VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH KAMEROVÉHO SYSTÉMU S PRŮMYSLOVÝM ROBOTEM KUKA

DESIGN OF A VISION SYSTEM WITH KUKA ROBOT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE Bc. JAKUB RUSNÁK

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. TOMÁŠ KUBELA

SUPERVISOR

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Jakub Rusnák

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní stroje, systémy a roboty (2301T041)**

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:

Návrh kamerového systému s průmyslovým robotem Kuka

v anglickém jazyce:

Design of a vision system with Kuka robot

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem je seznámit se s možnostmi strojového vidění v souvislosti s průmyslovými roboty Kuka a vytvořit prakticky orientovanou demonstrační aplikaci.

Cíle diplomové práce:

(1) Seznamte se s kamerovým systémem SICK IVC 2D, jeho možnostmi programování a možnými způsoby komunikace s průmyslovými roboty Kuka.
(2) Zaměřte se na problém snímání většího počtu různých objektů, jejich správné identifikace a třídění pomocí průmyslového robotu.
(3) Vytvořte demonstrační aplikaci na průmyslovém robotu Kuka KR 3.

Seznam odborné literatury:

[1] L. Sciavicco, B. Siciliano: Robotics Modelling, Planning and Control. Springer London, 2008
[2] PIRES, J. N. Industrial Robots Programming: Building Applications for the Factories of the Future. Springer, 2007. 282 s. ISBN 978-0-387-23325-3
[3] WOLF, A., STEINMANN, R. SCHUNK, H. Grippers in Motion: The Fascination of Automated Handling Tasks. Springer, 2005. 242 s. ISBN 978-3-540-27718-7

Vedoucí diplomové práce: Ing. Tomáš Kubela

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 14.1.2011

L.S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D. Ředitel ústavu	prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc. Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bc. Jakub Rusnák
NÁVRH KAMEROVÉHO SYSTÉMU S PRUMYSLOVÝM ROBOTEM KUKA
Diplomová práce, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky, 2011.

Diplomová práce pojednává o využití strojového vidění s roboty KUKA v oblasti identifikace a manipulace většího počtu různých objektů. V úvodní a teoretické části práce je popsán současný stav a možnosti systémů průmyslového vidění na trhu. Součástí práce je také demonstrační aplikace zabývající se rozpoznáním objektů (mincí) kamerovým systémem SICK IVC 2D, a jejich následné roztřídění průmyslovým robotem KUKA KR 3. V aplikaci je dále řešena síťová komunikace kamery s robotem přes PLC, programování robotu v jazyce KRL a program rozpoznávání prvků v prostředí IVC Studio.

Klíčová slova:
průmyslové vidění, inteligentní kamera, robot KUKA, rozpoznávaní objektů, třídění objektů

ABSTRACT

Bc. Jakub Rusnák
DESIGN OF A VISION SYSTEM WITH KUKA ROBOT
Master's thesis, Institute of Production Machines, Systems and Robotics, 2011.

Diploma thesis deals with applications of vision system with KUKA robot in field of identification and sorting bigger amount of different objects. Introductory and theoretical part of the thesis describes present situation on industrial vision systems market and their usage. Diploma thesis include practical application of object (coin) recognition with SICK IVC 2D vision system and their sorting by industrial robot KUKA KR 3. Application is also concerned with network communication between camera and robot via PLC, programming in KRL language and programm for object recognition in IVC Studio.

Key worlds:
Industrial vision, smart camera, KUKA robot, object recognition, object sorting

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

RUSNÁK, J. *Návrh kamerového systému s průmyslovým robotem Kuka.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Kubela.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Návrh kamerového systému s průmyslovým robotem Kuka* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Tomáše Kubely a uvedl v seznamu literatury všechny použité literární a odborné zdroje.

V Brně dne 27. května 2011

.....
Bc. Jakub Rusnák

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat především ing. Tomáši Kubelovi za jeho čas a cenné rady při řešení a tvorbě této diplomové práce.

OBSAH

ABSTRAKT
BIBLIOGRAFICÁ CITACE
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ
PODĚKOVÁNÍ
OBSAH
ÚVOD 11
1. STROJOVÉ VIDĚNÍ 12
1.1. VÝHODY, NEVÝHODY A UPLATNĚNÍ STROJOVÉHO VIDĚNÍ 12
1.2. HARDWAROVÉ USPOŘÁDÁNÍ KAMEROVÉHO SYSTÉMU 13
1.2.1. OSVĚTLENÍ A SVĚTELNÉ ZDROJE 14
1.2.2. SNÍMACÍ PRVEK 16
1.2.3. OPTIKA A KALIBRACE 18
1.3. ROZDĚLENÍ KAMEROVÝCH SYSTÉMŮ 20
1.3.1. KAMEROVÉ SENZORY (VISION SENSORS) 20
1.3.2. PC SYSTÉMY (PC BASED VISION SYSTÉM) 21
1.3.3. INTELIGENTNÍ KAMERY (SMART CAMERAS) 22
1.3.4. KOMPAKTNÍ SYSTÉMY (COMPACT VISION SYSTEMS) 23
1.3.5. EMBEDDED SYSTÉMY 23
1.3.6. 2D SYSTÉMY 23
1.3.7. 3D SYSTÉMY 24
1.4. SMART KAMERA IVC-2DM1122 25
1.5. PROGRAMOVACÍ PROSTŘEDÍ IVC STUDIO 3.1 26
2. DEMONSTRAČNÍ APLIKACE 28
2.1. POPIS ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY 28
2.2. KONCEPCE PRACOVIŠTĚ 30
3. NÁVRHY KONCEPCE ŘEŠENÍ 31
3.1. ŘEŠENÍ KOMUNIKACE 31
3.2. INSPEKČNÍ PROGRAM 34
3.2.1. ROZBOR LOKAČNÍCH INSPEKČNÍCH NÁSTROJŮ 34
3.2.2. ZJIŠTĚNÍ ZCELA PŘEKRÝVAJÍCÍCH SE MINCÍ 36
3.2.3. MOŽNOSTI POSTUPNOSTI IDENTIFIKACE OBJEKTŮ 39
4. VLASTNÍ ŘEŠENÍ DEMONSTRAČNÍ APLIKACE 41

4.1. NÁVRH INSPEKČNÍHO PROGRAMU 42
4.1.1. KALIBRACE 45
4.1.2. INSPEKCE 46
4.1.3. URČENÍ PŘEKRYTÍ 49
4.1.4. ODESLÁNÍ DAT 51
4.2. PROGRAM KUKA KR3 52

ZÁVĚR 53
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 54
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK 57
SEZNAM ZDROJŮ OBRÁZKŮ 58
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK 60
SEZNAM PŘÍLOH 61

ÚVOD

Moderní trendy v průmyslové výrobě směřují ke stále většímu množství automatizace ve výrobních linkách. To je způsobeno, jak potřebou kvalitní a nepřetržité výroby, tak požadavkem na oproštění pracovníku od fyzicky i psychicky náročné práce, vedoucí k nepřesnostem a chybám. Klíčovým krokem v řešení tohoto problému je nasazení průmyslových robotů a manipulátorů do výrobního procesu. Výroba se tak stává z dlouhodobého hlediska efektivnější a rentabilnější.

V posledních letech se kladou stále vyšší náklady na kvalitu výsledného produktu a je zaváděna tzv. totální kontrola. Výrobky a jejich části procházejí velkou řadou kontrol, a to pro každý jednotlivý kus. Ve větších sériích je téměř nemožné této kontroly docílit za použití lidského personálu. V kombinaci s prudkým rozvojem snímací a výpočetní techniky počátkem 21. století, situace dala podmět k výraznému rozvoji odvětví strojového vidění. V dnešní době je již provádění vizuálních inspekcí ve výrobních linkách běžnou praxí.

Spojení strojového vidění s průmyslovými roboty otevírá nové možnosti pro průmyslovou praxi. S inteligentní kamerou, jako snímacím a výpočetním prvkem, a průmyslový robotem, jako prvkem manipulačním či obráběcím, je možné tento systém použít pro nejrozmanitější úkony. Aplikace od identifikace a manipulace objektů, rozpoznání a obrobení součásti nebo jejích vad, a další předurčují tyto systémy do oblasti menších sérií, kde se dá využít jejich flexibility. Současné tendence výrobců průmyslových robotů a kamerových systémů to potvrzují.

Cílem této diplomové práce je seznámit se s kamerovým systémem SICK IVC 2D a vytvořit demonstrační aplikaci. Aplikace je určena k rozpoznání a třídění náhodně rozmístěného počtu různých objektů. Předmět demonstrační aplikace vychází z běžného požadavku průmyslové praxe na třídění součástí z předešlého procesu výroby.

Obr. 1 Inspekce náhodně rozmístěných objektů

1. STROJOVÉ VIDĚNÍ [1,2]

Rozvoj výpočetní techniky v 70. letech 20. století dosáhl úrovně umožňující zpracovávat dostatečný objem dat pro práci s obrazovou informací, to vyústilo ve vznik nového oboru s názvem počítačové vidění (computer vision). Tento obor se obecně zabývá automatizovanou činností, která vychází z informací získaných na základě rozboru obrazové informace pořízené snímacím prvkem (kamerou). Strojové vidění (machine vision) je pak využití počítačového vidění v průmyslové automatizaci, kde se nezabývá pouze samotným získáním informací z obrazu, ale jejich předávání jiným automatizovaným zařízením starajících se o výrobní proces.

Strojové vidění v průmyslové výrobě doznalo největší rozmach začátkem 21. století, což bylo zapříčiněno přeorientováním marketingu firem na maximální kvalitu a s tím spojenou totální kontrolu výrobků. Toto bylo dále podpořeno přechodem snímacích prvků z analogových na digitální, spolu s velkým výpočetním výkonem současných procesorů.

1.1. VÝHODY, NEVÝHODY A UPLATNĚNÍ STROJOVÉHO VIDĚNÍ [1,4]

Obecnou výhodou strojového vidění je značné přispění ke zvýšení kvality, spolu se snižováním nákladů. Toho je docíleno díky vlastnostem strojového vidění:

- Rychlost – sejmutí a vyhodnocení obrazu je rychlejší než mechanické měření vyžadující přiložení měřidel či kalibrů a jejich odečítání.
- Univerzálnost – systém umožňuje provádět několik kontrol či měření najednou.
- Bezkontaktnost – není potřeba se dotýkat měřené součásti, tudíž lze přesně měřit i měkké a poddajné materiály.
- Automatizovanost – systém umožňuje přímou komunikaci s periferiemi, zařízeními nebo nadřazeným výrobním systémem.
- Flexibilnost – při změně sortimentu výroby je změněn pouze inspekční program, popřípadě nastavení osvětlení a optiky.

Nevýhodami jsou vysoké počáteční náklady spojené s nákupem, instalací a kalibrací kamerového systému, které ovšem v dlouhodobějším měřítku mají výraznou návratnost. Dále pak spojené náklady na odborné zaškolení obsluhy.

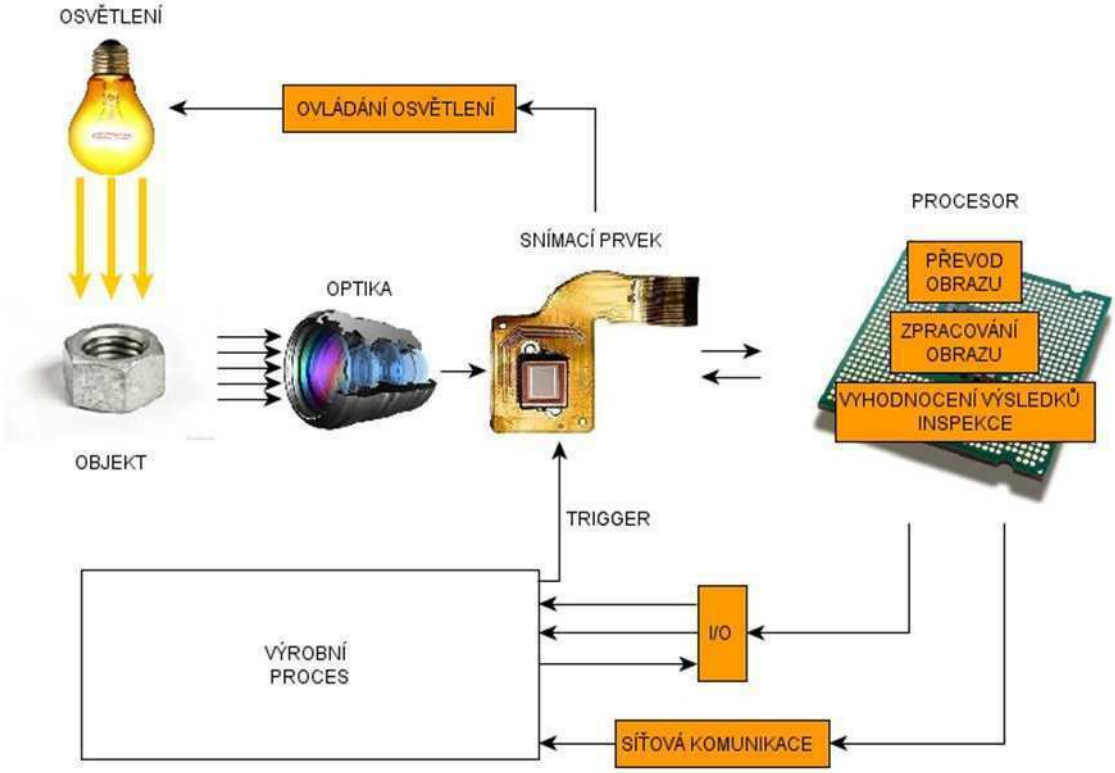
Z těchto důvodů se strojové vidění v dnešní době uplatňuje zejména v následujících oblastech:

- Čtení a verifikace kódů – identifikace součástí podle čárových, matrixových nebo jiných kódů a značek jak před montáží pro ověření správnosti součásti tak pro identifikaci finálního výrobku pro expedici.
- Kontrola sestavení a montáže – kontrola zda jsou přítomny veškeré díly ve správných polohách a orientacích, popřípadě pořadí vložení při montáži.
- Kontrola úplnosti a zabalení - zejména v potravinářském a farmaceutickém průmyslu kontrola správnosti a úplnosti objektů v obalu, zjištění počtu prvků na paletě.

- Rozpoznání polohy – (aplikace pick & place) po kalibraci systémů souřadnic vyhodnocení polohy volných prvků a předání informací pro další polohování.
- Identifikace barev – náhrada nákladné spektrometrie, kontrola nátěrů, kontrola čerstvosti potravin.
- Kontrola povrchů a potisků – vady nátěrů, mechanické poškození hran, poškrábání, kontrola etiket a obalů, posouzení vrstvy lepidla.
- Čtení textů – možnost zjištění data spotřeby lze předejít expedici prošlých výrobků, kontrola správnosti obsahu v závislosti na etiketě.
- Nalezení vad opracování – otřepy, nedokonalosti výlisků, kontrola napájení spoje v elektrotechnice.
- Měření a kontrola tolerancí
- Testování funkce, cejchování měřidel – vizuální kontrola ukazatele měřidla vzhledem naměřené veličině, automatická kontrola displejů.

1.2. HARDWAROVÉ USPOŘÁDÁNÍ KAMEROVÉHO SYSTÉMU [1, 3]

Kamerové systémy můžeme rozdělit do různých kategorií (viz. Kap. 1.3), které však využívají stejných základních principů získání obrazu a k tomu sloužících hardwarových komponent. Na Obr. 2 je schematicky znázorněno základní uspořádání těchto komponent.



Obr. 2 Schéma zapojení hardwaru [36,37,38,39,40]

1.2.1. OSVĚTLENÍ A SVĚTELNÉ ZDROJE [3, 5, 6]

Osvětlení v kamerovém systému je jeden z nejdůležitějších prvků systému. Osvětlení je nejlevnější a nejflexibilnější komponentou kamerového systému strojového vidění, ale přesto jej ovlivňuje nejpodstatnější měrou. Z tohoto důvodu je potřeba věnovat jeho výběru a nastavení patřičnou pozornost. Jeho cílem je maximálně zvýšit kontrast snímaného prvku a zároveň minimalizovat kontrast v oblastech obrazu mimo zájem (mimo snímaný prvek).

Volba osvětlení závisí na charakteru snímaného objektu a scény. Za charaktery snímané scény považujeme vlastnosti osvětlení externího prostředí (denní svit, osvětlení zářivkami na provozní hale apod.), dynamiku scény tzn., zda jsou objekty vyskytující se na scéně statické či se pohybují a s jakou rychlostí. Dále pak jestli se tyto parametry v průběhu času mění. Charakter snímaného objektu je materiál povrchu (odrazivost, absorpce světla), struktura povrchu (matný, leštěný) a barva objektu. Při volbě osvětlení se také bere v potaz typ snímacího prvku a jeho spektrální citlivost (viz. Kap. 1.2.2).

V současné době jsou pro průmyslové aplikace strojového vidění nejčastěji používány následující typy světelných zdrojů:

- Fluorescenční zdroje – Výhodami jsou husté světelné spektrum, vhodné pro bílé světlo a rozpoznávání barev, vysoce efektivní, snadné tvarovatelné trubice do požadovaného tvaru, velká variabilita barev pro různé plnící plyny. Nevhodné pro dynamické aplikace vzhledem ke kmitání světla v závislosti na frekvenci sítě (změna svítivosti v čase), malá životnost
- Halogenové zdroje – mají dlouhou životnost, jsou efektivní, odolné vůči vibracím (nemají vlákno), nevýhodou je dlouhý čas pro rozsvícení (drift), tudíž nevhodné pro časté spínání, nutnost přídavné elektroniky pro odpalování a limitaci proudu.
- LASER – Výhodou je monochromatické (pouze jedna vlnová délka), koherentní (všechny vlny ve stejné fázi) a kolimované světlo (nerozptýlené světlo v jednom směru), osvětlení velmi malé oblasti nebo tenké čáry, velmi vysoká intenzita. Nejčastěji využívané pro 3D systémy (viz. Kap. 1.3.7)
- Metal-Halidové zdroje (výbojky) – velmi zářivé, homogenní světelné spektrum, práce až do 300°C, práce při malých proudech. Nevýhodami jsou krátká životnost, nevhodné pro rychlé spínání, náchylné vůči vibracím, závislost světlosti na proudu (nutnost stabilizovaného proudu), nutnost přídavné ochrany vzhledem k vyzařování UV paprsků.
- Xenonové zdroje – Výhody je extrémní svítivost, vysoká barevná teplota až 12 000K (nejlepší bílé spektrum), možnost zábleskového světla s vysokou opakovatelností 200Hz (1000Hz při snížení svítivosti), životnost 10^8 záblesků. Nevýhodou je vysoké operační napětí a s tím spojená rizika, drahé, objemné (potřeba skříně s generátorem světla), snižuje se intenzita světla v průběhu životnosti až o 50%
- LED (Light Emitted Diode) – Výhodami jsou vysoká životnost až 100 000 hodin (závisí na podmínkách svícení), necitlivé vůči vibracím, téměř monochromatické světlo, ideální kontrolovatelnost, záblesky možné ve všech barvách i infračerveně (IR), možnost osvětlení více barvami, volnost tvaru osvětlovače, nízká energetická náročnost, bezúdržbové, malý instalační

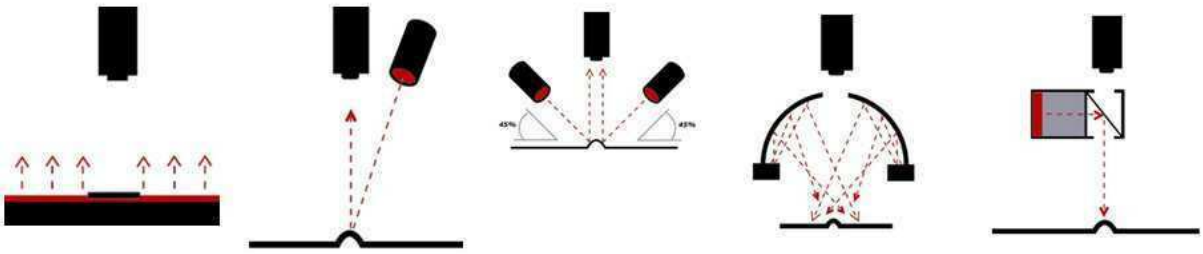
prostor. Nevýhodami jsou malá provozní teplota do 60°C, rychlé stárnutí bílých LED.

- Infračervené a ultrafialové osvětlení – Jedná se o osvětlení pro speciální aplikace a je potřeba k nim vybrat správný snímací prvek. Například infračervené světlo prochází plasty a používá se pro prosvětlování plošných spojů. Většina polymerů (včetně v průmyslu hojně užívaného nylonu) fluoreskuje pod ultrafialovým světlem, což se dá využít například pro kontrolu matic s nylonovým jištěním.

Z těchto zdrojů jsou v současnosti nejčastěji využívány fluorescenční, halogenové a LED zdroje. LED zdroje doznávají největšího uplatnění v průmyslové praxi a to zejména pro svou životnost, cenovou dostupnost, výbornou ovladatelnost, barevnou škálu a také snadné uspořádaní do požadovaných tvarů. Nejčastěji používané jsou červené LED v kombinaci s černobílými snímacími prvky nebo bílé LED v kombinaci s barevnými snímacími prvky. Pro návrh demonstrační aplikace řešené v této diplomové práci je použito červené LED osvětlení s černobílým snímacím prvkem (Obr. 3).

Obr. 3 červené LED světelné pole [41]

Podstatným faktorem je také samotná geometrie osvětlení [8,9,11,10,]. Níže jsou uvedeny nejužívanější typy geometrií pro LED osvětlení:



a) b) c) d) e)

Obr. 4 Gemetrie osvětlení – a) zadní osvětlení, b) částečné světlé pole, c) tmavé pole, d) difuzní dóm, e) difuzní osvětlení v ose [10]

- Zadní osvětlení (Obr. 4 a) – Užívá se pro získávání obrazů s výraznými kontrastními obrysy, často s monochromatickým zdrojem a polarizačním filtrem. Nevýhodou je pak možnost zobrazení pouze obrysů nikoliv barvy či potisku, velké zástavbový prostor.
- Světlé pole částečné (Obr. 4b) – Univerzální, levné, snadno nastavitelný směr. Nevýhodou jsou odlesky od součástí a nerovnoměrnost osvětlení, proto se

doporučuje jen pro nenáročné aplikace. Při nulovém úhlu hovoříme o koaxiálním osvětlení, které eliminuje stíny a je v převážné většině realizován jako kruhové s montáží na objektiv kamery.

- Temné pole (Obr. 4 c) – Nejméně používané navzdory vysokému kontrastu obrazu, nejčastěji pro zvýraznění reliéfů či malých vad, trhlin a prasklin. Nevýhodou je větší zástavbové prostory v blízkosti snímané oblasti.
- Difuzní osvětlení dóm (Obr. 4 d) – Osvětluje oblast ze všech směrů, tudíž potlačuje stíny a odlesky, převážně se používá pro inspekci nápisů a potisků. Nevýhodou jsou velké zástavbové rozměry (dóm musí pokrýt celou snímanou oblast či objekt).
- Difuzní osvětlení v ose (Obr. 4 e) – Je nejefektivnější osvětlení, rovnoměrně osvětluje, eliminuje stíny a odrazy. Paprsky světla dopadají i ze směru pod objektivem kamery. Nevýhodou je cena a omezené zorné pole.

1.2.2. SNÍMACÍ PRVEK [3,5,19,20,21,22,23,24,25]

Snímací prvek je nejdůležitější částí kamerového systému, je to „oko“ systému. Úkolem senzoru je zachytit reálný obraz prostředí, tvořený světelnými paprsky ve formě fotonů, a dále jej interpretovat v podobě informace rozpoznatelné výpočetními systémy, tj. elektrickou veličinou pro další zpracování.

Senzory mohou být analogové nebo digitální. Analogové senzory jsou díky rozmachu a cenové dostupnosti digitálních prvků na ústupu, stále se s nimi však můžeme setkat zejména ve starších aplikacích. Analogový výstup z kamery se pro účely dalšího zpracování digitalizuje a to přídavným hardwarem označovaným framegrabber.

Digitální senzory rozdělujeme do dvou hlavních kategorií 1D a 2D senzory. 1D senzory se nazývají čárové, mají jednu, popřípadě dvě až tři řady pixelů, Šířka senzoru udává šířku obrazu, délka obrazu je pak neomezená a je v praxi dána délkou snímaného objektu (objekt musí být v pohybu). Čárové senzory se používají pro kontinuální snímání dlouhých objektů například dřevěných desek, kmenů stromů apod. 2D nebo též plošné senzory mají pevně stanovenou šířku a délku při nejčastěji používaném poměru 4:3.

Snímací prvky se vyrábějí ve dvou provedeních CCD a CMOS.

- CCD – z anglického Charge Coupled Device, při dopadu fotonů na povrch pixelu jsou generovány elektrony formující elektrický náboj, který je následně posuvným registrem vyčítán ze všech pixelů a převádí na proud či napětí. CCD je charakterizován vlastností dynamický rozsah, který udává rozmezí mezi nejtmavší černou a nejjasnější bílou, kterou je senzor schopen rozpoznat. Dále šum vznikající parazitním „spodním nábojem“, při kterém se sejmutý tmavý bod jeví jako světlejší, je ovlivněn fyzickými vlastnostmi snímače a hlavně okolní zvýšenou teplotou. Blooming vzniká při přesvětlení obrazu, kdy přebytečný náboj jednoho pixelu přeteče na pixely okolní. Vinětace je způsobena vlastností CCD prvků, který je méně citlivý na světelné paprsky dopadající na něj pod úhlem, k čemuž dochází na okraji prvku a vzniká tak tmavší korona obrazu. Smear je způsoben přeskakováním náboje při vyčítání, v obraze pak vznikají světlé čáry, dá se snadno redukovat expozicí. Výhody jsou vyšší citlivost, maximální rozlišení, lepší poměr šumu

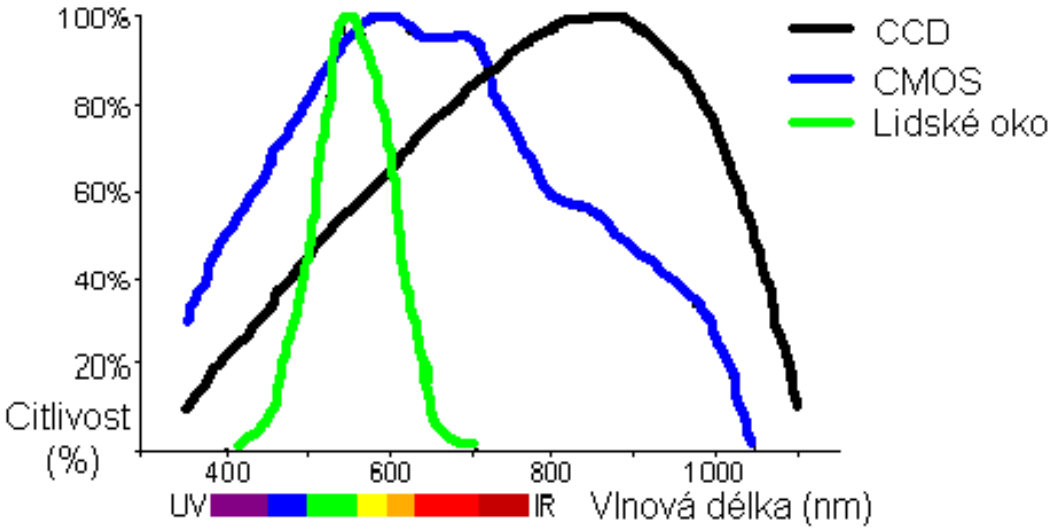
vůči signálu. Nevýhodou je pak vysoká cena daná speciální výrobou, větší rozměry a nemožnost integrace elektroniky přímo na čip.

- CMOS – z anglického Complementary metal-oxide semiconductor, na rozdíl od CCD nepřesouvá elektrický náboj při vyčítání, ale rovnou jej převádí na elektrické napětí přímo v pixelu. Výhodou je možnost vyčítání pouze požadovaných pixelů, což vede ke zvýšení rychlosti a efektivnosti aplikace. Jsou vysoce odolné vůči šumu, energeticky méně náročné a díky jednoduché výrobě levnější. Nevýhodou je pak menší plnící faktor pixelů a tím menší rozlišovací schopnost.

Senzory snímají pouze intenzitu světla nikoliv jeho barvu. Na Obr. 5 lze vidět rozdílné citlivosti CCD a CMOS prvku v porovnání s citlivostí lidského oka.

Pro snímání barev se využívá tzv. Bayerův filtr, což je mozaika filtrů kde před každým pixelem je filtr propouštějící pouze červené, modré nebo zelené světlo. Barevná hodnota jednotlivých pixelů se pak vypočítá z průměru okolních hodnot. Toto řešení je nejlevnější avšak snižuje rozlišovací schopnost prvku 3krát. Pro přesnější barevné aplikace se používá 3CCD snímač, u kterého je zařazena prizma rozdělující světelný tok do tří barev, ty jsou pak snímány třemi nezávislými snímači. Toto řešení je ovšem 3krát náročnější na přenesená data a je drahé vzhledem pracnosti výroby prizmy. Posledním řešením je FoveonX3 senzor, který se skládá ze 3 vrstev citlivých na rozdílné vlnové délky světla. Opět sebou nese trojnásobný objem dat.

V průmyslu se z důvodu menšího množství dat používají převážně senzory černobílé s 256 stupni šedi (8 bit). Detektory se vyrábějí v množství variant lišících se rozlišením, nejčastěji 640x480 a 1024x768 až do 50 Mpix, a velikostí senzoru což následně ovlivňuje velikost optiky. Menší senzory vyžadují přesnější optiku.

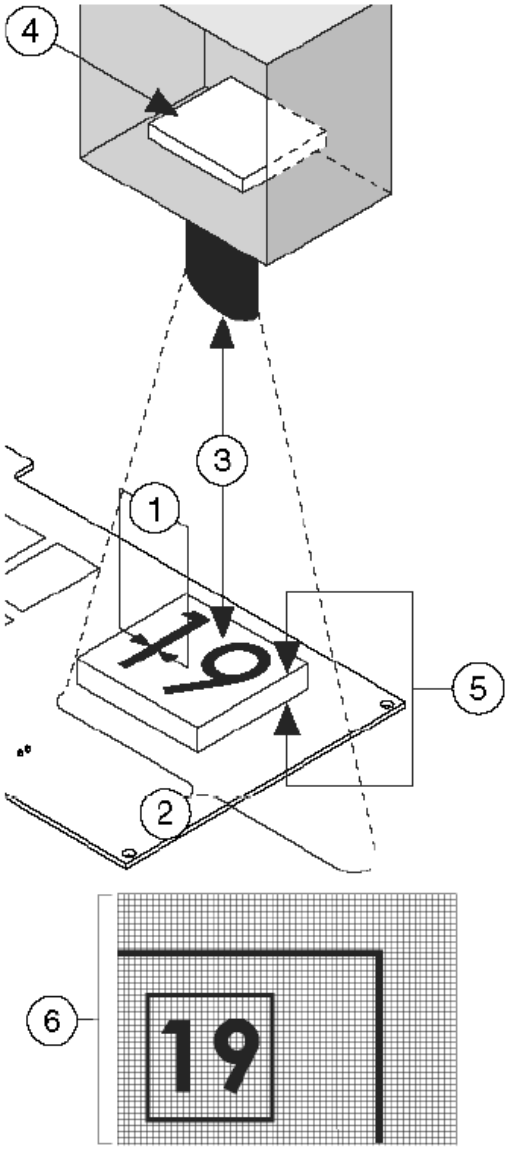


Obr. 5 Porovnání spektrální citlivosti snímačů [46]

1.2.3. OPTIKA A KALIBRACE [3,5,12,13]

Třetím klíčovým prvkem v řetězci hardwaru kamerového systému je optika. Optika slouží k usměrnění světelného toku (paprsků světla) od snímané oblasti do snímacího prvku. Volba příslušné optiky nám ovlivní několik parametrů kamerového systému (Obr. 6):

- Zorné pole (2) – Označované FOV (Field-of-view) je reálná část prostoru (6), kterou zachycuje snímací prvek a jeho velikost je určena použitou optikou (parametr ohnisková vzdálenost) a velikostí snímacího prvku (4). Na základě požadované velikosti zorného pole volíme optiku.
- Rozlišení (1) – udává s jakou nejmenší přesností je snímán obraz. Rozlišení musí být dvakrát vetší, než je požadovaná přesnost což vyplývá s Nyquistova kritéria. Platí, že čím větší požadujeme přesnost při stejném snímacím prvku, tím menší je zorné pole.
- Hloubka ostrosti (5) – udává rozmezí, v kterém je obraz ostrý. Pro snímání plochých předmětů či nápisů volíme optiku s malou hloubkou ostrosti naopak při velkých objektech velkou6 hloubku ostrosti.
- Pracovní vzdálenost (3) – určuje vzdálenost snímacího prvku od snímané plochy (nezahrnuje rozměry optiky). Určuje se na základě velikosti zorného pole a ohniskové vzdálenosti objektivu.



Obr. 6 Uspořádání otického systému [3]

Samotné optické čočky [14] jsou v několika provedeních:

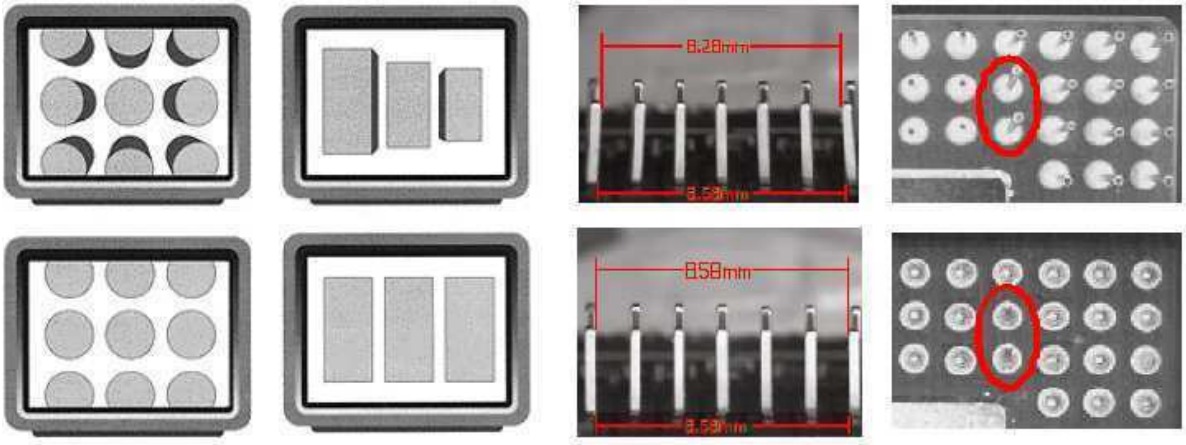
- s pevnou ohniskovou vzdáleností – ta je fixovaná a pro její změnu je třeba vyměnit optiku
- s proměnnou ohniskovou vzdáleností – tu lze měnit v rozsahu 3,5 až 8 mm, po každé změně je však nutno obraz znovu zaostřit. Z tohoto důvodu se v průmyslu používají jen okrajově.
- zoom čočky – oproti čočkám s proměnnou vzdáleností jsou nastavitelné v rozsahu 6 až 48 mm aniž by se ovlivnilo zaostření obrazu. Použití je také okrajové pro speciální aplikace.

Každý s těchto druhů čoček se připojuje ke kameře různými typy závitů:

- C-mount – Vzdálenost fokusačního bodu čočky od senzoru (ohnisková vzdálenost) je 17,52 mm. Jedná se o starší typ.
- CS-mount – Fokusační bod je vzdálen 12,52 mm. Novější s menšími výrobními náklady a umožňuje užití menšího snímače. CS-mount lze použít jak s CS závitem tak i se závitem C při použití 5 mm nástavce.

C a CS mount se používají typicky pro velikosti snímače 2/3“ a v současné době je nejvíce v průmyslu používaná verze CS. Pro větší detektory se používá F-mount, K – mount (také PK-mount) ty se však používají převážně pro klasické kamery a fotoaparáty. Pro velmi malé detektory se také používá S-mount.

Důležitou vlastností optiky v kamerovém systém je také, zda je optika perspektivní nebo telecentrická. U telecentrické [15, 16] optiky je sejmutý obraz bez perspektivy jak je vidět na spodní řadě v Obr. 7, a má menší vady pokřivení obrazu oproti normální (perspektivní) čočce. Nevýhodou je rozměr optiky, která musí mít větší nebo stejný průměr jako maximální rozměr snímaného prvku. Užívá se například pro kontrolu hlubokých děr, pinů na plošných spojích a procesorech.



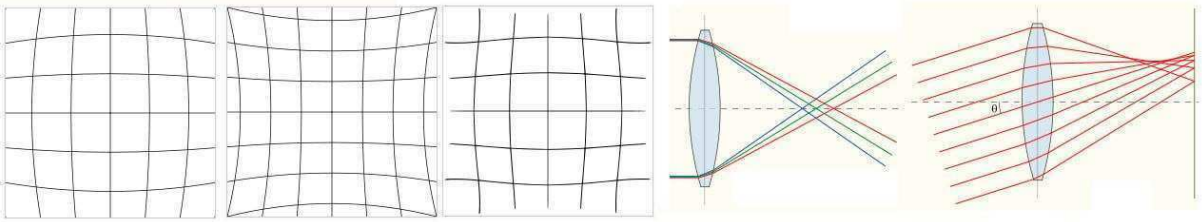
a) b) c) d)

Obr. 7 Porovnání normální a telecentrické čočky – horní řada normální čočka, spodní řada čočka telecentrická a) perspektiva, b) různě vzdálené objekty, c) piny plošného spoje, d) piny procesoru [3]

V některých případech se před samotnou čočkou používají filtry [18] a to buď filtry barevné umožňující prostup pouze určité vlnové délky, longpass filtr, který zabraňuje průchodu UV záření a shortpass filtr zabraňující infračervenému záření. CCD snímací prvky jsou citlivé na IR záření, proto používáme shortpass filtr pro jeho eliminaci. Dále jsou hojně užívané polarizační filtry, které vycházejí z předpokladu, že světlo se chová jako elektromagnetická vlna a osciluje v jakémkoliv směru 3D prostoru. Polarizační filtr propustí jen světlo oscilující v daném směru. Těchto filtrů se využívá např. pro odstranění odlesků, ke zvýšení kontrastu, ke zviditelnění povrchového napětí u kapalin a průhledných objektů.

Specifický tvar jednotlivých čoček, spolu s jejich zřetězením v optickém systému, sebou nese nežádoucí vlastnost, kterou je pokřivení obrazu. Tyto chyby jsou závislé jednak na parametrech dané čočky a na výrobních nepřesnostech povrchu čočky.

Nejčastějšími vadami obrazu jsou vydutí a vypuknutí obrazu nebo jeho kombinace (Obr. 8a, b, c). Chromatická aberace, při níž dochází k lámání jednotlivých částí spektra odlišně, způsobuje rozmazané okraje objektů (Obr. 8d). Astigmatismus také ústí v neostré hrany, je způsoben rozdílným bodem ostření pro horizontální a vertikální čáry. Coma je jev, který způsobuje proměnnou intenzitu přijímaného světla směrem od středu obrazu (Obr. 8e)



a) b) c) d) e)

Obr. 8 Geometrické vady optiky – a) vydutí, b) vypuknutí, c) kombinace vydutí a vypuknutí, d) chromatická aberace, e) coma [43,44,45]

Mechanické odstranění těchto vad mechanicky je velmi časově a finančně nákladné a mnohdy nereálné, proto se tyto vady upravují softwarově a to kalibrací kamery. Kalibrace kamery se provádí vždy při výměně optiky nebo nastavení jiného přiblížení. Softwarová korekce se liší dle výrobců programu a pro účely demonstrační aplikace v této diplomové práci bude rozebrána v Kap. 1.5.

1.3. ROZDĚLENÍ KAMEROVÝCH SYSTÉMŮ [1, 2, 3, 4, 5]

Kamerové systémy rozdělujeme do několika základních skupin se specifickým uspořádáním a typem kamer a výpočetní jednotky.

1.3.1. KAMEROVÉ SENZORY (VISION SENSORS)

Kamerový senzor je kompaktní řešení, kde kamera, osvětlení, procesor a komunikační rozhraní jsou umístěny v jednom pouzdře navrženém do průmyslového prostředí. Vzhledem k omezenému výkonu a počtu inspekčních funkcí mají uplatnění pouze pro jednodušší aplikace. Ve většině případů se senzor naučí daný tvar či vzor a pak vyhodnocuje jeho přítomnost, polohu, natočení nebo určuje typ objektu z předem naučených vzorů. Inspekční úloha se provádí jen jedna nebo jejich omezené kombinace. Digitální I/O jsou taktéž omezeny, proto je jim většinou přímo dána funkce jako např. trigger, signalizace detekce objektu apod. Pro rozsáhlejší inspekce se kamerové senzory seskupují a každý senzor provádí část inspekce. Příkladem použití může být detekce objektu na dopravním páse, detekce etikety a jejího správného umístění, přítomnost dílu sestavy aj.

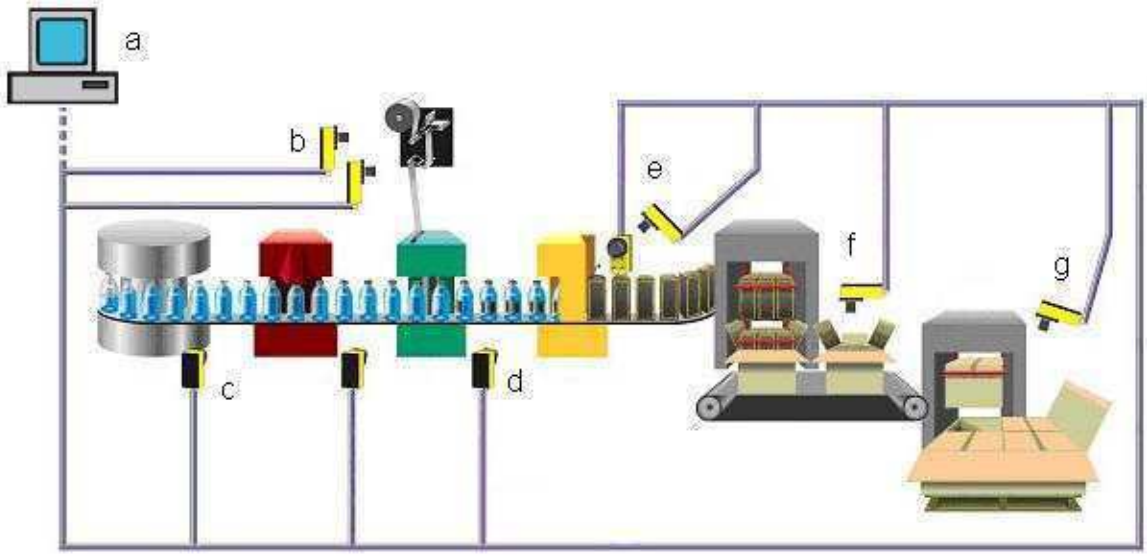
Obr. 9 Kamerový senzor FQ od firmy Omron [47]

Při seskupení kamerových senzorů pod jeden řídicí systém hovoříme o tzv. PC systémech.

1.3.2. PC SYSTÉMY (PC BASED VISION SYSTÉM)

PC systémy jsou historicky prvními používanými systémy pro strojové vidění. Skládají se z jednoho nebo více počítačů, ke kterému je připojeno několik kamer. Tento systém je vysoce modulární a umožňuje použití různých druhů kamer, kamerových senzorů, i inteligentních kamer od různých výrobců. Počítač získává informace od kamer a ostatních senzorů, provádí inspekční program a na základě jeho výsledků ovládá ostatní periferie nebo podstupuje informace dále. PC získává informace z různých kamer odlišně. Z analogových kamer je zapotřebí signál digitalizovat, k tomu slouží frame grabber (grabbovací karta) a příslušný software. U digitalizování obrazu ovšem dochází k určitému zkreslení obrazu (u nesynchronního přenosu to může být až 12%), u digitálních kamer tento problém odpadá. Digitální kamery přenášejí obraz standartním rozhraním (Ethernet, USB, Fire wire, Camera Link) s příslušným protokolem a k tomu určeným softwarem v řídícím PC. Informace z inteligentních kamer a kamerových senzorů jsou již předzpracovány a v digitální podobě. Po získání obrazu se tento zpracuje inspekčním programem. Programy mohou být napsány speciálně pro danou aplikaci, ale to se skoro nevyužívá. Na dnešním trhu je celá řada inspekčních programů různých výrobců (National Instruments, Matlab, IPL, Image Tool, Halcon, Sherlock, Matrox, OpenCV) obsahující vesměs všechny nezbytné funkce. Systém může využívat samostatného programu pro předzpracování obrazu.

Tyto systémy se využívají zejména pro rozsáhlé inspekce u výrobních linek, kde je potřeba kontrolovat velké množství prvků, nebo pro inspekci součástí v několika pohledech atd. Výhodami jsou vysoký výkon, omezený pouze výkonem počítače, téměř neomezený počet vstupů a výstupů, modularita. Nevýhodou je velikost, nutnost transportu dat na větší vzdálenosti a nízká odolnost PC v průmyslovém prostředí.



Obr. 10 Příklad PC systému - amplikace firmy Cognex - a) počítač ovládající inspekci a proces, b) kontrola trhlin papíru, c) kontrola plnosti lahve, d) kontrola etiket e) kontrola zabalení f) a g) kontrola úplnosti krabice a palety [46]

1.3.3. INTELIGENTNÍ KAMERY (SMART CAMERAS)

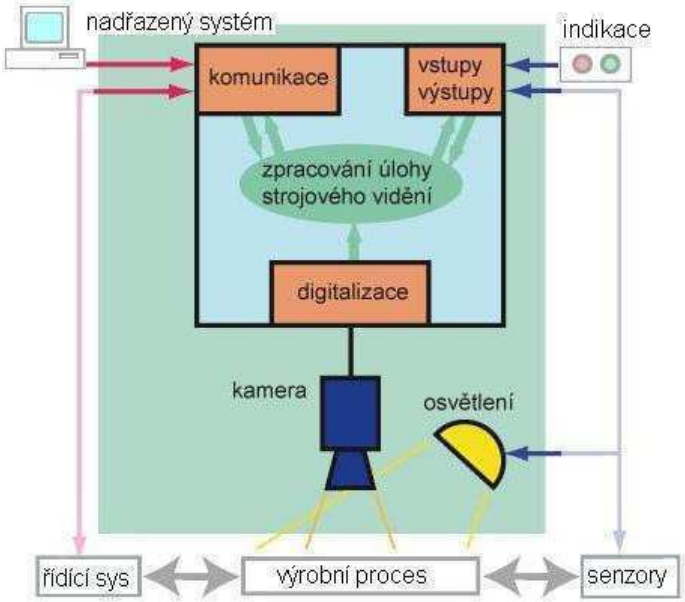
Inteligentní kamera kombinuje většinu komponent tradičního strojového vidění do jednoho kompaktního provedení. Jedná se o jedno pouzdro vhodné pro průmyslové použití, které v sobě obsahuje snímací prvek, jednoúčelový mikropočítač, komunikační rozhraní a v některých případech i osvětlení a optiku. Pouzdro může být v provedení odolném vůči prachu, vodě či radiaci. Kamera obstarává veškeré potřebné úkony, potřebné k inspekci od ovládání a triggování osvětlení, přes sejmutí a zpracování obrazu, samotnou inspekci obrazu, až po vyhodnocení výsledků a komunikaci s externími zařízeními.

Kamery jsou vybaveny jednoúčelovým mikropočítačem obstarávajícím chod systému, typicky v rozmezí výkonu od 400 MHz po 1 GHz. Jsou vybaveny pamětí FLASH pro ukládání programu a záznamu snímku či průběhu inspekce. Spuštění a běh programu obstarává paměť RAM.

Kamery pracují pod napětím od 24 VDC po 240 VAC, a komunikují pomocí digitálních vstupů a výstupů, z nichž jeden je ve většině případů použitý jako trrigovací vstup (pro inicializaci sejmutí obrazu) a jeden jako triggovací výstup (pro zapnutí osvětlení). Kamery jsou dále vybaveny síťovou komunikací, která slouží k odesílání výsledků inspekčního programu, nahrávání programu, realtimovému zobrazování snímaného obrazu na displeji, pro komunikaci s nadřízeným systémem a aktualizaci firmware programu. Pro síťovou komunikaci se v současnosti nejčastěji využívá Gigabit Ethernet nebo také robustní sběrnice CAN. U většiny kamer je přítomen také konektor pro sériovou linku RS-232/422/485 pro komunikaci se členy automatizačního procesu např. PLC.

Kamera dokáže provádět velkou škálu inspekcí, které mohou být ve své podstatě velmi komplikované, může přepínat mezi jednotlivými programy na základě aktuálních požadavků.

Inteligentní kamery jsou relativně malé s dostatečným výkonem pro širokou škálu inspekcí a v současné době pomalu vytlačují PC systémy. Nevýhodami jsou pak omezená kapacita paměti a omezené komunikační možnosti.



Obr. 11 Schéma inteligentní kamery [47]

1.3.4. KOMPAKTNÍ SYSTÉMY (COMPACT VISION SYSTEMS)

Kompaktní systémy jsou podobné jako PC systémy s tím rozdílem, že je použito průmyslového počítače. Tento počítač je uzpůsoben do průmyslového prostředí, odolává prachu, vlhkosti, zvýšeným teplotám, je odolný proti vibracím (neobsahuje mechanické částí – pevný disk v provedení SSD). K počítači se připojuje od jedné po víc kamer či kamerových senzorů pomocí rozhraní Fire wire. Počítač má vlastní I/O rozhraní, RS-232/422/485 sériovou linku a Ethernet pro komunikaci. Dále je pak vybaven VGA výstupem pro zobrazování v reálném čase. Výhodami jsou podstatně vyšší výkon a paměť než inteligentní kamery, možnost připojení více kamer. Tyto systémy jsou stavěny na míru dle požadované aplikace a veškeré prvky systému jsou od jednoho dodavatele, tudíž je zaručena jejich naprostá kompatibilita (což u PC systému může být problémem).

Obr. 12 Kompaktní systém firmy National Instruments [48]

1.3.5. EMBEDDED SYSTÉMY [27]

Embedded systémy řadíme do kategorie kompaktních systémů s tím rozdílem, že jsou vysoce výkonné. Řídící procesor je rozdělen na několik jader (v současnosti nejrozšířenější jsou 4 jádra) a každé jádro poskytuje výpočetní výkon pro jednu kameru. Snímání jednotlivých kamer může být až do 120 snímků za sekundu. Kamery jsou připojeny přes vysokorychlostní rozhraní typu Gigabit Ethernet či Camera Link a jsou vybaveny DVI portem pro zobrazování výsledků v reálném čase. Systém je schopen spínat I/O s frekvencí v řádech stovek Hz, což však může vést k elektromagnetickému rušení. Embedded systémy považujeme pro jejich výkonové vlastnosti za real-time systémy, z toho plyne jejich využití pro rychlé procesy.

1.3.6. 2D SYSTÉMY

Veškeré výše zmíněné systémy se používají pro dvourozměrné vidění. U těchto systémů se zabýváme zjišťováním požadovaných informací (inspekcí) z dvourozměrného obrazu. Jednotlivé operace, prováděné inspekčním programem, vycházejí z hodnot intenzity jasu jednotlivých pixelů a kombinací těchto hodnot v 2D prostoru, např. při hledaní naučeného objektu (naučené kombinace hodnot pixelů) se v obraze hledá skupina pixelů se stejnou kombinací jasu (hodnoty 0-255 u černobílého obrazu). U 2D systému je extrémně důležitým faktorem osvětlení, které ovlivňuje kvalitu sejmutého obrazu (viz. Kap. 1.2.1).

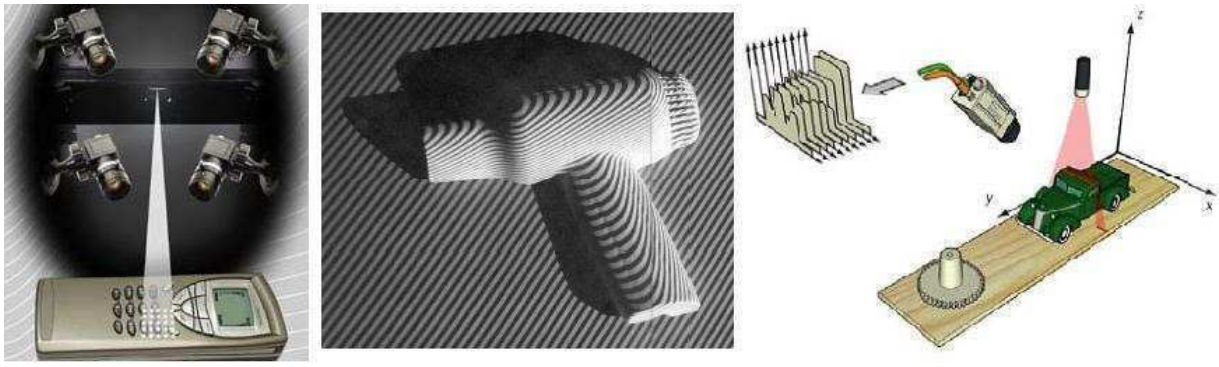
1.3.7. 3D SYSTÉMY [27,32]

Systémy 3D vidění rozdělujeme na pasivní a aktivní. Mezi pasivní systémy řadíme princip stereovize. Stereovize (také photogrametrie) pracuje na principu sejmutí obrazu objektu více kamerami, popřípadě jednou pohyblivou kamerou, z různých úhlů. Tyto obrazy jsou pak v softwaru poskládány dohromady a jsou vypočítány trojrozměrné informace o objektu. Nevýhodou této metody je nutnost velkého množství obrazů a větší výpočetní výkon. Nevýhody se částečně odstraní použitím značek nalepených na objektu, které softwaru usnadňují orientaci v prostoru. Metoda se používá pro nasnímání větších objektů, jako jsou karoserie aut a pro sledování tvarových změn objektů pod zatížením.

Dalším pasivním systémem je využití strukturovaného světla. Objekt se osvětlí pruhy světla (Obr. 13b) a software na základě deformace pruhů vypočítá prostorový tvar. Objekt je potřeba snímat z více úhlů pro jeho úplné určení. Výhodou je cena a nenáročnost na výpočetní výkon v poměru se stereovizí.

Mezi aktivní systémy pak patří laserová projekce. Kamera snímá laserový paprsek dopadající na snímaný objekt pod daným úhlem, paprsek zobrazuje výškový obrys objektu. Při současném snímání a posuvu objektu (popřípadě kamery s laserem) dostáváme 3D zobrazení sestavené z jednotlivých řezů (Obr. 13c). Tato metoda je velmi přesná, nevýhodou je pak nutnost pohybu předmětu či kamery a jejich synchronizace. Nejčastější užití je pro rozpoznání objektů na pásovém dopravníku, či rozpoznávání volně ložených součástí v krabici a jejich manipulace.

V kombinaci laseru (např. matice „teček“) a photogrametrie určíme 3D model objektu pomocí vychylování laseru zrcadlovým systémem (Obr. 13a). Tento systém se používá pro velmi přesné snímání menších objektů.



a) *b)* *c)*

Obr. 13 Příklady 3D systémů - a) photogrametrie, b) strukturované světlo, c) laserová projekce [32,49,50]

Existují další druhy systémů, které jsou používané pro velmi specializované účely a vyžadují speciální druhy hardwaru a softwaru. Např. systémy pro rentgenovou metrologii, kde snímáme hustotu materiálu v tělesech, a je nutno použít speciální snímací prvky, elektroniku a mnohdy mezikomponenty pro zachycení záření a vygenerování obrazu. Vzhledem k úzce profilovanému použití se jimi diplomová práce nezabývá.

1.4. SMART KAMERA IVC-2DM1122 [28,31]

Jedním z cílů této práce je seznámit se s kamerovým systém SICK IVC 2D, jeho možnostmi programování a možnými způsoby komunikace s průmyslovými roboty KUKA. Pro účely demonstrační aplikace je použita inteligentní kamera IVC-2DM1122 (dále jen kamera) od společnosti SICK. Německá firma SICK byla založena v roce 1946 a zařadila se mezi přední výrobce senzorických, bezpečnostních a kamerových systémů. V České Republice je zastupována dceřinou firmou SICK s.r.o., která se řadí mezi 50 dalších po celém světě. Portfolio firmy obsahuje množství Smart kamer jak pro 2D tak pro 3D strojové vidění a firma se také zabývá návrhem a implementací kamerových systémů.

Použitá kamera patří do kategorie inteligentních kamer pro 2D vidění. Tělo kamery má krytí IP54 s možností krytí optiky (potom krytí IP 65). Její spektrální citlivost je od 400 do 750 nm, obrazový senzor je typu CCD velikosti 1/3“ s elektronickou závěrkou a rozlišením 1024x768 px. O běh programu se stará 800MHz procesor a 128 MB RAM paměti. Program může být uložen na 16 MB interní paměti typu flash. Kamera je vybavena čtyřmi digitálními výstupy z toho jeden slouží pro triggování (osvětlení) a čtyřmi programovatelnými digitálními vstupy, opět jeden vyhrazený pro triggování (sejmutí obrazu). Kamera má komunikační rozhraní RS-482 sériovou linku, Fast Ethernet (10/100 Mbit/s) a může komunikovat přes OPC server umožňující výměnu dat např. SCADA systémem.

Ke kameře je možné připojit optiku pomocí standartní C nebo CS závitem. Použitá kamera je dále vybavena zoomovací optikou obsahující zoom, ostření a nastavitelnou ztmavovací clonu, vše s možností zajištění aretačním šroubem.

Kamera je programována přes Ethernet pomocí PC a vývojového programu IVC Studio.

Obr. 14 Smart kamera IVC-2DM1122 [28]

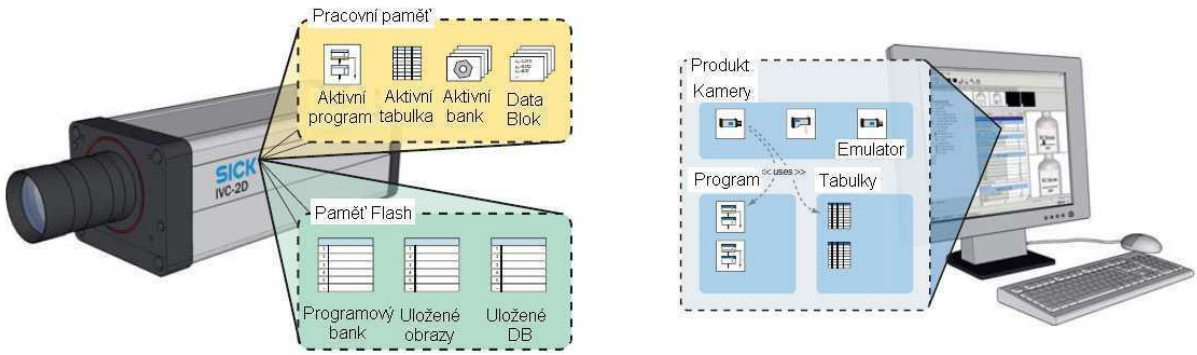
1.5. PROGRAMOVACÍ PROSTŘEDÍ IVC STUDIO 3.1 [29]

Prostředí IVC Studio je grafické uživatelské prostředí instalované na uživatelské PC, slouží k ovládání a programování kamery (Smart kamera IVC-2DM1122), umožňuje vytvoření, odzkoušení, nahrání a průběžnou kontrolu programu. Prostředí obsahuje zhruba 130 nástrojů (v závislosti na verzi) na zpracování obrazu roztříděných do 13 kategorií. IVC Studio obsahuje IVC Emulátor, který slouží k vývoji, odladění programu a inspekce off-line (tzn. bez připojené kamery). Emulátor dokáže simulovat skoro veškeré funkce, kromě funkcí komunikace, čtení kódů a znaků a některé funkce sejmutí obrazu. Tyto nepodporované funkce je třeba odzkoušet a doladit přímo na kameře.

Kamera komunikuje s IVC Studiem pomocí Ethernet připojení, které může být provedené 3 způsoby. Kamera je připojena přes Switch do sítě s DHCP serverem, v tomto případě je kameře dána dynamická IP adresa a je automaticky rozpoznána. Nebo připojením přes Switch do sítě bez DHCP serveru, a v tomto případě musí být kameře přidělena IP adresa ručně. Třetí možností je propojení přímo s PC a IP kamery používá stejnou podsíť jako PC a je zobrazována jako lokální. Připojení kamery v této diplomové práci využívá první možnosti a má dynamickou IP adresu. Toto řešení, připojení přes Switch s DHCP serverem, umožňuje připojení několika zařízení ke kameře, např. notebook na kterém je vytvářen program, PC na kterém se zobrazují výsledky inspekce, PLC atd.

Kamera má dva typy paměti, paměť operační (pracovní, RAM), ve které je uložen aktivní, právě prováděný program spolu s jeho komponenty a paměť flash, ze které lze vyčítat potřebná uložená data (Obr. 15a).

IVC Studio dokáže pracovat jak s 2D tak 3D kamerami. Při vývoji programu je vytvořen tzv. Produkt (product), který v sobě obsahuje informace a rozhraní pro kamery (devices) a jednotlivé části programu (Obr. 15b).



a) *b)*

Obr. 15 Schéma uložení dat - a) data v kameře, b) data v IVC Studiu [30]

Částmi programu je zaprvé samotný program pro určitou úlohu. Program se vytváří v IVC Studiu za pomocí nástrojů, také označovaných softsenzor. Nástroje jsou již připravené programy, provádějící jednoduché operace. Každý takový softsenzor obsahuje oblast vstupních dat, potřebných pro provedení operace, a jeho

výstupem jsou hodnoty výsledku. Příkladem softsensoru je např. „Binarize tool“, který převede obraz ze škály 256 stupňů šedé na 2 bitový obraz dle zadaných parametrů.

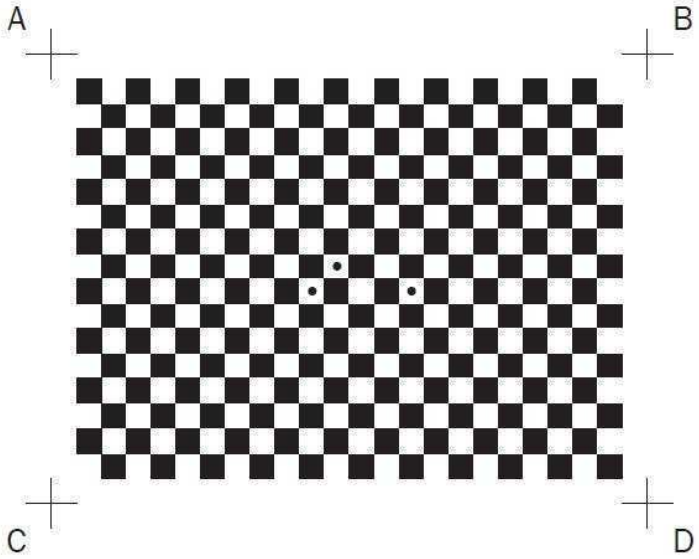
Druhou částí programu je úložný prostor pro obraz, v IVC Studiu označovaný jako Bank. Jeden bank může obsahovat jeden obraz sejmutý kamerou či jinak upravený v programu. Na flash paměti kamery lze takto uložit až do 10 000 banků.

Třetí částí je tabulka hodnot o maximální kapacitě 2000 hodnot. Slouží k ukládání dat v průběhu programu. Jednotlivé softsenzory mohou načítat vstupní data z tabulky a uložit do ní hodnotu výsledku.

Poslední čtvrtou částí jsou tzv. data bloky. Do data bloků se ukládají objemnější informace nutné pro práci programu. Do data bloku se například uloží naučený vzor, a v programu je na tento data blok odkázáno při porovnávání či vyhledávání.

Oddělení jednotlivých částí programu slouží pro přehlednější a snadnější programování komplikovanějších aplikací. V jednom programu je možno odkázat se na tabulku dříve uloženou v jiném programu, nebo vyčíst obraz uložený jinou kamerou.

Průmyslový robot pro účely manipulace potřebuje informace o cílovém objektu a to v milimetrech. Kamera však snímá obraz v pixelech. Převod mezi pixely a milimetry není pevně daný a záleží na snímaném prostoru (FOV). Proto je v IVC Studiu implementována funkce kalibrace obrazu. Ke kalibraci je zapotřebí sejmutí obrazu kalibračního terče (Obr. 16). Po zadání velikosti hrany čtverce program přepočítá pixely na milimetry a tyto informace uloží do vytvořeného data bloku spolu s informacemi o korekci obrazu. Tato korekce může být buď lineární, opravuje pouze perspektivní chyby obrazu, jako je např. nekolmost kamery na snímaný povrch. Může také opravovat nelineární chyby obrazu způsobené čočkou objektivu (viz. Kap. 1.2.3). Souřadný systém kamery má počátek ve středu obrazu. Při spolupráci kamery a externího zařízení (robotu) jsou souřadnice vztaženy k externímu systému souřadnic. V demonstrační aplikaci je koordinační systém kamery vztažen ke světovým souřadnicím robotu KUKA KR3. Toho je docíleno tak, že se v kalibračním nastavení zadají pozice bodů A až D (minimálně tří z nich) v souřadném systému robotu.



Obr. 16 Kalibrační terč [29]

2. DEMONSTRAČNÍ APLIKACE

Cílem diplomové práce je vytvoření demonstrační aplikace zaměřené na problém snímání většího počtu různých objektů, jejich správnou identifikaci a třídění pomocí průmyslového robotu. Úloha třídění objektů je v průmyslové praxi řešena v nejrůznějších oblastech výroby. Pro třídění se však využívá rozsáhlého systému mechanických prvků, které třídíc objekty postupně dle jejich geometrických, magnetických, indukčních a jiných fyzikálních vlastností. Tyto systémy jsou finančně, energeticky, prostorově a údržbově velmi nákladné. Rozvíjející se oblast strojového vidění a automatizace si klade za cíle tyto nedostatky potlačit.

Pro účely demonstrační aplikace byly vybrány jako objekty mince. Konkrétně se jedná o mince české (1 Kč, 2 Kč, 5 Kč, 10 Kč, 20 Kč, 50 Kč) platné v době vypracování práce. Mince byly vybrány vzhledem k tomu, že mají podobný tvar, ale různé velikosti, jsou z různých materiálů, mají odlišnou barvu a odraz světla.

Tabulka 1 Parametry mincí [33]

Hodnota	1 Kč	2 Kč	5 Kč	10 Kč	20 Kě	50 Kč
Rubová strana [33]						
Povrch	nikl	nikl	nikl	měď	slitina měď-zinek	okraj měď, střed slitina měď-zinek
Hrana	80 vroubků	11 hran	hladká	144 vroubků	13 hran	hladká
Průměr	20 mm	21,5 mm	23 mm	24,5 mm	26 mm	27,5 mm
Tloušťka	1,85 mm	1,85 mm	1,85 mm	2,55 mm	2,55 mm	2,55 mm

2.1. POPIS ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Problém identifikace většího počtu různých objektů (dále mincí) má několik základních charakteristik. Tato práce se zabývá statickou úlohou, to je takovou, při které mince nebudou během inspekce (sejmutí obrazu, vyhodnocení obrazu, odeslání informací) měnit svou polohu nebo natočení. Cílem aplikace je rozpoznat v daném prostoru náhodně vhozený větší počet mincí, určit jejich jednotlivou polohu, hodnotu a hodnotu celkového součtu mincí. Jednotlivé mince jsou na základě těchto informací průmyslovým robotem roztříděny (přeneseny do příslušných zásobníků).

<u>Charakteristika tvaru</u>: Mince jsou kulaté s výjimkou mince 2 Kč a 20 Kč, které mají tvar několikahranu, tohoto tvaru se dá využít při identifikaci. Mince 1 Kč a 10 Kč mají po svém obvodu vroubky, ty jsou však vzhledem ke svým nepatrným rozměrům nevhodné pro identifikaci. Všechny mince jsou rozdílných průměrů v odstupňované řadě s rozdílem 1,5 mm na minci. Mince jsou ve dvou tloušťkách 1,85 mm a 2,55

mm. Každá z mincí má na rubové straně jiný tvarový reliéf, na lícní straně má mince vždy reliéf českého lva v nepatrných obměnách.

Charakteristika povrchu: Mince jsou raženy a následně galvanicky pokoveny. Mince 1 Kč, 2 Kč, 5 Kč jsou pokoveny niklem a mají vysokou odrazivost světla (neopotřebované téměř zrcadlový odlesk). Mince 10 Kč je pokovena mědí a její povrch je lesklý. Mince 20 Kč má zinko-měděný povrch a je mírně matná. Mince 50 Kč má střed zinko-měděný a okraj měděný. Povrch mincí přijde do styku s nejrůznějšími nečistotami a mastnotami, vlastnosti povrchu se proto výrazně liší od velmi lesklého až po úplně matný. Povrch může být například u 10 Kč mince zasažen částečnou korozí oxidu měďnatého, povrch je pak vysoce matný s odlišnou barvou. Nečistoty mincí také způsobují změny v reliéfu mince.

U mincí hodnoty 10 Kč a 20 Kč se vyskytují mince výroční z roku 2000 s odlišným reliéfem rubové strany.

Přesnost a polohování: Mince jsou přesného tvaru vyrobené metodou ražby. Úchylky v tvaru jsou ± 0,1 mm na průměru a ± 0,13 mm (± 0,05 pro 10Kč a výš) na tloušťce. Mince jsou tříděny do zásobníků (např. krabice) s výrazně větším otvorem než jsou mince samotné, polohování a identifikace přesného středu není podmínkou. Na pootočení nebo typy vrchní strany (rub, líc) nezáleží.

Možné polohy mincí: Poloha mincí v prostoru je náhodná, proto je zapotřebí určit všechny možné typy poloh pro další řešení (Obr. 17). Mince může stát na hraně, tato poloha je však vysoce nepravděpodobná a nebude dále uvažována. Mince mohou zaujmout 3 hlavní typy poloh. Mince rozprostřené po ploše bez vzájemného doteku (1), dvě a více mincí se dotýkají hranami (2), (3), ale stále leží v jedné rovině. Třetím možným uspořádáním je překrývání mincí a to buď částečně (4), nebo úplně. Při úplném překrytí mincí překrývá větší mince menší (5), dvě stejně velké mince se překrývají identicky (6) nebo malá mince překrývá minci velkou (7). Dále může nastat poloha, kdy je mince částečně mimo snímanou oblast (8).

Obr. 17 Možné polohy mincí – ilustrační foto, dení světlo z vrchní strany

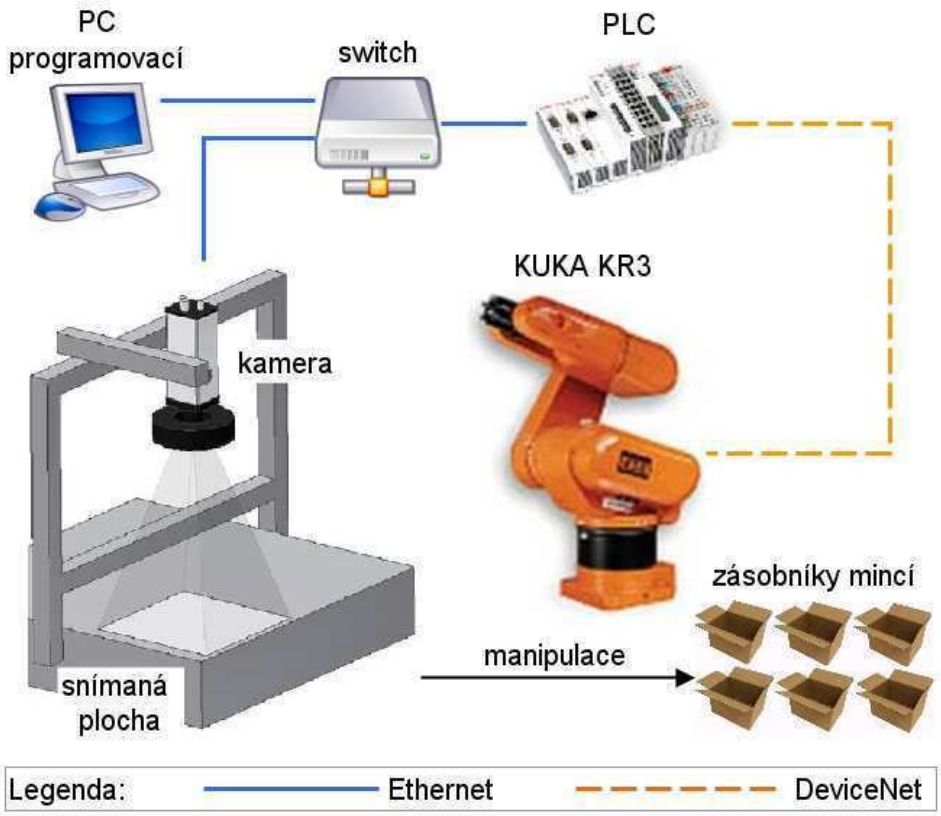
2.2. KONCEPCE PRACOVIŠTĚ [34,35]

Na Obr. 18 je schematicky znázorněna koncepce pracoviště. Kamera je umístěna kolmo nad snímací plochou. Manuální zoom a ostření kamery umožňuje volné nastavení velikosti snímané plochy. Kamera je nad snímanou plochou uchycena na modifikovatelné konstrukci z tvarových hliníkových profilů. Konstrukce umožňuje montáž přídavných zařízení a komponent jako např. osvětlení, kamery či senzory.

Kamera je pomocí Ethernetu připojena do síťového rozbočovače typu Switch, který slouží jako připojovací bod sítě. Pro zesíťování Ethernetového připojení nemůže být využit HUB, kamera toto zařízení nepodporuje. Ke Switchi je dále připojeno programovací PC. Na tomto PC je nainstalováno vývojové prostředí IVC Studio a slouží k programování kamery a online zobrazování výsledků inspekce.

Ke Switchi je rovněž připojeno PLC. PLC (Programmable logic controller) je průmyslový počítač s real-time operačním systémem, určeným do průmyslového prostředí. Použité PLC je od firmy Beckhoff model CX1010 a má rozšiřující moduly pro rozšíření paměti, digitální I/O, Ethernet komunikaci, USB připojení a komunikaci pomocí sběrnice DeviceNet. PLC v systému slouží k předávání informací ze sítě Ethernet do sběrnice DeviceNet (komunikace viz Kap. 3.1) a pro případné ovládání a komunikaci s dalšími prvky systému.

KUKA KR3 je 6-ti osý průmyslový robot s nosností 3 kg, dosahem 635 mm a opakovatelnou přesností ± 0.05 mm. Robot obstarává samotnou manipulaci mincí z prostoru snímaného kamerou do zásobníku mincí. Robot je vybaven koncovým efektorem s vakuovou přísavkou, která je jediná vhodná pro daný typ manipulace.



Obr. 18 Schéma koncepce pracoviště [52,53,54]

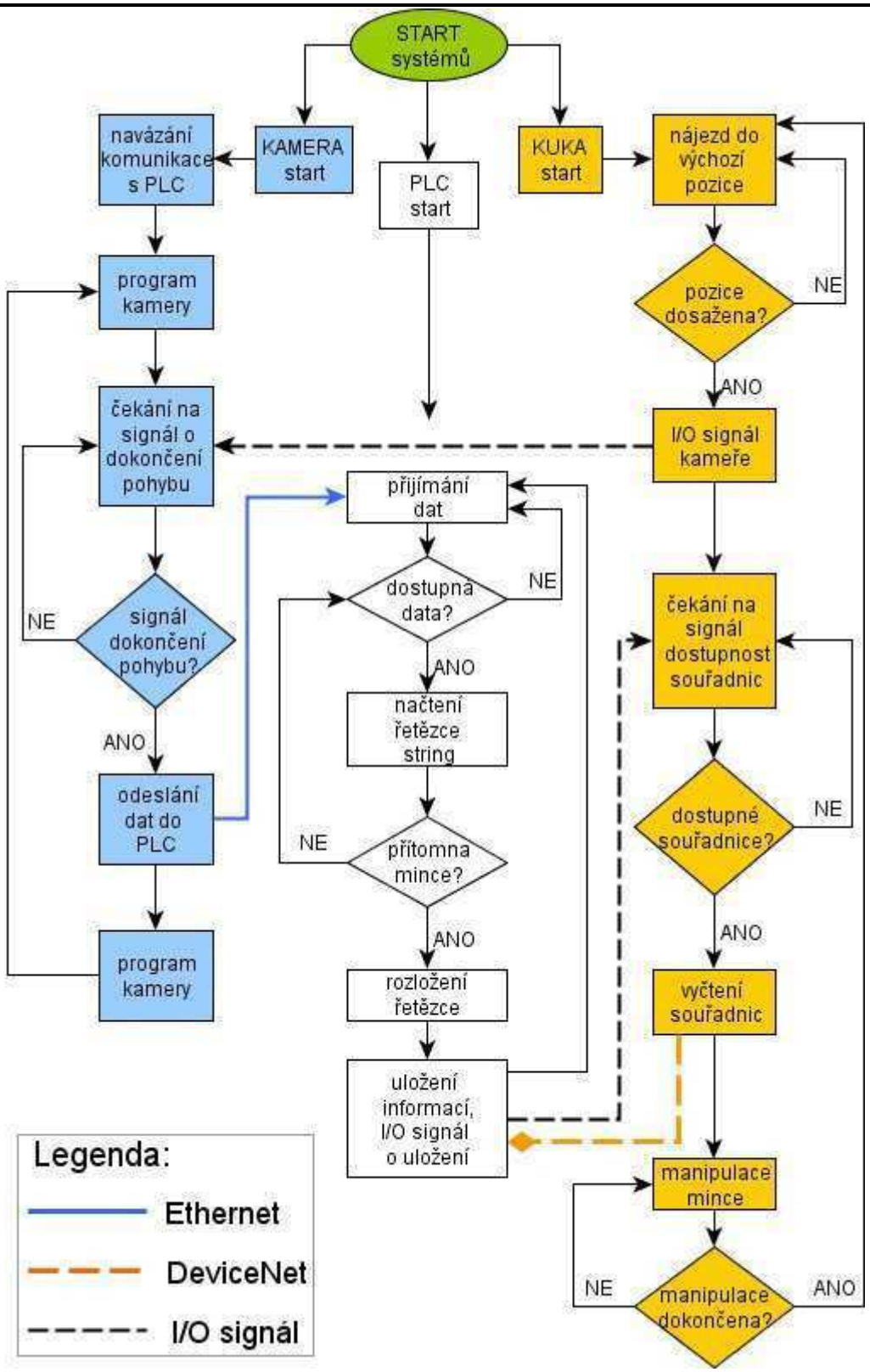
3. NÁVRHY KONCEPCE ŘEŠENÍ

Při návrhu koncepce řešení daného problému je nutné se zamyslet nad možnostmi a omezeními jednotlivých prvků systému, softwaru a okolního prostředí.

Třídění mincí probíhá v nekrytém prostoru umístěném v blízkosti okna. Toto má za následek výrazně proměnlivé světelné podmínky. Místnost je osvětlena fluorescenčními zářivkami s proměnlivým tokem světla, to má vliv na osvětlení objektů při krátké době expozice. Blízkost okna vnáší vliv náhodných stínů a kolísání světlosti v průběhu času. Z těchto důvodů bylo zvoleno osvětlení svou intenzitou výrazně převyšující okolní vlivy. Způsob osvětlení je různý pro individuální přístupy k řešení a jsou popsána níže.

3.1. ŘEŠENÍ KOMUNIKACE

Kamera provádí inspekční úkol a určuje jednotlivé polohy mincí, tyto informace musí předat robotu, který provede manipulaci. Návrh samotné komunikace mezi kamerou a robotem je blíže popsána a vyřešena v předešlých diplomových pracích [2, 4, 27] a není předmětem této. Komunikace je znázorněna na Obr. 19. Přestože je možná přímá komunikace kamery s robotem přes TCP/IP, není užita, protože je nutné dokoupit příslušný softwarový doplněk pro robot KUKA. Komunikace je proto řešena přes mezičlen, kterým je PLC. Komunikace probíhá tak, že po zapnutí všech systémů se kamera připojí jako klient k PLC pomocí sítě Ethernet. Pro připojení je v IVC Studiu nástroj Open Ethernet Raw, který nastaví komunikaci na příslušném portu (nastavení Transport Protocol je TCP outgoing). PLC na příslušném portu naslouchá a vyčítá z něj kamerou zaslané informace. Při zapnutí PLC pošle digitální signál robotu, který na jeho základě provede najetí do výchozí pozice. Po dosažení pozice o tomto stavu informuje formou digitálního signálu kameru. Kamera provede operaci a pošle informace PLC. Operací se myslí sejmutí obrazu, vyhodnocení obrazu a souřadnice mince, nebo pouze poslání souřadnic mince a to v závislosti na zvoleném inspekčním programu (popsané v následující kapitole). Informace odesílané z kamery jsou ve formě string a jsou zde obsaženy 4 hodnoty oddělené středníkem. Jednotlivé hodnoty jsou pozice mince ve světovém souřadném systému robotu x a y, nominální hodnota mince a hodnota, udávající výškovou pozici mince (v závislosti na metodě inspekce v milimetrech nebo pouze zda mince leží na podložce či nikoliv). PLC řetězec string přečte, rozloží do 4 hodnot, uloží je a dá signál robotu o zpracování dat. Robot je propojen přes DeviceNet jako Master s PLC v připojení Slave. Robot si načte příslušná data z PLC a provede manipulaci mince, po jejím skončení opět vyšle signál o dokončení operace kameře a ta pokračuje dále v programu.



Obr. 19 Vývojový diagram činosti zařízení a jejich komunikace

V následující kapitole jsou popsány možnosti inspekčního programu kamery. Odesílané informace kamerou, jejich frekvence v cyklu se mírně liší v závislosti na použité metodě.

3.2. INSPEKČNÍ PROGRAM

Při návrhu inspekční programu je nutné si uvědomit, jakými nástroji je možné rozpoznat mince a za jakých světelných podmínek se tyto nástroje dají nejlépe aplikovat. IVC Studio disponuje několika nástroji pro detekci polohy objektu.

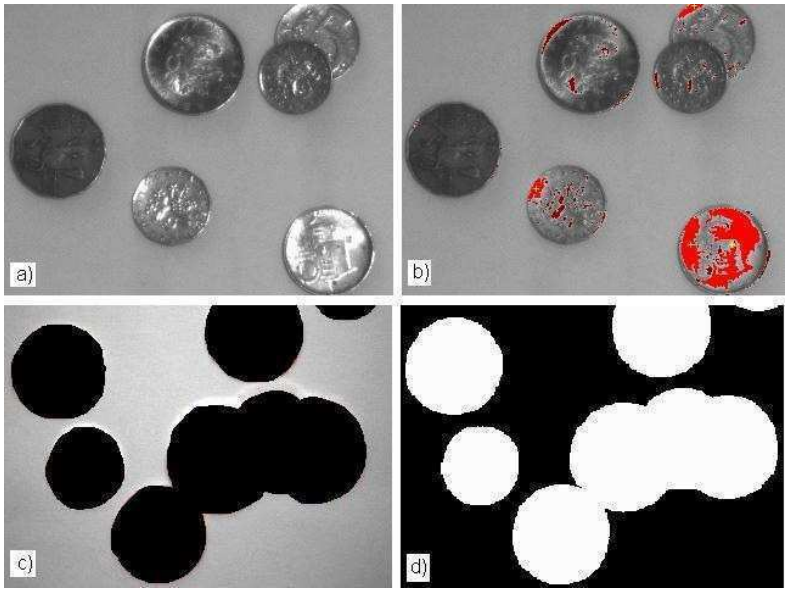
3.2.1. ROZBOR LOKAČNÍCH INSPEKČNÍCH NÁSTROJŮ

Blob Finder - Nástroj pracuje na principu Tresholdu, tzn. po nastavení spodní a horní hranice hodnoty pixelu jsou pixely v této hranici označeny bíle (hodnota 240) a pixely mimo tuto hranici černě (hodnota 0). Skupiny sousedících pixelů tvoří skvrny (Bloby), ty jsou pak ještě omezeny minimální a maximální velikostí v pixelech. Nástroj vypočítá polohu těžiště a objem v blobu v pixelech, tyto hodnoty uloží do tabulky pro všechny nalezené bloby. Tento nástroj je méně přesný, obecně jeho přesnost je 3 pixely pro určení polohy. S informacemi získanými Blob Finder může dále pracovat nástroj Blob Analysis, který blob dokáže prověřit a vypočítat podrobnější informace (šířku, výšku, natočení hlavní diagonály, obvod aj.).

Při užití tohoto nástroje spolu se zadním osvětlením je docíleno největší přesnosti a rychlosti tohoto nástroje. U zadního osvětlení je však ztracena veškerá informace z přední strany mince. Je možné snímat pouze vnější geometrické rozměry mince.

Při užití předního osvětlení je komplikovanější nastavení tresholdu, který se liší pro různé mince. V tomto případě je třeba dbát větší pozornosti nastavení osvětlení, aby bylo možno hranice tresholdu určit pro všechny mince zároveň a nemusel se užívat pro každou minci Blob Finder s různými parametry. To by vedlo ke komplikaci inspekčního programu a tím k jeho zpomalení.

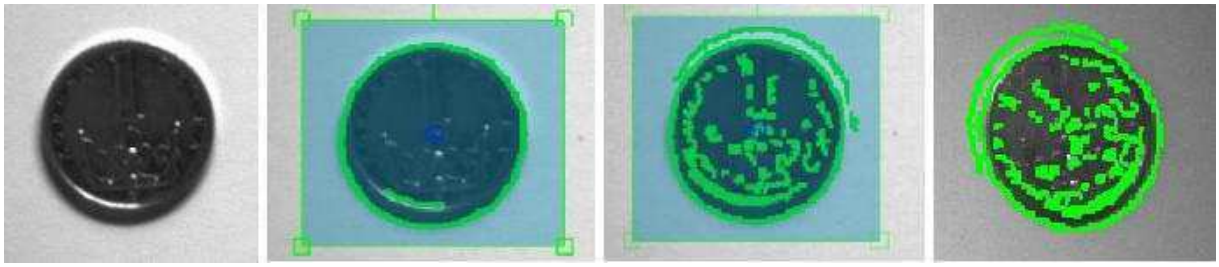
Další nevýhodou Blob Finderu je, že při dotýkání mincí vygeneruje pro více mincí jeden Blob, geometrii jednotlivých mincí je pak nutno zjišťovat jinými navazujícími metodami.



Obr. 20 Ukázka aplikace nástroje Blob Finder - a) sejmutý obraz osvětlený předním světlem, světlo špatně nastavené b) oblast Blobů (červená) – vzhledem ke špatnému nastavení osvětlení nemožnost nastavení kvalitního blobu, c) obraz sejmutý se zadním světlem d) vygenerovaný binární obraz z obrazu b)

Shape Locator – Tento nástroj lokalizuje v obraze předem naučený tvar. Mnoho konkurenčních softwaru disponuje funkcí nalezení vzoru a jednoduchými nástroji nalezení obrysových tvarů. IVC Studio tyto dvě funkce skládá dohromady a bere si od každé z metod část. Daný vzor je potřeba nejprve naučit a uložit do data bloku. Nástroj pracuje na principu zjišťování gradientu při přechodu mezi pixely. Výrazný gradient se objevuje na rozmezí barev. Hodnota gradientu lze nastavit pro danou přesnost vyhledávání. Na Obr. 21b a Obr. 21c je vidět rozdíl v nastavení gradientu při učení vzoru. Nástroj následně vyhodnocuje v sejmutém obraze patřičnou shodu naučeného tvaru (zelené pixely) s oblastí v tomto obraze. Jeho výstupní hodnotou je poloha, orientace, poměr zvětšení a procentuální shoda se vzorem.

Nástroj v kombinaci se zadním osvětlením dokáže rozpoznat pouze vnější geometrické tvary a je nevhodný v této kombinaci. Naopak při použití s předním osvětlením ho lze využít pro rozpoznávání nejen tvaru, ale i reliéfu mince. Nevýhodou nástroje je jeho náročnost na výpočet a tím velmi vysoký výpočetní čas, zvláště pak při prohledávání celého obrazu, dále pak menší přesnost určení polohy.



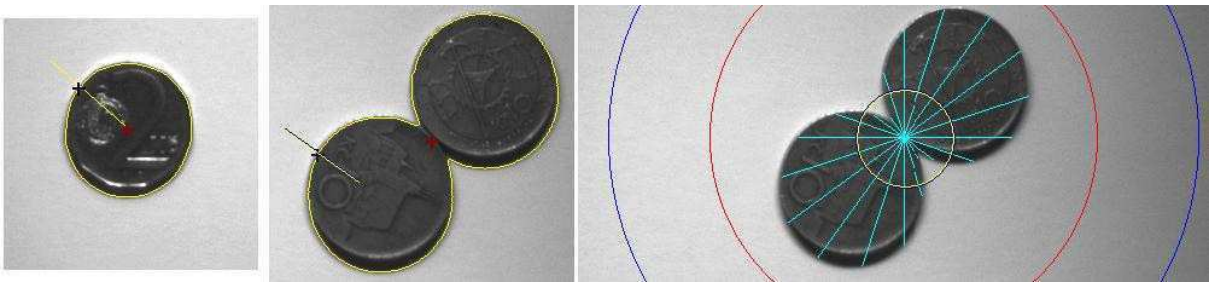
a) b) c) d)

Obr. 21 Ukázka nástroje Shape Locator – a) sejmutý obraz, osvětlení z boku, b) učení vzoru, c) učení vzoru s maximální robustností, d) vyhledaná mince, shoda 75%

Během návrhu inspekčního programu byl tento nástroj odzkoušen a funguje spolehlivě při detekci jedné mince v obraze. Přidáním více mincí klesla shoda jednotlivých nalezení a několikanásobně se zvýšil výpočetní čas. Nástroj se projevil nepoužitelný při situacích, kdy se mince částečně překrývají. Další nevýhodou je nutnost naučení vzorů jednotlivých mincí a to jak po lícové tak po rubové straně.

Externat Perimeter – Tento nástroj prostředí IVC Studio detekuje bod objektu podél zadané úsečky Obr. 22a na základě nastavené hodnoty tresholdu či gradientu. Od tohoto bodu následně detekuje hranu po obvodu objektu. Jedná se velmi účinný nástroj pro zjištění parametru kruhových součástí. Jeho přesnost je 1/3 pixelu. Nevýhodou je nutnost předchozího určení předběžné polohy mince např. Blob Finderem, pro možnost zadání pozice detekční úsečky. Navazující nástroj Circular Analysis potom dokáže vypočítat polohu středu, průměr (maximální, minimální, střední), obvod a oválnost.

I přesto že se nástroj jeví jako vhodný pro detekci kulatých mincí, zkoušky během práce na demonstrační aplikaci prokázaly opak. Jak je vidět na Obr. 22b nástroj detekuje nežádoucí tvary u dotýkajících se mincí. Na Obr. 22c jsou znázorněny vypočtené minimální (žlutě), maximální (modře) a střední (červeně) průměr pro tento tvar.



a) b) c)

Obr. 22 Ukázka nástroje External Perimeter – sejmuté obrazy osvětleny bočním světlem a) aplikace nástroje na osamocenu minci, b) aplikace nástroje na dotýkající se mince, c) vypočtené průměry

Rozbor a odzkoušení jednotlivých nástrojů a metod ukázal nevhodnost jejich užití samostatně. Inspekční program je nutné vytvořit za požití více rozdílných nástrojů.

Při náhodném rozložení mincí mohou nastat polohy, ve kterých je velmi obtížné mince identifikovat. Touto polohou je např. překrytí malé mince přes velkou (Obr. 17 poloha 7). U polohy kdy větší mince zcela překrývá minci menší (Obr. 17 poloha 5) je dokonce nemožné spodní minci identifikovat.

3.2.2. ZJIŠTĚNÍ ZCELA PŘEKRÝVAJÍCÍCH SE MINCÍ

Pro zjištění zda jde o minci samotnou, ležící na podložce, nebo jestli se jedná o minci, která překrývá zcela minci jinou je potřeba navrhnout řešení. Tento problém je možné řešit následujícími způsoby:

<u>Více kamer</u> - Pomocí dvou, popřípadě tří, kamer snímáme objekty pod různými úhly. Sestavení je zobrazeno na Obr. 23, jsou použité tři kamery navzájem svírající 90°. V zorném poli jsou mince hodnot 50 Kč a 5 Kč. Hlavní kamera 1 snímá cílovou kolmo na plochu a inspekčním programem v tomto obraze můžeme detekovat mince pomocí jejich průměru či vzoru. Pohled 1, na obrázku ukazuje sejmutý obraz kamerou 1. V tomto obraze je možno detekovat mince s celkovou hodnotou 255 Kč.

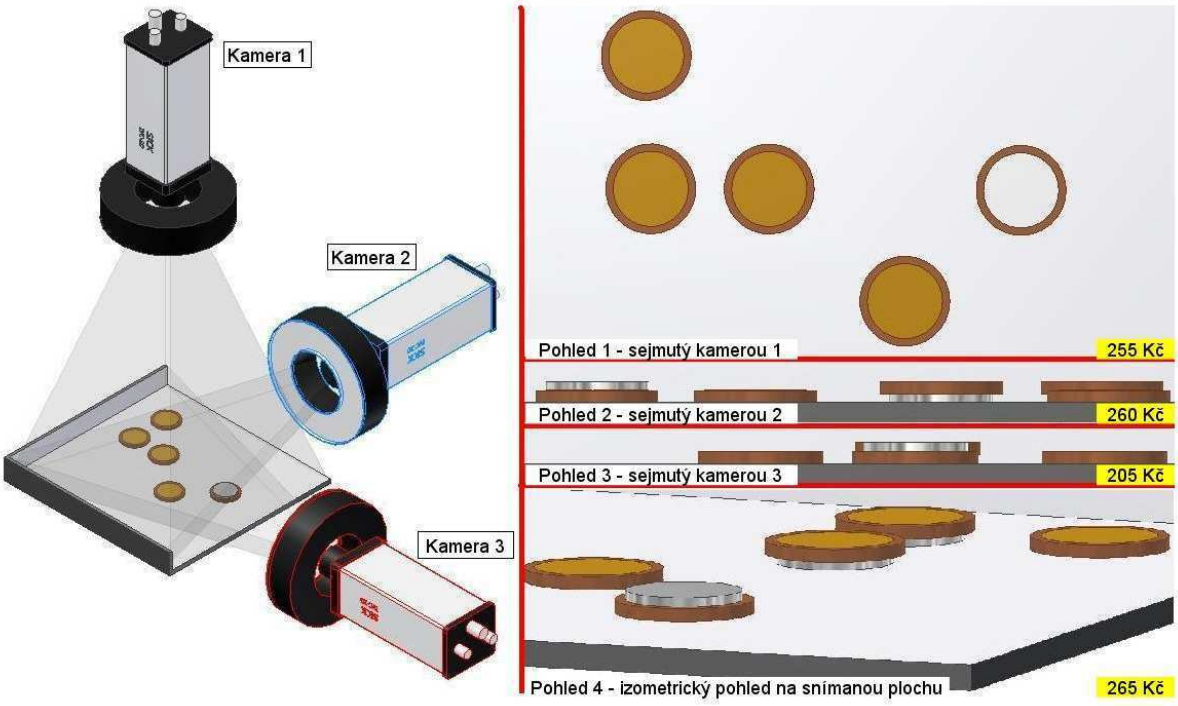
Sejmutý obraz dalších dvou kamer je vidět v pohledech 2 a 3. Z pohledů je vidět, které mince se překrývají a které nikoliv. V těchto pohledech je možné rozpoznat mince podle jejich průměru.

Jak je z obrázku vidět jedna mince v pohledech 2 a 3 je vždy v zákrytu za některou z dalších. Z tohoto důvodu není možné vždy určit hodnoty úplně překrytých mincí.

V pohledu 4 je pak ukázán izometrický pohled na mince, jejichž celkový součet je 265 Kč. Správného součtu nebylo docíleno ani v jednom z obratů.

Tato metoda je v zásadě použitelná, jelikož pravděpodobnost úplného překrytí mincí, jak přes sebe tak ve dvou dalších směrech, je nepravděpodobná. S odhlédnutím od této možnosti je metoda spolehlivá. Nevýhodou řešení je cena kamer a osvětlení. Obrazy z jednotlivých pohledů se musí, kvůli odlišným osvětlením,

snímat zvlášť a to prodlužuje čas inspekce. Inspekční program je také komplikovanější díky nutnosti komunikace mezi kamerami.

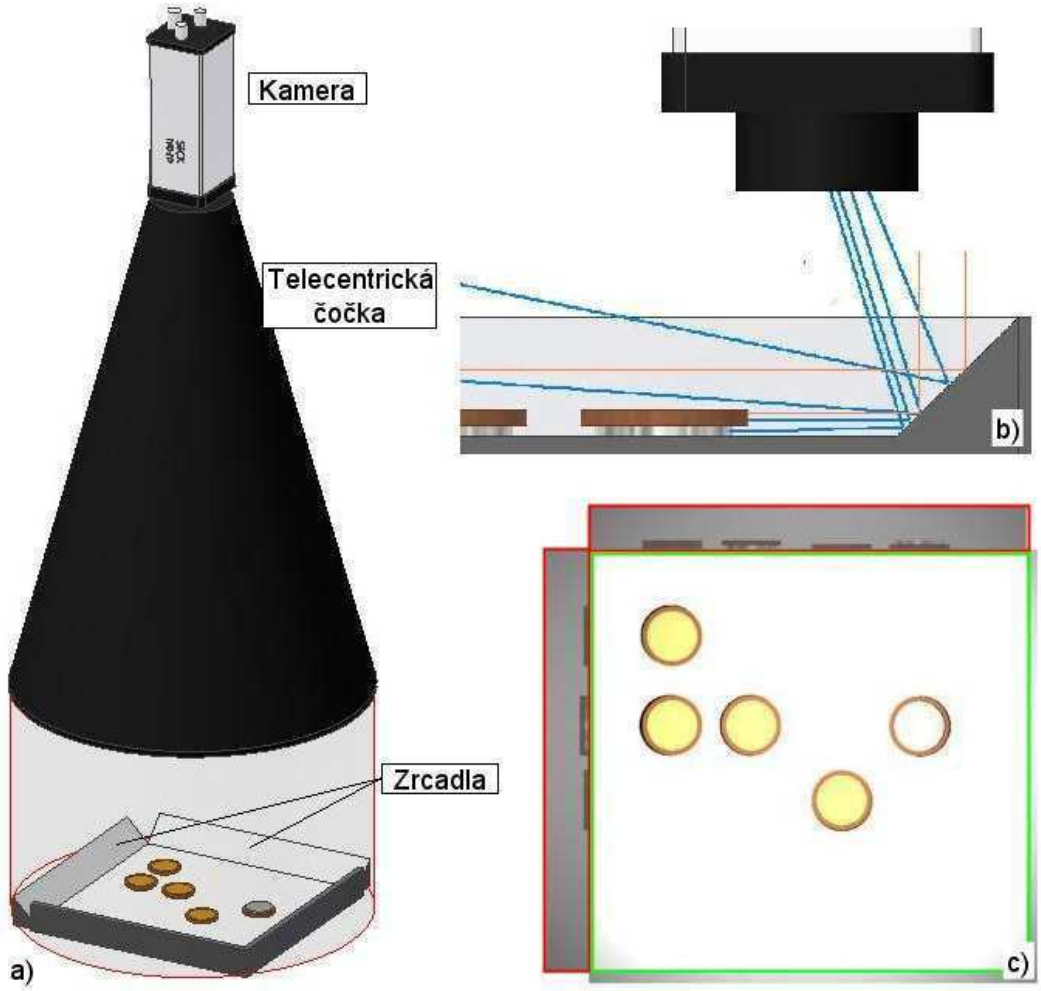


Obr. 23 Příklad užití více kamer s detaily jejich pohledů

Zrcadla – Snímanou plochu lze upravit přidáním jednoho nebo dvou zrcadel. Zrcadla jsou umístěny vůči podložce pod úhlem 45° na dvou okrajích plochy (Obr. 24a). Kamera snímá obraz kolmo na podložku a její zorné pole je zvětšeno tak, aby zachytilo i zrcadla. Sejmutý obraz pak naznačen na Obr. 24c). Vyhodnocovaný obraz je v inspekčním programu rozdělen na tři části. Oblast hlavní (na obr. zelená), ve které se nacházejí mince a dvě oblasti zrcadlové (na obr. červeně), které zachycují jednotlivá zrcadla. Zpracování obrazu ze zrcadlových oblastí probíhá stejně jako u předchozího řešení (pohled 2 a 3 Obr. 23).

Obraz však nelze snímat kamerou s klasickým objektivem. Je nutné použít objektiv telecentrický. U klasického objektivu se světelné paprsky (Obr. 24b - modré) rozcházejí a při dopadu na zrcadlovou plochu pod úhlem se rozchod ještě zdvojnásobí. Tím vznikají perspektivní deformace obrazu. U telecentrické čočky jsou všechny paprsky rovnoběžné a k deformacím nedochází.

Výhodou oproti předchozí je nižší cena a snadnější programování. Nevýhodou jsou velké zástavbové prostory telecentrické čočky a komplikované osvětlování objektu. Metoda také neřeší problém s mincemi v zákrytu u zrcadlových obrazů.



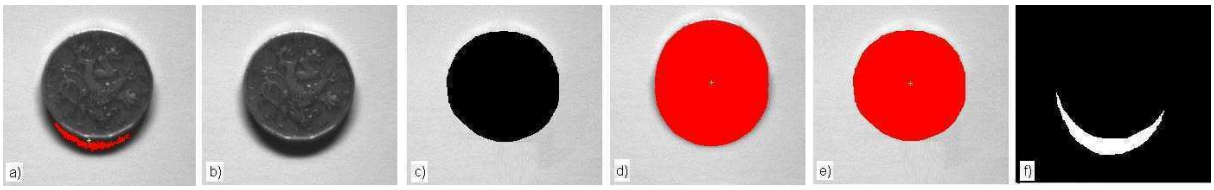
Obr. 24 Příklad užití zrcadel - a) celkové uspořádání, b) odraz světla pro normální (modré) a telecentrickou čočku (oranžové), c) obraz sejmutý kamerou s vyznačenými regiony

Velikost stínu – Jestliže je snímaná plocha osvětlena ze strany vznikne stín. Délka stínu je závislá na výšce tělesa. Na Obr. 17 je zobrazena mince hodnoty 20 Kč (pozice 5), napravo od ní je druhá 20 Kč mince. Podle délky stínu je zřejmé, že první z mincí (pozice 5) je výše než druhá a zcela překrývá jinou minci.

Při užití bočního osvětlení a vhodných softsenzorů je tak možné rozlišit mince ležící na podložce nebo mince ležící na jiných mincích.

U tohoto řešení je komplikované nastavení osvětlení (Obr. 25a). Osvětlení by mělo být ostré, aby vynikly stíny, ale zároveň difuzní aby vynikl reliéf mince a nedocházelo k nežádoucím odleskům. Této kombinace nelze dosáhnout s jedním osvětlením. Řešením je např. užití bočního osvětlení pro sejmutí prvního obrazu (Obr. 25b) a vzápětí sejmutí obrazu za použití zadního osvětlení (Obr. 25c), vytvoření blobů z těchto dvou obrazů (Obr. 25d, e) a jejich odečtení. Po odečtení zůstane binární obraz stínu (Obr. 25f), který je možné dále zkoumat.

Řešení problému pomocí odhalování stínu je nejlevnější z řešení (pouze jedna kamera a jedno či dvě osvětlení) je však náročnější na programování inspekční úlohy.



Obr. 25 Detekce stínu – a) detekce stínu nástrojem Blob Finder, boční osvětlení, b) obraz s bočním osvětlením, c) obraz osvětlený zezadu, d) blob z obrazu b, e) blob z obrazu d, f) binární obraz po odečtení blobů

Ani jedno s předchozích řešení nezaručuje 100% identifikace překryté mince. Nejúčinnější řešení je za pomocí více kamer. Všechny řešení však dokáží odhalit, zda se ve snímané oblasti nachází mince zcela překrytá jinou.

3.2.3. MOŽNOSTI POSTUPNOSTI IDENTIFIKACE OBJEKTŮ

Pro zadanou úlohu je možné řešit inspekční program několika způsoby na základě četnosti odesílání dat a konečného vyhodnocení výsledku inspekce. Konečným výsledkem inspekce je konečný součet roztříděných mincí. Četností odesílání dat je myšleno, zda budou informace o jednotlivých mincích odeslány najednou pro všechny mince, nebo budou data odesílány postupně před každou individuální manipulací.

Vyhodnocení všech objektů najednou – Při vyhodnocení všech mincí najednou kamera sejme obraz snímané oblasti a provede potřebné výpočty v inspekčním programu. V průběhu inspekce jsou postupně identifikovány jednotlivé mince a jejich souřadnice, hodnota a informace zda mince leží na podložce čí na jiné minci (dále označováno „překrytí“). Po dokončení identifikace všech mincí jsou odeslána veškerá data z tabulky do PLC a na displeji je zobrazena hodnota součtu mincí.

Výhodou je, že uživatel okamžitě vidí konečný součet a nemusí čekat na dokončení manipulace všech mincí. Nevýhodou je nejistota správnosti konečného součtu, díky nemožnosti detekce spodních mincí. Nejistota se dá odstranit dodatečnou inspekcí snímaného prostoru po dokončení manipulace. Kontrola odstraňuje výhodu okamžitého zjištění výsledku.

Vyhodnocení objektů postupně – Druhou alternativou je, po sejmutí obrazu provést inspekci a nalézt jednu minci. Uložené informace o poloze, hodnotě a překrytí se odešlou do PLC, robot provede manipulaci do příslušného zásobníku a je provedena nová inspekce. Tento postup se opakuje do roztřídění všech mincí. Výhodou je jistota správnosti konečného součtu. Nevýhodou je nutnost počkat, dokud nebudou přemístěny všechny mince.

Kombinované vyhodnocení objektů – U kombinovaného vyhodnocení objektů je využito výhod předchozích metod. Inspekční program nejprve provede analýzu mincí z hlediska překrytí. Jestliže se v prostoru nachází mince neležící na podložce, ale na jiných mincí, program vyhodnotí jejich souřadnice, hodnotu a překrytí uloží do tabulky. Tyto mince jsou robotem roztříděny a proběhne nová inspekce. V druhé inspekci se vyhodnotí zbývající mince (již jsou přítomny pouze mince na podložce), zobrazí se konečný součet mincí a odešlou se data do PLC pro konečné roztřídění mincí.

Výhodou je jistota správného součtu po krátké době, která je určena pouze počtem na sobě ležících mincí.

4. VLASTNÍ ŘEŠENÍ DEMONSTRAČNÍ APLIKACE

Na základě předchozího rozboru jednotlivých řešení, bylo vybráno nejvhodnější řešení pro jednotlivé kategorie. Tabulka 2 zobrazuje jednotlivé možnosti řešení a jejich nejpodstatnější výhody a nevýhody. Zeleně jsou pak označeny vybraná řešení v jednotlivých kategoriích.

Tabulka 2 Rozbor možností řešení

Velikost stínu		Zrcadla		Více kamer			
cena	komplikovanost programu	jednoduchý program	rozměry	přesnost		cena, komunikace	
Blob Finder		Shape Locator		External Perimeter		Kombinace	
rychlost, jednoduchý	dodatečná analýza	rozpoznání reliéfu	výpočetní čas, nepřesnost	přesná detekce	chyby při doteku mincí	přesnost, spolehlivost	složitost programu
Všechny objekty najednou		Postupně		Kombinované			
okamžitý součtu	nejistota přesnosti součtu	jistota přesného součtu	dlouhá doba určení součtu	jistota přesného součtu		náhodná doba určení součtu	

Jednotlivá řešení byla vybrána na základě předchozího rozboru a zhodnocení. U výběru lokačních nástrojů bylo také přihlédnuto ke zkušenostem získaných během jejich testování.

Pro volbu zjištění překrývajících se mincí byla zvolena možnost zjištění velikosti stínu. Tato možnost není finančně náročná a nevyžaduje dokoupení přídavných komponent systému, je tedy lehce realizovatelná v rámci možností vybavení ústavu. Pomocí metody je možno identifikovat mince neležící přímo na podložce snímaného prostoru a zjistit jejich polohu. Jednoduchost koncepce hardwarových komponent je na druhou stranu vyvážena komplikovaností aplikace.

Předchozí testování lokačních nástrojů prokázalo, že není možné tyto nástroje použít samostatně. Velká variabilita možných poloh mincí vede k nutnosti návrhu propracovanějších algoritmů, proto byla zvolena varianta, při níž bude využito jednotlivých softsenzorů v kombinaci v rámci komplexnějšího inspekčního programu.

Kombinované řešení bylo zvoleno také pro postupnost identifikace objektů. Kombinované řešení spočívá v identifikaci zcela či částečně překrytých mincí, následně je určena poloha jedné z těchto mincí a tyto data jsou odeslány do PLC. Po roztřídění první mince je zobrazen mezisoučet a činnost se opakuje do doby, než jsou roztříděny veškeré mince označené jako překrývající. Následuje inspekce zbytku mincí, vypočten celkový součet (mezisoučet již roztříděných mincí spolu se součtem všech zbylých mincí) a tento zobrazen. Souřadnice zbylých mincí jsou následně postupně odesílány do PLC. Toto řešení je spolehlivé z hlediska jistoty započtení všech mincí do konečného součtu, který je zobrazen v relativně krátkém čase.

4.1. NÁVRH INSPEKČNÍHO PROGRAMU

Inspekční program je navržen tak, aby byl schopný identifikovat jednotlivé mince, jejich hodnoty a polohu. Program dále musí být schopný rozpoznat přítomnost zcela překryté mince a to metodou porovnání velikosti stínu.

Pro správnou funkci programu je třeba správně nastavit podmínky snímání obrazu a osvětlení. Pro demonstrační aplikaci byla zvolena matně bílá podložka a osvětlení zboku pod úhlem. Osvětlovacím prvkem je obdélníkový osvětlovač od firmy SICK s červenými LED diodami. Tento osvětlovač je dostatečně silný, aby potlačil vlivy okolních světelných podmínek. Nevýhodou snímače je malá velikost, proto je potřeba užití více osvětlovačů pro dosažení konstantního osvětlení celé snímané plochy.

V rámci řešení demonstrační aplikace byl užit pouze jeden osvětlovací prvek, vzniklo tak nekonstantní osvětlení snímané plochy s úbytkem jasu v okrajích obrazu. Toto řešení bylo zvoleno, aby se otestovala funkčnost inspekčního programu při kolísání světelných podmínek, a tím byla dosažena vyšší robustnost aplikace.

U bočního osvětlení dochází k nežádoucím výrazně jasným odleskům od hran reliéfů mincí hodnot 1 Kč, 2 Kč a 5 Kč a u nových mincí. Odlesky v některých případech (např. u mincí opřených o jiné) dosahovaly intenzity, která bránila správné detekci hrany mince, to vedlo k chybnému určení průměru mince. Pro zabránění odlesků bylo použito difuzního filtru před osvětlovačem. Jako filtr byl použit pauzák, který rozptýlí světelné paprsky a nedochází k odleskům.

Osvětlovač je umístěn zhruba 60 mm nad snímanou plochou a osvětluje ji pod úhlem zhruba 30°. Umístění a natočení osvětlovače je možné měnit a v inspekčním programu je implementována kalibrační část, sloužící k určení výšky osvětlení po změně jeho polohy (Kap. 4.1.1).

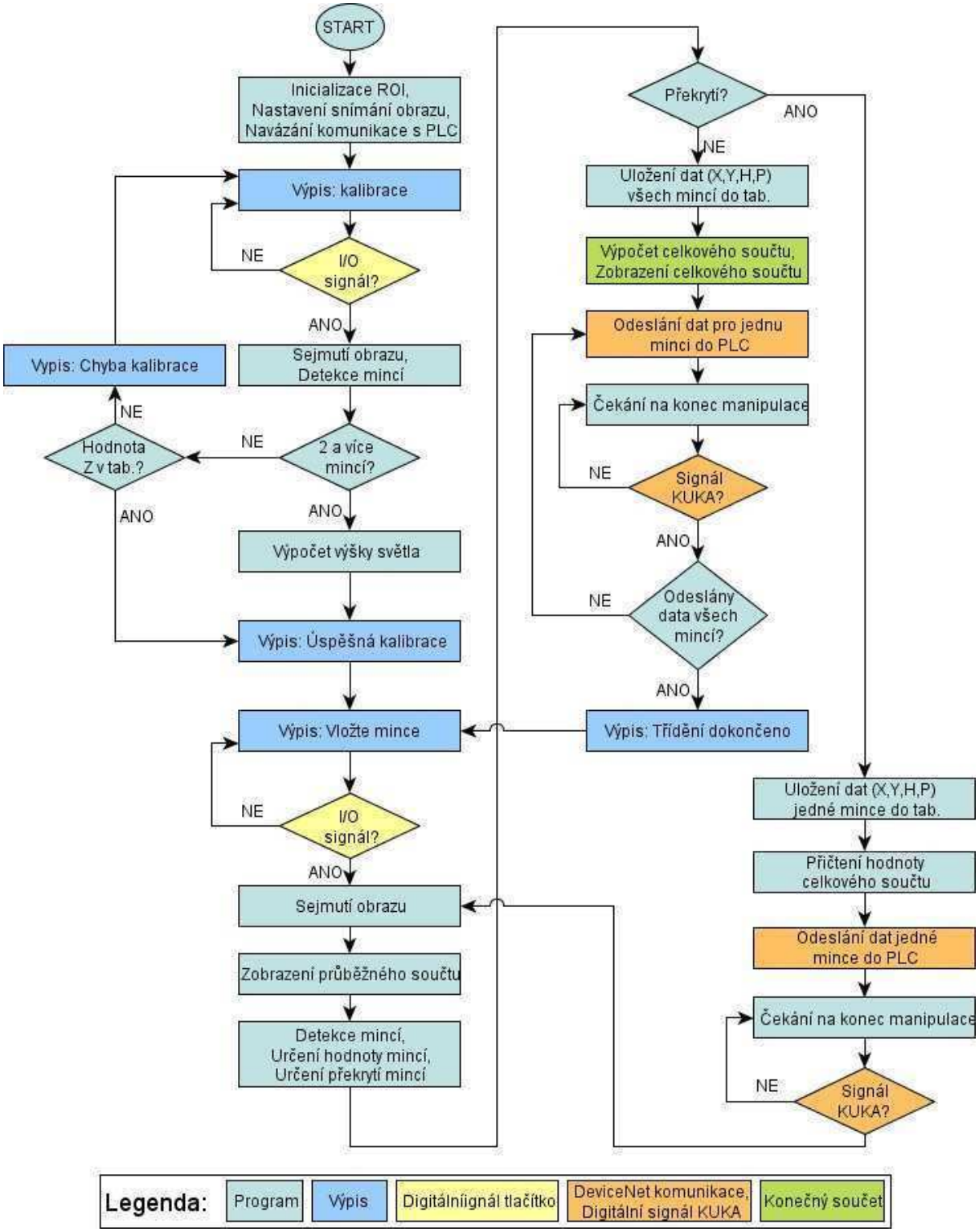
Průběh Inspekčního programu je znázorněn na Obr. 26.

Po zapnutí kamery proběhne definice oblasti zájmu tzv. ROI (Region Of Interest). ROI udává oblast v sejmutém obraze, která je používána dalšími kroky programu. V začátku programu je definovaný ROI určen přes celý snímaný obraz.

Následně je inicializováno komunikační spojení mezi kamerou a PLC. Nástroj Open Ethernet Raw v nastavení TCP outgoing naváže komunikaci na příslušném portu. Toho je využito v průběhu programu pro odesílání dat do PLC, které na daném portu naslouchá.

Nastaví se parametry pro sejmutí obrazu (Grab Setup), které jsou opět používány u snímání obrazu v průběhu programu. Nastavitelnými parametry doby expozice, hodnoty gain (udává velikost zvětšení intenzity světla, světlost)

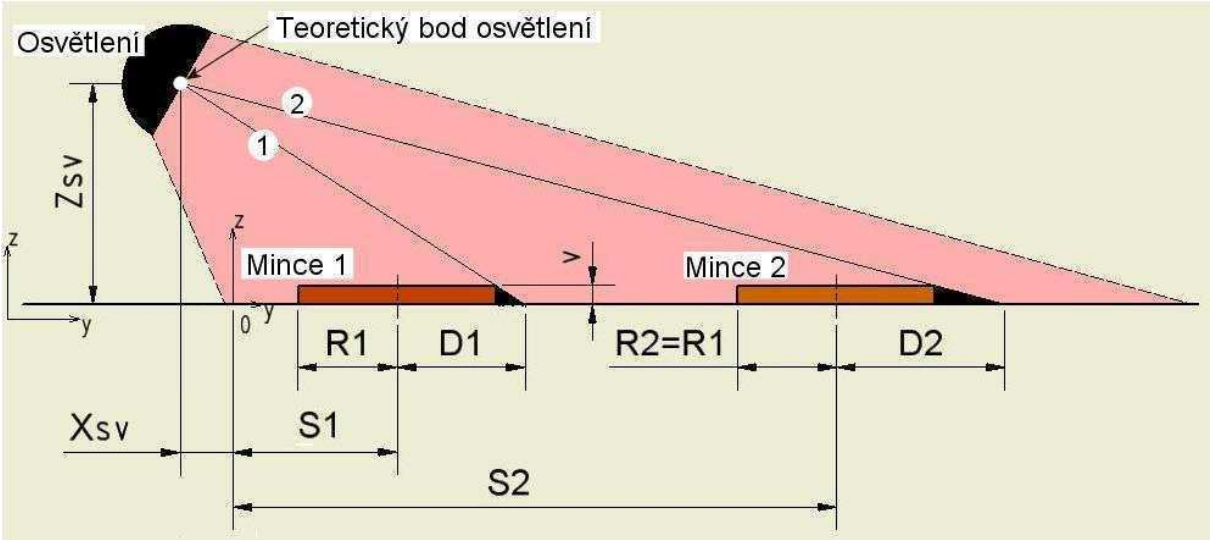
Z tabulky jsou vymazány hodnoty předchozího inspekčního programu. Jedinou nevymazanou hodnotou tabulky jsou první dva řádky, které slouží k uložení polohy světla nad podložkou (dále označovány Zsv a Xsv).



Obr. 26 Vývojový diagram činosti inspekčního programu

4.1.1. KALIBRACE

Následuje kalibrační část programu. Nejedná se o kalibraci souřadnicového systému, jak bylo popsáno v Kap. 1.5, ta je provedena před spuštěním inspekčního programu. Jedná se o kalibraci výšky osvětlení nad podložkou. Jak je vidět na Obr. 27, velikost stínu se mění v závislosti na vzdálenosti objektu od zdroje světla. To je způsobeno tím, že osvětlení nevyzařuje světelné paprsky rovnoběžně, ale rozbíhavě. V programu je proto vypočítán teoretický bod osvětlení, z kterého vychází světlo.



Obr. 27 Geometrie stínu - boční pohled

V začátku kalibrační části programu je výzva o vložení dvou mincí největší tloušťky. Je zapotřebí vložit dvě mince stejné hodnoty a to tak, že jedna bude umístěna co nejblíže ke zdroji světla, druhá pak co nejdále (kóty S1 a S2). Po vložení mincí je dán programu signál k provedení kalibrace, pomocí tlačítka připojeného na digitální vstup kamery. Následuje sekvence, při níž jsou identifikovány polohy mincí (X, Y), hodnota vzdálenosti od horního okraje obrazu (S), průměr mince (R) a délka stínu (D) udávající vzdálenost od středu mince po okraj stínu. Hodnoty se uloží do tabulky. Tato sekvence je totožná s inspekční částí programu a podrobně je rozebrána v Kap. 4.1.1.

Následuje kontrola, zda byly vloženy alespoň dvě mince. Při vložení více mincí se provede kalibrace podle nejbližší a nejvzdálenější mince od osvětlení (horní okraj obrazu). Jestliže nebyla vložena mince, program zkontroluje, zda je v tabulce uložena hodnota výšky osvětlení (Zsv) z předchozí kalibrace. Pokud je hodnota nulová, je vypsána chybová hláška. Jestliže je hodnota nenulová bere se jako kalibrační a program přejde na inspekční část.

Při detekci dvou mincí je vypočten teoretický bod osvětlení a jeho poloha (Xsv, Zsv) uložena do tabulky (na prvních dvou pozicích). Poloha bodu je vypočtena pomocí nástroje Line Intersection, který počítá polohu průsečíku přímek (1) a (2). Výška Zsv a poloha Xsv je dále v programu použita pro kontrolu velikosti stínu.

4.1.2. INSPEKCE

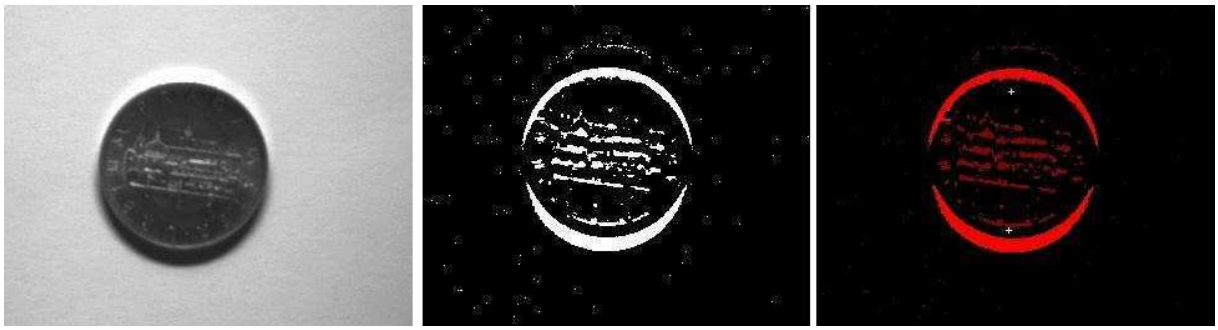
Po kalibraci program plynule přejde do části samotné inspekce. Nejprve je zobrazena výzva pro vložení mincí a program čeká na signál z tlačítka připojeného na digitální vstup. Nástroj Read Imput (v režimu wait) zaznamená stisknutí a spustí inspekci mincí.

Nejprve se vymaže tabulka, zanechají se pouze první hodnoty a to výška a poloha teoretického bodu osvětlení (Zsv, Xsv) a hodnota mezisoučtu mincí. Mezisoučet je hodnota již manipulovaných mincí, jež překrývaly ostatní mince. Při prvním průchodu programu je tato hodnota rovna nule.

Provede se sejmutí obrazu (Grab) a obraz se zkopíruje do banku 3 (Copy Image Bank), kde slouží k zobrazování výsledků inspekce (Obr. 28a). Vypíše se mezisoučet mincí.

Následně se aplikován nástroj zvýraznění detailů (Detail Extraction). Tento nástroj projde obraz (případně určené ROI) a vytvoří binární obraz. Světlá místa binární obrazu jsou přechody mezi hloubkami šedi, které pasují do nastavené hodnoty gradientu změny. Dále se nastavuje, zda bude zobrazen přechod z tmavých na světlé pixely, ze světlých na tmavé nebo oba tyto případy. Dále zobrazované prvky ovlivní typ prohledávání obrazu.

Byla použita metoda horizontálního prohledávání, gradient tresholdu 12 a poloměr zobrazení 6. To znamená, že obraz je prozkoumáván ze shora dolů po sloupcích a dojde-li, při přechodu mezi pixely, ke změně světlosti o hodnotu 12 jsou do binárního obrazu zaneseny pixely v rozmezí 6 od detekované změny. V kombinaci s bočním osvětlením, situovaným na horní hraně obrazu, vzniká obraz se zvýrazněnými částmi, na kterém dominují dva půlměsíce (Obr. 28b). Půlměsíce určují hranu mince horní nebo spodní. Testování tohoto postupu prokázalo, že horní hrana (půlměsíc) je vždy zobrazen velmi přesně.



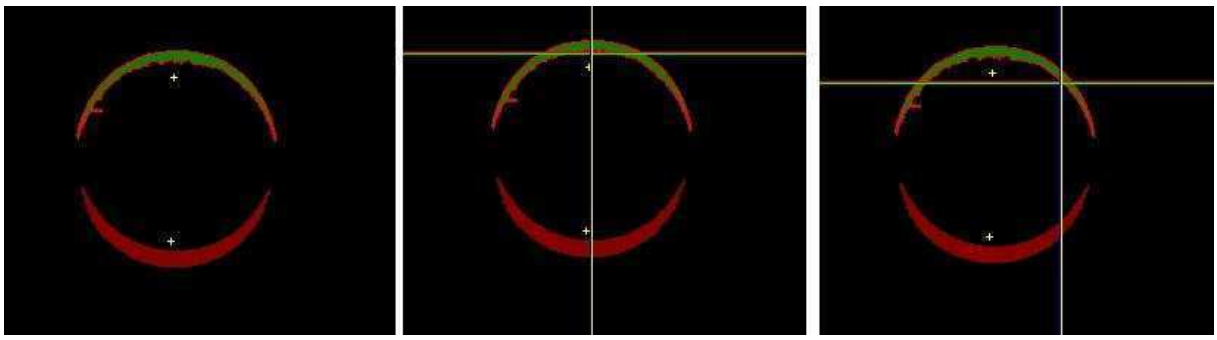
a) *b)* *c)*

Obr. 28 Ukázka programu, inspekce, část 1 – a) sejmutý obraz, b) zvýraznění detailů, c) určení blobů

Nástroj Blob Finder následně z binárního obrazu odfiltruje menší nečistoty a určí pozice středů detekovaných blobů. Odfiltrování je provedeno nastavení minimální hodnoty oblasti blobu. Výsledné souřadnice blobů jsou uloženy do tabulky (od indexu 100) a to postupně podle vzdálenosti od horního okraje. Tím je zajištěno, že bude vyhodnocován vždy jako první půlměsíc blíže vrchnímu okraji obrazu (vyboulený půlměsíc). Na Obr. 28b) je vidět výsledek, světle červené půlměsíce jsou detekované bloby a tmavě červené jsou zanedbané oblasti.

Následuje cyklus FOR, který se opakuje tolikrát, kolik bylo nalezeno blobů. Tím je zaručeno prozkoumání všech nalezených půlměsíců. Jako první v této sekvenci je vymazán bank 1.

Softsensor Blob Analyzer určí další parametry daného blobu. Parametry se určují vždy pro jeden blob, určený indexem opakování cyklu FOR. Analyzer je zde užit proto, aby určil polohu levého bodu blobu, jeho šířku a vykreslil jeho obvodové hranice do banku 1. Výsledek inspekce je uchováván v softsenzoru do jeho dalšího užití. Softsenzor zobrazí aktuální blob jako zelený se světle červenou hranicí, ostatní zjištěné bloby jsou zobrazeny tmavě červenou (Obr. 29a).



a) *b)* *c)*

Obr. 29 Ukázka programu, inspekce, část 2 – a) zobrazení hranic aktuálního blobu, b) a c) detekce hranice blobu

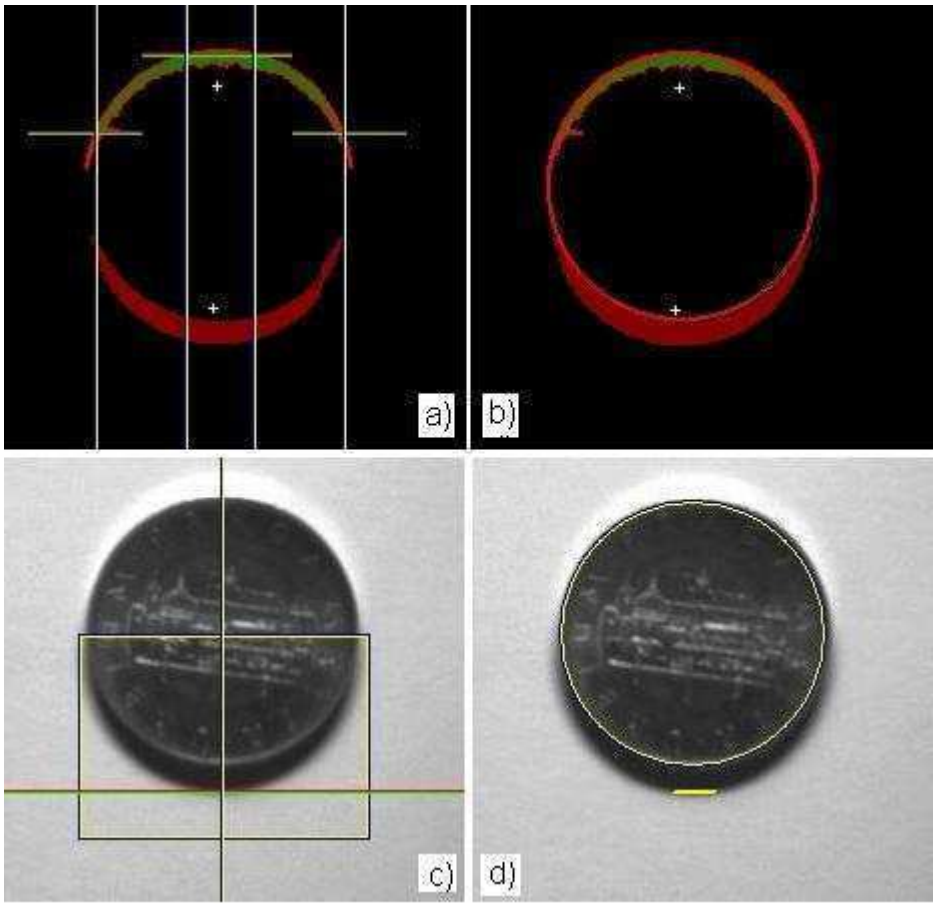
V banku 1, který zobrazuje hranice blobu se provede detekce hrany. Find Colum Edge určí souřadnice y, tak že detekuje barevnou hodnotu pixelu v daném sloupci. Detekuje se ve směru zezdola nahoru. Je užito dvou těchto detekcí na souřadnicích středu (Obr. 29b) a na souřadnicích vpravo od středu (Obr. 29c). Polohy sloupců pro detekci jsou vypočítány dle parametrů z Blob Analyzeru.

Následně se porovnají výsledné hodnoty v ose y. Jestliže y hodnota středu je menší (bráno od horní hrany obrazu), než hodnota pro okraj, znamená to, že se jedná o vypouklý půlměsíc. V tomto případě program provede analýzu průměru. V opačném případě jedná-li se o vydutý půlměsíc je analýza obrazu přeskočena a následuje nová iterace cyklu FOR.

Zjištění průměru se provádí vytvořeným makrem. Na začátku makra musí být znovu definován ROI.

Následuje detekce čtyř hran obdobným způsobem, jakým u zjištění prohnutí půlměsíce. Rozdíl je ve směru detekce (shora dolů), tím se detekuje skutečná hrana

mince. X souřadnice detekcí jsou určeny na základě šířky blobu a pozice jeho levého okraje tak, aby byly rozloženy po jeho šířce (Obr. 30a).



Obr. 30 Ukázka programu, inspekce, část 3 – a) detekce horní hrany, b) proložení kruhu body, c) detekce stínu, d) vizualizace výsledku

Vypočtenými body je proložena kružnice (Fit Circle). Tento softsenzor proloží kružnici čtyřmi body a vypočte jeho poloměr a souřadnice středu (Obr. 30b). Hodnoty jsou vypočítány s přesností 1/3 pixelu. Následuje kontrola velikosti kružnice, jestli nedošlo k naměření nežádoucí hodnoty.

Vypočte se vzdálenost S udávající polohu středu od horní hrany obrazu. Následuje porovnání, která z hodnot, jestli vzdálenost od horního okraje plus 50 či vzdálenost středu kruhu ke spodnímu okraji je menší. Menší hodnota se uloží a je použita pro zadání rozměru ROI ve směru y. Tím je docíleno, aby ROI nikdy nepřesáhl spodní hranici obrazu. Jestliže ROI přesáhne hranice obrazu, vede to k chybě programu.

Ve vytvořeném ROI, které má polohu určenou šířkou zkoumaného blobu a polohu dle středu vložené kružnice. V této oblasti se provádí detekce hrany stínu nástrojem Find Colum Edge a to přímo ze sejmutého obrazu (Obr. 30c). Nástroj je nastaven na detekci zespod nahoru a detekuje tmavou hranu stínu. V průběhu

testování detekce stínu tímto způsobem byla zjištěna nevýhoda. Jestliže se pod mincí (ve vertikálním směru obrazu) nachází jiná mince v těsné blízkosti, je tato detekována jako stín. Hrana stínu je určena okamžitě na spodní hranici ROI. Následně je stín vnímán programem jako velký a je určeno, že mince překrývá jinou a je manipulována okamžitě. Zvýší se tak čekání na konečný výsledek součtu mincí. Metoda však nevnáší jiné chyby a je velmi rychlá, z toho důvodu je i nadále užívána.

Je vypočítána délka stínu D, určená vzdáleností středu kružnice od bodu detekce stínu (Obr. 27).

Následně jsou hodnoty pozice středu kružnice X a Y, vzdálenost S a délka stínu D zapsány do tabulky (od indexu 200). Zvýší se hodnota reprezentující počet detekovaných mincí.

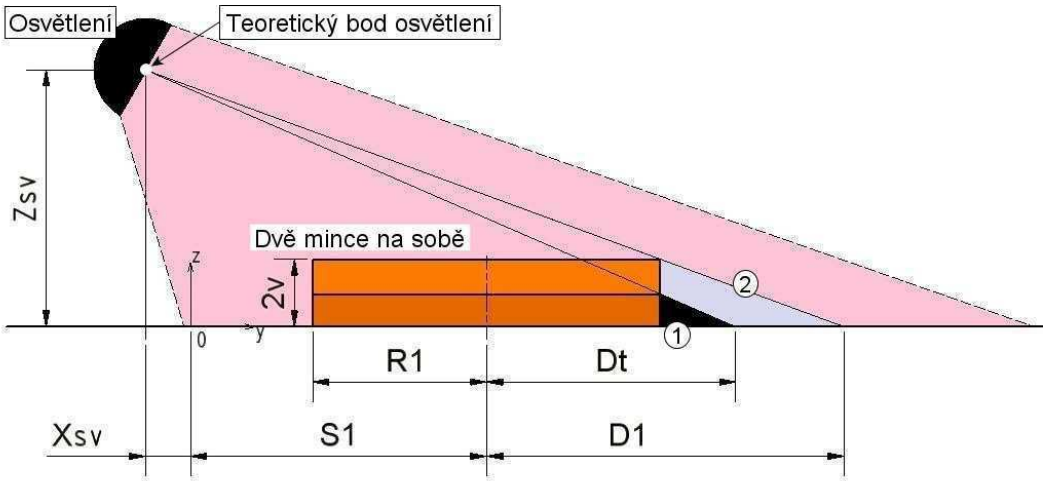
Výsledek určení průměru a stínu je následně vykreslen do banku 3 (Obr. 30d). Vizualizace výsledků slouží převážně k odladění programu a dá se jednoduše v nastavení makra vypnout.

Následuje konec makra a vyjetí zpátky do hlavního programu. Opětovně se provádí analýza blobu, určení typu půlměsíce a průměru, dokud nejsou analyzovány všechny bloby.

Na základě porovnání zjištěných průměrů je jednotlivým mincím přiřazena jejich nominální hodnota a následně uložena do tabulky (od indexu 300). Testy programu prokázaly správné určování hodnot mincí i přesto, že rozdíly jejich průměru jsou relativně malé.

4.1.3. URČENÍ PŘEKRYTÍ

Další část programu určuje, zda se v sejmutém obraze nacházejí zcela nebo částečně překryté mince. Opět je využito možnosti vytvoření makra. Na Obr. 31 je znázorněna geometrie stínů při překrytí mincí.



Obr. 31 Geometrie stínu při překrytí, boční pohled

Jak je vidět, jestliže jsou dvě mince na sobě, je výsledný stín (2) větší než stín teoretický (1). Makro proto vypočítá teoretický stín (Dt), který by měla vrhat mince v příslušně vzdálenosti od horního okraje obrazu (S1). Výpočet je proveden nástrojem Line Intersection a to z průsečíku přímky (procházející teoretickým bodem osvětlení a hranou mince) a osou y. V kalibrační části programu byla zadána pro výšku mincí hodnota 1 (jednotková) a byly užity největší možné mince. S hodnotou 1 se počítá i při zjištění délky teoretického stínu. Stín Dt je tak největší možný pro mince ležící přímo na podložce. Každý stín (D1) větší než teoretický (Dt) je stínem od překrývající mince. Makro takto zkontroluje všechny detekované mince podle jejich hodnot uložených v tabulce (od indexu 200)

Je-li nenalezena překrývající mince program, pokračuje v sečtení výsledků a odeslání dat. Při nalezení překrývající mince jsou okamžitě uloženy její data X, Y, H, P, do tabulky (od indexu 400), a pro hodnotu P (překrytí) je zapsána hodnota 1. Hodnota 1 v parametru P je informativní pro robot KUKA o poloze mince nad podložkou. Data jsou pak z tabulky vyčtena a převedena na řetězec string, který je odeslán nástrojem Write Ethernet String do PLC. Podoba převodu vypadá následovně:

= str(400)+';'str(401)+';'str(402)+';'str(403)+';'

Výsledný odeslaný řetězec má podobu např.:

884;216;10;1;

Po odeslání dat inspekční program čeká na digitální signál od robotu o dokončené manipulaci. Program uloží průběžnou hodnotu součtu a zobrazí ji, následně skočí na začátek, sejme obraz a opakuje se inspekce.

Další kontrolou je kontrola blízkosti středů mincí. Postupně se zkontroluje první mince se všemi následujícími v tabulce, pak druhá s následujícími a tak pro všechny mince. Kontrola probíhá na porovnání velikosti součtu průměrů mincí a jejich poloh středů. Jestliže vzdálenost středů je menší, než součet průměrů jedná se o částečně překryté mince. Mince níže v tabulce je následně vyhodnocena jako překrývající a to proto, že mince jsou v tabulce uspořádány podle polohy od horního okraje. Jestliže by byla překrývala mince blíže hornímu, nebyla by spodní mince detekována, jelikož by byl zobrazen pouze její spodní půlměsíc (byla by detekována až po roztřídění mince horní).

Obr. 32 Příklad detekce překrývající mince

Jeli vzdálenost středů velmi blízko u sebe a je menší než ¼ poloměru menší z mincí, znamená to že menší mince překrýva větší a je vyhodnocena k okamžité manipulaci. Tato detekce je však provedena velmi zřídka. U menších mincí je detekována větší velikost stínu v důsledku detekce hrany mince spodní a jsou určeny jako překrývají dříve v programu.

4.1.4. ODESLÁNÍ DAT

Při dalším nenalezení překryté mince je vypočten konečný součet ten a ten zobrazen. Uživatel pak nemusí čekat na konec třídění zbytku mincí.

Následuje cyklus FOR, který postupně odesílá data o jednotlivých mincích do PLC a čeká na konec manipulace. Po odeslání všech dat se vymaže zobrazovaný obraz z banku 3 a program najede na začátek na výzvu o vložení mincí pro nové třídění. Rovněž se zobrazí hodnota součtu předchozího třídění.

Data se do PLC odesílají stejným způsobem jako u odeslání hodnot pro překrývající mince. Rozdíl je pouze v postupném vyčítání tabulky a hodnota P je nastavena na nulu. Příklad převodu na string nástrojem Write Ethernet String:

```
str(floor(v(200+s147r1*5)))+';'+str(floor(v(201+s147r1*5)))+';'+str(v(300+s147r1))+';0;'
```

Kde hodnota s147r1 aktuální iterace cyklu FOR, hodnoty 200, 201, 300 pak výchozí indexu tabulky. Souřadnice jsou zaokrouhleny na celé číslo, pro přehlednější přenos. Toto zaokrouhlení je možné, protože není nutné uchopovat mince s desetinovou přesností.

Odeslaný strig se rovněž zobrazí u jednotlivých mincí pro kontrolu.

Obr. 33 Příklad zobrazení jednotlivých průměrů, stínů a stringů

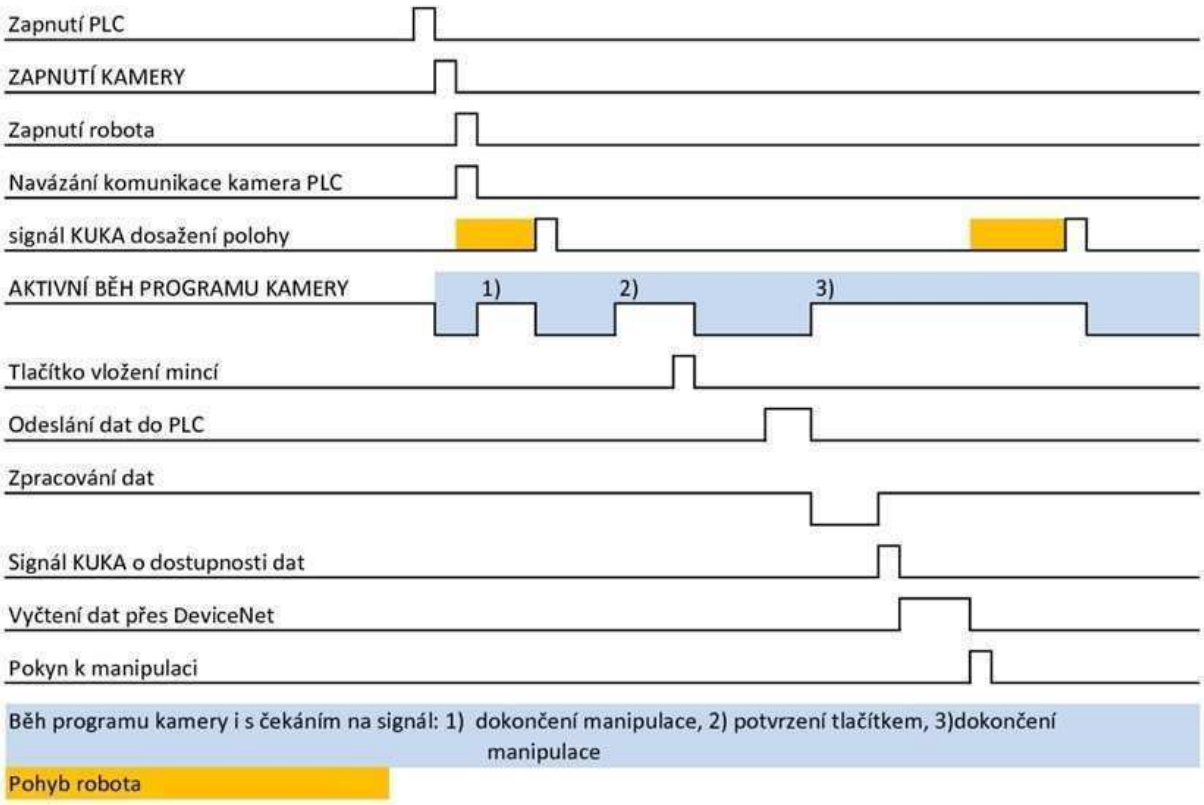
4.2. PROGRAM KUKA KR3

Robot v demonstrační aplikaci slouží jako manipulátor. K tomuto účelu je nutné ho vybavit příslušným uchopovacím zařízením. Byl zvolen podtlakový snímací prvek s odpružením. Přísavka jedinou vhodnou možností manipulace pro zadanou úlohu. Vzhledem k velikosti cílového prostoru manipulace není kutné udávat souřadnice mincí s přesností na desetinná místa. A souřadnice jsou zaokrouhlovány na celá čísla.

Před samotným procesem třídění je nutné kalibrovat souřadný systém kamery se souřadným systémem robota. Toho je docíleno najetím koncového efektoru robota postupně na body kalibračního terče a odečtení světových souřadnic. Tyto hodnoty jsou následně zadány do kalibrační tabulky kamery.

Po zapnutí robotu se inicializují proměnné a robot najede do výchozí tzv. home pozice. Po najetí do pozice vyšle digitální signál přímo kameře a čeká na signál od PLC. Jakmile PLC zpracuje data z kamery, odešle digitální signál robotu a ten přes DeviceNet načte hodnoty. Hodnoty si uloží do proměnných a najede na příslušné souřadnice X a Y. Jestliže je hodnota překrytí P rovna 1, robot v ose-z najede výše nad povrch, konkrétně o 3 mm. Odpružení přísavky zajišťuje výškovou korekci u vyšších a nižších mincí. Podle zjištěné hodnoty mince ji robot umístí na předem naučené souřadnice do zásobníku.

Po dokončení manipulace najede opět do výchozí polohy a vyšle signál kameře. Celý cyklus se opakuje, dokud nejsou roztříděny všechny mince. Vývojový diagram průběhu programu robotu je vidět na Obr. 19 v pravé části. Na Obr. 32 je znázorněn průběh signálů demonstrační aplikace.



Obr. 34 Průběh signálů demonstrační aplikace

ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo seznámit se se systémy strojového vidění a vytvoření prakticky orientované demonstrační aplikace. V demonstrační aplikaci je řešen problém snímání většího počtu různých prvků, jejich správná identifikace a roztřídění.

V úvodu práce je pojednáno o současném poznání v oblasti strojového vidění a kamerových systémů spolu s popisem jednotlivých prvků systémů.

Byl proveden rozbor problému třídění objektů, na příkladu mincí, z několika hledisek. Na základě definic vlastností a jednotlivých problémů byla navržena různá řešení z hledisek uspořádání komponent systému, z hlediska detekce objektů a z hlediska odesílání dat. Během návrhu a řešení variant byly otestovány jednotlivé řešení. Na základě teoretického rozboru a prakticky získaných zkušeností byly definovány výhody a nevýhody řešení.

Na základě předešlého rozboru a zkoušek bylo vybráno nejoptimálnější řešení pro demonstrační aplikaci. Jako řídící prvek celého systémy byla zvolena Smart kamera IVC-2DM1122, která provádí inspekční program identifikace mincí a následné předání dat do PLC Beckhoff CX 1010. PLC slouží v systému jako prostředník a upravená data podstupuje průmyslovému robotu KUKA KR3, který na základě těchto dat fyzicky mince roztřídí. Největším problémem se stala správná identifikace mincí, které se překrývaly. Byl proto vytvořen inspekční program, který na základě triangulace stínu rozpozná výškovou polohu mincí.

V diplomové práci bylo dosaženo cíle a byl vytvořen funkční program umožňující identifikaci většího počtu objektů v náhodném polohovém uspořádání.

V průběhu vypracování diplomové práce jsem si prohloubil své znalosti v oblasti strojového vidění ve spolupráci s průmyslovými roboty. Tyto vědomosti jsem následně úspěšně uplatnil při vytváření praktické demonstrační aplikace. Věřím, že nabyté zkušenosti mi pomohou v budoucí profesní praxi.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1 - *Strojové vidění* [online]. c2008 [cit. 2011-05-26]. Systémy strojového vidění. Dostupné z WWW: <http://www.strojove-videni.cz/default.asp?inc=inc/co-je-strojove-videni.htm&id=11>.

2 - KRAJCAR, M. Robotické vidění s průmyslovými roboty KUKA. Brno, 2009. 63 s. Diplomová práce na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Kubela.

3 - Machine Vision : Lectures. In *Machine Vision - Lectures*. TUT (Tampere) : [vl.n.], [2010]. s. 372.

4 - SELINGEROVÁ, S. Systémy průmyslového vidění s roboty Kuka a jeho aplikace na synchronizaci pohybu robotu s pohybujícím se prvkem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Pochylý.

5 - HORNBERG, Alexander. *Handbook of machine vision*. [s.l.] : Wiley-VCH, 2006. 796 s.

6 - *Photonics Dictionary* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Photonic buyers guide. Dostupné z WWW: <http://www.photonics.com/Directory/Dictionary/>.

7 - *Machinevision.co.uk* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Machinevision.co.uk. Dostupné z WWW: <http://www.machinevision.co.uk/>.

8 - FISHER, Jan . *Osvětlovače pro systémy strojového vidění* [online]. 2005 [cit. 2011-05-26]. Automatizace. Dostupné z WWW: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=773>.

9 - N*ational Instrument* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. A Practical Guide to Machine Vision Lighting I. Dostupné z WWW: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6901>.

10 - *National Instrument* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. A Practical Guide to Machine Vision Lighting III. Dostupné z WWW: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/6903>.

11 - *ndiamart* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Shanreya Aqua Products. Dostupné z WWW: <http://www.indiamart.com/shanreya-aquaproducts/products.html>.

12 - ATKINS, Robert M. *Photo.net* [online]. 2004 [cit. 2011-05-26]. Field of View. Dostupné z WWW: <http://photo.net/learn/fov/>.

13 - *Grayfield optical* [online]. c2010 [cit. 2011-05-26]. Depth of Field/Focus. Dostupné z WWW: <http://www.grayfieldoptical.com/depth_of_fieldfocus.html>.

14 - *Netcam.cz* [online]. c2010 [cit. 2011-05-26]. Vybíráme vhodné čočky pro webkamery . Dostupné z WWW: <http://www.netcam.cz/encyklopedie-ip-zabezpeceni/vybirame-vhodne-cocky.php>.

15 - *Edmund optics* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Telecentricity and Telecentric Lenses in Machine Vision. Dostupné z WWW: <http://www.edmundoptics.com/technical-support/imaging/what-is-telecentricity/>.

16 - *Opto Enginnering* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Telecentric lences: Basic information and working principles. Dostupné z WWW: <http://www.opto-engineering.com/telecentric-lenses-tutorial.html>.

17 - SIMANEK, Donald E. *Lock Haven University* [online]. c2006 [cit. 2011-05-26]. L-10 TELECENTRIC LENS SYSTEMS. Dostupné z WWW: <http://www.lhup.edu/~dsimanek/scenario/labman3/telecen.htm>.

18 - *Edmund optics* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Optical filers in Machine Vision. Dostupné z WWW: <http://www.edmundoptics.com/technical-support/imaging/filters/>.

19 - Charge-coupled device. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 16.10 2001, last modified on 27.4.2011 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device>.

20 - *Electronics how stuff works* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. What is the difference between CCD and CMOS image sensors in a digital camera?. Dostupné z WWW: <http://electronics.howstuffworks.com/cameras-photography/digital/question362.htm>.

21 - T*eledine Dalsa : A Teledine Technologies Company* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. CCD vs. CMOS. Dostupné z WWW: <http://www.dalsa.com/corp/markets/ccd_vs_cmos.aspx>.

22 - CCD. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 13.4.2006, last modified on 9.5.2011 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/CCD>.

23 - WOOTTON, Cliff. *A practical guide to video and audio compression: from sprockets and rasters to macroblocks*. [s.l.] : Elsevier, 2005. 787 s. Dostupné z WWW: <http://books.google.com/books?id=kJUczzCvkdgC&pg=PA137&dq=3-ccd+advantage+resolution+detail+colors&lr=&as_brr=0&ei=eAfeSsWFBYqukATwiuiwCA#v=onepage&q=3-ccd%20advantage%20resolution%20detail%20colors&f=false>. ISBN 9780240806303.

24 - *Foveon* [online]. c2010 [cit. 2011-05-26]. X3 Technology. Dostupné z WWW: <http://www.foveon.com/article.php?a=67>.

25 - KREIS, Thomas. *Handbook of holographic interferometry: optical and digital methods*. [s.l.] : Wiley-VCH, 2005. 542 s. Dostupné z WWW: <http://books.google.com/books?id=CNMPLjC0li8C&pg=PA77&dq=vertical-color-filter&hl=en#v=onepage&q=vertical-color-filter&f=false>. ISBN 9783527405466.

26 - *National Instruments* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. What Is the Real-Time NI Embedded Vision System?. Dostupné z WWW: <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8188>.

27 - KRUTÍLEK, J. Systémy průmyslového vidění s roboty Kuka a jeho aplikace na rozpoznávání volně ložených prvků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Kubela.

28 - IVC-2D, IVC-2D HighRes Reader. In *IVC-2D1122 katalogový list* [online]. [s.l.] : [s.n.], 8.3.2011 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <https://www.mysick.com/PDF/Create.aspx?ProductID=36962&Culture=cs-CZ>.

29 - Industrial Vision Camera IVC-2D. In *Operation Instruction* [online]. [s.l.] : [s.n.], 8.3.2011 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <https://www.mysick.com>

30 – Application Programming Manual IVC-2D. In *Referencemanual* [online]. [s.l.] : [s.n.], 8.3.2011 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <https://www.mysick.com>

31 - *SICK : Sensor Inteligent* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. O firmě SICK. Dostupné z WWW: <http://www.sick.com/cz/cs-cs/home/about_sick/Pages/about_sick.aspx>.

32 – Optical Measurement: Lectures. In *OpticalMeasurement - Lectures*. TUT (Tampere) : [vl.n.], [2010]. s. 177.

33 - *ČNB : Česká národní banka* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. České mince. Dostupné z WWW: <http://www.cnb.cz/cs/platidla/mince/>.

34 - *KUKA* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. KUKA. Dostupné z WWW: <http://www.kuka-robotics.com/czech_republic/cs/>.

35 - *Beckhoff* [online]. c2010 [cit. 2011-05-26]. Beckhoff. Dostupné z WWW: <http://www.beckhoff.com/>.

SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 1 Inspekce náhodně rozmístěných objektů
Obr. 2 Schéma zapojení hardwaru
Obr. 3 červené LED světelné pole
Obr. 4 Gemetrie osvětlení
Obr. 5 Porovnání spektrální citlivosti snímačů
Obr. 6 Uspořádání otického systému
Obr. 7 Porovnání normální a telecentrické čočky
Obr. 8 Geometrické vady optiky
Obr. 9 Kamerový senzor FQ od firmy Omron
Obr. 10 Příklad PC systému
Obr. 11 Schéma inteligentní kamery
Obr. 12 Kompaktní systém firmy National Instruments
Obr. 13 Příklady 3D systémů
Obr. 14 Smart kamera IVC-2DM1122
Obr. 15 Schéma uložení dat
Obr. 16 Kalibrační terč
Obr. 17 Možné polohy mincí
Obr. 18 Schéma koncepce pracoviště
Obr. 19 Vývojový diagram činosti zařízení a jejich komunikace
Obr. 20 Ukázka aplikace nástroje Blob Finder
Obr. 21 Ukázka nástroje Shape Locator
Obr. 22 Ukázka nástroje External Perimeter
Obr. 23 Příklad užití více kamer s detaily jejich pohledů
Obr. 24 Příklad užití zrcadel
Obr. 25 Detekce stínu
Obr. 26 Vývojový diagram činosti inspekčního programu
Obr. 27 Geometrie stínu - boční pohled
Obr. 28 Ukázka programu, inspekce, část 1
Obr. 29 Ukázka programu, inspekce, část 2
Obr. 30 Ukázka programu, inspekce, část 3
Obr. 31 Geometrie stínu při překrytí, boční pohled
Obr. 32 Příklad detekce překrývající mince
Obr. 33 Příklad zobrazení jednotlivých průměrů, stínů a stringů
Obr. 34 Průběh signálů demonstrační aplikace

Tabulka 1 Parametry mincí
Tabulka 2 Rozbor možností řešení

SEZNAM ZDROJŮ OBRÁZKŮ

36 - *Výhodná energie* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Výhodná energie. Dostupné z WWW: <http://vyhodna-energie.cz/>.

37 - CCD sensor. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 28.8.2006, last modified on 28.8.2006 [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/CCD_sensor>.

38 - *123RF* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. The optical scheme of a camera lens. Dostupné z WWW: <http://www.123rf.com/photo_2550769_the-optical-scheme-of-a-camera-lens.html>.

39 - *Quickest computer resorces* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. What is a CPU what is use for. Dostupné z WWW: <http://www.quicktiming.org/what-is-a-cpu-and-what-is-use-for>.

40 - *Portland bolt* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Heavy hex nuts. Dostupné z WWW: <http://www.portlandbolt.com/products/nuts/heavy_hex_nuts.html>.

41 - *Graftek Imaging* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Area Array. Dostupné z WWW: <http://www.graftek.com/pages/AL4424-660-NI.htm>.

42 - *Edmund optics* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Telecentricity and Telecentric Lenses in Machine Vision. Dostupné z WWW: <http://www.edmundoptics.com/technical-support/imaging/using-telecentric-lenses/>.

43 - File:Lens6a.svg. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lens6a.svg>.

44 - Distortion %28optics%29. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion_%28optics%29>.

45 - Coma %28optics%29. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, [cit. 2011-05-26]. Dostupné z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Coma_%28optics%29>.

46 - *Cognex* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. What is machine vision?. Dostupné z WWW: <http://www.cognex.com/CognexInfo/FastFacts/default.aspx?id=216>.

47 - *Systémy strojového vidění* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Inteligentní kamera. Dostupné z WWW: <http://www.strojove-videni.cz/default.asp?inc=inc/obr_ssv_3.htm&id=24>.

48 - *mpact vision technologies* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Vision system. Dostupné z WWW: <http://www.go-ivt.com/national-instruments>.

49 - *Automaatioseura* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Machine Vision news. Dostupné z WWW: <http://www.automaatioseura.fi/jaostot/mvn/mvn7/measuring.html>.

50 - RUSNÁK, J. Návrh automatizovaného pracoviště pro skládání výrobků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, fakulta strojního inženýrství, 2009. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. František Bradáč, Ph.D.

51 - *Er-soft* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Siemens S5-945 PLC. Dostupné z WWW: <http://www.er-soft.com/en/products/v/s5-cx945-s7-cx416-plc/>.

52 - *Robot Worx* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. Kuka KR3 Robot. Dostupné z WWW: <http://www.robots.com/kuka.php?robot=kr+3>.

53 - *JR Bal* [online]. c2011 [cit. 2011-05-26]. JR Bal. Dostupné z WWW: <http://shop.jrbal.sk/index.php?main_page=index&cPath=142>.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

CAN	Controller–area network
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-oxide Semiconductor
DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
FOV	Field of View
IP	Internet Protocol
OPC	OLE for Process Control (Object Linking and Embedding)
PC	Personal Computer
PLC	Programmable Logic Controler
RAM	Random-access memory
ROI	Region of Interest
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SSD	Solid State Device
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
VGA	Video Graphic Array

aj.	a jiné
apod.	a podobně
atd.	a tak dále
kap.	kapitola
např.	například.
obr.	obrázek
tab.	tabulka
tzn.	to znamená
tzv.	tak zvaný

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Inspekční program kamery

PŘÍLOHY NA CD

Příloha 2 - Poster k diplomové práci (formát PDF)

PŘÍLOHA 1 – Inspekční program kamery

ROI_celkovy_1024x768

	ROI Rectangle				
0	01 = X offset	0	.....	.....	.....
	02 = Y offset	0	.....	.....	.....
	03 = X coordinate	0	.....	.....	.....
	04 = Y coordinate	0	.....	.....	.....
	05 = Width	1024	.....	.....	.....
	06 = Height	768	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

navazani_komunikace_s_PLC

	Open Ethernet Raw [Not emulated]				
1	01 = Timeout (ms)	100	.....	.....	.....
	02 = Transport protocol	TCP outgoing	.....	.....	.....
	04 = IVC device port	5000	.....	.....	.....
	05 = Associated IP	0.0.0.0	.....	.....	.....
	06 = Associated port	0	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

Nastaveni_sejmuti

	Grab Setup				
2	01 = Exposure time (µs)	2200	.....	.....	.....
	02 = Gain	270	.....	.....	.....
	03 = External trigger	False	.....	.....	.....
	04 = Trigger slope	Falling	.....	.....	.....
	05 = Strobe enable	False	.....	.....	.....
	06 = Strobe time (µs)	1000	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

vymazani_tabulky

	Fill Table				
3	01 = Value	0	.....	.....	.....
	02 = Start table index	2	.....	.....	.....
	03 = End table index	1999	.....	.....	.....
	04 = Fill interval	1	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

KALIBRACE

	Goto				
4	01 = Goto step	5	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

vypis: kalibrace

	Add Text				
5	Time of execution (µs)	0			

cekani_na_signal_(tlacitko)

	Read Input [Not emulated]				
9	01 = Input number	0	.....	.....	.....
	02 = Wait	True	.....	.....	.....
	03 = Wait for	High	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Signal value	0			

Sejmuti_obrazu

10	Grab				
	01 = Destination bank	0	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = File Name	"10kc_A_2.IMG			

Zkopirovani_pro_zobrazeni_vysledku

11	Copy Image Bank				
	01 = Source bank	0	.....	.....	.....
	02 = Destination bank	3	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

Zvyrazneni_hran

12	Detail Extraction				
	01 = Source Bank	0	.....	.....	.....
	02 = ROI Definition Step	0	.....	.....	.....
	03 = Operator Type	Vertical	.....	.....	.....
	04 = Threshold	12	.....	.....	.....
	05 = Operator Radius	6	.....	.....	.....
	06 = Destination Bank	1	.....	.....	.....
	07 = Deviation Type	Dark	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
Setup	01 = Number of Detail Pixels	6556			

Blob_odfiltrovani_necistot

13	Blob Finder				
	01 = Source Bank	1	.....	.....	.....
	02 = ROI Definition Step	0	.....	.....	.....
	03 = Destination Bank	2	.....	.....	.....
	04 = Generate Blob Image	Enabled	.....	.....	.....
	05 = Lower Threshold	1	.....	.....	.....
	06 = Upper Threshold	255	.....	.....	.....
	07 = Threshold Mode	Manual	.....	.....	.....
	08 = Min Blob Area (pixels)	200	.....	.....	.....
	09 = Max Blob Area (pixels)	10000	.....	.....	.....
	10 = Timeout (ms)	1000	.....	.....	.....
	11 = Discard Edge Blobs	Enabled	.....	.....	.....
	12 = Fill Holes in Blobs	Disabled	.....	.....	.....
	13 = Sort By	Vertical Position	.....	.....	.....
	14 = Sorting Order	Ascending	.....	.....	.....
	15 = Sorting Point X	=v0	.....	.....	.....
	16 = Sorting Point Y	0	.....	.....	.....
	17 = Table Index	100	.....	.....	.....
	18 = Max Blobs in Table	20	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Number of Found Blobs	5			
	02 = Lower Threshold Used	1			
Setup	03 = Upper Threshold Used	255			

FOR_pro_zjisteni_vsech_prumeru

	For				
	01 = Start value	0	------	------	------
	02 = End value	=s13r1-1	------	------	------
14	03 = Increment	1	------	------	------
	04 = END step	47	------	------	------
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Loop index	5			

vymazani_banku_1

	Reset Image Banks				
15	Time of execution (µs)	0			

analyza_blobu

	Blob Analyzer				
	01 = Blob Finder Step Number	13	------	------	------
	02 = Blob Index	=s14r1	------	------	------
	03 = Destination Bank	1	------	------	------
	04 = Visualize Results	Enabled	------	------	------
	05 = Display Centroids	Disabled	------	------	------
	06 = Orientation Method	None	------	------	------
	07 = Compute Bounding Box	Enabled	------	------	------
	08 = Compute Diameters	Disabled	------	------	------
	09 = Angular Resolution (degrees)	1,0	------	------	------
	10 = Compute Perimeter	Enabled + Visualized	------	------	------
	11 = Create Blob ROI	Disabled	------	------	------
16	Time of execution (µs)	0			
	01 = Blob Area (pixels)	722			
	02 = Left Edge of Blob	535			
	03 = Top Edge of Blob	695			
	04 = Blob Width (pixels)	105			
	05 = Blob Length (pixels)	35			
	06 = Blob Centroid X	588,04			
	07 = Blob Centroid Y	717,463			
	08 = Blob Orientation (degrees)	-1			
	09 = Blob Ovality	-1			
	10 = Max Diameter of Blob (pixels)	-1			
	11 = Min Diameter of Blob (pixels)	-1			
	12 = Average Diameter of blob (pix	-1			
	13 = Blob Perimeter Length (pixels)	284			
	14 = Bounding Box Center X	-1			
	15 = Bounding Box Center Y	-1			
	16 = Bounding Box Width (pixels)	-1			
	17 = Bounding Box Length (pixels)	-1			
	18 = Blob Volume (3D only)	-1			
Setup	19 = Blob Height (3D only)	-1			

detekce_hrany_stredu_pulmesice

	Find Column Edge				
17	01 = Source bank	=s16a3	.....	.....	.....
	02 = Column	=s16r6	.....	.....	.....
	03 = Analysis direction	Down -> up	.....	.....	.....
	04 = Gray low	245	.....	.....	.....
	05 = Gray high	250	.....	.....	.....
	06 = ROI definition step	0	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Row	728			

detekce_hrany_prave_strany_pulmesice

	Find Column Edge				
18	01 = Source bank	=s16a3	.....	.....	.....
	02 = Column	=s16r6+s16r4/3	.....	.....	.....
	03 = Analysis direction	Down -> up	.....	.....	.....
	04 = Gray low	245	.....	.....	.....
	05 = Gray high	250	.....	.....	.....
	06 = ROI definition step	0	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Row	716			

IF_kontrola_mesicovitosti

	If				
19	01 = Control expression	=s17r1<s18r1	.....	.....	.....
	02 = ELSE or END step	46	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

Zjisteni_prumeru

	Zjisteni_prumeru				
20	01 = source bank	1	.....	.....	.....
	02 = destination bank	2	.....	.....	.....
	03 = X pozice blobu	=v(100+(s14r1*3))	.....	.....	.....
	04 = Y pozice blobu	=v(101+(s14r1*3))	.....	.....	.....
	05 = Vykreslit	True	.....	.....	.....
	06 = leva_cast_blobu	=s16r2	.....	.....	.....
	07 = vykreslovaci bank	3	.....	.....	.....
	08 = sirka_blobu	=s16r4	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = X pos	587,9599609375			
	02 = Y pos	651,410766601563			
	03 = R mince	63,0874443054199			
	04 = D stinu	77,5892333984375			

Podprogram makra:

	ROI Rectangle		
1	Time of execution (µs)	0	

bod_1

	Find Column Edge				
	01 = Source bank	=s0r1	-----	-----	-----
	02 = Column	=s0r6+5	-----	-----	-----
	03 = Analysis direction	Up -> down	-----	-----	-----
2	04 = Gray low	245	-----	-----	-----
	05 = Gray high	250	-----	-----	-----
	06 = ROI definition step	1	-----	-----	-----
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Row	426			

bod_2

	Find Column Edge				
	01 = Source bank	=s0r1	-----	-----	-----
	02 = Column	=s0r3-(s0r8/8)	-----	-----	-----
	03 = Analysis direction	Up -> down	-----	-----	-----
3	04 = Gray low	245	-----	-----	-----
	05 = Gray high	250	-----	-----	-----
	06 = ROI definition step	1	-----	-----	-----
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Row	387			

bod_3

	Find Column Edge				
	01 = Source bank	=s0r1	-----	-----	-----
	02 = Column	=s0r3+(s0r8/8)	-----	-----	-----
	03 = Analysis direction	Up -> down	-----	-----	-----
4	04 = Gray low	245	-----	-----	-----
	05 = Gray high	250	-----	-----	-----
	06 = ROI definition step	1	-----	-----	-----
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Row	387			

bod_4

	Find Column Edge				
	01 = Source bank	=s0r1	-----	-----	-----
	02 = Column	=s0r6+s0r8-5	-----	-----	-----
	03 = Analysis direction	Up -> down	-----	-----	-----
5	04 = Gray low	245	-----	-----	-----
	05 = Gray high	250	-----	-----	-----
	06 = ROI definition step	1	-----	-----	-----
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Row	428			

Vlozeni_kruhu

6	Fit Circle				
	01 = Source bank	=s0r1	.....	.....	.....
	02 = X1	=s2a2	.....	.....	.....
	03 = Y1	=s2r1	.....	.....	.....
	04 = X2	=s3a2	.....	.....	.....
	05 = Y2	=s3r1	.....	.....	.....
	06 = X3	=s4a2	.....	.....	.....
	07 = Y3	=s4r1	.....	.....	.....
	08 = X4	=s5a2	.....	.....	.....
	09 = Y4	=s5r1	.....	.....	.....
	10 = Destination bank	=s0r2	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = X center	629,1944			
	02 = Y center	452,2594			
	03 = Radius	67,38897			

IF_kontrola_velikosti_mince

7	If				
	01 = Control expression	=s6r3>45 and s6r3<75	.....	.....	.....
	02 = ELSE or END step	24	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

vypocet_vydalenosti_S

8	Distance and Angle				
	01 = Start point X	=s6r1	.....	.....	.....
	02 = Start point Y	0	.....	.....	.....
	03 = End point X	=s6r1	.....	.....	.....
	04 = End point Y	=s6r2	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Distance	442,4063			
	02 = Line angle	270			

min_Y

9	Mathematical Operation				
	01 = Variable A	=s6r3+50	.....	.....	.....
	02 = Variable B	=765-s6r2-1	.....	.....	.....
	03 = Mathematical operation	Min	.....	.....	.....
	04 = Table index	2	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

ROI_pro_stin

10	ROI Rectangle				
	01 = X offset	0	.....	.....	.....
	02 = Y offset	0	.....	.....	.....
	03 = X coordinate	=s6r1-s6r3-5	.....	.....	.....
	04 = Y coordinate	=s6r2	.....	.....	.....
	05 = Width	=s6r3*2+10	.....	.....	.....
	06 = Height	=s9r1	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

detekce_stinu

11	Find Column Edge				
	01 = Source bank	0	------	------	------
	02 = Column	=s6r1	------	------	------
	03 = Analysis direction	Down -> up	------	------	------
	04 = Gray low	0	------	------	------
	05 = Gray high	100	------	------	------
	06 = ROI definition step	10	------	------	------
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Row	513			

Delka_stinu_D

12	Distance and Angle				
	01 = Start point X	=s6r1	------	------	------
	02 = Start point Y	=s11r1	------	------	------
	03 = End point X	=s6r1	------	------	------
	04 = End point Y	=s6r2	------	------	------
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Distance	70,59369			
	02 = Line angle	90			

zapsani_X

13	Write to Table				
	Time of execution (µs)	0			

zapsani_Y

14	Write to Table				
	Time of execution (µs)	0			

zapsani_R

15	Write to Table				
	Time of execution (µs)	0			

zapsani_S

16	Write to Table				
	Time of execution (µs)	0			

zapsani_D

17	Write to Table				
	Time of execution (µs)	0			

pricteni_poctu_minci

18	Mathematical Operation				
	01 = Variable A	=v190	------	------	------
	02 = Variable B	1	------	------	------
	03 = Mathematical operation	+ (Addition)	------	------	------
	04 = Table index	190	------	------	------
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Operation result	1			

Vykresleni_ano/ne

19	If				
	01 = Control expression	=s0r5	------	------	------
	02 = ELSE or END step	23	------	------	------
	Time of execution (µs)	0			

nacteni_kruznice

20	ROI Circle				
	01 = X offset	0	.....	.....	.....
	02 = Y offset	0	.....	.....	.....
	03 = X center	=s6r1	.....	.....	.....
	04 = Y center	=s6r2	.....	.....	.....
	05 = Radius	=s6r3	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

Vykresleni_kruznice_mince

21	Draw ROI				
	01 = ROI definition step	20	.....	.....	.....
	02 = Color	252	.....	.....	.....
	03 = Filling	False	.....	.....	.....
	04 = Destination bank	=s0r7	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

22	Draw Line				
	01 = Start point X	=s6r1-10	.....	.....	.....
	02 = Start point Y	=s11r1	.....	.....	.....
	03 = End point X	=s6r1+10	.....	.....	.....
	04 = End point Y	=s11r1	.....	.....	.....
	05 = Color	252	.....	.....	.....
	06 = Destination bank	=s0r7	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

END_if_vykresleni

23	End				
	01 = Start step	19	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

END_if_kontrola_velikosti_mince

24	End				
	01 = Start step	7	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

Konec makra

END_if_kontrola_mesicovitosti

46	End				
	01 = Start step	19	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

END_for_pro_zjisteni_vsech_prumeru

47	End				
	01 = Start step	14	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

IF_vlozeny_dve_mince

48	If then Goto				
	01 = Control expression	=v190k2	.....	.....	.....
	02 = Goto step	52	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

poloha teoretickeho bodu (Zsv Xsv)

49	Line Intersection				
	01 = Line A start point X	=v203+v204	.....	.....	.....
	02 = Line A start point Y	0	.....	.....	.....
	03 = Line A end point X	=v203+v(197+v190*5)	.....	.....	.....
	04 = Line A end point Y	1	.....	.....	.....
	05 = Line B start point X	=v(198+v190*5)+v(199+v190*5)	.....	.....	.....
	06 = Line B start point Y	0	.....	.....	.....
	07 = Line B end point X	=v(198+v190*5)+v(197+v190*5)	.....	.....	.....
	08 = Line B end point Y	1	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = X intersection	972,6729			
	02 = Y intersection	-16,80298			

Zsv (zapis)

50	Write to Table				
	01 = Value	=s49t2	.....	.....	.....
	02 = Table index	0	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

Xsv (zapis)

51	Write to Table				
	01 = Value	=s49t1	.....	.....	.....
	02 = Table index	1	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

IF_predesla_hodnota_Z_svetla

52	If then Goto				
	01 = Control expression	=v0>0	.....	.....	.....
	02 = Goto step	56	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

smazani_banku_3

53	Reset Image Banks		
	Time of execution (µs)	0	

vypis: nespravna_kalibrace

54	Add Text		
	Time of execution (µs)	0	

skok_na_kalibraci

55	Goto				
	01 = Goto step	4	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

smazani_banku_3

56	Reset Image Banks		
	Time of execution (µs)	0	

vypis: kalibrace v poradku

57	Add Text		
	Time of execution (µs)	0	

INSPEKCE

58	Goto				
	01 = Goto step	59	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

vypis: vyzva k vlozeni minci

59	Add Text				+
	Time of execution (µs)	0			+

cekani_na_signal_(tlacitko)

60	Read Input (Not emulated)				−
	01 = Input number	0	.....	.....	.....
	02 = Wait	True	.....	.....	.....
	03 = Wait for	High	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			−
	01 = Signal value	0			

vymazani_tabulky

61	Fill Table				+
	Time of execution (µs)	0			

SEJMUTI OBRAZU_____

62	Grab				−
	01 = Destination bank	0	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			+

63	Copy Image Bank				−
	01 = Source bank	0	.....	.....	.....
	02 = Destination bank	3	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

vypsani mezisouctu

64	Add Text				+
	Time of execution (µs)	0			+

Zvyrazneni_hran

65	Detail Extraction				−
	01 = Source Bank	0	.....	.....	.....
	02 = ROI Definition Step	0	.....	.....	.....
	03 = Operator Type	Vertical	.....	.....	.....
	04 = Threshold	12	.....	.....	.....
	05 = Operator Radius	6	.....	.....	.....
	06 = Destination Bank	1	.....	.....	.....
	07 = Deviation Type	Dark	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			−
Setup	01 = Number of Detail Pixels	7865			

Blob_odfiltrovani_necistot

66	Blob Finder				−
	01 = Source Bank	1	.....	.....	.....
Setup	Time of execution (µs)	0			+

FOR_pro_zjisteni_vsech_prumeru

67	For				−
	01 = Start value	0	.....	.....	.....
	02 = End value	=s66r1-1	.....	.....	.....
	03 = Increment	1	.....	.....	.....
	04 = END step	100	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			−
	01 = Loop index	3			

vymayani_banku_1			
68	Reset Image Banks		+
	Time of execution (µs)	0	

analyza_blobu					
69	Blob Analyzer				−
	01 = Blob Finder Step Number	66	.....	.....	.....
Setup	Time of execution (µs)	0			−

detekce_hrany_stredu_pulmesice			
70	Find Column Edge		+
	Time of execution (µs)	0	+

detekce_hrany_prave_strany_pulmesice			
71	Find Column Edge		+
	Time of execution (µs)	0	+

IF_kontrola_mesicovitosti			
72	If		+
	Time of execution (µs)	0	

Zjisteni_prumeru					
Macro TOOL 73	Zjisteni_prumeru				−
	01 = source bank	1	.....	.....	.....
	02 = destination bank	2	.....	.....	.....
	03 = X pozice blobu	=v(100+(s67r1*3))	.....	.....	.....
	04 = Y pozice blobu	=v(101+(s67r1*3))	.....	.....	.....
	05 = Vykreslit	True	.....	.....	.....
	06 = leva_cast_blobu	=s69r2	.....	.....	.....
	07 = vykreslovaci bank	3	.....	.....	.....
	08 = sirka_blobu	=s69r4	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			−
	01 = X pos	717,157958984375			
	02 = Y pos	619,392883300781			
	03 = R mince	51,8019523620605			
	04 = D stinu	63,6071166992188			

END_if_kontrola_mesicovitosti					
99	End				−
	01 = Start step	19	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

END_for_pro_zjisteni_vsech_prumeru					
100	End				−
	01 = Start step	67	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

IF-GO 101	If then Goto				−
	01 = Control expression	=v200<1	.....	.....	.....
	02 = Goto step	59	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

zjisteni hodnoty			
Macro TOOL 102	Zjisteni_hodnoty		
	Time of execution (µs)	0	

Podprogram makra:

FOR pro vsechny zjistene mince

	For				
1	01 = Start value	0	.....	.....	.....
	02 = End value	=v190-1	.....	.....	.....
	03 = Increment	1	.....	.....	.....
	04 = END step	14	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Loop index	3			

1 kc ?

	If in Range Goto				
2	01 = Value to be compared	=v(202+5*s1r1)	.....	.....	.....
	02 = Min value allowed	40	.....	.....	.....
	03 = Max value allowed	48,5	.....	.....	.....
	04 = Goto if	Out of range	.....	.....	.....
	05 = Goto step	4	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Comparison result	1			

zapsani hodnoty 1

	Write to Table				
3	01 = Value	1	.....	.....	.....
	02 = Table index	=300+(s1r1)	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

2Kc ?

	If in Range Goto				
4	Time of execution (µs)	0			

zapsani hodnoty 2

	Write to Table				
5	Time of execution (µs)	0			

5Kc ?

	If in Range Goto				
6	Time of execution (µs)	0			

zapsani hodnoty 5

	Write to Table				
7	Time of execution (µs)	0			

10Kc ?

	If in Range Goto				
8	Time of execution (µs)	0			

zapsani hodnoty 10

	Write to Table				
9	Time of execution (µs)	0			

20Kc ?

	If in Range Goto				
10	Time of execution (µs)	0			

zapsani hodnoty 20

	Write to Table				
11	Time of execution (µs)	0			

50Kc ?			
12	If in Range Goto		+
	Time of execution (µs)	0	+
zapsani hodnoty 50			
13	Write to Table		+
	Time of execution (µs)	0	
END_for_pro vsechny zjistene mince			
14	End		+
	Time of execution (µs)	0	

Konec makra

kontrola prekriti			
Macro TOOL	Kontrola_stinu		
	Time of execution (µs)	0	−
	01 = nalezeno prekriti ?	0	
118	02 = X mince	0	
	03 = Y mince	0	
	04 = H mince	0	
	05 = S mince	0	

Podprogram makra:

FOR pro vsechny zjistene mince				
	For			−
	01 = Start value	0	.....	.....	.....
	02 = End value	=v190-1	.....	.....	.....
1	03 = Increment	1	.....	.....	.....
	04 = END step	13	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			−
	01 = Loop index	0			
vymazani tab od 400				
2	Fill Table			+
	Time of execution (µs)	0		
urceni konce stinu				
	Line Intersection			−
	01 = Line A start point X	0	.....	.....	.....
	02 = Line A start point Y	0	.....	.....	.....
	03 = Line A end point X	10	.....	.....	.....
	04 = Line A end point Y	0	.....	.....	.....
	05 = Line B start point X	=v1	.....	.....	.....
3	06 = Line B start point Y	=v0	.....	.....	.....
	07 = Line B end point X	=v(203+s1r1*5)+v(202+s1r1*5)	.....	.....	.....
	08 = Line B end point Y	1	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			−
	01 = X intersection	154,2503			
	02 = Y intersection	0			

vypocet delky stinu teoreticke Dt					
4	Mathematical Expression				
	01 = Expression	=[(s3r1-v(203+s1r1*5))+10]	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Result	79,4642			
IF_ vetsi stine nez maximalni?					
5	If				
	01 = Control expression	=$4r1< v(204+s1r1*5)	.....	.....	.....
	02 = ELSE or END step	11	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
zapsani X					
6	Write to Table				
	Time of execution (µs)	0			
zapsani Y					
7	Write to Table				
	Time of execution (µs)	0			
zapsani X					
8	Write to Table				
	Time of execution (µs)	0			
zapsani P					
9	Write to Table				
	Time of execution (µs)	0			
skok na konec					
10	Goto				
	01 = Goto step	14	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

EBD_if_ vetsi stin nez maximalni ?					
11	End				
	01 = Start step	5	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
zapsani P pro neprekriti					
12	Write to Table				
	01 = Value	0	.....	.....	.....
	02 = Table index	403	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

END_for_pro vsechny zjistene mince					
13	End				
	01 = Start step	1	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

Konec makra

IF_je prekriti?					
133	If				
	01 = Control expression	=s118r1	.....	.....	.....
	02 = ELSE or END step	141	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

pricteni celkoveho souctu

134	Mathematical Operation				
	01 = Variable A	=v3	.....	.....	.....
	02 = Variable B	=v402	.....	.....	.....
	03 = Mathematical operation	+ (Addition)	.....	.....	.....
	04 = Table index	3	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Operation result	10			

vypsani dat mince

135	Add Text				
	Time of execution (µs)	0			

vypsani mezisouctu

136	Add Text				
	Time of execution (µs)	0			

odeslani dat prekrivajici mince

137	Write Ethernet String [Not emulated]				
	01 = OPEN step	1	.....	.....	.....
	02 = Timeout (ms)	1000	.....	.....	.....
	03 = String	00)+','str(401)+','str(402)+','str(403)+','	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Sent bytes	0			

vymazani tab od 400

138	Fill Table				
	Time of execution (µs)	0			

cekani na signal od KUKA

139	Read Input [Not emulated]				
	Time of execution (µs)	0			

skok na sejmuti

140	Goto				
	01 = Goto step	61	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

IF_ je prekriti?

141	End				
	01 = Start step	133	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

FOR_secteni zbytku minci

142	For				
	01 = Start value	0	.....	.....	.....
	02 = End value	=v190-1	.....	.....	.....
	03 = Increment	1	.....	.....	.....
	04 = END step	145	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Loop index	1			

finalni soucet

143	Mathematical Operation				
	01 = Variable A	=v3	.....	.....	.....
	02 = Variable B	=v(300+s142r1)	.....	.....	.....
	03 = Mathematical operation	+ (Addition)	.....	.....	.....
	04 = Table index	3	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Operation result	200			

vypsani dat mince

144	Add Text				
	Time of execution (µs)	0			

END_for_ secteni zbytku minci

145	End				
	01 = Start step	142	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

vypsani finalniho souctu

146	Add Text				
	Time of execution (µs)	0			

FOR_odmanipulovani minci

147	For				
	01 = Start value	0	.....	.....	.....
	02 = End value	=v190-1	.....	.....	.....
	03 = Increment	1	.....	.....	.....
	04 = END step	150	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Loop index	2			

odeslani dat jednotlive mince

148	Write Ethernet String [Not emulated]				
	01 = OPEN step	1	.....	.....	.....
	02 = Timeout (ms)	1000	.....	.....	.....
	03 = String	'+str(floor(v(300+s147r1)))+';'+str(0)+';'	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			
	01 = Sent bytes	0			

cekani na signal od KUKA

149	Read Input [Not emulated]				
	Time of execution (µs)	0			

END_for_odmanipulovani minci

150	End				
	01 = Start step	147	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			

vypsani finalniho souctu 2

152	Add Text				
	Time of execution (µs)	0			

vymayani tab

154	Fill Table				
	Time of execution (µs)	0			

155	Goto				
	01 = Goto step	59	.....	.....	.....
	Time of execution (µs)	0			