

# **Měření barevných souřadnic materiálu v průmyslové výrobě**

## **Coloured Coordinates Measurement of Matter in Industrial Production**

Bc. Martin Botek

---

Diplomová práce  
2014



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin Botek**  
Osobní číslo: **A12292**  
Studijní program: **N3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Měření barevných souřadnic materiálu v průmyslové výrobě**  
**Coloured Coordinate Measurement of Matter in Industrial Production**

Téma anglicky:

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši popisující danou problematiku.
2. Z dostupných technických prostředků navrhnete a sestavte systém pro měření barevných souřadnic.
3. Provedte reálná měření barevnosti vybraného materiálu.
4. Navrhnete a realizujete metodu pro detekci barevně nevyhovujících vzorků.
5. Zhodnotte meze použitelnosti navržené metody.
6. Diskutujte případné další možnosti využití výsledků práce s ohledem na specifika průmyslového prostředí.

Rozsah diplomové práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **WRIGHT, W.** The measurement of colour. 4th ed. London: Adam Hilger, 1969, 340 s. ISBN 0852741340.
2. **HUNT, Robert a Michael POINTER.** Measuring colour. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2011, 469 s. ISBN 978-1-119-97559-5.
3. **DANNHOFEROVÁ, Jana.** Velká kniha barev: kompletní průvodce pro grafiky, fotografy a designéry. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2012, 352 s. ISBN 978-80-251-3785-7.
4. **FRASER, Bruce, Fred BUNTING a Chris MURPHY.** Správa barev: průvodce profesionála v grafice a pre-pressu. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2003, 521 s. ISBN 8072269437.
5. **VIK, Michal.** Základy měření barevnosti. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 1995, 109 s. ISBN 80-708-3162-6.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Milan Navrátil, Ph.D.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

**7. února 2014**

Termín odevzdání diplomové práce:

**27. května 2014**

Ve Zlíně dne 7. února 2014

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.

*děkan*



doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

*ředitel ústavu*

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou měření barevnosti povrchů se zaměřením na možnosti měření a detekce barevně nevyhovujících vzorků konkrétního průmyslově vyráběného materiálu. V práci jsou rovněž uvedeny základní pojmy teorie barev, jejich matematické vyjádření a specifika pro měření barevnosti. V praktické části je popsán návrh a stavba vlastního systému pro automatizované měření barevných souřadnic včetně vývojového prostředí Matlab, ve kterém byla realizována jeho softwarová část. Dále jsou zpracována a vyhodnocena reálná měření barevnosti daného materiálu jak v laboratorních podmínkách, tak přímo ve výrobním provozu, a navržena aplikace pro detekci barevně nevyhovujících vzorků. V závěrečné kapitole jsou shrnuty získané poznatky a popsány doporučení s ohledem na dané průmyslové prostředí.

Klíčová slova: Barvy, barevné prostory, měření barevnosti povrchů, barevné diference, Matlab.

## ABSTRACT

The master's thesis deals with the color measurement of surfaces, with a focus on the possibility of color measurement and detection of non-compliant samples of a particular industrially produced material. The thesis also presents basic notions of color theory, its mathematical expressions and specifics for color measurement. The practical part describes the design and construction of own system for automated measurement of color coordinates including Matlab development environment, in which the software part of this system has been implemented. Furthermore, real color measurement of the material both in laboratory conditions and within the manufacturing operation has been processed and evaluated, and application for detection of non-compliant color samples has been designed. The final chapter summarizes the obtained findings and recommendations with regard to the industrial environment.

Keywords: Color, color spaces, color measurement of surfaces, color differences, Matlab.

Poděkování patří v první řadě mé přítelkyni, rodině a blízkým, kteří mě po celou dobu studia morálně podporovali. Neméně pak také mému vedoucímu práce panu Ing. Milanu Navrátilovi, Ph.D., kterému bych tak rád poděkoval za jeho vstřícnost, cenné rady a podněty, které mi pomohly při tvorbě diplomové práce.

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ POJMY TEORIE BAREV .....</b>	<b>11</b>
1.1 SVĚTLO .....	11
1.2 BARVA .....	12
1.2.1 Charakteristiky barvy .....	13
1.2.2 Míchání barev .....	13
1.3 VNÍMÁNÍ BARVY LIDSKÝM OKEM .....	14
<b>2 MĚŘENÍ A MATEMATICKÉ VYJÁDŘENÍ BAREV .....</b>	<b>16</b>
2.1 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ BAREVNÝ VJEM .....	16
2.1.1 Zdroje světla .....	16
2.1.2 Podmínky osvětlování a pozorování .....	18
2.1.3 Standardní pozorovatel .....	20
2.2 BAREVNÉ PROSTORY .....	22
2.2.1 RGB .....	22
2.2.2 CIE XYZ .....	23
2.2.3 CIE xyY – chromatický diagram .....	25
2.2.4 CIE L*a*b* .....	26
2.3 BAREVNÁ DIFERENCE .....	29
2.3.1 CIE1976 ( $\Delta E_{ab}$ ) .....	29
2.3.2 CMC ( $\Delta E_{CMC}$ ) .....	30
2.3.3 CIE1994 ( $\Delta E_{94}$ ) .....	31
2.3.4 CIEDE2000 ( $\Delta E_{00}$ ) .....	32
2.4 ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ BAREVNOSTI .....	33
2.4.1 Kolorimetry .....	33
2.4.2 Spektrofotometry .....	34
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>36</b>
<b>3 POPIS DOSTUPNÝCH PROSTŘEDKŮ .....</b>	<b>37</b>
3.1 SONDA ATLAS SCIENTIFIC ENV-RGB .....	37
3.2 WEBKAMERA MICROSOFT LIFE CAM STUDIO .....	39
<b>4 STAVBA SYSTÉMU PRO MĚŘENÍ BAREVNÝCH SOUŘADNIC .....</b>	<b>41</b>
4.1 HARDWAROVÁ ČÁST .....	41
4.1.1 Integrovaná koule .....	42
4.1.2 Zdroj světla .....	44
4.1.3 Kostra .....	45
4.2 SOFTWAREOVÁ ČÁST .....	46
4.2.1 Matlab .....	46
4.2.1.1 Image Acquisition Toolbox .....	47
4.2.1.2 Reprezentace obrazových dat .....	48
4.2.2 Vlastní měřicí aplikace .....	49
4.2.2.1 Uživatelské grafické rozhraní .....	49
4.2.2.2 Struktura programu .....	51

<b>5</b>	<b>MĚŘENÍ.....</b>	<b>53</b>
5.1	POPIS VZORKŮ A ZAMĚŘENÍ MĚŘENÍ.....	53
5.2	TESTOVACÍ MĚŘENÍ A POKUSY O ZVÝŠENÍ PŘESNOSTI .....	53
5.2.1	Statická scéna .....	54
5.2.2	Dynamická scéna.....	54
5.3	MĚŘENÍ VZORKOVNÍKU VYHOVUJÍCÍCH A NEVYHOVUJÍCÍCH BAREVNOSTÍ .....	58
5.3.1	Vyhodnocení měření.....	58
5.3.2	Diskuze výsledků.....	60
<b>6</b>	<b>APLIKACE PRO DETEKCI NEVYHOVUJÍCÍCH VZORKŮ .....</b>	<b>62</b>
6.1	POPIS APLIKACE .....	62
6.1.1	Režim měření vzoru.....	63
6.1.2	Režim detekce .....	63
6.2	ZHODNOCENÍ MEZÍ DETEKCE .....	64
6.3	MĚŘENÍ VE VÝROBNÍM PROVOZU .....	65
<b>7</b>	<b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DOPORUČENÍ S OHLEDEM NA SPECIFIKA VÝROBNÍHO PROVOZU .....</b>	<b>68</b>
7.1	DISKUZE JINÝCH ŘEŠENÍ .....	68
7.2	NÁVRHY PRO ZLEPŠENÍ STÁVAJÍCÍHO ŘEŠENÍ A DALŠÍ VÝZKUM .....	68
7.2.1	Kamera.....	69
7.2.2	Zdroj světla a podmínky osvětlování a pozorování.....	70
7.2.3	Další vhodné oblasti zájmu .....	71
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>72</b>
	<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>76</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>79</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>80</b>
	<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>82</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>83</b>

## ÚVOD

Barevnost neboli vlastnost povrchu ovlivňující výsledný barevný vjem je důležitým kvalitativním parametrem produktů z celé řady průmyslových odvětví. Jak v minulosti, tak i v dnešní praxi je stále kontrola kvality barevnosti prováděna subjektivně na základě vizuálního posudku barevné difference ve vztahu k toleranci povolené pro příslušný produkt. V řadě případů, jako je kontrola materiálu na výrobní lince, však nemůže být takováto inspekce prováděna nepřetržitě. Navíc ani posudky školeného pozorovatele nejsou stoprocentně spolehlivé. Běžně se stává, že se pozorovatelé v posudku přijatelné a nepřijatelné barevné difference liší ba dokonce, že se liší posudky jediného pozorovatele.

Průkopnická práce Mezinárodní osvětlovací komise (CIE - Commission Internationale de l'Éclairage) a rozvoj v oblasti optiky, mikroelektroniky a výpočetní techniky v posledních desetiletích pak přinesli do průmyslové praxe systémy pro měření barevnosti, které poskytují objektivní posudky barevných diferencí.

Teoretická část práce tedy shrnuje základní pojmy z teorie barev tak, aby i člověk bez znalostí v dané oblasti byl schopen se v této problematice orientovat a pochopil, jak vzniká výsledný barevný vjem. V práci jsou také popsány základní faktory, které ovlivňují barevný vjem a tak i měření barevnosti. Dále je uveden matematický popis barev prostřednictvím barevných prostorů a nejčastěji užívaných vztahů pro vyjádření barevných diferencí. V závěru teoretické části jsou pak vylíčeny základní typy měřicích zařízení.

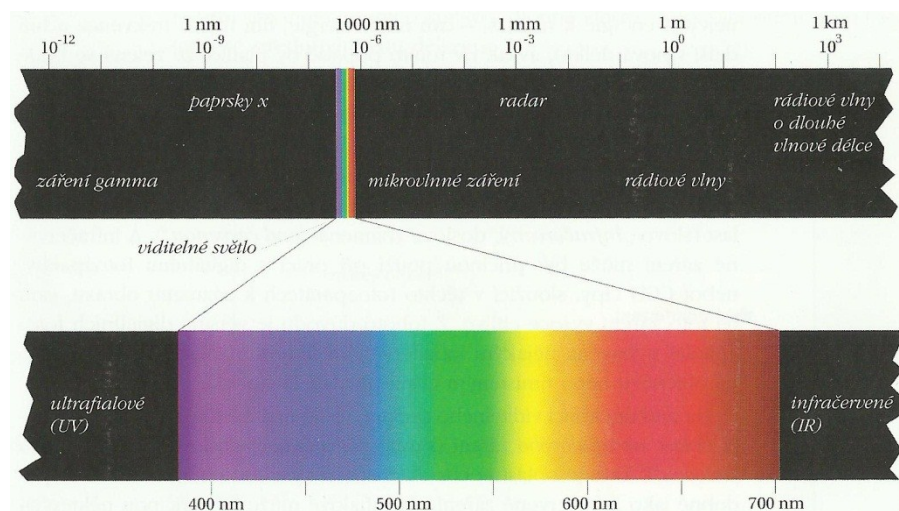
Praktická část se zaměřuje na návrh a stavbu vlastního systému pro automatizované měření barevnosti průmyslově vyráběného plastového granulátu, který stojí především na poskytnuté webkameře LifeCam Studio. Pro tvorbu softwarové části systému je využito vývojové prostředí Matlab 2012b, které obsahuje řadu užitečných funkcí pro zpracování obrazových dat z kamer. V další kapitole jsou popsána a vyhodnocena reálná měření granulátu v laboratorních podmínkách, která jsou orientována na stanovení barevných diferencí v barevném prostoru CIE  $L^*a^*b^*$ . Cílem těchto měření je především získání podkladů pro návrh aplikace pro automatizovanou detekci barevně nevyhovujících vzorků. V kapitole zabývající se popisem takto navržené aplikace jsou následně zhodnoceny meze detekce a vylíčen pokus o otestování aplikace přímo ve výrobním provozu. Závěrečná část práce pak shrnuje zjištěné poznatky a uvádí doporučení pro zlepšení stávajícího systému a další výzkum s ohledem na provoz, ve kterém je granulát vyráběn.

## I. TEORETICKÁ ČÁST

# 1 ZÁKLADNÍ POJMY TEORIE BAREV

## 1.1 Světlo

Základním předpokladem lidského vidění a tedy i vnímání barev je dostatek světla. Zdroje viditelného světla mohou být přirozené (např. slunce), nebo umělé (např. zářivka, žárovka). Lidské oko je schopno zachytit jen malou část elektromagnetického spektra mezi infračerveným a ultrafialovým zářením. Tato oblast se nachází přibližně mezi vlnovými délkami 380 nm až 740 nm. V závislosti na vlnové délce jej pak vnímáme jako barvu.



Obr. 1 Elektromagnetické spektrum[1]

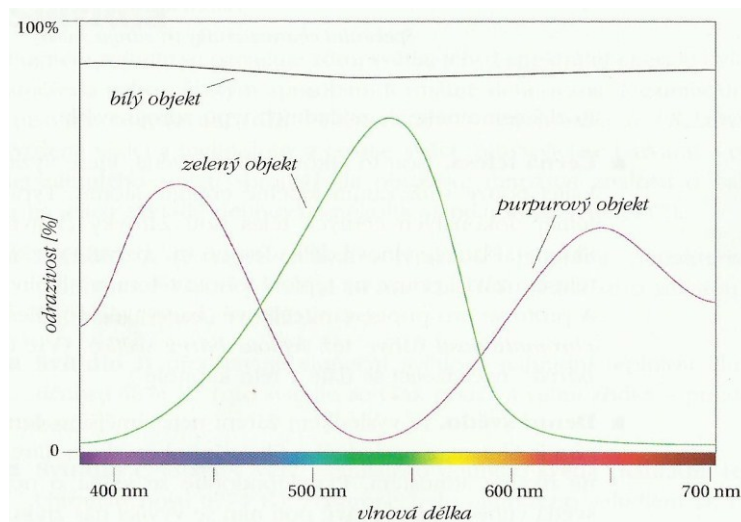
Dominantní vlnové délky světelných paprsků určují barevné tóny, které vytváří škálu viditelného spektra. Spektrum můžeme pozorovat například při průchodu světla optickým hranolem. Vlnové délky se však stanovují problematicky a jsou tak uvedeny pouze přibližně. Vzhledem k tomu, že v barevném spektru přechází jedna barva plynule ve druhou, je spektrum často označováno jako spojitě.[4]

Viditelné spektrum se obecně dělí na červenou (740 až 625 nm), oranžovou (625 až 590 nm), žlutou (590 až 565 nm), zelenou (565 až 500 nm), modrou (500 až 440 nm) a fialovou (440 až 380 nm) barvu světla.

Světelné zdroje obvykle vyzařují do prostoru fotony všech vlnových délek, které tak vytváří bílé světlo (tzv. achromatické světlo), jehož jediným atributem je intenzita. Opakem bílého světla je světlo monochromatické, které je tvořeno fotony jedné vlnové délky (např. laser). V případě, že bílé světlo dopadá na povrch pozorovaného předmětu, jsou některé fotony povrchem pohlceny a jiné zase odraženy. Odražené světlo se tak stává

nositelem barevné informace, kde kombinaci vlnových délek odražených fotonů vnímáme jako barvu předmětu. Například světlo odražené od bílého objektu obsahuje stejné množství fotonů o všech vlnových délkách, světlo ze zeleného objektu naproti tomu obsahuje málo fotonů s dlouhou vlnovou délkou a málo fotonů s krátkou vlnovou délkou. Většina takového světla je tedy tvořena fotony se střední vlnovou délkou (viz Obr. 2).

Tato skutečnost může být znázorněna spektrální charakteristikou světla odraženého daným objektem (remisní křivka). [1,4]



Obr. 2 Spektrální charakteristika tří odlišných objektů [1]

## 1.2 Barva

Na základě výše uvedeného můžeme barvu definovat jako subjektivní vjem vyvolaný částí spektra viditelného záření, které se odráží od povrchu pozorovaného objektu v závislosti na jeho barevnosti a které dopadá do optické soustavy oka pozorovatele. Barevný vjem je tedy dán třemi faktory: pozorovaným objektem, citlivostí pozorovatele a zdrojem světla. [5]

Všechny barvy je možno rozdělit na achromatické a chromatické. Achromatické barvy zahrnují bílou, černou a šedou, které jsou v souvislosti s pojmem „barevný“ často opomíjeny. Spektrální charakteristika achromatických barev má tvar přímky rovnoběžné s osou vlnových délek. U ideálního bílého povrchu tedy nastává 100% odraz světla ve všech vlnových délkách, u neutrálně šedého povrchu je odraz 50 % a ideální černý povrch neodráží žádné světlo.

Chromatické barvy jsou pak podle svého spektrálního složení buď jednoduché, nebo složené. Jednoduché jsou tzv. monochromatické barvy, které jsou vyvolány viditelným

světlem o jedné vlnové délce. Oproti tomu složené chromatické barvy charakterizuje spektrální průběh, který prochází přes více vlnových délek. Od achromatických se složené barvy tedy odlišují tím, že jejich spektrální průběh nemá tvar přímky ale křivky s jedním či více vrcholy.[2]

### 1.2.1 Charakteristiky barvy

Z hlediska zrakového vjemu lze každou barvu charakterizovat třemi základními atributy:

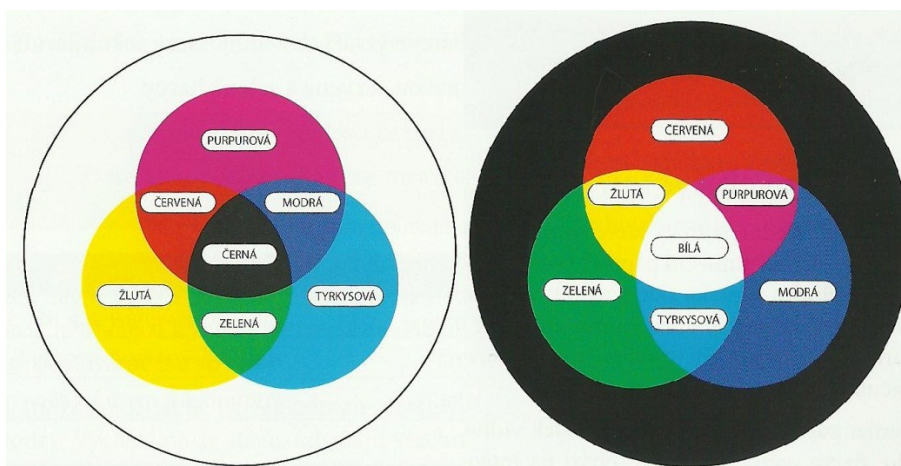
- **Barevný tón (odstín)** – je vlastností chromatické barvy, která nám umožňuje vnímání její dominantní vlnové délky, podle níž ji můžeme přirovnat k některé ze spektrálních barev. Složené chromatické barvy totiž obsahují mnoho vlnových délek, přičemž vlnová délka, která se zdánlivě jeví v konkrétním barevném vzorku jako převažující, určuje její barevný odstín. To nám umožňuje z hlediska barevnosti srovnávat složené barvy s monochromatickými a definovat je vlnovou délkou.
- **Sytost (čistota)** – vyjadřuje relativní podíl světla v určité oblasti spektra proti celkové intenzitě. Obecně můžeme říci, že charakterizuje do jaké míry je dominantní vlnová délka (barevný tón) ovlivněna dalšími vlnovými délkami. Barevné vzorky se širokým spektrem vlnových délek tak vytváří vjem nenasycených (desaturovaných) barev a vzorky, jejichž spektrum má jedno výrazné maximum, vytváří vjemy sytých (saturovaných) barev. Největší sytost tedy mají spektrální monochromatické barvy, jimž je přiřazována sytost 100 %.
- **Jas** – vyjadřuje, jaké množství světelné energie je od barevného povrchu odraženo. Čím více fotonů od barevného povrchu odráží, tím více je odstín barvy světlejší a naopak čím více fotonů povrch pohlcuje tím je barva tmavší. Jas je nejčastěji vyjadřován v % (0 až 100 %). Patří k achromatickým vlastnostem a jsme jej tedy schopni vnímat nezávisle na barvě. Podle L. Barana dokáže lidské oko rozlišit okolo 300 různých jasových stupňů barev.[1,2,4]

### 1.2.2 Míchání barev

Existují dva způsoby, kterými lze získat (namíchat) barevné tóny, kdy aditivním (součtovým) mícháním se získávají barvy světla a subtraktivním (odečítacím) se získávají pigmentové barvy.

**Aditivní míchání barev** vychází z černé barvy, která představuje stav, kdy neprobíhá žádná emise světla. Postupným rozsvěcováním (přičítáním) tří základních světelných paprsků, které vnímáme jako červený, modrý a zelený dostáváme barvu bílou. Tyto tři základní barevné paprsky mohou být ve výsledném světle zastoupeny v různém poměru a tím vytvářet ostatní barvy spektra. Přitom platí, že s čím větší intenzitou barevná světla rozsvítíme, tím světlejší výslednou barvu dostaneme, popřípadě tím blíže se přiblížíme od černé k bílé. Tento způsob používají například monitory a displeje.

**Subtraktivní míchání barevných pigmentů** je založeno na odrazu světla od povrchu objektů, z čehož plyne, že je tato metoda odkázána na vnější zdroj světla. Místo barevných světel se zde využívají krycí pigmentové barvy. Veškeré barvy se opět vytváří ze tří základních barev, které jsou doplňkové v aditivním systému, tedy azurová, purpurová a žlutá. Tento způsob se používá při míchání barevných látek (např. tisk).[4]



Obr. 3 Aditivní (vlevo) a subtraktivní (vpravo) míchání barev[4]

### 1.3 Vnímání barvy lidským okem

Množství pravidel pro práci s barvami vychází z fyziologického působení barev. Proto je vhodné se blíže seznámit i s principem barevného vidění lidského zrakového orgánu.

Z hlediska barevného vidění jsou nejdůležitějšími částmi lidského oka čočka a sítnice. Čočka vykonává funkci filtru, který chrání sítnici před vysokoenergetickým ultrafialovým zářením. Především díky tomu nemůžeme vidět v ultrafialové oblasti, čímž se lidský zrak odlišuje od jiných zrakových (např. zrak včel) či vizuálních (např. digitální fotoaparát) systémů. Sítnice pak představuje poměrně složitou vnitřní blánu oka, která obsahuje nervové buňky citlivé na světlo. Tyto buňky se nazývají receptory a dělíme je na dva typy označované jako tyčinky a čípky. Tyčinky jsou citlivější, nacházejí se na okraji sítnice

a zajišťují černobílé (tzv. skotopické) vidění za šera a ve tmě – při denním světle jsou prakticky oslepeny. Oproti tomu čípky se nachází především na malé ploše ve středu sítnice (žlutá skvrna) a zprostředkovávají barevné (tzv. fotopické) vidění.

Čípky můžeme rozdělit na tři typy podle toho, jaký obsahují fotopigment. Jeden typ čípků je tak hlavně citlivý na světlo delších vlnových délek okolo 650 nm (červený fotopigment), druhý na světlo středních vlnových délek okolo 550 nm (zelený fotopigment) a poslední typ je nejvíce citlivý na světlo krátkých vlnových délek kolem 450 nm (modrý fotopigment).

Na této skutečnosti je postavena tzv. trichromatická teorie barevného vidění, kde jednotlivé typy čípků vyvolávají vjem červené, zelené, nebo modré barvy v závislosti na složení dopadajícího světla. Tyto prvotní signály z receptorů jsou vedeny do mozku, kde se podle jejich poměru vytváří výsledný barevný vjem. To znamená, že téměř každou barvu lze simulovat pomocí pouze tří dobře zvolených základních barev světla.[1,4]

## 2 MĚŘENÍ A MATEMATICKÉ VYJÁDŘENÍ BAREV

Vzhledem k tomu, že barevný vjem hodnocený lidským zrakem je závislý i na fyzickém a psychickém stavu pozorovatele, můžeme říct, že tento vjem je vždy pouze subjektivní. Proto bylo třeba vymyslet systém pro přesné a objektivní měření barev a jejich popis.

Věda zabývající se měřením barev se nazývá kolorimetrie a vychází ze standardů Mezinárodní osvětlovací komise (CIE - Commission Internationale de l'Éclairage), která v roce 1924 ustanovila pracovní skupinu pro kolorimetrii. Jelikož samotnou barvu měřit nelze, protože se objevuje pouze v mysli pozorovatele, je kolorimetrie postavena na měření spektrálních vlastností světla a fyziologických vlastností zraku.[2,4]

### 2.1 Faktory ovlivňující barevný vjem

Jak již jsme si uvedli, na vzniku barevného vjemu se podílejí tři základní prvky a to zdroj světla, pozorovaný předmět a pozorovatel, kdy změna jakéhokoli z těchto prvků má za následek i změnu výsledného barevného vjemu. Existuje tedy velké množství faktorů, které mají vliv na výsledný barevný vjem, z nichž byla celá řada standardizována CIE. Mezi hlavní faktory patří:

- zdroje světla,
- podmínky osvětlování a pozorování,
- standardní pozorovatelé.[2]

#### 2.1.1 Zdroje světla

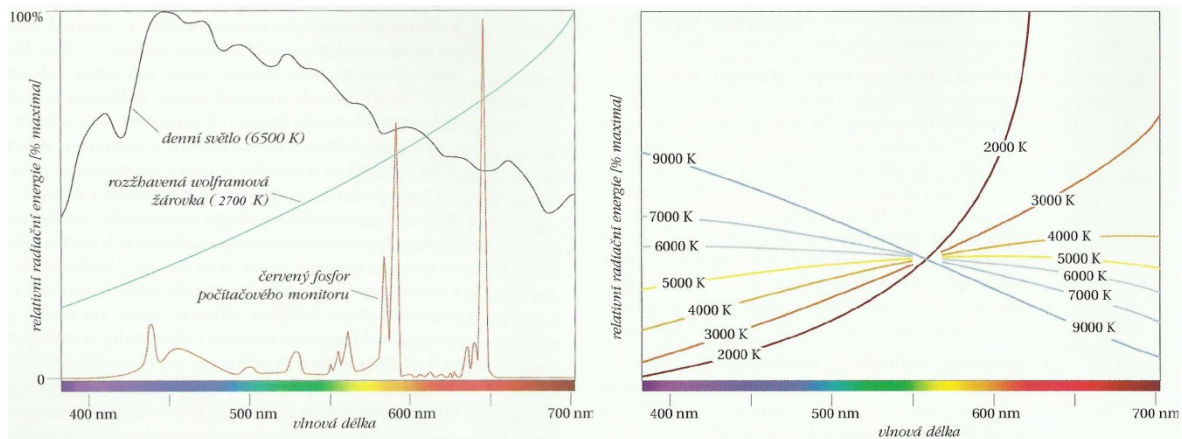
Pro objektivní pozorování barev je nutno specifikovat zdroj světla, který osvětluje barevný povrch objektu. Zdrojem světla označujeme jakýkoliv předmět, který vyzařuje elektromagnetické záření s vlnovými délkami odpovídajícími viditelné části spektra. Podobně jako u pozorovaných objektů můžeme i u zdrojů světla charakterizovat jimi vyzařované světlo pomocí spektrální charakteristiky (viz Obr. 4 vlevo).[1,7]

Zdroje světla jsou charakterizovány hlavně jejich teplotou chromatičnosti ( $T_C$  [K]), kde se setkáváme i s pojmy ekvivalentní ( $T_{CE}$  [K]) a náhradní teplota chromatičnosti ( $T_{CP}$  [K]).

**Teplota chromatičnosti** se používá u zdrojů světla, které mají spektrální charakteristiku shodnou se spektrální charakteristikou černého tělesa<sup>1</sup>.

**Ekvivalentní teplota chromatičnosti** se užívá u zdrojů světla se spektrální charakteristikou, která se příliš neodlišuje od černého tělesa a má plynulý průběh.

**Náhradní teplota chromatičnosti** se používá u zdrojů, jejichž spektrální charakteristika vykazuje náhlé změny.[2]



Obr. 4 Spektrální charakteristika tří zdrojů světla (vlevo) a černého tělesa při různých teplotách (vpravo)[1]

Aby se zabránilo používání nepřehledného množství světelných zdrojů, definovala CIE šest standardních zdrojů světla A až F:

- **A** – Žlutooranžové světlo odpovídající klasické wolframové žárovce s teplotou chromatičnosti  $T_C = 2856$  K (klasická 100 W žárovka má přibližně  $T_C = 2600$  K).
- **B** – Žárovka s filtrem simulujícím přímé denní světlo, která má ekvivalentní teplotou chromatičnosti  $T_{CE} = 4874$ . Používá se jen zřídka.
- **C** – Žárovka s filtrem simulujícím nepřímé sluneční světlo, která má ekvivalentní teplotou chromatičnosti  $T_{CE} = 6774$ . Postupně bylo nahrazeno světlem D.
- **D** – Řada zdrojů simulujících denní světlo. Od standardních zdrojů světla C se liší především tím, že obsahují ultrafialovou složku. Nejrozšířenějšími zdroji světla

<sup>1</sup> Černé těleso je těleso, které dokonale pohlcuje dopadající záření, a to při každém úhlu dopadu a které naopak při každé vlnové délce vyzařuje maximální energii nezávisle na použitém materiálu. [6]

typu D jsou D50 a D65 s ekvivalentní teplotou chromatičnosti  $T_{CE} = 5000$  a  $T_{CE} = 6504$  K. D65 odpovídá černé křivce na Obr. 4 vlevo.

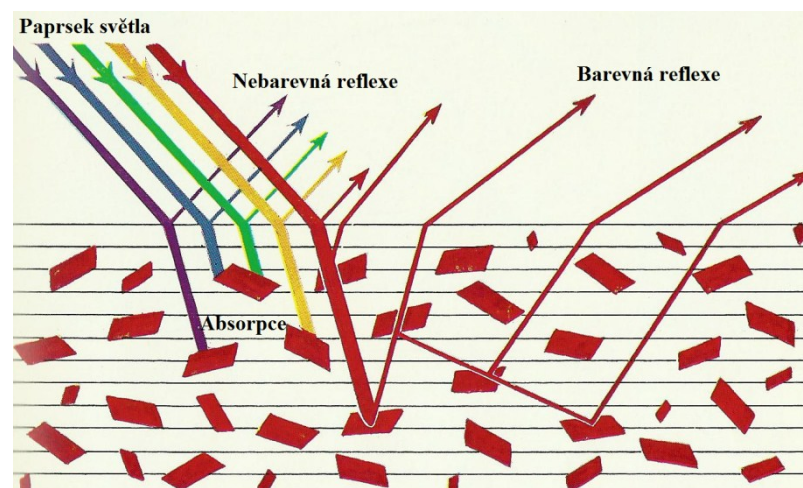
- **E** – Teoretický zdroj světla s konstantní energií pro všechny vlnové délky.
- **F** – Řada zářivkových osvětlení F1 až F12 s náhradní teplotou chromatičnosti (mají ve svých spektrálních charakteristikách ostré špičky). Nejedná se o oficiální standard, ale vzhledem k tomu, že je zářivkové osvětlení často používáno, doporučuje CIE některé druhy.[1,7]

### 2.1.2 Podmínky osvětlování a pozorování

Druhým faktorem ovlivňujícím výsledný barevný vjem je spektrální odrazivost povrchu pozorovaného předmětu, která je rovněž označována jako remise. Když dopadá světlo na povrch předmětu, dochází k reakci světla s povrchem, čímž je ovlivněna barva světla.

Při tomto procesu proniká hlavní část světla do velmi malé hloubky povrchu, kde dochází k interakci mezi fotony světla a atomy povrchu. Atomy povrchové vrstvy absorbují fotony s některými vlnovými délkami (selektivní absorpce) a jiné fotony zase odrazí (viz Obr. 5). Tento odraz nazýváme jako difúzní odraz (barevná reflexe). Vedle difúzního odrazu dochází zpravidla u malého podílu světla k zrcadlovému odrazu, kdy toto světlo není ovlivněno povrchem předmětu (nebarevná reflexe). [1,2,3]

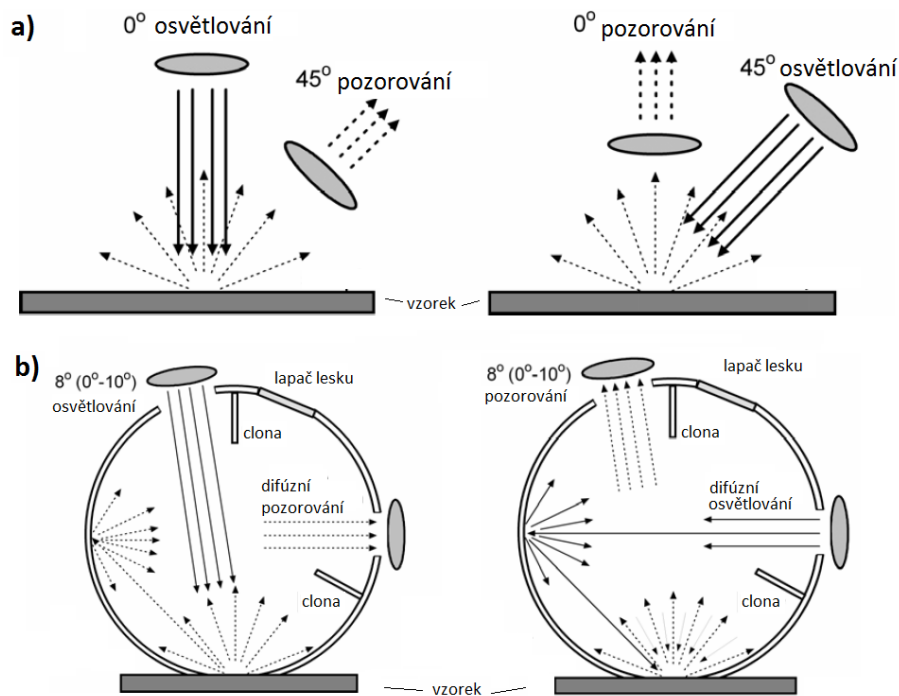
Pozn.: U průsvitných předmětů část světla předmětem prochází. Dochází k tzv. transmisi.



Obr. 5 Remise červeného předmětu[3]

Volbou vhodných podmínek pozorování a osvětlování lze zrcadlový odraz vyloučit a sledovat barvu povrchu v její plné vydatnosti. Za tímto účelem CIE definovala pro

kolorimetrická měření neprůhledných objektů doporučení právě v podobě podmínek osvětlování a pozorování (viz Obr. 6).



Obr. 6 CIE měřicí geometrie[8]

a) Takto uspořádané měřicí geometrie jsou označovány jako 0/45 (vlevo) a 45/0 (vpravo). U geometrie 0/45 je vzorek osvětlován paprsky ve směru normály k jeho povrchu s možnou odchylkou  $\pm 2^\circ$  a úhel pozorování je  $45^\circ \pm 10^\circ$ . Tato geometrie není doporučena pro lesklé předměty. Pokud je takto použita, neměl by pak být vzorek osvětlován přímo ve směru normály ale s odklonem  $5^\circ$  až  $10^\circ$ . Nejčastěji je používán úhel  $8^\circ$ .

Geometrie 0/45 je shodným postupem, kde je pouze otočen chod paprsků. Vzorek je tedy osvětlován pod úhlem  $45^\circ \pm 2^\circ$  od normály povrchu a do senzoru dopadají paprsky ve směru normály, přičemž odchylka osy svazku by neměla být větší než  $10^\circ$ .

Pro obě geometrie je rovněž doporučováno, aby odchylka jednotlivých paprsků od osy osvětlujícího svazku a svazku dopadajícího do senzoru nepřekročila  $8^\circ$ .

b) Při takovéto konfiguraci jsou měřicí geometrie označovány jako 0/d (případně 8/d, na obrázku vlevo) a d/0 (případně d/8, na obrázku vpravo), kde d vyjadřuje, že se jedná o difúzní geometrii. U geometrie 0/d je vzorek osvětlován přímo ve směru normály k jeho povrchu, přičemž by odchylka osy osvětlujícího svazku od normály neměla být větší než  $10^\circ$  a kterýkoliv paprsek svazku by se neměl od jeho osy odchýlit o více jak  $5^\circ$ . Světlo, které se následně odráží do všech směrů, je sbíráno integrátorem (nejlépe kulovým)

a vyhodnocováno senzorem umístěným v otvoru v boku integrátoru. V případě, že jsou měřeny lesklé povrchy, je třeba zajistit, aby od něj odražené paprsky nedopadali do osvětlovacího otvoru. V těchto případech je doporučeno neosvětlovat vzorek přímo ve směru normály, ale s odchylkou 5° až 10°. Nejčastěji je používán úhel 8°, odkud plyne označení 8/d.

U geometrie d/0 se stejně jako u předešlé dvojice geometrií jedná o stejné uspořádání pouze s přetočeným chodem paprsků. To znamená, že vzorek je difúzně osvětlován v integrátoru a odražené záření je vyhodnocováno senzorem umístěným ve směru normály, přičemž odchylka osy světelného svazku vstupujícího do senzoru od normály je menší než 10° a odchylka paprsků od osy svazku je menší jak 5°. V integrátoru umístěné clony s bílým povrchem zamezují přímému osvětlení vzorku. Obdobně jako u předešlé geometrie se u lesklých povrchů používá odklon senzoru od normály – nejčastěji 8° (d/8).

Vnitřní plocha integrátoru je tvořena odrazným bílým povlakem s velmi malou selektivitou odrazu. Integrátory jsou dále vybavovány tzv. lapači lesku. Jedná se o černou plochu s vysokou absorpcí, která umožňuje z měření vyloučit zrcadlovou složku odrazu. Řada zařízení umožňuje tuto plochu podle nastavení zaměňovat s bílou reflexní plochou, čímž je do měření zahrnuta i tato složka odrazu.[2,8]

### 2.1.3 Standardní pozorovatel

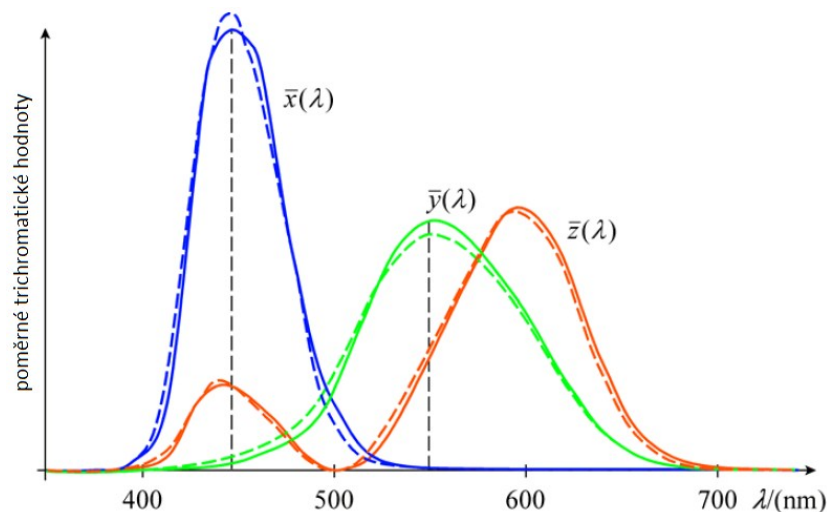
Třetí faktor ovlivňujícím výsledný barevný vjem je způsob, jakým člověk vnímá barvu. Proto byla provedena s pozorovateli bez vad oka řada experimentů, jejichž cílem bylo zjistit průměrnou citlivost oka na jednotlivé odstíny barev tvořených podílem červeného, zeleného a modrého světla (soustava RGB – Red, Green, Blue). Při těchto experimentech pozorovatel porovnával dvě plochy s bílým povrchem. Na jednu plochu dopadalo světlo analyzované monochromatické barvy (definované v rozsahu vlnových délek 380 až 780 nm obvykle s krokem 5 nm) a na druhou světlo složené ze tří monochromatických světél (červené  $\lambda_R = 700$  nm, zelené  $\lambda_G = 546,1$  nm a modré  $\lambda_B = 435,8$  nm) jejichž intenzitu šlo individuálně nastavit. Pozorovatel pak následně hodnotil, kdy dojde ke stejnému barevnému vjemu (metamerii).[9]

Na základě získaných závislostí intenzit jednotlivých barev na vlnové délce byly sestrojeny tzv. funkce trichromatických členitelů  $\bar{r}(\lambda)$ ,  $\bar{g}(\lambda)$ ,  $\bar{b}(\lambda)$ . U těch se ale vyskytl problém, jelikož pro některé vlnové délky nabývali záporných hodnot – danou analyzovanou barvu

nešlo složit z definovaných základních monochromatických barev, ale pouze přidáním odpovídající barevné složky (červená, zelená, modrá) k analyzované barvě. Z tohoto důvodu CIE navrhla tzv. ireálná (imaginární) primární světla, která umožnila transformaci funkcí trichromatických členitelů tak, aby nabývali pouze kladných hodnot.

Tyto funkce se nazývají funkce trichromatických členitelů CIE, značí se jako  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  a CIE jimi v roce 1931 definovala tzv. standardního pozorovatele. Jejich hodnoty byly stanoveny pro přesné foveální vidění, to je vnímání barev žlutou skvrnou sítnice, která obsahuje pouze čípky. To však platí jen za předpokladu, že zorné pole zabírá zorný úhel  $1,5^\circ - 4^\circ$ . Standardně je používán úhel  $2^\circ$ , odkud plyne označení  $2^\circ$  nebo normální pozorovatel.[2,9]

V mnoha případech však světlo vyvolávající barevný vjem vstupuje do oka tak, že dopadá na celou sítnici. Proto CIE v roce 1964 definovala doplňkového standardního pozorovatele s  $10^\circ$  zorným polem, který by měl být použit při jakémkoli pozorování se zorným polem větším než  $4^\circ$ . Od tohoto roku by každé zařízení pro měření barev mělo obsahovat informaci, zda odpovídá použití definice  $2^\circ$  (normálního) pozorovatele nebo definice  $10^\circ$  (doplňkového) pozorovatele. Není-li tento údaj uveden, předpokládá se využití  $2^\circ$  normálního pozorovatele.[7,9]



Obr. 7 Grafické znázornění funkcí trichromatických členitelů pro  $2^\circ$  (plně) a  $10^\circ$  (čárkovaně) pozorovatele[9]

## 2.2 Barevné prostory

Dnešní moderní technologie používají pro vyjádření barev různé barevné prostory. Tyto prostory jsou většinou odvozeny ze způsobu, jakým člověk vnímá barvy, a ze známých principů míchání barev. Jde tedy v podstatě o matematické modelování lidského vnímání barev, které nám umožňuje odkazovat se na určitou barvu pomocí číselného vyjádření. Obecně můžeme barevné prostory rozdělit na dvě základní skupiny:

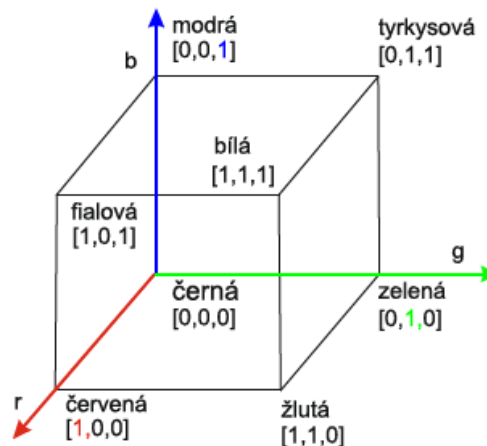
- **Barevné prostory závislé na zařízení** – Jedná se o prostory určené pro konkrétní zařízení, které představují určitý rozsah barev viditelného spektra. Mezi hlavní zástupce této skupiny patří barevné prostory RGB a CMYK. Při práci s počítačem se nejčastěji setkáme s barevným prostorem RGB založeným na aditivním míchání barev, který je využíván řadou výstupních zařízení (např. monitory, skenery) a v našem případě především vstupních zařízení (např. digitální fotoaparáty, kamery, jednodušší senzory barevnosti). Subtraktivní barevný prostor CMYK je pak využíván hlavně u barevných tiskáren, proto není v této práci dále rozváděn.[4]
- **Barevné prostory nezávislé na zařízení** – Tyto prostory jsou definovány zcela univerzálně a nezávisle na jakémkoli typu zařízení. Vycházejí z dlouholeté práce vědců a techniků zabývajících se kolorimetrií v rámci Mezinárodní komise pro osvětlování (CIE). Od roku 1931 tak CIE vytvořila celou řadu standardních barevných prostorů, jako jsou CIE XYZ, CIE xyY – chromatický diagram, CIE L\*a\*b\* a CIE L\*u\*v\*.[1]

### 2.2.1 RGB

Jak je patrné z kapitoly 1.3, barevný prostor RGB odpovídá způsobu, jakým lidské oko vnímá barvy. Tento prostor je obvykle reprezentován ve formě jednotkové krychle, umístěné v osách základních barev  $r$  (červená),  $g$  (zelená) a  $b$  (modrá), kde jednotlivé souřadnice odpovídají intenzitě dané základní světelné složky (viz Obr. 8). Počátek soustavy, který odpovídá černé barvě má souřadnice  $[0,0,0]$ . Vrchol o souřadnicích  $[1,1,1]$  pak představuje bílou barvu a body na pomyslné diagonále mezi těmito body odpovídají odstínům šedi.

V počítačové grafice jsou základní barevné složky barevného prostoru RGB často nazývány jako barevné kanály a intervaly jejich intenzit nejsou prezentovány v rozsahu

0 až 1 ale v celočíselném rozsah 0 až 255, který lze vyjádřit 8 bity. Dostáváme tak  $256^3$  ( $2^{24}$ ) barevných kombinací, což představuje 16 777 216 barevných odstínů.[4,10]



Obr. 8 Barevný prostor RGB[10]

### 2.2.2 CIE XYZ

Tento barevný prostor tvoří základ pro matematické a fyzikální vyjádření barvy a je využíván především pro kolorimetrické zpracování barev, popřípadě v některých počítačových programech pro transformace barev.

Barevný prostor CIE XYZ je založen na křivkách citlivosti tří barevných receptorů lidského oka, které CIE v roce 1931 definovala jako standardního pozorovatele (viz kapitola 2.1.3). Všechny barvy v tomto prostoru jsou tak definovány pomocí tří imaginárních primárních světél X, Y a Z (měly by větší sytost než spektrálně čisté barvy – osy proto leží vně oblasti skutečných barev), což při kolorimetrických výpočtech netvoří problém, jelikož poměry mezi souřadnicemi zůstávají stejné. Primární světla X, Y a Z byly stanoveny tak, aby byly dodrženy tyto podmínky:

- Všechny reálné barvy mají kladné hodnoty.
- Jedna ze tří hodnot zároveň poskytovala údaj o jasnosti barvy. X a Z byly proto zvoleny tak, aby měly nulový jas a souřadnice Y odpovídala jasnosti.
- Primární barvy X, Y a Z se chovají aditivně, stejně jako primární barvy R, G, a B.[2,7]

Každou barvu tak můžeme vyjádřit pomocí tří čísel tzv. trichromatických složek, které jsou definovány následovně:

$$\left. \begin{aligned} X &= k \int_{380}^{780} E(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)d\lambda \\ Y &= k \int_{380}^{780} E(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda \\ Z &= k \int_{380}^{780} E(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)d\lambda \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

kde  $E(\lambda)$  je spektrální rozložení energie osvětlení podle vlnové délky  $\lambda$ ,

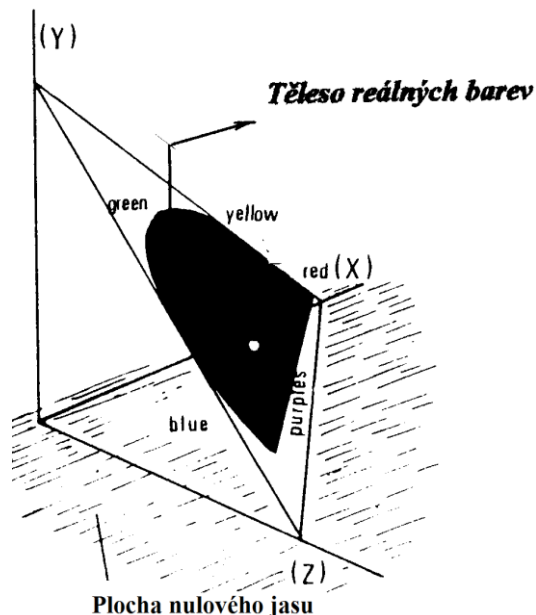
$R(\lambda)$  spektrální odrazivost vzorku (remise) při vlnové délce  $\lambda$ ,

$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  hodnoty trichromatických členitelů,

$k$  normalizační faktor, který je dán vztahem:

$$k = 100 / \int_{380}^{780} E(\lambda)\bar{y}(\lambda)d\lambda . \quad (2)$$

Integrály v rovnicích jsou obvykle pro usnadnění výpočtu nahrazeny součty a hodnoty součinnů  $E(\lambda)\bar{x}(\lambda)$ ,  $E(\lambda)\bar{y}(\lambda)$  a  $E(\lambda)\bar{z}(\lambda)$  jsou pro jednotlivé používané standardní světelné zdroje tabelovány při současném respektování normalizační podmínky z rovnice (2), takže odpadá normalizační faktor.[2,9]



Obr. 9 Barevný prostor CIE XYZ[2]

### Převod RGB do XYZ

Pro převod souřadnic  $r$ ,  $g$  a  $b$  do barevného prostoru XYZ se využívá převodní matice. Existuje ale více druhů RGB barevných prostorů a pro každý z nich odpovídající převodní matice. V praktické části této práce bude pro měření barevnosti využívána především webkamera. Proto se zaměříme pouze na barevný prostor sRGB, který představuje standardní barevný prostor pro Internet. Převodní vztah má následující tvar:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124564 & 0.3575761 & 0.1804375 \\ 0.2126729 & 0.7151522 & 0.0721750 \\ 0.0193339 & 0.1191920 & 0.9503041 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r' \\ g' \\ b' \end{bmatrix} \quad (3)$$

kde  $r'$ ,  $g'$  a  $b'$  jsou souřadnice  $r$ ,  $g$ ,  $b$  po inverzní gamma korekci.

Pro přesný převod je třeba provést ještě před samotným užitím převodní matice inverzní gama korekci  $r$ ,  $g$ ,  $b$  hodnot. Barevný prostor sRGB byl totiž navržen tak, aby šel přímo zobrazovat na CRT monitorech, které nereagují na vstupní signály lineárně – vstupní napětí není přímo úměrná výstupnímu jasu, ale exponenciálně. Aby se obraz zobrazoval správně, musela tedy být vstupní data upravena gamma korekcí. Inverzní gamma korekce pak vypadá následovně:

$$r' = r/12,92 \quad \text{pro } r \leq 0,04045, \quad (4a)$$

$$r' = ((r + 0,055)/1,055)^{2,4} \quad \text{pro } r > 0,04045, \quad (4b)$$

kde  $r$  nabývá hodnot 0 – 1.

Stejný vztah platí i pro souřadnice  $g'$  a  $b'$ . [18,19]

### 2.2.3 CIE xyY – chromatický diagram

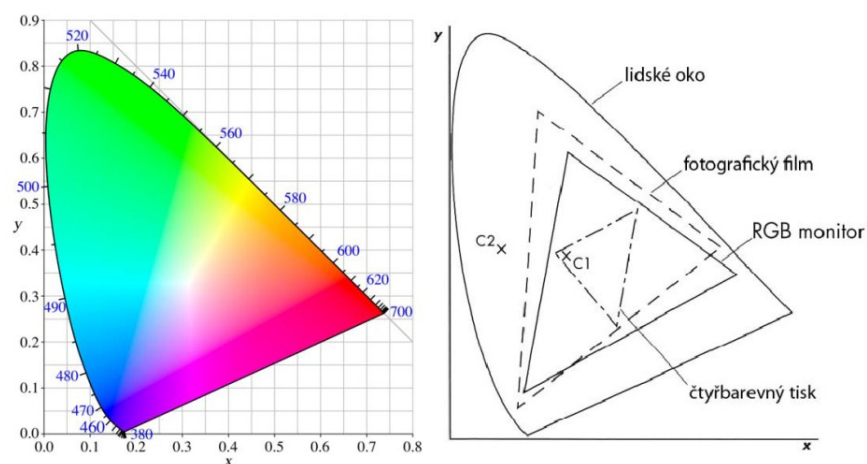
Barevný prostor xyY je přímo odvozen z barevného prostoru XYZ a slouží především ke znázornění barev ve dvojrozměrném prostoru nezávisle na jasu. Hodnota  $Y$  je zde shodná s trichromatickou složkou  $Y$ , která představuje jas barvy. Hodnoty  $x$  a  $y$  se nazývají chromatické souřadnice barvy a jsou vypočtené přímo z trichromatických složek  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  pomocí následujícím vztahů: [7]

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, y = \frac{Y}{X + Y + Z}, z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (5)$$

Platí tedy, že  $x + y + z = 1$ , z čehož plyne, že hodnota  $z$  může být získána ke každé libovolné barvě tím, že bude nahrazena odečtením trichromatických souřadnic  $x$  a  $y$  od 1 ( $1 - x - y = z$ ).

Vzhledem k tomu, že je barevný prostor XYZ pravoúhlý, můžeme matematicky transformovat rovinu, která vytíná v tomto prostoru rovnostranný trojúhelník, do roviny XY. Tím získáme chromatický diagram s osami  $x$ ,  $y$ , kde čisté spektrální barvy vytváří tvar podkovy, známý jako spektrální locus. Čára spojující koncové body podkovy se nazývá purpurová linie. Všechny body, které odpovídají chromatičnosti reálně existujících světelných podnětů, jejichž barvu jsme doopravdy schopni vidět, pak leží uvnitř podkovy. Ve středu podkovy se nachází bílá, směrem od středu, jsou barvy sytější, a na okrajích se nacházejí nejsytější čisté spektrální barvy.

V souvislosti s tímto zobrazením barev je vhodné rovněž zmínit pojem gamut. Gamut označuje konkrétní oblast barev v barevném prostoru, které jsou viditelné lidským zrakem (samotný locus), nebo které dokáží reprodukovat konkrétní zařízení pracující s barvou.[2,7]

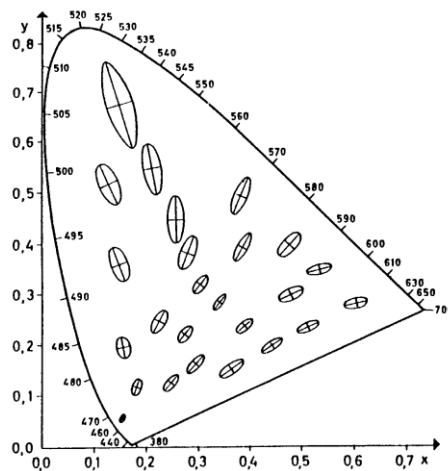


Obr. 10 Chromatický diagram a gamut různých zařízení[7]

#### 2.2.4 CIE L\*a\*b\*

Barevný prostor CIE L\*a\*b\* byl navržen tak, aby se co nejvíce blížil podmínkám ideálního barevného prostoru. V takovémto prostoru je číselně vyjádřená vzdálenost mezi libovolnými dvěma body, z nichž každý reprezentuje určitou barvu v prostoru, shodná s pozorovatelem vnímaným rozdílem těchto barev.[2,7]

Jak bylo pokusy prokázáno barevný prostor CIE XYZ (CIE xyY) tyto podmínky nesplňuje. Při těchto pokusech různí pozorovatelé hodnotili 2° zorné pole rozdělené na dvě poloviny. Jednu polovina byla nastavována experimentátorem a druhou musel pozorovatel upravit tak, aby byl barevný vjem obou stran stejný. Výsledkem těchto pokusů bylo zjištění, že pro dvě různé dvojice barevných odstínů je stejně vnímaná odchylka vyjádřena v barevném prostoru odlišnou geometrickou vzdáleností prezentovanou jako elipsa (viz Obr. 11).[2]



Obr. 11 Vzdálenost barev v chromatickém diagramu[12]

Tento jev představoval značný problém pro potřebné výpočty barevných rozdílů. Proto byl vytvořen barevný prostor CIE  $L^*a^*b^*$ , který přímo vychází z prostoru CIE XYZ. Pravoúhlé osy tohoto prostoru tvoří jas  $L^*$ , který nabývá hodnot z intervalu 0 (černá) až 100 (bílá), a dvě chromatické osy  $a^*$  a  $b^*$ . Osa  $a^*$  probíhá od zelené barvy k červené a osa  $b^*$  od modré ke žluté (viz Obr. 12). Matematicky jsou souřadnice jednotlivých barev definovány takto:[9]

$$L^* = 116 \cdot (Y/Y_n)^{1/3} - 16 \quad \text{pro } Y/Y_n > 0,008856 \quad (6a)$$

$$L^* = 903,3 \cdot (Y/Y_n) \quad \text{pro } Y/Y_n \leq 0,008856 \quad (6b)$$

$$a^* = 500 \cdot [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \quad (6c)$$

$$b^* = 200 \cdot [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (6d)$$

kde  $f(X/X_n) = (X/X_n)^{1/3}$  pro  $(X/X_n) > 0,008856$ ,

$$f(X/X_n) = (841/108) \cdot (X/X_n) + 16/116 \quad \text{pro } (X/X_n) \leq 0,008856,$$

$$f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3} \quad \text{pro } (Y/Y_n) > 0,008856,$$

$$f(Y/Y_n) = (841/108) \cdot (Y/Y_n) + 16/116 \quad \text{pro } (Y/Y_n) \leq 0,008856,$$

$$f(Z/Z_n) = (Z/Z_n)^{1/3} \quad \text{pro } (Z/Z_n) \leq 0,008856,$$

$$f(Z/Z_n) = (841/108) \cdot (Z/Z_n) + 16/116 \quad \text{pro } (Z/Z_n) > 0,008856$$

a kde

$X_n, Y_n, Z_n$  jsou hodnoty trichromatických složek tělesa s dokonalým odrazem světla:  $X_n = 0,94811$ ;  $Y_n = 1$ ;  $Z_n = 1,07305$ .

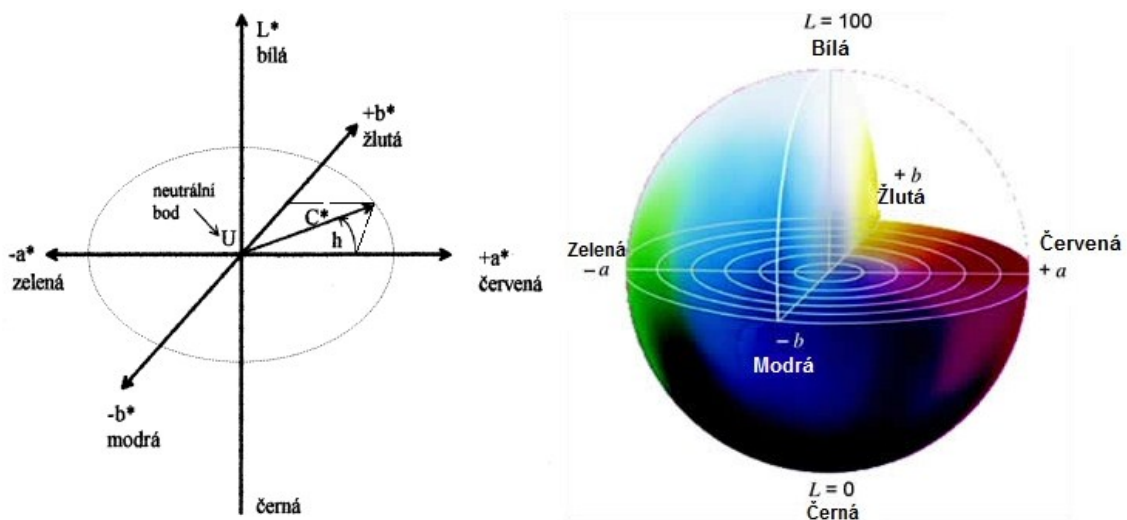
Často bývá výhodné vyjádření bodu v barevném prostoru pomocí tzv. cylindrických souřadnic  $L^*$ ,  $C^*$ ,  $h^\circ$ , které lépe odpovídají lidskému charakterizování barev (toto vyjádření bývá mnohdy označováno jako barevný prostor CIE  $L^*C^*h^*$ ). Pro souřadnici  $L^*$  platí výše uvedená rovnice (4a) a souřadnice  $C^*$  a  $h^\circ$  jsou odvozeny z chromatických souřadnic  $a^*$  a  $b^*$ :

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (7a)$$

$$h^\circ = \arctan(b^*/a^*) \quad (7b)$$

kde  $C^*$  vyjadřuje sytost barvy (chroma) - odpovídá vzdálenosti bodu v barevném prostoru od shodně vnímané šedé v tělese barev,

$h^\circ$  znázorňuje odstín (hue), který odpovídá úhlu mezi barevným vektorem a kladnou poloosou  $a^*$  ( $0^\circ$ - $360^\circ$ ).



Obr. 12 Barevný prostor CIE  $L^*a^*b^*$ [2,11]

Obdobné vlastnosti jako barevný prostor CIE  $L^*a^*b^*$  má i prostor CIE  $L^*u^*v^*$ . Ten se ale ukázal jako méně vhodný pro výpočet barevných diferencí povrchů a je proto využíván především v oblastech technologií vyzařujících světlo, jako jsou obrazovky a monitory.[9,11,17]

### 2.3 Barevná diference

V řadě průmyslových odvětví (např. textilní, plastikářské) je běžnou součástí provozní praxe provádění posudků, zda barevnost konkrétního vzorku je ve shodě s předlohou (posudky PASS/FAIL – přijatelné/nepřijatelné). Pokud bychom měli ideální barevný prostor, tvořily by body barev se stejně vnímanou vizuální odchylkou kouli kolem bodu představujícího předlohu. Poloměr této koule by pak reprezentoval mezní barevnou odchylku, kde barevné odstíny uvnitř koule jsou přijatelné (PASS) a vně nepřijatelné (FAIL).[2]

Na základě domněnky, že je barevný prostor CIE  $L^*a^*b^*$  ideálním prostorem, byl ve stejném roce (1974) jako tento prostor definován i vzorec pro výpočet barevné diference  $\Delta E_{ab}$ . Ukázalo se ale, že ani CIE  $L^*a^*b^*$  není úplně ideálním prostorem. V souvislosti s tímto se vědecká obec zabývající se kolorimetrií rozhodla nevytvářet nový barevný prostor a vyvinula řadu dalších rovnic pro výpočet barevné diference, které dávají větší nebo menší váhy hodnotám  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  v různých oblastech tohoto barevného prostoru. Díky tomu tyto rovnice lépe odpovídají vizuálně vnímaným rozdílům. Mezi nejznámější rovnice pro výpočet barevné diference patří:

- CIE1976 ( $\Delta E_{ab}$ ),
- CIE1994 ( $\Delta E_{94}$ ),
- CIEDE2000 ( $\Delta E_{00}$ ),
- CMC ( $\Delta E_{CMC}$ ).[12]

#### 2.3.1 CIE1976 ( $\Delta E_{ab}$ )

I přes své nedostatky je rovnice  $\Delta E_{ab}$  široce používaná v průmyslu a výzkumu. Tvar této rovnice je:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} . \quad (8)$$

Informace o samotném charakteru této celkové diference mezi vzorkem (index 1) a předlohou (index 0) nám blíže poskytují jednotlivé složky:

$$\Delta L^* = L^*_1 - L^*_0, \quad (9a)$$

$$\Delta a^* = a^*_1 - a^*_0, \quad (9b)$$

$$\Delta b^* = b^*_1 - b^*_0. \quad (9c)$$

Druhá možnost jak vyjádřit charakter celkové diference je využití cylindrických souřadnic, kde úhlová odchylka odstínu  $\Delta H^*$  je upravena tak, aby neměla polární, ale kartézský charakter:[14]

$$\Delta L^* = L^*_1 - L^*_0, \quad (10a)$$

$$\Delta C^* = C^*_1 - C^*_0, \quad (10b)$$

$$\Delta H^* = \sqrt{(\Delta E_{ab} - \Delta L^* - \Delta C^*)^2}, \quad (10c)$$

### 2.3.2 CMC ( $\Delta E_{CMC}$ )

Rovnice CMC je založena na cylindrických souřadnicích CIE  $L^*a^*b^*$  a poskytuje lepší soulad mezi vizuálním posouzením a měřeným rozdílem barev. Tato rovnice nebyla vyvinuta CIE ale "Výborem pro měření barevnosti Spolku barvířů a koloristů ve Velké Británii" označovaným jako SDC CMC (Colour Measurement Committee) a od roku 1988 patří mezi široce uznávané standardy.

CMC výpočet matematicky definuje kolem barvy předlohy místo koule, jak tomu bylo u  $\Delta E_{ab}$ , elipsoid s osami, které odpovídají odstínu, sytosti a jasu. Elipsoid představuje prostor přijatelné barvy a automaticky se liší ve velikosti a tvaru v závislosti na poloze bodu barvy v barevném prostoru (viz Obr. 13). Elipsoidy jsou konstruovány podle následující rovnice:[13,14]

$$\Delta E_{CMC} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{1 \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{c \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{S_H}\right)^2}, \quad (11)$$

kde  $S_L$ ,  $S_C$  a  $S_H$  jsou váhové funkce:

$$S_L = \frac{0,040975 \cdot L_0^*}{1 + 0,01765 L_0^*} \text{ pokud } L_0^* \geq 16, \text{ jinak } S_L = 0,511,$$

$$S_C = \frac{0,0638 \cdot C_0^*}{1 + 0,0131 C_0^*} + 0,638,$$

$$S_H = S_C \cdot (T \cdot f + 1 - f),$$

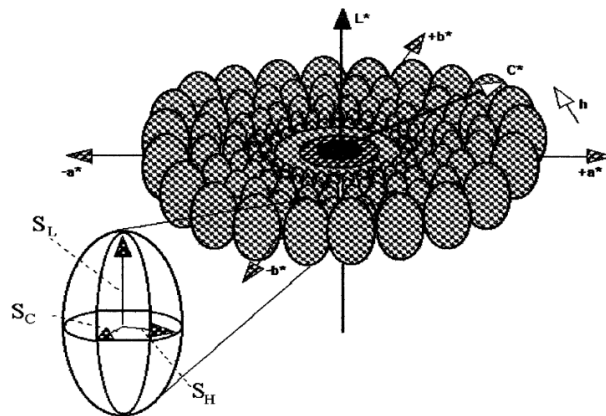
$$\text{kde } f = \sqrt{\frac{(C_0^*)^4}{(C_0^*)^4 + 1900}},$$

$$T = 0,56 + |0,2 \cdot \cos(h_0^\circ + 168)| \quad \text{pro } 164^\circ \leq h_0^\circ < 345^\circ,$$

$$T = 0,36 + |0,4 \cdot \cos(h_0^\circ + 35)| \quad \text{pro } 345^\circ \leq h_0^\circ < 164^\circ,$$

a

$l$  a  $c$  jsou váhové faktory, kdy současná praxe je, že  $c = 1$  pro všechna odvětví průmyslu, a  $l = 2$  pro textilie a  $l = 1,4$  pro nátěrové hmoty a plasty.



Obr. 13 Toleranční elipsoidy CMC v CIE  $L^*a^*b^*$ [2]

### 2.3.3 CIE1994 ( $\Delta E_{94}$ )

V roce 1994 vydala CIE novou rovnici pro výpočet barevné diference označovanou  $\Delta E_{94}$  nebo CIE1994. Stejně jako CMC i tato rovnice produkuje elipsoidy. Její hlavní výhoda oproti CMC spočívá v jednoduchosti:[13]

$$\Delta E_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*}{k_C \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*}{k_H \cdot S_H}\right)^2}, \quad (12)$$

kde  $k_L = 1$  pro většinu měření, resp.  $k_L = 1,4$  pro použití v plastikářském průmyslu,

$$k_C = k_H = 1,$$

$$S_L = 1,$$

$$S_C = 1 + 0,045 \cdot C_0^*,$$

$$S_H = 1 + 0,015 \cdot C_0^*$$

### 2.3.4 CIEDE2000 ( $\Delta E_{00}$ )

I když je  $\Delta E_{00}$  stále testována (není oficiálním standardem), je považována za rovnici pro výpočet barevné difference, která nejlépe odpovídá člověkem vnímaným rozdílům barev.  $\Delta E_{00}$ , na rozdíl od rovnice  $\Delta E_{94}$ , pokrývá i zjištěnou interakci mezi rozdílem sytosti a rozdílem odstínu v modré oblasti. Výpočet barevné odchylky zde probíhá ve 3 krocích:

#### 1. Výpočet $a'$ , $C'$ a $h'$ ( $L' = L^*$ , $b' = b^*$ )

$$a' = (1 + G)a^*$$

$$\text{kde } G = 0,5 \left( 1 - \sqrt{\frac{\overline{C}^{*7}}{\overline{C}^{*7} + 25^7}} \right),$$

kde  $\overline{C}^*$  je aritmetický průměr sytosti předlohy  $C_0^*$  a vzorku  $C_1^*$ .

$$C' = \sqrt{a'^2 + b'^2}$$

$$h' = \arctan(b'/a')$$

#### 2. Výpočet $\Delta L'$ , $\Delta C'$ a $\Delta H'$

$$\Delta L' = L'_0 - L'_1$$

$$\Delta C' = C'_0 - C'_1$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_0 C'_1} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right),$$

kde  $\Delta h' = h'_0 - h'_1$ .

#### 3. Výpočet $\Delta E_{00}$

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L \cdot S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H \cdot S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C \cdot S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H \cdot S_H}\right)}, \quad (13)$$

$$\text{kde } S_L = 1 + \frac{0,15(\overline{L}'_{01} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L}'_{01} - 50)^2}},$$

$$S_C = 1 + 0,045\bar{C}',$$

$$S_H = 1 + 0,045\bar{C}' \cdot T,$$

$$\text{kde } T = 1 - 0,17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0,24 \cos(2\bar{h}') + 0,32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0,20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ),$$

a

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C,$$

$$\text{kde } \Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\frac{(\bar{h}' - 275^\circ)}{25}\right]^2\right\},$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}}. [14]$$

Rotační funkce  $R_T$  byla do rovnice přidána právě pro pokrytí interakce mezi rozdílem sytosti a rozdílem odstínu v modré oblasti.

## 2.4 Zařízení pro měření barevnosti

Obecně se zařízení pro měření barevnosti dělí na kolorimetry a spektrofotometry. Tyto zařízení zpravidla využívají podobné měřicí geometrie, jaké jsou uvedeny v kapitole 2.1.2, které mohou být různými výrobci modifikovány. Jejich hlavní rozdíl spočívá především v komplexnosti měření.

### 2.4.1 Kolorimetry

Jak bylo řečeno, barva ve skutečnosti představuje různé vlnové délky bílého světla. Kolorimetr vypočítává barvu měřením tří primárních složek světla, které vidíme jako červené, zelené a modré (RGB) a to tak, že světlo odražené od měřeného povrchu prochází přes filtry a dopadá na fotočlánky, čímž je napodobována reakce různých typů čípků lidského oka. Výsledkem jsou číselné souřadnice vyjadřující polohu v některém z barevných prostorů (nejčastěji CIE XYZ, CIE  $L^*a^*b^*$  a CIE  $L^*u^*v^*$ ). Většina kolorimetrů rovněž umožňuje uživateli zvolit jiný barevný prostor či způsob výpočtu barevné difference mezi dvěma vzorky.[1,13]

Vzhledem k tomu, že je u těchto zařízení používán pouze jeden konkrétní zdroj světla (nejčastěji standardní svítidlo D50, nebo D65) a že nejsou schopny měřit spektrální odrazivost, nedokáží kolorimetry, na rozdíl od spektrofotometrů, přesně rozpoznat metamerii. Poskytují pouze informaci, zda se při daném osvětlení barva obou vzorků jeví

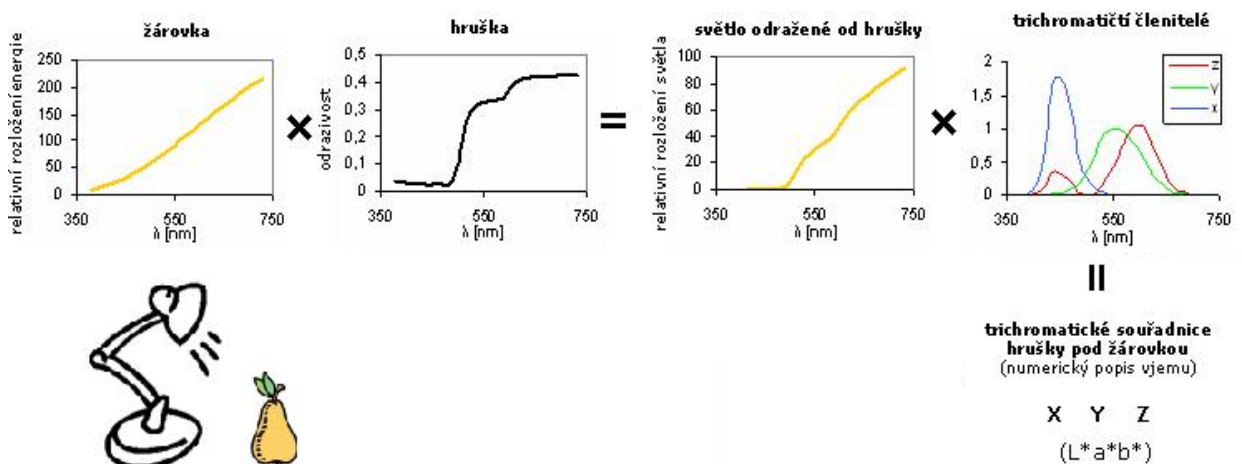
stejná. Nejsme ale schopni rozpoznat, jestli se jedná o metamerii závislou na osvětlení, nebo jestli mají oba vzorky stejnou spektrální charakteristiku (shodují se při jakémkoli zdroji světla).[1]

Hlavní výhodou kolorimetrů oproti spektrofotometrům je především jejich mnohem menší pořizovací cena. Tyto zařízení pak nacházejí své uplatnění hlavně ve výrobních a kontrolních aplikacích pro měření barevné diference a u měření vzorníků barev.[16]

Je nutno poznamenat, že na trhu existují i kolorimetry v podobě osamocených senzorů, které posílají do PC pouze příslušné barevné souřadnice. K takovýmto kolorimetrům pak může, ale i nemusí, být dodáván vyhodnocovací software a stejně tak mohou, nebo nemusí, být vybaveny vlastním zdrojem světla, popřípadě je možno tento zdroj vypnout.

#### 2.4.2 Spektrofotometry

Spektrofotometry se liší od kolorimetrů v tom, že měří odrazivost a absorpci (případně propustnost) pro různé vlnové délky viditelného spektra. Namísto 3 barevných filtrů používají systém tvořený optickou mřížkou, která rozkládá bílé světlo na jednotlivé spektrální barvy, a většinou také vícenásobným senzorem. Toto uspořádání dovoluje měřit intenzitu odraženého světla v úzkých intervalech vlnových délek obvykle 10 nm, což umožňuje sestavit remisní křivku daného povrchu (poměr intenzity světla dopadajícího na povrch a světla odraženého do senzoru pro různé vlnové délky). Mikroprocesor pak pomocí remisní křivky vypočítá trichromatické složky  $X$ ,  $Y$  a  $Z$  (viz Obr. 14). Výpočet odpovídá rovnici (1) (viz kapitola 2.2.2 CIE XYZ).[15]



Obr. 14 Schématický postup výpočtu trichromatických složek spektrofotometrem[15]

Hlavní nevýhoda spektrofotometrů spočívá především v jejich poměrně vysoké ceně, která koresponduje s tím, že tyto zařízení poskytují více kombinací světelných zdrojů a pozorovatelů, obsahují složitý optický systém a obvykle také mikroprocesor, který spektrální data zpracovává. Spektrofotometry tak nacházejí své uplatnění především v laboratořích a aplikacích výzkumu a vývoje, kde umožňují precizní analýzy a velmi přesnou správu barev.[16]

## II. PRAKTICKÁ ČÁST

### 3 POPIS DOSTUPNÝCH PROSTŘEDKŮ

Praktická část této práce se zaměřuje především na možnosti měření barevnosti a barevných diferencí průmyslově vyráběného plastového granulátu.

Vlastní návrh systému, který by umožňoval měřit a vyhodnocovat barevnost, vycházel v první řadě z dostupných senzorických zařízení, kterými byli:

- sonda pro měření barvy Atlas Scientific ENV-RGB,
- webkamera Microsoft LifeCam Studio.

#### 3.1 Sonda Atlas Scientific ENV-RGB

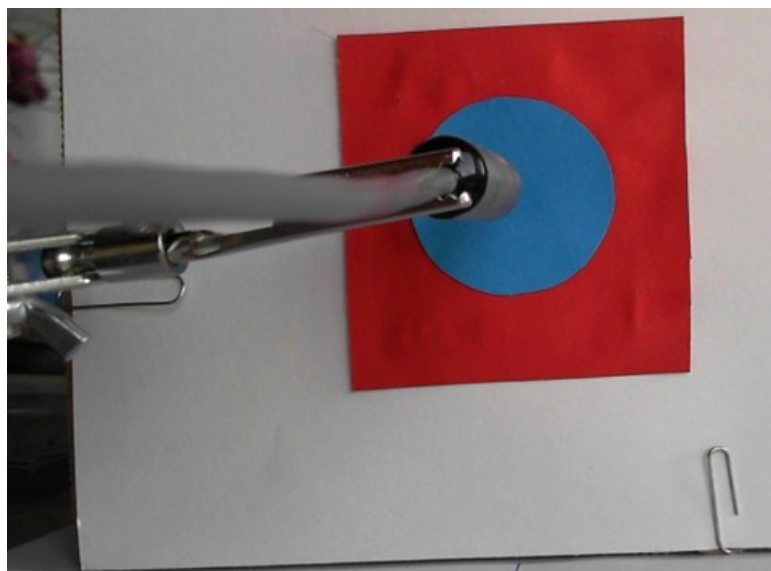
Sonda ENV-RGB se vyznačuje velmi vysokou odolností proti vnějším vlivům. Snímací čip, který vyhodnocuje barvu na základě intenzity světla procházejícího přes zelené, červené a modré filtry, je umístěn v pouzdře tvaru trubky z nerezové oceli, které odolá tlaku až 16 MPa. Sonda rovněž splňuje požadavky na krytí IP 68, což dovoluje i její trvalé ponoření do vody. Navíc odolává teplotám -40 až 85 °C.

Výstupem sondy jsou data v RGB formátu, kde každá hodnota je vyjádřena 8 bity (hodnoty 0 až 255). Ty jsou posílány přes sériové rozhraní TTL RS 232. Z toho důvodu však není možné připojit sondu přímo k PC, ale je třeba využít převodník na klasické RS 232 nebo USB rozhraní, který byl použit v našem případě.

Hlavním nedostatkem sondy však je, že výrobce neuvádí zorný úhel. Proto byl proveden jednoduchý pokus, jehož cílem bylo alespoň přibližně tento údaj určit. Podle výrobce je sonda určena primárně pro aplikace monitorování životního prostředí. Z tohoto důvodu jsme pokus prováděli za slunného dne blízko okna, kdy snímané povrchy tvořené barevnými papíry byly osvětlovány nepřímým denním světlem.

V rámci pokusu jsme z modrého papíru vystříhli kruh o průměru 4 cm a ten přilepili na červené pozadí. Sondu jsme upevnili do svorek připevněných ke stojánku tak, že sonda byla namířena kolmo do středu kruhu. Stojánek jsme pak kolmo posunovali po 1 cm od snímané plochy. Cílem bylo zachytit vzdálenost, při níž modrá barva začne přecházet ve fialovou. Pro záznam RGB hodnot jsme vytvořili jednoduchou měřicí aplikaci ve vizuální vývojové prostředí Agilent VEE Pro, které dovoluje programovat vytvářením intuitivních blokových schémat. Blokové schéma aplikace je možné si prohlédnout v příloze P I. V této měřicí aplikaci si po startu uživatel zadá název a umístění textového souboru, do kterého se

budou ukládat data. Následně je do sondy zaslán příkaz pro kontinuální zasilání hodnot, které jsou zaznamenávány do příslušného textového souboru a objektu „Logging AlphaNumeric“ na obrazovce. Pro orientační vizualizaci zaznamenané barvy byl použit web [colorspire.com](http://colorspire.com) zabývající se vizualizací barev v barevných prostorech RGB, HSV a HTML kódu.



*Obr. 15 Pokus pro stanovení snímacího úhlu sondy (foto pořízeno webkamerou LifeCam Studio)*




Jak je patrné z tabulky 1, již při vzdálenosti 1 cm má výsledná barva fialový nádech a při vzdalování přechází v růžovou. Při opakování pokusu bylo proto odstraněno červené pozadí a ponechán pouze modrý kruh na bílém pozadí. Z výsledků je patrné, že i přes odstranění červeného podnětu, přechází výsledná barva v růžovou, což signalizuje, že zaznamenané hodnoty značně neodpovídají realitě.

*Tab. 1 Výsledky pokusu pro zjištění snímacího úhlu*

Vzdálenost [cm]	S červeným pozadím		Bez červeného pozadí	
	<i>r, g, b</i> [-]	Vizualizace	<i>r, g, b</i> [-]	Vizualizace
1	116, 80, 89		116, 80, 88	
2	126, 72, 80		149, 92, 100	
3	150, 79, 86		178, 102, 108	
4	163, 85, 92		187, 104, 109	

Po těchto nepříliš uspokojivých výsledcích bylo nasnadě provedení testu, jak sonda snímá základní barvy. K tomu byly použity listy jasně červeného, zeleného a modrého papíru formátu A4 (modrá a červená odpovídala barvám na Obr. 15), kdy sonda byla vždy nasměrována kolmo do středu ve vzdálenosti 2 cm.

*Tab. 2 Výsledky testu měření základních barev*

Barva	$r, g, b$ [-]	Vizualizace
Červená	110, 41, 46	
Zelená	111, 74, 67	
Modrá	89, 75, 94	

Z výsledků je patrné, že u modré barvy zvětšením snímané plochy, došlo ke zlepšení. Také se tím potvrdilo, že tato sonda, na které není patrná žádná optika, nemá specifikovatelný zorný úhel, ale vyhodnocuje veškeré světlo dopadající na čip z poloprostoru. Dále je velmi zarážející vysoká hodnota  $r$ , která je u zelené barvy dokonce větší než  $g$ . Z těchto důvodů bylo rozhodnuto vyřadit sondu ENV-RGB z dalších návrhů a realizace systému pro měření barevnosti.

### 3.2 Webkamera Microsoft LifeCam Studio

Po neuspokojivých výsledcích sondy ENV-RGB se stala hlavním senzorickým zařízením při návrhu systému webkamera LifeCam Studio od společnosti Microsoft. Ta se i přes svůj primární účel užití vyznačuje zajímavými technickými parametry. Je vybavena skleněným objektivem a CMOS čipem o rozlišení 1920×1080, díky jemuž je schopna pořizovat video v kvalitě 720p HD rychlostí až 30 snímků za sekundu a jednotlivé snímky v kvalitě 1080p HD. Vysoké rozlišení však sebou přináší i jistý nedostatek v podobě vyšších hardwarových nároků.

*Tab. 3 Hardwarové požadavky na chod kamery*

Parametr	Minimální	Optimální pro video 720p HD
Procesor	Intel Dual-Core 1.6 GHz a vyšší	Intel Dual-Core 3.0 GHz a vyšší
Operační paměť	1 GB RAM	2 GB RAM
HDD	1,5 GB	1,5 GB

Kryt kamery má trubkovitý tvar o průměru 30 mm a délce 60 mm. Z přední části je kryt převážně hliníkový a ze zadní plastový. Kameru je možno provozovat při teplotě 0 až 40 °C a relativní vlhkosti 5 až 85 % bez kondenzace. Výrobce udává minimální vzdálenost pro zaostření je 10 cm. Při testech se však ukázalo, že kamera dokáže zaostřit i objekty vzdálené 8 cm. Diagonální zorný úhel kamery je 75°.



*Obr. 16 Webkamera Microsoft LifeCam Studio[20]*

## 4 STAVBA SYSTÉMU PRO MĚŘENÍ BAREVNÝCH SOUŘADNIC

Vedle kolorimetrů a spektrofotometrů se hlavně díky vysoké dostupnosti kamer stále více začíná uplatňovat měření barevnosti pomocí obrazové analýzy jimi pořízených záběrů. Kamera sice přímo neposkytuje souřadnice v některém z barevných prostorů, ale tato informace je obsažena v pixelech, ze kterých se skládá zaznamenaný obraz. Každý pixel tak má svoji barvu, která je vyjádřena souřadnicemi  $r$ ,  $g$  a  $b$  v našem případě v barevném prostoru sRGB. Aby bylo tedy možno tyto informace automatizovaně vyhodnocovat a zaznamenávat, bylo třeba sestavit vlastní měřicí aplikaci. Pro tvorbu této aplikace bylo vybráno programovací prostředí Matlab 2012b, který obsahuje velmi účinné nástroje pro zpracování a interpretaci obrazových informací.

Kromě samotné měřicí aplikace však bylo třeba i zajistit kvalitní podmínky pozorování a osvětlování. Tento důležitý faktor tak vyústil ve stavbu vlastního kompaktního hardwaru, jak bude uvedeno dále.

Celý systém tedy můžeme rozdělit na dvě části a to hardwarovou a softwarovou.

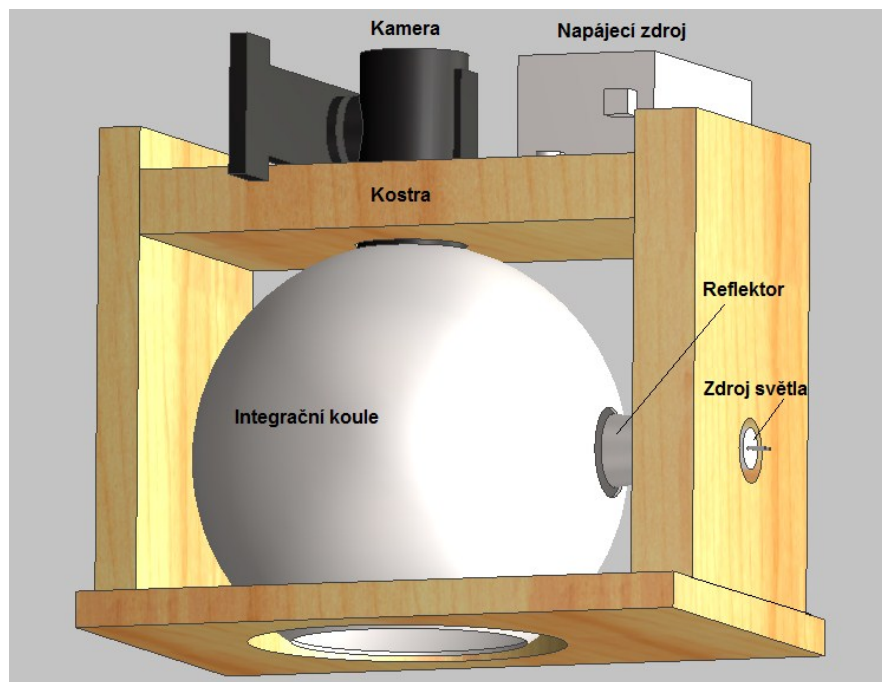
### 4.1 Hardwarová část

Návrh a stavba hardwarové části byla inspirována CIE doporučovanou měřicí geometrií d/0, u které je měřený povrch difúzně osvětlován v integrační kouli a následně vyhodnocován senzorem, v našem případě kamerou, umístěným v normále k povrchu. Hlavní výhodou této geometrie jsou její nepopiratelné výhody při měření nehomogenních lesklých povrchů, jako je plastový granulát. Difúzní osvit v integrační kouli zajišťuje rovnoměrné osvětlení měřeného povrchu, díky čemuž nejsou ve snímané scéně patrné žádné odlesky. Takového efektu bychom s geometrií 45/0 nebo 0/45 pravděpodobně nedosáhli.

Vzhledem k dostupným prostředkům pro realizaci nebylo možno splnit veškerá doporučení CIE a to hlavně doporučení týkajících rozbíhavosti paprsků světla. Z tohoto důvodu a s ohledem na složitější podmínky pro aretaci kamery nebyla využita geometrie d/8.

Při navrhování základního rozměru byla zohledněna možnost měření menšího objemu vzorků plastového granulátu a celková mobilita výsledné sestavy. Pro lepší představu, jak budou jednotlivé komponenty a celková sestava vypadat, byl po celou dobu navrhování a výběru komponent využíván software Autodesk Inventor (viz Obr. 17). Tento softwarový nástroj umožňuje vytvářet digitální prototypy, které poskytují konstruktérovi komplexní

náhled na celý návrh ještě před jeho realizací. Díky tomu je také snazší vyhnout se pozdějším rozměrovým kolizím při jeho následném fyzickém sestavování.



Obr. 17 Návrh hardwarové části v programu Autodesk Inventor

Celá hardwarová část systému při opomenutí PC s měřicí aplikací vytvořené v programovacím prostředí Matlab sestává z následujících částí:

- webkamery Microsoft LifeCam Studio,
- integrační koule,
- zdroje světla v podobě LED žárovky napájené z 12 V napájecího zdroje (trafa),
- reflektoru,
- a kostry z překližky.

#### 4.1.1 Integrační koule

Integrační koule je koule, která je uvnitř potažena vrstvou s vysokou difuzní odrazivostí. Ta zajišťuje rozptyl světla vstupujícího dovnitř tak, že je osvětlení ve všech bodech uvnitř koule jednotné. Integrační koule jsou využívány pro měření v mnoha oblastech optiky. Díky tomu je jejich nabídka na trhu široká. Hlavní nevýhodou je jejich vysoká pořizovací cena. Proto jsme postavili vlastní integrační koule.

K její tvorbě byla využita dvoudílná (skládá se ze dvou polokoulí) plastová průhledná koule o průměru 120 mm. Těsně nad úroveň spojnice obou polokoulí jsme vyvrtali otvor pro zdroj světla a do středu horní polokoule otvor pro kameru. U spodní polokoule jsme

úhlovou bruskou vyřízli otvor o průměru 65 mm, přes který je kamerou snímán měřený povrch. Koule měla být původně z 3 mm tlustého plechu. Tato koule měla již z výroby otvor o průměru 65 mm. Bohužel se ale nenašly technické prostředky, které by umožňovali tuto kouli bezpečně rozpúlit. U průměru otvoru jsme však zůstali. Jedná se o kompromis mezi co největší plochou snímanou kamerou a zachováním kulového tvaru.

U integračních koulí spektrofotometrů se většinou jako vnitřní krytí používá síran barnatý, který je v mnoha případech využíván i jako bílý pigment. V našem případě byla použita univerzální bílá matná barva na kovy, dřevo a plasty. Při aplikaci barvy na vnitřní povrch koule se pak ukázala výhoda její průhlednosti, které spočívala v možnosti kontrolovat kvalitu nátěru pohledem proti světlu. Z tohoto důvodu jsme nanesli celkem jedenáct nátěrů, přičemž poslední vrstva byla pro zvýšení difúzního účinku zdrsňena jemným smirkovým papírem tak, aby v žádném bodě vnitřního povrchu nebyli patrné odlesky světla.

Do koule bylo dále třeba přidat dvě clonky, které zabraňují tomu, aby světlo ze vstupního otvoru dopadalo přímo na snímáný povrch a přímo do objektivu kamery (viz Obr. 18). Clonky byly proto modelovány a upevněny na povrch koule do středu mezi osvětlovací a pozorovací otvor a mezi osvětlovací díru a díru pro snímáný povrch tak, aby při pohledu do osvětlovací skuliny z jakéhokoli úhlu nebylo vidět ostatní otvory a naopak. Stejně jako povrch i clonky jsme natřeli bílou barvou a zdrsňili smirkovým papírem.



*Obr. 18 Pohled do integrační koule*

#### 4.1.2 Zdroj světla

Pro navrhovaný systém by byl ideální standardní zdroj světla D50 nebo D65. Ten se ale bohužel pro naše potřeby nepodařilo obstarat. Na trhu dostupné standardní zdroje světla totiž mají zpravidla tvar trubice o rozměrech 60 až 120 cm a jejich cena je také několikanásobně větší než jiné běžně dostupné zdroje. Takto nabízené standardní zdroje v podstatě představují doplňkový sortiment ke světelným (kolorimetrickým) skříním pro vizuální hodnocení barevnosti.

Při výběru zdroje světla jsme se tedy zaměřili na index podání barev Ra (anglicky Color Rendering Index, zkratka CRI), který vyjadřuje, jak je daný zdroj světla schopen reprodukovat barvy osvětleného objektu ve srovnání se světlem referenčního ideálního zdroje. Dalšími hodnotícími faktory při výběru byla teplota chromatičnosti, světelný tok a rozměry. Ve výsledku byla vybrána LED žárovka s Ra 80, světelným tokem 120 lm, teplotou chromatičnosti 5000 K a rozměry 12 x 35 mm.

Použitím vztahu:

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (14)$$

kde  $E$  je intenzita osvětlení [lx],

$\Phi$  je světelný tok [lm],

$S$  je osvětlená plocha [m<sup>2</sup>], pro kouli  $S = 4\pi r^2$ ,

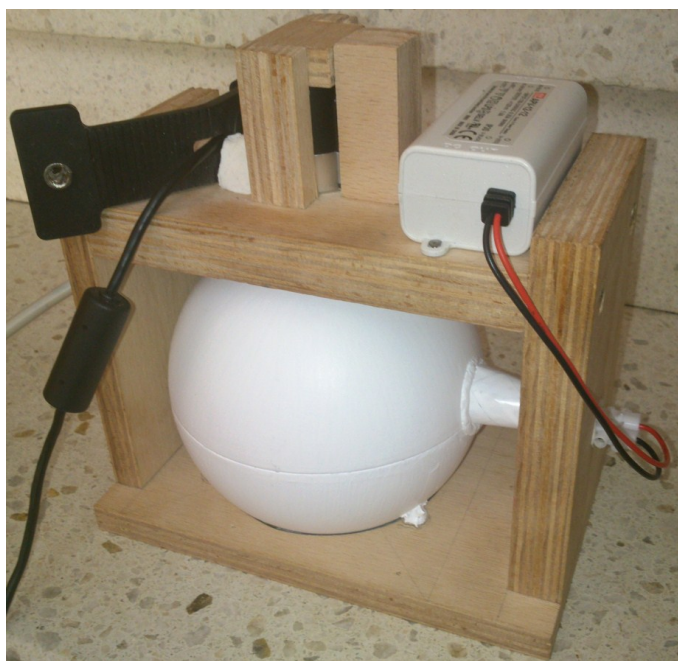
jsme přibližně určili intenzitu osvětlení na vnitřním povrchu integrační koule na 2840 lx. Tato hodnota podle CIE již spadá do osvětlení pro velmi náročné zrakové úkoly. V našem případě byla při výběru světelného toku limitující hlavně možnost nastavení expozice kamery. Ukázalo se, že světelný tok 120 lm není pro námi vybíraný zdroj světla ještě limitní, ale je při něm již třeba nastavit expozici na hodnotu -10, přičemž minimální hodnota je -13 (kamera umožňuje nastavit expozici v rozsahu -13 až 0).

Mezi další kladné stránky vybrané žárovky patří, že je vybavena LED čipem od společnosti CREE, předního výrobce LED. Žárovka je dále napájena bezpečným napětím 12V DC a to z napěťového zdroje (trafa). Tyto napěťové zdroje však bývají vybaveny jen krátkými vývody pro připojení svítidla a pro připojení k síti 230 V. Proto jsme pro zvýšení mobility ke zdroji připájeli další 2 m napájecího kabelu.

Jediným problémem, který se ale týká většiny dostupných žárovek, byl prostorový úhel svícení žárovky, který je  $300^\circ$ . Abychom mohli světlo usměrnit tak, abychom nemuseli žárovku umisťovat přímo do integrační koule, museli jsme vyrobit vlastní reflektor. Světelné reflektory se často vyrábí z leštěného hliníku, proto jsme pro výrobu našeho reflektoru použili jednostrannou lepicí pásku na bázi čistého hliníku, která se běžně využívá pro izolování a opravy rozvodů klimatizací a vzduchotechniky, a která odolává teplotě až  $120^\circ\text{C}$ . Tu jsme přilepili na tvrdý papír a stočili do vějíře, tak aby šel nasadit těsně za čelní průsvitnou část LED žárovky.

#### 4.1.3 Kostra

Aby veškeré komponenty tvořily kompaktní celek, bylo třeba navrhnout a postavit kostru, která by je držela pospolu. Pro stavbu kostry byly použity 4 desky z překližky o tloušťce 12 a 18 mm, které jsme nechali nařezat na zakázku. Do horní a pravé desky (viz Obr. 19) byly vyvrtány otvory pro žárovku a kameru. Kamera byla dále aretována pomocí klínek z překližky a polymerové modelovací hmoty, která tvrdne na vzduchu. Tato hmota byla také využita pro zajištění přesného lícování reflektoru a kamery v integrační kouli a upevnění žárovky v kostře. Při určování průměru spodního otvoru pak byl velmi nápomocný program Autodesk Inventor. Otvor byl realizován tak, že jsme jej nejprve po obvodu postupně odvrtali a následně zpilovali, aby koule doléhala na zem. Pro spojení desek samotných jsme na závěr použili 8 samořezných šroubů.



Obr. 19 Sestavená hardwarová část

## 4.2 Softwarová část

Pro potřeby měření byla v programovacím prostředí Matlab 2012b vytvořena vlastní měřicí aplikace, která komunikuje s kamerou LifeCam Studio přes USB rozhraní a která umožňuje vyhodnocovat, zobrazovat a zaznamenávat barevné souřadnice měřeného povrchu a jejich diference oproti souřadnicím zadané barvy.

### 4.2.1 Matlab

Matlab (z anglického matrix laboratory) je vysoce výkonný nástroj pro technické výpočty. Toto interaktivní skriptovací programové prostředí v současnosti představuje uznávaný standard v oblasti technických výpočtů, měření a simulací a to jak v rámci výzkumu a vzdělávání, tak i v průmyslu. Kromě velmi užitečných výpočetních a grafických nástrojů poskytuje svým uživatelům také rozsáhlou databázi specializovaných knihoven, tzv. toolboxů, kde díky otevřené architektuře systému lze přidávat i knihovny od jiných uživatelů, které lze dále libovolně využít při vlastní práci.

Nejdůležitějším prvkem výpočetního jádra Matlabu jsou algoritmy pro operace s maticemi reálných a komplexních čísel. Tato vlastnost pak představuje nespornou výhodu při práci s obrazovými daty. Kromě matic a jednodušších datových typů Matlab podporuje i složitější typy, jako jsou vícerozměrná pole reálných či komplexních čísel a pole buněk, kde každý prvek může být jiného typu.

Další silnou stránkou Matlabu jsou široké možnosti prezentace výsledků. Uživatel tak má možnost interpretovat výsledky pomocí různých grafů (2D grafy, 3D grafy, histogramy...), kde u každého takto vytvořenému objektu lze libovolně měnit jeho vzhled. Matlab dále poskytuje prostředky pro vytváření aktivních uživatelských rozhraní a to pomocí grafického systému nazvaného Handle Graphics, který umožňuje vytvářet ovládací prvky, jako jsou tlačítka, posuvníky atd.

Programovací jazyk Matlabu samozřejmě obsahuje i všechny příkazy, které jsou potřeba pro psaní programů, jako jsou podmínky, cykly a podobně. Díky tomu je uživatel schopen vytvářet i rozsáhlé aplikace, kde se vytvořené procedury a funkce ukládají do tzv. m-souborů a v případě potřeby je lze volat stejně jako vestavěné funkce, které jsou zpravidla uloženy právě v těchto souborech a rozděleny do jednotlivých knihoven. Knihovny a funkce se pak dále dají snadno přenášet mezi všemi podporovanými platformami - Windows, Linux, Solaris a Mac.

#### 4.2.1.1 Image Acquisition Toolbox

Tento toolbox poskytuje prostředky, které jsou určeny hlavně pro správu a získávání videa z kamer, které jsou připojeny k počítači. Podporováno je velké množství zařízení od levných síťových až po vysoce výkonné kamery s nadstandardními funkcemi. Funkce tohoto toolboxu tak umožňují, kromě získávání jednotlivých snímků z kamery a jejich ukládání do paměti, také nastavování vlastností kamer, což bylo velkým způsobem nápomocné při používání kamery jako zařízení pro měření barevnosti. Dále jsou popsány funkce z tohoto toolboxu, které byly využity ve vlastní měřicí aplikaci.

- **imaqtool** – jedna ze základních funkcí. Formou uživatelského rozhraní umožňuje vyzkoušet další funkce tohoto toolboxu. Uživatel si tak může jednoduše zvolit používanou kameru včetně jejího rozlišení a následně zobrazovat náhledy videa a pořizovat snímky. Pořízené snímky je možno uložit jako proměnnou, se kterou lze dále pracovat v pracovním prostředí Matlabu nebo uložit na HDD. Důležitým objektem v tomto rozhraní je objekt „Session Log“, ve kterém se interaktivně v návaznosti na kroky uživatele generuje kód, který je možno využít při vlastní práci.



Obr. 20 Rozhraní *imaqtool*

- **videoinput, getselectedsource** – funkce *videoinput* slouží k vytvoření video objektu, do kterého se ukládají jednotlivé snímky ze zadané kamery podle nastaveného formátu. Takto vytvořený objekt pak slouží jako vstupní parametr

dalším funkcím, které jsou s ním schopny pracovat. Jednou z nich je funkce *getselectedsource*, která na základě objektu vytvořeného funkcí *videoinput* vytvoří další objekt, s jehož pomocí je možno nastavovat vlastnosti kamery. V měřicí aplikaci je tento objekt využit k nastavování vlastností kamery, jako je expozice, jas, zaostření atd.

- ***start, stop, delete*** – funkce *start* zajistí, aby byly záběry z kamery přístupné v prostředí Matlab (ukládány do mezipaměti) tak, aby s nimi bylo možno pracovat pomocí další funkce – *trigger*. *Stop* pak zastavuje ukládání do paměti a *delete* smaže video objekt. Vstupním parametrem všech těchto funkcí je video objekt vytvořený funkcí *videoinput*.
- ***triggerconfig, trigger*** – funkce *triggerconfig* slouží k nastavení vlastností pořizování snímků, tedy zda bude video načítáno manuálně po každém volání funkce *trigger* s nastaveným počtem snímků, nebo automaticky po volání funkce *start*.
- ***getdata*** – tato funkce slouží k načtení obrazových dat, která byla zaznamenána funkcí *trigger*. Vstupním parametrem je opět video objekt. Každý snímek je pak uložen jako trojrozměrná matice.

#### 4.2.1.2 Re prezentace obrazových dat

Před samotným extrahováním barevných souřadnic z pořízených snímků je vhodné se seznámit s tím, jakým způsobem jsou jednotlivé pořízené snímky v Matlabu reprezentovány.

Každý snímek načtený například pomocí příkazu

$$Snimek = getdata (Kamera);$$

je reprezentován jako trojrozměrná matice  $Snimek(r, s, k)$ , která tvořena osmibitovými celočíselnými hodnotami (formát uint8), kde  $r$  a  $s$  je index řádku v obraze a  $k$  je index barevného kanálu. Obraz tak můžeme rozdělit na jednotlivé barevné kanály v podobě dvojrozměrných matic:

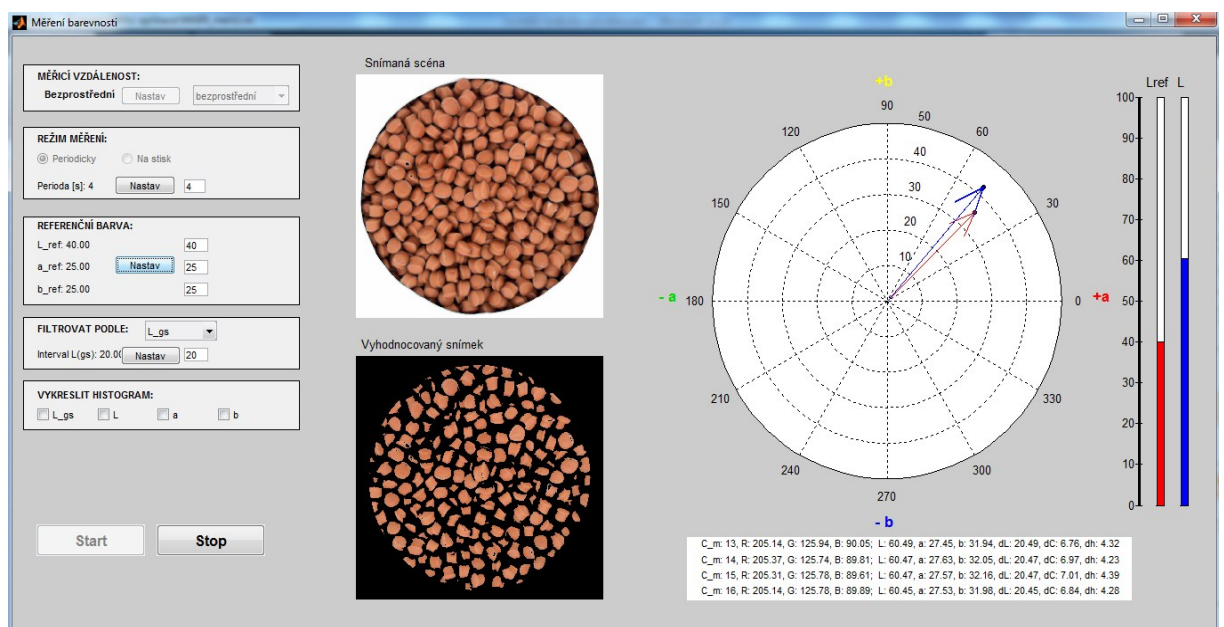
$$R = Snimek (:, :, 1);$$
$$G = Snimek (:, :, 2);$$
$$B = Snimek (:, :, 3);$$

s kterými lze dále pracovat. Znak : pak představuje všechny hodnoty daného indexu.

#### 4.2.2 Vlastní měřicí aplikace

Hlavním účelem sestavené měřicí aplikace je uplatnění vztahů pro převod souřadnic z barevného prostoru sRGB do prostoru CIE L\*a\*b\* a následné výpočty barevných diferencí oproti zadané poloze referenční barevnosti v prostoru CIE L\*a\*b\*. Veškerá data o barevných diferencích a o barevnosti jsou pak automaticky zaznamenávána do textového souboru tak, aby je bylo možno dále vyhodnocovat například v programu MS Excel. Kód programu je možné si prohlédnout na přiloženém CD.

##### 4.2.2.1 Uživatelské grafické rozhraní



Obr. 21 Uživatelské grafické rozhraní měřicí aplikace

Vzhledem k rozlehlosti celého programu byl pro snazší práci vytvořen přehledný uživatelský panel (viz Obr. 21), který byl koncipován tak, aby s ním byl schopen pracovat i běžný uživatel, jež nemá zkušenosti s programováním v prostředí Matlab. Toto grafického uživatelské rozhraní (dále jen „GUI“), je vytvořeno po spuštění souboru MAIN\_merici.m, který představuje hlavní soubor, jež je třeba spustit jako první. Po jeho spuštění dochází k inicializaci všech ovládacích prvků aplikace. Rozložení samotného GUI je znázorněno na obrázku výše. Všechny hodnoty, jako rozměry jednotlivých objektů a jejich poloha, jsou počítány relativně (normovaně) v závislosti na velikosti rozlišení obrazovky a jsou tak plně přizpůsobitelné rozměrům okna a rozlišení monitoru.

Funkce jednotlivých částí GUI jsou popsány níže:

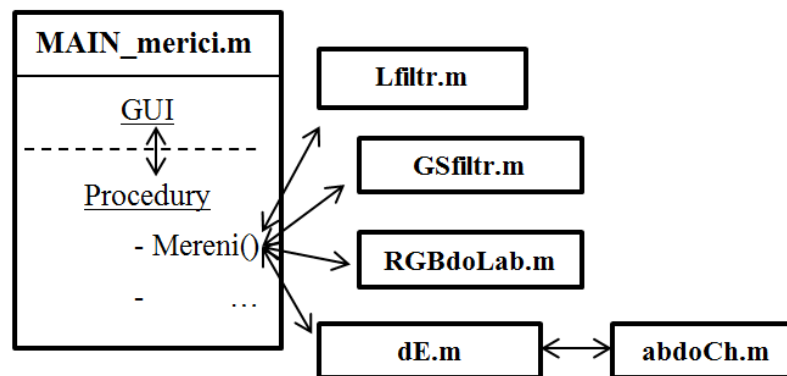
- **Měřicí vzdálenost** - V této oblasti si uživatel může nastavit, jestli bude měření probíhat z bezprostřední vzdálenosti, kdy je měřicí zařízení těsně nad či v kontaktu s měřenou plochou, nebo ze vzdálenosti 1,5 cm, což je přibližně mezera, která by musela být mezi měřicím zařízením a granulátem na výrobní lince, aby nedocházelo ke kolizím. Volbu je možno provést pouze před prvním spuštěním tlačítka „Start“ (po spuštění kamery není možno již měnit její vlastnosti). Od volby se odvíjí nastavení jasu kamery („Brightness“), který je při větší vzdálenosti třeba zvýšit, a poloměr vyhodnocované plochy, který je při větší vzdálenosti třeba snížit, abychom eliminovali méně osvětlené okraje.
- **Režim měření** - Zde uživatel volí, zda bude měření probíhat periodicky po nastaveném časovém intervalu, nebo při každém stisknutí tlačítka „Start“. Nelze měnit při běhu měření.
- **Referenční barva** - Umožňuje zadat referenční souřadnice v CIE  $L^*a^*b^*$ , od kterých se budou v tomto prostoru počítat barevné diference pro aktuálně měřený povrch.
- **Filtrovat podle** - V této části je možno nastavit, aby se z pořízeného snímku před jeho vyhodnocením vyfiltrovali nedostatečně a příliš osvětlené oblasti a to buď podle nejčastější hodnoty  $L^*$ , nebo  $L_{GS}$  (jas ze snímku v odstínech šedi). Tyto filtry vznikly jako snaha o snížení nejistoty měření způsobené pohybem granulátu mezi měřeními. Jejich podrobnější popis je uveden v kapitole 5.2.2 Dynamická scéna.
- **Vykreslit histogram** - Pro více informací o vyhodnocovaném snímku si uživatel smí vybrat, zda se bude vykreslovat i histogram odstínů šedi vyhodnocovaného snímku vycházející z prostoru sRGB a jednotlivých kanálů ze snímku přepočítaného do CIE  $L^*a^*b^*$ .
- **Start, Stop** – Tlačítko „Start“ spouští samotné měření, které podle nastavení probíhá periodicky nebo při každém stisku tohoto tlačítka, a inicializuje výběr umístění a názvu textového souboru (u režimu „Na stisk“ pouze při prvním stisku), do kterého se budou data ukládat. Po této inicializaci je do souboru vypsáno aktuální datum, čas a hlavička označující veličiny v jednotlivých sloupcích. Mezi zapisovaná data patří číslo měření, průměrné hodnoty  $r$ ,  $g$ ,  $b$  a  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  vycházející ze snímku v prostoru sRGB a CIE  $L^*a^*b^*$ , referenční souřadnice v CIE  $L^*a^*b^*$ , odchylka jasu  $\Delta L^*$ , odchylka sytosti  $\Delta C^*$ , výpočtová odchylka odstínu  $\Delta H^*$ , úhlová odchylka odstínu  $\Delta h^\circ$  a barevné diference  $\Delta E_{ab}$ ,  $\Delta E_{94}$ ,  $\Delta E_{00}$  a  $\Delta E_{CMC}$ , kde  $\Delta E_{CMC}$  je zaznamenávána dvakrát – jednou s koeficientem  $l = 1,4$  a po druhé s  $l = 2$ , což je hodnota nejčastěji používaná

v textilním průmyslu. Tlačítko „Stop“ pak ukončuje měření tak, aby bylo opět možno změnit režim a vybrat nový soubor pro ukládání.

- **Informace o aktuálním měření** – Uživatel je rovněž několika způsoby informován o aktuálním měření. V okně „Snímaná scéna“ se vykresluje snímek pořízený kamerou a v okně „Vyhodnocovaný snímek“ snímek, z kterého jsou vypočítávány souřadnice v sRGB a CIE L\*a\*b\* (černá oblast není zahrnuta do výpočtů). Do grafu vpravo se pak vykresluje referenční (červená) a aktuální (modrá) poloha v CIE L\*a\*b\*. V oblasti pod grafem se dále vypisuje číslo měření, barevné souřadnice a odchylky jasu, sytosti a odstínu z posledních 4 měření.

#### 4.2.2.2 Struktura programu

Kód celého programu je rozdělen do šesti m-souborů, které až na souboru MAIN\_merici.m pracují jako funkce. Strukturu celého programu je možno vidět na obrázku níže.



Obr. 22 Struktura měřicí aplikace

- **MAIN\_merici.m** – Hlavní soubor, který můžeme logicky rozdělit na dvě části – GUI a Procedure. Při spuštění souboru se tak nejprve inicializuje uživatelské rozhraní, vypočítá se logická maska, která umožňuje vybrat v obrazu kruhovou oblast, a nastaví se vlastnosti kamery. Veškeré automatické funkce kamery jako je zaostření, kompenzace protisvětla, vyvážení bílé a nastavení expozice jsou vypnuty, protože by zásadním způsobem ovlivňovali data z kamery.

Ovládací prvky pak volají jednotlivé procedury zajišťují běh celého programu. Nejdůležitější procedurou je „Mereni()“, která je volána buď periodicky časovačem, nebo při každém stisku „Start“. V této proceduře dochází k načtení snímku kamery, jeho vynásobení logickou maskou a ořezání. Následně může být snímek ještě filtrován pomocí funkcí Lfiltr.m nebo GSfiltr.m. Z upraveného snímku je pak vypočtena

průměrná hodnota každého kanálu ( $r$ ,  $g$ ,  $b$ ) a následně je funkcí RGBdoLab.m převeden do prostoru CIE  $L^*a^*b^*$ . U převedeného snímku je opět pro každý kanál ( $L^*, a^*, b^*$ ) vypočtena průměrná hodnota. Takto získané hodnoty jsou následně vstupním parametrem funkce dE.m, která vrací barevné difference oproti zadané referenční barevnosti. Procedura dále zajišťuje zápis dat do souboru a zobrazení informací o aktuálním měření.

- **RGBdoLab.m** – V této funkci jsme aplikovali vzorce pro převod barevných prostorů. Pro prostor sRGB se tak nejprve provede inverzní gamma korekce. Následně je pomocí převodní matice provedena konverze do prostoru CIE XYZ a na závěr převod do CIE  $L^*a^*b^*$ . Pro zvýšení rychlosti programu nejsou jednotlivé pixely procházeny v cyklech, ale je využito indexování matic prostředí Matlab. Při výpočtech je tedy snímek tvořený třemi kanály (maticemi) vždy převeden na jednu matici tvořenou třemi řádkovými vektory. Podmínky vycházející ze vzorců jsou realizovány pomocí logických vektorů, které umožňují určit pozici hodnot, které danou podmínku splňují či ne a realizovat tak výpočty pomocí pouhého násobení a sčítání vektorů bez nutnosti procházet je cykly.
- **dE.m** – Tato funkce zajišťuje výpočet barevných diferencí a odchylek mezi zadanou referenční barevností a aktuálně změřenou v prostoru CIE  $L^*a^*b^*$ . U výpočtů je problematické především správné určení úhlu odstínu  $h^\circ$ . To zajišťuje funkce abdoCh.m, která přepočítává souřadnice  $a^*$  a  $b^*$  na cylindrické souřadnice  $C^*$  a  $h^\circ$ . Pro určení souřadnice  $h^\circ$  jsme využili funkci Matlabu  $atan2d()$ , která pro I. a II. kvadrant vrací úhel 0 až  $180^\circ$  a pro III. a IV. kvadrant  $-180$  až  $0^\circ$  (v tomto případě stačí přičíst  $360^\circ$ ). Dále je třeba správně určit polaritu odstínové odchylky  $\Delta h^\circ$ . V případě, že je odchylka větší než  $180^\circ$ , je třeba odečíst  $360^\circ$  a pokud je menší než  $-180^\circ$ , je nutné přičíst  $360^\circ$ .

Správné určení odstínové odchylky je důležité pro výpočty v rámci barevné odchylky  $\Delta E_{00}$ , kde se počítá s průměrnými cylindrickými souřadnicemi. Pro průměrnou úhlovou odchylku však není možno použít klasický aritmetický průměr. Například  $(10^\circ + 350^\circ)/2 = 180^\circ$ . Správně ale průměrný úhel leží mezi těmito úhly tedy  $0^\circ$ . Ke správnému určení úhlu jsme tedy využili znalosti úhlové odchylky, z jejíž polarity vychází i směr. K referenčnímu úhlu odstínu tak pouze přičítáme polovinu odchylky a v případě, že výsledek překračuje úhel  $0^\circ$  či  $360^\circ$ , přičítáme či odečítáme  $360^\circ$ .

- **Lfiltr.m, GSfiltr** – Viz kapitola 5.5.2.

## 5 MĚŘENÍ

### 5.1 Popis vzorků a zaměření měření

Jak již bylo uvedeno, praktická část této práce se zaměřuje na měření barevnosti plastového granulátu, který je rovněž označován jako regranulát. Vyrábí se totiž tzv. regranulací. Při tomto recyklačním procesu jsou odpadní PP a LDPE, ale i jiné plasty, nejprve podrceny na nožovém mlýnu, proprány a vysušeny. Takto vzniklá drť se potom dávkuje do šnekového vytlačovacího stroje, kde přechází v taveninu, která je na výstupu z vytlačovacího stroje filtrována. Tavenina je následně obarvena a granulována na granulacím zařízení (tzv. "granulace do vody").

Z firmy zabývající se recyklací plastů výše uvedeným způsobem (budeme ji pracovně nazývat „ColorReplast“), nám byl zapůjčen vzorkovník vyhovujících a nevyhovujících barevností granulátu s barevným označením terakota a po jednom vzorku zeleného a modrého granulátu. Jedná se o nejčastěji vyráběné barvy. Terakotový vzorkovník je tvořen pěti vzorky granulátu. V jeho středu se nachází správná barva s laboratorně určenými hodnotami  $r, g, b$  153, 87, 61 a vedle ní po dvou vzorcích s tmavším a světlejším odstínem. U světlejších a tmavších vzorků byl vizuálně vždy jeden určen jako ještě přijatelný a jeden jako již nevyhovující. Objem jednotlivých vzorků byl přibližně 2 cl. Samotné granule, kterými jsou vzorky tvořeny, pak mají zhruba tvar malých válečků o přibližném průměru 5 mm a výšce 3 mm. Podstatná část granulí je rovněž různě tvarově deformována s možným výskytem malých prohlubní.

Cílem provedených měření je hlavně otestovat možnost automaticky detekovat již nevyhovující vzorky. Ve firmě ColorReplast je totiž správná barevnost při výrobě hodnocena pouze náhodnou vizuální kontrolou, což v řadě případů, z důvodu špatného nastavení množství barviva, vede k tvorbě většího objemu již barevně nevyhovujícího granulátu.

### 5.2 Testovací měření a pokusy o zvýšení přesnosti

Před samotným proměřováním jednotlivých vzorků byla provedena testovací měření, jejichž cílem bylo zvýšit celkovou přesnost. Pro tyto účely byl náhodně vybrán vzorek zeleného granulátu, který byl měřen z bezprostřední vzdálenosti.

### 5.2.1 Statická scéna

Pro lepší představu o spolehlivosti snímků pořízených kamerou, jako zdroje pro určení barevných souřadnic, bylo třeba zjistit nejistotu měření u statické scény. Tedy v situaci, kdy se granulát ani kamera jakýmkoli způsobem nepohybuje. Za tímto účelem bylo provedeno 50 měření po 2 sekundách a následně vypočítána směrodatná odchylka  $\sigma$  pro každou souřadnici v základním barevném prostoru sRGB a také prostoru CIE L\*a\*b\* podle vztahu:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (s - \bar{s})^2}, \quad (15)$$

kde  $n$  je počet měření,

$s$  je změřená souřadnice (veličina),

$\bar{s}$  je aritmetický průměr souboru změřených souřadnic.

Ze směrodatných odchylek souřadnic jsme pak dále spočítali polohovou směrodatnou odchylku pro každý barevný prostor, která odpovídá rovnici (8) pro výpočet barevné difference  $\Delta E_{ab}$  s tím rozdílem, že místo rozdílu pro každou souřadnici dosazujeme její směrodatnou odchylku. Rovnice má tedy tvar:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}, \quad (16)$$

kde  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  a  $\sigma_z$  jsou směrodatné odchylky jednotlivých souřadnic v daném barevném prostoru.

Tento postup určení nejistoty měření je pak aplikován i u dalších měření.

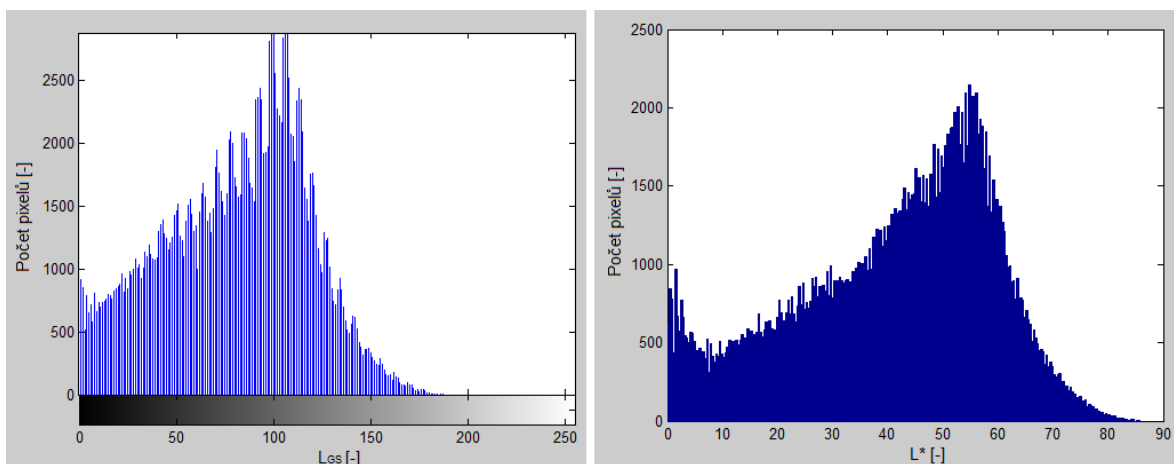
Výše zmíněným způsobem byla tedy určena pro statickou scénu polohová směrodatná odchylka v prostoru sRGB  $\sigma_p = 0,323$  a v prostoru CIE L\*a\*b\*  $\sigma_p = 0,263$ . Tyto odchylky se s největší pravděpodobností dají přičítat šumu v obraze způsobenému samotnou kamerou.

### 5.2.2 Dynamická scéna

Měření granulátu jako statické scény však není relevantní. Granulát se při zpracování ve výrobě neustále prolíná a i v případě kontaktního měření vzorků za účelem vytvoření například vlastního vzorníku je pravděpodobné, že daný objem vzorku bude mít pokaždé různé uspořádání jednotlivých granulí a prohlubní mezi nimi.

Proto bylo provedeno opět 50 měření s tím rozdílem, že mezi každým měřením byl granulát promíchán. Ze získaných hodnot jsme pak opět vypočítali polohovou směrodatnou odchylku. Ta pro prostor sRGB byla  $\sigma_p = 1,301$  a pro CIE L\*a\*b\*  $\sigma_p = 0,563$ . U sRGB se tedy odchylka přibližně zčtyřnásobila a u CIE L\*a\*b\* zdvojnásobila.

Nabízí se tedy otázka, jak zvýšení odchylky vlivem změny uspořádání granulátu minimalizovat. Při našem pokusu o snížení nejistoty jsme vycházeli z předpokladu, že většina granulí ve scéně je rovnoměrně osvětlena. Cílem pak bylo odfiltrovat veškeré oblasti, které byly osvětleny nedostatečně (prohlubně) a které byly přesvětleny. Abychom zjistili, jak je scéna osvětlena, vykreslili jsme si v Matlabu pomocí funkce *imhist* klasický histogram snímku vycházející z sRGB a pomocí funkce *hist* histogram pro souřadnici  $L^*$ .



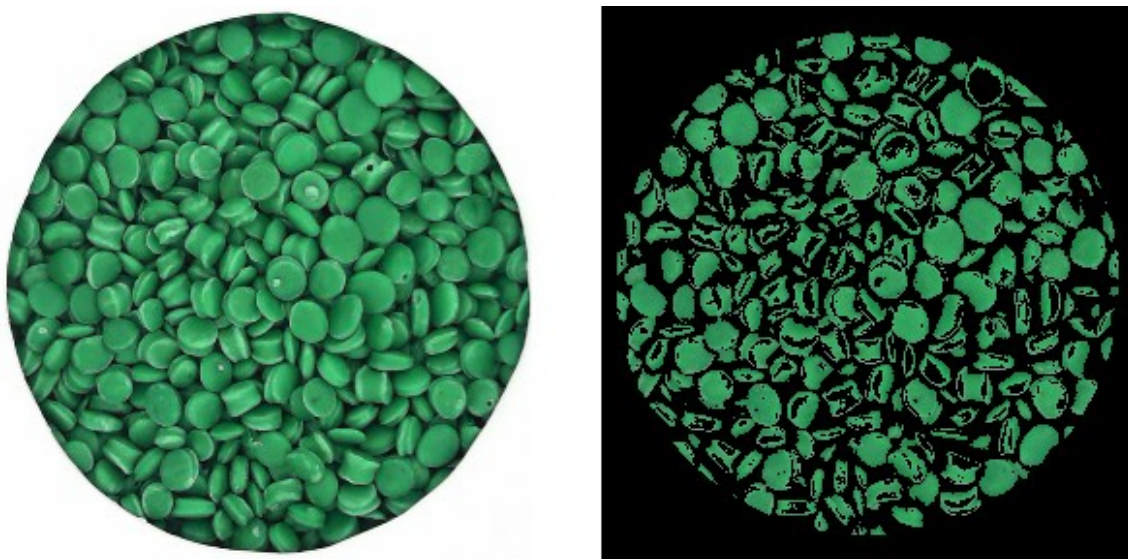
Obr. 23 Histogramy měřeného povrchu

V obou histogramech (viz Obr. 23) je patrné vždy jedno maximum, tedy nejvíce pixelů s určitou úrovní jasu. Jas u klasického histogramu jsme si pracovníčně označili jako  $L_{GS}$  (GrayScale). Abychom mohli scénu filtrovat podle těchto maxim, přidali jsme do měřicí aplikace 2 další funkce, jejichž výstupem je filtrovaný snímek, z něhož jsou pak určeny barevné souřadnice:

- **Lfiltr.m** – vstupním parametrem této funkce je pořízený snímek a zadaný interval  $L^*$  v jehož středu se nachází maximum. U vstupního snímku se pro každý pixel vypočítá hodnota  $L^*$  a následně se pomocí funkce Matlabu *mode* stanoví modus hodnot  $L^*$  zaokrouhlených na celá čísla. Tedy nejčastěji se vyskytující hodnota. K vstupnímu snímku je pak vypočítána logická maska, kde pixely s  $L^*$  nacházejícím se mimo zadaný interval, jehož střed je dán vypočteným modem, mají hodnotu 0 a pixely uvnitř 1. Vstupní snímek je na závěr vynásoben touto maskou.

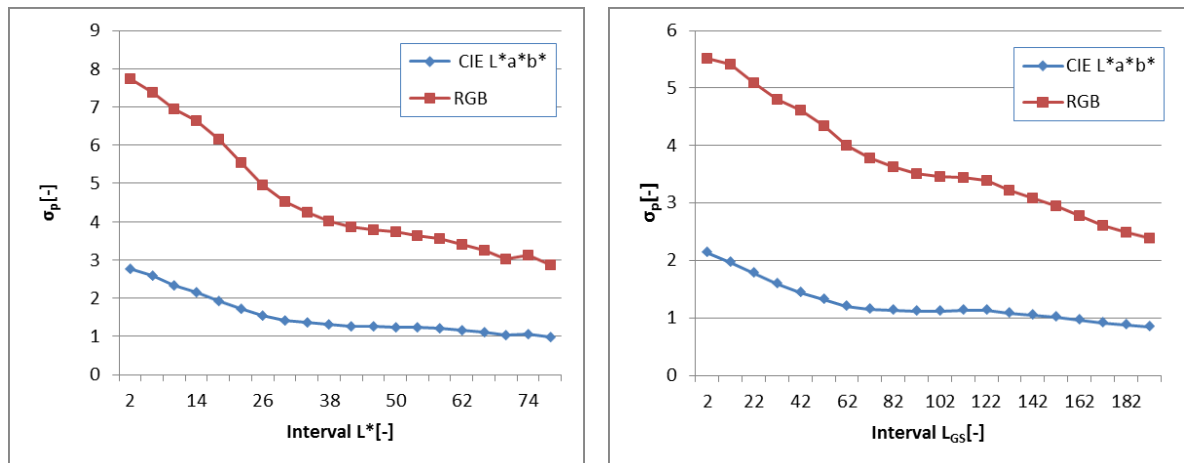
- **GSfiltr.m** – funguje na stejném principu jako Lfiltr.m jen s tím rozdílem, že modus se nevypočítává z  $L^*$  ale z  $L_{GS}$ . Hodnoty  $L_{GS}$  jsou získány převodem vstupního snímku do odstínu šedi prostřednictvím funkce Matlabu *rgb2gray* (každá hodnota je vyjádřena průměrem hodnot  $r$ ,  $g$ ,  $b$  vstupního snímku).

První vizuální výsledky těchto filtrování byly shodné a pozitivní. Jak je patrné na Obr. 24, došlo k odfiltrování všech prohlubní a bílých prolisů. Dále je možno vidět pozitivní účinky integrační koule v podobě minimálních odlesků.



Obr. 24 Snímek pořízený kamerou a jeho podoba po filtrování

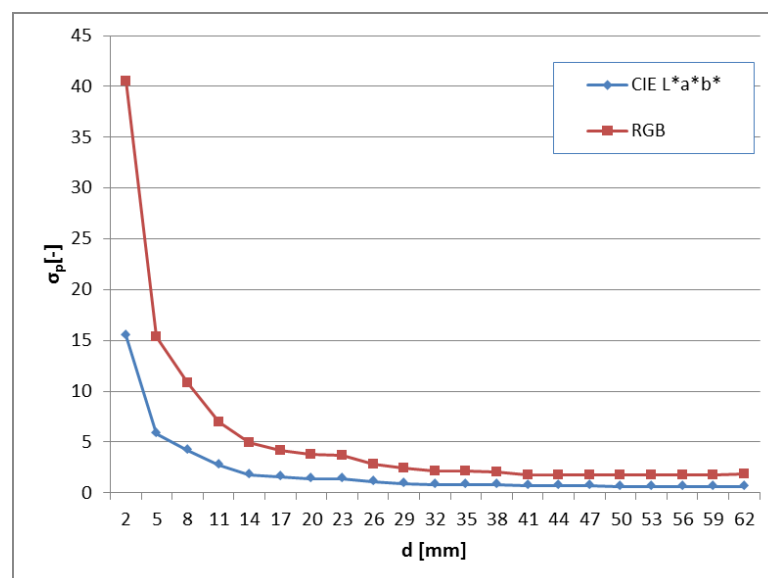
Dále jsme chtěli zjistit, která z metod a jaký interval bude nejúčinnější. Provedli jsme proto 45 měření, kdy mezi každým byl granulát promíchán. Každé měření bylo reprezentováno jedním snímkem, u kterého byly vyhodnoceny barevné souřadnice pro 20 různých intervalů filtrování podle  $L^*$  a  $L_{GS}$ . Pro každý interval pak byla ze 45 hodnot každé souřadnice stanovena polohová směrodatná odchylka pro oba prostory. Intervaly  $L^*$  jsme měnili po 4 (2, 6, 10, 14, ..., 78) a intervaly  $L_{GS}$  po 10 (2, 12, 22, 32, ..., 192). Větší interval znamená nižší úroveň filtrování.



Obr. 25 Polohové směrodatné odchylky pro různé úrovně filtrování podle  $L^*$  a  $L_{GS}$

Z výsledků na obrázku výše je zjevné, že filtrování směrodatnou odchylku nesnižuje, ale zvětšuje. Z tohoto důvodu jsme od filtrování tímto způsobem upustili.

Vzhledem k víceméně rovnoměrnému rozložení prohlubní a prolisů se tedy jeví jako nejvhodnější snímanou scénou nefiltrovat, zabírat co největší plochu a nejistotu měření minimalizovat pouze počtem měření. Na Obr. 26 pak lze vidět, jaký vliv má na prostorovou směrodatnou odchylku velikost snímané plochy. Tento graf byl získán obdobným postupem jako u vyhodnocování filtrování podle  $L^*$  a  $L_{GS}$  jen s tím rozdílem, že každý snímek reprezentující jedno měření nebyl vyhodnocován pro různé intervaly  $L^*$  a  $L_{GS}$ , ale pro různé průměry vyhodnocované kruhové plochy. Průměr jsme měnili po 24 px, které v našem případě představují přibližně 3 mm.



Obr. 26 Vliv průměru vyhodnocované plochy na prostorovou směrodatnou odchylku

### 5.3 Měření vzorkovníku vyhovujících a nevyhovujících barevností

Pro zhodnocení možností detekce nevyhovujících barevností jsme měření zaměřili na terakotový vzorník zapůjčený od společnosti ColorReplast. Každý z pěti vzorků jsme nasypali do Petriho misky a měřili 150 krát z bezprostřední vzdálenosti, tedy při nejlepších světelných podmínkách, a následně ze vzdálenosti 1,5 cm, která by byla potřebná pro umístění měřicího zařízení v provozu. Abychom simulovali prolínání granulí, byl příslušný vzorek vždy mezi měřeními promíchán.

K měření jsme využili výše popsany vlastní systém pro měření barevných souřadnic. Postup byl takový, že jsme nejprve pro danou vzdálenost změřili správný vzorek. Pro jednotlivé hodnoty souřadnic CIE  $L^*a^*b^*$  jsme spočítali průměr a ten stanovili jako referenční barevnost zadanou do měřicí aplikace. Pro zbylé 4 vzorky jsme tak kromě samotných souřadnic v sRGB a v CIE  $L^*a^*b^*$  získávali i hodnoty barevných diferencí  $\Delta E_{ab}$ ,  $\Delta E_{94}$ ,  $\Delta E_{00}$  a  $\Delta E_{CMC}$ , kde  $\Delta E_{CMC}$  je zaznamenávána dvakrát – jednou s koeficientem  $l = 1,4$  a po druhé s  $l = 2$ , odchylky jasu  $\Delta L^*$ , sytosti  $\Delta C^*$ , výpočtové odchylky odstínu  $\Delta H^*$  a úhlové odchylky odstínu  $\Delta h^\circ$ .

Při měření byly vypnuty všechny automatické funkce kamery. Její vlastnosti jsme nastavili na střední hodnoty. Pouze jas kamery („Brightness“), expozici („Exposure“), vyvážení bílé („White balance“) a zaostření („Focus“) jsme nastavili tak, aby získaná barevnost referenčního vzorku v sRGB co nejvíce odpovídala u něj přiložené hodnotě. Při zvýšení vzdálenosti měření na 1,5 cm musela být zvýšena hodnota jasu kamery, tak abychom se opět co nejvíce přiblížili přiložené hodnotě. Bez této úpravy byl snímáný obraz příliš tmavý.

#### 5.3.1 Vyhodnocení měření

Jak se ukázalo, jsou výsledky měření z obou vzdáleností velmi podobné. Proto jsou dále uvedeny pouze výsledky měření ze vzdálenosti 1,5 cm, které jsou pro možné využití systému v praxi směrodatnější. Výsledky měření z bezprostřední vzdálenosti je možno zhlédnout v příloze P III. Textové soubory s veškerými naměřenými daty se nacházejí na přiloženém CD.

Pro každou veličinu, získanou měřeními pomocí vlastního měřicího systému, byla vypočtena její průměrná hodnota, směrodatná odchylka  $\sigma$  (rovnice 15) a relativní směrodatná odchylka podle vzorce:

$$\delta = \frac{\sigma}{s} \cdot 100 [\%], \quad (17)$$

kde  $\bar{s}$  je průměrná změřená veličina.

U souřadnic v prostoru sRGB a CIE L\*a\*b\* jsme dále určili i polohovou směrodatnou odchylku podle rovnice 16. Ve výsledcích jsou uvedeny jen průměrné směrodatné odchylky  $\bar{\sigma}$ , průměrné polohové odchylky  $\bar{\sigma}_p$  a průměrné relativní směrodatné odchylky  $\bar{\delta}$  pro všech 5 vzorků, respektive pro 4 vzorky v případě barevných diferencí a odchylek. Hodnoty, z kterých byly vypočítány, je možné vidět v příloze P II.

Jednotlivé vzorky jsou označeny čísly 1 až 5, kde 1 je příliš světlý vzorek, 2 je světlý stále přijatelný vzorek, 3 je ideální referenční vzorek, 4 je tmavý stále přijatelný vzorek a 5 je příliš tmavý vzorek.

### Výsledky

Tab. 4 Získané souřadnice v prostoru sRGB a CIE L\*a\*b\*

Vzorek	r [-]	g [-]	b [-]	L* [-]	a* [-]	b* [-]
1	161.70	105.60	79.25	49.39	19.96	23.30
2	157.48	96.00	70.25	46.35	22.74	24.43
3	150.22	89.57	64.96	43.78	22.78	24.00
4	145.35	84.48	59.74	41.82	23.16	24.43
5	137.88	80.19	56.63	39.72	22.13	23.38
$\bar{\sigma}$ [-]	0.91	0.78	0.79	0.31	0.20	0.30
$\bar{\delta}$ [%]	0.61	0.85	1.20	0.70	0.92	1.26
$\bar{\sigma}_p$ [-]	1.44			0.48		

Tab. 5 Barevné diference v CIE L\*a\*b\*

Vzorek	$\Delta E_{ab}$ [-]	$\Delta E_{CMC1,4:1}$ [-]	$\Delta E_{CMC2:1}$ [-]	$\Delta E_{94}$ [-]	$\Delta E_{00}$ [-]
1	6.26	4.49	3.50	4.19	4.19
2	2.61	1.86	1.35	1.82	1.76
4	2.14	1.48	1.08	1.44	1.35
5	4.19	2.93	2.09	2.91	2.67
$\bar{\sigma}$ [-]	0.32	0.24	0.18	0.23	0.22
$\bar{\delta}$ [%]	9.21	9.69	10.03	9.61	9.62

Tab. 6 Odchylyky jasů, sytosti a odstínu v CIE L\*a\*b\*

Vzorek	$\Delta L^*$ [-]	$\Delta C^*$ [-]	$\Delta H^*$ [-]	$\Delta h^\circ$ [°]
1	5.58	-2.40	1.63	2.94
2	2.54	0.39	0.33	0.57
4	-1.99	0.69	0.02	0.04
5	-4.09	-0.80	0.05	0.08
$\bar{\sigma}$ [-]	0.31	0.25	0.21	0.45
$\bar{\delta}$ [%]	8.09	29.43	489.23	396.73

### 5.3.2 Diskuze výsledků

Barevný prostor CIE L\*a\*b\* je v současnosti nejčastěji využívaný prostor pro měření barevnosti a vyhodnocování barevných diferencí. Tento prostor byl navržen tak, aby změny polohy v něm co nejvíce odpovídali vizuálně vnímaným změnám. Při našem měření jsme však omezeni tím, jak "vidí" barvy kamera, přičemž kamera samotná má 5 možných parametrů nastavení, kde každý zásadním způsobem ovlivňuje výstupní obrazová data. Samotná data z kamery jsou také pravděpodobně ovlivněna její teplotou. Přibližně po 10 minutách provozu dochází k razantním změnám, kdy souřadnice  $r$ ,  $g$  a  $b$  rychle klesají přibližně o 9 jednotek. Kameru je tedy třeba nechat před každým měřením běžet v jiném programu tak, aby si udržovala určitou provozní teplotu. Dá se tedy spekulovat, jaký vliv má na měření délka provozu kamery a okolní teplota prostředí. Při oddálení měřené plochy, je navíc třeba kameru přenastavit. Intenzita osvětlení zpravidla klesá s druhou mocninou vzdálenosti a snímaný obraz by byl příliš tmavý. Bylo tedy třeba přidat v nastavení kamery jas.

V podniku vyrábějícím granulát je v současnosti barva vyhodnocována pouze subjektivně pracovníky. Stejně tak i dodané vzorky byly vyhodnoceny subjektivně. V CIE L\*a\*b\* pak vidíme, jak se barvy zaznamenané kamerou jeví právě z pohledu člověka. Zde je zajímavé, že u ještě přijatelných vzorků není patrný úbytek v sytosti, jak je tomu u již nevyhovujících vzorků. Podle hodnoty  $L^*$  jsme pak schopni přesně říct, jestli je vzorek světlejší nebo tmavší. Obdobné byly i změny u hodnot získaných měřeními kartového vzorníku fasádních barev s mnohem většími barevnými rozdíly. Konkrétně šlo o vzorník zelené a hnědé barvy, kde pro každou barvu bylo změřeno 5 vzorků od tmavé po světlou. Výsledky těchto měření

je možné si prohlédnout v souborech .xml v adresáři „Vzorník fasádních barev“ na přiloženém CD.

Barevné difference jsme pak schopni při zahrnutí měření z bezprostřední vzdálenosti určit s průměrnou nejistotou pro všechny typy  $\pm 0,29$  a průměrnou relativní nejistotou 13,28 %. Zjištěné barevné difference subjektivně odpovídají realitě, kdy hodnota pouze postřehnutelná difference (z anglického „just noticeable difference“) je nejčastěji uváděna kolem  $\Delta E_{ab} = 2$ . Difference  $\Delta E_{CMC2:1}$  s koeficientem  $l = 2$ , používaná hlavně v oděvním průmyslu, se v porovnání s  $\Delta E_{94}$ ,  $\Delta E_{CMC1,4:1}$  a  $\Delta E_{00}$  zdá být pro naši situaci méně přesná. Hodnoty ostatních diferencí se pak až na  $\Delta E_{ab}$  velmi podobají. Rozdíl u  $\Delta E_{ab}$  je způsoben tím, že kolem bodu v prostoru CIE L\*a\*b\* vytváří toleranční kouli, zatímco ostatní typy generují toleranční elipsoidy s hlavní osou víceméně rovnoběžnou s osou L\*. Díky tomu jsou méně citlivé na změny jasu. Z výsledků dále vyplývá, že nejsme z vizuálního hlediska schopni říci, která z barevných diferencí je lepší. Všechny jsou obecně uznávané a užívané a ani odborníci se nemohou shodnout, která nejlépe odpovídá člověkem vnímaným diferencím.

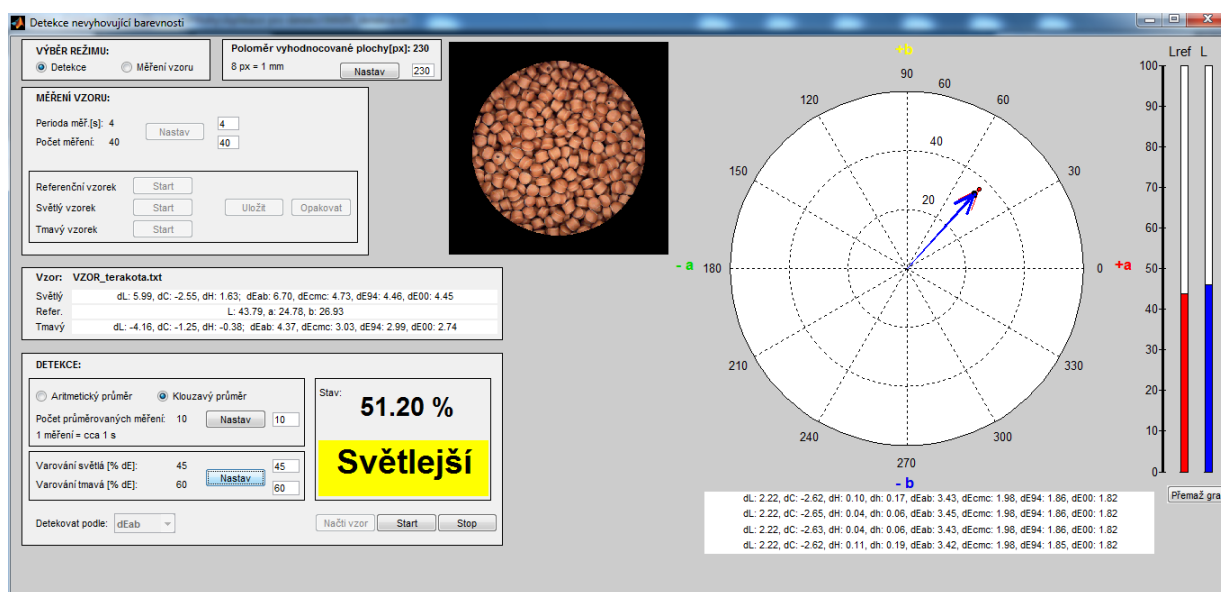
Porovnáním polohové směrodatné odchylky v CIE L\*a\*b\* se směrodatnou odchylkou průměrné hodnoty  $\Delta E_{ab}$  se dále jeví přesnější průměrování barevných diferencí získaných z jednotlivých měření namísto výpočtu z průměrných souřadnic.

## 6 APLIKACE PRO DETEKCI NEVYHOVUJÍCÍCH VZORKŮ

Na základě výše uvedených měření a známých potřeb ve výrobě granulátu byla v programovacím prostředí Matlab navržena a sestavena aplikace pro detekci barevně nevyhovujících vzorků. Celý program vychází z výše popsané měřicí aplikace. Rovněž struktura je velmi podobná. Nejsou již jen využívány funkce pro filtrování `Lfiltr.m` a `GSfiltr.m` a z funkce `dE.m` byl odebrán výpočet barevné difference  $\Delta E_{CMC2:1}$ . Nejzásadnější rozdíl pak spočívá v hlavním souboru (skriptu), který jsme označili jako `MAIN_detekce.m`. Tento skript je možné zhlédnout, vzhledem k jeho rozlehlosti (1200 řádků), na příloženém CD.

Pro tuto aplikaci jsme, stejně jako u měřicí, vytvořili přehledné grafické uživatelské rozhraní (viz Obr. 27). V další části se tedy zaměříme na popis tohoto uživatelského panelu a z něj vycházející funkčnosti celého programu.

### 6.1 Popis aplikace



Obr. 27 Aplikace pro detekci barevně nevyhovujících vzorků

Celá aplikace pracuje ve dvou základních funkčních režimech, kterými jsou „Měření vzoru“ a samotná „Detekce“ na základě změřeného vzoru. Společnou oblastí je, obdobně jako u měřicí aplikace, okno pro vykreslení aktuálního vyhodnocovaného snímku a graf s textovým polem pod ním pro zobrazování informací o aktuálním měření a referenční barevnosti. Oblast „Vzor“ poskytuje informace o právě měřeném vzoru, či vzoru vybraném

pro detekci. Aplikace navíc poskytuje možnost nastavit poloměr vyhodnocované kruhové plochy, který by s ohledem na výsledky v Obr. 26 neměl být menší než 20 mm (160 px).

### 6.1.1 Režim měření vzoru

Tento režim slouží k naměření vzoru, který je tvořen barevnými souřadnicemi referenčního vzorku (ideální barevnost) v CIE  $L^*a^*b^*$  a barevnými diferencemi a odchylkami již nevyhovujícího světlého a tmavého vzorku. Uživatel si dále volí, z kolika měření budou aritmetickým průměrem tyto hodnoty pro jednotlivé vzorky vypočteny a po jaké časové periodě budou tato měření realizována. Měření vzorků pak probíhá postupně od referenčního po tmavý. Při prvním stisku tlačítka „Start“ je uživatel vyzván k výběru umístění a názvu vzoru. Po provedení měření každého vzorku je možné výsledky automaticky uložit do zadaného textového souboru nebo měření opakovat.

### 6.1.2 Režim detekce

Režim detekce slouží k automatickému odhalování již nevyhovujících vzorků. Detekce probíhá na základě vybraného typu barevné difference. Vzhledem k tomu, že se velikost difference ke světlému a tmavému vzorku může lišit a odchylky jsou v provozu vyhodnocovány pouze vizuálně, má uživatel příležitost zvolit si, při jakém poměru aktuální barevné difference k diferencii příliš světlého či tmavého vzorku ze vzoru je aktivováno varování, že je aktuálně vyhodnocovaný vzorek již příliš světlý, či tmavý. Tento poměr je vyjadřován v procentech relativně k barevné diferencii světlého, či tmavého vzorku ze vzoru a to podle aktuální hodnoty  $\Delta L^*$ . Aktuální barevná difference a hodnota  $\Delta L^*$  je vypočítávána z periodicky získávaných hodnot  $L^*, a^*, b^*$  a referenčních hodnot  $L^*, a^*, b^*$  ze vzoru. V případě, že poměr diferencí dosáhne procenta zadaného uživatelem, přechází stav do žluté barvy s nápisem „Světlejší“, nebo „Tmavší“. Při překročení 100 % má stav barvu červenou. V obou případech jsou pak naměřené barevné difference a odchylky jasu, sytosti a odstínu ukládány s aktuálním časem do textového logu, jehož umístění a název je zadáván při startu detekce.

Abychom minimalizovali náhodnou chybu, je hodnota barevné difference porovnávána s hodnotou ve vzoru a hodnota  $\Delta L^*$  vypočtena jako průměr hodnot získaných ze zadaného počtu měření. Statisticky je vhodné, aby byl počet průměrovaných hodnot alespoň 20 až 30, což odpovídá 20 až 30 měřením, kde v našem případě 1 měření trvá přibližně 1 s (rychlost je ovlivněna především výkonem PC). To v praxi nepředstavuje žádný problém.

Při výrobě granulátu se totiž změna barevnosti po nesprávném nastavení dávkování barviva projevuje velmi pozvolna – trvá přibližně 10 minut, než je granulát již označen jako nevyhovující. Diference tedy stačí vyhodnocovat i každé 2 minuty. Pro rychlejší postihnutí změny, případně pro možnost průměrování více hodnot, lze krom klasického aritmetického průměru zvolit i klouzavý průměr. V tomto případě při zadání počtu průměrovaných měření např. 30 není diference vyhodnocována každých 30 s, ale každou 1 s z posledních 30 měření. Klouzavý průměr jsme v našem případě realizovali jako posuvný registr tvořený maticí, jejíž velikost (počet řádků) je dána zadaným počtem průměrovaných měření. Hodnoty získané z každého nového měření se ukládají jako vektor na poslední řádek matice (konec registru), přičemž nejstarší měření na začátku (prvním řádku) je posunem odstraněno. Po každém měření je pak vypočten průměr jednotlivých sloupců v matici – každý sloupec představuje jednu veličinu ( $\Delta L^*$ ,  $\Delta E_{ab}$ ,  $\Delta E_{94}$ , ...).

## 6.2 Zhodnocení mezí detekce

Hlavní podmínkou pro úspěšné použití námi navrženého systému pro detekci barevně nevyhovujících vzorků jsou především stejné podmínky, při kterých probíhá měření. Pokud opomeneme vliv teploty kamery, jde především o konstantní vzdálenost měřeného povrchu a od něj se odvíjející konstantní nastavení kamery. U měření z bezprostřední vzdálenosti a ze vzdálenosti 1,5 cm byl při stejném nastavení kamery patrný velký rozdíl již v zaznamenávaném obrazu – byl tmavší, což vedlo k poklesu hodnot  $r$ ,  $g$  a  $b$ . Abychom se přiblížili původním hodnotám, bylo nutné zvýšit jas kamery. I tak jsme ale úplně stejných hodnot nedosáhli (byla vyzkoušena i jiná kombinace nastavení expozice a jasu, největší přiblížení ale přineslo pouhé zvýšení jasu při stejné expozici).

Dalším omezením jsou velikosti samotných barevných diferencí příliš světlých a tmavých vzorků uložených ve vzoru. U většiny dnešních zařízení pro měření barevnosti se pro vyjádření spolehlivosti a detekčních mezí využívají hodnoty barevné difference  $\Delta E_{ab}$ . Při určování procentuálního podílu aktuální barevné difference vůči diferenci ze vzoru je nutno zohlednit to, že poloha referenční barevnosti v CIE  $L^*a^*b^*$  je určena s polohovou směrodatnou odchylkou přibližně  $\pm 0,5$  a barevná difference se směrodatnou odchylkou přibližně  $\pm 0,3$ . S malou rezervou jsme tedy schopni spolehlivě detekovat barevnou diferencí  $\Delta E_{ab} \geq 1$ . Proto je vhodné nastavovat procentuální podíl tak, aby odpovídal barevné diferencii alespoň 1 a více. Jako nejlepší pro detekci se pak jeví právě difference

$\Delta E_{ab}$ , která je více citlivá na změnu hodnoty jasu  $\Delta L^*$  a tudíž je větší než ostatní barevné difference.

Omezujícím faktorem pak může být i samotné nastavení kamery. O námi měřených vzorcích lze subjektivně říci, že byly spíše tmavší. Nastavení expozice a jasu kamery, které nejlépe vizuálně odpovídá daným vzorkům, však není vhodné pro povrchy s jasnými křiklavými barvami. Například žlutá barva výrazným způsobem ztrácí na barevnosti a přechází v bílou.

### 6.3 Měření ve výrobním provozu

I přesto, že námi používaná webová kamera není ideální nástroj pro měření v průmyslovém prostředí, chtěli jsme výše uvedenou aplikaci pro detekci nevyhovujících barevností, společně se zbytkem měřicího systému, otestovat přímo ve výrobním provozu ve společnosti ColorReplast.

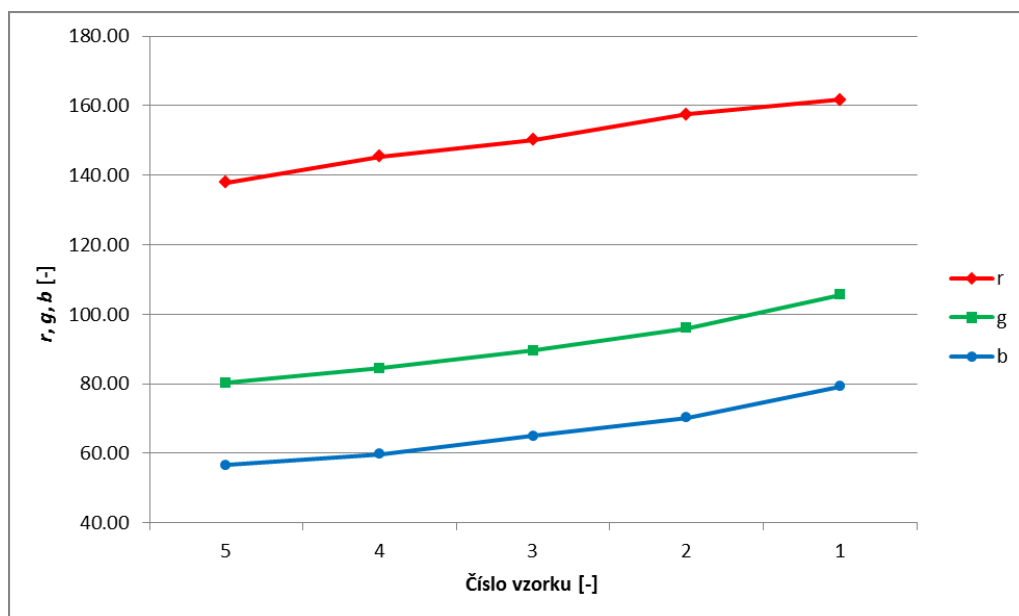
V tomto reálném provozu se však vyskytuje celá řada dalších faktorů, které významným způsobem ovlivňují měření a znesnadňují tak detekci. Prvním problémem, který jsme museli pro provedení testu vyřešit, byla vysoká vlhkost měřeného granulátu. V posledním kroku jeho výroby totiž malé kousky taveniny, ze které sestává, odpadávají do vody, kde se ochlazují, aby vytvořili výsledný produkt. Granulát, který pak jede po výrobní lince, tak má v místech, kde je třeba provádět měření, stále dosti vysokou teplotu a vlhkost, což je příčinou odpařování vody a orosení objektivu kamery.



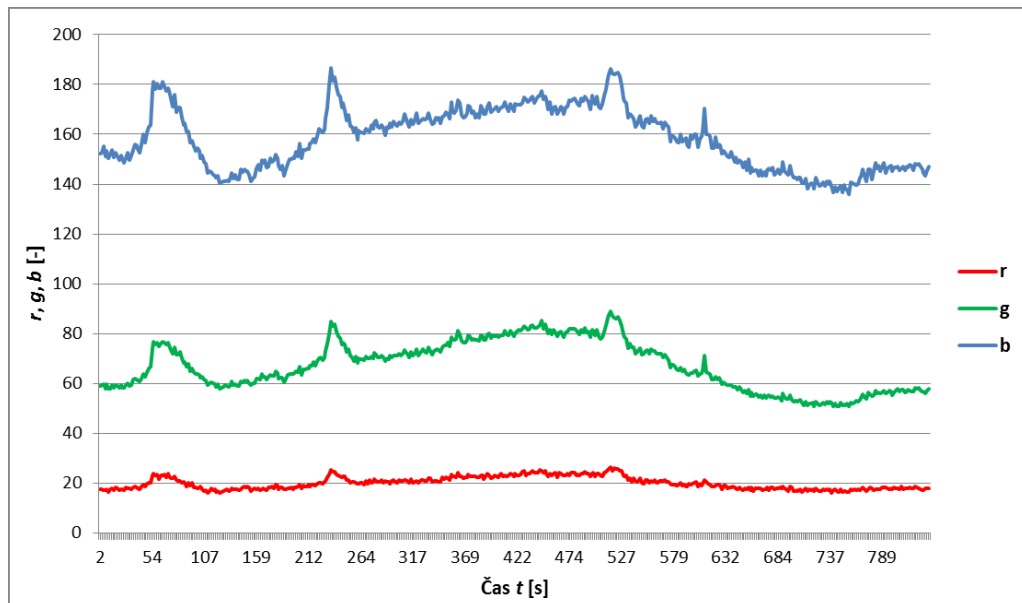
Obr. 28 Upravená hardwarová část v provozu

Abychom orosení předešli, bylo třeba do hardwarové části systému přidat další prvek. Jedná se o ventilátor primárně určený pro chlazení PC procesoru, který přes vějířovou redukci s úzkým výstupem upevněným v malém otvoru integrační koule do ní vhání vzduch, čímž vytlačuje vlhkost a zabraňuje orosení. Výsledné řešení je možno vidět na obrázku výše.

V době měření se na lince vyráběl granulát modré barvy. Zamýšleným postupem testování bylo změřit vzor, kdy by se nejprve změnil referenční vzorek, následně světlý vzorek při sníženém dávkování barviva a nakonec tmavý vzorek při zvýšeném dávkování barviva a poté bychom sledovali chování detekce v praxi. Při testovacích měření jsme však zjistili, že vlivy specifické pro tento provoz ovlivňují měření natolik, že detekovatelné změny barevnosti zanikají v nepředvídatelných změnách viditelných hlavně na hodnotách  $r$ ,  $g$ ,  $b$  z kamery. Proto jsme na lince nechali pouze postupně změnit dávkování barviva, tak aby se barevnost měřeného granulátu měnila z příliš tmavé na příliš světlou, a spustili periodické měření po 1,75 s. Na následujících obrázcích je vidět, jaký je žádaný trend vývoje hodnot  $r$ ,  $g$ ,  $b$  od tmavého vzorku po světlý změřený u terakotového vzorníku v laboratorních podmínkách a jaký byl trend při měření na výrobní lince.



Obr. 29 Trend hodnot  $r$ ,  $g$ ,  $b$  u terakotového vzorníku (příliš tmavý až příliš světlý vzorek)



*Obr. 30 Vývoj hodnot  $r$ ,  $g$ ,  $b$  u modrého granulátu (příliš tmavý až příliš světlý) při měření v provozu*

Asi nejvýznamnějším faktorem, který zkresloval měření, byly vysoké změny výšky granulátu a celkové struktury jeho povrchu. V době měření se výrobní linka potýkala s problémy, kdy granulát nestíhal dostatečně rychle chladnout. Díky tomu vytvářel shluky, které způsobovaly prudké změny výšky a struktury jeho „hladiny“ (přibližně  $\pm 10$  mm). Dalším podstatným faktorem je dozajista i vysoká teplota v blízkosti granulátu a její možné změny, které také pravděpodobně ovlivňují výstupní data z kamery. Již samotný teplý vlhký vzduch není vhodným prostředím pro kameru určenou pro domácí použití. V našem případě navíc ve výrobní hale docházelo k průvanu, který patrně způsoboval i výkyvy jeho proudění.

Po ukončení měření a vypnutí ventilátoru jsme dále zaznamenali zajímavý poznatek. Přestože nebyl z integrační koule vytlačován vzduch ventilátorem, nedocházelo již k orosení objektivu. Celá konstrukce se totiž během měření ohřála nad rosný bod.

## 7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A DOPORUČENÍ S OHLEDEM NA SPECIFIKA VÝROBNÍHO PROVOZU

### 7.1 Diskuze jiných řešení

Měření barevnosti je jedním z nejsložitějších oblastí optiky a vyžaduje tak kvalitní vybavení. Jako ideální řešení pro firmu ColorReplast se může zdát pořízení bezkontaktních spektrofotometrů či kolorimetrů pro průmyslové aplikace. Takové východisko je však pro společnost finančně nereálné. Většina těchto zařízení navíc snímá kruhovou plochu přibližně do průměru 20 až 30 mm, zatímco z našich testovacích měření s ohledem na prostorovou směrodatnou odchylku způsobenou prolináním granulátu vyplývá, že snímaná plocha by měla mít průměr alespoň 40 mm. Dalším omezujícím faktorem je velká proměnlivost vzdálenosti snímané plochy. U převážné části nabízených měřicích zařízení se tolerance (pokud je vůbec uvedena) pohybuje kolem  $\pm 2$  mm, zatímco v námi zkoumaném provozu dochází k výchytkám až přibližně  $\pm 10$  mm. Většina těchto zařízení by pravděpodobně nepřinesla ani žádané absolutní měření barev, které by bylo nezávislé na podmínkách, kde by hodnoty naměřené v provozu odpovídaly měřením v laboratorních podmínkách. Podle společnosti ColorLite [25] je totiž barevnost povrchu teplotně závislá, kdy teplotní rozdíl 10 °C může vést k barevné diferencii až  $\Delta E_{ab} = 0,7$ . Navíc by u těchto zařízení bylo třeba, stejně jako v našem případě, vyřešit problém s rosením v důsledku vysoké vlhkosti.

### 7.2 Návrhy pro zlepšení stávajícího řešení a další výzkum

S přihlédnutím na všechna tato fakta se tedy jeví jako nejvhodnější postup do budoucna vývoj vlastního měřicího systému založeného na obrazové analýze záběrů z kamer. Námi navržený systém, jak je patrné z výsledků měření v provozu, není pro průmyslové prostředí ve společnosti ColorReplast dostatečný. V laboratorních podmínkách (více méně konstantní pokojová teplota, běžná vlhkost a téměř stejná měřicí vzdálenost) jsme u zapůjčených vzorků, s ohledem na polohovou směrodatnou odchylku stanovení referenční polohy v prostoru CIE  $L^*a^*b^*$  a směrodatnou odchylku určení barevné difference, schopni spolehlivě detekovat barevnou diferencii  $\Delta E_{ab} \geq 1$ . Přímo v provozu se však detekční schopnosti ztrácí za náhodnými změnami naměřených hodnot způsobenými faktory specifickými pro toto prostředí. Nabízí se tak celá řada možných zlepšení a oblastí dalšího výzkumu.

### 7.2.1 Kamera

V souvislosti s prudkými změnami hodnot  $r$ ,  $g$ ,  $b$  v důsledku změn výšky hladiny granulátu by bylo při dalším výzkumu ucházející provedení testovacích měření s různým nastavením zaostření kamery. Cílem by bylo zjistit, zdali při zaostření kamery před nebo za střední úroveň granulátu nepovede ke snížení těchto změn a jaký by byl vliv na rozmazání obrazu a detekční schopnosti změn barevnosti.

Dalším logickým krokem je výměna kamery samotné. Námí využívaná webkamera LifeCam studio není ideálním snímacím zařízením pro průmyslové prostředí. Jejimi hlavními nedostatky je vysoký šum obrazu, který je v laboratorních podmínkách příčinou přibližně poloviny hodnoty nejistoty měření, a vysoká závislost výstupních obrazových dat na teplotě kamery, kdy se hodnoty ustálí až po několika minutách jejího provozu. Lze tedy spekulovat, jaký vliv má na výsledky měření teplota okolního prostředí. Podle Glenna Archera [26] podílejícího se na vývoji systému pro inspekci barevnosti vytlačovaných plastových částí je většina RGB kamer teplotně závislá. V jejich případě způsobovala změna teploty kamery o 8 °C nelineární změnu RGB hodnot o 3 %.

Je nutno rovněž podotknout, že námí zjištěné barevné diference vychází z toho, jakým způsobem „vidí“ barvy a tedy i výsledné diference námí používaná kamera při daném nastavení. Webkamera LifeCam Studio má řadu nastavitelných vlastností jako vyvážení bílé, saturace, jas, kontrast a ostrost („Sharpness“), které zásadním způsobem ovlivňují výstupní data z kamery. Proto by pro další výzkum bylo vhodné zvolit kameru, která by umožňovala vyhodnocovat data ve formátu RAW, tedy surová data z obrazového čipu.

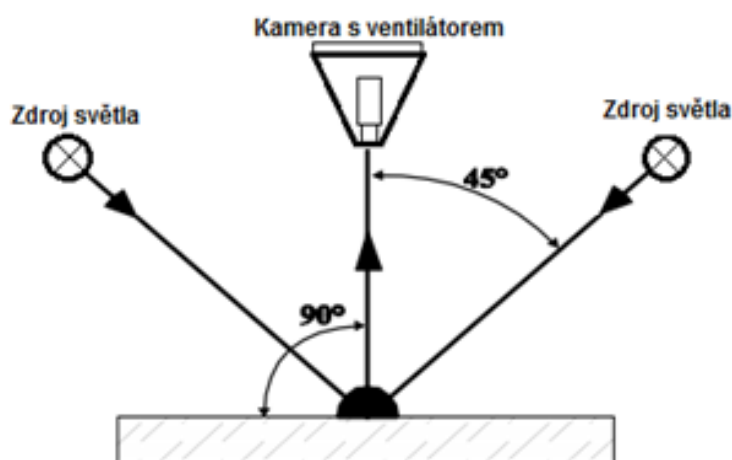
Při výběru kamery je příhodné zohlednit i provozní teplotu a zaměřit se na minimalizaci šumu v obraze a věrnost barev. Co se věrnosti barev týká, je ideálním řešením kamera se třemi obrazovými čipy, kdy každý je vybaven jedním barevným filtrem. Velkým plusem by byl i vícebitový A/D převodník, který zvyšuje barevnou hloubku – počet úrovní, kterými je vyjádřen každý barevný kanál. Běžné kamery mají 8 bitový převodník ( $2^8 = 256$  úrovní). Existují však i kamery pro průmyslové aplikace s 10, 12 a více bitovými převodníky. Pro snížení šumu je třeba se zaměřit na velikost obrazového čipu – čím větší čip, tím větší světlocitlivé buňky a tím nižší šum. V mnoha případech tak má pozitivní vliv na úroveň šumu i nižší rozlišení čipu.

### 7.2.2 Zdroj světla a podmínky osvětlování a pozorování

Pro další zkvalitnění měření by bylo žádoucí zakomponovat do hardwarové části systému standardní zdroj světla. Barevný prostor CIE  $L^*a^*b^*$  byl primárně navržen pro měření barevnosti spektrofotometry, které používají právě takovéto zdroje s pevně danou spektrální charakteristikou. Stejně tak i referenční bílý bod prostoru sRGB je dán zdrojem D65. V případě, že by takovéto řešení nebylo z finančních či prostorových důvodů možné, mělo by být alternativně využito alespoň plnospektrálních žárovek s vysokou věrností podání barev  $R_a$ .

Námi sestavené podmínky osvětlování a pozorování byly navrženy s ohledem na co nejrovnoměrnější osvětlení menšího objemu granulátu. Jak se ukázalo, tato geometrie poskytuje nejlepší světelné podmínky při měření z malých vzdáleností. Rovněž se projevil její vysoký vliv na výsledky v důsledku změny vzdálenosti měřeného povrchu, kdy integrační koule sice poskytuje rovnoměrné osvětlení, ale se vzrůstající vzdáleností od ní razantně klesá jeho intenzita.

Do budoucna tak bude třeba otestovat další měřicí geometrie. Jednou z možností by tak mohlo být otestování jiné CIE doporučené geometrie. Jako nejvhodnější se tak jeví geometrie 45/0 a 0/45. Geometrie 45/0 by s ohledem na nehomogenitu povrchu bylo účelné zdvojit (viz Obr. 31 vlevo). Kameru by zde pak bylo třeba doplnit o ventilátor, který by z prostoru kamery odváděl vlhký vzduch. Jednalo by se opět o vějíř, v jehož širším konci by se nacházel ventilátor a v užším pak objektiv kamery, přičemž by vzduch proudil podél okrajů kamery a vějíře užším koncem ven.



Obr. 31 Měřicí geometrie 45/0 navrhovaná pro další výzkum

U obou geometrií by bylo rovněž vhodné zajistit minimální rozbíhavost paprsků a doplnění kamery o polarizační filtr kvůli odleskům. Je třeba si však uvědomit, že pravděpodobně ani tyto geometrie úplně nevyřeší problém se změnou výšky granulátu, ale mohou představovat směr, kterým by se dalo dále ubírat pro snížení vlivu tohoto negativního faktoru. Do budoucna tedy bude třeba se více zabývat problematikou šíření světla. Výhodou těchto geometrií je i možnost umístění kamery do větší vzdálenosti od teplého granulátu ve spojení s nižší teplotou a vlhkostí prostředí, ve kterém pracuje.

### 7.2.3 Další vhodné oblasti zájmu

Po vyřešení nejistoty měření způsobené výkyvy výšky hladiny granulátu se jeví jako příhodné pro zvýšení přesnosti měření provedení dalších testů zaměřených na možné změny teplot přímo ve výrobním provozu. Cílem by bylo především zdokumentovat vliv případné změny teploty granulátu a kamery na měřená data.

V případě, že by pak další výzkum neprobíhal s kamerou umožňující vyhodnocování obrazových dat ve formátu RAW, budou výsledky měření stále ve velké míře závislé na konkrétním nastavení vlastností kamery. V tomto případě by bylo zajímavé a možná i užitečné otestovat, jak se změny barevnosti odráží v dalších na zařízení závislých prostorech, jako jsou HSV, HSL a HSI.

## ZÁVĚR

Jedním z hlavních cílů této práce bylo otestovat možnosti měření barevnosti průmyslově vyráběného plastového granulátu a detekce již barevně nevyhovujících vzorků tohoto materiálu prostřednictvím vlastního měřicího systému.

První část práce se tak zaměřuje na teoretické základy barev, jejich matematické vyjádření a hlavní specifika pro jejich měření. V druhé části jsou pak popsána dostupná senzorická zařízení, z nichž se sonda Atlas Scientific ENV-RGB ukázala jako nevhodná pro další návrhy systému. Hlavním zjištěným nedostatkem sondy byla absolutní absence optiky určující zorný úhel a nereálně vysoké hodnoty souřadnice  $r$  v barevném prostoru RGB.

Jako senzorická část systému proto byla využita webkamera Microsoft LifeCam Studio, která se stala nedílnou součástí hardwarové části systému, jež byla inspirována CIE doporučenou měřicí geometrií d/0, která poskytuje nejlepší osvětlení pro nehomogenní lesklé povrchy. K realizaci měřicí aplikace, která tvoří softwarovou část systému, jsme využili vývojové prostředí Matlab 2012b. Pro vyhodnocování barevných diferencí byl do aplikace zakomponován převod snímků pořízených kamerou do barevného prostoru CIE  $L^*a^*b^*$  a rovnice pro jejich výpočet.

Pomocí sestaveného systému jsme následně provedli testovací měření granulátu zaměřená na určení nejistoty měření a její možné snížení. Při těchto měřeních se ukázalo, že podstatnou část nejistoty způsobuje samotný šum v obraze pořízeném kamerou a tato nejistota se přibližně zdvojnásobuje vlivem prolínání granulátu. Nejistotu způsobenou prolínáním, jsme se pak neúspěšně snažili snížit odfiltrováním nedostatečně a příliš osvětlených částí obrazu. Měření dále prokázala, že průměr vyhodnocované plochy by měl být alespoň 40 mm.

Další měření orientovaná na vyhodnocování barevných diferencí byla realizována na vzorníku nevyhovujících barevností zapůjčeného z podniku vyrábějící granulát. Ta ukázala, že navržený systém je schopen spolehlivě detekovat barevné odchylky  $\Delta E_{ab} \geq 1$  a že právě tento typ barevné difference je pro detekci pravděpodobně nejlepší. Rovněž podhalila nevhodnější parametr pro určování charakteru difference, kterým se stala změna souřadnice jasu  $\Delta L^*$ . Vzhledem k tomu, že zjištěná barevná difference  $\Delta E_{ab}$  ještě vyhovujících vzorků byla kolem 2 a již nepřijatelných více než dvojnásobná, jeví se navržený systém za daných podmínek měření jako použitelný. Proto jsme s ohledem na

tyto výsledky a znalosti výrobního procesu navrhli aplikaci pro automatizovanou detekci barevně nevyhovujících vzorků.

Přímo ve výrobním provozu pak byly odhaleny další faktory typické pro toto prostředí, které významným způsobem zkreslují měření a neumožňují tak úspěšné otestování navržené detekční aplikace. Mezi tyto faktory patří hlavně velké změny výšky hladiny granulátu a vysoká teplota a vlhkost v jeho blízkosti.

Ukazuje se, že vzhledem k samotnému charakteru granulátu a faktorům specifickým pro provoz by pravděpodobně nebyly schopny spolehlivě detekovat barevné difference ani mnohem nákladnější komplexní zařízení pro měření barevnosti. Z tohoto důvodu bude do budoucna nutno pokračovat ve vývoji vlastního, podle všeho na kameře založeného systému. Ten by pak bylo účelné doplnit o kvalitnější komponenty, jako je plnospektrální zdroj světla a kamera umožňující vyhodnocovat data v RAW formátu. Také bude nezbytné kompletně změnit měřicí geometrii, kde se k otestování nabízí geometrie 45/0 a 0/45 popřípadě návrh vlastní geometrie. Při dalším zkoumání by rovněž bylo příhodné zmapovat vliv teploty kamery a měřeného povrchu na naměřená data.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

One of the main aims of this work was to test the possibilities of color measurement of industrially manufactured plastic granulate and color detection of non-compliant color samples of this material by own measuring system.

The first part of the thesis is focused on the theoretical foundations of colors, their mathematical expression and the main aspects for their measurement. The second part then describes the available sensory devices from which the probe Atlas Scientific ENV-RGB proved to be unsuitable for further system design. The main identified deficiencies were, that the probe absolutely lacks optics, which would determine the angle of view, and unrealistically high values of  $r$  coordinate in RGB color space.

Because of this, the webcam Microsoft LifeCam Studio was used as the sensory part, which has become an integral part of the hardware part of the system, which was inspired by the CIE recommended measuring geometry d/0, which provides the best lighting for inhomogeneous shiny surfaces. For measurement application realization, which forms software part of system, we used the development environment Matlab 2012b. To we could evaluate the color differences, transfer of images captured by the camera into color space CIE  $L^*a^*b^*$  and equations for their calculation was incorporated into application.

Using the assembled system we subsequently performed test measurements of the granulation product focused on measurement uncertainty determination and its possible reduction. For these measurements it was revealed that a substantial part of the uncertainty is caused by noise in the image acquired by the camera and this uncertainty is approximately doubled due to the blending of the granulation product. We then unsuccessfully tried to reduce the uncertainty caused by blending by the filtration of under and over illuminated parts of the image. Measurements also showed that the diameter of the evaluated area should be at least 40 mm.

Another measurements oriented on evaluation of color differences were performed on the color atlas of nonconforming colors loaned from the company producing granulate. It showed that the proposed system is able to reliably detect color differences  $\Delta E_{ab} \geq 1$  and that this type of color difference is probably the best for detection. It also unveiled the most suitable parameter for determining the nature of the difference. It is brightness coordinate change  $\Delta L^*$ . Given that the observed color difference  $\Delta E_{ab}$  of still compliant samples was around 2 and non-compliant was more than twice bigger, the designed system appears to

be under the measurement conditions applicable. Therefore, with respect to these results and knowledge of the manufacturing process we were designed application for automatic color detection of non-compliant samples.

Other factors specific to this environment, which significantly distorts the measurement and does not allow successful test of the proposed detection application, were then revealed directly in the production. These factors are mainly represented by large change in the level of the granulation product and high temperature and humidity of surroundings.

It turns out, that due to the nature of the granulation product and factors specific to the production even very expensive complex device for color measurement would probably not be able to reliably detect a color difference. For this reason, it going to be necessary in future to continue to develop own, apparently on the camera-based system. It would be useful to supplement the quality components such as full-spectrum light source and a camera, which is able to evaluating the data in RAW format, to the system. It will also be necessary to completely change the measurement geometry. It offers the possibility to test geometry 45/0 and 0/45 or to design own geometry. In further exploring would also be useful to map the influence of the temperature of the camera and the measured surface to the measured data.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] FRASER, Bruce, Fred BUNTING a Chris MURPHY. *Správa barev: průvodce profesionála v grafice a pre-pressu*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2003, 521 s. ISBN 8072269437.
- [2] VIK, Michal. *Základy měření barevnosti*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita, 1995, 109 s. ISBN 80-708-3162-6.
- [3] WRIGHT, W. *The measurement of colour*. 4th ed. London: Adam Hilger, 1969, 340 s. ISBN 0852741340
- [4] DANNHOFFEROVÁ, Jana. *Velká kniha barev: kompletní průvodce pro grafiky, fotografy a designéry*. 1. vyd. Brno: Computer Press, 2012, 352 s. ISBN 978-80-251-3785-7.
- [5] ŠULCOVÁ, Petra. Vyjadřování a hodnocení barev. In: *Studentská vědecká konference 2012*. Ostrava: Přírodovědecká fakulta OU, 2012, s. 4. Dostupné z: <http://konference.osu.cz/svk/sbornik2012/pdf/budoucnost/chemie/sulcova.pdf>
- [6] KREIDL, M. *Měření teploty - senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-145-4.
- [7] KOHOUT, Václav. Historie a elementární základy teorie barev III. *Školská fyzika* [online]. Plzeň: Pedagogická fakulta Západočeské univerzity v Plzni, 2013, č. 2 [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: [http://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013\\_02\\_8.pdf](http://sf.zcu.cz/data/2013/sf2013_02_8.pdf)
- [8] VIKOVÁ, Martina. *Kolorimetrie funkčních barviv* [online]. Liberec: Technická univerzita, 2009 [cit. 2014-02-02]. Dostupné z: [http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Textilni\\_Fyzika/Kolorimetrie%20funk%C4%8Dn%C3%ADch%20barviv.pdf](http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Textilni_Fyzika/Kolorimetrie%20funk%C4%8Dn%C3%ADch%20barviv.pdf)
- [9] ZMEŠKAL, Oldřich, Michal ČEPPAN a Petr DZIK. *Barevné prostory a správa barev*. Brno, 2002. Dostupné z: [http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/stud06\\_rozn02.pdf](http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download/stud06_rozn02.pdf)
- [10] ŠPIČKA, Ivo a Robert FRISCHER. *Počítačová geometrie a grafika* [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012, 1 [cit. 2014-02-06]. ISBN 978-80-248-2590-8. Dostupné z: <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/PGG/Pocitacova%20geometrie%20a%20grafika.pdf>

- [11] HEIDELBERG S.R.O. *Color Management: Odborný průvodce*. Praha, 2004. Dostupné z: [http://www.cz.heidelberg.com/wwwbinaries/bin/files/cze/cs/vzdelani/Color\\_management.pdf](http://www.cz.heidelberg.com/wwwbinaries/bin/files/cze/cs/vzdelani/Color_management.pdf).
- [12] MILLWARD, Scott. Color Difference Equation and Their Assessment. *Test Targets: RIT School of Print Media Publication* [online]. 2009, č. 9 [cit. 2014-02-12]. Dostupné z: [http://cias.rit.edu/~gravure/tt/pdf/pc/TT9\\_color\\_difference\\_equations.pdf](http://cias.rit.edu/~gravure/tt/pdf/pc/TT9_color_difference_equations.pdf)
- [13] X-RITE. *A Guide to Understanding Color Communication*. Michigan (USA), 2007. Dostupné z: [http://www.xrite.com/documents/literature/en/L10-001\\_Understand\\_Color\\_en.pdf](http://www.xrite.com/documents/literature/en/L10-001_Understand_Color_en.pdf)
- [14] VIK, Michal. *Měření Barevnosti a Vzhledu: Barevné Odchytky*. Liberec, 2005. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/sylaby/Kolorimetrie/vcoldif.pdf>
- [15] OTÁHALOVÁ, Lenka. Metody a typy zařízení pro hodnocení barevnosti. In: *AZ Reprodukce Barev* [online]. 2009 [cit. 2014-02-13]. Dostupné z: <http://www.reprodukce-barev.org/?menu=3&hlav=3>
- [16] Comparing Colorimeters and Spectrophotometers. In: *Konica Minolta* [online]. 2014 [cit. 2014-02-13]. Dostupné z: <http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/color/part3/01.html>
- [17] PASCALE, Danny. RGB coordinates of the Macbeth ColorChecker. In: *BabelColor* [online]. 2006 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://www.babelcolor.com/download/RGB%20Coordinates%20of%20the%20Macbeth%20ColorChecker.pdf>
- [18] JOHNSON, Adam. Gamma-Correct Rendering (sRGB). In: *CRYENGINE* [online]. 2013 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: <http://docs.cryengine.com/pages/viewpage.action?pageId=1605651>
- [19] LINDBLOOM. RGB to XYZ. In: *BruceLindbloom.com* [online]. 2012 [cit. 2014-04-13]. Dostupné z: [http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn\\_DeltaE\\_CIE2000.html](http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CIE2000.html)
- [20] *Microsoft Hardware LifeCam Studio*. [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: <http://www.microsoft.com/hardware/en-us/p/lifecam-studio>

- [21] MELČ, Antonín. Světelné zdroje pro interiéry aneb jak nahradit klasickou žárovku. *SVĚTLO* [online]. 2009, č. 1 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=38557](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=38557)
- [22] HUNT, Robert a Michael POINTER. *Measuring colour*. 4th ed. Hoboken: Wiley, 2011, 469 s. ISBN 978-1-119-97559-5.
- [23] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB pro začátečníky*. 2. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 151 s. ISBN 80-7300-175-6.
- [24] ZAPLATÍLEK, Karel a Bohuslav DOŇAR. *MATLAB: tvorba uživatelských aplikací*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2004, 215 s. ISBN 80-7300-133-0.
- [25] COLORLITE. *ColorLite sph9i: Industrial Online Spectrophotometer*. Katlenburg-Lindau, 2013. Dostupné z: [http://www.colorlite.de/sites/default/files/artikelanhang/online\\_spectral\\_colour\\_measurement.pdf](http://www.colorlite.de/sites/default/files/artikelanhang/online_spectral_colour_measurement.pdf)
- [26] WILSON, Andrew. Imaging systems tackle color measurement. *Vision Systems Design* [online]. 2007, č. 12 [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.vision-systems.com/articles/print/volume-12/issue-8/features/product-focus/imaging-systems-tackle-color-measurement.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
SDC	Society of Dyers and Colorists
CMC	Color Measurement Committee
PC	Personal Computer
TTL	Transistor-transistor logic
RS 232	Recommended Standard 232
USB	Universal Serial Bus
RGB	Red, Green, Blue
sRGB	standard RGB
HSI	Hue, Saturation, Intensity
HSV	Hue, Saturation, Value
HSL	Hue, Saturation, Lightness
HTML	HyperText Markup Language
CRI	Color Rendering Index
GUI	Graphical User Interface

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Elektromagnetické spektrum[1]</i> .....	11
<i>Obr. 2 Spektrální charakteristika tří odlišných objektů[1]</i> .....	12
<i>Obr. 3 Aditivní (vlevo) a subtraktivní (vpravo) míchání barev[4]</i> .....	14
<i>Obr. 4 Spektrální charakteristika tří zdrojů světla (vlevo) a černého tělesa při různých teplotách (vpravo)[1]</i> .....	17
<i>Obr. 5 Remise červeného předmětu[3]</i> .....	18
<i>Obr. 6 CIE měřicí geometrie[8]</i> .....	19
<i>Obr. 7 Grafické znázornění funkcí trichromatických členitelů pro 2° (plně) a 10° (čárkovaně) pozorovatele[9]</i> .....	21
<i>Obr. 8 Barevný prostor RGB[10]</i> .....	23
<i>Obr. 9 Barevný prostor CIE XYZ[2]</i> .....	24
<i>Obr. 10 Chromatický diagram a gamut různých zařízení[7]</i> .....	26
<i>Obr. 11 Vzdálenost barev v chromatickém diagramu[12]</i> .....	27
<i>Obr. 12 Barevný prostor CIE L*a*b*[2,11]</i> .....	28
<i>Obr. 13 Toleranční elipsoidy CMC v CIE L*a*b*[2]</i> .....	31
<i>Obr. 14 Schématický postup výpočtu trichromatických složek spektrofotometrem[15]</i> .....	34
<i>Obr. 15 Pokus pro stanovení snímacího úhlu sondy (foto pořízeno webkamerou LifeCam Studio)</i> .....	38
<i>Obr. 16 Webkamera Microsoft LifeCam Studio[20]</i> .....	40
<i>Obr. 17 Návrh hardwarové části v programu Autodesk Inventor</i> .....	42
<i>Obr. 18 Pohled do integrační koule</i> .....	43
<i>Obr. 19 Sestavená hardwarová část</i> .....	45
<i>Obr. 20 Rozhraní imaqtool</i> .....	47
<i>Obr. 21 Uživatelské grafické rozhraní měřicí aplikace</i> .....	49
<i>Obr. 22 Struktura měřicí aplikace</i> .....	51
<i>Obr. 23 Histogramy měřeného povrchu možná změnit</i> .....	55
<i>Obr. 24 Snímek pořízený kamerou a jeho podoba po filtrování</i> .....	56
<i>Obr. 25 Polohové směrodatné odchylky pro různé úrovně filtrování podle L* a L<sub>GS</sub></i> .....	57
<i>Obr. 26 Vliv průměru vyhodnocované plochy na prostorovou směrodatnou odchylku</i> .....	57
<i>Obr. 27 Aplikace pro detekci barevně nevyhovujících vzorků</i> .....	62
<i>Obr. 28 Upravená hardwarová část v provozu</i> .....	65

---

<i>Obr. 29 Trend hodnot <math>r</math>, <math>g</math>, <math>b</math> u terakotového vzorníku (příliš tmavý až příliš světlý vzorek) .....</i>	<i>66</i>
<i>Obr. 30 Vývoj hodnot <math>r</math>, <math>g</math>, <math>b</math> u modrého granulátu (příliš tmavý až příliš světlý) při měření v provozu .....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 31 Měřicí geometrie 45/0 navrhovaná pro další výzkum .....</i>	<i>70</i>

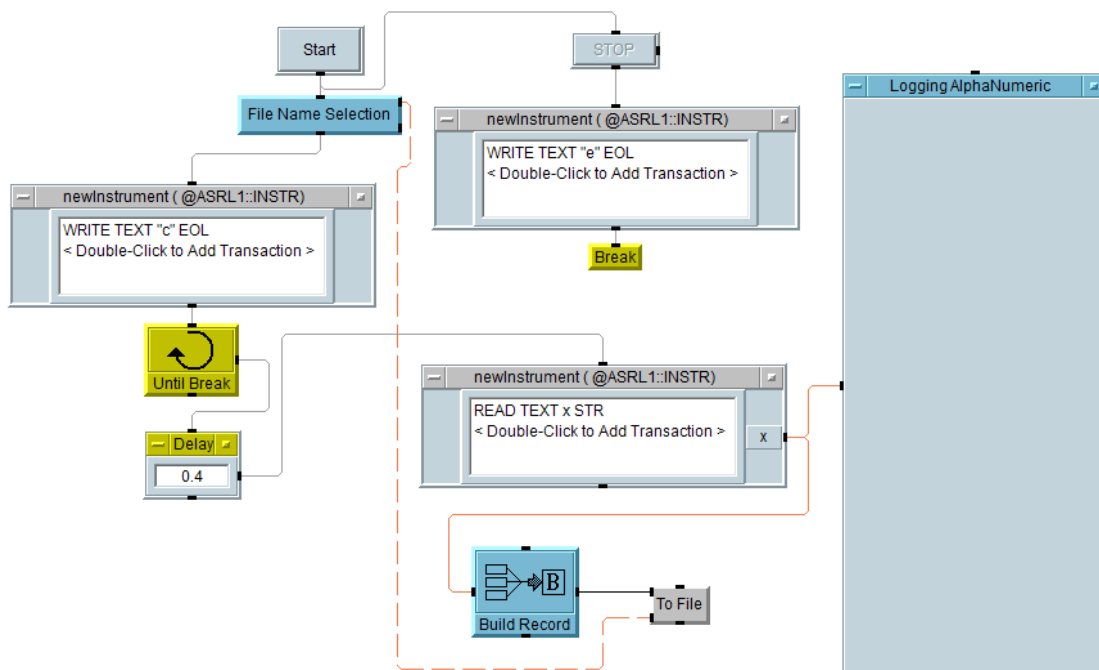
**SEZNAM TABULEK**

<i>Tab. 1 Výsledky pokusu pro zjištění snímacího úhlu.....</i>	38
<i>Tab. 2 Výsledky testu měření základních barev .....</i>	39
<i>Tab. 3 Hardwarové požadavky na chod kamery.....</i>	39
<i>Tab. 4 Získané souřadnice v prostoru sRGB a CIE L*a*b* .....</i>	59
<i>Tab. 5 Barevné diference v CIE L*a*b* .....</i>	59
<i>Tab. 6 Odchytky jasu, sytosti a odstínu v CIE L*a*b*.....</i>	60

## SEZNAM PŘÍLOH

- P I Měřicí aplikace pro otestování sondy ENV-RGB
- P II Směrodatné a relativní směrodatné odchylky pro jednotlivé veličiny a vzorky
- P III Výsledky měření z bezprostřední vzdálenosti

## PŘÍLOHA P I: MĚŘICÍ APLIKACE PRO OTESTOVÁNÍ SONDY ENV-RGB



## PŘÍLOHA P II: SMĚRODATNÉ A RELATIVNÍ SMĚRODATNÉ ODCHYLKY PRO JEDNOTLIVÉ VELIČINY A VZORKY

### Směrodatné odchylky

Vzorek	$\sigma_r$ [-]	$\sigma_g$ [-]	$\sigma_b$ [-]	$\sigma_{L^*}$ [-]	$\sigma_{a^*}$ [-]	$\sigma_{b^*}$ [-]
1	1.09	1.20	1.09	0.44	0.24	0.25
2	0.87	0.75	0.76	0.30	0.15	0.30
3	0.89	0.67	0.71	0.29	0.17	0.31
4	0.85	0.62	0.65	0.27	0.19	0.31
5	0.87	0.67	0.76	0.28	0.25	0.34

Vzorek	$\sigma_{\Delta Eab}$ [-]	$\sigma_{\Delta Ecmc1,4}$ [-]	$\sigma_{\Delta Ecmc2}$ [-]	$\sigma_{\Delta E94}$ [-]	$\sigma_{\Delta E00}$ [-]	$\sigma_{\Delta H^*}$ [-]	$\sigma_{\Delta L^*}$ [-]	$\sigma_{\Delta C^*}$ [-]	$\sigma_{\Delta h^*}$ [°]
1	0.45	0.34	0.27	0.32	0.33	0.22	0.44	0.27	0.41
2	0.31	0.23	0.19	0.22	0.21	0.24	0.30	0.24	0.41
4	0.23	0.18	0.13	0.18	0.16	0.26	0.27	0.25	0.45
5	0.29	0.20	0.15	0.20	0.18	0.32	0.28	0.29	0.56

### Relativní směrodatné odchylky

Vzorek	$\delta_r$ [%]	$\delta_g$ [%]	$\delta_b$ [%]	$\delta_{L^*}$ [%]	$\delta_{a^*}$ [%]	$\delta_{b^*}$ [%]
1	0.68	1.13	1.37	0.88	1.20	1.05
2	0.55	0.78	1.08	0.65	0.68	1.24
3	0.59	0.75	1.10	0.65	0.77	1.28
4	0.58	0.73	1.09	0.64	0.84	1.25
5	0.63	0.84	1.34	0.70	1.14	1.46

Vzorek	$\delta_{\Delta E_{ab}}$ [%]	$\delta_{\Delta E_{cm1,4}}$ [%]	$\delta_{\Delta E_{cm2}}$ [%]	$\delta_{\Delta E_{94}}$ [%]	$\delta_{\Delta E_{00}}$ [%]	$\delta_{\Delta H^*}$ [%]	$\delta_{\Delta L^*}$ [%]	$\delta_{\Delta C^*}$ [%]	$\delta_{\Delta h^*}$ [%]
1	7.17	7.52	7.62	7.51	7.76	13.82	7.80	11.34	13.85
2	11.98	12.35	13.80	11.84	12.10	71.68	11.77	62.92	71.52
4	10.70	11.98	11.55	12.28	11.96	1197.21	13.44	36.12	1212.76
5	6.98	6.89	7.15	6.82	6.65	674.21	6.80	36.21	684.32

### PŘÍLOHA P III: VÝSLEDKY MĚŘENÍ Z BEZPROSTŘEDNÍ VZDÁLENOSTI

Vzorek	$r$ [-]	$g$ [-]	$b$ [-]	$L^*$ [-]	$a^*$ [-]	$b^*$ [-]
1	166.62	105.61	75.44	49.78	21.93	26.18
2	158.89	93.31	64.02	45.59	24.65	27.16
3	153.93	88.86	60.32	43.79	24.78	26.93
4	149.48	84.15	55.95	42.01	25.18	27.13
5	141.18	79.12	52.71	39.63	24.23	25.81
$\bar{\sigma}$ [-]	1.34	1.13	0.98	0.46	0.21	0.28
$\bar{\delta}$ [%]	0.87	1.25	1.59	1.04	0.88	1.03
$\bar{\sigma}_p$ [-]	2.012131			0.58		

Vzorek	$\Delta E_{ab}$ [-]	$\Delta E_{CMC1,4:1}$ [-]	$\Delta E_{CMC2:1}$ [-]	$\Delta E_{94}$ [-]	$\Delta E_{00}$ [-]
1	6.70	4.73	3.64	4.46	4.45
2	1.86	1.34	0.99	1.30	1.25
4	1.86	1.31	0.95	1.28	1.20
5	4.37	3.03	2.18	2.99	2.74
$\bar{\sigma}$ [-]	0.46	0.34	0.25	0.33	0.32
$\bar{\delta}$ [%]	16.57	16.94	16.69	17.28	17.16

Vzorek	$\Delta L^*$ [-]	$\Delta C^*$ [-]	$\Delta H^*$ [-]	$\Delta h^\circ$ [°]
1	5.99	-2.55	1.63	2.64
2	1.80	0.03	0.24	0.37
4	-1.78	0.37	-0.18	-0.27
5	-4.16	-1.25	-0.38	-0.60
$\bar{\sigma}$ [-]	0.46	0.22	0.26	0.42
$\bar{\delta}$ [%]	14.51	166.65	81.95	81.98