



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

ROBOTICKÝ VÝBĚR 2D OBJEKTŮ Z KONTEJNERU

ROBOTIC SELECTION OF 2D OBJECTS FROM A CONTAINER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Velen Bohumil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Bc. Bohumil Velen
Studijní program:	Aplikovaná informatika a řízení
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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

Robotický výběr 2D objektů z kontejneru

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jde o řešení velmi praktické úlohy výběru objektů, tj. součástek z kontejneru. Netriviálnost úlohy plyne ze složitosti dílů, i jejich předem nedefinované prostorové orientaci. Matematické postupy vyhledání shody modelu dílu s nasnímanými daty jsou stále předmětem výzkumu. Neméně důležitý a časově kritický problém představuje výpočet bezkolizní cesty robotického ramene s uchopovacím zařízením do vybraného místa odběru. Úloha bude řešena s reálným kooperativním robotem s využitím strojového vidění.

Cíle diplomové práce:

Rešerše systémů s obdobným účelem.
Konstrukce snímacího pole a konstrukce čelistí efektoru.
Snímání a zpracování obrazu pro účel identifikace a manipulace 2D objektů.
Automatický návrh bezkolizní cesty pro definovaného robota.
Praktické experimenty a jejich vyhodnocení.
Poster s prezentací.

Seznam doporučené literatury:

PAJDLA, Tomáš. Global optimization in camera and robot calibration: Globální optimalizace v kalibraci kamer a robotů. V Praze: České vysoké učení technické, [2017]. ISBN 978-80-01-06114-5.

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

V předložené diplomové práci je řešena specifická problematika automatizace výroby. Konkrétně se v tomto případě jedná o výběr 2D dílu z kontejneru pomocí robotu. Práce stručně prezentuje jak široké možnosti, které jsou na trhu v tomto ohledu nabízeny, tak konkrétní sestavení a naprogramování robota, který dokáže identifikovat díl, uchopit ho a manipulovat s ním tak, aby se dostal do požadované pozice. V práci jsou prezentovány a dokumentovány výsledky identifikace a manipulace s několika 2D díly. Tyto experimenty prokázaly účinnost řešení a praktickou výkonnost užitého systému strojového vidění a kolaborativního robota ABB YuMi. Tímto způsobem byla rovněž ukázána cesta k řešení obdobných úloh manipulace v dalších možných průmyslových aplikacích.

ABSTRACT

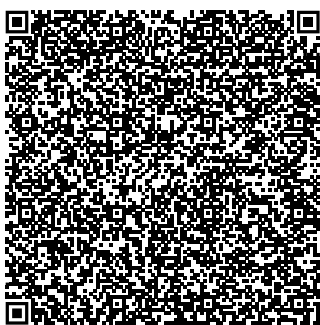
In this thesis, a specific problem of production automation is addressed. Specifically, in this case, it concerns the selection of 2D products from a container by a robot. The thesis briefly presents both the wide range of options that are offered on the market in this regard, and the specific build and programming of a robot that can identify the part, grasp it and manipulate it to get it into the desired position. In this paper, the results of the identification and manipulation of several 2D parts are presented and documented. These experiments have demonstrated the effectiveness of the solution and the practical performance of the machine vision system and the ABB YuMi collaborative robot that was used. This also showed the way to solve similar manipulation tasks in other possible industrial applications.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robot, strojové vidění, identifikace objektu, efektor, čelisti efektoru, programování

KEYWORDS

Robot, machine vision, object identification, effector, effector jaws, programming



2023

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VELEN, Bohumil. Robotický výběr 2D objektů z kontejneru. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149798>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Radomil Matoušek.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych chtěl vyjádřit velké díky mé rodině a přátelům, kteří mi byli podporou po celou dobu mého studia.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

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

V Brně dne 20. 5. 2023

.....

Bohumil Velen

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PRŮMYSLOVÁ APLIKACE	15
2.1	2D strojové vidění.....	15
2.1.1	Kamerový senzor	17
2.1.2	Inteligentní kamera	17
2.1.3	PC systém.....	19
2.1.4	Zákaznický systém.....	19
2.2	3D strojové vidění.....	20
2.2.1	Laserová triangulace	20
2.2.2	Stereovidění.....	20
2.2.3	Strukturované světlo	21
2.2.4	Interferometrie bílým světlem	22
2.3	Průmyslové roboty.....	22
2.3.1	Typy průmyslových robotů.....	23
2.3.2	Kolaborativní roboty.....	26
2.4	Efektory.....	27
2.4.1	Rozdělení úchopných prvků.....	27
2.4.2	Elektrický koncový efektor	27
2.4.3	Pneumatický koncový efektor.....	28
2.4.4	Magnetický koncový efektor.....	29
2.4.5	Podtlakový koncový efektor.....	29
2.4.6	Speciální koncové efektory	30
3	PŘÍPRAVKY PRO PRAKTICKOU ČÁST	31
3.1	Snímací pole.....	31
3.2	Kontejner.....	33
4	ZPRACOVÁNÍ OBRAZU	35
4.1	Instalace Smart kamery	35
4.2	Konfigurace Smart kamery	35
4.2.1	Připojení kamery.....	36
4.2.2	Nastavení obrazu	37
4.2.3	Nalezení dílů.....	39
4.2.4	Kontrola dílů.....	40
4.2.5	Informace o poloze	44
5	EXPERIMENTY	45
5.1	První experiment (rozměrová verifikace)	46
5.1.1	Měření dílu A (polotovar příruby).....	46
5.1.2	Měření dílu B1 (imbusový klíč 5)	49
5.2	Druhý experiment	52

5.2.1	Inicializace systému	54
5.2.2	Detekce a manipulace s dílem	56
5.3	Třetí experiment	58
5.3.1	Detekce a manipulace s dílem	59
5.4	Čtvrtý experiment	61
6	ZÁVĚR.....	63
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	71
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK.....	73
	SEZNAM TABULEK.....	75
	SEZNAM PŘÍLOH	77

1 ÚVOD

V současnosti je možné pozorovat zvýšenou poptávku po automatizaci a robotizaci v průmyslu s důrazem na komplexnost i adaptibilitu řešení. Řešení diplomové práce se zabývá jednou ze základních, ovšem ne zcela triviálních, úloh pro moderní robotické aplikace, a to výběrem 2D objektů z kontejneru s následnou manipulací. Pojmeme 2D objekt je míněn díl, či součást, kde v pomyslné souřadnicové soustavě x-y-z můžeme uvažovat vnější rozměr dílu x nebo x a y, tj. délku a šířku, která dominuje nad rozměrem z, tedy výškou. Takovýto typ dílu je relativně frekventovaný, jak ukazují dva užité příklady dílu použité v experimentech této práce – malá příruba s otvorem a imbusové klíče. Přes jasně definovaný cíl manipulace, obsahuje úloha automatizovaného výběr 2D objektů z kontejneru dostatek problematických částí, které se tak staly podnětem i řešením představeným v této diplomové práci. Zde je třeba si uvědomit, že řešení uvedené úlohy zahrnuje komplexní a částečně mezioborový znalostní přístup. Využití metod strojového vidění, programování a integrace technologií robotu, kamer, znalost matematiky, kinematiky apod.

Práce stručně prezentuje jak technologické možnosti, které jsou na trhu v tomto ohledu nabízeny, tak konkrétní sestavení a naprogramování robota, který dokáže identifikovat díl, uchopit ho a manipulovat s ním tak, aby se dostal do požadované pozice. V práci jsou prezentovány a dokumentovány výsledky identifikace a manipulace s několika 2D díly. Tyto experimenty prokázaly účinnost řešení a praktickou výkonnost užitého a naprogramovaného systému strojového vidění a pro práci určeného kolaborativního robota ABB YuMi.

Úvod práce v kapitole dva je zaměřen na problematiku jednotlivých technických částí, které se vyskytují při výběru dílu z kontejneru. Rešeršním způsobem byly popsány jednotlivé technologie, které se mohou v jednotlivých částech systému vyskytovat. Po rešerši jednotlivých částí problematiky je ve třetí kapitole představena užitá konstrukce experimentálního snímacího pole a kontejneru. Čtvrtá kapitola se zabývá prací s užitým snímacím zařízením – smart kamera In-Sight 2001-230 mini od výrobce Cognex. V této kapitole je rovněž řešeno zpracováním obrazu a popsány možnosti pro identifikaci a inspekci dílu. Dále je zmíněna kalibrace samotné kamery. Závěrečné kapitoly představuje výsledek práce a věnují se tedy samotným praktickým experimentům. Tyto experimenty byly provedeny celkem čtyři. První experiment je zaměřen na měření rozměru dílu pomocí smart kamery. Další experimenty realizují samotný adaptivní výběr dílů, kde je navíc navrhnutá automatická bezkolizní cesta pro užitého kolaborativního robota Yumi IRB 14000.

Tímto způsobem byla ukázána cesta k řešení obdobných úloh manipulace v dalších možných průmyslových i neprůmyslových aplikacích, což je jistě obecný účel této práce.

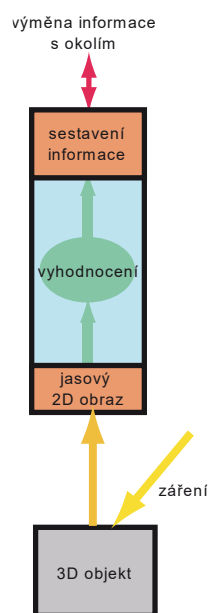
2 PRŮMYSLOVÁ APLIKACE

Jednou z typických průmyslových aplikací je výběr objektů z kontejneru. Jde o relativně složitý problém, který je ovšem v průmyslu frekventovaný, a tedy často a na různých úrovních řešený. Uvedená problematika, resp. její řešení zahrnuje několik složitých částí – úloh, které jsou často komplementární. Jde například o úlohu vyhledání daného dílu náhodně orientovaného v kontejneru. Pro identifikaci dílu lze vybrat velmi variabilní technologii (např. různé možnosti snímání objektu). Další problematikou je výběr vhodného robota či manipulátoru dle možné preference (rychlost, kolaborativnost, prostředí aj.). V práci jsou stručně představeny různé možnosti robotů nebo manipulátorů. V poslední části kapitoly je uveden stručný přehled možných efektorů používaných v průmyslu. Parametrem může být tvar, velikost, hmotnost, hustota či elasticita dílu, který se má z kontejneru vybírat.

2.1 2D strojové vidění

Strojové vidění je technologie, která umožňuje počítačovým systémům získávat a zpracovávat obrazová data z různých zdrojů, jako jsou například kamery a skenery, a následně analyzovat tato data za účelem rozpoznání různých prvků ve scéně. Hlavní využití strojového vidění je v úlohách průmyslové automatizace, kde se provádí vyhledání dílu, kontrola rozměrů, počítání objektů, kontrola kvality apod.[1]

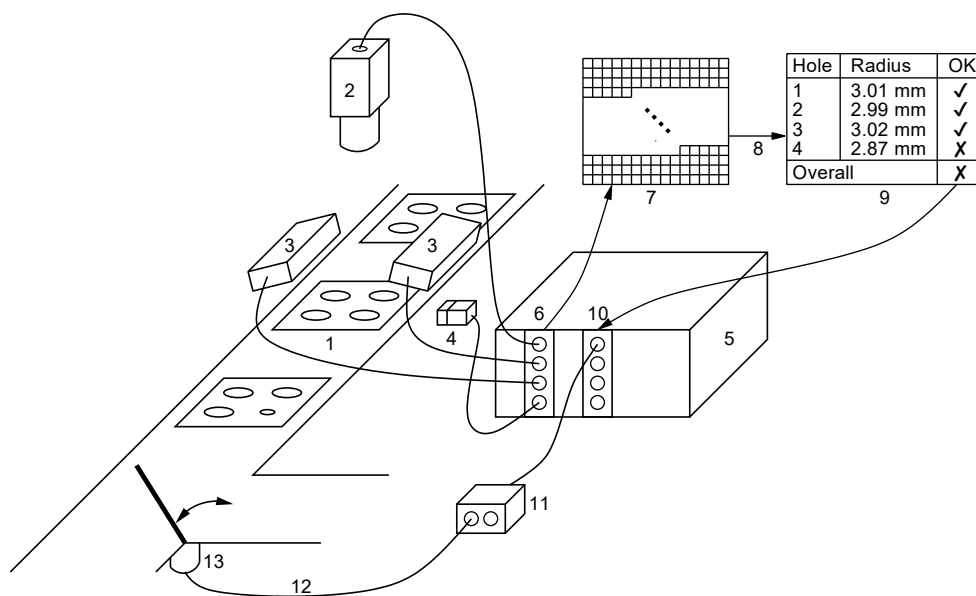
Princip strojového vidění je podobný jako v případě lidského oka. Na rozdíl od člověka je tu místo oka používána kamera. Stejně jako mozek provádí vyhodnocení obrazu i tady pracuje systém pomocí algoritmů. Na tento systém můžeme nahlížet jako na obecný senzor, který můžeme vidět na obrázku 1. [2]



Obr. 1: Schéma obecného senzoru [2]

Obraz je dvojrozměrná prezentace trojrozměrného objektu, který je schopný při ozáření zdrojem světla odrazit záření. Díky tomu lze docílit toho, že budeme znát potřebné informace o objektu. [2]

Systém strojového vidění se skládá z jedné nebo více kamer, jednoho nebo více osvětlovačů, technických prostředků pro zpracování dat (mohou být integrovány přímo v kameře) a programových prostředků pro zpracování dat. [3]



Obr. 2: Systém strojového vidění [4]

Komponenty typického strojového vidění můžeme vidět na obrázku 2. Obraz objektu (1) je pořízen kamerou (2). Objekt je osvětlen osvětlovačem (3). Pořízení obrazu spouští fotoelektrický spínač (4). Počítač (5) pořízuje obraz prostřednictvím rozhraní kamera – počítač (6). Fotoelektrický spínač je připojen ke snímacímu zařízení. Snímací zařízení spouští osvětlení. Ovladač zařízení sestaví 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). [4]

Základní systémy strojového vidění můžeme rozdělit do čtyř kategorií. Pro jednotlivé kategorie lze použít různou výpočetní techniku a určité části kombinovat. Každou kategorií lze také použít na jiný typ úloh. Rozdělení do skupin můžeme vidět v tabulce 1. [2]

Tab. 1: Kategorie 2D strojového vidění s charakteristikami [2]

Kamerový senzor	Kompaktnost, zjednodušený hardware, omezené softwarové nástroje, omezené I/O, omezené komunikační možnosti, omezená třída použití, nižší cena
Inteligentní (smart) 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

2.1.1 Kamerový senzor

Jedná se o systém, kdy je kamera a osvětlení integrováno do jednoho pouzdra. Tento typ má omezen počet digitálních vstupů a výstupů. Výstupy jsou tranzistorové PNP nebo NPN, ochrana proti prepólování a poškození proti napěťové špičce. Digitální I/O slouží např. k poslání informace o vyhodnocení, či synchronizaci s osvětlovačem. Komunikačním rozhraní bývá většinou ethernet. Ten většinou slouží pouze ke konfiguraci. Kamerový senzor může taky obsahovat průmyslovou sběrnici. Výhodou tohoto systému je nižší pořizovací cena. Kamerový senzor s oddělenou snímací hlavou můžeme vidět na obrázku 3.[2]



Obr. 3: Příklad kamerového senzoru (Keyence) [5]

2.1.2 Inteligentní kamera

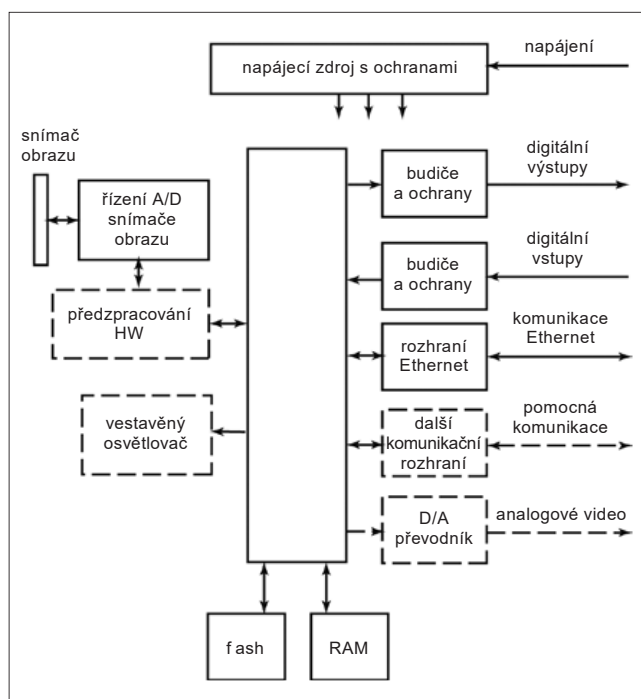
Inteligentní kamery nebo také označované jako Smart kamery jsou komplexní zařízení, která se skládají z těchto částí: prvky snímání a digitalizace, výpočetní část, vstupy

a výstupy a komunikační rozhraní. Ukázkou inteligentní kamery můžeme vidět na obrázku 4.



Obr. 4: Příklad inteligentní kamery s integrovaným osvětlením (B+R automation, ABB) [6]

Blokové schéma této kamery můžeme vidět na obrázku 5. [7]



Obr. 5: Blokové schéma inteligentní kamery [7]

Dnešní kamery používají snímače typu CMOS oproti předchůdcům, kteří používali CCD. Na tento typ snímačů jsme schopni integrovat A/D převodní a řídicí obvody, což dříve nebylo možné. Obsluha čipu je jednodušší, podobá se vybírání dat z paměti. [7]

O výpočetní část se stará mikropočítač. Ten se využívá pro rychlé zpracování dat. Rychlost procesorů bývá nad 1 GHz. Kompletní digitální snímek je uložen v paměti RAM u většiny moderních inteligentních kamer. Ovšem kapacita této paměti je omezena a závisí především na požadované velikosti programu, který se po inicializaci přenáší

z programové paměti flash do RAM a zde je spuštěn. Flash paměť je většinou vestavěná, ovšem začínají se také používat externí paměťové karty. [7]

Stejně jako kamerový senzor i inteligentní kamera má vstupy a výstupy. Digitální vstupy a výstupy jsou provedeny jako u kamerového senzoru, kdy máme otevřený kolektor typu PNP nebo NPN. Pracovní napětí je do 30 V, dále je zde ochrana proti prepólování nebo ochrana proti přepětí. Digitální vstupy se většinou používají pro synchronizaci sejmутí snímku. Řízení této synchronizace je buď pomocí čidel nebo signálem z vyššího řídicího systému. [7]

Komunikační rozhraní je poslední částí inteligentní kamery. Má za úkol propojit inteligentní kamery se zařízením HMI, které umožňuje konfiguraci kamery. Přenosová rychlost musí být velká, proto se běžně používá jako komunikační rozhraní ethernet. [7]

2.1.3 PC systém

Charakteristickým rysem pro tuto skupinu je osobní počítač se standardním operačním systémem s modularitou tohoto systému. Dále se tento systém vyznačuje větším počtem zapojených kamer. Kamery jsou většinou propojeny se systémem pomocí vysokorychlostního ethernetu. Součástí PC systému bývá software, který obsahuje vývojové prostředí, pro konfiguraci a sledování jednotlivých kamer. Komunikace s PLC probíhá po průmyslových sběrnících jako je Profinet nebo EtherCat. Využití těchto systémů bývá pro složité úlohy, kdy je potřeba zpracovat velké množství dat z mnoha kamer. Ukázkou PC systému můžeme vidět na obrázku 6. [2]

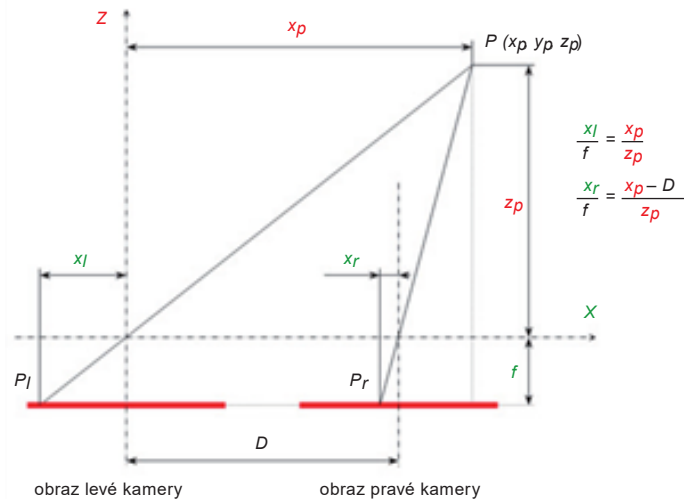


Obr. 6: Příklad PC systému [8]

2.1.4 Zákaznický systém

Zákaznické systémy se dělají na zakázku podle potřeb uživatele. Tyto systémy většinou vyžadují velkou rychlost zpracování dat a používají se tam, kde se pracuje se speciálními algoritmy a kamerami. Cena těchto systémů bývá o dost vyšší než běžně implementovatelné inteligentní kamery. [2]

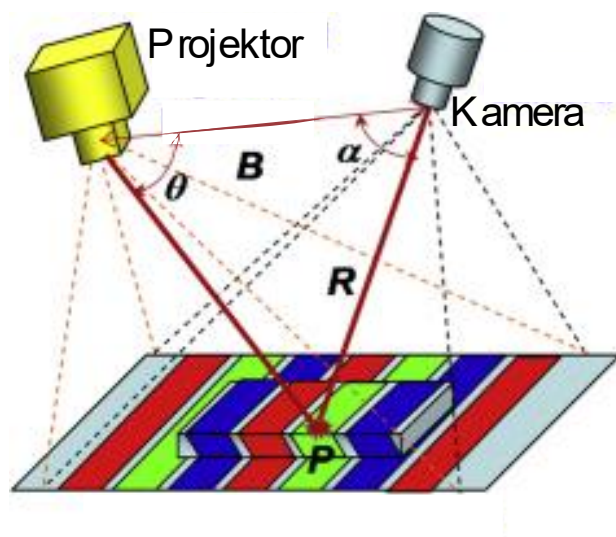
jejich vnitřní a vnější parametry známé a aby se obrazy z kamer mohly spárovat. Pro identifikaci stejného jednoho bodu objektu na snímcích se využívá umělá inteligence. Stereoidění se používá v mnoha aplikacích, jako jsou například robotika, počítačové vidění, virtuální a rozšířená realita, vědecké aplikace a mnoho dalších. Velkou výhodou tohoto systému je menší citlivost na problematické povrchy. Nevýhodou je menší přesnost výsledků. Princip stereoidění můžeme vidět na obrázku 8. [10]



Obr. 8: Zjednodušený princip stereoidění [10]

2.2.3 Strukturované světlo

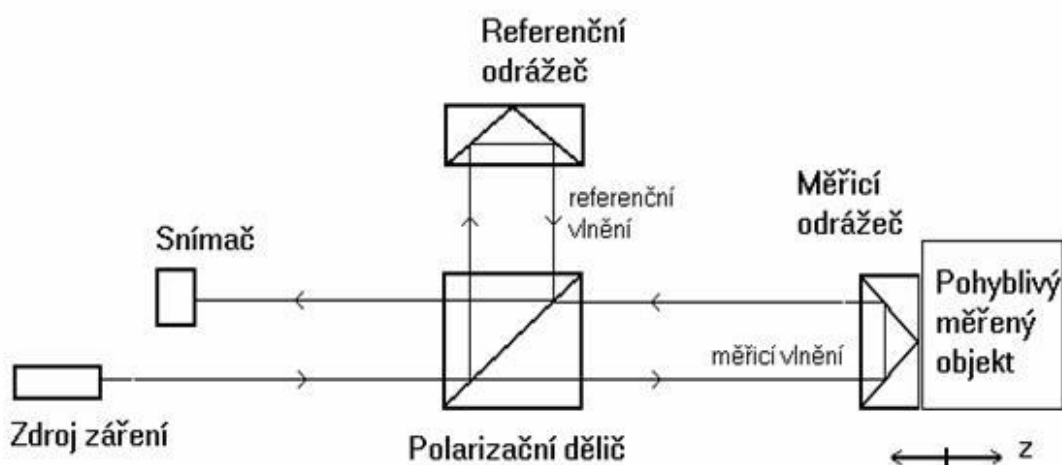
Zobrazovací senzor (například videokamera) se používá k získání 2D obrazu scény při osvětlení strukturovaným světlem. Pokud je scéna rovinným povrchem bez jakékoli 3D povrchové variace, vzor zobrazený na pořízeném snímku je podobný vzoru promítaného strukturovaného světelného vzoru. Pokud je však povrch ve scéně nerovinný, geometrický, tvar povrchu deformuje promítaný vzor strukturovaného světla, jak je vidět z kamery. Principem technik 3D zobrazování povrchu ve strukturovaném světle je extrahovat tvar 3D povrchu na základě informací z deformace promítaného vzoru strukturovaného světla. Přesné 3D povrchové profily objektů ve scéně lze vypočítat pomocí různých principů a algoritmů strukturovaného světla. Ukázkou práce se strukturovaným světlem můžeme vidět na obrázku 9. [11]



Obr. 9: Princip použití strukturovaného světla [11]

2.2.4 Interferometrie bílým světlem

Objekt je osvětlen pomocí bílého interferenčního světla. Rozdělovače paprsků rozdělí světlo na dva paprsky. Jeden paprsek je referenční a druhý směřuje na předmět. Oba paprsky se zpátky odrážejí a znovu kolimují v monochromatické kameře. Vertikální skenování poskytne 2D interferogram, který je základem pro výpočet 3D obrazu. Princip interferometrie můžeme vidět na obrázku 10. [12]



Obr. 10: Princip použití interferometrie bílým světlem [13]

2.3 Průmyslové roboty

Průmyslový robot je automatizované zařízení, schopné samo manipulovat s předměty ve svém okolí podle nějakého programu. Disponuje a využívá informací zpětné vazby o poloze. Průmyslové roboty jsou tedy všeobecně určeny k tomu, aby prováděly operace,

které se opakují. Pro jiné operace mohou být přizpůsobeny bez mechanických úprav zařízení. Úprava robota na novou operaci probíhá softwarově. Průmyslové roboty se používají ve všech výrobních technologiích, jak můžeme vidět v tabulce 2.

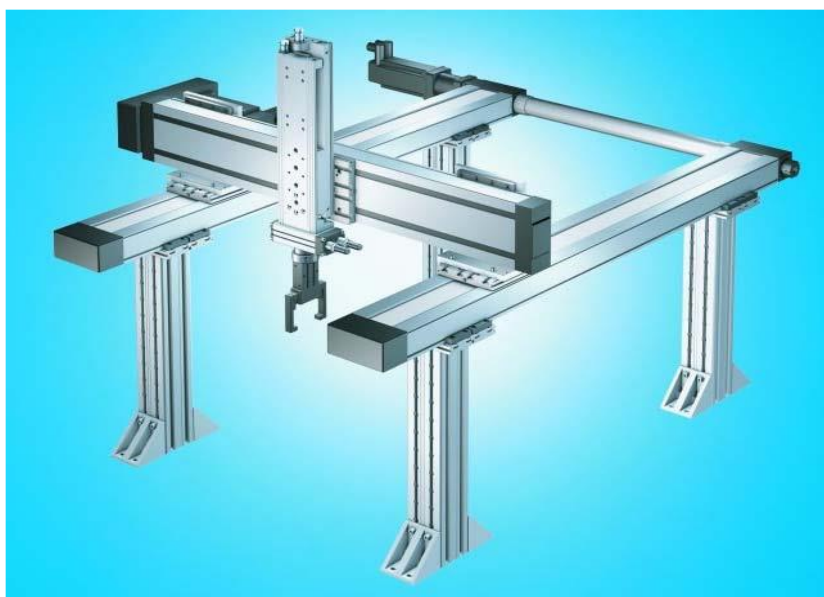
Tab. 2: Výrobní technologie, ve kterých se používají průmyslové roboty

Svařování	Nosiče technologických hlavic – svařovací kleště, hubice
Obrábění	Nosiče technologických nástrojů – vodní paprsek, laserový paprsek, brusný kotouč
Povrchové úpravy	Nanášení barev, smaltování, manipulace při nitridaci
Tváření	Kooperace s tvářecími automaty, manipulace s výkovky a výlisky
Montáž	Přesná rychlá montáž

2.3.1 Typy průmyslových robotů

Kartézský robot

Kartézští roboty se také nazývají portálovými roboty, a to kvůli pravoúhlé konfiguraci. Práce tohoto robota je v kartézském souřadnicovém systému (tj. může pracovat dvourozměrným nebo trojrozměrným pohybem). Pracovním prostor je krychle nebo kvádr. Nejčastější uspořádání pro tento typ je, když jeden lineární pohyb je realizován pojezdem po portálu. Systém je stabilní a z hlediska rozboru se jedná o nejpřesnější systém. Tuhá konstrukce umožňuje nést těžká břemena. Tento robot najde využití v pick and place aplikacích, manipulaci s materiálem a ve 3D tisku. Kartézského robota můžeme vidět na obrázku 11. [14]



Obr. 11: Příklad kartézského robota [15]

Cylindrický robot

Cylindrický robot využívá jak rotační pohyb, tak lineární. Skládá z jednoho rotačního kloubu a jednoho nebo dvou prizmatických kloubů. Roboty této skupiny jsou vesměs opatřeny nosným sloupem, otočným kolem osy z. Na sloupu je umístěno horizontální rameno, které se pohybuje nahoru a dolů a při horizontálním pohybu se buď teleskopicky zkracuje či prodlužuje. Pracovním prostorem je část nebo celý válcový prstenec. Hodí se především do stísněných prostorů, kdy je potřeba zachovat velkou rychlost. Použití je převážně v aplikacích pick and place, kdy je nutné rotační pohyby. Ukázkou tohoto robota můžeme vidět na obrázku 12. [16]



Obr. 12: Příklad cylindrického robota [17]

Sférický robot

Sférický robot neboli polární robot. Byl jeden z prvních typů robotů. Obsahuje dva rotační klouby a jeden prizmatický kloub. Polohování robota je ve sférických souřadnicích. Pracovním prostorem je kulový segment. U těchto robotů se hlavní rameno kromě otáčení kolem svislé osy z může naklápět kolem horizontální osy, čímž je zabezpečen vertikální pohyb koncového bodu ramene. Horizontální pohyb je zabezpečen vysouváním ramene. Tento typ robota je dnes již nahrazen angulárním typem. Fotku sférického robota můžeme vidět na obrázku 13. [16]



Obr. 13: Příklad sférického robota (Kawasaki) [18]

Delta robot

Delta roboty mohou být také nazývány paralelními roboty. Tvořeny jsou z paralelních kloubových spojů připojených ke společné základně. Předností těchto robotů je jejich rychlost manipulace, proto se používají v pick and place aplikacích. Hlavní využití našly v potravinářství, farmacii a v elektro průmyslu. Ukázkou tohoto typu robota můžeme vidět na obrázku 14. [16]



Obr. 14: Příklad delta robota (ABB) [19]

SCARA robot

Robot SCARA nebo také kloubové robotické rameno. Má dva rotační klouby, které zajišťují pohyb v rovině XY. Pohyb koncového efektoru je vertikální. Jsou předurčeny pro pracovní operace prováděné svisle shora a uplatňují se výhradně u plošných montáží. Pracovním prostorem je plochý válcový prstenec. Velkou výhodou těchto robotů je jejich rychlost, se kterou pracují. SCARA robota můžeme vidět na obrázku 15. [16]



Obr. 15: Příklad SCARA robota (Fanuc) [20]

Angulární robot (6-osý robot)

Dalším typem robota je 6-osý angulární robot. Dalšími označení daného robota může být mnohoúhlový nebo kloubový. Jedná se o nejčastěji nasazovaného robota v průmyslových aplikacích. Má tři a více rotačních os. Počet kloubů určuje rozsah pohybu. V pracovním prostoru mohou dosáhnout jakéhokoliv bodu. Pracovním prostor je složen z kulových segmentů. Tito roboty se připodobňují lidským pažím. Nejčastější jsou roboti se šesti stupni volnosti, ale některé mohou mít jen čtyři. Průmyslových aplikacích se používají především k manipulaci s materiálem, který může vážit od pár gramů až k několika stům kilům. Ukázku robota můžeme vidět na obrázku 16. [16]



Obr. 16: Příklad 6-osého robota TX-90 (Fanuc) [21]

2.3.2 Kolaborativní roboty

Kolaborativní roboty nebo také coboty jsou speciální druhy průmyslových robotů, které jsou navrženy tak, aby mohli spolupracovat s lidmi v bezprostřední blízkosti. Coboti jsou vybaveni rozsáhlou sadou bezpečnostních senzorů a mají omezenou rychlost a sílu, aby minimalizovali jakékoliv riziko zranění při interakci s lidmi. Je důležité posuzovat bezpečnostní opatření cobota vždy s ohledem na konkrétní aplikaci, ve které je používán, a zvolit tak nejvhodnější úroveň bezpečnosti. Příklad takového kolaborativního robota můžeme vidět na obrázku 17. [22]



Obr. 17: Příklad kolaborativního robota [23]

2.4 Efektory

Poslední důležitou částí jsou efektory. U průmyslových robotů a manipulátorů se používají především pro tyto činnosti:

- Vkládání objektů do pracovního prostoru
- Mezioperační manipulace
- Technologické operace
- Kontrolní operace
- Speciální práce

Existuje spousta druhů těchto zařízení. Čelisti jsou speciálním názvem pro manipulační efektory. [24]

2.4.1 Rozdělení úchopných prvků

Úchopné prvky rozlišujeme podle styku s objekty:

- Elektrické
- Pneumatické
- Magnetické
- Podtlakové
- Speciální

Tyto typy se dále dělí na aktivní a pasivní. Pasivní úchopné prvky neumožňují ovládnutí síly oproti aktivním. Protože aktivní prvky se využívají téměř ve všech případech, budeme se zabývat pouze jimi. [25]

2.4.2 Elektrický koncový efektor

Servoelektrický efektor se čím dál častěji využívá v průmyslových aplikacích, a to z důvodu lehké ovladatelnosti. Poloha prstů je ovládána přes elektrický motor. Ten dostává signály z řídicího systému. Uplatnění těchto efektorů je univerzální, jelikož jsme schopni ovládat zdvih čelistí podle potřeby.

Výhody elektrických efektorů:

- Zpětná vazba o zdvihu čelistí (není potřeba jezdit po cele dráze zdvihu)
- Detekce uchycení objektu
- Nastavení síly a rychlosti stisku

Využití toto efektoru najde v průmyslových aplikacích, kde se často mění sortiment, který má jiné velikosti. Ukázkou tohoto efektoru můžeme vidět na obrázku 18. [26]



Obr. 18: Příklad elektrického efektoru s čelistmi (Schunk) [27]

2.4.3 Pneumatický koncový efektor

Hlavní pohonnou jednotkou u pneumatických efektorů je vzduch. Stlačený vzduch tlačí na píst a ten otevírá nebo zavírá čelisti. Pohyb těchto efektorů může být buď rovnoběžný nebo úhlový. Kompaktní rozměry a nízká hmotnost dělají tento efektor velmi oblíbený.

Výhody elektrických efektorů:

- Malá hmotnost a rozměry
- Nízká pořizovací cena
- Univerzální pro jednoduché aplikace

Využití toto efektoru najde v různých manipulátorech a tam, kde nás nezajímá velikost součásti. Použití tohoto efektoru můžeme vidět na obrázku 19. [26]



Obr. 19: Příklad pneumatického efektoru s průmyslovým robotem [28]

2.4.4 Magnetický koncový efektor

Magnetické koncové efektorů lze použít na objekty z feromagnetických materiálů. Ukázkou tohoto efektoru můžeme vidět na obrázku 20. Fungují na principu elektromagnetu. Předností těchto efektorů je jejich jednoduchost. Zastoupení těchto efektorů v průmyslových aplikacích je zanedbatelné. Značnou nevýhodou tohoto efektoru je, že některé z magnetizované díly se poté musí demagnetizovat. Další nevýhodou je, že na sebe chytají i jiné magnetické věci. [25, 26]



Obr. 20: Příklad magnetického efektoru (Schunk) [29]

2.4.5 Podtlakový koncový efektor

Tyto efektorů využívají pro uchopení sílu, která vzniká podtlakem. Takový efektor můžeme vidět na obrázku 21. Ten se vytváří pomocí vývěvy nebo ejektoru. Podtlakové koncové efektorů s ejektory jsou vhodné pro menší úchopné hlavice. Jedná se o levná zařízení s dobrou flexibilitou. Mohou být použity na většiny materiálů. Nevýhoda těchto efektorů je v tom, že jim vadí perforované materiály. [25, 26]



Obr. 21: Příklad podtlakového efektoru, savka (Schunk) [30]

2.4.6 Speciální koncové efekty

Mezi speciální koncové efekty řadíme ty, které se běžně nepoužívají nebo jsou ještě ve fázi výzkumu. Některé z těchto efektorů jsou inspirované přírodou, příkladem může být chameleon nebo chapadlo chobotnice. Další jsou napodobeniny lidské ruky. Příklad efektoru inspirovaného chameleonem můžeme vidět na obrázku 22. [26]



Obr. 22: Příklad efektoru inspirovaného chameleonem (Festo) [31]

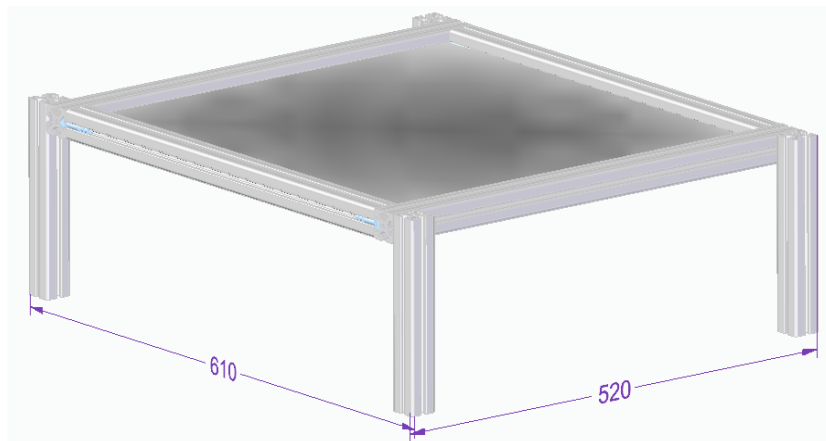
3 PŘÍPRAVKY PRO PRAKTICKOU ČÁST

Před začátkem samotné aplikace bylo potřeba navrhnout a vyrobit snímací pole a kontejner. Tyto části budou využity při experimentální části.

3.1 Snímací pole

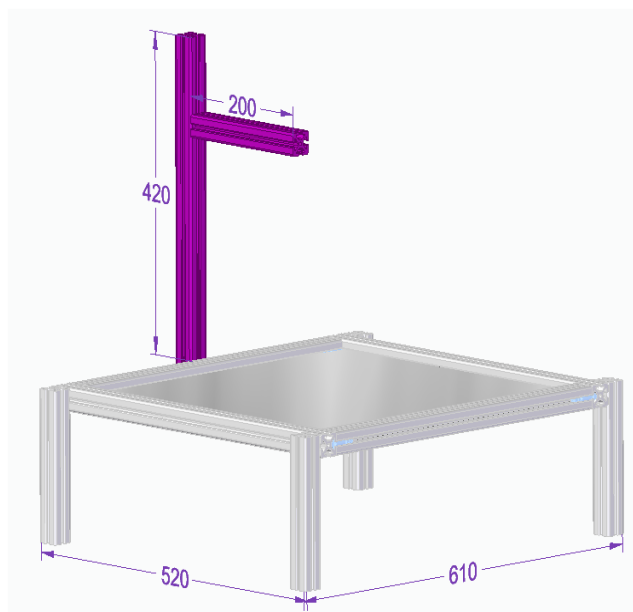
První návrh snímacího pole byla inspirace klasickým stolem, Rozměry byly 490 x 460 mm. Jako deska snímacího pole byla zvolena deska z mléčného plexiskla, a to kvůli případnému podsvícení snímací desky. Kamera nad tímto stolem měla být zavěšena na své vlastní konstrukci. Nevýhoda tohoto návrhu je v tom, že u stolu nemůže být nastavena jeho samotná výška.

Proto byl udělán druhý návrh. Tento návrh můžeme vidět na obrázku 23. Velikost snímacího pole zůstala zachována. Pouze se změnily nohy stolu, které se nyní nacházejí na stranách. Díky této úpravě jsme schopni nastavovat výšku stolu. Ta se pohybuje v rozsahu od 17 mm do 190 mm. Kamera měla být stejně jako v první variantě zavěšená na své konstrukci. Toto řešení je také nevyhovující, z toho důvodu, že pokud by došlo k nějakému pohybu stolu vůči kameře, mělo by dojít ke kalibraci kamery.



Obr. 23: Druhá varianta snímacího pole

Třetí návrh vychází z varianty druhé. Jak je vidět na obrázku 24, v této variantě je přidělán držák kamery na samotný stůl. Tímto držákem zajistíme stejnou polohu kamery vůči stolu. Držák kamery je udělán tak, aby se sním v případě potřeby dalo pohnout v jakémkoliv směru.



Obr. 24: Třetí varianta snímacího pole

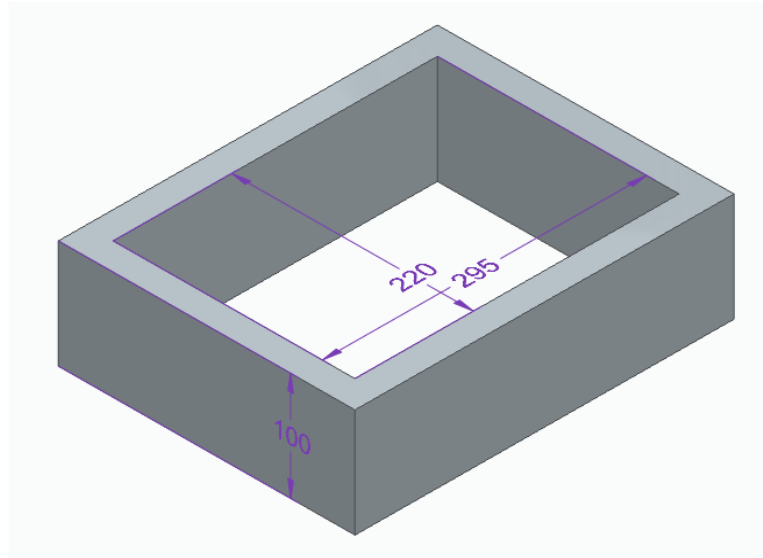
Z tohoto návrhu se stala finální verze, která byla vyrobena. Toto řešení můžeme vidět na obrázku 25. Celkové rozměry stolu s držákem kamery jsou 610 x 550 x 620 mm. Vybírací plocha má rozsah polohy od 17 mm do 190 mm. Samotná vybírací plocha má rozměry 490 x 460 mm.



Obr. 25: Realizace finální verze snímacího pole (výškově nastavitelné snímací pole i kamerový držák)

3.2 Kontejner

Poslední částí, kterou bylo potřeba navrhnout a vyrobit, byl kontejner. Kontejner má sloužit na provádění samotných experimentů. Vnitřní rozměry kontejneru byly voleny podle plochy, kterou snímáme kamerou. Rozměry této plochy jsou 295 x 220 mm. Výška kontejneru byla zvolena 100 mm. Kontejner nebude mít dno. Je to z důvodu položení na vybírací plochu, která je mléčná a v případě potřeby, je možné tuto plochu podsvítit ze spodní strany. Model kontejneru můžeme vidět na obrázku 26.



Obr. 26: Model kontejneru pro vybírání dílů

4 ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

Zpracování obrazu je součástí strojového vidění. V našem případě byla pro snímání obrazu použita *smart kamera Cognex In-Sight 2001-230 mini* od výrobce Cognex. Kameru můžeme vidět na obrázku 27. Jak jsme již dříve zmínili Smart kamery se vyznačují tím, že zpracování a vyhodnocení obrazu se provádí v samotné kameře. Samotná kamera má rozlišení 1280x960. Dále disponuje červeným osvětlením s objektivem 6,2 mm. Jedná se monochromatickou kameru. [32]



Obr. 27: In-Sight 2001 mini [32]

4.1 Instalace Smart kamery

Kamera je připojena na konci ramene pro kameru u stolu, jak můžeme vidět na obrázku 25. Umístění kamery nad snímací plochou je ve výšce 370 mm. Je to z důvodu zajištění co největšího snímacího pole. V této poloze byla kamera skoro na maximálním zaostření. Rozměry snímané plochy pro tuto vzdálenost jsou 295 x 220 mm, což odpovídá vnitřnímu rozměru kontejneru dle obrázku 26. Poznamenejme, že rozměry udávané výrobcem jsou 300 x 223 mm, což zhruba odpovídá našemu měření. Přepočítání pixelu na milimetr odpovídá $1 \text{ mm} \approx 4,07 \text{ pixelů}$.

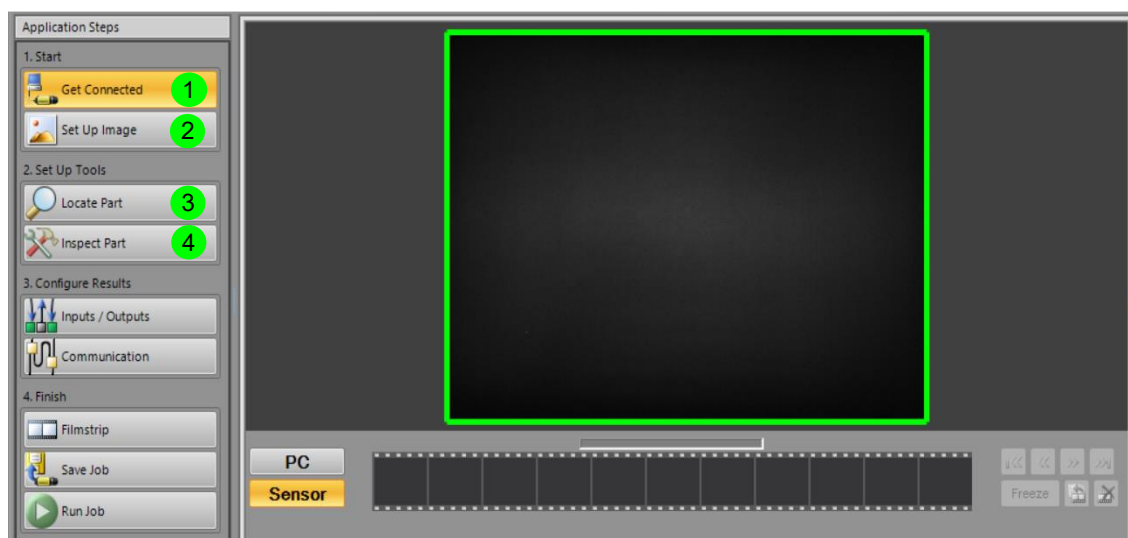
O propojení kamery s robotem Yumi se stará ethernetový kabel, který se konektorem M12 připojuje na kameru. Kamera musí mít externí napájení, o které se stará stejnosměrný zdroj s jmenovitým napětím 24 V/ 0.1 A.

4.2 Konfigurace Smart kamery

Pro nastavování kamery máme dvě možnosti. První možností je nastavení kamery pomocí *RobotStudia*. RobotStudio je software pro programování robotů od firmy ABB. Protože firma ABB úzce spolupracuje s firmou Cognex, byla v RobotStudiosu dodělána záložka Vision, která podporuje připojení kamer od Cognexu. Přidání samotné kamery nebylo

možné provést automaticky, ale muselo být provedeno manuálně konfigurací systémového souboru. Přesněji do souboru SIO, kde je specifikováno, jak se bude kamera jmenovat, jak bude komunikovat a jakou má MAC adresu. Prakticky je vhodné poznamenat, že při práci v tomto softwaru občas docházelo k zásekům a reakce softwaru byly pomalejší, vyjádřeno časem latence 2-5 s.

Proto byla zvolená alternativa a to samotná aplikace na nastavení kamer od Cognexu. Jedná se o aplikaci *In-Sight Explorer*. Tento software se spustí pouze, když je připojená nějaká kamera od firmy Cognex. Vizuální představení aplikace můžeme vidět na obrázku 28.

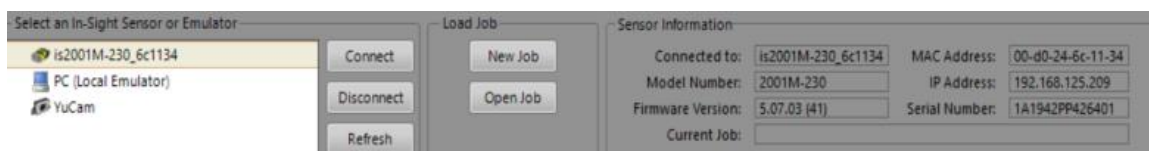


Obr. 28: Software In-Sight pro konfiguraci kamery

Připojení kamery (1) se provádí tak, že si vybereme kameru z výčtu připojených kamer. Po připojení kamery je dalším krokem nastavení obrazu (2). Zde se nastavuje spoušť, zaostření, blesk a kalibrace kamery. Následuje vyhledávání dílů (3), kde se specifikuje, jaký díl se má vyhledávat. V inspekční části (4) se provádí různá měření, logické úlohy a další věci, které se mají kontrolovat na vyhledaných dílech.

4.2.1 Připojení kamery

Prvním úkolem při konfiguraci je připojení k samotné kameře, můžeme vidět na obrázku 29.



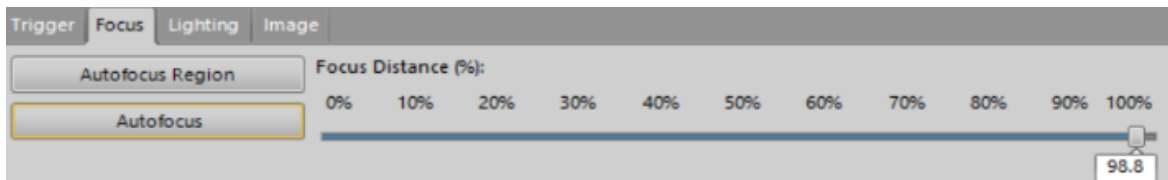
Obr. 29: Nastavení kamery

Zde si vybíráme z připojených kamer. Naše kamera se jmenuje is2001M-230_6c1134. V pravé části obrázku můžeme vidět její IP adresu a MAC adresu kamery. U připojení

kamery se také provádí založení nebo vybrání nového projektu. Tyto projekty se ukládají v kameře.

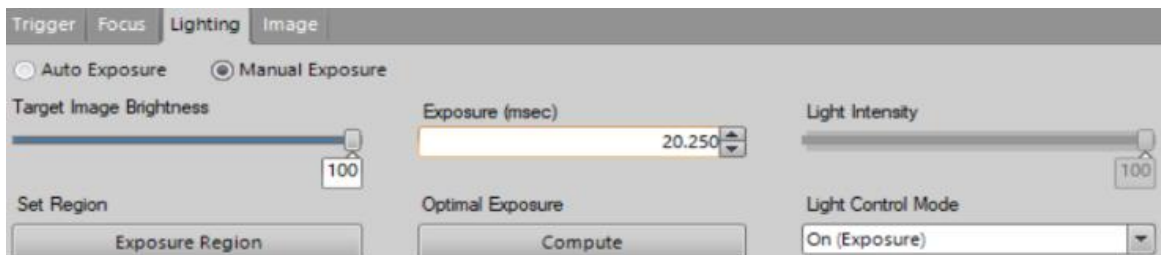
4.2.2 Nastavení obrazu

Při nastavování obrazu nastavujeme čtyři věci, spoušť, zaostření, blesk a kalibraci obrázku. U spoušti máme na výběr tři režimy, kontinuální režim, externí režim a režim fotoaparát. Naším zvoleným režimem je režim fotoaparát, díky němuž jsme schopni pořizovat fotografie, které poté kamera vyhodnotí. Pro pořízení fotky se používá spoušť, která je řízena programově. V záložce zaostření se zaostřujeme obraz, pro optimální rozeznání. Zaostření můžeme udělat ručně nebo použít automatické zaostření. V naší aplikaci jsme použili automatické zaostření pro hrubé nastavení ostrosti obrazu. Drobnější doladění jsme prováděli ručně podle potřeby. Na obrázku 30 můžeme vidět výsledné zaostření, které je 98,8%.



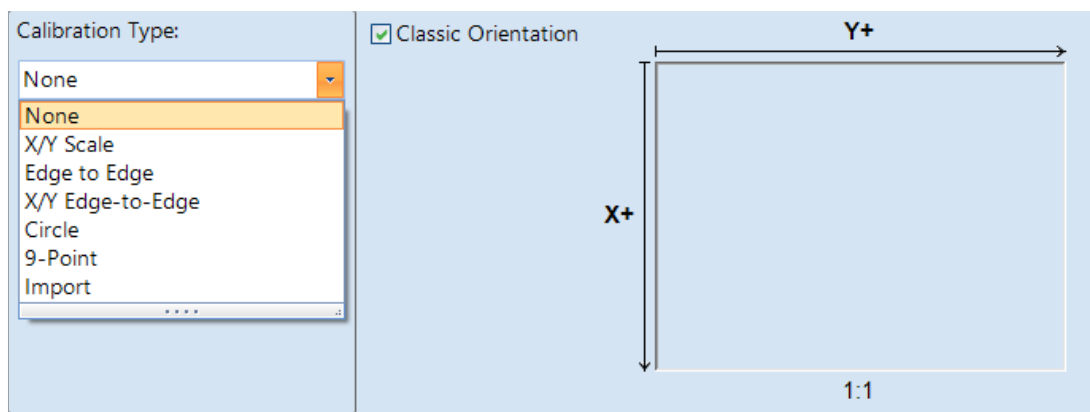
Obr. 30: Nastavení zaostření kamery

Následující záložka je blesk neboli osvětlení snímané plochy. Bez blesku nebo externího osvětlení bychom nebyli schopni tuto aplikaci provést. V nastavení blesku nastavujeme čas expozice. Máme také na výběr ze dvou možností a to ruční nastavení expozice nebo automatické nastavení expozice. Nyní jsme zvolili ruční nastavení expozice. Naše nastavení expozice na 20,250 ms můžeme vidět na obrázku 31.



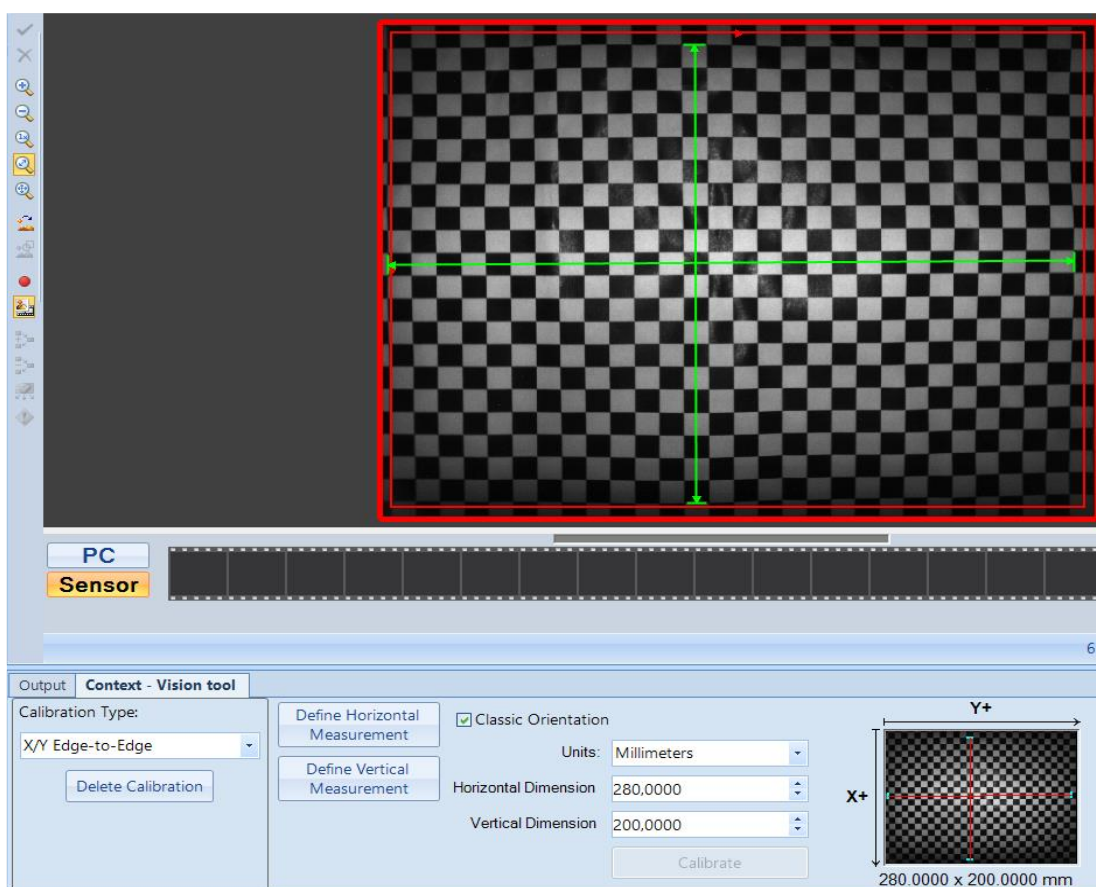
Obr. 31: Nastavení blesku

Poslední a nejdůležitější částí u nastavení obrazu je kalibrace kamery. V softwaru od firmy Cognex máme jen jednu možnost kalibrace kamery. Proto byla kalibrace udělána v RobotStudios, kde máme na výběr z několika možností. Tyto možnosti můžeme vidět na obrázku 32.



Obr. 32: Možnosti z nastavení kamery

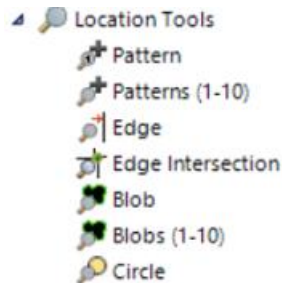
Námi zvolený typ kalibrace je X/Y Edge to Edge. Tento typ kalibrace funguje tak, že použijeme kalibrační papír (šachového charakteru) s velikostí čtverce 10 mm, tento papír nasnímáme kamerou. Dále nastavíme v ose x dvě čáry, mezi kterými si změříme vzdálenost a tuto vzdálenost mezi čtverci spočítáme a napíšeme do patřičné kolonky. Tento stejný postup použijeme i při kalibraci osy y. Kalibraci můžeme vidět na obrázku 33.



Obr. 33: Kalibrace pomocí nástroje X/Y Edge to Edge

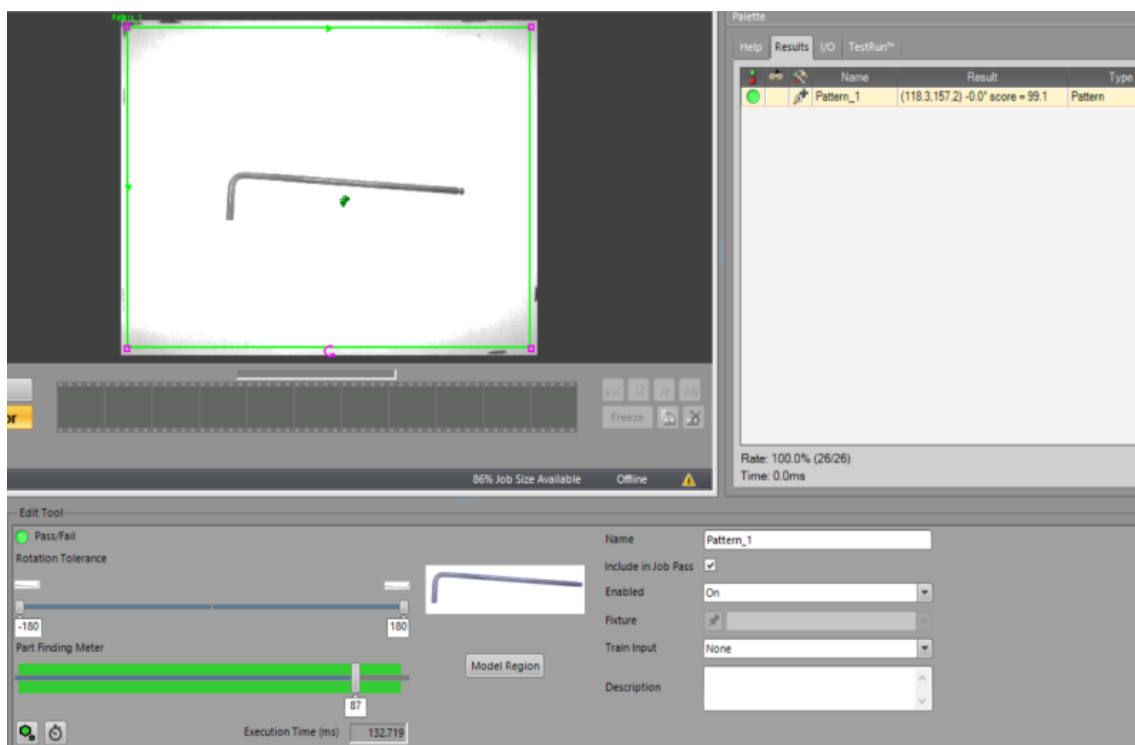
4.2.3 Nalezení dílů

Nástroje pro určování polohy se používají k lokalizaci dílu v zorném poli a hlášení polohy nalezeného dílu. Výstup lokalizačních nástrojů lze využít jako přípravky pro jiné kontrolní nástroje nebo použít například v robotických aplikacích s automatickým naváděním. Lokalizační nástroje můžeme vidět na obrázku 34.



Obr. 34: Nástroje pro vyhledávání dílů

Nástroj *pattern* nebo také vzor, vyhledává prvky v obrázku, které vykazují maximální podobnost s dříve definovaným vzorem. Tento druh porovnávání vzorů se také nazývá „template matching“. Proces hledání vzoru se skládá ze dvou fází: tréninku a hledání. V trénovací fázi se ručně nastavuje oblast, ze které se vybírá trénovací vzor. Tento vzor je dále vyhledáván. Ve fázi vyhledání se na nových snímcích vyhledává pozice, které nejvíce odpovídají trénovacímu vzoru. Více stejných pozic je řazeno sestupně podle podobnosti až do minimální úrovně podobnosti.



Obr. 35: Použití vyhledávacího nástroje pattern

Na obrázku 35 můžeme vidět již druhou fázi a to fázi vyhledávání. V dolní části obrázku můžeme vidět trénovací vzor, dále se tu nachází, jak může být náš vzor natočený nebo také minimální hodnota schody. Na pravé straně obrázku vidíme název vyhledávaného vzoru pozici, v jaké se nachází (souřadnice X a Y a rotaci dílu) a můžeme tam také vidět skóre neboli jakou má náš díl shodu s trénovacím vzorem.

Nástroj *pattern (1-10)* funguje na úplně stejném principu jako nástroj *pattern*. Hlavním rozdílem je, že tento nástroj vyhledává až deset dílů podle trénovacího vzoru.

Dalším nástrojem je *edge* neboli hrana. V terminologii strojového vidění je hrana definována jako hranice (buď čára, oblouk nebo kruh) mezi dvěma sousedními skupinami pixelů s kontrastními hodnotami ve stupních šedi. Nástroj *edge* se používá k detekci a zpracování statistik o nalezených hranách.

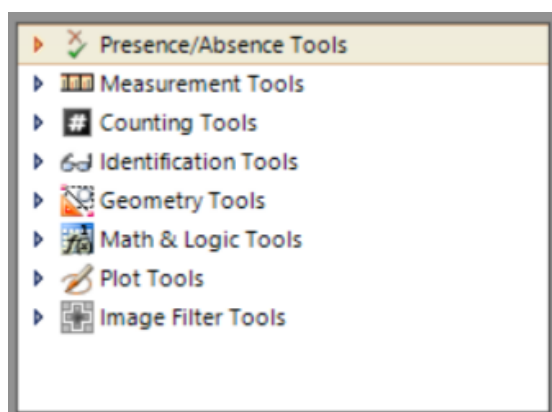
Edge inspection můžeme nazvat také jako průsečík hran. Tento nástroj se používá tam, kde se protínají dva prvky hran.

Dalšími dvěma nástroji pro vyhledávání dílů jsou *blob* a *blobs (1-10)*. Jak se už dříve ukázalo, hlavním rozdílem mezi těmito nástroji je, že první nástroj vyhledává jen jeden díl, avšak druhý nástroj až deset dílů. Oba nástroje vyhledávají bloby, které odpovídají zadaným parametrům. Po vyhledání blobu nám kamera poskytne informace o poloze a orientaci dílu. Konkrétně se jedná o souřadnice X a Y těžiště a úhel natočení nalezeného dílu.

Nástroj *kruh* vyhledává kruhový okraj v prstencové (kruhové nebo prstencové) oblasti obrazu. Kruh vytváří jednorozměrné projekce obrazové oblasti součtem hodnot pixelů na soustředných kružnicích snímaných ve směru rostoucího poloměru. Přejechy hran jsou extrahovány z promítaných obrazových dat.

4.2.4 Kontrola dílů

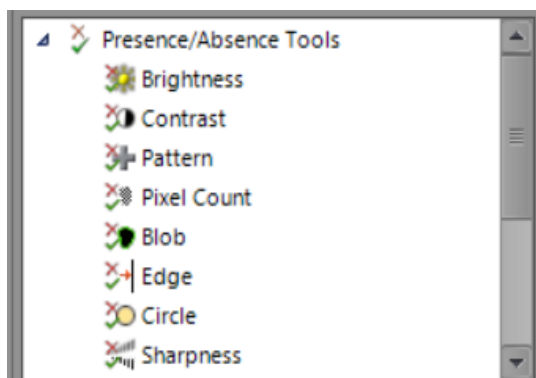
V sekci kontrola dílů můžeme použít z několika kontrolních nástrojů, které nám pomáhají při kontrole dílů. Seznam těchto nástrojů můžeme vidět na obrázku 36.



Obr. 36: Skupiny nástrojů pro kontrolu dílu

Nyní si představíme jednotlivé skupiny. Skupina *prezence/absence* slouží k určení přítomnosti prvku. Nástroje této skupiny mohou být použity k detekci objektů, které mají být přítomny na snímku (např. značky na produktu v průmyslové výrobě) nebo k odhalení

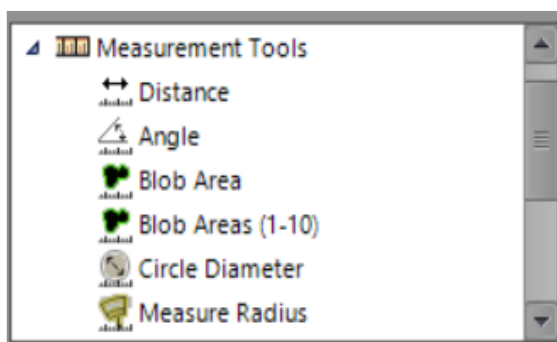
anomálií, kdy by měl být určitý prvek na snímku, ale není. Jednotlivé nástroje skupiny můžeme vidět na obrázku 37.



Obr. 37: Nástroje ve skupině prezenze/absence

Nástroj *jas* využívá průměrné hodnoty jasu pixelů v určité oblasti obrázku a na základě této hodnoty určuje, zda je prvek v této oblasti přítomen nebo nikoliv. Konkrétně se jedná o průměrnou hodnotu jasu v stupních šedi pixelů v dané oblasti, kterou nástroj hlásí jako výstup. Nástroj jasu se hodí v situacích, kdy je nutné detekovat prvky s vysokým kontrastem například, když je prvek dobrého dílu mnohem tmavší nebo světlejší než prvek špatného dílu. Využití tohoto nástroje spočívá v tom, že změna jasu prvku může poskytnout dobrou indikaci přítomnosti nebo nepřítomnosti dané části nebo objektu. Například, při kontrole víčka lahve může být rychle zjištěno, zda je přítomno nebo nepřítomno, pokud se změří jas v dané oblasti a porovná se s určenou referenční hodnotou.

Skupina *měření* je nezbytný pomocník při získávání rozměrů a úhlů různých prvků na snímku. Nástroje v této skupině umožňují měřit vzdálenosti mezi objekty, průměry kruhových či kulových tvarů, úhly mezi různými částmi a plochy jednotlivých objektů na základě jejich obrazových dat. Nástroje skupiny měření můžeme vidět na obrázku 38.



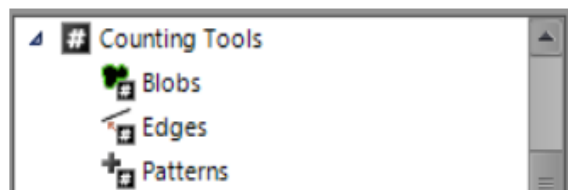
Obr. 38: Nástroje ve skupině měření

Nejpoužívanějšími nástroji v této skupině je *měření vzdálenosti* a *měření úhlu*. Nástroj pro *měření vzdálenosti* slouží k přesnému vypočítání vzdálenosti mezi dvěma

libovolnými prvky na snímku a hlásí tuto vzdálenost. Tento nástroj je velmi užitečný v situacích, kdy je nutné získat přesné informace o vzdálenosti mezi prvky, například při měření délky dílu nebo vzdálenosti mezi středy dvou otvorů. Použití nástroje pro měření vzdálenosti umožňuje získat přesné rozměry a vzdálenosti jednotlivých prvků na snímku, což je důležité při mnoha průmyslových aplikacích.

Nástroj pro *měření úhlu* slouží k výpočtu úhlu mezi dvěma hranami prvku na snímku a zobrazuje úhel mezi nimi.

Následující skupina počítání se používá k počítání prvků na snímku.



Obr. 39: Nástroje v počítací skupině

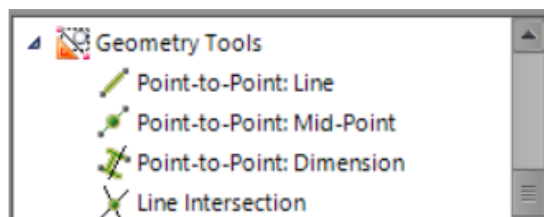
Na obrázku 39 můžeme vidět přehled dostupných nástrojů ve skupině *počítání*. Nástroj *blob* počítá prvky blob vyhledané v oblasti obrazu. Tento nástroj je jedním z rychlejších nástrojů. Využití tento nástroj najde při kontrole konektoru, kdy kontroluje správný počet pinů.

Jeden dalších užitečných nástrojů je *počítání vzorů*, který pracuje na základě naučeného modelu, který slouží jako reprezentace hledaného vzoru. Tento nástroj dokáže spolehlivě detekovat a spočítat výskyt daného vzoru v obrazu. Může se použít například k počítání počtu identických prvků na papírové šabloně nebo k monitorování počtu poškozených pixelů na obrazovce.

Identifikační skupina se používá na čtení symbolů, textů a vzorových prvků. V této skupině se nachází dva nástroje, prvním nástrojem je *čtení textu*. Tento nástroj umožňuje přečíst a ověřit textový řetězec v rámci určité oblasti. Nástroj může pracovat s různými fonty. Čtení textu probíhá tak, že se text segmentuje a klasifikuje. Nejprve se provede segmentace textu pomocí prahových technik. Poté se jednotlivé znaky natrénují pomocí databáze písmen. Klasifikace probíhá během čtení textu, kdy se porovnávají segmentované znaky s uloženými znaky v databázi písmen.

Druhým nástrojem v této skupině je identifikace vzorů. Nástroj pro identifikaci vzorů se trénuje na vzorových prvcích a poté je *identifikuje obraz*, zdali se tam tyto prvky vyskytují. Tento nástroj je užitečný například při hledání specifických objektů v obrázcích, jako jsou například znaky na registračních značkách, logo společností nebo určité vzorce v materiálech. Díky tomu je možné zajistit, aby se na lince vyráběly pouze správné výrobky, nebo informovat ostatní zařízení v továrně o aktuálně běžícím výrobku.

Skupina *geometrie* vytvářejí geometrické reference v obraze, které mohou být použity jako vstup pro další kontrolní nástroje.

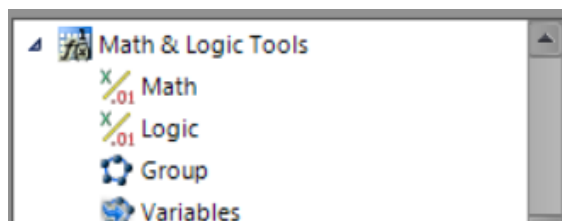


Obr. 40: Nástroje ze skupiny geometrie

Na obrázku 40 je přehled nástrojů ze skupiny geometrie. Nástroj *bod k bodu* umožňuje vytvořit referenční přímku mezi dvěma zadanými body, počátky přípravek nebo středy kruhových prvků. Následně vrací souřadnice X,Y pro oba konce sestrojené přímky. Tento nástroj usnadňuje vytváření geometrických referencí a může být použit například pro další kontrolní nástroje, jako jsou nástroje ze skupiny matematika, logika nebo měření.

Nástroj *průsečík čar* se používá k nalezení bodu průsečíku dvou čar v obraze a poskytuje souřadnice X a Y tohoto bodu. Tento nástroj může být užitečný například pro kontrolu rovnoběžnosti nebo kolmosti prvků na výrobní lince.

Skupina *matematika a logika* umožňují propojování a provádění matematických operací s výstupy z jiných nástrojů na základě určitých podmínek. Tyto nástroje umožňují také zpracování statistik, seskupování a řazení nástrojů podle potřeby. Vytváření kroků pro správné pořadí operací je také součástí této funkcionality. Nástroje této skupiny můžeme vidět na obrázku 41.

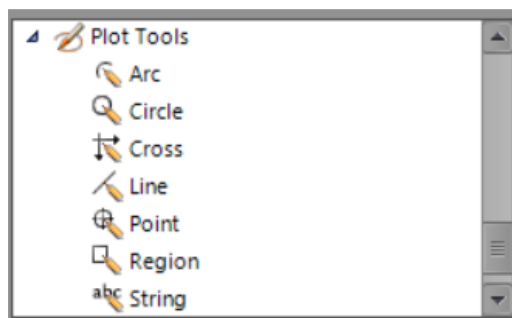


Obr. 41: Nástroje ze skupiny matematika a logika

Nástroj *matematika* umožňuje vytvářet matematické vzorce pro zpracování dat a úloh s použitím běžných matematických operací, statistických funkcí a trigonometrických funkcí. Tento nástroj umožňuje matematické zpracování dat a úloh v rámci dané aplikace. Nástroj matematika se používá tam, kde chceme spojit více nástrojů, příkladem může být sečtení správných výsledku nebo průměr měření ze skupiny měření.

Nástroj *logika* je užitečný v situacích, kdy potřebujete porovnat výstupní hodnoty nástrojů s očekávanými hodnotami a na základě toho rozhodnout o dalších krocích v procesu. Tento nástroj umožňuje sestavit logický vzorec, který vyhodnotí, zda jsou výstupní hodnoty nástrojů v souladu s očekáváním.

Skupina pro *vykreslování* umožňuje generovat obrazy na základě matematických výrazů a funkcí, které lze aplikovat na různé typy dat, jako jsou body, křivky nebo plochy. Přehled nástrojů můžeme vidět na obrázku 42.



Obr. 42: Nástroje ze skupiny vykreslování

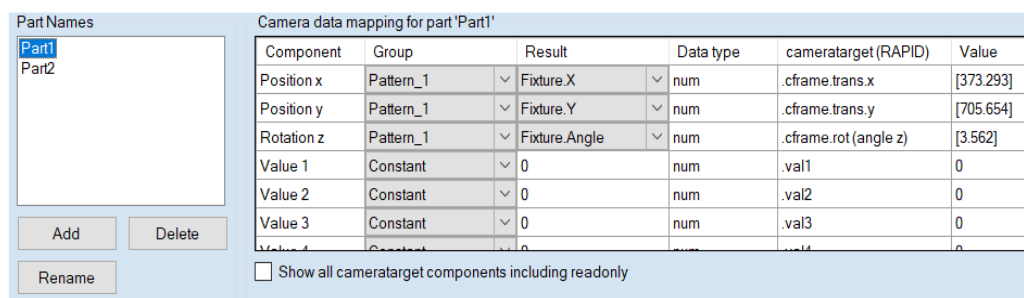
Nástroj pro *vykreslování čar* umožňuje matematickému vzorci vykreslit čárovou grafiku na obrázek a vrátit hodnoty pro počáteční a koncové body čáry. Tyto hodnoty určují polohu počátečního a koncového bodu na ose X a Y.

Nástroj *vykreslení bodu* slouží k vykreslení bodové grafiky na základě matematických výrazů pro X a Y souřadnice bodu. Po vykreslení bodu na obrázek nástroj vrátí souřadnice bodu v systému X a Y.

Filtrovací skupina umožňuje zlepšit kvalitu obrazu nebo určité oblasti obrazu pro snadnější a přesnější analýzu. V této skupině nalezneme jeden nástroj a to nástroj filtr. Nástroje pro filtrování obrazu umožňují aplikovat různé techniky na určitou oblast obrazu s cílem vylepšit jeho kvalitu pro další zpracování. Výstupem filtru je nový obraz, který může být použit pro určování různých charakteristik obrazu, jako je poloha, velikost nebo jas. Jeho účinné použití umožňuje spolehlivější a opakovatelné výsledky v dalších kontrolních aplikacích.

4.2.5 Informace o poloze

Informace o poloze vyhledávaného dílu jsou do robota předávány pomocí nástroje Output to Rapid. V tomto nástroji předáváme souřadnice, které nám poskytuje některý z vyhledávacích nástrojů.



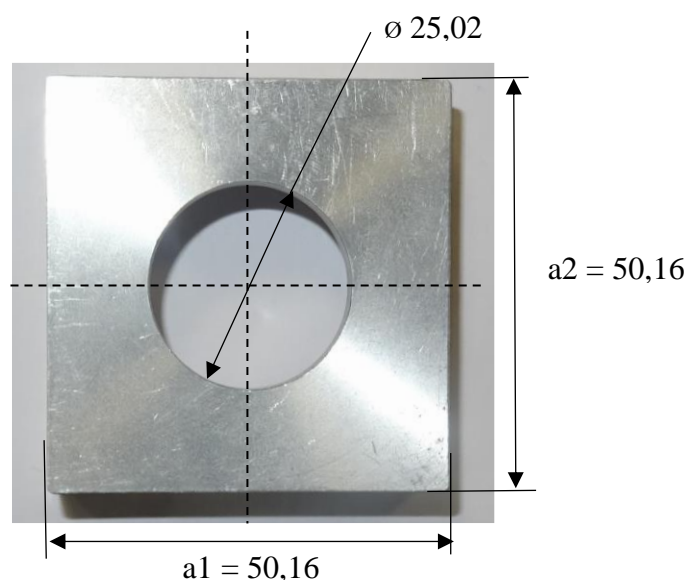
Obr. 43: Nastavení mapování kamery

Ukázku nastavení předání informace o poloze dílu můžeme vidět na obrázku 43. Na obrázku můžeme vidět, že z vyhledávacího nástroje se předávání informace o pozici X a Y a dále se předává úhel natočení. Tyto hodnoty jsou předávány jako čísla. Zapisují se do datového typu data kamery *cameratarget*, který předává dál souřadnice dílu. Tyto hodnoty se dají jednotlivě vyčítat.

5 EXPERIMENTY

Tato kapitola se věnuje praktickým experimentům. Celkem byly provedeny čtyři experimenty. První experiment zahrnoval měření dílů pomocí kamery. Tyto díly se vybíraly v dalších experimentech. Druhým experimentem bylo vybrání dílu A z kontejneru. Třetím experimentem spočíval ve vybrání dílů B1 z kontejneru. Čtvrtým experimentem bylo vybírání dílu B1 a dílu B2 z kontejneru. Vybírání dílů bylo pomocí kolaborativní robota od firmy ABB. Tímto kolaborativním robotem byl Yumi. Efektorem byl Yumi Smart efektor, který má v sobě servo modul.

Díl A je symetrický čtverec, který má uprostřed díru, jak můžeme vidět na obrázku 44. Rozměry toho dílu jsou 50,16x50,16 mm. Tento díl by měl být lehčí pro výběr z kontejneru pro svoji symetričnost.



Obr. 44: Díl A (polotovar příruby) s rozměry

Díl B1, na kterém byly provedeny experimenty, je imbusový klíč velikosti 5. Ten můžeme vidět na obrázku 45 i s rozměry. Profil toho imbusového klíče je tvořen šestihranem ohnutým po rovné straně.



Obr. 45: Díl B1(imbusový klíč 5) s rozměry

Dílem B2 je imbusový klíč velikosti 4. Na obrázku 46 můžeme vidět samotný klíč s rozměry.



Obr. 46: Díl B2 (Imbusový klíč 4) s rozměry

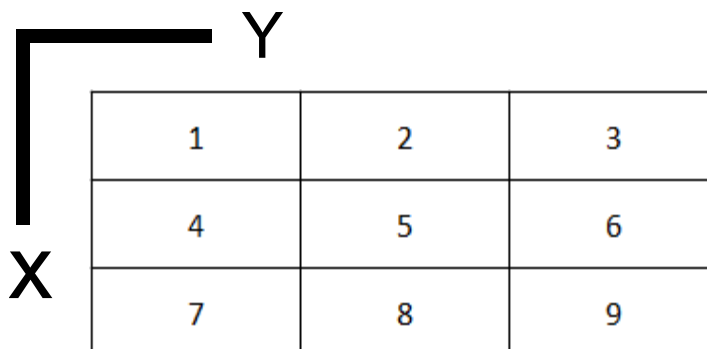
Přesnost měřicího zařízení s kterým byly měřeny jednotlivé rozměry dílů byla 0,02 mm.

5.1 První experiment (rozměrová verifikace)

V prvním experimentu bylo realizováno měření dílů pomocí kamerového senzoru. Tento experiment sloužil jako podklad pro následující experimenty. Měření jednotlivých dílů probíhalo pro potřebu verifikace možnosti využití smart kamery (viz kap. 4) pro stanovení rozměru součásti, což bylo potřebné pro adaptivní (dle rozměru) uchopení součásti. U dílu A se měřily vnější rozměry, u dílu B1 se měřily dva vnější rozměry a rozměr šestihranu (vnitřní průměr šestihranu), viz obrázky 44 a 45. Měření probíhalo s podsvětlením i s přísvitkem z kamery.

5.1.1 Měření dílu A (polotovar příruby)

Jak už se zmínilo výše měřily se u toho dílu vnější rozměry. Naměřené hodnoty posuvným měřidlem byly 50,16 x 50,16 mm a průměr byl 25,02 mm. Měření dílu probíhalo po celé ploše a to tak, že tato plocha byla pomyslně rozdělena do devíti shodných obdélníků. Jednotlivé obdélníky byly označeny číslem od jedné do devíti. Rozložení těchto obdélníků můžeme vidět na obrázku 47.



Obr. 47: Rozložení měřených míst pro první díl

Orientace dílu při měření byla s nulovým natočením. K měření jednotlivých rozměrů byl použit nástroj ze skupiny měření. Byl to nástroj pro měření délky. Nastavení těchto dílů můžeme vidět na obrázku 48. Při měření s přísvitkem museli být použity dva nástroje

pro identifikaci. Bylo to proto, že díl byl lesklý a při umístění ve středu snímacího pole nám díl odrážel světlo z přísvitů zpět do kamery. Tento obraz byl dost jasný. Opačným případem byl díl na kraji vybírací plochy. Když nebyl díl přímo pod přísvitem, byl výsledný obraz tmavší. Tento problém se při měření s podsvětlením nevyskytl.

Name	Result	Type
Pattern_1	(31.6,70.6) -4.5° score = 75.2	Pattern
Edge_4	Present	Edge
Edge_3	Present	Edge
Edge_2	Present	Edge
Edge_1	Present	Edge
Distance_2	51.331 mm	Distance
Distance_1	51.474 mm	Distance

Obr. 48: Natavení nástrojů při měření dílu A

Měření dílu A s podsvětlením můžeme vidět v tabulce 3 a s přísvitem můžeme vidět v tabulce 4.

Tab. 3: Měření dílu A s podsvětlením

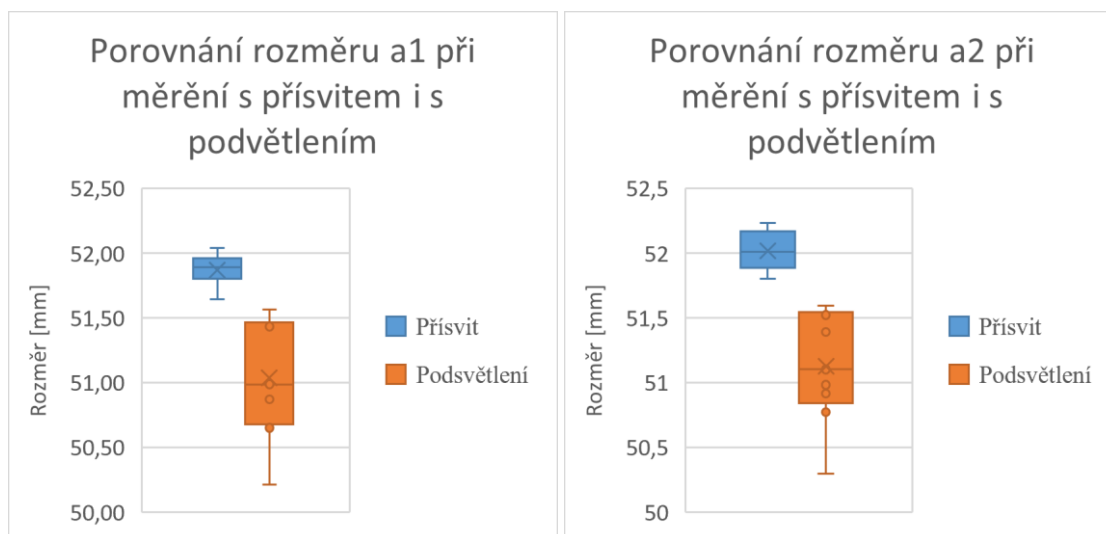
	a1 rozměr	Relativní chyba měření	a2 rozměr	Relativní chyba měření
1	51,56	2,8%	51,59	2,9%
2	50,99	1,6%	50,98	1,6%
3	51,45	2,6%	51,56	2,8%
4	50,70	1,1%	51,10	1,9%
5	50,21	0,1%	50,29	0,3%
6	50,65	1,0%	50,77	1,2%
7	51,43	2,5%	51,39	2,5%
8	50,87	1,4%	50,91	1,5%
9	51,48	2,6%	51,52	2,7%

Z tabulky 3 nám vychází, že nejvyšší relativní chyba měření je 2,9% a vyskytuje se v prvním čtverci.

Tab. 4: Měření dílu A s přísvitem

	a1 rozměr	Relativní chyba měření	a2 rozměr	Relativní chyba měření
1	51,83	3,3%	52,15	4,0%
2	51,89	3,4%	52,03	3,7%
3	51,64	3,0%	51,96	3,6%
4	51,99	3,7%	52,01	3,7%
5	51,90	3,5%	51,79	3,3%
6	51,81	3,3%	51,98	3,6%
7	51,79	3,2%	51,81	3,3%
8	52,04	3,7%	52,18	4,0%
9	51,92	3,5%	52,23	4,1%

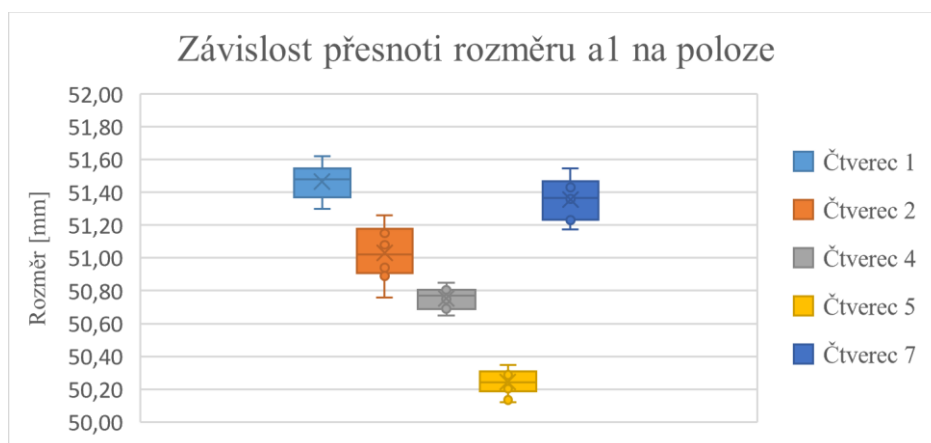
Z tabulky 4 nám vyplývá, že nejvyšší relativní chyba měření je 4,1% a vyskytuje se v devátém čtverci.



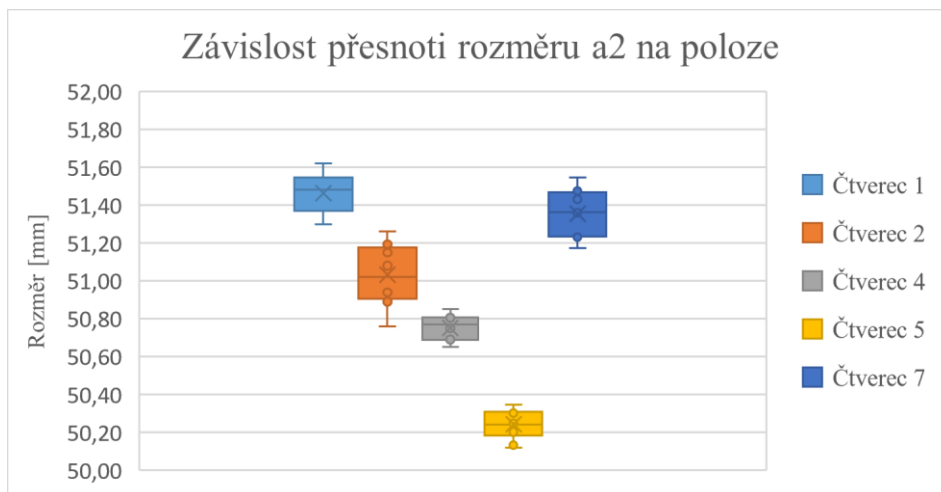
Obr. 49: Porovnání rozměru a1 a a2 při měření s přisvitem i s podsvětlením

Pro statistické porovnání, které měření je lepší, jsme nejprve ověřili hypotézu o normálním rozdělení dat. Pro tuto hypotézu byla zvolena jednoduchá metoda Jarque – Beta Test. Tímto testem jsme potvrdili, že se jedná o normální rozdělení (hodnota testu = 0,6509, $p = 0,7222$). Dále byl provedeny testy hypotéz o rovnosti rozptylů a o rovnosti střední hodnoty. Test pro rovnost rozptylů vyšel $p = 0,000744$ a test o rovnosti středních hodnot vyšel $p = 0,0016$. Z těchto výsledků vyplývá, že zamítáme nulovou hypotézu, tedy, že rozdíl v přesnosti měření (průměr) je významný, obdobně rozptyl. Ze statistiky i samotných grafů, které můžeme vidět na obrázku 49 vyplývá, že měření s podsvětlením je výhodnější než měření s přisvitem i když má větší rozptyl.

V další měření dílu A jsme používali už jen podsvětlení. Zde proběhlo další měření kvůli přesnosti oblasti měření. Toto měření bylo provedenou ve specifickém prostoru, a to ve čtvercích 1, 2, 4, 5 a 7. Z teoretických předpokladů by měla nejhorší měření vycházet ve čtvercích 1 a 7 a nejlepší měření by mělo vycházet ve čtverci 5.



Obr. 50: Graf závislost přesnosti rozměru a1 na poloze s podsvětlením

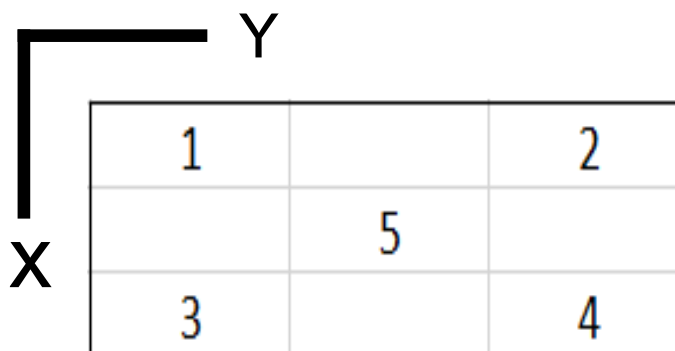


Obr. 51: Graf závislost přesnosti rozměru a2 na poloze s podsvětlením

Výsledky měření rozměru a1 můžeme vidět na obrázku 50. Výsledky měření rozměru a2 můžeme vidět na obrázku 51. Z výsledků vyplývá, že teoretické předpoklady byly potvrzeny.

5.1.2 Měření dílu B1 (imbusový klíč 5)

Naměřené hodnoty rozměrů dílu B1 byly, průměr 4,94 mm, šířka 32,3 mm a délka 163,97 mm. Měření bylo provedeno na snímací ploše s rozložením, které můžeme vidět na obrázku 52.



Obr. 52: Rozložení měřených míst pro díl B1

Díl byl při měření pokládán na plochu v orientaci, kterou můžeme vidět na obrázku 45. Měření probíhalo s podsvětlením a s přísvitkem. Použité nástroje pro měření jsou vidět na obrázku 53. V tabulce 5 najdeme měření dílu B1 s podsvětlením a v tabulce 6 s přísvitkem.

	Name	Result	Type
●	Pattern_1	(121.1,153.6) 0.5° score =...	Pattern
●	Edge_1	Present	Edge
●	Edge_2	Present	Edge
●	Distance_1	4.475 mm	Distance
●	Edge_3	Present	Edge
●	Distance_2	32.277 mm	Distance
●	Edge_4	Present	Edge
●	Edge_5	Present	Edge
●	Distance_3	164.410 mm	Distance

Obr. 53: Nastavení nástrojů pro měření jednotlivých rozměrů pro druhý díl

Tab. 5: Výsledky měření dílu B1 s podsvětlením

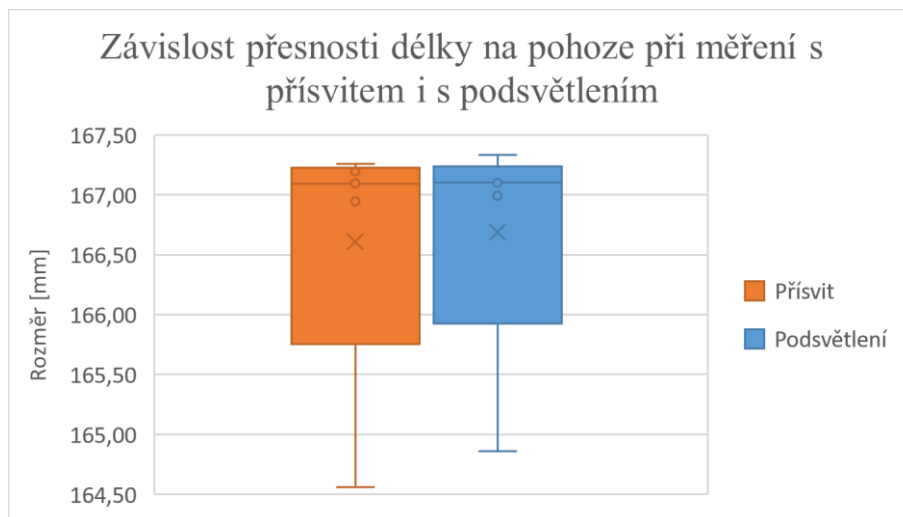
	Délka	Relativní chyba měření	Šířka	Relativní chyba měření	Průměr	Relativní chyba měření
1	167,23	2,0%	32,69	1,2%	5,48	10,9%
2	166,99	1,8%	32,75	1,4%	5,63	13,9%
3	167,10	1,9%	32,66	1,1%	5,51	11,6%
4	167,14	1,9%	32,67	1,2%	5,54	12,2%
5	164,86	0,5%	32,21	-0,3%	5,19	5,0%

Z tabulky 5 vyplývá, že největší relativní chyba nastává při měření průměrů. Tady chyba dosahuje až 13,9%.

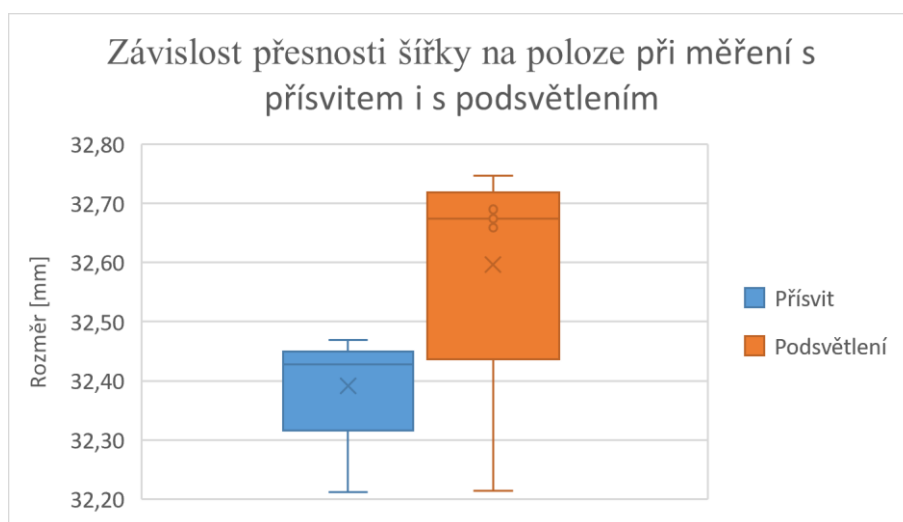
Tab. 6: Výsledky měření dílu B1 s přisvitím

	Délka	Relativní chyba měření	Šířka	Relativní chyba měření	Průměr	Relativní chyba měření
1	167,26	2,0%	32,42	0,4%	5,17	4,7%
2	167,19	2,0%	32,47	0,5%	5,18	4,8%
3	166,94	1,8%	32,43	0,4%	5,14	4,0%
4	167,09	1,9%	32,43	0,4%	5,18	4,8%
5	164,56	0,4%	32,21	-0,3%	5,02	1,6%

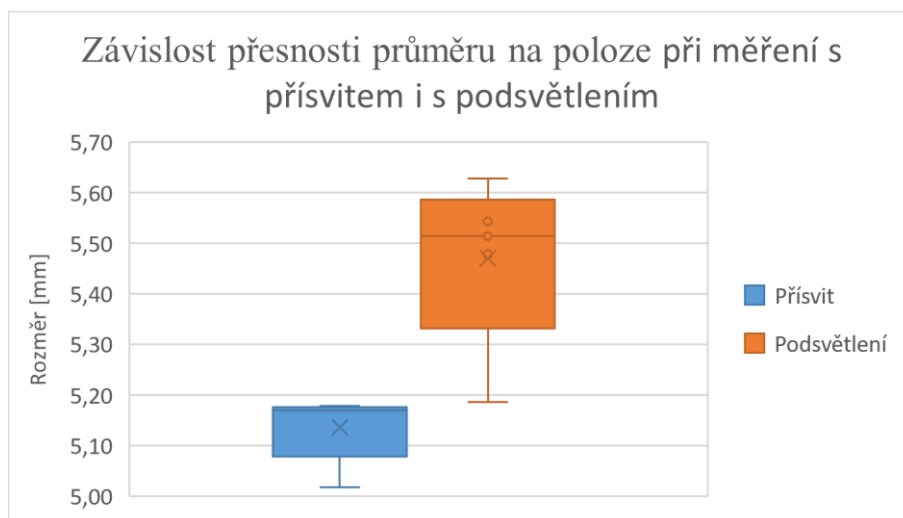
Z tabulky 6 vyplývá, že největší relativní chyba nastává při měření průměrů. Tady chyba dosahuje až 4,8%.



Obr. 54: Graf závislost přesnosti rozměru délky na poloze s přívitem i s podsvětlením



Obr. 55: Graf závislost přesnosti rozměru šířky na poloze s přívitem i s podsvětlením



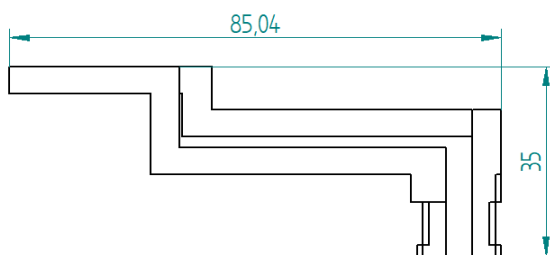
Obr. 56: Graf závislost přesnosti rozměru průměru na poloze s přívitem i s podsvětlením

Pro statistické porovnání, které měření je lepší, jsme opět provedli test normality metodou Jarque-Beta Test. Tímto testem jsme potvrdili, že se jedná o normální rozdělení. Dále byl udělán test pro rozměr délky, šířky a průměru o rovnosti rozptylů a o rovnosti střední hodnoty. Ze statistických výsledků vyplývá zamítnutí nulové hypotézy (tj. hodnoty jsou statisticky významně odlišné). Z grafů, kterou jsou na obrázcích 54, 55 a 56 můžeme vidět, že měření s přísvitem bylo přesnější než měření s podsvětlením.

Z výsledků měření dílu B1 byl vyvozen závěr, že měření s přísvitem je u tohoto dílu lepší než měření s podsvětlením. Proto byl v dalším měření pro díly B používán pouze přísvit. Výsledek vyšel oproti předchozímu měření odlišně, je to z důvodu výšky měřených dílů.

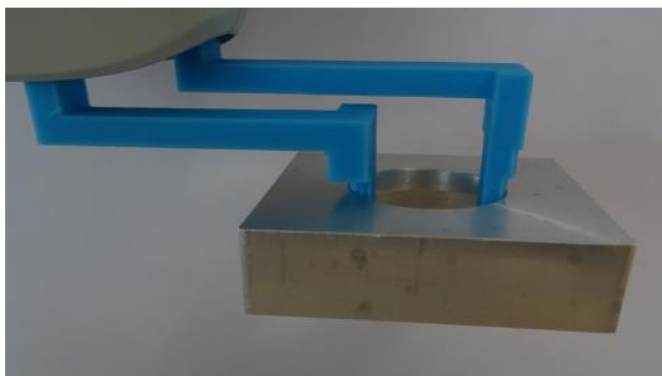
5.2 Druhý experiment

V druhém experimentu byl proveden výběr dílu A z kontejneru. Pro výběr dílu A byly navrženy speciální čelisti, viz obrázek 57. Z důvodu existence středového otvoru, byl tento otvor – díra, využit pro uchopování. Čelisti byly navrženy tak, aby se při uchycování dílu roztahovaly a tím držely díl, který se vybírá (inverzní pinzetový úchop). Funkční část uchopovacích čelistí jsou úmyslně vyoseny mimo montáž efektoru z důvodu minimalizování možnosti kolize s kontejnerem.



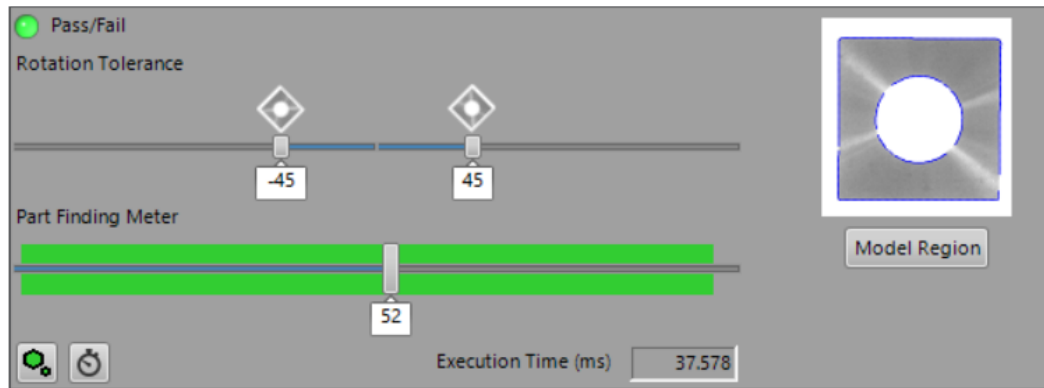
Obr. 57: Návrh čelistí pro vybírání dílu A z kontejneru

Tento návrh čelistí byl následně vytištěn na 3D tiskárně. Samotné uchycení objektu čelistmi můžeme vidět na obrázku 58.



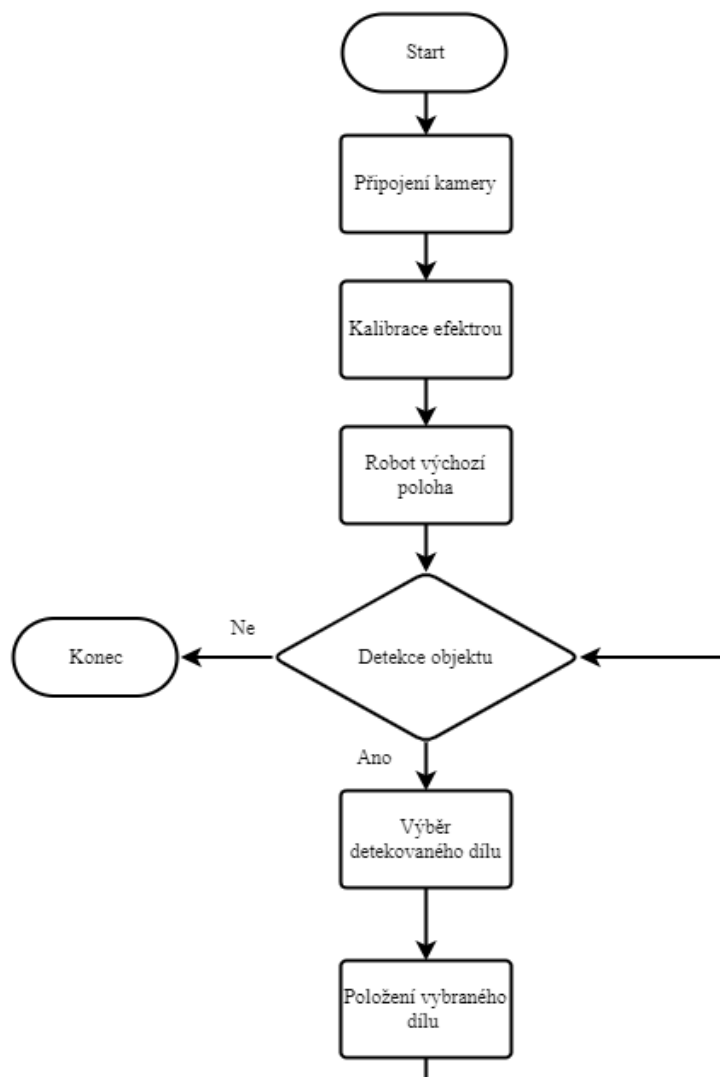
Obr. 58: Uchycení dílu A speciálně upravenými čelistmi

Další částí při experimentu bylo nastavení kamery na vyhledávání daného dílu. Nastavení a identifikace dílu proběhla podle kapitoly čtyři, kdy se nastavily jednotlivé parametry. Při nastavování se začalo připojením kamery a vytvořením souboru, do kterého se nastavení bude ukládat. Poté jsme nastavili spoušť na kameru. Následovalo zaostření na plochu. Dalším nastavením bylo nastavení blesku, ten byl v tomto experimentu vypnutý, z důvodu použití podsvětlení. Kalibrace kamery byla provedena až v RobotStudios. V další záložce se poté nastavila identifikace dílů. Nastaven byl jeden vzor. Tento vzor můžeme vidět na obrázku 59.



Obr. 59: Nastavení výběrací vzoru pro druhý experiment

Vývojový diagram tohoto experimentu můžeme vidět na obrázku 60. Vývojový diagram se dá rozdělit na dvě fáze. První fází jsme nazvali inicializace systému. V této fázi se provádělo samotné nastavení kamery přes RobotStudio, kalibrace efektoru a na polohování robota do výchozího bodu. Tato fáze byla stejná ještě v třetím a čtvrtém experimentu. Druhou fází jsme nazvali detekce a manipulace s dílem. V této fázi se nejprve detekuje díl a následně se vyzvedává a pokládá na definované místo.



Obr. 60: Základní vývojový diagram výběru dílu z kontejneru

5.2.1 Inicializace systému

```
VAR cameratarget mycameratarget;  
TASK PERS wobjdata mywobj:=[FALSE, TRUE, "", [[291.916, -  
102.28, -1.41783], [0.999864, -1.26576E-05, 7.38715E-06, -  
0.0165184]], [[76.1876, 92.7137, 0], [1, 0, 0, 0]]];
```

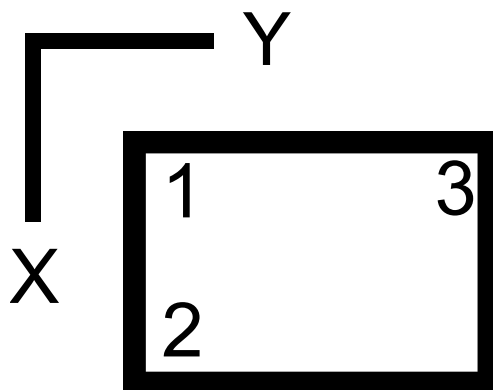
Při programování budeme pracovat s těmito proměnnými. Proměnná `mycameratarget` je datového typu `data` kamery. Do této proměnné poté ukládáme data získaná z obrázku kamery. Proměnná `mywobj`, která je datového typu, `data` pracovního objektu. Do této proměnné poté ukládáme souřadnice plochy, ze které budeme vybírat objekt a souřadnice objektu, který vybíráme.

Při samotné realizaci bylo důležité připojit kameru. Nastavení kamery probíhá přes program robotu.

```
VAR cameratarget mycameratarget;  
CamSetProgramMode Camera_1;  
CamLoadJob Camera_1, myjob;
```

Při použití `CamSetProgramMode` přikážeme zvolené kameře, aby se spustila v programovacím módu. Tento mód se používá pro nastavování kamery. Dále jsme v tom módu schopni vybrat program kamery, ve kterém je uloženo naše nastavení kamery a vybíraného dílu. Naše kamera má v RobotStudios označení `Camera1`. Druhým příkazem do kamery nahrajeme náš zvolený soubor s veškerým nastavením, které jsme před samotným začátkem programováním udělali.

S připojením kamery také souvisí kalibrace kamery vůči robotu. O to se nám starají `wobjdata`, kde se definuje poloha aktuální pracovní plochy a pozice vybíraného dílu. Do toho datového typu zkalibrujeme naši plochu pomocí třech bodů. Do této proměnné se naše plocha definuje pomocí tří bodů. Prvním bodem je vnitřní roh kontejneru. Druhým bodem je další vnitřní roh kontejneru ve směru osy X a třetím bodem je vnitřní roh ve směru osy Y. Ukázku kalibračních bodů pracovní plochy můžeme na obrázku 61. Po psání všech třech bodů se nám vypočítá pracovní plocha.



Obr. 61: Body pro kalibraci kamery vůči robotu

Při nastavení efektoru je potřeba nastavit sílu a rychlost úchopu. Toto nastavení se provádí v RobotStudios pomocí příkazu `g_Init`.

```
g_Init \maxSpd:=10 \holdForce:=5 \Calibrate;
```

V příkazu můžeme vidět, že maximální rychlost uchycení je nastavena na 10 mm/s. Síla uchycení je 5 N. Poslední volitelnou vlastností je `Calibrate` to znamená, že čelisti projdou procesem kalibrace s nulovou přidržovací silou. Dále se v programu ještě vyskytuje příkaz `g_MoveTo`. Tento příkaz dělá to, že čelisti se rozjedou na definovanou hodnotu od kalibračního bodu. Dalším bodem je najetí robotem na výchozí pozici.

```
MoveL Offs (Start_pos, 0, 0, 0), r_str.r_param.speed, r_str.r_param.zone, Servo\WObj:=wobj0;
```

5.2.2 Detekce a manipulace s dílem

Po najetí do výchozí polohy se volá podprogram, ve kterém se detekuje díl.

```
CamSetRunMode Camera_1;
CamReqImage Camera_1;
CamGetResult Camera_1, mycameratarget;
mywobj.oframe := mycameratarget.cframe;
```

Spuštěním kamery do run modu, tedy pracovní mód se provádí pomocí příkazu `CamSetRunMode`. Dalším příkazem je `CamReqImage`, ten příkazuje kameře pořídit obrázek. Příkaz `CamGetResult` nám slouží k získání výsledku z pořízeného obrázku a informace o poloze dílu uloží do proměnné `mycameratarget`. Tyto informace se dále zapisují do proměnné `mywobj`. Tato část kódu z detekce a manipulace s dílem se dále vyskytuje také u třetího a čtvrtého experimentu.

V čem se druhý, třetí a čtvrtý experiment lišil je ve vyzvednutí dílu. Protože díl A je symetrický s dírou uprostřed, vyzvednutí dílu bylo jednodušší. Při výběru nám nezáleželo na jeho rotaci, ale pouze na poloze dílu. Logika pro vyzvedávání byla taková, že pole bylo pomyslně rozděleno na čtyři části. V každé části byl díl uchopován tak, aby střed efektoru byl při středu a vyosené čelisti byli natočeny k díře dílu. Proto byly pro vyzvednutí dílu použity čtyři varianty uchopení dílu. Pro tyto varianty úchopu byly vytvořeny čtyři proměnné datového typu `robtarget` s označením `myrobtargetx`, kde místo `x` bylo číslo varianty úchopu. Příklad jedné uchopovací varianty můžeme vidět níže.

```
CONST robtarget myrobtarget1:= [[45.68, 46.64, -
0.58], [0.00669652, -0.909879, -0.414795, 0.0044566], [-
1, 2, 1, 4], [110.08, 9E+09, 9E+09, 9E+09, 9E+09]];
```

V této proměnné je uložena pozice a orientace, jak má být identifikovaný díl vybírán. Tyto hodnoty jsou posunuté od pozice dílu z důvodu vyosení čelistí mimo střed efektoru. Samotné hodnoty vybíraného dílu nám po vytvoření programu nejsou známy. Ty získáme tak, že spustíme program a ten se nám sám zastaví, protože nemáme definované hodnoty. Ty definujeme tak, že najedeme čelistmi do míst, kde chceme díl vybírat a tyto hodnoty zapíšeme do naší proměnné.

Dále byla vytvořena ještě jedna proměnná pro odložení dílu. Tu můžeme vidět níže, kdy máme pouze jednu odkládací pozici.

```
CONST robtarget Fin_pos1:=[[450.61,385.01,128.37],[0.0064494  
5,-0.701194,-0.712942,0.000392822],[-  
1,2,1,4],[110.123,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];
```

Samotný výběr a odložení dílu můžeme vidět v ukázce níže, kdy je ukázán pouze výběr v jednom ze čtyř čtverců. Tento postup je dále stejný u všech čtverců.

```
MoveL Offs(myrobtarget1,0,0,120,r_str.r_param.speed,r_str.r_  
param.zone,Servo\WObj:=mywobj;  
  
MoveL myrobtarget1, v100, fine, Servo \WObj:=mywobj;  
  
g_MoveTo CONSTANT_CLOSE;  
WaitTime 1;  
  
MoveL Offs(myrobtarget1,0,0,120),r_str.r_param.speed,r_str.r_  
_param.zone,Servo\WObj:=mywobj;  
  
MoveL Offs(Fin_pos1,0,0,0),r_str.r_param.speed,r_str.r_param.  
.zone,Servo\WObj:=wobj0;  
  
MoveL Offs(Fin_pos1,0,0,-10),v100,fine,Servo\WObj:=wobj0;  
  
g_MoveTo CONSTANT_OPEN;  
WaitTime 1;  
  
MoveL Offs(Fin_pos1,0,0,0),r_str.r_param.speed,r_str.r_param.  
.zone,Servo\WObj:=wobj0;  
  
MoveL Offs(Start_pos,0,0,0),r_str.r_param.speed,r_str.r_para  
m.zone,Servo\WObj:=wobj0;
```

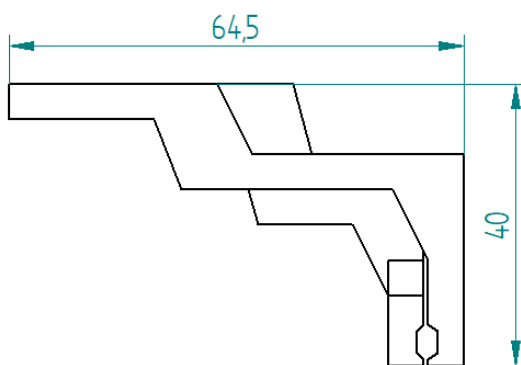
Po detekci dílu následuje samotné vybrání dílu. Prvním krokem je najetí nad pozici, ze které se díl má vybírat. Najetí nad pozici prvně probíhá nad vybíracím kontejnerem a to z důvodů bezkolizní cesty. Poté byl spuštěn do kontejneru na pozici dílu. Následuje rozevření čelistí a uchycení dílu. Následně je díl vybrán nad kontejner. Tyto pohyby byly v souřadnicovém systému mywobj, což je souřadnicový systém kalibrované plochy.

Pokračování bylo položení dílu do krabíčky. To proběhlo podobným stylem jako vytažení dílu z kontejneru s tím rozdílem, že nyní se čelisti svíraly pro odložení dílu. Po odložení dílu následovalo najetí zpět do výchozí pozici. Tyto pohyby proběhly v globálním souřadnicovém prostoru.

Při vyzvedávání tohoto typu dílu z kontejneru byl průměrný čas vyzvednutí 14,5 s. Čase na vyzvednutí jednotlivých dílů závisel na jejich poloze.

5.3 Třetí experiment

Ve třetím experimentu byl proveden výběr dílu B1 z kontejneru. Navrhnuty byly speciální čelisti, které jsou schopné vybírat díly B1 i B2. Protože mají díly specifický průměr a to šestihran, byli čelisti navrženy právě na tento průřez. Dále byly tyto čelisti vyoseny jako v předešlém experimentu. Uchycení probíhá stisknutím čelistí k sobě. Návrh čelistí můžeme vidět na obrázku 62.



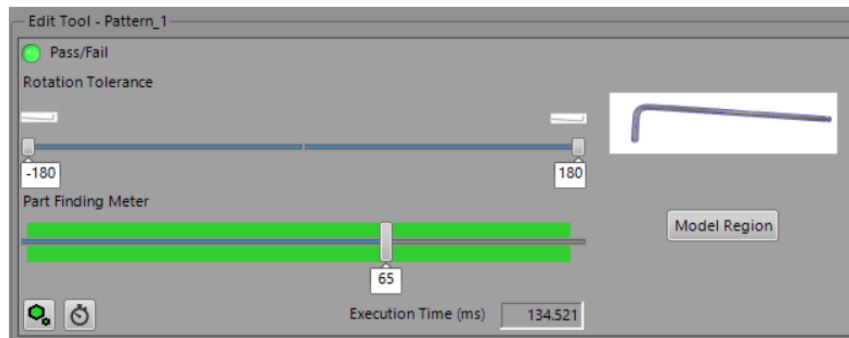
Obr. 62: Návrh čelistí pro vybírání dílu A z kontejneru

Tento návrh byl také vytisknut na 3D tiskárně. Uchopení dílu čelistmi můžeme vidět na obrázku 63.



Obr. 63: Uchycení dílu B1 čelistmi

Po vytvoření čelistí byl dalším krokem nastavení kamery. V tomto experimentu byl použit přísvit. Od toho se odvíjelo další nastavení. Vytvořen byl opět soubor pro uložení nastavení. Nastavena byla spoušť, zaostření, blesk byl povolen a kalibrace kamery proběhla v RobotStudiu. Pro vyhledávání dílu byly nastaveny dva vzory a to z důvodu dvou možností položení dílu B1. Nastavení jednoho ze vzorů můžeme vidět na obrázku 64. Časová náročnost při zpracování dvou vzorů se pohybovala okolo 0,5 s.



Obr. 64: Nastavení vzoru pro vybírání dílu B1 z kontejneru

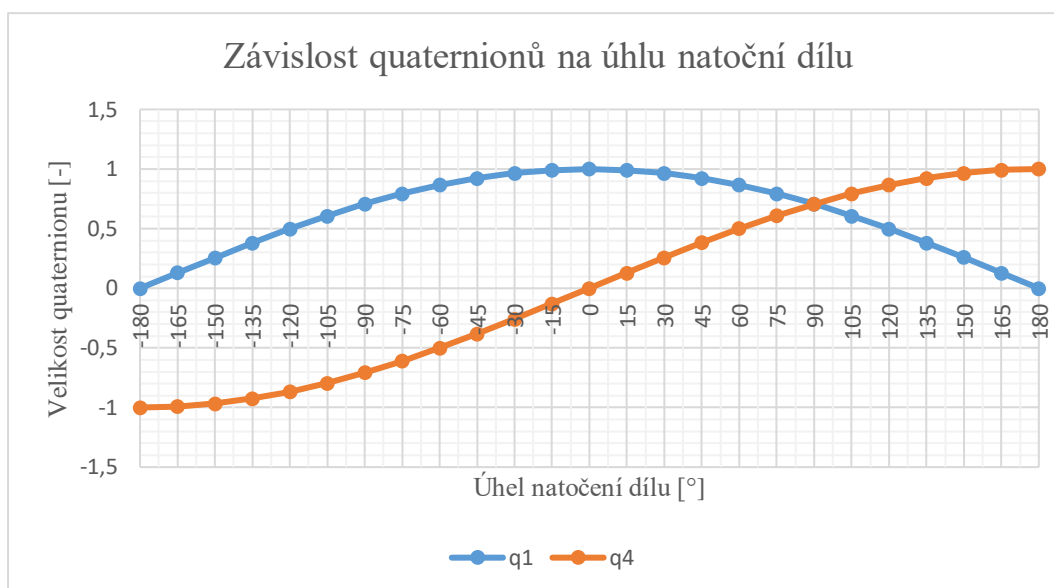
Obdobným způsobem jsme nastavili i druhý vzor pro druhou polohu dílu.

Inicializace systému byla stejná jako v druhém experimentu, proto zde již nebude zmíněna. Zabývat se budeme především detekcí a manipulací s dílem.

5.3.1 Detekce a manipulace s dílem

Detekce dílu a získání informace jeho polohy je stejné jako v druhém experimentu. Rozdíl oproti předchozímu experimentu je v tom, že uvažujeme i rotaci dílu. Dalšími rozdíly jsou dva vybírací vzory a taky složitost dílu B1. Jako vybírací místo bylo zvoleno těžiště. Při pokusech bylo zjištěno, že když vybíráme díl v těžišti, tak docházelo ke kolizi s kontejnerem, při umístění dílu v rohu. Proto byla zvolena dvě vybírací místa. Jedno bylo těsně kousek od konce a druhé bylo kousek od ohybu. Nyní přejdeme k samotné logice vybírání.

Při použití logiky vybírání byl prostor opět rozdělen do čtyř částí v závislosti na poloze dílu a v každé části byl prostor rozdělen do segmentů v závislosti na úhlu natočení dílu. V každé části bylo jiné rozdělení velikostí segmentů a to podle možností uchycení vybírání dílu v daném prostoru tak, aby nedocházelo ke kolizi. Rozdělení segmentů bylo pro oba vzory jiné. Problém nastal v tom, že kamera udává úhel natočení ve stupních v rozsahu od -180° do 180° , kdežto do robota ho posílá v quaternionech (což je v oblasti robotiky běžné). Proto bylo uděláno měření, jak se quaterniony liší v závislosti na úhlu. Výsledky měření můžeme vidět v obrázku 65. Měření probíhalo tak, že se díl otáčel o 15° a byly zapsány hodnoty quaternionu.



Obr. 65: Graf závislosti quaternionu na úhlu natočení dílu

Rotace se skládá ze čtyř quaternionů, v grafu můžeme vidět pouze dva z důvodu, že zbylé dva byly nulové. Můžeme vidět, že quaternion q_4 se mění v celém rozsahu (kladné i záporné hodnoty), proto při segmentaci budeme pracovat právě s ním.

Protože rozložení sekcí pro každý vzor bylo jiné, musela být použita podmínka, o jaký vzor se jedná. To můžeme vidět v následující ukázce.

```
IF mycameratarget.name = "Part1" THEN
```

V další ukázce můžeme vidět naprogramování podmínky pro určitý segment.

```
IF mycameratarget.cframe.rot.q4 >= -0.7
AND mycameratarget.cframe.rot.q4 <= -0.38 THEN
!od -90° do -45° Segment 2
```

Výběr a odložení dílu bylo stejné jako v druhém experimentu. Rozdíl je v tom, že u dílu B1 máme dva body uchycení a s tím souvisí, to že musíme mít víc pozic pro uchycení dílu. Pro první vzor máme šest těchto pozic. Je to z důvodu toho, že do uchopovacích bodů můžeme najíždět ze dvou stran a také v jiných rotacích. U druhého vzoru to bylo horší, tam jsme měli sedm vyběracích pozic. S více body úchopu souvisí také více pozic pro odložení dílu. V našem případě to byly čtyři pozice.

Při vyzvedávání tohoto dílu z kontejneru byl průměrný čas na jeden díl 17 s. Nevíc závisela rychlost na rotaci dílu než na poloze. Při vhodném natočení a poloze bylo možné vyzvednout díl do 14 s. Naopak při špatném byl tento čas až 22 s.

5.4 Čtvrtý experiment

V posledním experimentu byly vybírány z kontejneru dva díly a to díl B1 a díl B2. Tyto díly budou vybírány pomocí čelistí, které byly použity v třetím experimentu. Nastavení kamery bylo stejné jako v předchozím experimentu. Přidány byly pouze další dva vzory a to vzory dílu B2, který také může mít dvě orientace položení. S přidáním dalších vzorů souvisí také prodloužení času zpracování obrazu. Čas zpracování obrazu se prodloužil dvojnásobně oproti předchozímu experimentu, tato hodnota se pohybovala okolo 1 s.

Při vybírání dílů z bedny bylo použitého stejného principu pro vybírání jednotlivých dílů jako ve třetím experimentu. Rozdíl byl v odkládání dílů, kdy se třídily jednotlivé velikosti. Imbusové klíče číslo 5 se dávaly do jedné krabičky s tím, že ohnutá část klíče ležela na jednu stranu a imbusové klíče číslo 4 taktéž byly orientovány stejně.

Naměřený průměrný čas pro výběru jednoho dílu byl 18,34 s. Nejrychleji vybraný díl byl s čase 15 s. Nejpomaleji vybraný díl byl s časem 26 s.

6 ZÁVĚR

Práce řešila reálnou průmyslovou aplikaci, a to vybírání náhodně orientovaných 2D dílů z kontejneru. Představena byla problematika, která s touto úlohou i pro její pochopení souvisí. Diskutovány byly možnosti strojového vidění, variabilita efektorů a v neposlední řadě možnosti průmyslových robotů.

Pro potřeby práce byl navržen a fyzicky vytvořen experimentální stůl pro snímání pole a specifický kontejner bez dna (reálně možnost s průhledným dnem) pro manipulované díly. Ke stolu byl přidán držák kamery, na kterém byla kamera umístěna s flexibilní možností změny výšky, případně středu vůči kontejneru. Plocha snímacího pole byla zhotovena z mléčného plexiskla, které částečně působilo jako difuzér při podsvětlení. Experimenty byly provedeny jak s přísvitem červeným světlem, ze směru objektivu kamery, tak s podsvětlením stolu, což byl důvod pro specifický návrh kontejneru.

Další část práce byla věnována použité kameře a práci s ní. Použitou kamerou byla smart kamera Cognex In-Sight 2001-230 mini. Samotnou kameru bylo možné nastavovat ze dvou softwarů. První možností byl software od samotného výrobce kamery Cognex, druhou možností bylo nastavení kamery v RobotStudios, tedy software pro programování a simulaci robotů ABB. Při práci s kamerou se nastavovali různé parametry – spoušť, zaostření, blesk, další kalibrace, z nichž některé byly laděny experimentálně. Dále pro potřebu zpracování obrazu byly nastavovány vzory, podle kterých byly díly identifikovány a vybírány. V neposlední řadě byly ukázány inspekční nástroje, které slouží k lepšímu rozeznávání dílů.

V experimentální části práce byly pro účel manipulace zvoleny tři díly, které lze považovat za dobře reprezentativní. Díl s označením A byl polotovár příruby, v podstatě symetrický kvádr s délkami stran 50,16 mm, výškou 14 mm a dírou o průměru 25 mm uprostřed. Dalšími dvěma experimentálními díly byl imbusový klíč velikosti 5 označený jako díl B1 a imbusový klíč velikosti 4 označený jako díl B2.

Primárním experimentem bylo rozměrové měření dílů A a B1 kamerou ve dvou režimech osvětlení, s horním přísvitem a s podsvětlením. Uveďme, že horní přísvit byl veden z osy kamery a vzhledem k povrchu dílů nepředstavoval zásadní problém možný odraz. Při měření dílu A byl tento díl pokládán po celé snímací ploše (ploše kontejneru). Výsledek měření potvrdil předpoklad, že čím byl díl blíže středu, tím bylo měření přesnější. Dále bylo zjištěno a statisticky potvrzeno, že měření s podsvětlením bylo přesnější pro díl A než měření s přísvitem. Proto se v dalších experimentech s tímto dílem používalo podsvětlení. Stejně měření proběhlo i s dílem B1, s tím rozdílem, že díl byl podkládán ve zjednodušeném schématu (do rohů a doprostřed). Opět bylo potvrzeno, že čím je díl dále od středu, tím je přesnost měření menší. Výsledky měření rozměrů vzhledem k přísvitu, či podsvitu byly těsnější, přesto bylo na úrovni statistiky potvrzeno přesnější měření s přísvitem. Proto bylo pro snímání, resp. Manipulaci s díly B1 a/nebo B2 užito přísvitu.

Dále následovaly manipulační experimenty označené jako druhý, třetí a čtvrtý. V druhém experimentu se prováděl výběr dílu A z kontejneru s podsvětlení. Uvedme, že podle dílu byly navrženy čelisti, kterými se tento díl vybíral. Tyto čelisti byly navrženy tak, aby bylo možné vybrat díl z každé pozice v kontejneru. Proto tyto čelisti byly vyoseny mimo efektor. Úchopovým místem dílu A byla středová díra, za kterou se díl vybíral. Další částí bylo nastavení kamery a vzoru (proces zpracování obrazu, Cognex), podle kterého se daný díl vybíral. Následovalo samotné řešení, které bylo rozděleno do dvou částí. V první části proběhla inicializace systému. V této části byl do kamery nahrán soubor s naším dřívějším nastavením kamery. Dále proběhla kalibrace efektoru a najetí robota do výchozí pozice. V druhé části probíhala detekce dílu a následné vybrání detekovaného dílu a odložení na požadované místo. Čas detekce dílu smart kamerou se pohyboval kolem hodnoty 200 ms. Po detekci byly do robota poslány pouze souřadnice dílu bez rotace dílu. Rotace nebylo v tomto případě potřeba posílat proto, že díl je symetrický. Byla vytvořena automatická bezkolizní cesta pro robota. Pro výběr dílu byl použit kolaborativní robot Yumi, jak již bylo uvedeno. Rychlosti vybírání pro daný experiment jsou uvedeny v tabulce 7. Čas na vyzvednutí jednotlivých dílů logicky závisel na jejich poloze.

Ve třetím experimentu se vybíral z kontejneru díl B1. Tento díl byl o poznání složitější na vyzvednutí než díl A. Pro díl B1 i díl B2 byly nahrnuty čelisti, které jsou schopny vyzvednout oba díly. Tyto čelisti byly také vyoseny mimo efektor. Uchopovací místa na dílech B1 i B2 byla dvě. První uchopovací místo bylo voleno 2 cm od delšího konce a druhé uchopovací místo bylo voleno obdobně od ohybu. Tato volba byla nutná z důvodu bezkolizní cesty robota. Inicializace proběhla stejně jako v druhém experimentu s tím, že teď byly nastaveny dva vzory pro výběr dílu. Bylo to proto, že díl může ležet na dvou stranách (ve smyslu levotočivý, pravotočivý). Standardně následovala detekce, vyzvednutí a položení dílu. Čas detekce tohoto typu dílu se pohyboval okolo 500 ms. Delší čas detekce byl zjevně zapříčiněn vyhledávání dvou tvarů, navíc geometricky složitějších než v případě dílu A. Po detekci dílu byly z kamery poslány informace o poloze a natočení dílu. Následovalo automatické vyzvednutí daného dílu z kontejneru a odložení na požadovanou pozici. Poznamenejme, že odložení dílu bylo provedeno do krabičky vedle kontejneru. Orientace dílů položených do krabičky byla taková, že díly byly orientovány jedním směrem. Rychlosti vybírání pro daný experiment můžeme vidět v tabulce 7. Jednotlivé časy manipulace byly závislé jak na x-y pozici dílu v kontejneru, tak na jeho natočení.

Čtvrtým experimentem bylo rozšíření třetího experimentu směrem k praktické flexibilitě. Tento experiment realizoval výběr dvou podobných dílů, a to dílů B1 a B2. K výběru dílu byly použity čelisti pro třetí experiment. Taktéž proběhla inicializace jako v předešlých experimentech. Nastavení kamery proběhlo stejně s tím, že se ještě přidaly další dva vzory. Ve výsledku kamera potom rozeznávala čtyři vzory, tedy po dvou pro každý díl (dle orientace, jak již bylo uvedeno). S přidáním dalších vzorů se prodloužil čas detekce dílu v podstatě lineárně, tj. na 1 s. Při výběru dílu z kontejneru byla také navržena automatická bezkolizní cesta. Opět poznamenejme, že odkládání dílů probíhalo tak,

že díly B1 byly pokládány do jedné krabičky a díly B2 do druhé krabičky. Díly byly pokládány do krabiček stejným směrem. Rychlosti vybírání pro daný experiment můžeme vidět v tabulce 7. Na prodloužení času výběru dílu se promítlo jak prodloužení doby detekce jednotlivých dílů, tak delší cesta při třídění dílů, či pozice a orientace při při výběru dílu. V ohledu provedených experimentů je pro úplnost třeba uvést dvě skutečnosti:

- Objektů A, či B1, či B1 a B2 bylo v rámci jednoho výběru z kontejneru do 8 kusů.
- V experimentech bylo zajištěno bezkolizní položení objektů, tj. nepřekrývali se, ani se nedotýkaly. Při tomto uspořádání byl systém 100% spolehlivý s testovaným opakováním 20 výběrů.

Tab. 7: Porovnání rychlostí výběru dílů v jednotlivých experimentech

	Průměrný výběr jednoho dílu [s]	Nejrychleji vybraný díl [s]	Nejpomaleji vybraný díl [s]
Druhý experiment	14,5	13	17
Třetí experiment	17	14	22
Čtvrtý experiment	18,34	15	26

Závěrem bych chtěl konstatovat, že dosažené výsledky jsou po drobných úpravách přenositelné na další typy dílů. Systém může být modifikován pro přesnější měření dílů, tedy v důsledku rozšíření o přímé vyhodnocení zmetkovitosti součástí. Čas manipulace lze pochopitelně snížit využitím rychlejšího robotu, kooperací obou chapadel robotu YuMi apod. Pokračování této diplomové práce by se mohlo ubírat směrem použití a otestování jiné kamery pro detekci dílů, jinými možnostmi osvětlení, změnou vybíraných dílů a pochopitelně i volbou jiného robotu. Dále by mohlo být řešeno omezení tohoto systému, a to uložení dílů přes sebe.

Variant do budoucnosti je zjevně mnoho, a tak v závěru přeji svému případnému pokračovateli úspěšný vývoj a praktické aplikace v uvedeném směru. Aplikace, které posunou danou disciplínu pokročilé a adaptivní robotické manipulace vyvíjené na ÚAI ku předu tak, jak vypracování této práce posunulo mé obzory a dovednosti, což považuji za nepsaný, ale pro mne bezesporu rovněž důležitý výsledek této práce.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] JAIN, Ramesh a Rangachar KASTURI. *Machine vision*. Boston: McGraw-Hill, 1995. ISBN 00-703-2018-7.
- [2] HAVLE, Otto. Strojové vidění I: Principy a charakteristiky. *Automa*. 2008, **2008**(1), 4.
- [3] *Techopedia* [online]. [cit. 2023-03-09]. Dostupné z: <https://www.techopedia.com/definition/30414/machine-vision-system-mvs>
- [4] STEGER, Carsten, Markus ULRICH a Christian WIEDEMANN. *Machine Vision Algorithms and Applications*. 2nd. Německo: Wiley-VCH., 2018. ISBN 978-3-527-41365-2.
- [5] *Kamerový senzor IV2: Keyence* [online]. [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.keyence.eu/cscz/products/vision/vision-sensor/iv2/>
- [6] Strojové vidění. *BR-automation* [online]. [cit. 2023-03-14]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/cs/produkty/strojove-videni/>
- [7] HAVLE, Otto. Přehled trhu: inteligentní kamery. *Automa*. 2009, **2009**(5), 3.
- [8] *Počítač strojového vidění: Onlogic* [online]. [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.onlogic.com/solutions/machine-vision-computers/>
- [9] Laserové triangulační snímače. *Automa* [online]. 2013, **2013**(12), 2 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/10894.pdf
- [10] 3D skenery pro použití v průmyslu. *Automa* [online]. 2015, **2015**(12), 4 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/54325.pdf
- [11] GENG, Jason. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics* [online]. 2011, **3**(2), 33 [cit. 2023-03-29]. ISSN 1943-8206. Dostupné z: doi:10.1364/AOP.3.000128
- [12] 3D machine vision – technical basics and challenges. In: *Stemmer imaging* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/knowledge-base/3d-machine-vision/>
- [13] Blokové schéma interferometru. In: *Optické metody měření 3D objektů* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/05023/image016.jpg>
- [14] OSHA Technical Manual (OTM) Section IV: Chapter 4. In: *United State Department of labor* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://www.osha.gov/otm/section-4-safety-hazards/chapter-4#cartesian>

- [15] ČERNOHORSKÝ, Josef. *ZÁKLADY ROBOTIKY Kinematika a topologie robotů* [online]. In: . [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/43156364-Zaklady-robotiky-kinematika-a-topologie-robotu.html>
- [16] THE TOP SIX TYPES OF INDUSTRIAL ROBOTS IN 2020. In: *Diy robotics* [online]. [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://diy-robotics.com/blog/top-six-types-industrial-robots-2020/>
- [17] Cylindrical Robots. In: *Industrial-Electricity* [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: https://www.industrial-electronics.com/industrial-electricity-com/4_Cylindrical_Robots.html
- [18] The Kawasaki-Unimate 2000. In: *Kawasaki robotics* [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: https://robotics.kawasaki.com/en1/anniversary/history/history_02.html
- [19] Delta robots. In: *BR-automation* [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.br-automation.com/cs/produkty/machine-centric-robotics/roboticke-portfolio/maximum-performance-with-delta-robots/>
- [20] SCARA robot. In: *Fanuc* [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/scara-series/scara-sr-3ia>
- [21] TX2-90. In: *Staubli* [online]. [cit. 2023-04-13]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/cz/en/robotics/products/industrial-robots.html>
- [22] Cobot. In: *Diy robotics* [online]. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://diy-robotics.com/topics/cobot/>
- [23] Lehký kolaborativní robot CRX-10iA. In: *Fanuc* [online]. [cit. 2023-04-17]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/kolaborativn%C3%AD-roboty/crx-10ia>
- [24] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [25] MATIČKA, Robert a Jaroslav TALÁCKO. *Mechanismy manipulátorů a průmyslových robotů*. 2., přeprac. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1991. ISBN 80-030-0567-1.
- [26] PARÁK, Roman. *Lecture 3: Programming for robots and manipulators* [online]. In: . [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://github.com/rparak/Programming-for-robots-and-manipulators-VRM/blob/main/Lecture/3/Lecture_3.pdf
- [27] EGP. In: *Schunk* [online]. [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://schunk.com/de/en/gripping-systems/parallel-gripper/egp/c/PGR_1593

- [28] ABB v Česku otevírá výrobní a vývojové centrum robotiky. In: *Energy Hub* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://cz.energyhub.eu/en/articles/627122/abb-v-cesku-otevira-vyrobni-a-vyvojove-centrum-robotiky>
- [29] Magnetická chapadla. In: *Schunk* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: https://schunk.com/cz/cs/uchopovaci-systemy/magneticka-chapadla/emh/c/PGR_4313
- [30] Vakuová chapadla. In: *Průmyslové spektrum* [online]. [cit. 2023-04-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/robot-pomocnik-s-lidskou-tvari>
- [31] FlexShapeGripper. In: *Festo* [online]. [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: https://www.festo.com/us/en/e/about-festo/research-and-development/bionic-learning-network/highlights-from-2015-to-2017/flexshapegripper-id_33444/
- [32] In-Sight 2000 Mini Vision Sensor Features. In: *Cognex* [online]. [cit. 2023-05-09]. Dostupné z: <https://www.cognex.com/products/machine-vision/vision-sensors/in-sight-2000-mini>

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma obecného senzoru [2].....	15
Obr. 2: Systém strojového vidění [4]	16
Obr. 3: Příklad kamerového senzoru (Keyence) [5]	17
Obr. 4: Příklad inteligentní kamery s integrovaným osvětlením (B+R automation, ABB) [6]	18
Obr. 5: Blokové schéma inteligentní kamery [7].....	18
Obr. 6: Příklad PC systému [8].....	19
Obr. 7: Příklad měřicího triangulačního snímače [9].....	20
Obr. 8: Zjednodušený princip stereovidění [10]	21
Obr. 9: Princip použití strukturovaného světla [11].....	22
Obr. 10: Princip použití interferometrie bílým světlem [13].....	22
Obr. 11: Příklad kartézského robota [15]	23
Obr. 12: Příklad cylindrického robota [17]	24
Obr. 13: Příklad sférického robota (Kawasaki) [18].....	24
Obr. 14: Příklad delta robota (ABB) [19].....	25
Obr. 15: Příklad SCARA robota (Fanuc) [20].....	25
Obr. 16: Příklad 6-osého robota TX-90 (Fanuc) [21]	26
Obr. 17: Příklad kolaborativního robota [23]	26
Obr. 18: Příklad elektrického efektoru s čelistmi (Schunk) [27].....	28
Obr. 19: Příklad pneumatického efektoru s průmyslovým robotem [28].....	28
Obr. 20: Příklad magnetického efektoru (Schunk) [29]	29
Obr. 21: Příklad podtlakového efektoru, savka (Schunk) [30]	29
Obr. 22: Příklad efektoru inspirovaného chameleonem (Festo) [31].....	30
Obr. 23: Druhá varianta snímacího pole.....	31
Obr. 24: Třetí varianta snímacího pole.....	32
Obr. 25: Realizace finální verze snímacího pole (výškově nastavitelné snímací pole i kamerový držák)	32
Obr. 26: Model kontejneru pro vybírání dílů.....	33
Obr. 27: In-Sight 2000 mini [32]	35
Obr. 28: Software In-Sight pro konfiguraci kamery	36
Obr. 29: Nastavení kamery	36
Obr. 30: Nastavení zaostření kamery	37
Obr. 31: Nastavení blesku	37
Obr. 32: Možnosti z nastavení kamery.....	38
Obr. 33: Kalibrace pomocí nástroje X/Y Edge to Edge	38
Obr. 34: Nástroje pro vyhledávání dílů	39
Obr. 35: Použití vyhledávacího nástroje pattern.....	39
Obr. 36: Skupiny nástrojů pro kontrolu dílu.....	40
Obr. 37: Nástroje ve skupině prezence/absence	41
Obr. 38: Nástroje ve skupině měření.....	41

Obr. 39: Nástroje v počítačí skupině	42
Obr. 40: Nástroje ze skupiny geometrie	43
Obr. 41: Nástroje ze skupiny matematika a logika	43
Obr. 42: Nástroje ze skupiny vykreslování.....	44
Obr. 43: Nastavení mapování kamery	44
Obr. 44: Díl A (polotovár příruby) s rozměry.....	45
Obr. 45: Díl B1(imbusový klíč 5) s rozměry	45
Obr. 46: Díl B2 (Imbusový klíč 4) s rozměry.....	46
Obr. 47: Rozložení měřených míst pro první díl.....	46
Obr. 48: Nastavení nástrojů při měření dílu A	47
Obr. 49: Porovnání rozměru a1 a a2 při měření s přísvitom i s podsvětlením.....	48
Obr. 50: Graf závislost přesnosti rozměru a1 na poloze s podsvětlením	48
Obr. 51: Graf závislost přesnosti rozměru a2 na poloze s podsvětlením	49
Obr. 52: Rozložení měřených míst pro díl B1	49
Obr. 53: Nastavení nástrojů pro měření jednotlivých rozměrů pro druhý díl.....	50
Obr. 54: Graf závislost přesnosti rozměru délky na poloze s přísvitom i s podsvětlením.....	51
Obr. 55: Graf závislost přesnosti rozměru šířky na poloze s přísvitom i s podsvětlením.....	51
Obr. 56: Graf závislost přesnosti rozměru průměru na poloze s přísvitom i s podsvětlením.....	51
Obr. 57: Návrh čelistí pro vybírání dílu A z kontejneru.....	52
Obr. 58: Uchycení dílu A speciálně upravenými čelistmi.....	52
Obr. 59: Nastavení vybírací vzoru pro druhý experiment	53
Obr. 60: Základní vývojový diagram výběru z kontejneru.....	54
Obr. 61: Body pro kalibraci kamery vůči robotu	55
Obr. 62: Návrh čelistí pro vybírání dílu A z kontejneru.....	58
Obr. 63: Uchycení dílu B1 čelistmi.....	58
Obr. 64: Nastavení vzoru pro vybírání dílu B1 z kontejneru.....	59
Obr. 65: Graf závislosti quaternionu na úhlu natočení dílu.....	60

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

2D	Druhá dimenze
3D	Třetí dimenze
A/D	Analogově-digitální převodník
CCD	charge-coupled device – zařízení s vázaným nábojem
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor – Komplementární kovový oxid-polovodič
HMI	Human Machine Interface – rozhraní člověk-stroj
I/O	Input/Output – vstup/výstup
MAC	Media Access Control – Řízení přístupu k médiím
PLC	Programmable Logic Controller – programovatelný logický automat
RAM	Random Access Memory – Paměť s náhodným přístupem
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm – kloubové robotické rameno pro montáž

SEZNAM TABULEK

Tab. 1:	Kategorie 2D strojového vidění s charakteristikami [2].....	17
Tab. 2:	Výrobní technologie, ve kterých se používají průmyslové roboty.....	23
Tab. 3:	Měření dílu A s podsvětlením.....	47
Tab. 4:	Měření dílu A s přísivitem.....	47
Tab. 5:	Výsledky měření dílu B1 s podsvětlením.....	50
Tab. 6:	Výsledky měření dílu B1 s přísivitem.....	50
Tab. 7:	Porovnání rychlostí výběru dílů v jednotlivých experimentech.....	63

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1: Programy pro jednotlivé experimenty