Bakalářská práce

České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Kamerová kontrola kvality nátěrové hmoty

Pavel Turnovec

Vedoucí: Ing. Vladimír Smutný, Ph.D.
Obor: Kybernetika a robotika
Studijní program: Systémy a řízení
Květen 2019

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Turnovec** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **424780**

Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**

Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**

Studijní program: **Kybernetika a robotika**

Studijní obor: **Systémy a řízení**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Kamerová kontrola kvality nátěrové hmoty

Název bakalářské práce anglicky:

Machine vision inspection of paint material

Pokyny pro vypracování:

1) Seznamte se s metodou nanášení texturovaného nátěru máčením. Zjistěte požadavky technologie na kamerovou kontrolu.
2) Navrhněte snímací pracoviště a vyberte technické prostředky pro kamerovou kontrolu. Pracoviště sestavte.
3) Navrhněte algoritmy zpracování obrazu, které budou hodnotit nasnímané obrazy a poskytovat zpětnou vazbu robotické buňce, v které je kamera umístěna.
4) Algoritmy implementujte, otestujte a zhodnoťte výsledky.

Seznam doporučené literatury:

[1] Sonka Milan, Hlavac Vaclav, Boyle Roger: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, 2008, Springer
[2] Jaehne Berndt: Digital Image Processing, 2005, Springer

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Vladimír Smutný, Ph.D., robotické vnímání CIIRC

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **14.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce:
do konce letního semestru 2019/2020

Ing. Vladimír Smutný, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	prof. Ing. Michael Šebek, DrSc. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Pavel Ripka, CSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací.
Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Poděkování

Nejprve bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Vladimíru Smutnému, Ph.D. za jeho cenné rady, motivující konzultace a podporu během psaní práce.

Poděkování patří i společnosti Inomech, s. r. o., ve které jsem se na vývoji stroje mohl spolupodílet.

Velmi děkuji také mé rodině za její podporu během studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, ...

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem a realizací systému strojového vidění pro zařízení vyrábějící texturovaně obarvené pastelové tužky. Tvorba této práce probíhala zároveň s montáží a prvotním testováním stroje, jež je v textu částečně dokumentováno. Nejprve jsou stanoveny specifikace, které má kamerový systém splňovat. Souběžně s testováním a zjišťováním poznatků o technologických vlastnostech procesu se požadavky měnily a byly upřesňovány. Byly navrženy změny v uspořádání snímací techniky, aby byl výsledný obraz použitelný pro obrazovou analýzu. Následně je prezentován klasifikační algoritmus aplikovaný na multispektrální obrazy a zhodnoceny výsledky. S ohledem na ně je v závěru navrhnut jiný způsob získání veličin ohodnocujících kvalitu připravené nátěrové hmoty.

Klíčová slova: strojové vidění, pastelky, máčení, nátěrová hmota, klasifikace

Vedoucí: Ing. Vladimír Smutný, Ph.D.
Český institut informatiky,
robotiky a kybernetiky,
Jugoslávských partyzánů 1580/3,
160 00 Praha 6

Abstract

This thesis deals with a machine vision system design and realization for a device producing textured colored crayons. The thesis creation run concurrently with the machine construction and its primary testing, which is partly documented in the text. At first, specifications for the camera system are defined. Requirements were changed and redefined by testing and acquiring knowledge about technological process properties. Changes in a imaging devices arrangement were designed, so image result could be usable for an image analysis. Next, classification algorithm used for multispectral images is stated and then evaluated its results. Considering the results, there is proposed another way to measure quality of prepared painting material.

Keywords: machine vision, crayons, dipping, paint material, classification

Title translation: Machine Vision Inspection of Paint Material

Obsah

1 Úvod **1**

1.1 Zařazení práce, motivace 1

1.2 Cíle práce 3

2 Popis a specifikace úlohy **5**

2.1 Popis stroje a technologického postupu 5

2.2 Předmět kamerové kontroly 6

2.2.1 Požadavky na kvalitu nátěrové hmoty 7

2.3 Požadavky na systém strojového vidění 8

2.3.1 Informace od zadavatelů 8

2.3.2 Možnosti chování systému strojového vidění 9

2.3.3 Informace získané testováním . 9

2.4 Výsledná specifikace 10

3 Teoretické znalosti pro návrh systému **13**

3.1 Definice úlohy rozpoznávání 13

3.2 Fyzika světla a barev 14

4 Výběr technických prostředků, konfigurace **17**

4.1 Snímané oblasti 17

4.2 Pořízení barevného obrazu 17

4.3 Použité vybavení pro snímání obrazu 19

4.4 Mechanické začlenění do stroje . 20

4.5 Zhodnocení vybavení a obrazu, navrhované změny 21

4.5.1 Osvětlení 21

4.5.2 Objektiv 22

4.5.3 Vyhodnocovací jednotka 23

5 Získání a zpracování dat **25**

5.1 Nátěrové hmoty 25

5.2 Pořízení obrazů 26

5.2.1 Komunikace s nadřazeným systémem 26

5.3 Zpracování obrazových souborů . 27

6 Hodnocení stavu nátěrových hmot **31**

6.1 Klasifikace nátěrových hmot . . . 31

6.1.1 Implementace v Matlabu 32

6.1.2 Výsledky klasifikace 32

6.2 Návrh následujícího postupu . . . 34

6.2.1 Spolehlivě klasifikovatelné kombinace 35

6.2.2 Nespolehlivě klasifikovatelné kombinace 36

6.2.3 Trhliny 36

7 Závěr **37**

Literatura **39**

A Obsah přiloženého DVD **41**

B Tabulky **43**

Obrázky

2.1 Ukázka výsledného produktu – pastelek s mramorovým vzhledem . . 6

2.2 Ukázka možného stavu hladiny po nanesení a rozmíchání tří barev 7

3.1 Ke znázornění interakce světla a hmoty. Převzato z [1] 15

4.1 Nákres rozmístění snímaných oblastí 18

4.2 Uživatelské rozhraní řídicí jednotky CV-X450A 19

4.3 Spektrální složení vyzařování jednotlivých typů LED. Převzato z prospektu výrobce Keyence 20

4.4 Kamera a opláštěná osvětlovací jednotka na nosníku. Návrh Inomech, s. r. o. 21

4.5 Kontrast trhliny a tmavé hmoty při spodním osvětlení 22

5.1 Ručně nanesená hmota M60800 . 27

6.1 Promíchaná kombinace Original a její segmentace 35

Tabulky

4.1 Pojmenování vyzařovacích spekter LED 20

6.1 Úspěšnost klasifikace testovacích dat 34

B.1 Označení nátěrových hmot a jméno odstínu dle výrobce 44

B.2 Používané kombinace nátěrových hmot 45

B.3 Vizualizace používaných kombinací 46

B.4 Úspěšnost klasifikace trénovacích dat 47

B.5 Úspěšnost klasifikace testovacích dat 48

B.6 Úspěšnost klasifikace testovacích dat ve spektru `B` 49

B.7 Úspěšnost klasifikace testovacích dat ve spektru `G` 49

B.8 Úspěšnost klasifikace testovacích dat ve spektru `Am` 50

B.9 Úspěšnost klasifikace testovacích dat ve spektru `R` 50

B.10 Úspěšnost klasifikace testovacích dat ve spektru `Fr` 51

Kapitola 1

Úvod

1.1 Zařazení práce, motivace

Automatizace průmyslu prochází neustálým vývojem, jehož cílem je lépe naplňovat podstatu tohoto odvětví – eliminaci potřeby přítomnosti člověka v průmyslovém procesu. Nároky jsou zvyšovány na každý obor spjatý s automatizací, a tak i od strojového vidění jsou vyžadovány úkoly, které dříve do procesů nebyly zařazeny nebo byly přenechány člověku. Cílem je optimalizace zmetkovitosti, nákladů, objemu produkce a kvality výrobku.

Strojové vidění (Machine Vision) je mezioborová disciplína systémového inženýrství, jejímž úkolem v průmyslové automatizaci je poskytovat nadřazenému procesu zpětnou vazbu založenou na sběru a analýze obrazových dat. Zpětná vazba může nést informaci použitelnou pro kontrolu, třídění, měření, počítání, či lokalizaci a manipulaci výrobků. Strojové vidění je odlišováno od *počítačového vidění (Computer Vision)*: ačkoliv oba obory využívají mnoho stejných prostředků i pojmů, první je považován za silně aplikačně – zejména průmyslově – zaměřený, inženýrský obor, druhý je orientován spíše vědecky.

Náplň této práce spadá do oblasti strojového vidění: primárním cílem je navrhnout kamerovou kontrolu, která bude součástí stroje vyrábějícího texturovaně obarvené pastelové tužky. Stroj je vyvíjen ve firmě Inomech, s. r. o., kde jsem měl již dříve možnost se spolupodílet na tvorbě několika jednodušších aplikací kamerové kontroly na jiných strojích.

Z praxe vycházejí a v literatuře [1] jsou shrnuty hlavní požadavky na řešení v oblasti strojového vidění: cena, doba potřebná pro návrh a realizaci, odolnost vůči okolnímu prostředí, spolehlivost, dlouhá životnost a snadná údržba. Samotná funkčnost je pojata pragmaticky: musí vykonat zadané požadavky v požadovaném čase, být robustní vůči běžným odchylkám výrobků nebo vlastnostem stroje a dle aplikace mít určitou možnost úpravy nebo rozšíření. Jak dále uvádí [1], v tomto oboru je správné využívat postup „Funguje to? – Použij to!“

Nejčastějším řešením úkolů strojového vidění ve firmě Inomech, s. r. o., bylo využití produktů zavedených společností, a to zejména vestavěných zařízení typických svou uzavřeností. Tento přístup bude dále označován též jako konvenční, neboť je běžný i u dalších výrobců automatizační techniky. Dokonce někteří odběratelé výrobních strojů tento postup explicitně požadují – předpokládají, že tím umožní nebo usnadní případnou údržbu svým pracovníkům.

Konvenční přístup může splnit výše vyjmenované požadavky: softwarové nastavení oněch produktů je navrženo s ohledem na vysokou uživatelskou přívětivost a tak může být provedeno méně kvalifikovanou osobou relativně rychle, což pomáhá snížit výslednou cenu. I zbylá kritéria bývají dobře splněna. Pokud je produkt schopen požadované funkce a zároveň je jeho cena vyhodnocena jako přijatelná pro danou aplikaci, nemá smysl hledat jiné řešení.

Použití konvenčního řešení má však hned několik úskalí. Vestavěné produkty obvykle zahrnují hardwarové vybavení (kameru, osvětlovací a případně vyhodnocovací jednotku), ale zároveň softwarové prostředí. Software je zde většinou svázán s daným hardwarem a jeho funkčnost se liší jak mezi výrobci, tak i mezi řadami produktů každého dodavatele. Proto je nutné již v počáteční fázi – výběru a nákupu zařízení – vědět, jaké softwarové nástroje budou požadovány. Ovšem během dalších fází (implementace, testování) dochází mnohdy ke změně požadavků vzhledem k průběžně zjišťovaným skutečnostem. Uzavřený a uživatelsky přívětivý software se pak ukáže být nepružný a limitující, obzvláště pro kvalifikovanější tvůrce, kteří by byli schopni daný podproblém vyřešit implementací vhodného algoritmu. Celková doba strávená tvorbou a laděním nastavení tak může neúnosně vzrůst a tím dojde k překročení odhadovaných časových a finančních nákladů.

Netriviální aplikace strojového vidění vyžadují komplexní a kvalifikovaný přístup. Jedná se obor interdisciplinární, jsou využívány znalosti z oblastí fyziky, mechaniky, elektrotechniky, digitálního zpracování signálů, algoritmů atd.

1.2 Cíle práce

Cílem je navrhnout systém kamerové kontroly pro prototyp jednoúčelového stroje určeného k barvení pastelek máčením. V době zadání bakalářské práce jsou hlavní součásti stroje a principy funkce již navrženy, přechází se k fázím oživování, testování a ladění. Požadavky na kamerovou kontrolu tedy ještě nejsou stanoveny a jedním z úkolů práce bude tyto specifikovat dle výsledků průběžného testování. Dále je třeba zohlednit, že ještě před mým vstupem do tvorby systému bylo dle přání zákazníka a odhadu požadavků zakoupeno vybavení pro kamerovou kontrolu od společnosti Keyence (kamera, osvětlovací a vyhodnocovací jednotka). Proto bude toto zařízení použito pro testování a pokud samo o sobě nebude pro koncové použití vyhovující, bude doplněno o další součásti, případně nahrazeno. V každém případě však bude v tomto textu proveden obecnější rozbor možností volby potřebného technického vybavení. Podobné platí pro analýzu získaných snímků: ta bude provedena v prostředí Matlab.

Kapitola 2

Popis a specifikace úlohy

2.1 Popis stroje a technologického postupu

V této části bude popsáno zařízení, v němž bude kamerová kontrola použita, aby bylo možné pochopit další návaznosti. Popis bude proveden stručně s minimem detailů, i přesto považuji za vhodné upozornit, že kromě obecně platných zákonů pro ochranu duševního vlastnictví může firma Inomech, s. r. o., technické řešení stroje v budoucnu například zaregistrovat jako užitný vzor. Věcně bude popsán též technologický postup – pro něj podobně některé zmíněné netriviální informace mohou být duševním vlastnictvím zákazníka (zadavatele a odběratele stroje).

Stroj je určen k nanášení vícebarevného nátěru na povrch pastelových tužek. Dle požadavku zákazníka je stroj navrhnut s důrazem na velmi věrné napodobení neautomatizovaného technologického postupu, kterým je v současnosti daný produkt vyráběn. Vstupem do zařízení je paletka s tužkami, jejichž povrch je upraven pouze jedinou (podkladovou) barvou. Úkolem je provést obarvení tak, aby na povrchu pastelek vznikl dvou- nebo tříbarevný vzor (na základě podobnosti označován zadavatelem jako *mramor*). Řešení je založeno na máčení tužek ve vodní lázni, na jejíž hladině je nanesena tenká vrstva nátěrových hmot (*barev*). Správným rozmícháním je dosaženo zajímavé textury, která se při namáčení přenáší na tužky a vytvoří jejich atraktivní vzhled, viz obr. 2.1.

Při vykonávání tohoto postupu člověkem je vše prováděno ručně: nanesení

Obrázek 2.1: Ukázka výsledného produktu – pastelek s mramorovým vzhledem

základní (též tzv. licí) barvy na hladinu, nanesení jedné či dvou doplňkových (tzv. stříkacích) barev, tvorba vhodné struktury rozmícháním, namočení tužek osazených v paletce a nakonec odstranění zbytků barvy z hladiny. Zvolená automatizace je založena na robotické ruce, která zajistí provedení všech hlavních kroků. K činnosti bude používat výměnných nástrojů – trysek pro aplikaci barev a tyčových hrotů pro míchání. Čelisti robotické ruky též umožňují uchopení paletky. Nádrže určené k máčení jsou zde umístěny dvě vedle sebe – v jedné probíhá příprava nátěrové hmoty a samotné máčení, zatímco druhá je čištěna a připravována na další cyklus. Celý stroj bude z důvodu bezpečnosti osob oplocen.

2.2 Předmět kamerové kontroly

Předmětem kamerové kontroly je stav vrstvy barevné hmoty na hladině těsně před máčením (dále též zjednodušeně stav *hladiny*), na němž přímo závisí kvalita výsledného produktu. Ukázka hladiny s třemi rozmíchanými barvami je na obrázku 2.2, který byl pořízen v pozdější fázi testování. Pokud hladina bude vykazovat níže definované defekty, je žádoucí máčení nezahajovat a buďto provést pomocí robotické ruky pokus o nápravu stavu, nebo připravenou vrstvu odstranit a znovu připravit. Tím se zabrání zbytečnému znehodnocení

Obrázek 2.2: Ukázka možného stavu hladiny po nanesení a rozmíchání tří barev

vstupujících tužek. Pokud by byla ověřována až kvalita výsledného produktu (pastelek), docházelo by pouze k vytřídění zmetků, které by byly vzhledem k technologii neopravitelné.

2.2.1 Požadavky na kvalitu nátěrové hmoty

Nátěrová hmota, která tvoří hladinu lázně pro máčení, musí splňovat následující požadavky:

1. **Vhodná textura**: použité barvy musí být správně rozmíchány tak, aby na každé pastelce z paletky mohl při máčení vzniknout vizuálně uspokojivý barevný vzor.

2. **Celistvost**: ve vrstvě nátěrové hmoty mohou z různých důvodů vznikat trhliny. Trhlina je takové místo na hladině, kde není zastoupena ani jedna z barev. Může se jednat o větší souvislou plochu nebo o menší defekty ve formě teček.

Tyto požadavky jsou zatím formulovány vágně – podstatou kontroly zde totiž není striktní třídění založené na exaktně definovaném kritériu, nýbrž subjektivní vnímání vizuální kvality vyrobeného produktu. Navíc jistá míra různorodosti mezi jednotlivými kusy je žádoucí. Tím se úloha liší od typických zadání na kamerovou kontrolu v průmyslu. Během práce budou muset být kritéria upřesněna.

2.3 Požadavky na systém strojového vidění

Základní rámec a předmět kamerové kontroly byly nastíněny výše. Jako u každého technického díla, i pro návrh systému strojového vidění je však důležité mít předem detailní specifikaci požadavků. Díky tomu se podaří snadněji navrhnout varianty řešení, vyhodnotit jejich vhodnost a později stanovit, zda realizované dílo splnilo očekávání zákazníka. Ke snadnějšímu vytvoření specifikace nabízí kniha [1] vzor obecného dotazníku (*Machine Vision Questionnaire*), který objednavatel systému strojového vidění vyplní před započetím práce na jeho tvorbě. V případě této práce je ve skutečnosti objednavatelem jak odběratel stroje, tak společnost stroj vyrábějící. Informace, požadavky a omezení od obou těchto subjektů budou muset být brány v potaz (zásadní jsou samozřejmě ty prvního jmenovaného).

2.3.1 Informace od zadavatelů

V případě této úlohy je nutné od zadavatelů zjistit především následující:

- počet různých barev použitých nátěrových hmot, jejich variabilitu, fyzikální vlastnosti (chování), cenu a používané kombinace barev,
- detailní popis možných vad hladiny a jejich parametrů, pro které je vyžadováno spolehlivé detekování,
- takt kompletního cyklu i jednotlivých podoperací stroje.

Některé z těchto informací byly zjištěny spolehlivě a budou uvedeny v dalším textu, jiné nejsou v současné chvíli k dispozici, budou zatím považovány za neznámé a buďto se podaří je objasnit během testování, nebo budou nahrazeny intuicí.

2.3.2 Možnosti chování systému strojového vidění

Existuje více možností, jak bude systém strojového vidění navázán na chod stroje a nadřazené řízení. Po testování budou vybrány nejvhodnější varianty z následujících oblastí:

- snímání hladiny:
  - bezprostředně před máčením (po rozmíchání všech barev),
  - kromě předchozího také po nanesení základní barvy,
- povaha zpětné vazby:
  - pouze rozhodnutí hladina vyhovuje/nevyhovuje, případně s údajem o pravděpodobnosti,
  - detailnější informace o pozici a rozsahu vady pro nápravu robotem,
- reakce stroje při detekci nevyhovujícího stavu hladiny:
  - nezahájení máčení, odstranění naneseného barevného filmu a zahájení cyklu od začátku,
  - pokus o nápravu vady (např. opětovným promícháním),
  - provedením máčení i přes zjištění pravděpodobného výskytu vady s tím, že informace bude předána do nějakého nadřazeného informačního systému a příslušná paletka bude následně podrobena podrobnější výstupní kontrole,
  - zastavení chodu stroje a přivolání obsluhy (po několika pokusech).

2.3.3 Informace získané testováním

Při postupujícím testováním stroje bylo možné částečně upřesňovat požadavky na systém strojového vidění. Z hlediska technologického i z požadavků zákazníka na takt stroje je kritickou veličinou čas. Zejména doba mezi nanesením barev na hladinu a namočením pastelek musí být co nejkratší, aby nedošlo k vyschnutí hmoty. Stroj tedy po nanesení barev nemá dostatek času provádět jakékoliv nápravy stavu hladiny. Zpětná vazba ze systému strojového vidění do chodu stroje se tím zjednodušuje na binární vyhovuje/nevyhovuje. Na základě toho bude/nebude provedeno máčení. V druhém případě to kromě znehodnocení hmoty přináší časový prostoj stroje, jelikož je třeba vyčkat, až bude některá z nádrží vyčištěna a připravena na nový cyklus. Proto bylo a bude i dále prováděno ladění stroje, které zajistí vysokou spolehlivost tvorby

vyhovujícího stavu hladiny. Je tedy možné říci, že apriorní pravděpodobnost jevu „hladina vyhovuje“ bude velmi vysoká (jinak by se chod stroje nevyplatil).

Důležitá je informace o následné výstupní kontrole: jelikož budou paletky s pastelkami vkládány i odebírány ručně po jedné, bude mít obsluha stroje možnost provádět vizuální kontrolu, která nebude nikterak náročná – stačí zhodnotit, zda nenastal některý z důsledků kritických, málo pravděpodobných poruch stroje. Příkladem takové poruchy může být nenanesení některé z barev kvůli jejímu nedostatku v zásobníku. To se zřetelně projeví na výstupní paletce a stále přítomná obsluha zastaví chod stroje a zařídí nápravu. Navíc v tomto případě by tato chyba byla detekována jinými systémy stroje (kontrola průtoku apod.).

Pro nastalý stav tak zařazení systému strojového vidění do stroje může být vnímáno jako částečně nadbytečné, ekonomicky nevýhodné. Tento stav se však může později změnit – producent po dlouhodobém ověření funkčnosti stroje zřejmě provede rozšíření návazných systémů tak, že dojde k eliminaci přítomnosti obsluhy u stroje (paletky budou zakládány a odebírány automaticky apod.). Také může vzniknout informační systém celého provozu, který bude požadovat data o předpokládané kvalitě jednotlivých paletek, sérií apod.

2.4 Výsledná specifikace

Z předchozí analýzy můžeme specifikovat hlavní požadované vlastnosti systému strojového vidění:

- snímání hladiny: bude provedeno pouze po promíchání,
- zpětná vazba:
  - informace ohodnocující kvalitu hladiny (pravděpodobnost, že je vyhovující); výsledek by měl být k dispozici do 72 s od pořízení snímku, což vychází z požadovaného taktu stroje,
  - volitelně: rychlá detekce vážné vady, která s vysokou pravděpodobností způsobí nepoužitelnost většiny tužek z paletky; výsledek do 5 s, což je doba, po kterou robot provádí výměnu nástroje a přenesení paletky k máčení,
- chování stroje:

- ukládání informací,
- zastavení stroje a přivolání obsluhy po několikanásobném výskytu špatně hodnocené hladiny v radě,
- při rychlé detekci vážné vady zastavení cyklu a předčasná likvidace hmoty z hladiny.

Kapitola 3

Teoretické znalosti pro návrh systému

Pro návrh systému splňujícího požadované chování je třeba znalostí s mnoha oborů. V této části provedu shrnutí hlavních poznatků, které jsou pro tuto práci podstatné.

3.1 Definice úlohy rozpoznávání

Úloha této práce z pohledu obecné umělé inteligence patří do jejího podoboru *rozpoznávání* (v angličtině *Pattern Recognition*). Je požadováno rozhodnutí, do jaké z předem stanovených tříd objekt patří. Přesněji jsou obecné pojmy oboru s touto úlohou v následujících vztazích (připraveno v souladu s [3]): Zkoumaným *objektem* je vrstva nátěrové hmoty. Tvůrce systému provede *volbu měření* neboli definuje systém – v tomto případě je zvoleno použití strojového vidění, konkrétní parametry budou diskutovány později. Měřením se získá *obraz* (v obecném smyslu), zde se bude jednat o digitální 2D obraz v běžně používaném významu. Může následovat *zpracovaní obrazu* tak, aby došlo k maximalizaci diskriminační schopnosti a/nebo k redukci dat. Vzniklý *vektor příznaků* vstupuje do *klasifikátoru*. To je stroj (algoritmus), který zobrazuje množinu vektorů příznaků na množinu jmen tříd – neboli stanovuje rozhodovací pravidlo.

Přístup k tvorbě klasifikátoru lze rozdělit na dva základní postupy (dle [3]):

1. Definováním rozhodovacího pravidla „ručně“ po detailní analýze problému.
2. Nastavením klasifikátoru učením z objektů, u nichž je správná klasifikace známa.

První varianta je vhodná zejména pro případy, kdy jsou analýza problému a nastavení klasifikátoru přímočaré a intuitivní. Druhý postup otevírá možnosti využití metod oboru strojového učení, které však většinou nejsou aplikovány přímo, nýbrž po dekompozici problému.

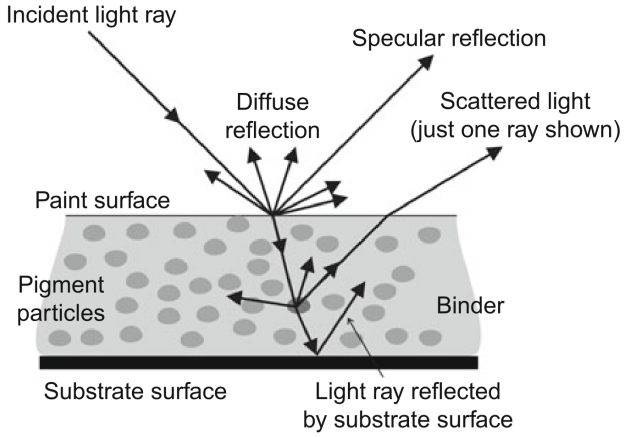
3.2 Fyzika světla a barev

Světlo jakožto elektromagnetické záření je mimo jiné charakterizováno svým spektrem, tedy průběhem jeho intenzity v závislosti na vlnové délce. Světelné paprsky s *dostatečně* odlišným spektrem jsou lidským zrakem vnímány jako paprsky různé barvy. Pojem *barva světla* se pak používá ke zjednodušenému popisu vnímaní jeho spektra (odborně hovoříme o spektrálním složení světla). Dále pak *barva* označuje „vlastnost objektů spojenou s jejich schopností odrážet elektromagnetické vlnění různých vlnových délek“[2] – tedy spektrální odrazivost povrchu. Termín se také v běžné řeči používá pro hmotu určenou k nanesení na povrch objektu ke změně barvy jeho povrchu – nátěrovou hmotu.

Interakce světla s objekty

Při průchodu světla optickým prostředím jsou jeho vlastnosti obecně modifikovány. K významným změnám vlastností dohází na rozhraní optických prostředí. Následující model je zde velmi důležitý, viz též obr. 3.1 Směrem k objektu je vyslán světelný paprsek. Jeho první část se odrazí přímo z povrchu. Zbývající část prochází dovnitř objektu, kde je modifikována interakcemi s částicemi pigmentu. Tyto jevy jsou blíže popsány následovně:

- Odraz z povrchu může být difúzní (pro matné, ideálně pak pro tzv. lambertovské povrchy) nebo silně směrový (zrcadlový odraz), obecně jde o kombinaci těchto jevů.
- Světlo odražené povrchem mívá téměř nezměněné spektrum, naopak může být významně polarizováno.



Obrázek 3.1: Ke znázornění interakce světla a hmoty. Převzato z [1]

- Částice pigmentu pohlcují určitou část spektra. Světlo odražené z objemu má pak jiné spektrální složení.
- Odraz z objemu je typicky difuzní. Pokud jsou ale částice pigmentu například protažené a zarovnané v jednom směru, pak je i odraz a výsledné vnímání barvy objektu silně směrově závislé [1].

Spektrum odražených paprsků je tedy dáno jak vlastnostmi objektu, tak spektrem světla, kterým je osvětlován. Lidské vnímání částečně potlačuje vliv odlišného různého osvětlení.

Vnímání barvy člověkem

Schopnost vnímání barvy člověkem je dána přítomností tří druhů čípků v oku (L-, M- a S-čípky, zjednodušeně označované jako červené, zelené a modré). Velikost výstupního signálu z každého druhu čípku je spektrálně závislá – průběhy těchto závislostí se mezi druhy čípků liší. To je podstatou modelu barevného vidění člověka (trichromatický model). Na základě poměru mezi signály z různých druhů blízce lokalizovaných čípků mozek určuje barvu dopadajícího paprsku.

Z toho plyne, že člověk může dva světelné paprsky s odlišným spektrálním složením vyhodnocovat jako paprsky mající stejnou barvu. Tento jev se nazývá *barevný metamerismus*. Stejný jev může nastat při získávání obrazu běžným digitálním fotoaparátem, neboť ten měří také jen tři integrální charakteristiky, ale i při snímání jinou technikou založenou na mírně odlišném uspořádání.

Barevné modely

Při studiu tématu barev je přirozené seznámit s jednotlivými barevnými modely (např. CIE 1931, RGB, HSI, CIELAB) a na nich definovanými barevnými prostory (např. sRGB). To jsem provedl dle knihy [1]. Důležitým poznatkem pro tuto práci je, že většina modelů vychází z trichromatického modelu a především se snaží o takový popis, který umožní postupovat s cílem věrné reprodukce barev pro účely vnímání člověkem. Pro dosažení cílů práce není podstatné provádět věrné snímání a zobrazování barev člověku. Je ovšem třeba vzít v potaz, že transformací obrazových dat do jiného barevného modelu můžeme například usnadnit definici rozhodovacího pravidla při rozpoznávání.

Kapitola 4

Výběr technických prostředků, konfigurace

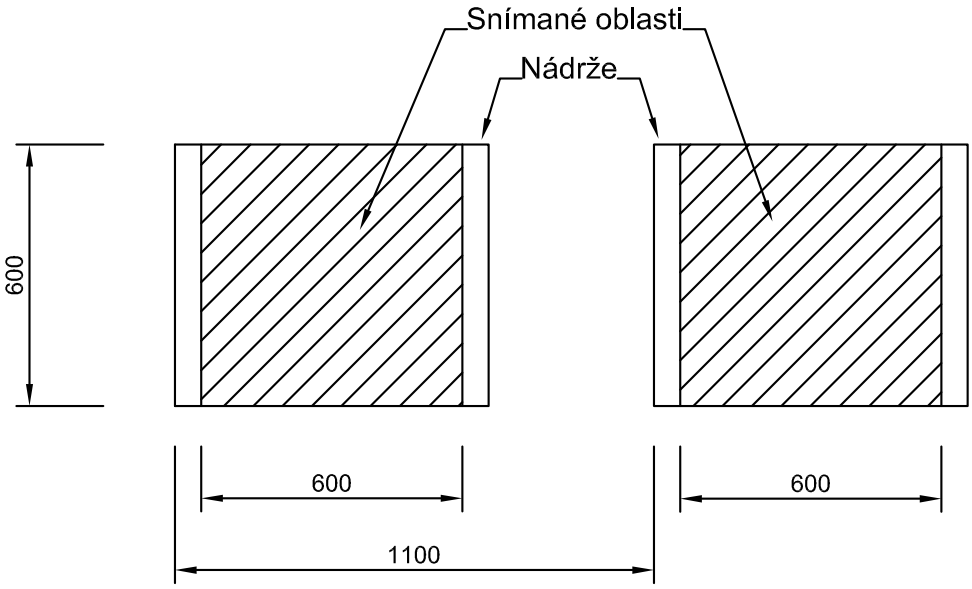
Správnou volbou vybavení musí být zajištěno, aby ze snímaného obrazu bylo možné získat vhodné příznaky s požadovanou diskriminační schopností. V této kapitole budou popsány parametry zařízení, které již bylo dříve zakoupeno, a zhodnoceny jeho vlastnosti. Následovat bude krátký rozbor vhodného zabudování do stroje a diskutován výběr hardwaru a softwaru pro běh algoritmů.

4.1 Snímané oblasti

Snímány musí být dvě plochy dle nákresu 4.1. Rozměr každé z nich bude maximálně 600 mm x 600 mm. Pokud bude z technologického hlediska možno využívat menší oblast hladiny, bude tato vymezena nastavitelnými hrably. Vzdálenost středů ploch je 1100 mm a měnit se již nebude.

4.2 Pořízení barevného obrazu

Pro pořízení barevného obrazu průmyslovými kamerami je nejčastěji používáno jednoho monochromatického obrazového snímače, před nímž je umístěna maska s třemi barevnými filtry (typicky Bayerova maska). Nevýhodou tohoto řešení je, že pro každý pixel je nutné dopočítat dvě barevné složky z okolních

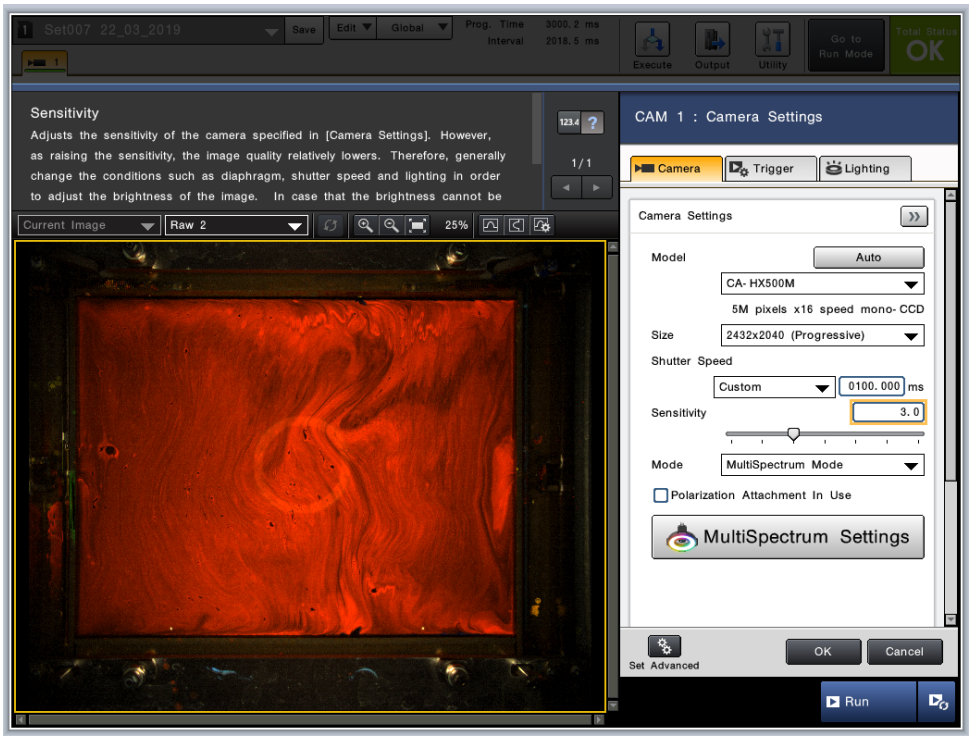


Obrázek 4.1: Nákres rozmístění snímaných oblastí

pixelů. Tento problém nenastává u méně se vyskytující, dražší varianty s použitím tří senzorů, kde na každý z nich je směrována odlišná část spektra pomocí vstupní optiky. Obě řešení zachycují obraz ve všech kanálech synchronně. Obecně může být použito více než tři kanály (multispektrální a hyperspektrální snímání).

Odlišným přístupem je použití jednoho monochromatického snímače, který sekvenčně zachytí scénu osvětlenou postupně světlem s odlišným spektrem. Zde se již obvykle jedná o více než tři pásma a to přináší vlastnosti multispektrálních obrazů. Nevýhodou je sekvenční snímání, jednotlivé kanály jsou zaznamenány s časovým posunem, což vadí u scén s pohybem. Též je nutná synchronizace snímače s osvětlovací technikou.

Obecným účelem pořízení multispektrálního obrazu je zvýšení schopnosti rozlišení dvou odlišných spekter světla (barev). K hodnocení této vlastnosti je v barevném prostoru CIELAB ($L^*a^*b^*$) zavedena veličina rozdíl barevnosti ΔE^*. Jedná se o kartézskou vzdálenost mezi dvěma body v tomto modelu. Jak je zjednodušeně shrnuto v [1], hodnota $\Delta E^* = 1$ odpovídá přibližně nejmenšímu okem pozorovatelnému rozdílu a kvalitní digitální fotoaparáty mají v celém barevném prostoru průměrnou chybu přibližně $\Delta E^* = 5$–6. V praxi nejsou zařízení se třemi kanály a realizovatelnými filtry schopná dosáhnout v celém XYZ tristimulárním prostoru průměrné hodnoty ΔE^* nižší než 5. Aby bylo možné snížit ji na 1–1.5, je zapotřebí šest kanálů [1].



Obrázek 4.2: Uživatelské rozhraní řídicí jednotky CV-X450A

4.3 Použité vybavení pro snímání obrazu

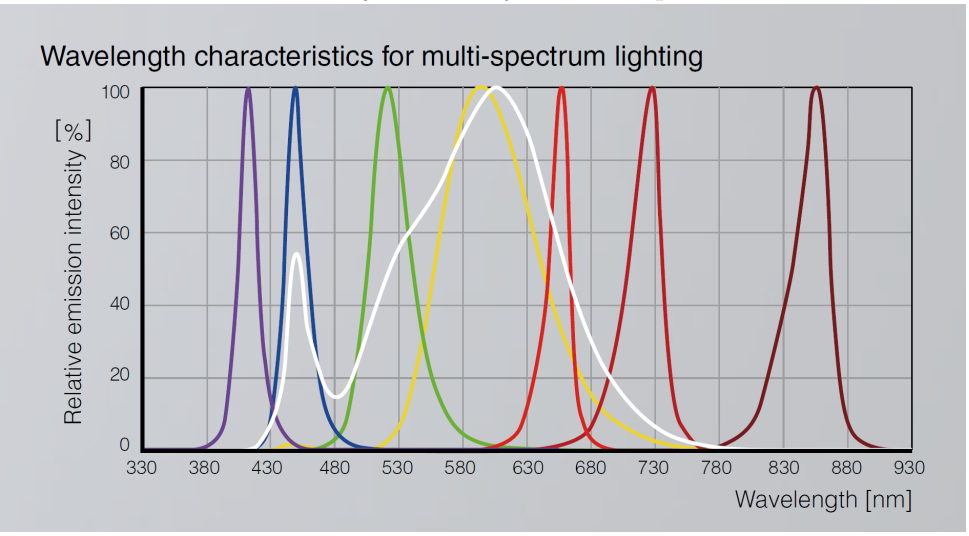
Jak již bylo zmíněno v úvodu, ještě před tím, než jsem byl zapojen do tvorby systému, bylo dle požadavku zákazníka a na základě hrubé analýzy problému zakoupeno vybavení zn. Keyence řady CV-X. Proto bude právě ono použito k získávání obrazů. Komplet se skládá z řídicí/vyhodnocovací jednotky, samotné kamery, osvětlovací jednotky, objektivu, polarizačních filtrů a kabelů.

K použité hlavní jednotce CV-X450A se připojuje jak samotná kamera, tak osvětlovací jednotka (nebo více kamer a/nebo osvětlovacích jednotek). Řídicí jednotka zajišťuje nastavení a spouštění snímání obrazu i osvětlení. Dále je možné provádět zpracování a vyhodnocení. Použitý procesor je přímo navržen k tomuto účelu (typu DSP) a díky tomu je možné dosáhnout rychlejšího zpracování obrazových dat. Získané snímky je možné ukládat na SD kartu, zpřístupnit přes protokol FTP atd. Dále jednotka podporuje a je částečně připravena pro komunikaci přes většinu standardů používaných v průmyslu (použit bude Profinet). Spolu s určitými osvětlovacími jednotkami a monochromatickými kamerami je možné pracovat v multispektrálním režimu, čehož bude v této aplikaci využito. Pro představu je ukázka z uživatelského rozhraní jednotky na obr. 4.2

Použitá kamera CA-HX500M má monochromatický obrazový snímač typu CMOS s rozlišením 2432 x 2040 bodů. Velikost snímače je typu 1", elementy pixelů mají rozměr 5,0 μm x 5,0 μm. Osvětlovací jednotka CA-DRM20X prstencového tvaru o průměru cca 200 mm používá osm typů čipů LED, přičemž každý má odlišné spektrum vyzařování, viz obr. 4.3. Pojmenování a zkratky pro jednotlivé typy LED (jejich vyzařovací spektra) dle výrobce je v tabulce 4.1. Dále v textu budou tyto zkratky používány.

Zkratka	**Anglický název**	**Český ekvivalent**
UV	Ultraviolet	Ultrafialové
B	Blue	Modré
G	Green	Zelené
Am	Amber	Jantarové (žluto-oranžové)
R	Red	Červené
Fr	Far-red	„Dlouhé červené“
Ir	Infrared	Infračervené
W	White	Bílé

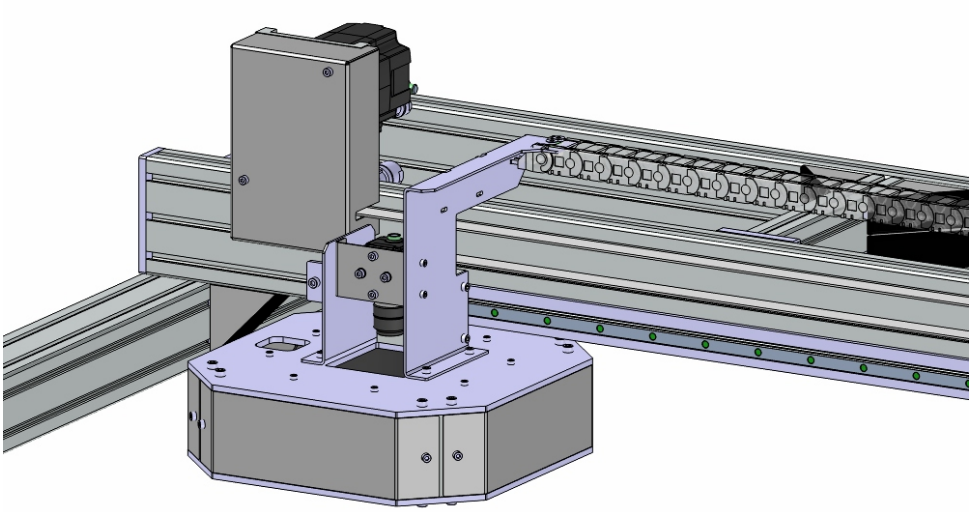
Tabulka 4.1: Pojmenování vyzařovacích spekter LED



Obrázek 4.3: Spektrální složení vyzařování jednotlivých typů LED. Převzato z prospektu výrobce Keyence

4.4 Mechanické začlenění do stroje

Konstruktér stroje navrhl konzolu z hliníkových profilů s vybavením pro zajištění lineárního pohybu kamery s osvětlovací jednotkou. Na jedné straně bude nosník upevněn do zdi ve výšce přibližně 1000 mm, aby nezasahoval do operačního prostoru robotu. Polohování kamery bude provádět servomotor s převodovkou přes ozubený řemen. Kamera bude přemisťována mezi třemi



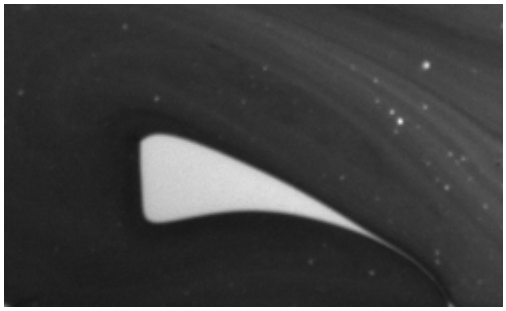
Obrázek 4.4: Kamera a opláštěná osvětlovací jednotka na nosníku. Návrh Inomech, s. r. o.

pozicemi: parkovací, nad první a nad druhou nádrží. Oplechování osvětlovací jednotky slouží k její ochraně při případné kolizi s robotem.

4.5 Zhodnocení vybavení a obrazu, navrhované změny

4.5.1 Osvětlení

Pro danou aplikaci se použití tohoto vybavení a uspořádání projevuje několika nedostatky. V první řadě jde o nevhodnost konfigurace osvětlení: osvětlovací jednotka je oproti snímané ploše malá a ve výsledném obraze je patrná jak vinětace, tak zrcadlový odlesk tvaru prstence (platí zejména pro spektrum dlouhé červené). Dále intenzita osvětlení je nedostačující, musí být snímáno s delší expoziční dobou (až 1/10 s na jeden barevný kanál) a/nebo vyšší citlivostí snímače. Delší expoziční doba prodlužuje celkový čas potřebný pro získání obrazu a pak může dojít k znatelnějšímu projevu časového posunu mezi snímanými kanály, neboť hladina po promíchání není zcela v klidu. V získaném obraze je dále nízký nebo žádný kontrast mezi trhlinami a tmavými odstíny nátěrové hmoty (což platí pro všechna vyzařovací spektra osvětlovací jednotky). Proto bylo uvažováno o změně osvětlení. Jeho lepší rovnoměrnosti by bylo možné dosáhnout použitím plošných nebo liniových zdrojů (např. LED pásků). Dostupný prostor pro umístění nad nádržemi je



Obrázek 4.5: Kontrast trhliny a tmavé hmoty při spodním osvětlení

značně omezen operačním prostorem robotické ruky. Pro pořízení barevného obrazu by navíc se stávající monochromatickou kamerou opět musely být použity multispektrální zdroje synchonizované s řídicí jednotkou. Jako možné kompromisní řešení bylo navrženo umístění bílých LED pásků do nádrže pod hladinu. Tento zdroj by byl použit při pořízení obrazu pro detekci trhlin. Synchronizaci zapnutí osvětlení a spuštění snímání by zajistila hlavní automatika stroje, přičemž osvětlovací jednotka Keyence by tomto případě byla vypnuta. Prosvícení nátěrové hmoty zespodu (snímání propuštěného světla) by zajistilo dobrý kontrast mezi trhlinami a hmotou. Možnost byla ověřena po zakoupení běžného bílého LED pásku, který byl provizorně umístěn na stěnách nádrže v průsvitné bužírce. Výřez vzniklého snímku při nanesení tmavé barvy je na obr. 4.5. Při ponechání LED pásku pod hladinou při testování stroje se na něm ale začaly usazovat drobné zbytky barev a rez. Problém by bylo možné eliminovat směřováním osvětlení částečně dolů a jeho umístěním pod kryt. Zákazník však řešení s osvětlením pod hladinou zatím kvůli obavě ze ztížené údržby odmítá. Pokud po vlastním testování stroje a standardizaci technologie usoudí, že je opravdu důležité výskyt trhlin detekovat, pak bude osvětlení pod hladinou instalováno. Důležité je, že vliv okolního světla bude minimalizován oplocením stroje z plného černého plechu.

4.5.2 Objektiv

Současné prostorové rozlišení můžeme zjednodušeně charakterizovat počtem pixelů na milimetr: tato hodnota je cca 3,16 pix/mm. Zadavatel nebyl schopen stanovit požadavek na prostorové rozlišení pro tuto úlohu, určitě však bude vhodné zmenšit zorné pole, ve kterém se nachází i okraje nádrže nepotřebné pro analýzu. Toho bude dosaženo výměnou dodaného objektivu.

4.5.3 Vyhodnocovací jednotka

Hodnocení použitelnosti řídicí a vyhodnocovací jednotky je pro danou aplikaci spíše negativní. Jedná se o drahé zařízení, které by mělo vykazovat vysokou spolehlivost v průmyslovém nasazení. Obsahuje mnoho předdefinovaných nástrojů pro strojové vidění, praktické použití je ale kvůli své uzavřenosti obtížné. Například: k přístroji je možné připojit pouze počítačovou myš, klávesnici nikoliv. Psaní vlastního kódu, které je alespoň v některých nástrojích jednotky umožněno, tak musí být provedeno klikáním myší na virtuální klávesnici. Vytvořit složitější vyhodnocovací logiku je tak značně komplikováno. Doporučil bych výměnu celého kompletu za produkt jiného výrobce s odlišným přístupem k tvorbě systému strojového vidění. Stávající sada je ale již zakoupena a byla přáním objednavatele stroje. Východiskem z této situace může být použití stávajícího vybavení pro získání obrazu, jeho zpracovaní a vyhodnocení ale provádět na jiné platformě. Ta by mohla být tvořena běžným PC kompatibilním hardwarem dobře umístitelným do rozvaděče stroje a vlastním SW řešením. Pokud k tomuto zadavatel dá svolení, bude samozřejmě požadována minimální cena dodatečného vybavení. Proto budu dále uvažovat, že toto zařízení bude méně výkoné a bez komponent, které by umožnily rychlé obrazové operace. Počítač bude připojen to ethernetové sítě stroje. Obrazová data z jednotky Keyence pak budou přenášena protokolem FTP, čímž samozřejmě vznikne určité zpoždění. Výsledky analýzy mohou být protokolem TCP/IP předány hlavní řídicí jednotce stroje, ukládány a případně předávány do centrálního úložiště.

Kapitola 5

Získání a zpracování dat

Aby bylo možné přes veškeré výše uváděné nejistoty provést určitou analýzu, snažil jsem se zjistit od objednavatele stroje co nejvíce informací. Na základě nich jsem pořídil obrazová data.

5.1 Nátěrové hmoty

Objednavatel v současnosti používá **34** různých barevných nátěrových hmot, jejich počet by neměl v budoucnu výrazně narůst, pastelky jsou totiž prodávány v **zavedených barevných kombinacích** – těch je celkem **29**. Pro přehled barevných hmot a jejich kombinací viz tabulky B.1, B.2 a znázornění v tabulce B.3. Používané kombinace můžeme rozdělit do dvou kategorií: s barvami výrazně odlišnými a naopak s barvami blízkého odstínu. Výrobce nemá k dispozici specifikaci hmot v některém barevném modelu. Hmoty jsou připravovány nejprve přesně dle stále stejného receptury, která stanovuje poměr jednotlivých pigmentů i nebarevných složek hmoty (ředidel, pojidel, plnidel atd.). Ovšem důležitým poznatkem z fáze testování stroje je skutečnost, že přímo před samotným zahájením výroby každé série je technology závodu každá hmota ručně doředěna ředidlem a/nebo plnidlem dle aktuálního chování závislého na vnějších podmínkách. Pozorováním bylo odhaleno, že tento zásah může být poměrně velký a pak způsobí znatelnou změnu vnímané barvy hmoty. Výrobce se ale zatím příliš nesnaží o dosažení absolutně stejného vzhledu mezi sériemi, důležité pro něj je správné chování hmot na hladině a kvalitní přenesení na pastelky. Správným chováním je myšlena například skutečnost, že ani jedna z hmot není „roztažlivější“ na úkor druhé (druhých).

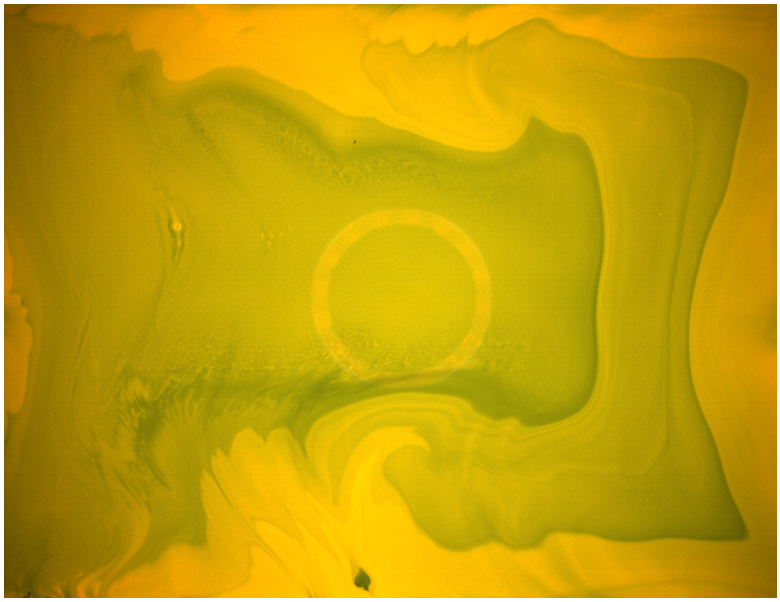
Každá jednotlivá hmota má snahu rozbíhat se po vodní hladině, mezi sebou se ale nátěry samovolně nemísí, k tomu je zapotřebí citlivé promíchání pohybem tenké tyčinky po hladině, což obstarává robotická ruka.

5.2 Pořízení obrazů

Požádal jsem o dodání vzorků všech nátěrových hmot. Jelikož ty jsou vyráběny podle aktuální potřeby výrobního závodu, podařilo se postupně získat jen 28 různých, většinu vzorků o malém objemu. Pořídil jsem snímky hladiny po nanesení každé hmoty samostatně, přičemž bylo nutné nanášet každou barvu ručně, stroj je určen k práci po sériích. Ukázka ručního nanesení je na obr. 5.1. Protože ruční aplikace s následným čištěním hladiny byla zdlouhavá a časový prostor k užívání stroje pro testování i objem dostupných barev omezený, bylo snímáno s předem nastavenými, pevnými expozičními programy (dále jen programy). Ty jsem v řídicí jednotce kamery nastavil dle odhadu z počátečních pokusů s některými barevnými hmotami. Programy se mezi sebou liší především nastavenou expoziční dobou, citlivostí snímače a některé intenzitou osvětlení. Kromě toho bylo u některých použito odlišné nastavení „záludných“, v dokumentaci řídicí jednotky nejasně popsaných parametrů, u kterých nebylo zřejmé, zda ovlivňují pouze následné chování jednotky při vyhodnocování, nebo modifikují i ukládané obrazy. Clona objektivu byla vždy stále maximálně otevřena – není požadována větší hloubka pole, hladina je v konstantní vzdálenosti od kamery.

5.2.1 Komunikace s nadřazeným systémem

Aby bylo možné provádět poloautomatizovaný sběr dat a později vidění začlenit do systému stroje, byla nastavena a naprogramována komunikace s nadřazeným řídicím systémem. Ten je v tomto stroji založen na vybavení zn. Siemens, ke komunikaci byl zvolen protokol Profinet. Data specifikovaná v adresním prostoru jsou dle nastavení periodicky vyměňována. Na straně PLC Siemens byly v jazyce SCL naprogramovány řídicí bloky. Ty zajistí především spouštění snímání v požadovaný okamžik synchronně s chodem stroje a umožní přepínání mezi přednastavenými programy kamery. S omezeními danými řídicí jednotkou kamery je možné též přímo měnit nastavenou expozici apod.



Obrázek 5.1: Samotná hmota M60800 na hladině. Příklad nanesení s výraznější variabilitou způsobenou ručním nanášením

5.3 Zpracování obrazových souborů

Obrazy jsou řídicí jednotkou ukládány na SD kartu v nekomprimovaném formátu BMP. Celkem bylo výše zmíněným postupem tzv. bracketingu získáno 4608 obrazových souborů. Každý soubor je jednotkou umísťován v adresáři s příslušným číslem expozičního programu a v několika dalších podsložkách dle času pořízení, ve svém názvu má uveden čas a použité spektrum vyzařování. Žádná jiná metadata o snímku nejsou jednotkou do souborů ukládána. Aby bylo možné se soubory lépe pracovat, provedl jsem nejprve jejich přejmenování s pomocí nástrojů souborového manažeru. Vzor jména souboru je následující:

```
"<název nátěrové hmoty>_V-<verze nanášení>...
_C-<spektrum osvětlení>_I-<intenzita osvětlení>...
_T-<expoziční čas>_S-<citlivost snímače>_P-<číslo programu>"
```

<název nátěrové hmoty>:

Šestimístné označení dle výrobce vždy začínající písmenem M, nebo `LAKRED` – nanesena směs nepigmentových složek nátěrové hmoty (lak a ředidlo), nebo `PRAHLA` – prázdná vodní hladina (bez nanesení jakékoliv hmoty),

<verze nanášení>:

0 nebo 1; ve většině případů každá hmota nanesena pouze jednou a pak je k dispozici pouze verze 0; u dvou nátěrových hmot jsem provedl nanášení dvakrát a k dispozici je i verze 1,

<spektrum osvětlení>:

Možnosti z `B, G, AM, R, FR, W, IR, UV` dle tabulky 4.1. Označení `COLOR` je použito u souborů, které jsou řídicí jednotkou kamery automaticky vytvářeny jako určitá kombinace původních multispektrálních ukládaná ve standardním RGB formátu. Podobně `GRAY` je „průměrný“ obrázek ve stupních šedi,

<intenzita osvětlení>:

Celočíselná hodnota v možném rozsahu 0 – 700 rovna nastavení v kontroléru kamery. Typicky použita maximální hodnota 700,

<expoziční čas>:

Hodnota expozičního času v milisekundách,

<citlivost snímače>:

Celé číslo v možném rozsahu 1 – 7,

<číslo programu>:

Hodnota 8 – 25.

Po nanesení každé nátěrové hmoty bylo spuštěno snímání postupně všemi expozičními programy v pořadí od jejich nejmenšího čísla. V každém programu jsou získávány obrazy pod všemi nastavenými světelnými spektry – časový posun mezi nimi je dán téměř výhradně nastaveným expozičním časem, tedy např. pro nastavených 100 ms na každé spektrum a šest použitých spekter jsou obrazy získány během přibližně 600 ms. Doba mezi přepnutím programů je ale v jednotkách sekund a tak snímky všech programů pro nanesenou hmotu byly pořízeny v časovém úseku přibližně 60 s. Jelikož vždy docházelo k určitému pohybu hmoty na hladině, není vhodné dále používat kombinace obrazů pořízených různými programy.

V Matlabu jsem pro získání lepšího přehledu o vlastnostech všech souborů připravil strukturu `imagesMeta`. Ta obsahuje stejná pole, jako mají soubory, a navíc informace o kvalitě expozice (počet saturovaných pixelů apod.). Vybírat prvky z této struktury je možné standardními nástroji Matlabu pro práci se strukturami nebo je pro zjednodušení práce připravena funkce `getImMetaSub`.

Výběr obrazových souborů pro následnou klasifikaci byl proveden částečně ručně dle histogramu obrazů po využití „doporučení“ skriptu `selectImageFiles`.

Pro většinu kombinací se nakonec ukazuje nejvhodnější použít program s $EV = 200$, kde EV je zde myšlen násobek expozičního času a citlivosti snímače. Dále označovaná trénovací data tak pochází většinou z programu č. 20 a testovací data z programu č. 14.

Kapitola 6

Hodnocení stavu nátěrových hmot

Původním přáním zákazníka bylo, aby kamerový systém dokázal identifikovat jakoukoliv používanou barevnou hmotu (zatím z 34) na hladině, tedy aby každému pixelu obrazu přiřadil identifikátor hmoty. To vzhledem ke skutečnostem dříve uvedeným (viz zejména popis vlastností nátěrových hmot v části 5.1) nemusí být triviální. Pokud se to ale podaří, přínosem může být mimo jiné zjednodušení dalšího zpracování pro porozumění obrazu. Nabízí se takový postup segmentace obrazu, při němž bude využita klasifikace s učitelem. Jako trénovací data poslouží obrazy získané dle 5.2. U každého obrazu známe správnou klasifikaci všech pixelů – je jím jeden identifikátor příslušné nanesené hmoty. Je však důležité poznamenat, se při každém ručním nanášení nátěrové hmoty dochází přes veškerou snahu k nerovnoměrnosti v rozlití barev na hladině. Tato variabilita v trénovacích množinách ale může být chápána pozitivně, neboť jak bylo uvedeno výše, odstín každé hmoty se mezi výrobními sériemi též může v určitých mezích měnit.

6.1 Klasifikace nátěrových hmot

Přirozeným požadavkem na klasifikátor v této aplikaci je rychlost implementace a možnost snadné interpretace jeho chování. Proto byl implementován klasifikátor nastavený dle kritéria minimální vzdálenosti k etalonu třídy. Vektor příznaků $\mathbf{x}$ je v našem případě pixel obrazu a bude mít typicky dimenzi $n = 5$. Budou totiž využita spektra osvětlení `B`, `G`, `Am`, `R` a `Fr`. Všechny složky vektoru mohou nabývat hodnot $0-255$. Etalonem každé třídy bude vektor dimenze n, hodnoty jeho složek empiricky určíme jako průměrné hod-

noty v příslušné dimenzi trénovacích dat. Etalony jednotlivých tříd označíme $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, ..., \mathbf{v}_R$, kde R je počet tříd. Vektor $\mathbf{x}$ zařadíme dle kritéria minimální vzdálenosti do třídy i, jestliže platí:

$$| \mathbf{v}_i - \mathbf{x} | = \min | \mathbf{v}_j - \mathbf{x} |, \quad j = 1, 2, ..., R, \tag{6.1}$$

kde vzdálenost definujeme jako normu $| \mathbf{v}_i - \mathbf{x} |$. [3]

6.1.1 Implementace v Matlabu

V prostředí Matlab jsem implementoval třídu (ve smyslu programování) klasifikátoru pro účel této úlohy. Pro každou používanou kombinaci nátěrových hmot s dostupnými daty je používána samostatná instance klasifikátoru. Počet tříd R, mezi kterými každý klasifikátor rozpoznává, je tak 2 nebo 3.

Vytvořená třída Matlabu `MinDistanceClassifier` poskytuje metody `learn(trainingData)` a `classify(inputData)`:

`learn(trainingData)`: Spočítá etalony jednotlivých klasifikačních tříd a uloží je ve své instanci. Argument `trainingData` je pole typu CELL ARRAY, jehož délka odpovídá počtu tříd, mezi nimiž má klasifikátor rozlišovat. Prvky tohoto CELL ARRAY jsou standardní třírozměrná pole. Počet řádků a sloupců každého je libovolný, jejich násobek určuje počet vzorků (pixelů) pro danou třídu. Třetí rozměr pole udává dimenzi vektorového prostoru příznaků a musí být stejný pro všechny třídy.

`classify(inputData)`: Vrátí oklasifikovanou matici (matici obsahující čísla přiřazených tříd dle pořadí učení). Třetí rozměr argumentu `inputData` musí odpovídat dimenzi prostoru etalonů.

Hromadná klasifikace pro trénovací a testovací data je řešena ve skriptu `batchClassification5D.m`, respektive po jednotlivých spektrech ve skriptu `batachClassification1D.m`.

6.1.2 Výsledky klasifikace

Výsledky modelu klasifikátoru dle kritéria minimální vzdálenosti byly velmi neuspokojivé. I pro některé kombinace barev nátěrových hmot, jejichž odstín

je okem dobře rozlišitelný, byla úspěšnost klasifikace na testovacích datech nízká. Z toho důvodu jsem se pokoušel aplikovat jiné typy klasifikačních algoritmů a vhodně nastavit jejich modely. Snažil jsem se do určité míry využít nástrojů Matlabu, respektive jeho toolboxů. Kniha [1] doporučuje v případech multispektrálních dat pro rozpoznávání barev použít metodu k nejbližších sousedů (k *nearest neighbors*, k-NN). Nastavení modelu tohoto algoritmu zjednodušeně spočívá ve vhodné volbě k a výběru trénovacích dat. V některých případech se mi postupně dařilo dosahovat lepších výsledků, aniž by byl model přeučený. Značnou nevýhodou tohoto typu klasifikace je, že doba výpočtu narůstá s mohutností množiny trénovacích dat. Tím se komplikuje použití na uvažovaném hardwaru.

Teprve po dlouhé době, kdy se mi nedařilo najít vhodné klasifikační modely, jsem odhalil původ problému v použitých trénovacích a testovacích datech. Vlastní chybou při dřívějším hromadném přejmenování obrazových souborů jsem způsobil, že některé soubory měly ve jménech jiné označení použitého spektra, než bylo ve skutečnosti použito. Následně vygenerovaná a používaná sloučená obrazová data tak byla mezi sebou v některých případech nekonzistentní.

Po nápravě vzniklé chyby se již podařilo dosáhnout uspokojivějších výsledků. Tabulky B.4 (v příloze) a 6.1 shrnují výsledky relativní úspěšnosti pro trénovací, respektive testovací data klasifikovaná výše popsaným modelem klasifikátoru dle minimální vzdálenosti. Z 18 kombinací je úspěšnost pro 9 z nich větší než 90 % pro všechny třídy (2 nebo 3). Pro další 4 kombinace je tato úspěšnost větší než 75 %.

Pro „úspěšnější“ kombinace je původ neúspěšně klasifikovaných pixelů (kromě outlierů) typicky v mezikruží, kde dochází k odlesku, a též na okrajích nádrže – to je dáno jak vinětací obrazů, tak též skutečností, že typicky se při ručním nanášení u okrajů usadila silnější vrstva hmoty (viz 5.1). U neúspěšně klasifikovaných kombinací je příčinou zejména blízkost odstínů jejich hmot. Jedná se o hmoty, které se liší především intenzitou své barvy. Vzhledem k variabilitě tloušťky vrstvy hmoty to způsobuje nemožnost snadné klasifikace.

Dobrých výsledků klasifikace je v některých případech dosaženo i při využití pouze jediného spektra osvětlení. Toho může být využito k tomu, aby byl pro určité kombinace snímán pouze jeden kanál. Klasifikace tímto způsobem pak vlastně znamená prahování jedním nebo dvěma prahy. Výsledky pro jednotlivá spektra na testovacích datech jsou v tabulkách B.6, B.7, B.8, B.9 a B.10.

Ačkoliv bylo původní snahou dokázat rozlišit jednotlivé hmoty v každé

Označení kombinace	1. hmota [%]	2. hmota [%]	3. hmota [%]	Minimum [%]
Original	99,10	93,32	98,70	93,32
Tropical	99,20	98,81	98,96	98,81
Fire	93,32	98,04	79,32	79,32
USAc	97,61	100,00	—	97,61
USAm	98,83	99,99	—	98,83
100	99,87	1,58	—	1,58
101	100,00	98,05	—	98,05
102	60,80	81,39	74,99	60,80
103	95,72	71,72	72,52	71,72
105	90,27	97,40	85,19	85,19
113	79,31	95,54	84,18	79,31
114	98,46	95,16	—	95,16
115	93,42	98,28	95,16	93,42
116	96,02	99,95	98,96	96,02
118	92,27	86,78	74,68	74,68
119	25,06	35,34	95,35	25,06
122	98,13	87,45	98,77	87,45
123	95,65	98,23	98,22	95,65

Tabulka 6.1: Úspěšnost klasifikace testovacích dat pro dostupné kombinace klasifikátorem dle minimální vzdálenosti při použití 5-dimenzionálního prostoru tvořeného spektry `B, G, Am, R, Fr`

kombinaci, nyní se ukazuje, že přílišné lpění na tomto cíli není žádoucí. Třídění jednoduchým klasifikátorem (prahováním) ale může být využito pro segmentaci obrazu u těch kombinací, které byly vyhodnoceny jako dobře klasifikovatelné.

6.2 Návrh následujícího postupu

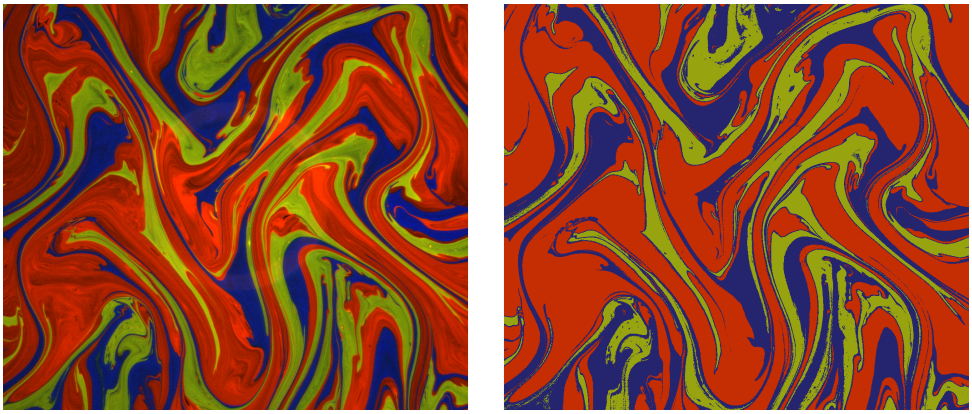
Řečeno v terminologii hierarchie úloh zpracování obrazu a jeho reprezentace, motivací pro předchozí postup klasifikace byla představa možnosti přímého a rychlého přechodu od digitálního obrazu k objektům, kterými zde myslím jednotlivé nátěrové hmoty na hladině. Tím by se podařilo obejít mezikroky používané pro přechod od digitálního obrazu k obrazu s příznaky (hledání oblastí, hran, apod.) a následné segmentace. Příznaky pro ohodnocení stavu hladiny by byly stanovovány až na základě těchto objektů. Jelikož je ale přímá jednoduchá klasifikace v případech barev blízkých odstínů neúspěšná, musí pro ně být zvolen jiný postup.

6.2.1 Spolehlivě klasifikovatelné kombinace

Nejprve by měly být další kroky provedeny na spolehlivě klasifikovatelných kombinacích nátěrových hmot. Podkladem bude zkušební provoz, při němž by měli pracovníci obsluhující stroj nebo kontroloři kvality zaznamenávat určité hodnocení výsledků máčení každé paletky s tužkami. To by mělo být přiřazené ke snímku hladiny, ve které bylo máčení provedeno. Poté bude možné provádět další analýzu ke zjištění, které příznaky v obraze jsou pro vzhled výsledného produktu důležité.

Pro provedení segmentace bude možné použít klasifikátor minimální vzdálenosti od etalonu třídy, případně po přesnějším stanovení variability jednotlivých strojově nanášených hmot upravený model podobně jednoduchého klasifikátoru. Kromě použití rozhodovacího pravidla k segmentaci je možné porovnáním vzdáleností od etalonů určit špatně použitý odstín.

Základním postupem, jehož použití je zvažováno, bude stanovení vlastností v několika posuvných oknech (výřezech) obrazu. Počet, pozice a tvar výřezů budou stanoveny na základě počtu a pozici pastelek v máčené paletce rozsahu pohybu robota ve vodorovném směru při máčení paletky. V každém okně bude stanoven poměr pixelů přiřazených jednotlivým třídám (barevným hmotám). Dále pak může být stanovena délka hran (počet hranových pixelů) v jednotlivých výřezech. Jejich hledání je v úspěšně segmentovaném obraze snazší záležitostí, přičemž předpokládám, že právě správný počet přechodů mezi jednotlivými barevnými odstíny bude určovat vizuální uspokojivost pastelky.



Obrázek 6.1: Vlevo výřez promíchané kombinace Original; vpravo výsledek segmentace při použití klasifikátoru kritéria minimální vzdálenosti k etalonům z trénovacích dat ve spektru `G` (zobrazeno v průměrných barvách příslušné hmoty)

6.2.2 Nespolehlivě klasifikovatelné kombinace

Bez ohledu na to, zda se producentovi podaří snížit variabilitu připravovaných hmot, nebude vhodné pro tyto kombinace postupovat ve snaze provádět přímou segmentaci bez předzpracování. Pokud se například u spolehlivě klasifikovatelných kombinací prokáže význam hran, bude snahou nastavit algoritmy detekce hran i pro kombinace hmot blízkých odstínů. I přesto, že tyto hrany možná nebudou přesně reprezentovat fyzickou hranici mezi jednotlivými hmotami nanesenými na hladinu, jejich význam pro vzhled pastelky se může projevit jako podstatný.

Jinými přirozeně se nabízejícími metodami segmentace jsou metody morfologické, například s využitím tzv. rozvodí. Důležitým prvním krokem by byla schopnost správně nalézat výchozí značky před použitím takovýchto metod.

Kromě toho je možné (opět ve výřezech) stanovovat entropii (viz [4]) v monochromatických obrazech jednotlivých spekter a znovu po delším zkušebním provozu stroje posoudit, jaká je souvislost se vzhledem výsledného produktu a také jaké nastavení stroje použít k opakovanému dosahování žádaných stavů.

6.2.3 Trhliny

Pokud se trhliny budou i po odladění stroje na hladině pravidelně vyskytovat, mělo by být nejprve doplněno osvětlení dovnitř nádrže, jak je prezentováno v části 4.5.1. Pro analýzu jejich vlivu by bylo možné použít granulometrii. Pro představu se používá pro vysvětlení analogie s prosíváním kamenů. „Vstupem je hromada kamenů (granulí) o různých velikostech. Úlohou je zjistit, kolik kamenů patří do jednotlivých tříd daných velikostí. Tato úloha se řeší postupným prosíváním hromady sítem s rostoucí velikostí děr. Výsledkem analýzy je diskrétní funkce. Nezávisle proměnnou je velikost děr v sítu a závisle proměnnou je počet kamenů příslušné velikosti.“[2]

Kapitola 7

Závěr

V práci byl vyvíjen systém strojového vidění pro prototyp jednoúčelového stroje k nanášení vícebarevného nátěru máčením. S postupným testováním stroje, technologického procesu i systému strojového vidění byly tvořeny a modifikovány požadavky. Navrhovaným změnám v konfiguraci osvětlení i volbě hardwaru zatím nebylo vyhověno. Důvodem jsou omezení daná konstrukcí stroje a konzervativnost zákazníka, který chce s investicemi do změn kamerové kontroly vyčkat nejméně do chvíle, kdy bude úspěšně ověřen zkušební provoz stroje.

Po získání obrazových dat pro jednotlivé barevné hmoty a výběru trénovacích a testovacích množin bylo prováděno nastavování správného modelu klasifikátoru. Rozpoznávání nátěrových hmot na základě získaných multispektrálních obrazů nejprve selhávalo i u některých případů okem dobře odlišitelných odstínů. Příčina problému byla odhalena později – jednalo se o chybu při přípravě dat.

Po opravě této chyby se ukázalo, že pro polovinu zkoušených kombinací je úspěšný i jednoduchý způsob klasifikace dle kritéria minimální vzdálenosti, tedy kdy rozdělující plochou (pro dvě třídy) je nadrovina umístěná uprostřed vzdálenosti mezi etalony tříd. Pro některé kombinace je též možné použít pouze jednu dimenzi (jedno spektrum multispektrálního obrazu). Pak je samozřejmě úspěšné i jednoduché prahování příslušného obrazu ve stupních šedi.

V průběhu oživování a testování stroje bylo potřeba spolupracovat s kolegy i na zprovoznění dalších částí stroje. Nyní je již zařízení umístěno v budově

zákazníka a probíhá zkušební provoz. V práci na systému kamerové kontroly bude třeba dále pokračovat ve spolupráci s kontrolory výstupní kvality. Během práce jsem se bohužel nedostal k použití obrazových algoritmů pro získání dalších obrazových příznaků. Byly alespoň navrženy takové algoritmy, které bude vhodné na již automaticky sbíraných obrazových datech vyzkoušet nejdříve. Ještě předtím ale bude potřebné realizovat navržené úpravy v pořizování obrazu, jestliže na to zákazník přistoupí.

Z počínajícího zkušebního provozu zatím vyplývá, že pokud budou odladěny některé technologické nedostatky, bude provoz stroje spolehlivý a splní zákazníkem požadované parametry.

Literatura

[1] Bruce G. Batchelor. *Machine vision handbook*. Springer, London, c2012.

[2] Václav Hlaváč and Miloš Sedláček. *Zpracování signálů a obrazů*. Vydavatelství ČVUT, Praha, vyd. 2., přeprac edition, 2005.

[3] Vladimír Mařík, Olga Štěpánková, and Jiří Lažanský. *Umělá inteligence*. Academia, Praha, 1993.

[4] Milan Šonka, Václav Hlaváč, and Roger Boyle. *Image processing, analysis, and machine vision*. Cengage Learning, United States of America, 4th edition edition, 2015.

Příloha A

Obsah přiloženého DVD

- Vybraná obrazová data
- Matlab skripty pro použité pro zpracování dat
- Pomocná data

Příloha B

Tabulky

Označení	Odstín
MR015C	tyrkysový
M10300	bílý
M10400	světle žlutý
M10900	šedý
M11100	šedý
M11400	tmavě šedý
M19900	černý
M22400	okrový
M31000	fialový
M33600	fialový
M41100	světle modrý
M42800	modrý
M42900	tmavě modrý
M44800	modrý
M46100	zelený
M46200	zelený
M51600	zelený
M60400	žlutý
M60800	žlutý
M68000	světle žlutý
~~M72400~~	světle oranžový
M72500	oranžový
M73000	červeno-oranžový
M80400	světle růžový
M80700	červeno-růžový
~~M80800~~	fialový
M82500	červený
~~M82600~~	tmavě červený
~~M94104~~	zelený
M94111	hnědý
~~M94114~~	růžový
M94119	zelený
~~M94121~~	hnědý
M94123	hnědý

Tabulka B.1: Označení nátěrových hmot a jméno odstínu dle výrobce. Přeškrtnutí položky znamená, že pro hmotu nebyla k dispozici trénovací data

Označení kombinace	1. hmota	2. hmota	3. hmota
Original	M82500	M60400	M42800
Tropical	M31000	M60400	M42800
Fire	M82500	M60400	M72500
USAc	M82500	M10300	—
USAm	M42800	M10300	—
100	M10300	M10900	—
101	M10400	M60400	—
102	M68000	M60400	M60800
103	M22400	M60400	M68000
~~104~~	M68000	M72400	M72500
105	M72500	M73000	M60800
~~106~~	M82600	M10900	M72500
~~107~~	M60400	M94114	M82600
~~108~~	M72500	M82500	M82600
~~109~~	M94114	M80400	M80700
~~110~~	M0015C	M82600	M11400
~~111~~	M82600	M19900	M80800
~~112~~	M94114	M42800	M33600
113	M0015C	M41100	M44800
114	M44800	M42800	—
115	M42900	M44800	M42800
116	M60400	M0015C	M42800
~~117~~	M94119	M94104	M46100
118	M60400	M94119	M46100
119	M46100	M51600	M46200
~~120~~	M72500	M94121	M94123
~~121~~	M94123	M94121	M94111
122	M72500	M82500	M19900
123	M11100	M19900	M11400

Tabulka B.2: Používané kombinace nátěrových hmot. Přeškrtnuté číslo kombinace znamená nedostupnost trénovacích dat pro některou hmotu z jejího složení. Kombinace používající pouze dvě hmoty mají buňku v posledním sloupci prázdnou

Označení kombinace	**1. hmota**	**2. hmota**	**3. hmota**
Original			
Tropical			
Fire			
USAc			—
USAm			—
100			—
101			—
102			
103			
~~104~~	—	—	—
105			
~~106~~	—	—	—
~~107~~	—	—	—
~~108~~	—	—	—
~~109~~	—	—	—
~~110~~	—	—	—
~~111~~	—	—	—
~~112~~	—	—	—
113			
114			—
115			
116			
~~117~~	—	—	—
118			
119			
~~120~~	—	—	—
~~121~~	—	—	—
122			
123			

Tabulka B.3: Používané kombinace nátěrových hmot – přibližná vizualizace z trénovacích dat

Označení kombinace	**1. hmota** [%]	**2. hmota** [%]	**3. hmota** [%]	**Minimum** [%]
Original	98,95	96,42	99,05	96,42
Tropical	99,51	98,67	99,58	98,67
Fire	96,42	97,99	87,92	87,92
USAc	98,25	100,00	—	98,25
USAm	99,17	99,98	—	99,17
100	75,35	86,18	—	75,35
101	100,00	99,01	—	99,01
102	71,27	72,32	80,35	71,27
103	91,51	80,79	78,96	78,96
105	94,61	97,34	91,01	91,01
113	87,98	95,77	86,49	86,49
114	98,38	96,45	—	96,45
115	95,50	98,24	96,45	95,50
116	98,44	99,88	99,58	98,44
118	88,50	92,32	80,54	80,54
119	53,14	86,71	73,03	53,14
122	98,20	97,59	88,33	88,33
123	97,29	98,66	98,19	97,29

Tabulka B.4: Úspěšnost klasifikace trénovacích dat pro dostupné kombinace klasifikátorem dle minimální vzdálenosti při použití 5-dimenzionálního prostoru tvořeného spektry `B, G, Am, R, Fr`

Označení kombinace	**1. hmota** [%]	**2. hmota** [%]	**3. hmota** [%]	**Minimum** [%]
Original	99,10	93,32	98,70	93,32
Tropical	99,20	98,81	98,96	98,81
Fire	93,32	98,04	79,32	79,32
USAc	97,61	100,00	—	97,61
USAm	98,83	99,99	—	98,83
100	99,87	1,58	—	1,58
101	100,00	98,05	—	98,05
102	60,80	81,39	74,99	60,80
103	95,72	71,72	72,52	71,72
105	90,27	97,40	85,19	85,19
113	79,31	95,54	84,18	79,31
114	98,46	95,16	—	95,16
115	93,42	98,28	95,16	93,42
116	96,02	99,95	98,96	96,02
118	92,27	86,78	74,68	74,68
119	25,06	35,34	95,35	25,06
122	98,13	87,45	98,77	87,45
123	95,65	98,23	98,22	95,65

Tabulka B.5: Úspěšnost klasifikace testovacích dat pro dostupné kombinace klasifikátorem dle minimální vzdálenosti při použití 5-dimenzionálního prostoru tvořeného spektry `B, G, Am, R, Fr`

Označení kombinace	1. hmota [%]	2. hmota [%]	3. hmota [%]
Original	96,95	85,21	98,93
Tropical	61,75	54,36	100,00
Fire	85,21	82,67	19,50
USAc	99,80	100,00	—
USAm	88,23	99,95	—
100	99,92	1,65	—
101	97,38	100,00	—
102	46,73	63,99	95,23
103	43,52	71,75	94,32
105	79,30	82,67	19,44
113	38,89	99,32	46,77
114	99,95	86,97	—
115	95,61	100,00	86,97
116	87,33	96,92	100,00
118	30,60	71,75	59,26
119	22,08	88,10	12,98
122	87,95	0,00	24,49
123	95,15	98,65	100,00

Tabulka B.6: Úspěšnost klasifikace testovacích dat pro dostupné kombinace klasifikátorem dle minimální vzdálenosti při použití spektra `B`

Označení kombinace	1. hmota [%]	2. hmota [%]	3. hmota [%]
Original	96,58	97,99	99,99
Tropical	62,54	54,00	97,99
Fire	99,03	95,36	99,77
USAc	99,75	100,00	—
USAm	98,37	100,00	—
100	99,89	1,75	—
101	58,33	41,59	—
102	42,06	92,57	54,99
103	100,00	61,51	54,99
105	97,20	93,66	99,65
113	70,36	93,45	75,01
114	100,00	95,47	—
115	95,22	99,97	95,47
116	63,44	100,00	87,02
118	84,70	65,66	57,10
119	22,18	28,91	94,33
122	86,44	99,48	53,40
123	95,68	98,77	100,00

Tabulka B.7: Úspěšnost klasifikace testovacích dat pro dostupné kombinace klasifikátorem dle minimální vzdálenosti při použití spektra `G`

Označení kombinace	1. hmota [%]	2. hmota [%]	3. hmota [%]
Original	100,00	81,66	95,38
Tropical	96,44	100,00	72,89
Fire	81,66	95,13	71,99
USAc	86,50	99,03	—
USAm	99,57	100,00	—
100	99,88	1,63	—
101	77,20	58,68	—
102	40,83	66,31	6,21
103	82,59	40,83	15,83
105	85,69	87,36	68,20
113	86,26	75,12	68,84
114	100,00	97,92	—
115	75,14	96,85	97,92
116	65,69	100,00	42,39
118	97,93	87,07	86,21
119	33,60	38,84	96,88
122	99,86	65,73	98,42
123	95,95	98,92	99,81

Tabulka B.8: Úspěšnost klasifikace testovacích dat pro dostupné kombinace klasifikátorem dle minimální vzdálenosti při použití spektra `Am`

Označení kombinace	1. hmota [%]	2. hmota [%]	3. hmota [%]
Original	100,00	55,46	65,74
Tropical	58,09	100,00	76,26
Fire	55,46	99,95	50,79
USAc	65,01	75,68	—
USAm	99,51	100,00	—
100	99,88	1,36	—
101	74,90	57,07	—
102	38,30	66,34	0,00
103	78,83	38,30	11,28
105	70,43	99,33	80,75
113	83,72	82,35	75,65
114	100,00	98,29	—
115	79,40	98,06	98,29
116	40,17	100,00	64,65
118	77,55	91,24	66,97
119	12,41	36,36	91,18
122	100,00	90,21	98,95
123	96,23	98,48	100,00

Tabulka B.9: Úspěšnost klasifikace testovacích dat pro dostupné kombinace klasifikátorem dle minimální vzdálenosti při použití spektra `R`

Označení kombinace	**1. hmota** [%]	**2. hmota** [%]	**3. hmota** [%]
Original	97,99	63,24	67,81
Tropical	73,12	98,11	84,16
Fire	63,24	97,94	56,27
USAc	79,59	88,47	—
USAm	98,65	98,15	—
100	99,76	1,64	—
101	74,92	51,00	—
102	5,09	67,58	48,83
103	74,66	15,92	48,83
105	75,55	97,52	77,36
113	72,77	96,06	80,20
114	98,03	96,28	—
115	77,29	97,82	96,28
116	51,77	98,11	72,28
118	70,36	82,83	37,98
119	11,56	40,82	83,82
122	97,90	88,59	97,80
123	95,35	94,07	97,95

Tabulka B.10: Úspěšnost klasifikace testovacích dat pro dostupné kombinace klasifikátorem dle minimální vzdálenosti při použití spektra `Fr`