výkonem, tyto dva parametry patří mezi hlavní výhody hydraulického pohonu. K hydraulickému pohonu je zapotřebí další zařízení (např. čerpadlo a servoventil). Dále je nutné u tohoto typu pohonu zvýšená údržba. Zvýšená údržba, nutnost dalšího zařízení a nízká účinnost jsou nevýhodami hydraulických pohonů.

Elektrický servopohon je standardní pro průmyslové roboty. Elektrický pohon disponuje velmi dobrou říditelností, velkým rozsahem výkonů a rychlostí. Problémem u elektrických pohonů je přehřívání. [24]

Ovládání

Pro přímé ovládání robota slouží řídicí systém. Na řídicím systému se nachází ovládací panel, který obsahuje:

- Hlavní vypínač
- Nouzové zastavení
- Motory zapnuty
- Přepínač módů

K řídicímu centru je pak připojen pendant, pomocí jehož zadáváme instrukce robotovi. Jsou různé druhy pendantů, ale všichni by měly obsahovat bezpečnostní tlačítko. Bezpečnostní tlačítko má tři polohy (1 – nezmáčknuté, 2 – první stupeň zmáčknutí, 3 – promáčknutí). Robot může přijímat pohyby pouze, když bezpečnostní tlačítko je v 2. poloze. Pendant slouží pro přímé zadávání pohybů, vytváření trajektorie, úprava rychlosti pohybu

robota po trajektorii a vytvořit program. Vytvořený program pak je možné následně upravovat. [25]



Obrázek 2.11 - Pendant Kuka [30]

Koncový efektor

Koncový efektor musí zajistit bezpečné a spolehlivé uchopení. Koncový efektor má dvě základní rozdělení, a to:

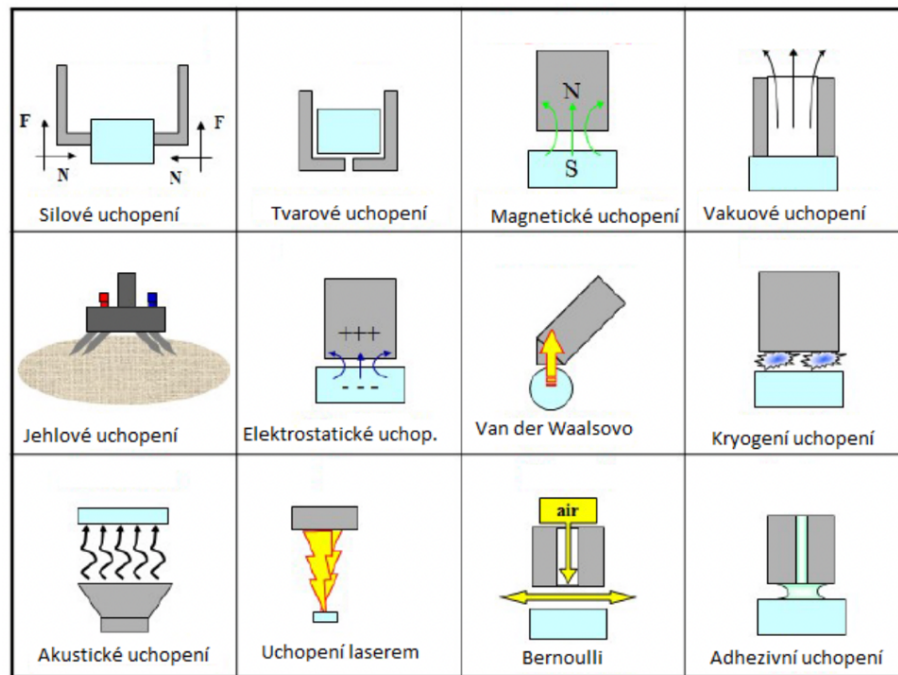
- Rozdělení podle pohonu
 - Elektrický pohon
 - Hydraulický pohon
 - Pneumatický pohon
- Rozdělení podle způsobu uchopení objektu

Elektrický pohon představuje rychlé, přesné a jednoduché ovládání chapadel. Hlavní výhodou je, že nepotřebuje žádné další médium. Elektrický pohon je mechanicky velmi podobný pneumatickému, akorát jeho cena je mnohem vyšší.

Pneumatický pohon, jak již je zmíněno výše je podobný elektrickému pohonu. Patří mezi nejvíce využívané pohony, a to především díky jeho ceně. Nevýhoda spočívá v obtížnosti řízení síly a rychlosti sevření.

Hydraulický pohon je většinou využíván s hydraulickým servopohonem a tím pádem slouží právě při uchopování velkých a velmi těžkých věcí, kde je zapotřebí vyvinout velká uchopovací síla.

V současné době existuje mnoha principů uchopování. U koncového efektoru rozlišujeme typ uchopení a následně typ chapadel. Nejvíce používaná chapadla jsou mechanická (silové) (Obrázek 2.12).



Obrázek 2.12 - Typy uchopení [36]

Typy mechanických chapadel:

- Dvoučelist'ová paralelní chapadla – konají lineární přímočarý pohyb a nejvíce se využívají v technické praxi (Obrázek 2.13)



Obrázek 2.13 - Dvoučelist'ové paralelní chapadlo [37]

- Dvoučelist'ová angulární chapadla – konají pohyb po kružnici, jinak podobná paralelním
- Centrická chapadla – mají tři nebo více prvků pro uchopení rozmístěných po obvodu
- Adaptivní chapadla – mají možnost se přizpůsobit tvaru objektu
- Antropomorfní chapadla – svým tvarem připomínají ruku, „prsty“ se mohou pohybovat nezávisle na sobě a díky tomu mají více stupňů volnosti
- Kolaborativní chapadla – typ chapadla jsou speciálně navržena pro spolupráce s člověkem (Obrázek 2.14) [26]



Obrázek 2.14 - Kolaborativní chapadlo [38]

2.2.1 Typy průmyslových robotů:

Typy průmyslových robotů vycházejí z katalogu společnosti Fanuc. Hlavní rozdělení je dle konstrukčního hlediska (kloubové, delta a SCARA), následuje rozdělení dle aplikačního hlediska (paletizační, svařovací a lakovací) a poslední speciální kolaborativní. [40]

Kloubové roboty

Kloubové roboty jsou nejběžnějším typem robotů používaných v průmyslu. Obsahují rotační klouby, které jsou běžně označovány jako osy. Kloubové roboty jsou obvykle poháněny servomotory a mohou mít jednoduchou konstrukci se dvěma osami nebo složitou s deseti a více osami. Nejběžnější jsou roboti s šesti osami. [41]



Obrázek 2.15 - FANUC LR Mate [40]

Delta roboty

Delta roboty jsou známý svojí rychlostí, přesností a lehkostí. Delta roboty připomínají svým tvarem pavouka. Architektura z propojených paralelogramů připojených ke společné základně. Roboty se nejvíce využívají ve farmaceutickém, potravinářském a elektrickém průmyslu při činnostech jakými jsou balení, nakládání a podávání součástek. [42]



Obrázek 2.16 - FANUC M1 [40]

SCARA roboty

Robotická ramena SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arms) jsou užitečná v řadě aplikací. Mohou provádět přesné a opakující se úlohy, jako je nakládání/vykládání, montáž, balení/paletizace, vychystávání/manipulace, třídění, skládání na hromady a rozmisťování. SCARA roboti pracují při velmi vysokých rychlostech. [43]



Obrázek 2.17 - FANUC SR-3iA [40]

Paletizační roboty

Paletizace je náročná aplikace stohování krabic, pytlů, beden, lahví a kartonů na palety jako poslední krok montážní linky před naložením na přepravní vozidlo. Flexibilita vzorů palet, flexibilita nástrojů a doba cyklu jsou tři hlavní výzvy automatizované paletizace v dnešním průmyslu. [42]



Obrázek 2.18 - FANUC M410 [40]

Roboty pro svařování elektrickým obloukem

Robotika ve svařovacím odvětví zaručuje precizní a bezchybnou kvalitu svarů. Firma Fanuc nabízí pouze jednu řadu robotů pro svařování elektrickým obloukem s nosností 20 kg a maximálním dosahem 3123 mm. [42]



Obrázek 2.19 - FANUC Svařování elektrickým obloukem [40]

Lakovací roboty

Lakovací roboty se využívají hlavně z důvodů snížení emisí a vysokou kvalitou nátěrů. Obsluha lakovacích robotů je velmi jednoduchá díky specializovaným softwarům. Tento typ robotů se nejvíce používá v automobilovém a stavebním průmyslu. [42]



Obrázek 2.20 - FANUC P-350iA/45 [40]

Spolupracující (kolaborativní) roboty – Kolaborativní robot (Obrázek 2.21) je navržen tak, aby spolupracoval se zaměstnancem, zatímco průmyslový robot pracuje místo zaměstnanců (Podkapitola 2.2.2).



Obrázek 2.21 - Kolaborativní robot CRX-10iA [40]

Přehled sortimentu firmy FANUC [40]

Přehled sortimentu firmy FANUC byl zvolen na základě výrobce kolaborativního robota z laboratoře využité v diplomové práci. V tabulce 2.1 byly uvedeny základní parametry (nosnost a rozsah) u každého typu průmyslového robota.

FANUC ROBOTY	Počet řad	Nosnosti kg (od – do)	Maximální rozsah mm (od – do)
Kloubové	9	7–2300	911–4683
Delta	4	1–12	420–1600
Paletizační	3	50–700	2003–3143
Svařování elektrickým obloukem	1	20	3123
Lakovací	6	5–45	892–2800
SCARA	4	3–20	400–1100
Kolaborativní	7	4–35	550–1813

Tabulka 2.1 - Sortiment FANUC

2.2.2 Kolaborativní robot

Kolaborativní robot je navržen tak, aby spolupracoval se zaměstnancem, zatímco průmyslový robot pracuje místo zaměstnanců. Kolaborativní robot vytváří bezpečnější a efektivnější pracoviště a může zaměstnancům pomáhat s prací, která může být pro ně samotné příliš nebezpečná, namáhavá nebo zdoluhavá. Naproti tomu průmyslové roboty pracují bez lidské pomoci a tím uvolňují zaměstnance pro smysluplnější úkoly, které nejsou tak všední a jsou méně náchylné k poraněním způsobeným opakovanými pohyby.

Kolaborativní robot je snadněji programovatelný než průmyslový robot. Kolaborativní robot je schopný se "učit" přímo při práci a tím je jeho programování jednodušší. Přeprogramování je tím pádem také jednodušší a pracovník v továrně může kolaborativního robota přeprogramovat jednoduše tím, že posune rameno po požadované dráze. U průmyslového robota se při přeprogramování musí napsat/opravit kód. [44]

Force senzor (snímač síly) umožňuje robotu detekovat sílu a točivý moment působící na koncový efektor v 6 stupních volnosti. Force senzor poskytuje téměř lidský cit a schopnost vykonávat práci, kterou dříve vykonávali řemeslníci. Roboti vybavení snímačem síly jsou schopni realizovat měřicí, konturovací a montážní úlohy. Sensory jsou zcela integrovány do robota kvůli rychlejšímu zpracování. [45]

Výrobci: KUKA [47], FANUC [40], Yaskawa [48], ABB [46]

Čtyři největší výrobci kolaborativních robotů a přehled sortimentu se základními parametry.

VÝROBCI KOLABORATIVNÍCH ROBOTŮ	Počet řad	Nosnosti kg (od – do)	Maximální rozsah mm (od – do)
FANUC	5	10–35	911–1141
ABB*	4	0,5–5	560–950
YASKAWA	4	10–20	1379–1900
KUKA	1	7–14	800–820

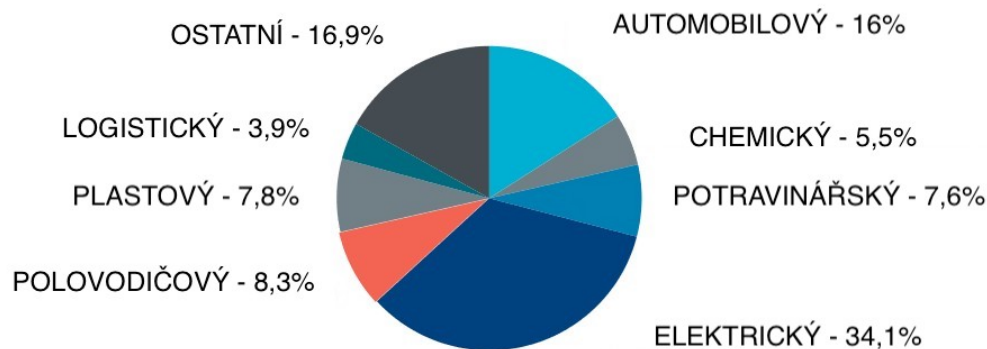
Tabulka 2.2 - Výrobci kolaborativních robotů

* u ABB jiný typ kolaborativních robotů, proto nosnosti mohou být zavádějící (Obrázek 2.22)



Obrázek 2.22 - ABB robot Yumi [49]

Obrázek 2.23 ukazuje využití kolaborativních robotů k roku 2019 v jednotlivých průmyslech. Z grafu lze vidět, že největší využití je v elektrickém průmyslu a na druhém místě je průmysl automobilový. Společně tvoří polovinu trhu roku 2019.



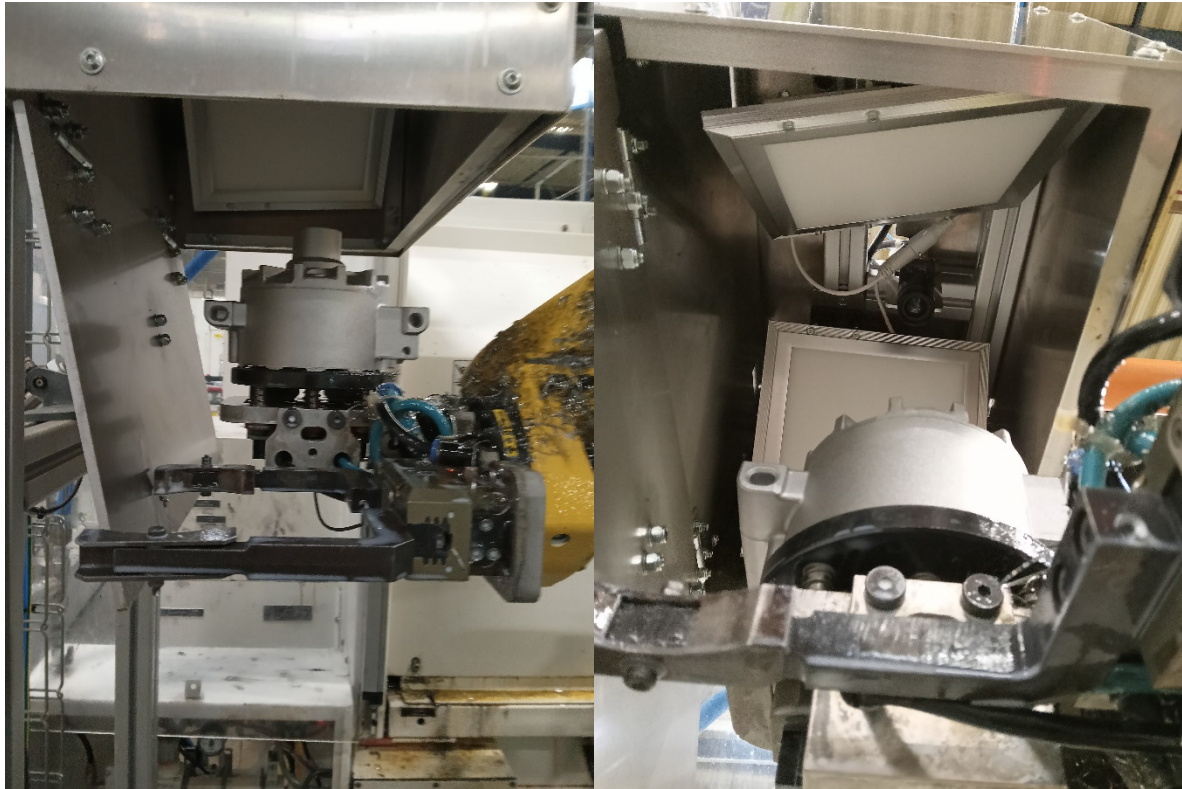
Obrázek 2.23 - Využití kolaborativních robotů, 2019 [50]

2.3 Příklady aplikovaných řešení snímacích senzorů v praxi

Příklady využití různých typů strojového vidění z praxe (čtení QR kódu, kontrola natáčení výrobku, navádění robota a 3D bin – picking).

2.3.1 2D kamerová kontrola natočení výrobku v automotive průmyslu

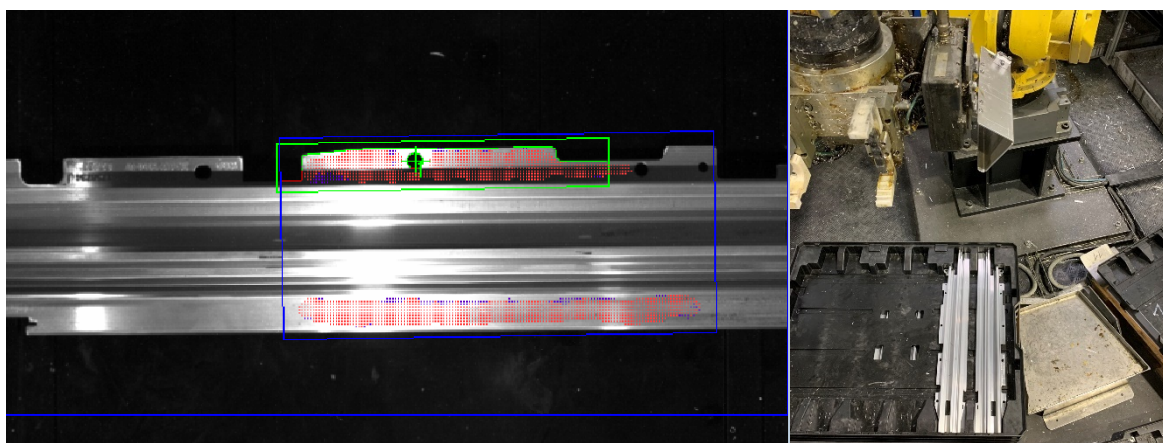
2D kamera se zde využívá ke kontrole orientace výrobku (Obrázek 2.24). Důvodem je správné napozicování robota při zakládání do vřetene obráběcího stroje. 2D kamera je schopna identifikovat pouze pozici X a Y. Využití kamerového systému bylo v tomto případě nevyhnutelné, protože výroba se vyznačuje vysokou variantností, což je pro každou automatizaci vždy na obtíž. Jednotlivé varianty výrobků mají stejné pouze určité části, proto bylo nutné použít univerzální vstupní dopravník, ve kterém nebylo možné zaručit přesnou pozici výrobku pro odběr a následné založení do stroje robotem. Robot po odebrání najíždí do „fotobuňky“, kde je definována přesná poloha a rotace dílu v chapadle. Robot následně zakládá do stroje dle aktuálních souřadnic.



Obrázek 2.24 - 2D kamera

2.3.2 Navádění robota na hliníkový profil pomocí 3D kamery

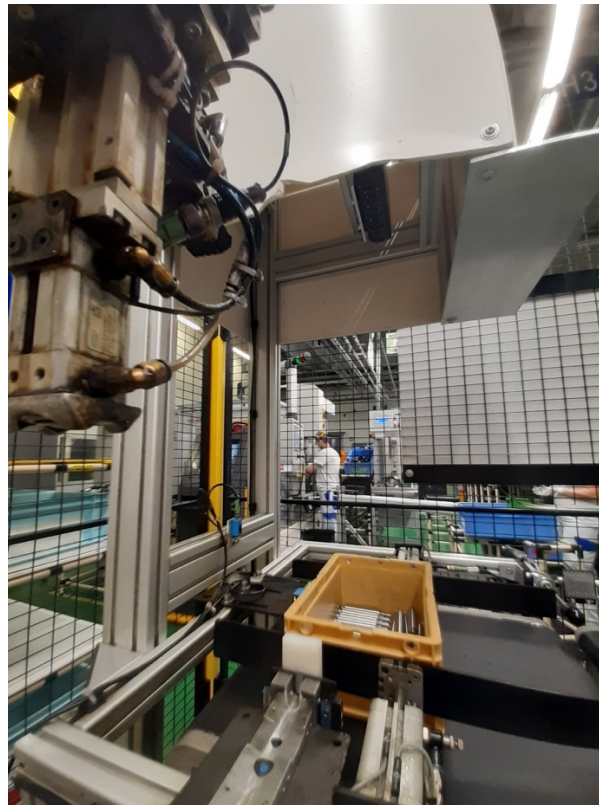
V tomto případě jsou hliníkové profily volně uložené do lůžek, která zajišťují alespoň přibližnou pozici dílu a rozlišení pravý/levý typ (Obrázek 2.25). Pomocí kamerového systému FANUC 3DV/400 je rozpoznán díl, nalezena jeho pozice v horizontálních osách, pozice ve svislé ose a náklony vůči souřadnému systému. Kamerový systém využívá identifikaci tvaru dle přechodu mezi bílými a tmavými pixely. Tento tvar určuje souřadnice v horizontálních osách. V určitých prostorech nalezeného tvaru vytváří 3D mapu bodů jimiž prokládá rovinu. Tato rovina určuje souřadnici na svislé ose a náklon vůči souřadnému systému.



Obrázek 2.25 – 3D kamera

2.3.3 3D bin-picking ocelových hřídelek

3D bin-picking je systém, který pomáhá vybírat předměty z kontejneru jako je zásobník a umisťovat je například na paletu nebo do procesu (Obrázek 2.27). V tomto případě byl systém FANUC 3DV/400 (3D senzor od firmy Fanuc) využit na pozicování robota pro výběr ocelových hřídelek volně ložených v KLT boxu. Pro identifikaci hřídelky byl využit nástroj, který je schopen rozeznat díl podle 3D modelu. Bohužel systém není schopen přesně identifikovat orientaci dílu v intervalech 180°, proto bylo k robotu naintegroováno lůžko, kde je tato orientace pomocí optického senzoru definována.



Obrázek 2.26 – Bin-picking

2.3.4 Čtení QR kódu

Příklad použití čtečky QR kódu (Obrázek 2.23). V této aplikaci jsou z číselného řetězce z QR kódu vyčítány například: informace o typu výrobku, jeho unikátní identifikační číslo, stav OK/NG a míra zpracování. Čtečky QR kódu jsou využívány i ve spolupráci průmyslových robotů.



Obrázek 2.27 – Čtečka QR kódu

Kapitola se zabývá krátkým úvodem do robotiky, kompletním rozdělením robotů, uvedením neznámějších výrobců kolaborativních robotů, popisem kolaborativních robotů a z čeho se skládají. Závěrem kapitoly je využití snímacích senzorů v praxi. V další kapitole bude uvedeno použití 2D kamery ve spolupráci s kolaborativním robotem.

3 Použití 2D kamery pro práci kolaborativního robota

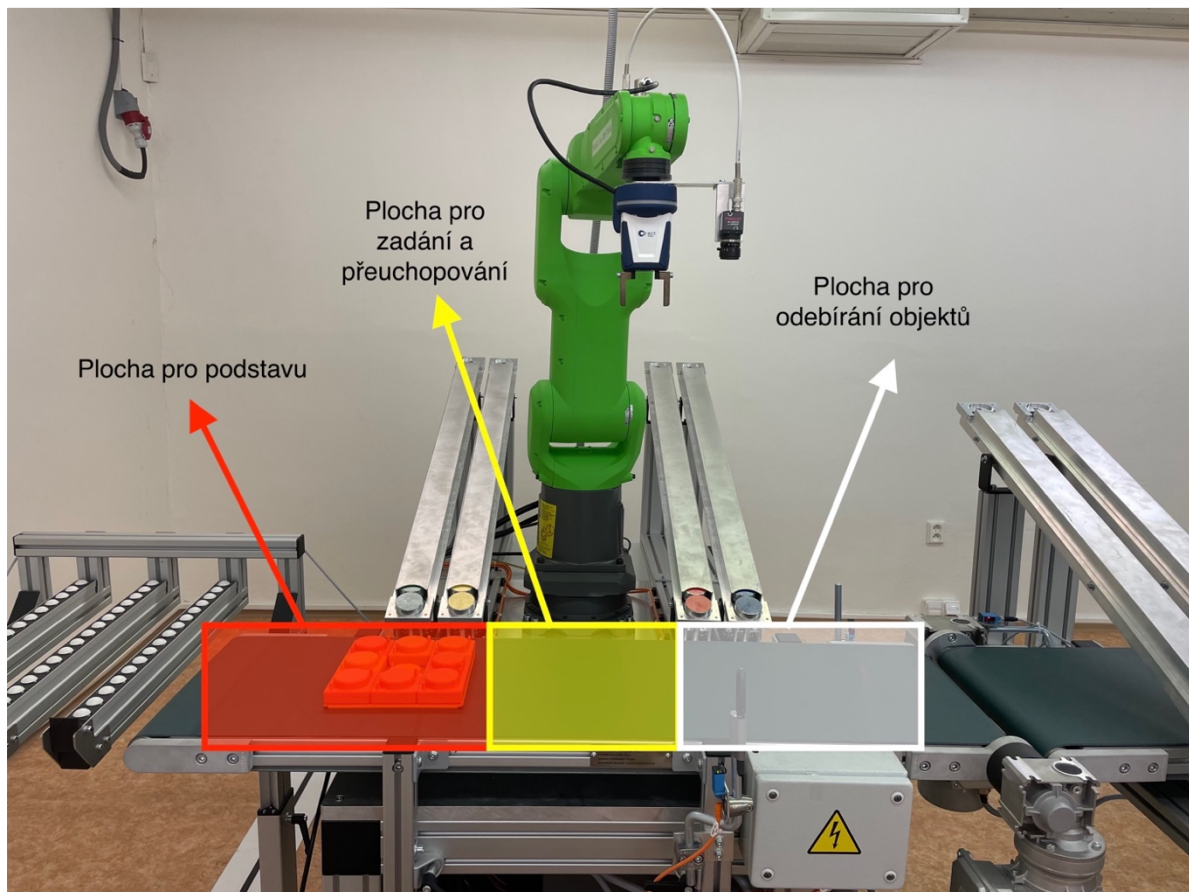
Tato kapitola je stěžejní kapitolou praktické části diplomové práce. V této kapitole bylo nejprve popsáno pracoviště, které obsahuje 2D kameru od společnosti Fanuc a kolaborativního robota také od společnosti Fanuc. Kolaborativní robot i kamera jsou využity k sestavování navrhovaných objektů. Pro práci bylo využito pracoviště Průmysl 4.0, které je součástí katedry průmyslového inženýrství a managementu.

Následuje popis experimentu, nastavení kamerového systému a programování kolaborativního robota.

3.1 Pracoviště

Pracoviště se skládá z pracovní plochy (pás dopravníku) a samotného kolaborativního robota. Zbylé vybavení zobrazené na obrázku 3.1 slouží k jinému experimentu, proto dále není uvedeno.

Pro účel experimentu byla pracovní plocha rozdělena na tři oblasti (Obrázek 3.1). Pracovní plocha se skládá z plochy určené pro podstavu, plochy pro zadání experimentu a přeuchopení objektů a plochy pro odebrání objektů. Na kolaborativním robotu je nainstalovaná kamera a kolaborativní chapadlo.



Obrázek 3.1 - Pracoviště kolaborativního robota

3.1.1 Kolaborativní robot

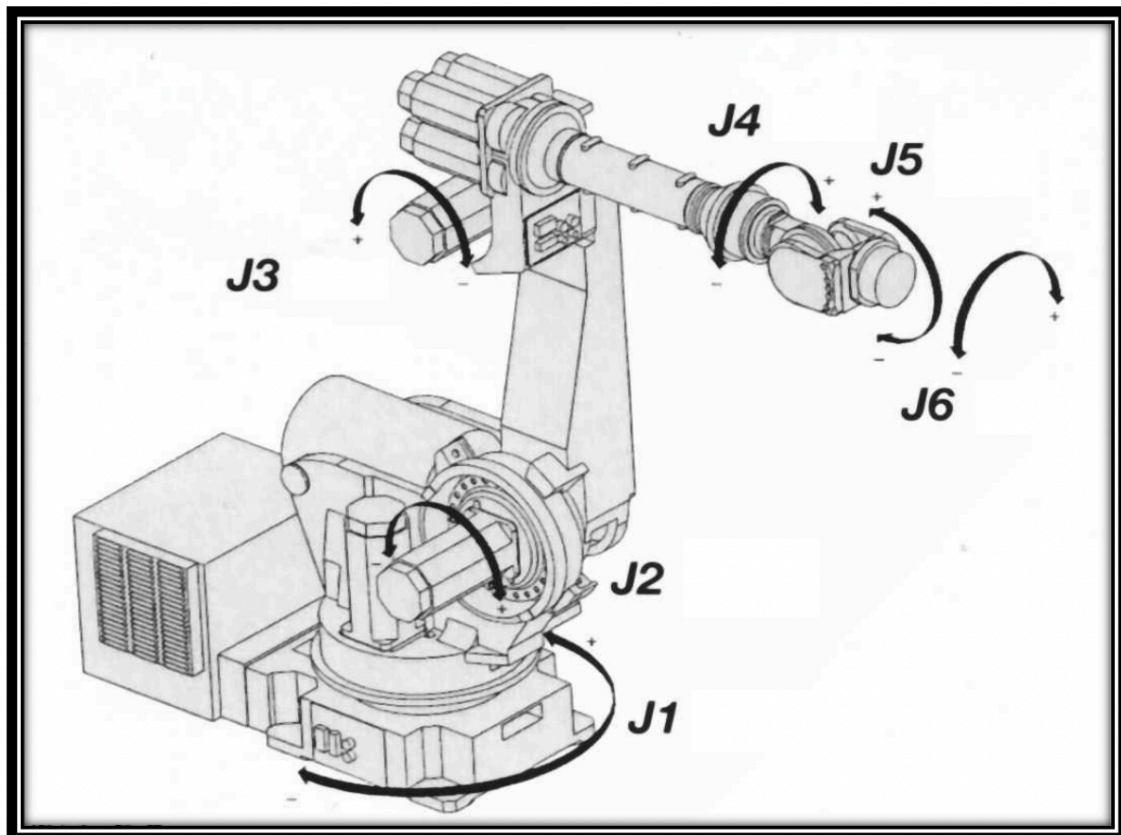
Kolaborativní robot na pracovišti je Fanuc CR-7iA/L. Tato řada kolaborativních robotů vychází z řady LR. Robot má maximální nosnost 7 kilogramů, rozsah 911 milimetrů a pracuje v šesti osách. Všichni kolaborativní roboti od značky Fanuc jsou zelení, aby se odlišili od standartních žlutých robotů Fanuc. Robota je možno namontovat na podlahu, stěnu i strop.

Podporuje nejnovější funkce společnosti Fanuc (iRVision a Force Sensing). Robot je vybaven malou řídicí jednotkou R-30iB. [52]

Podrobná specifikace je uvedena v Tabulce 3.1, kde označení J1 až J6 mají jednotlivé klouby robota (Obrázek 3.2) – v tabulce je uveden jejich pohybový rozsah.

CR-7iA/L		
Max. zatížení na zápěstí		7 kg
Max. dosah		911 mm
Řízené osy		6
Opakovatelnost		+/- 0.01 mm
Mechanické zatížení		55 kg
Rozsah pohybu	J1	340°
	J2	166°
	J3	383°
	J4	380°
	J5	240°
	J6	720°
Maximální rychlost		1000 mm/s

Tabulka 3.1 - Technické informace [52]



Obrázek 3.2 - Jednotlivé klouby robota [53]

Řídicí jednotka R-30iB je navržena k snadnějšímu používání robotů (Obrázek 3.3). Nabízí více než 250 softwarových funkcí, které vedou k maximální výkonosti robota. Řídicí

jednotka také poskytuje plnou konektivitu prostřednictvím sítě Ethernet, což umožňuje snadné připojení robotů, vzdálených počítačů a dalšího hardwaru. [53]



Obrázek 3.3 - Řídicí jednotka



Obrázek 3.4 – iPendant

K řídicí jednotce je připojen Fanuc iPendant-Touch (Obrázek 3.4). Toto zařízení je kombinací uživatelsky přátelského rozhraní a skvělé výkonosti. Pendant je vybaven jak klasickými tlačítky, tak i dotykovou obrazovkou, která urychluje práci. Výhoda klasických tlačítek je poté v přesnosti při najíždění do určité pozice. Na monitoru lze zobrazit i 3D grafika a zároveň lze displej rozdělit až do tří oken, což umožňuje větší efektivitu. [54]

Kolaborativní chapadlo je od společnosti Schunk (Obrázek 3.5). Chapadlo zjednodušuje sledování bezpečnosti celého systému pro kolaborativní aplikace. Bezpečnost je zajištěna díky proudovému omezení. Rozhraní společnosti Schunk spolupracuje s kolaborativními roboty od společností Kuka, Fanuc a Universal Robots. [55]



Obrázek 3.5 - Kolaborativní chapadlo a 2D kamera

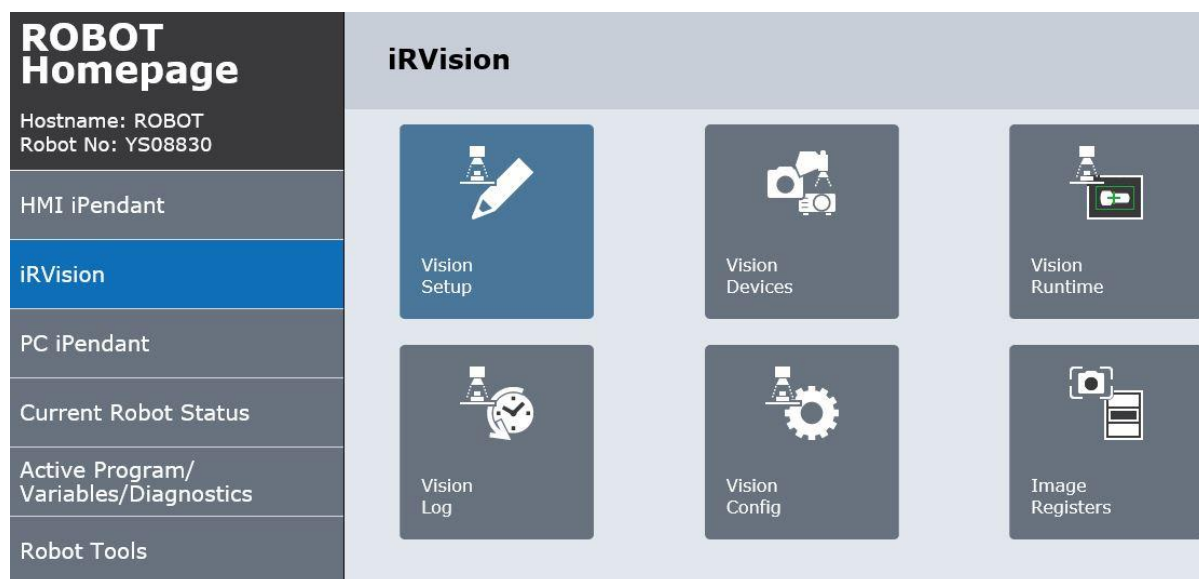
3.1.2 Kamerový systém

iRVision 2D je kamerový systém také od společnosti Fanuc, který pomocí kamery Fanuc SC130EF2C umožňuje robotům vidět. Tato kamera umožňuje snímání barev a byla nainstalována ke koncovému efektoru robota (Obrázek 3.5). Systém iRVision je jednoduchý a lze jej ovládat bez složitého programování nebo odborných znalostí. Díky systému odpadá nutnost usadit výrobek do přesné polohy, aby si jej robot mohl uchopit. iRVision je plně integrovaný a nevyžaduje externí zařízení.

Systém podporuje: [56]

- Až 7 kamer
- Podpora vidění – 2D, 2^{1/2}D, 3D podle laserové projekce a 3D mapy pomocí strukturovaného světla
- Lze kombinovat s Bin Picking a iRPickTool
- Detekce nepohyblivých a pohyblivých dílů nezávisle na jejich velikosti, tvaru nebo poloze
- Nástroje, které automatizují kalibrační postupy

Kamerový systém je možné zobrazit v internetovém prohlížeči Internet Explorer (Obrázek 3.6) nebo přímo na pendantu. V internetovém prohlížeči je uživatelské rozhraní větší a s lepším rozlišením, takže je zde práce efektivnější. K rozhraní v internetovém prohlížeči je možno se připojit pomocí Ethernet kabelu vedoucího z řídicí jednotky.

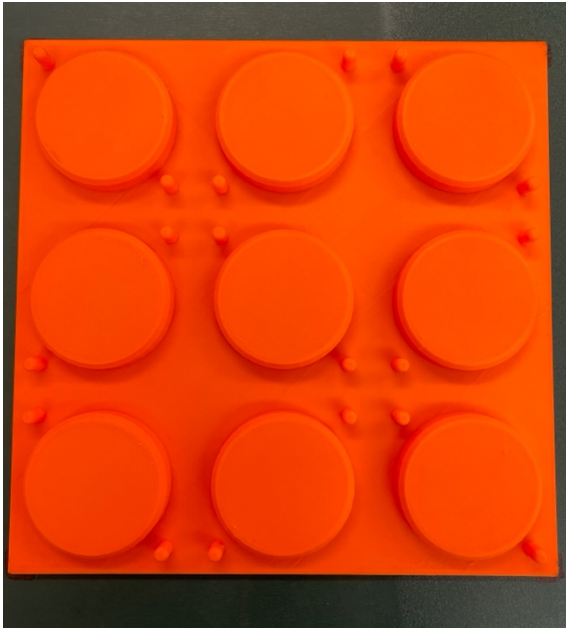


Obrázek 3.6 - Prostředí iRVision

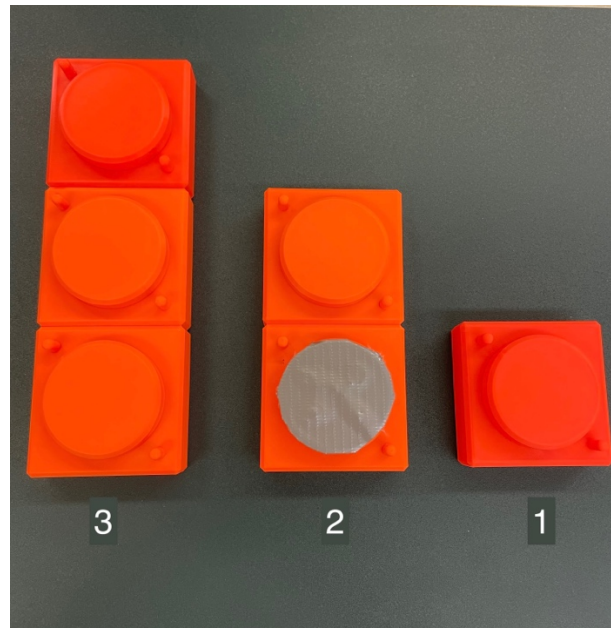
Na pracovišti byla provedena praktická část diplomové práce a v další kapitole je popsáno, jak bude robot využívat kamerový systém a kolaborativního robota k stavění.

3.2 Popis experimentu

Úkolem robota bude seskládat 3D prostorovou sestavu se stávající z několika vrstev. Byly naplánovány dva typy sestav, kdy pracovní názvy sestav byly zvoleny jako garáž a dům. Sestavy budou skládány ze 3 typů objektů (Obrázek 3.8) a podstavy (Obrázek 3.7). Podstava 3x3 i objekty byly vytištěny na 3D tiskárně na Západočeské univerzitě. Kolíky byly přidány z důvodu lepšího usazení jednotlivých objektů a zároveň lehké toleranci při malých odchylkách způsobených uchopením.

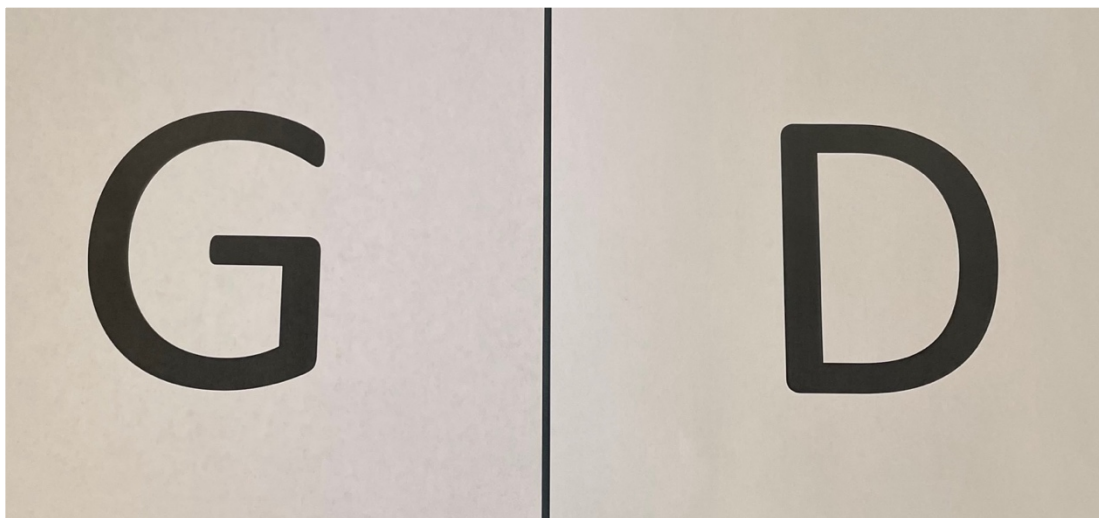


Obrázek 3.7 - Podstava



Obrázek 3.8 - Objekty 1, 2 a 3

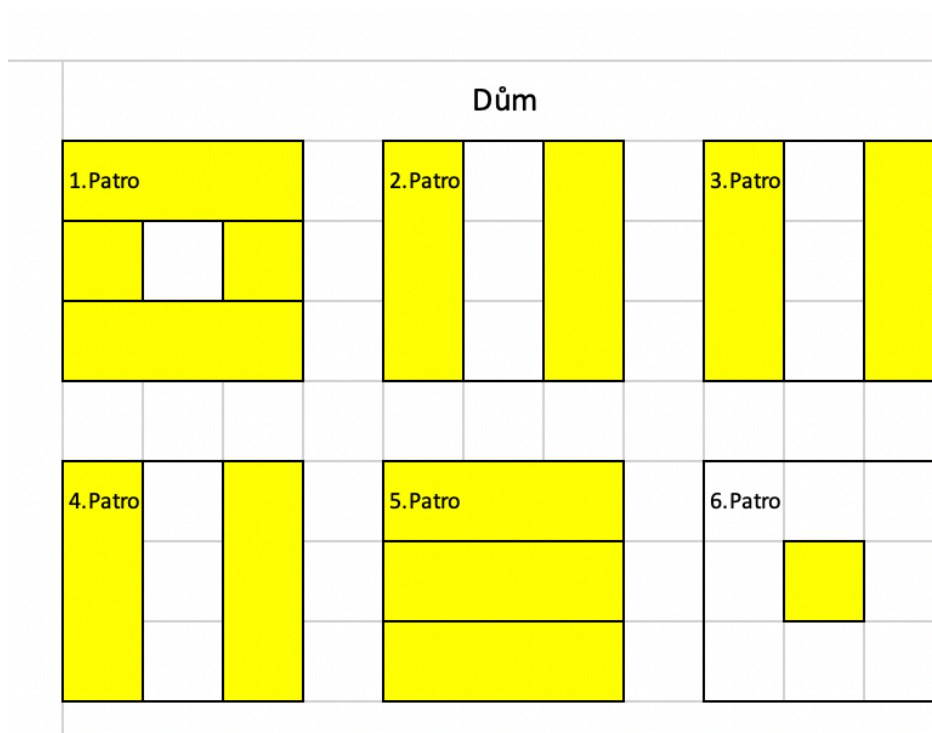
Samotný proces skládání objektů je zahájen rozpoznáním, jestli robot bude stavět garáž nebo dům. Rozpoznání je provedeno pomocí kamery, kdy na linku, která je snímána je předložen papír s velkým písmenem G jako garáž nebo D jako dům (Obrázek 3.9).



Obrázek 3.9 - Proces vidění – Zadání garáže nebo domu

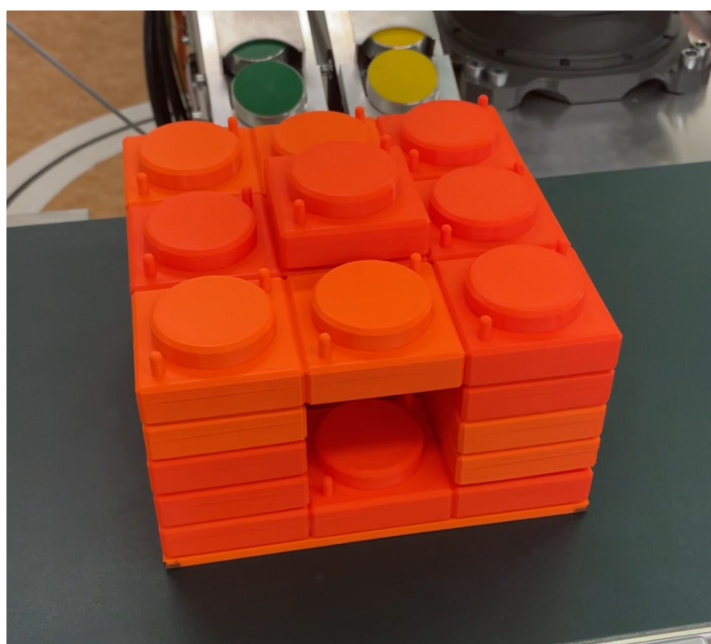
Proces vidění rozhodne o tom, který program se provede. Písmenu G značí spuštění programu Garáž a písmeno D spustí program Dům. Při nepřítomnosti ani jednoho z písmen robot nebude pokračovat.

Na obrázcích 3.10 a 3.12 jsou zobrazeny jednotlivá patra domu a garáže. Čtvrté patro garáže je problémové kvůli objektu 2 a jeho převažování, které bylo vyřešeno zatížením jedné strany objektu.

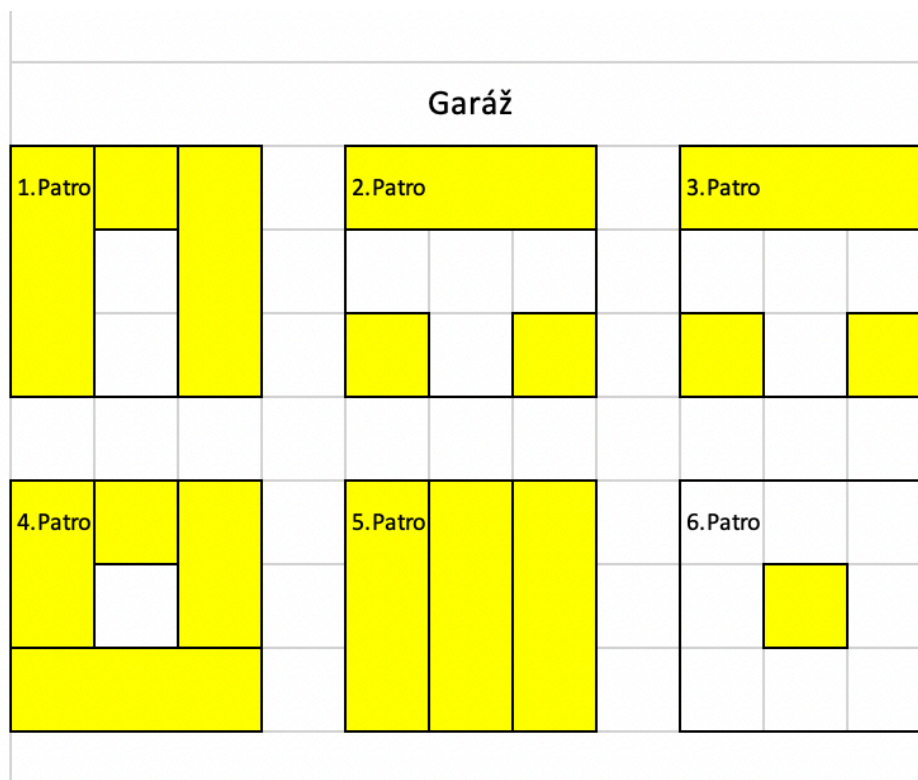


Obrázek 3.10 - Rozvržení pater dům

U domu probíhá stavění pouze z objektů 1 a 3. Při rozvrhování pater byla snaha o minimální přiblížení se reálné podobně domu a garáže. Výsledná sestava doma se zobrazena na obrázku 3.12.



Obrázek 3.11 - Výsledná sestava domu



Obrázek 3.12 - Rozvržení pater garáž

Po načtení zadání se spustí příslušný program a začne skládání. Skládání se skládá ze tří odlišných objektů. Objekty se bohužel musí na linku podávat ručně, protože linka je uzpůsobená na jiný druh práce. Při nepřítomnosti objektu, podstavy nebo chybě v stavění se robot zastaví a vyhlásí chybu. Cílem je kompletně seskládat dům nebo garáž. Sestavení bude provedeno opakovaně a vyhodnotí se úspěšnost tohoto sestavování.

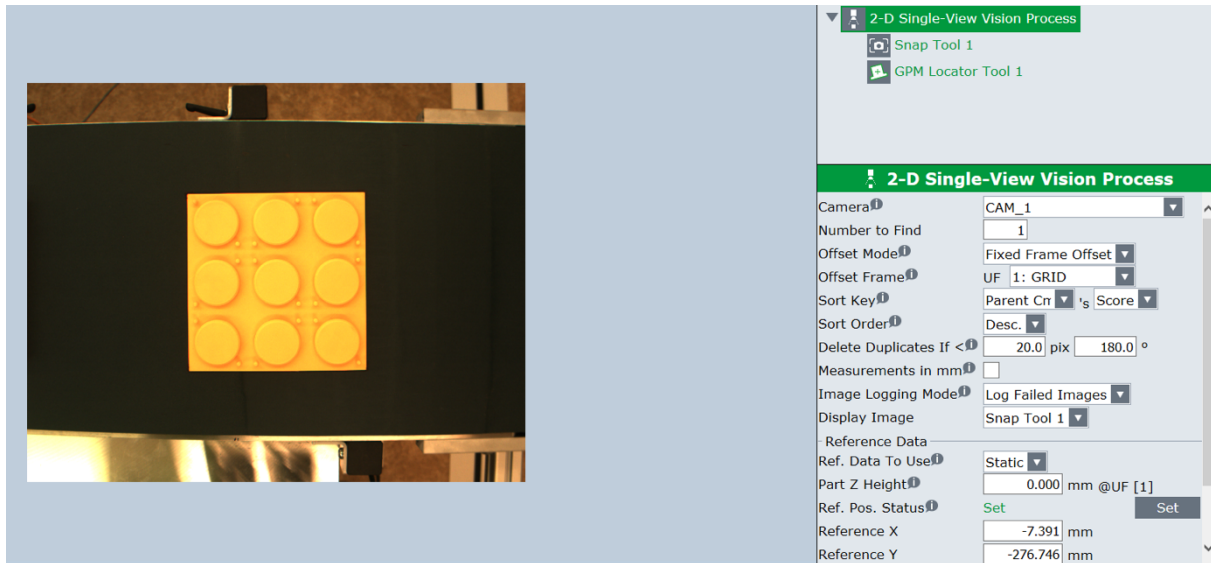
Objekty na Obrázku 3.8 robot odebírá z prostoru snímaného kamerou. U objektu 2 byl problém, když nastal přesah a objekt se začal převažovat (případ u stavění garáže Obrázek 3.12). Tento problém byl vyřešen vyvrtáním děr na jedné straně a přidáním závaží do objektu. U objektu 2 musíme řešit odebírání ve dvou případech, aby vždy robot uchopil správnou stranu objektu, a přitom se nepřetočil a nepřetrhl kabely (kabely na propojení chapadla a kamery).

3.3 Nastavení kamerového systému

Všechna nastavení procesů byla prováděna v iRVision 2D v internetovém rozhraní. Celkem bylo potřeba nastavit 7 procesů na snímání (písmeno G, písmeno D, podstava, objekt 1, objekt 2 dvakrát a objekt 3). Budou ukázány jednotlivé kroky nastavení kamerového systému podstavy, a to včetně skóre, jak dobře dokáže kamera načíst naučený objekt. Následují ukázky výsledného procesu vidění pro zbylé 3 objekty.

Nastavení – Krok 1: 2-D Single-View Vision Process

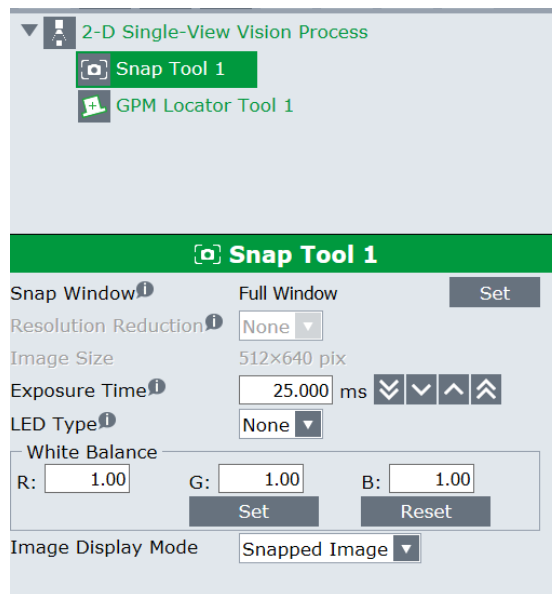
V procesu pro snímání bylo zvoleno „2-D Single-View Vision Process“, jelikož pracoviště je vybavené jednou 2D kamerou a snímaný objekt se nepohybuje (Obrázek 3.13). Následně byl vybrán typ kamery „CAM_1“, která je již kalibrována. Dalším krokem bylo nastavení „Offsetu“. „Offset Mode“ byl nastaven na „Fixed Frame Offset“, což znamená, že podstava se nebude pohybovat a zůstane fixní. „Offset Frame“ byl zvolen „1:GRID“. Velmi důležité bylo nastavení referenčních pozic pomocí tlačítka „Set“, ale tenhle krok se dělá až jako poslední.



Obrázek 3.13 - Nastavení procesu podstava

Nastavení – Krok 2: Snap Tool 1

V „Snap Tool 1“ bylo zvoleno „Full Window“ (Obrázek 3.14). U této možnosti se vybírá, jak moc velkou plochu má kamera snímat. „Exposure Time“ a „White Balance“ byly ponechány v základním nastavení.



Obrázek 3.14 - Snap Tool podstavy

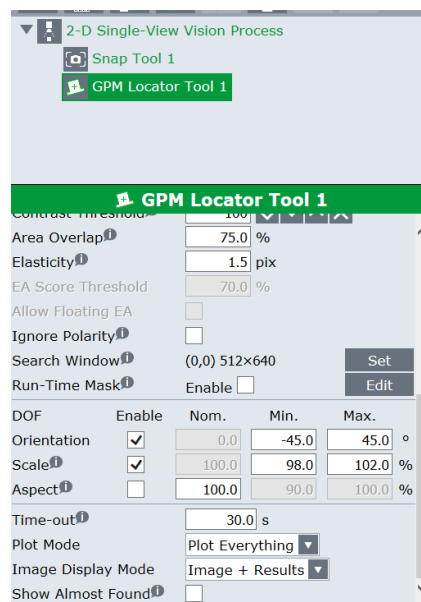
Nastavení – Krok 3: GPM Locator Tool

Třetí částí nastavení byl „GPM Locator Tool“, kde byl proces „naučen“, jakou snímá barvu a tvar (Obrázek 3.15). Učení bylo provedeno hned v prvním kroku a to tlačítkem „Teach“, kdy byl vybrán námi snímáný objekt. Dalšími důležitými hodnotami jsou „Score Threshold“ a „Contrast Treshhold“. „GPM Locator Tool“ také umožňuje díky „Training Mask“ a „Emphasis Area“ zdůrazňovat, co má kamera snímat nebo, co má kamera přeskakovat. Ostatní hodnoty byly ponechány.



Obrázek 3.15 - GPM podstavy

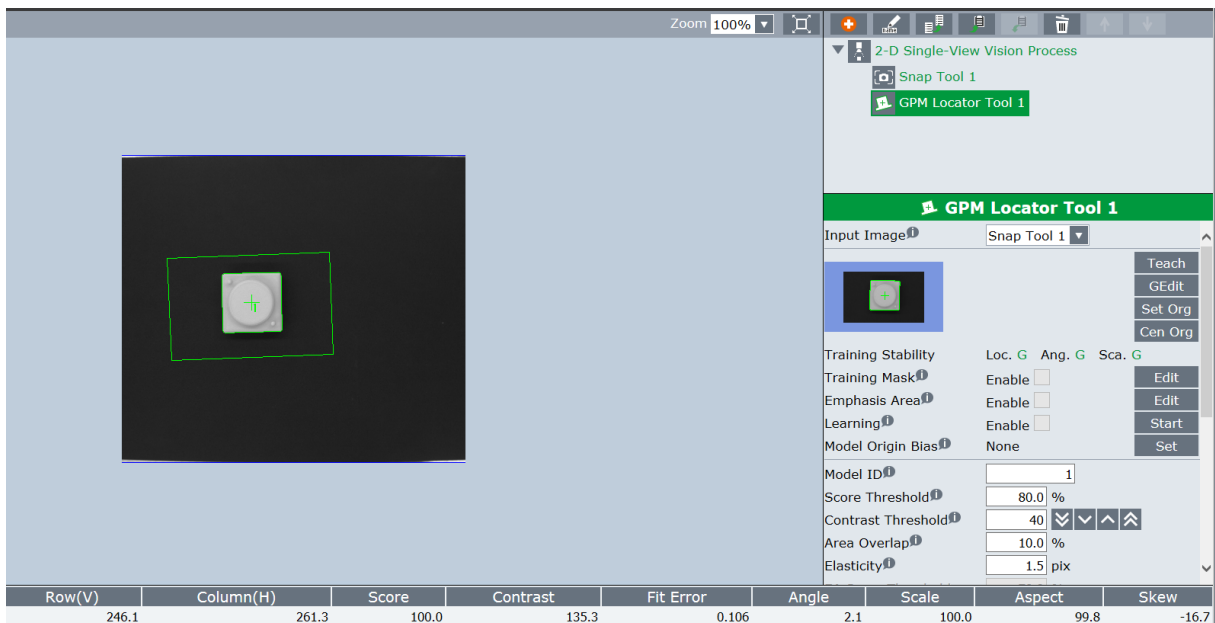
Pokračování v nastavení „GPM Locator Tool 1“ (Obrázek 3.16). Důležitým nastavením zde pro náš proces byla orientace. Orientace stanovuje, jak moc natočený objekt můžeme odebrat. Ostatní nastavení bylo ponecháno na výchozí hodnotě. Předposledním krokem před nastavením souřadnic bylo najít objekt a změřit jeho skóre. Software určuje skóre vyfocenému objektu od 0 do 100, kdy 100 je nejlepší. Podstava dostala skóre 100, což znamená, že kamera dokáže načíst správně „naučený“ objekt. Hodnoty ve skóre menší než 90 je lepší zkusit přenastavit kvůli možným chybám při odebrání (Obrázek 3.14).



Obrázek 3.16 - GPM, dokončení nastavení podstavy

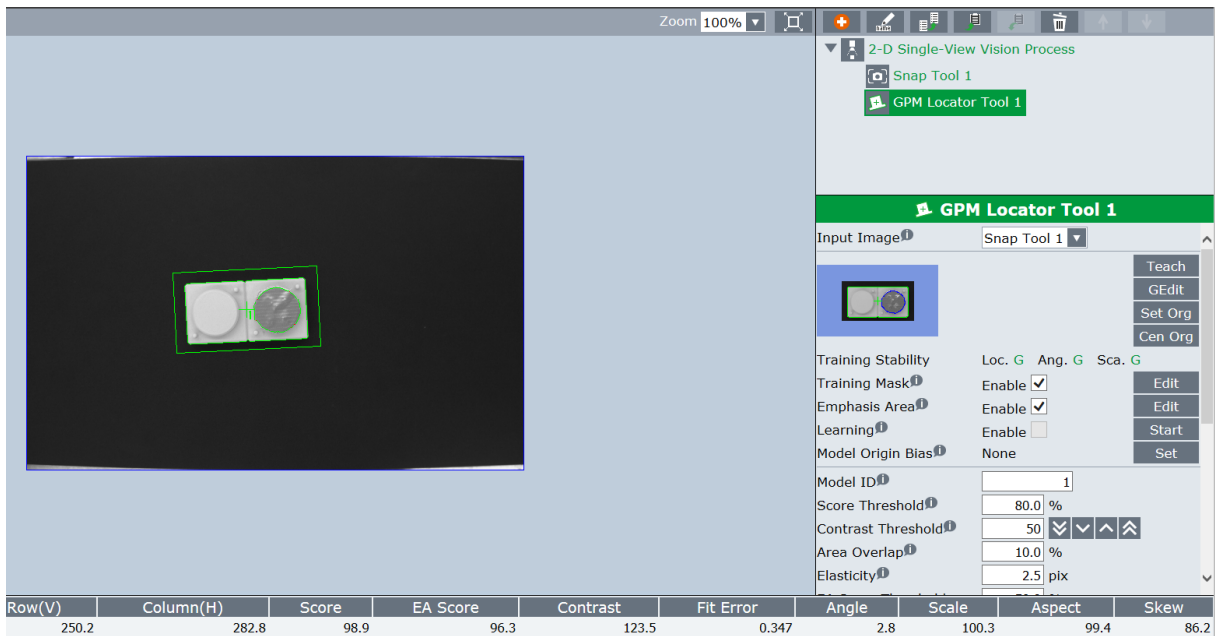
Ukázka výsledného nastavení ostatních procesů vidění

Na obrázku 3.17 je proces focení objektu 1. Tento objekt byl pro nastavení nejlehčí. Skóre objektu je 100 a ve většině případů objekt 1 dosahoval nejlepších výsledků ve skóre.

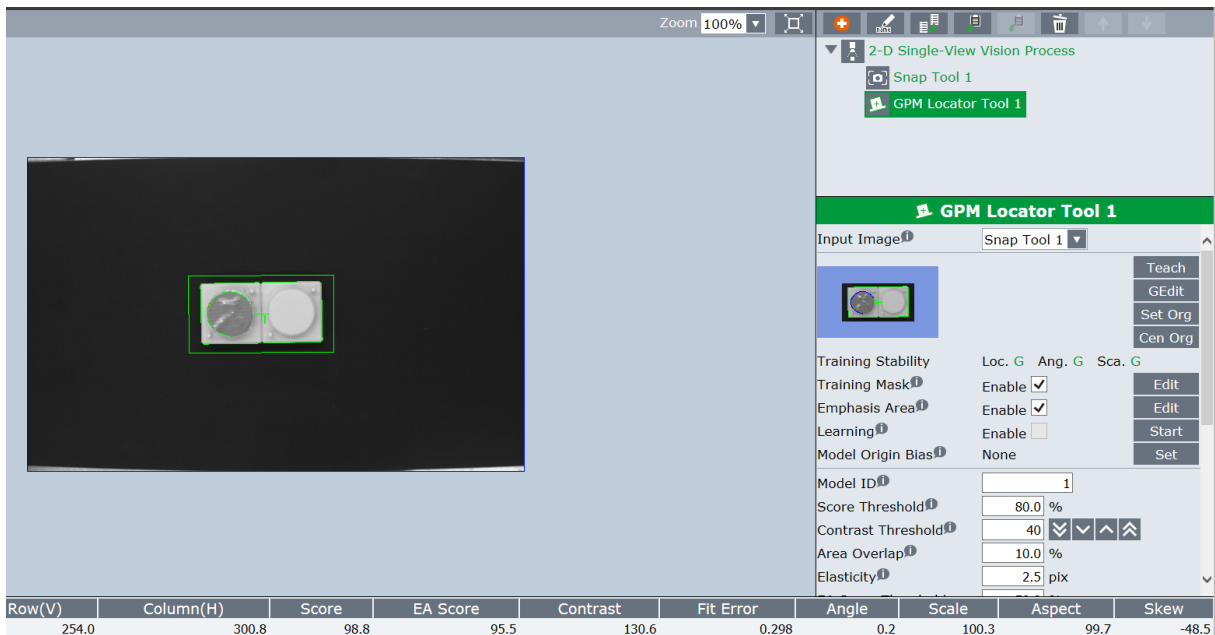


Obrázek 3.17 - GPM objekt 1

Na obrázku 3.18 a 3.19 je objekt 2, který je focen dvakrát kvůli rozdílu při uchopení. U těchto procesů je skóre kolem 98, pokud byl objekt načten na okrajích zorného pole kamery jeho hodnota byla výrazně nižší.

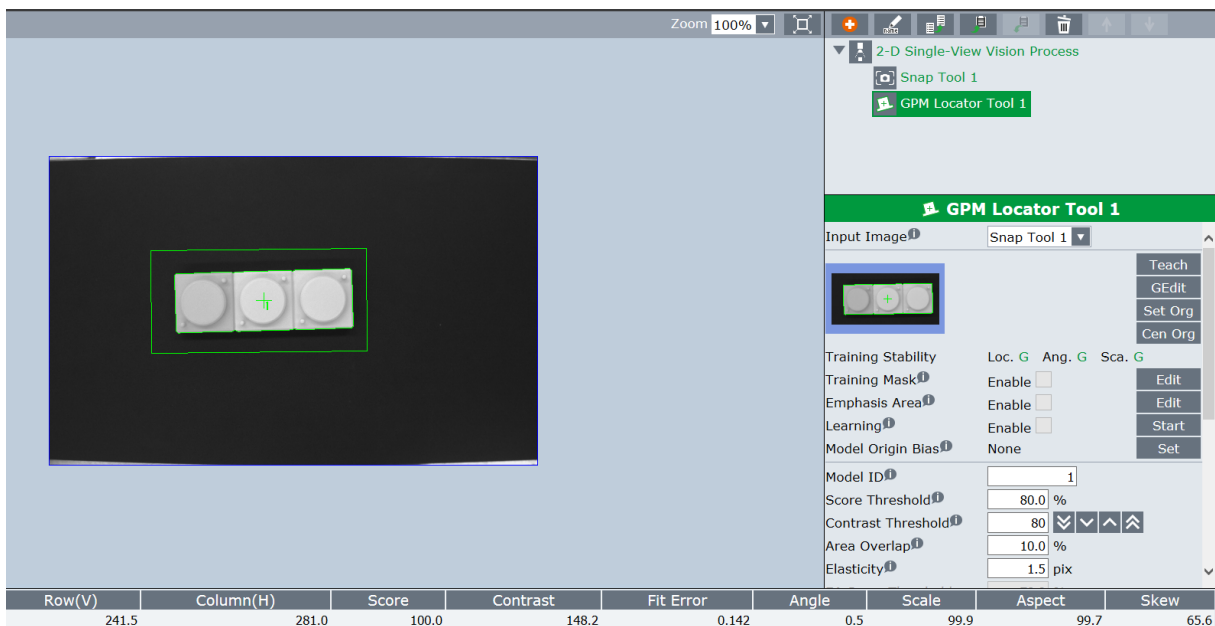


Obrázek 3.18 - GPM objekt 2 I



Obrázek 3.19 - GPM objekt 2 II

Na obrázku 3.20 je objekt 3, který na středu dosahuje 100 skóre. Při testování systému byl objekt 3 nejproblémovějším objektem ze všech. Objekt 3 dosahuje ve většině částí zorného pole kamery vysokého skóre, ale kvůli zkreslení je na okrajích zorného pole posunutý střed objektu 3 a dochází k špatnému uchopení.



Obrázek 3.20 - GPM objekt 3

V podkapitole byly vytvořeny a nastaveny procesy vidění, které budou využity v následující kapitole programování kolaborativního robota.

3.4 Programování kolaborativního robota

K vytvoření programů byly využity vstupy z předchozích kroků a byl vytvořen program k sestavení experimentu se strukturou plnou podprogramů. Většina společností, která vyrábí roboty má svůj vlastní programovací jazyk, a tak to má i Fanuc. Fanuc má vlastní programovací jazyk KAREL. KAREL je nižší programovací jazyk podobný Pascalu. [57]

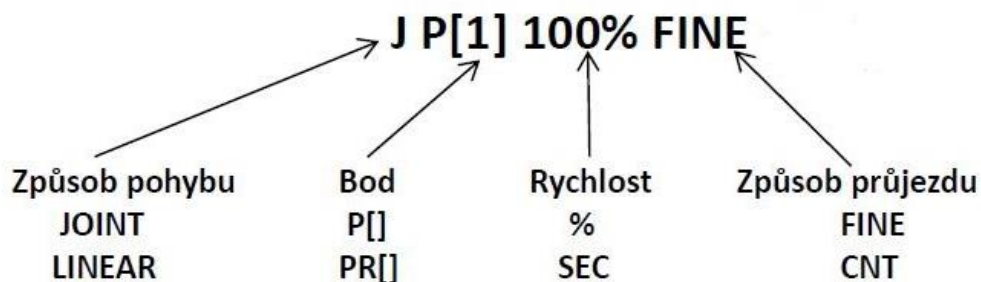
U programování robotů se vyskytují dva termíny: [57]

- První varianta je online programování. Online programování znamená, že člověk pracuje s reálným robotem, dochází k přímé interakci. Tato varianta byla využita i v této praktické části. Robot přímo najíždí do požadovaných poloh, a to buď za pomoci ovládacího pendantu nebo sám člověk může robota navést do polohy (v tomto případě, ale stejně musíme využít pendant k uložení pozice)
- Druhá varianta je offline programování. Offline programování probíhá ve aplikaci, která virtuálně nahrazuje pracoviště. Tento typ programování se používá zejména ve společnostech, kde si nemohou dovolit zastavit linku kvůli testování nebo učení robota.

3.4.1 Základní příkazy pro programování kolaborativního robota Fanuc

Pro pochopení logiky vytvořených programů je zapotřebí vysvětlení základní příkazů, který se vyskytují v programech. Uvedeny jsou zde pouze nejdůležitější příkazy z programů.

Pohybové instrukce



Obrázek 3.21 - Pohybové instrukce [58]

Způsob pohybu:

- JOINT – robot se do bodu dostane nejkratší tedy i nejrychlejší cestou
- LINEAR – lineární pohyb po osách

Bod:

- P[] – bod uložený pouze v daném programu
- PR[] – poziční registr uložený na paměti (např. bod pro focení)

Způsob průjezdu:

- FINE – robot dojede přesně do bodu a zastaví v něm
- CNT – u CNT máme hodnoty 0 – 100 a určuje se tím, jak blízko se robot danému bodu přiblíží, 0 = FINE, robot v bodě nezastavuje

Instrukce pro řízení programu

LABEL – příkaz LBL se používá pro specifikaci nepodmíněného skoku

WAIT – pozdrží program na určitou dobu nebo dokud není naplněn například parametr

CALL – příkaz call přeskočí z právě spuštěného programu na program volaný „podprogram“, kde jede od první řádku až do konce, poté se vrátí na další řádek hlavního programu

ABORT – přeruší provádění programu

PAUSE – mění stav programu z „running“ na „pause“

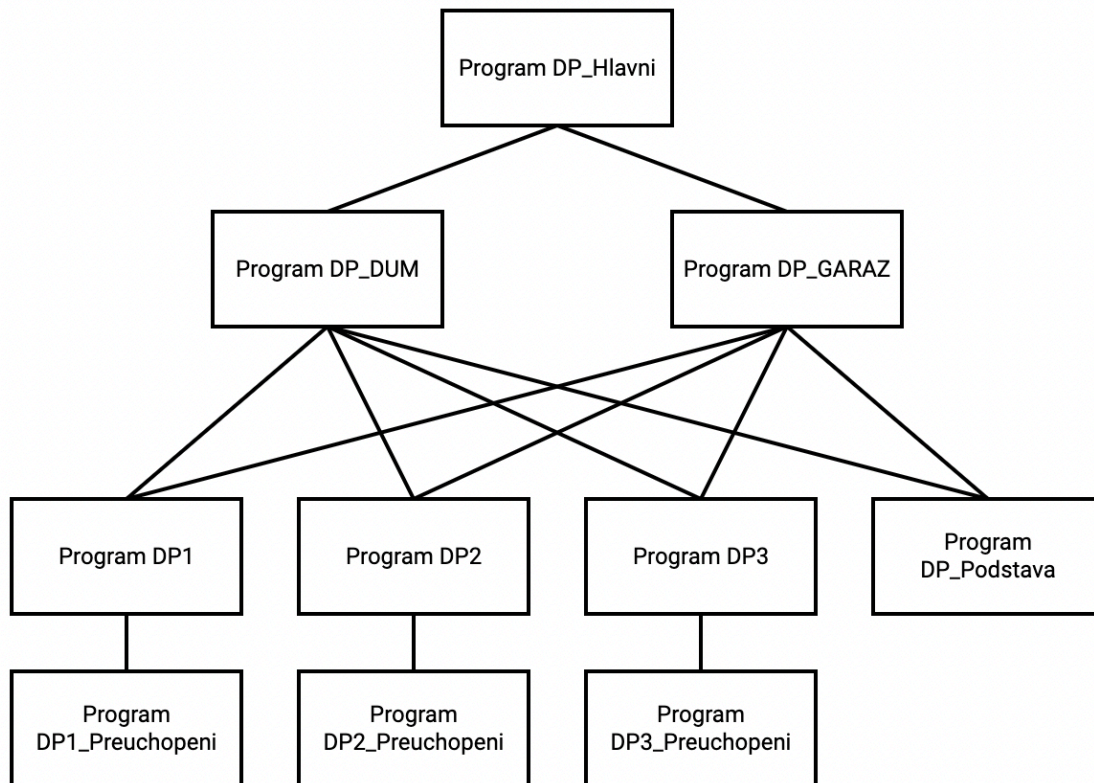
Ostatní příkazy

Příkazy	Úlohy
VISION RUN_FIND	volá proces vytvořený v iRVsion 2D
VISION GET_OFFSET	nastaví souřadnice (polohu) snímaného objektu
VOFFSET,VR[]	pracuje s uloženou pozicí z daného vision procesu
TOOL Offset, PR[]	upravuje poziční data od naučeného bodu, využívá poziční registr

Tabulka 3.2 - Příkazy využité při programování

3.4.2 Hierarchie programů

Na obrázku 3.22 lze vidět hierarchie programů. Jedná se o zobrazení, jak se programy navzájem volají. Hlavní program „DP_Hlavni“ volá buď „DP_DUM“ nebo „DP_GARAZ“. Programy „DP_DUM“ a „DP_GARAZ“ obsahují stejné volání další podprogramů, a proto byly spojeny. Následně tyto programy volají „DP1, DP2, DP3 a DP_Podstava“. Programy „DP1, DP2 a DP3“ si volají poslední program „preuchopení“.



Obrázek 3.22 - Hierarchie programů

Následovat budou vývojové diagramy jednotlivých programů a ukázka hlavního programu v programovacím jazyku KAREL.

3.4.3 Ukázka hlavního programu v programovacím jazyku KAREL

Na začátku kódu je „LBL2“ kvůli přeskokování v případě, kdy robot nenačte zadání. Poté se čeká na hlavní tlačítko linky, které spouští celý systém. Následně si robot najede do bodu. Bod byl zvolen, aby kvalita focení mohla být, co nejkvalitnější. Hlavní program pracuje s procesem vidění, kde rozděljuje, jaká stavba se provede. Podmínka, který program se spustí byla řešena pomocí „JMP LBL“. Pokud „GET_OFFSET“ nenačte příslušný proces vidění „DPDUM“, program přeskočí pomocí „JMP LBL“ na druhý „GET_OFFSET“, který se snaží načíst proces vidění „DPGARAZ“. Pokud ani jeden z „OFFSETU“ nenačte příslušný proces, program přeskočí na 14 řádku kódu, vyhodí chybu a přeskočí na začátek programu (na první řádek kódu).

Pokud „OFFSET“ načte daný proces vidění, následně podle typu načteného procesu vidění zavolá pomocí příkazu „CALL“ program „DP_DUM“ nebo program „DP_GARAZ“ (Obrázek 3.23).

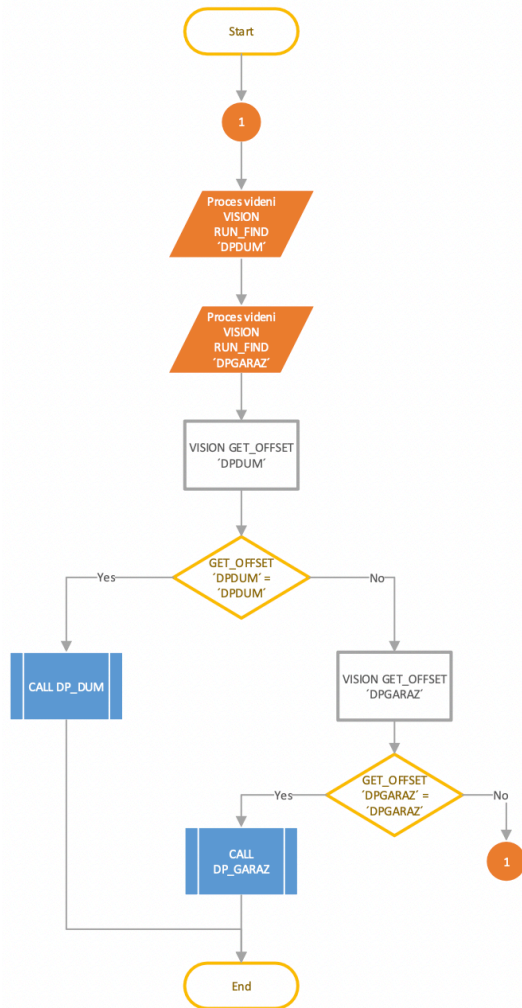
```
1: LBL[2]
2: WAIT (DI[16:OFF:TLACITKO OBSLUHA])
3:J P[1] 100% FINE
4: VISION RUN_FIND 'DPDUM'
5: VISION RUN_FIND 'DPGARAZ'
6: VISION GET_OFFSET 'DPDUM' VR[3] JMP LBL[1]
7: CALL DP_DUM
8: JMP LBL[99]
9: LBL[1]
10: VISION GET_OFFSET 'DPGARAZ' VR[3] JMP LBL[98]
11: CALL DP_GARAZ
12: JMP LBL[99]
13:
14: LBL[98]
15: UALM[5]
16: JMP LBL[2]
17:
18: LBL[99]
[End]
```

Obrázek 3.23 - Program "DP_Hlavni"

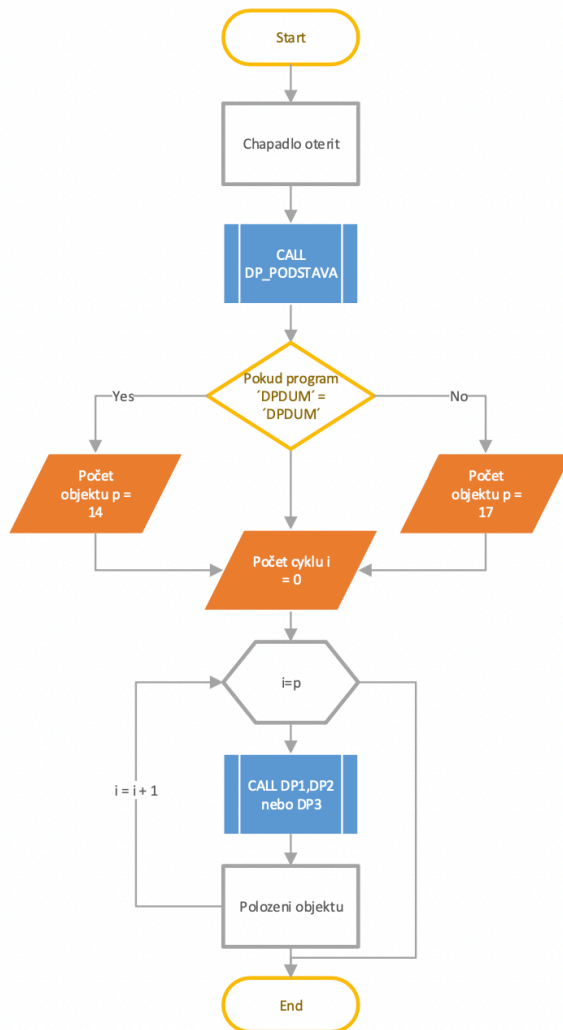
3.4.4 Vytvořené programy

První vývojový diagram je k programu „DP_Hlavni“ (Obrázek 3.24). Vývojový diagram ukazuje logiku programu. Slouží pro grafické znázornění jednotlivých kroků algoritmu a obsahuje obrazce, kdy každý obrazec má svoji specifikaci.

Na obrázku 3.25 je vývojový diagram programů „DP_DUM“ a „DP_GARAZ“. Program „DP_DUM“ má stejnou strukturu jako program „DP_GARAZ“. V tomto programu byl robot „naučen“ jak seskládat dům nebo garáž. Program načte počáteční polohu podstavu a následně staví dům nebo garáž objekt po objektu. Při každém kroku stavění si program volá „DP1, DP2 nebo DP3“.



Obrázek 3.24 - Diagram "DP_Hlavni"

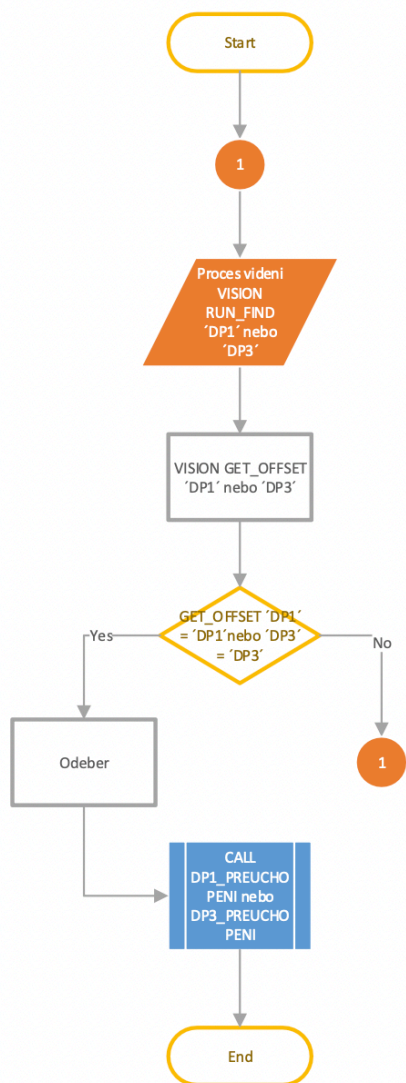


Obrázek 3.25 - Diagram "DP_DUM" a "DP_GARAZ"

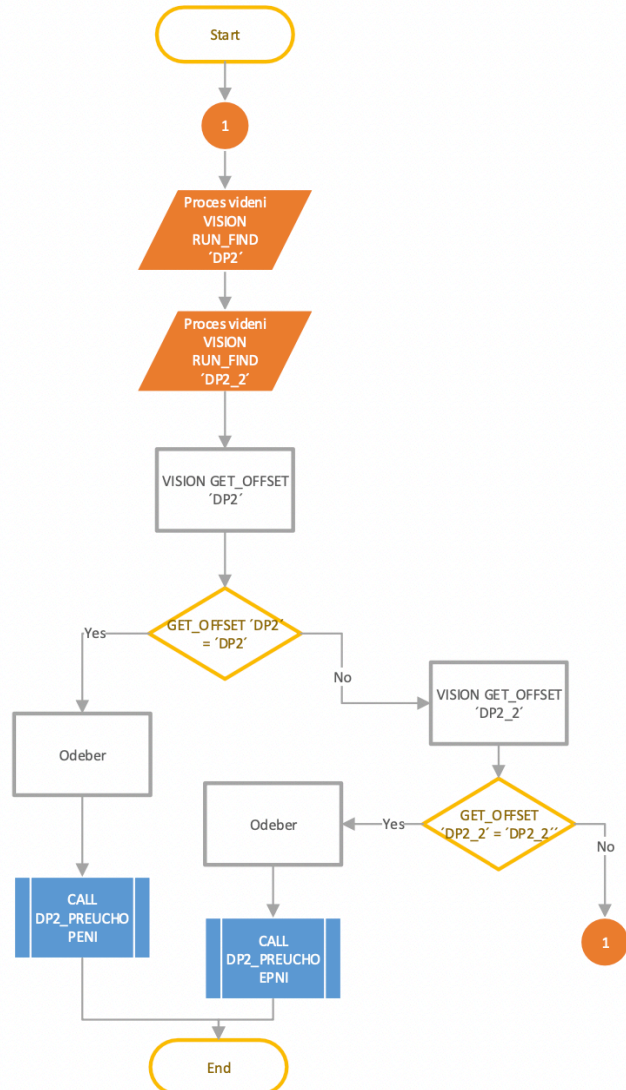
Programy „DP1 a DP3“ mají stejnou strukturu (Obrázek 3.26), program „DP2“ má strukturu kvůli odebírání komplikovanější (Obrázek 3.27). Vývojové diagramy (Obrázek 3.25 a 3.26) ukazují větší složitost programu „DP2“ oproti programu „DP1“ nebo „DP3“. Objekt 2 je jediný, který má dvě varianty, a to kvůli zatížení jedné části. Odebírání objektu 2 ve dvou variantách:

- Varianta 1 pracuje od 0° do 179°
- Varianta 2 pracuje od 180° do 359°

Mezi variantami uchopení přeskakujeme opět pomocí „JMP LBL“. V tomto případě je rozdílný pouze proces vidění, ale program se v obou případech volá stejný.



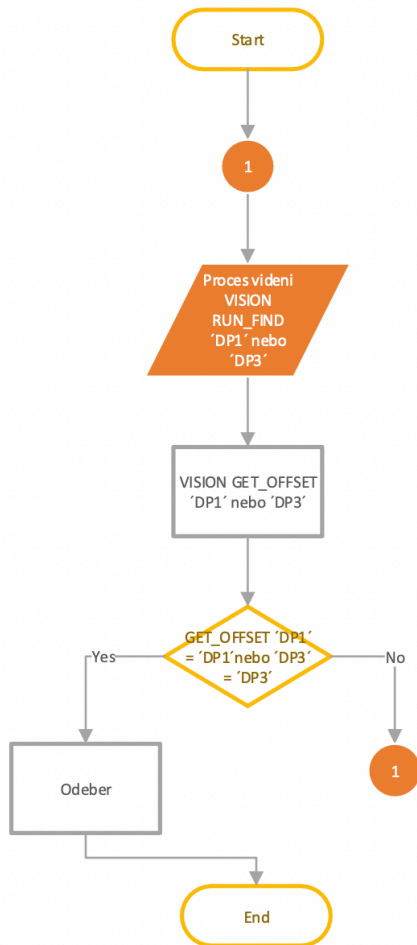
Obrázek 3.26 - Diagram "DP_1" a "DP_3"



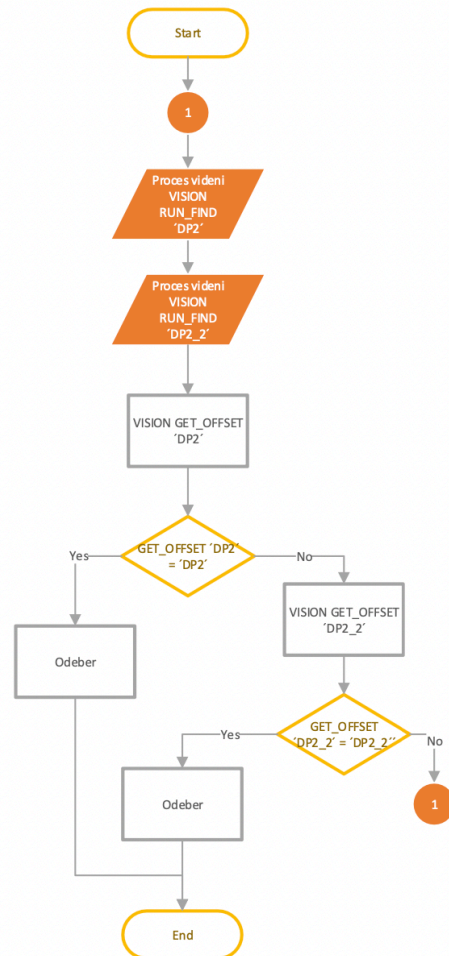
Obrázek 3.27 - Diagram "DP_2"

Program „PREUCHOPENI“ má stejnou strukturu pro objekty 1 a 3 (Obrázek 3.28). Objekt 2 má program přeuchopení opět komplikovanější kvůli odebrání ve dvou variantách (Objekt 3.29). Přeuchopení slouží jako program pro lepší uchycení a snížení rizika ke špatnému sestavení. U přeuchopení je objekt přesunut na lepší pozici pro snímání. Kamera vyfotí lépe objekt a dojde k přesnějšímu uchopení.

Tento program je jako poslední v hierarchii programů. Využita selekce přes „JMP LBL“, ale tentokrát už se nevolá žádný jiný program.

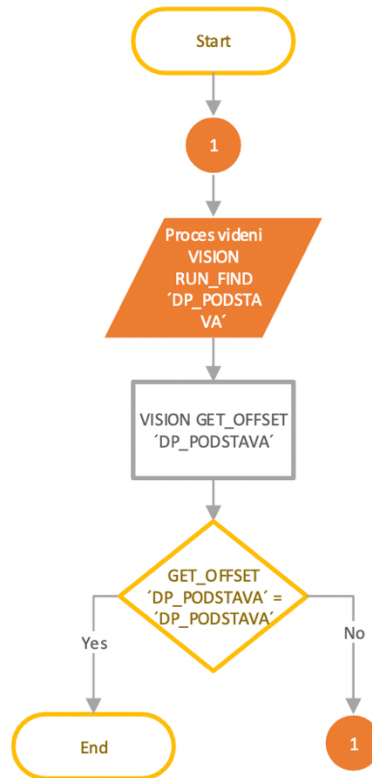


Obrázek 3.28 - Diagram "DP_1" a "DP_3" preuchopeni



Obrázek 3.29 - Diagram "DP_2" preuchopeni

Program „DP_Podstava“ je ze všech programů a vývojových diagramů nejjednodušší (Obrázek 3.30). Tento program pouze načte a uloží pozici podstavy s kterou se následně pracuje v dalších programech. Pokud podstava není načtena, program ukáže chybu a skokovou podmínkou se vrátí na začátek programu.



Obrázek 3.30 - Diagram "DP_Podstava"

Na základě vytvořených programů a připraveného pracoviště byly následně provedeny experimenty, které byly vyhodnoceny v následující kapitole.

4 Vyhodnocení experimentů

Cílem experimentů bylo otestování úspěšnosti sestavení, uchopení objektů a vliv osvětlení na skládání. V rámci testování sestavení bylo provedeno celkem 14 experimentů. Experimenty byly prováděny s přeuchopením. U přeuchopení má objekt vždy vysoké skóre, protože je umístěn přímo na střed zorného pole kamery. V souvislosti s tímto byly provedeny i testy jednotlivých objektů a jejich odběry v rámci zorného pole kamery. Objekty bylo umisťovány po odebírací ploše a zkoumány jejich skóre a zda je objekt vůbec načten procesem vidění.

Jelikož je tématem strojní vidění, bude při testování využít i luxmetr k testování osvětlení a zjištění funkčnosti kamery k různým druhům kvality osvětlení. Sestavování bude zkoumáno z pohledu autora práce a vyhodnoceno z pohledu přesnosti skládání.

Vyhodnocení je rozděleno do 3 experimentů (sestavování, uchopení a osvětlení), aby v průběhu testování byly lépe vyhodnoceny chyby a problémy systému.

4.1 Experiment 1: Sestavení objektů do výsledné sestavy

Cílem experimentu je zjistit kvalitu sestavování objektů na podstavu. Z celkových 14 testů sestavení (7 dům a 7 garáž) byly dvě chyby v sestavení. Bylo provedeno 10 testů za osvětlení 600 Lx a 4 za osvětlení 400 Lx. Sestavení probíhala s přeuchopením, takže odebírací pozice vždy dosahovala dobrého skóre. Z celkových 14 testů byly zaznamenány dvě chyby v sestavení. Obě chyby byly totožné a nastaly při sestavení garáže s objektem 1. Chyby nastaly v patře číslo 4, kde se sestavují i objekty 2 (jedná se o krok 12).

Sestavení		
Celkem testů		14
Osvětlení	600 [Lx]	10
	400 [Lx]	4
Výsledná sestava	Dům	7
	Garáž	7
Chyby	Dům	0
	Garáž	2
Chybovost systému		14,29 %

Tabulka 4.1 - Chybovost sestavení

Nápravné opatření

Zlepšení kroku bylo opraveno manuální změnou souřadnic bodu, kde chapadlo uvolňuje objekt 1. Nové uložení pozic není možné, protože by neseděly vůči naučené pozici podstavu, které proběhlo při prvním sestavení. Přesnost objektu 1 ve 4. patře se manuální změnou souřadnic zlepšila a při dalších testech už chyba v této fázi sestavování nenastala.

Výsledek lze interpretovat jako úspěšný. Po opravě objektu 1 nedocházelo k žádné další chybě. Při odstranění přeuchopování ze systému by byl výsledek pravděpodobně horší.

4.2 Experiment 2: Rozpoznání a uchopení objektů

Cílem experimentu je zjistit kvalitu procesů vidění a uchopení v zorném poli kamery. Uchopení probíhalo v průběhu sestavování i následně testováním jednotlivých objektů v zorném poli kamery. Uchopení během sestavování zaznamenalo 8 chyb.

Uchopení		
Celkem jednotlivých uchopení		217
Chyby	Celkem	8
	Objekt 1	1
	Objekt 2	3
	Objekt 3	4
Chybovost systému		3,69 %

Tabulka 4.2 - Chybovost uchopení

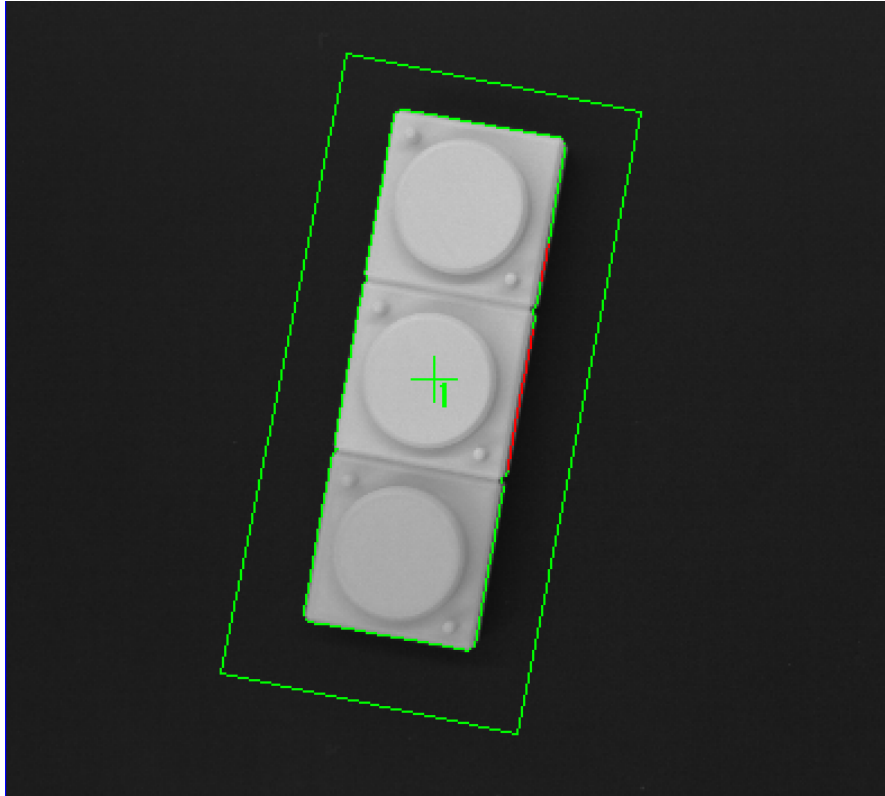
Chyby byly zaznamenány u všech objektů a téměř vždy chyba souvisela s uchopením objektu na okraji zorného pole kamery. U jednotlivých objektů také proběhla kontrola skóre na jednotlivých pozicích zorného pole (Obrázek 4.1).

Kvalita skóre pro jednotlivé objekty v jednotlivých částí zorného pole kamery				Objekt 1	Objekta 3	Nefunkční pro objekty 2 a 3
				Objekt 2	Všechny objekty	
95,30%			100%			95%
	89%		92%		86%	
	98%		99%		94%	
	86%		99 - 100%		85%	
	98%		99%		97%	
	90%		89%		88%	
96,70%			99%			96,40%

Obrázek 4.1 - Skóre objektů v zorném poli kamery

Nápravné opatření

Z celkových 8 chyb byly 4 způsobeny špatným uchopením objektu 3. Špatné uchopení bylo vždy na podobné pozici odběru. Objekt 3 nacházející se v pozici zobrazené na obrázku 4.2 má posunutý střed vzhledem ke zkreslení a tím pádem je problémový pro odběr. Jedním z řešení může být zmenšení zorného pole kamery a v případě, kdy objekt 3 nebude v zorném poli kamery, program vyhlásí chybu „nenalezen objekt 3“ a kamera by automaticky najela do jiné fotící pozice.



Obrázek 4.2 - Objekt 3 s posunutým středem

Z obrázku 4.2 lze vidět, že střed nalezený procesem vidění nesedí přesně se středem objektu. Tento rozdíl zapříčiňuje problémy s odběrem. Objekt je ve fázi „učení“ naučen, že chapadlo se orientuje přesně podle středu a perfektní odběr je, když je střed přesně nalezen. V tomto případě je střed posunut a tím pádem i nájezd robota není nejpřesnější. Díky typu úchopu a přeuchopení dokáže robot tolerovat malé výchylky v určení středu objektu. Pokud je střed objektu vychýlen více, chapadlo robota má problém uchopit objekt správně.

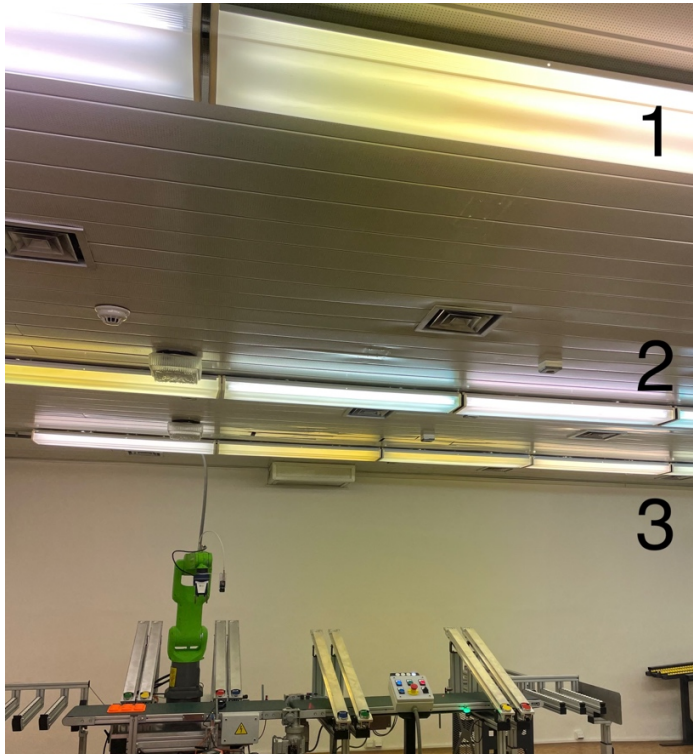
Další 3 chyby byly zapříčiněny nenačtením objektu 2. Chyba v nenalezení objektu 2 může být zapříčiněna tím, že objekt 2 musel být více zatížen a následkem zatížení vznikly malé rozdíly v jednotlivých objektech 2 (celkem 3 kusy). Chyby byly opět pouze na okrajích zorného pole kamery. Řešením je úprava objektů 2, aby byly objekty totožné.

Zbývá 1 chyba byla u objektu 1, kdy objekt 1 byl zaměněn za objekt 2. Při následném zkoumání bylo zjištěno, že objekt 1 lze lehce zaměnit za objekt 2 i objekt 3 kvůli tomu, že objekt 2 i objekt 3 jsou spojené objekty 1. V tomto případě byl předělán proces vidění u objektu 1. Byla přenastavena hodnota „Area Overlap“ na 0 %. Funkce „Overlap Area“ je prostorové číselné měření, které vypočítá celkovou plochu, délku nebo počet překryvu mezi prvky v aktuální vrstvě a prvky v cílové vrstvě.

Po opravě u objektu 1 došlo ke zlepšení uchopení a tím se zvedla i úspěšnost celkové kvality uchopení, která při dobré pozici pro snímání dosahuje vysoké úspěšnosti.

4.3 Experiment 3: Osvětlení pracoviště

Cílem experimentu je zjistit, jak velký vliv má osvětlení na kvalitu sestavení. Bylo provedeno měření osvětlení pracoviště pomocí luxmetru (Obrázek 4.4). Pracoviště obsahuje 3 řady osvětlení (Obrázek 4.3) a byly otestovány všechny způsoby osvětlení. Všechny naměřené hodnoty jsou v tabulce 4.1. Z obrázku 4.3 a tabulky 4.1 lze vidět, že nejsilnější osvětlení dodává kameře řada 2.



Obrázek 4.3 - Osvětlení pracoviště



Obrázek 4.4 - Luxmetr

Světla	Osvětlení (Lux)	Kvalita odběrů
Plné osvětlení	600	vynikající
Jedna řada vypnutá		
1. řada	500	velmi dobrá
2. řada	310	dobrá
3. řada	400	dobrá
Jedna řada zapnutá		
1. řada	92	nedostačující
2. řada	300	nedostačující
3. řada	230	nedostačující

Tabulka 4.3 - Tabulka hodnot osvětlení

Po vyhodnocení sestavení při 600 Lx a 400 Lx byly dále provedeny testy sestavení (nezapočítány do experimentu 1) při osvětlení 500, 310 a 300 luxech. Kvalita odběrů byla hodnocena autorem práce a byla rozdělena na 4 kategorie. Mezi hodnotami 500 Lx a 310 Lx byla kvalita odběru podobná, tudíž dobrá až velmi dobrá. Nejlépe se kvalita poznala při natočení podstavy o 45 stupňů, jelikož je pak sestavení náročnější. U hodnoty 310 Lx při natočení podstavy bylo vidět, že skládání už má větší odchylky oproti 600 Lx. Při 300 Lx měl proces vidění úspěšnost načtení podstavy okolo 50 %, proto pouze jedna řada světél byla vyhodnocena jako nedostačující, jelikož všechny hodnoty pro jednu řadu světél se nacházejí pod úrovní 300 Lx. Sestavování pro 300 Lx a níže nebylo provedeno.

4.4 Využití experimentu

Spolehlivost systému se po opravě v průběhu experimentů přiblížila 100 %. Takhle velká spolehlivost je díky přeuchopování objektů a jejich umístování do ideálního snímáčiho prostoru robota.

U uchopení objektů a procesů vidění je pravděpodobnější, že objekt nebude nalezen, než aby byl uchycen špatně. V případě možnosti využití linky by objekty nemusely být dodávány manuálně a bylo by nastaveno vždy dopravení objektu na co nejlepší odběrovou pozici a tím pádem by mohl být odstraněn krok přeuchopení.

Sestavované objekty by se daly zařadit ke středně obtížným objektům vzhledem k snímání. Testování experimentu ukazuje, že strojové vidění je v dnešní době na dobré úrovni a přesnost procesů vidění stále roste. Při kombinaci strojového vidění a kolaborativního robota vznikají podmínky pro možné uplatnění plně automatizovaného procesu výroby.

Programování robota lze propojit se senzory dopravní linky, tím pádem k plné automatizaci není zapotřebí jenom kamera, ale mohou se využívat i nejnovější senzory běžně používané u linek.

Strojové vidění má veliké využití v praxi a tato práce by šla implementovat například na přesné skládání do krabice, kdy výroba obsahuje tvarově různé výrobky. Tvarově různé výrobky by byly snímány kamerou připevněnou na kolaborativním robotu. Robot by s přesností skládal výrobky do cílové pozice. Výhodou může být i dosah ramene 911 mm. Při takovém rozsahu je možná kombinace více linek, umístění robota mezi linky. Robot by odebíral z více linek a skládal do jedné cílové pozice.

Další využití je upínání tvarově různých obrobků do novějších obráběcích center, kdy robot na základě určení procesu vidění dokáže zapnout příslušných program obrábění v obráběcím centru, takže dopravníkem může jezdit více tvarově různých obrobků. Strojové vidění načte příslušný obrobek a uloží si aktuální pozici obrobku. Pozice je načtena do programu kolaborativního robota, který si pro obrobek „šáhne“, přesune a uloží do cílové pozice a spustí správný program pro obrábění.

5 Závěr

Práce byla vytvořena na pracovišti v laboratoři Průmyslu 4.0 na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Cílem práce bylo vymyslet logiku experimentu k dosažení nejvyšší úspěšnosti, sestavit programy a procesy vidění, aby vše fungovalo s nejmenším počtem chyb a otestovat úspěšnost sestavení a uchopení jednotlivých objektů. Součástí práce byly testy světelných podmínek a jejich vliv na sestavování a odebírání jednotlivých objektů. V průběhu vyhodnocování a testování experimentu vznikly problémy, které byly upraveny/opraveny v prospěch úspěšnosti celého systému.

V první teoretické části byly popsány systémy strojového vidění. Na začátku teoretické části byly zvoleny různé definice strojového vidění, krátký úvod do historie, základní systémy a jejich výhody/nevýhody. Nutností bylo i popsání základních parametrů systémů strojového vidění a senzorů kamer (CMOS a CCD). Závěrem kapitoly bylo uvedení trendů ve strojovém vidění jako je například hluboké učení.

Druhá teoretická část obsahuje úvod do průmyslové robotiky a využití systémů strojového vidění v průmyslové robotice. Součástí úvodu do průmyslové robotiky je základní rozdělení robotů s následným podrobným popisem kolaborativních robotů. U využití senzorů v praxi ve spolupráci s roboty jsou uvedeny 4 příklady využití.

V praktické části byla popsána logika celého experimentu (systému) s popisem jednotlivých objektů, sestav, zadání a pracoviště. Následně byly uvedeny všechny procesy vidění s popisem procesu vidění u podstavy a popisem jednotlivého nastavení. V části programování byly vysvětleny základní příkazy, ukázka struktury hlavního programu a vývojové diagramy všech programů. Vývojové diagramy byly udělané pro lepší pochopení logiky vytvoření programů. Propojení a volání programů je vysvětleno v hierarchii programů.

V závěru práce bylo provedeno testování sestavení a uchopení objektů. Součástí testování byl taky vliv osvětlení na kvalitu sestavení experimentu. Během testování byly odhaleny některé chyby v nepřesné pozici nebo chybném procesu vidění. Více chyb bylo u uchopení objektů, a proto byly otestovány také jednotlivé objekty u okrajů zorného pole kamery. Na konec byly uvedeny příklady možného využití systému v praxi.

V souhrnu lze konstatovat, že teoretická část práce popisuje systémy strojového vidění a jejich využití ve spolupráci s roboty. Praktická část se zaměřuje na popis a nastavení základních pohybů, procesů vidění, programování robota a testování úspěšnosti vytvořeného experimentu. Testování odhalilo některé chyby, které byly na konci práce popsány a opraveny.

Seznam použitých zdrojů

- [1] COGNEX. *COGNEX* [online]. [cit. 2021-10-25]. Dostupné z: <https://www.cognex.com/what-is/machine-vision/what-is-machine-vision>
- [2] HOTAŘ, Vlastimil. *Úvod do problematiky strojového vidění*. Liberec: Technická univerzita, 2015. ISBN 978-80-7494-156-6.
- [3] STEGER, Carsten, Markus ULRICH a Christian WIEDEMANN. *Machine Vision Algorithms and Applications*. 2nd. 2018. ISBN 978-3-527-41365-2.
- [4] CHLEBNÝ, Jan. *Automatizace a automatizační technika*. Brno: Computer Press, 20014. ISBN 978-80-251-3447-5.
- [5] INTEGRO. *Integro Technologies* [online]. [cit. 2021-10-26]. Dostupné z: <https://www.integro-tech.com/5-machine-vision-innovations-to-expect-in-2021/>
- [6] HAVLE, Otto. Strojové vidění I: Principy a charakteristiky. *AUTOMATA*. 2008.
- [7] HUANG, Katie. *Katie Huang* [online]. [cit. 2021-10-26]. Dostupné z: <https://katiehuang1221.medium.com/an-introduction-to-computer-vision-131826e2b512>
- [8] SPARKS, Robert. *OpticsMag* [online]. 2021 [cit. 2021-10-26]. Dostupné z: <https://opticsmag.com/what-is-liquid-lens-technology/>
- [9] HÁJEK, Martin. *Foto Fokus* [online]. 2018 [cit. 2021-10-26]. Dostupné z: <https://fotofokus.cz/2018/02/digitalni-snimace-typy/>
- [10] CALDERONE, Len. *Robotics Tomorrow* [online]. 2019 [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.roboticstomorrow.com/article/2019/12/what-is-machine-vision/14548>
- [11] *Techopedia* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/30414/machine-vision-system-mvs>
- [12] *Vision Doctor* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.vision-doctor.com/en/camera-technology-basics/ccd-sensors.html>
- [13] *Vision Doctor* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <https://www.vision-doctor.com/en/camera-technology-basics/cmos-sensors.html>
- [14] *Elektronické systémy* [online]. [cit. 2021-11-15]. Dostupné z: <http://www.elektronicke-systemy.cz/technicke-parametry-kamerovych-systemu>
- [15] ATRIA. Atria Innovation [online]. [cit. 2022-01-05]. Dostupné z: <https://www.atriainnovation.com/en/machine-learning-in-industry/>
- [16] 3D machine vision – technical basics and challenges. STEMMER [online]. [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/3d-machine-vision/>
- [17] Kamerové senzory. Keyence [online]. [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/vision/vision-sensor/>
- [18] Strojové vidění. BR-Automation [online]. [cit. 2022-01-10]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/cs/produkty/strojove-videni/>
- [19] *C&T Solution* [online]. [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: http://www.candtsolution.com/en/Promo/2018/VCO_6000/
- [20] *Advanced Graphics* [online]. [cit. 2022-01-12]. Dostupné z: <https://advancedgraphics.com/r2-d2-cardboard-cutout/>
- [21] 15 Main Types of Robotics. *Vapulus* [online]. 2018 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://www.vapulus.com/en/15-main-types-of-robotics/>
- [22] Robotics Technology. *Builtin* [online]. [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://builtin.com/robotics>
- [23] CHAKRABORTY, Esha. Co je kloubový robot?. *Lambda Geeks* [online]. [cit. 2022-01-17]. Dostupné z: <https://cs.lambdageeks.com/articulated-robots/>

- [24] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. 2007 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [25] LIPINA, Jan a Jiří MAREK. *OVLÁDÁNÍ A PROGRAMOVÁNÍ ROBOTŮ ABB* [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2022-01-19]. Dostupné z: <https://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2753-7.pdf>. Laboratorní cvičení. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [26] JAROŠ, David. *Koncové efektor robotů pro uchopování objektů z různých materiálů* [online]. Liberec, 2018 [cit. 2022-01-18]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/152174/Bakalarska_prace_2018_David_Jaros.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [27] Safety Testing in Healthcare Robotics. *UL* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.ul.com/news/safety-testing-healthcare-robotics>
- [28] *Pal Robotics* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://pal-robotics.com/research/>
- [29] Security robots are mobile surveillance devices, not human replacements. *The Verge* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2019/11/14/20964584/knightscope-security-robot-guards-surveillance-devices-facial-recognition-numberplate-mobile-phone>
- [30] WIRELESS TEACH PENDANTS FOR ROBOTS. *Robotics Book* [online]. 2019 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://roboticsbook.com/wireless-teach-pendants-for-robots/>
- [31] *IStock Photo* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.istockphoto.com/cs/fotografie/krvav%C3%BD-nano-robot-s-kamerou-dr%C3%A1py-a-jehlou-nad-krevn%C3%ADmi-bu%C5%88kami-3d-vykreslov%C3%A1n%C3%AD-gm655733506-119299479>
- [32] *The Verge* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2021/12/5/22819328/humanoid-robot-eerily-lifelike-facial-expressions>
- [33] *Shutterstock* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.shutterstock.com/cs/search/flying+robot>
- [34] *Spectrum* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/swimming-robot-eel-epfl>
- [35] *Joom* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.joom.com/cs/products/5ce2163d28fc710101dd74da>
- [36] Fantoni, G., Santochi, M., Dini, G., Tracht, K., Scholz-Reiter, B., Fleischer, J., Lien, T.K., Seliger, G., Reinhart, G., Franke, J., Hansen, H.N., Verl, A., *Grasping devices and methods in automated production processes* [online]. 2014, 679-701 [cit. 2022-01-20]. ISSN 0007-8506. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0007850614001887?via%3Dihub>
- [37] Koncový efektor jako důležitá periférie robotů. *WP* [online]. 2021 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.wpeng.cz/1/koncovy-efektor-jako-dulezita-periferie-robotu/>
- [38] Kolaborativní chapadlo (HRC) v okolí obráběcího stroje. *Oneindustry* [online]. 2017 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.oneindustry.cz/strojirenstvi/kolaborativni-chapadlo-hrc-v-okoli-obrabeciho-stroje/>
- [39] Industrial Robots. *MHI* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.mhi.org/fundamentals/robots>
- [40] *FANUC* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-sortimentu-robot%C5%af>

- [41] What is an Articulated Robot?. *Robots Done Right* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/Articles/what-is-an-articulated-robot.html>
- [42] Průmyslové roboty: Jaké jsou jejich druhy?. *Factory automation* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/prumyslove-roboty-jake-jsou-jejich-druhy/>
- [43] Our SCARA industrial robots. *STAUBLI* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/en/robotics/product-range/industrial-robots/4-axis-scara-robots/>
- [44] ROEHL, Cory. KNOW YOUR MACHINE: INDUSTRIAL ROBOTS VS. COBOTS. *UNIVERSAL ROBOTS* [online]. 2017 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/blog/know-your-machine-industrial-robots-vs-cobots/>
- [45] Force Sensors for automated assembly, contouring and measuring. *FANUC* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/si/en/robots/accessories/robot-vision/force-sensor>
- [46] Collaborative robot selection table. *ABB* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/147f234ec5fd4573b7555a1c1bf64159/180221%20Cobot%20family_Brochure_digital.pdf?x-sign=Ox9KSAoRlpDqSmrfMf5ARRTTyWLzWS0RIY5BXD68yXMY6uXoQ72ksko1adRXMzDD
- [47] *KUKA* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/pr%C5%AFmyslov%C3%A9-roboty/lbr%C2%A0iwa>
- [48] HC Series Cobots. *YASKAWA* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.yaskawa.eu.com/products/robots/cobot>
- [49] Yumi. *ABB* [online]. [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/kolaborativni-roboty/yumi>
- [50] XIAO, Maya. The Collaborative Robot Market 2021–28: Grounds for Optimism After A Turbulent Two Years. *Interact Analysis* [online]. 2021 [cit. 2022-01-20]. Dostupné z: <https://www.interactanalysis.com/the-collaborative-robot-market-2021-28-grounds-for-optimism-after-a-turbulent-two-years/>
- [51] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [52] Fanuc. *Spolupracující robot CR-7iA a CR-7iA/L* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/spolupracuj%C3%ADc%C3%AD-roboty/collaborative-cr7ial>
- [53] Fanuc. *Řídící jednotka R-30iB Plus* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/robot-controller-and-connectivity>
- [54] Fanuc. *Nový dotykový ovladač FANUC iPendant-Touch* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/p%C5%99%C3%ADslu%C5%A1enstv%C3%AD/robot-controller-and-connectivity/ipendant-touch>
- [55] Schunk. *Chapadlo Co-act EGP-C* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/co-act/chapadlo-co-act-egp-c/
- [56] *Fanuc iR-Vision* [online]. [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: <https://irp-cdn.multiscreensite.com/af8b6634/files/uploaded/FANUC%20iR-Vision.pdf>

- [57] ZIMA, Jaroslav. *Programování průmyslových robotů FANUC* [online]. Liberec, 2020 [cit. 2022-04-12]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/157707/Jaroslav_Zima_BP_2020.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci.
- [58] KROUŽECKÁ, Eva. Podklady pro školení. In: *ARC-Robotics* [online]. Plzeň: ARC Robotics, s. 1-57 [cit. 2022-05-15]. Dostupné z: <https://www.arc-robotics.cz/>

Přílohy

Všechny níže uvedené přílohy jsou dostupné v elektronické podobě.

Příloha č. 1: Video soubor – Sestavění dům

Příloha č. 2: Video soubor – Sestavění dům

Příloha č. 3: Video soubor – Sestavění garáž