

UNIVERZITA PARDUBICE

Fakulta elektrotechniky a informatiky

System pro stanovení stupně zanesení povrchu
rotujícího hřebenu bezdotykovou cestou

Jana Karlová

Diplomová práce
2018

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Jana Karlová
Osobní číslo: I16173
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Komunikační a řídicí technologie
Název tématu: Systém pro stanovení stupně zanesení povrchu rotujícího hřebenu bezdotykovou cestou
Zadávací katedra: Katedra elektrotechniky

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cíl práce: Cílem práce je vyvinout zařízení pro snímání a vyhodnocování stupně zanesení povrchu hřebenu. Zařízení bude tvořeno snímací kamerou, řídicí jednotkou vyhodnocující v reálném čase zanesení povrchu rotujícího hřebenu a komunikačním modulem pro přenos dat do nadřazeného systému. Architektura zařízení bude založena na zpracování signálu získaného z kamery v reálném čase v procesoru STM32F4 ARM Cortex. Pro vývoj a optimalizaci bude integrována sériová komunikační linka a programovací SWD rozhraní. Pro řídicí jednotku bude vyvinut algoritmus vyhodnocení stupně zanesení pro různé typy zpracovávaného materiálu. Během měření v reálných podmínkách bude zejména stanoven algoritmus synchronizace snímače s rotujícím kartáčem a algoritmus stanovení hodnoty zanesení povrchu kartáče.

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši dodané platformy s STM32F407 a kamerou OV7670.
2. Prostudujte současné zdrojové kódy pro vyčítání obrazu do DRAM paměti.
3. Navrhněte způsob vizualizace vyčteného snímku do počítače.
4. Navrhněte způsob synchronizace okamžiku snímání s otáčkami kartáče.
5. Navrhněte způsob osvětlení snímaného kartáče.
6. Stanovte způsob vyhodnocení stupně zanesení povrchu rotujícího kartáče.

Rozsah práce: cca 40 - 60 str.

Rozsah grafických prací: dle potřeby, orientačně 20 grafů

Rozsah pracovní zprávy: cca 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

[1] Brown G.: "Discovering the STM32 Microcontroller", Indiana University 2016

[2] Yiu J.: "The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors", Newnes 2013, ISBN-10: 0124080820

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Dobrovolný, Ph.D.
Katedra elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 31. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2018


Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan




Ing. Jan Pávek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 15. listopadu 2017

Prohlášení autora

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 9/2012, bude práce zveřejněna v Univerzitní knihovně a prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 30. 08. 2018

Jana Karlová

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu této práce Ing. Martinu Dobrovolnému, Ph.D. za vedení, cenné rady a především za jeho dávku trpělivosti se mnou a ochotu, která byla potřebná k dokončení této diplomové práce. Také bych chtěla poděkovat svému kolegovi Jiřímu Vavřínovi za pomoc při výrobě krytu kamery. Dále bych ráda poděkovala své rodině, přátelům a vnu, kteří byli psychickou vzpruhou v průběhu studia.

Anotace

Diplomová práce se zaměřuje na vývoj a sestavení řádkové kamery, použité k vyhodnocení stanovení stupně zanesení povrchu rotujícího hřebenu. Kde jako snímací senzor byl použit lineární obrazový snímač TCD1304DG, pro který byla navržena DPS. Práce obsahuje finální návrh zařízení včetně popisu řídicího algoritmu kamery a algoritmu na vyhodnocení nasnímaných dat.

Klíčová slova

Lineární obrazový snímač, Řádková kamera, STM32, Průmyslové kamery, Strojové vidění

Title

Development of a Device for impurity level detection of circular comb.

Annotation

This diploma thesis focuses on the development and construction of a line-scan camera used to evaluate impurity level of circular comb. The linear image sensor TCD1304DG was used as the image processing sensor for which PCB was designed. Thesis also includes the final design of the device with the description of the control algorithm for a line-scan camera and the algorithm for evaluation of the scanned data.

Keywords

Linear image sensor, Line-scan camera, STM32, Industrial cameras, Machine vision

Obsah

Seznam zkratk	8
Seznam obrázků	9
Seznam tabulek	11
Úvod	12
1 Možná řešení návrhu systému snímání kartáče	13
1.1 Tenzometrický proužek	13
1.2 Ultrazvukový snímač	13
1.3 Bodový snímač	14
1.4 Plošná kamera.....	15
1.5 Řádková kamera	18
1.5.1 Volnoběžný režim.....	20
1.5.2 Externí synchronizace.....	20
1.5.3 Binning	20
2 Návrh vlastního řešení	21
2.1 Popis systému	21
2.2 Řídící jednotka.....	22
2.3 Kamera.....	23
2.3.1 Výběr senzoru.....	23
2.3.2 Návrh DPS.....	23
2.3.3 Výběr objektivu	24
2.3.4 Montáž objektivu k DPS	27
2.3.5 Osvětlení.....	28
2.3.6 Softwarové řešení	29
2.3.6.1 Popis řízení senzoru TCD1304DG.....	29
2.3.6.2 Konfigurace periférií v STM32CubeMX.....	32
2.3.6.3 Popis algoritmu	38
2.3.6.4 Příjem a zpracování dat	41
3 Snímky pořízené kamerou	45
3.1 Snímek celého objektu	45
3.2 Režimy snímání	46
3.2.1 Režim 1.....	47

3.2.2	Režim 2.....	48
3.2.3	Režim 3.....	51
3.3	Vady obrazu při nevhodném umístění sestavy	53
	Závěr	56
	Literatura	57
	Příloha A – Kryt kamery	59

Seznam zkratek

APB	Advanced Peripheral Bus
A/D	Analogově digitální
CCD	Charge-coupled device
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
COM	Communication port
DMA	Direct Memory Access
DPS	Deska plošných spojů
GPIO	General-purpose input/output
ICG	Integration clear gate
IDE	Integrated development environment
LAN	Local area network
LED	Light-Emitting Diode
NVIC	Nested Vectored Interrupt Controller
PC	Personal computer
PSC	Prescaler
PWM	Pulse width modulation
RAM	Random Access Memory
SH	Shift gate
SMD	Surface Mounted Device
SWD	Serial Wire Debug
USB VCP	Universal Serial Bus Virtual COM Port
USB OTG FS	Universal Serial Bus Out to go Fast

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Princip ultrazvukového snímání.....	14
Obrázek 2 – Srovnání přenosu informace CCD a CMOS senzoru [4].....	15
Obrázek 3 - Ukázka CCD a CMOS obrazových snímačů [7].....	17
Obrázek 4 – Kruhové osvětlení princip.....	18
Obrázek 5 – CCD a CMOS lineární obrazový snímač [7].....	18
Obrázek 6 – Plošný a lineární CMOS senzor architektura.....	19
Obrázek 7 – Schéma systému.....	21
Obrázek 8 – Schéma zapojení.....	24
Obrázek 9 – Navržená deska.....	24
Obrázek 10 – Srovnání formátu senzoru a objektivu.....	25
Obrázek 11 – Výpočet ohniskové vzdálenosti.....	26
Obrázek 12 – Kamera v rozloženém stavu.....	27
Obrázek 13 – Kamera ve složeném stavu.....	28
Obrázek 14 – Snímací systém.....	29
Obrázek 16 – Časový diagram senzoru TCD1304 při použití elektronické závěrky [1]	30
Obrázek 17 – Časová charakteristika senzoru TCD1304 [1].....	30
Obrázek 18 – Časové požadavky senzoru TCD 1304 [1].....	31
Obrázek 19 – Časování signálů ICG a SH za použití elektronické závěrky.....	31
Obrázek 20 – Konfigurace hodin časovačů.....	33
Obrázek 21 – Zapojení vstupněvýstupních pinů procesoru.....	35
Obrázek 22 – Konfigurace periférií.....	36
Obrázek 23 – NVIC.....	37
Obrázek 24 – Vývojový diagram.....	40
Obrázek 25 – Instrument Control Toolbox.....	41
Obrázek 26 – Změřený výstup z obrazového senzoru.....	42
Obrázek 27 – Složený snímek z nasnímaných dat.....	42
Obrázek 28 – Binární podoba obrázku.....	43
Obrázek 29 – Maska vytvořená morfologickými operacemi.....	43
Obrázek 30 – Stanovené procento zanesení 36,2 %.....	43
Obrázek 31 – Stanovené procento zanesení 13%.....	44
Obrázek 32 – Gumička nasnímaná kamerou.....	45
Obrázek 33 – Obrázek gumičky po úpravě v Matlabu.....	45
Obrázek 34 – Snímek tří čar na papíře.....	46
Obrázek 35 – Snímek tí čar na papíře po úpravě v Matlabu.....	46
Obrázek 36 – Snímání objektu za přímého denního světla a použití režimu 1.....	47
Obrázek 37 – Snímek po úpravě v Matlabu.....	47
Obrázek 40 – Režim 2 za použití nepřímého denního světla.....	48
Obrázek 41 – Režim 2 za použití nepřímého denního světla po úpravě v Matlabu.....	48
Obrázek 42 – Režim 2 v místnosti s použitím reflektoru jako zdroje osvětlení.....	49
Obrázek 43 – Režim 2 v místnosti s použitím reflektoru jako zdroje osvětlení po úpravě v Matlabu.....	49

Obrázek 44 – Režim 2 s reflektorem umístěným příliš blízko	50
Obrázek 45 – Režim 2 s reflektorem umístěným příliš blízko po úpravě v Matlabu.....	50
Obrázek 46 – Režim 3 za přímého denního světla	51
Obrázek 47 – Režim 3 za přímého denního světla po úpravě v Matlabu.....	51
Obrázek 48 – Režim 3 za nepřímého denního světla	52
Obrázek 49 – Režim 3 za nepřímého denního světla po úpravě v Matlabu	52
Obrázek 50 – Režim 3 za umělého osvětlení umístěného ve větší vzdálenosti	53
Obrázek 51 – Režim 3 za umělého osvětlení umístěného ve větší vzdálenosti	53
Obrázek 52 – Reflektor umístěn ze shora.....	54
Obrázek 53 – Reflektor umístěn ze shora po úpravě v Matlabu	54
Obrázek 54 – Reflektor umístěn ze shora a blíž ke snímanému objektu.....	54
Obrázek 55 – Reflektor umístěn ze shora po úpravě v Matlabu	54
Obrázek 56 – Reflektor umístěn na pravé straně.....	55
Obrázek 57 – Reflektor umístěn na pravé straně po úpravě v Matlabu	55
Obrázek 58 – Reflektor umístěn na levé straně.....	55
Obrázek 59 – Reflektor umístěn na levé straně po úpravě v Matlabu.....	55

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Souhrn nastavení časovačů s nejnižší citlivostí.....	34
Tabulka 2 – Režim umělého osvětlení s vyšší intenzitou.....	34
Tabulka 3 – Režim umělého osvětlení vhodný například se světlem ve větší vzdálenosti .	34

Úvod

V dnešní době je kladen důraz na rychlou výrobu velkého množství výrobků ve velké kvalitě za co nejméně peněz. To jsou často protichůdné požadavky a odpovědí na ně je rozvoj automatizace. Většina výrobků, ať už se jedná o textilie, papír, a podobně jsou vyráběny sériově, to znamená za použití automatizovaných strojů. Automatizované stroje mají, ale jednu velkou nevýhodu. Sami o sobě neumějí vyhodnotit stav výroby a jejich aktivitu je, tedy třeba neustále kontrolovat. Společně s vývojem automatizace se tedy i ruka v ruce vyvíjí kontrola výroby. Tato diplomová práce je zaměřena na textilní stroj a jeho potřebu doplnění o automatizované vyhodnocování stupně znečištění kartáče. Bez tohoto vyhodnocení zanesení kartáč špatně češe bavlnu a pracuje neefektivně.

Cílem této diplomové práce je tedy návrh zařízení, jenž dokáže získávat informace o aktuálním stavu rotujícího hřebenu bezdotykovou cestou a vyhodnotit je.

První část této diplomové práce stručně shrnuje možné způsoby snímání povrchu hřebenu. Z teoretické části vyplývá, který způsob snímání povrchu hřebenu se nabízí jako nejvhodnější.

Po výběru vhodného snímacího systému, je třeba jej zkonstruovat. Jeho vývojem se zabývá druhá kapitola. Kde jsou postupně rozebrány všechny potřebné konstrukční prvky. Další podstatnou částí této kapitoly je řízení snímače, které je podrobně rozebráno a na základě čeho byl vyvinut řídicí algoritmus snímače, který získává aktuální informace o stavu povrchu hřebenu. Kromě zkonstruování systému je v této kapitole rozebráno zpracování získaných dat a určení stupně zanesení.

Dalším důležitým bodem práce je ověření funkčnosti navrženého prototypu a posouzení chování takovýchto snímacích zařízení za určitých podmínek, čímž se zabývá závěr práce. Kde je ukázán dopad některých důležitých vnějších vlivů které je třeba brát v potaz při instalaci zařízení.

1 Možná řešení návrhu systému snímání kartáče

Cílem práce je vyvinout zařízení pro stanovení stupně zanesení povrchu rotujícího hřebenu bezdotykovou cestou. Existuje několik principů a způsobů náhledu na zadanou problematiku, jimiž se zabývá tato kapitola.

Jeden z nejjednodušších způsobů je dotykové snímání tenzometrickým proužkem, který využívá mechanického napětí. Další metodou je použití ultrazvukového snímače, který se používá například k analýze struktur materiálů. Výhodou ultrazvukového snímání je možnost vizualizace objektu, či materiálu. Další z možných řešení je využití optického snímání pomocí bodového snímače nebo kamery. Výhodou snímání obrazu je i snadná modifikovatelnost např. pro kontrolu kvality materiálu a to pouze úpravou algoritmu bez zásahu do hardwaru zařízení. V této kapitole jsou porovnány plošné a řádkové kamery.

1.1 Tenzometrický proužek

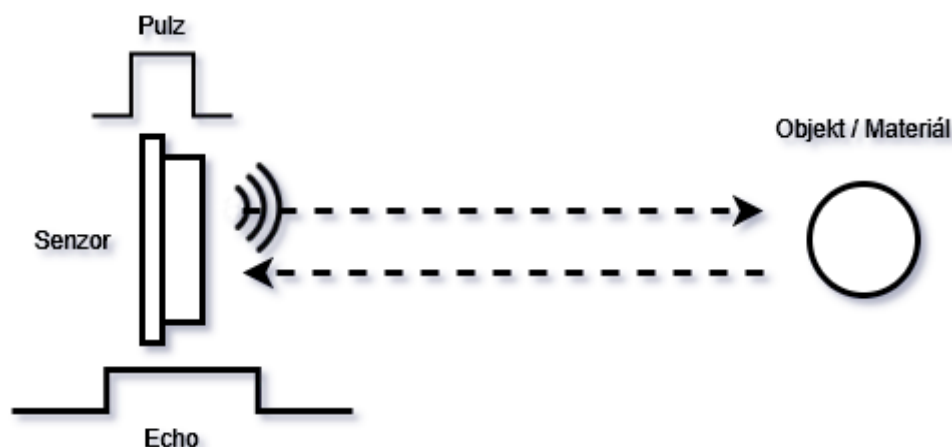
Jedno z uvažovaných řešení byl tenzometrický proužek umístěný na pružném elementu, který by se jedním koncem dotýkal povrchu hřebenu. V případě zanesení by docházelo ke změně.

Namáhání tenzometrického snímače, například nadzvedáváním nečistotami, se převede na měření změny odporu. Ze změny odporu lze posléze určit, k jak velkému namáhání došlo. Jedná se o jednoduché a levné řešení, které však nemá dostatečnou citlivost pro tuto aplikaci. Zanesený kartáč bavlnou je pro tenzometrický proužek téměř nezatelná změna oproti kartáči bez nečistot. Proto se toto řešení ukázalo jako nevhodné.

1.2 Ultrazvukový snímač

Ultrazvukové vlny mají v praxi, a co se týče měření velké využití. Mezi časté použití patří například aplikace v lékařství, kdy se využívá průchodu vln lidskou tkání a jejich odrazu od orgánů. Další využití je například při měření hloubky hladin, či vzdáleností objektů, nebo při vyhodnocování tloušťky materiálů či závad materiálů. Při ultrazvukovém snímání je možná i vizualizace. Z toho důvodu je to zajímavá varianta řešení vyhodnocení zanesení hřebenu. Výhoda oproti snímání např. optickému je vyšší odolnost vůči zanesení prachem a dalšími nečistotami.

Zjednodušený princip je pro tato využití podobný a je vyobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 1).



Obrázek 1 – Princip ultrazvukového snímání

Ultrazvukové snímání je založeno na vyslání akustického signálu směrem k objektu či materiálu a zachycení echo signálu. Echo signál je poté použit na výpočet na vzdálenosti, či hloubky, tedy i struktury materiálu. Ultrazvukový senzor má dvě hlavní komponenty, vysílač, který generuje krátký akustický pulz a přijímač, který detekuje odezvu odraženou od povrchu. [2]

Při ultrazvukovém snímání hraje velkou roli citlivost, která roste s frekvencí a rozlišení, které v tomto kontextu souvisí s rozlišitelností diskontinuit blízko u sebe. Rozlišitelnost také roste s frekvencí. Volba frekvence závisí na tloušťce a typu materiálu a jeho struktuře. Se zvyšující se frekvencí dochází k rozptylu akustických vln. Tento způsob snímání není příliš vhodný pro příliš tenké, či hrubé a nepravidelné materiály. Odezva signálu by byla na úrovni šumu. Nevýhodou řešení je také nízká odolnost k vysokofrekvenčnímu mechanickému vlnění, které lze předpokládat na rotujícím mechanickém stroji. [3]

Vzhledem k těmto skutečnostem a drobnému zanesení povrchu kartáče, nebylo toto řešení zvoleno.

1.3 Bodový snímač

Bodový snímač, může představovat jakákoliv fotocitlivá součástka, například fotodiody.

Fotodiody je polovodičová součástka, která převádí světlo na elektrický proud. Princip fotodiody je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu. Fotodiody jsou konstrukčně upraveny tak, aby dopadající světlo bylo soustředěno na přechod pomocí čočky.

Princip spočívá v tom, že snímané těleso je ozářeno zdrojem světla a do jeho blízkosti se umístí bodový snímač. Světlo odražené z osvětleného snímaného objektu pak dopadá na tento bodový snímač. Dá se umístit i několik bodových snímačů vedle sebe a tím získáme řádkový detektor.

Na podobném principu fungují i výrazně dražší obrazové snímače. Jde o velice levné, jednoduché a efektivní řešení problému.

Pro účely vyhodnocení stupně zanesení povrchu rotačního kartáče byl na FEI vyvinut snímač snímající v osmi diskretních bodech 50 řádků připadajících na aktivní polovinu válce. Zařízení bylo v průběhu roku 2018 úspěšně otestováno a poskytuje dostatečnou informaci pro stanovení stupně znečištění. Zařízení bylo využito v rámci testovacího režimu pro získání dat v reálném provozu.

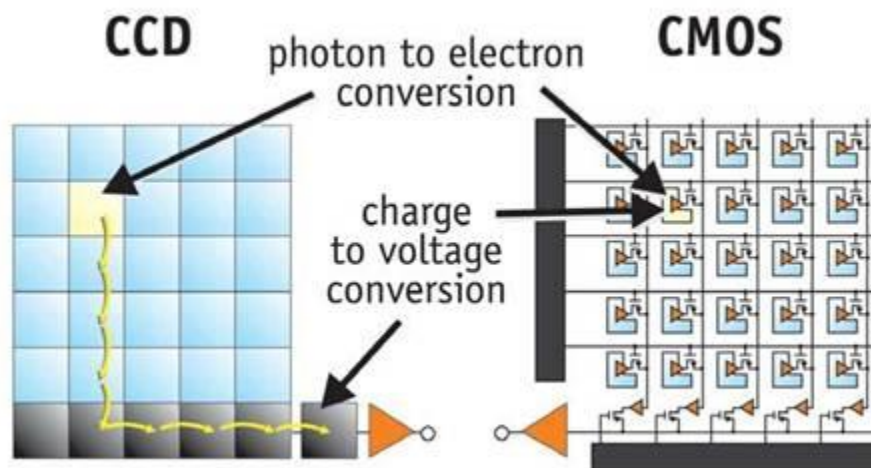
Pro účely další analýzy je vhodné vyvinout zařízení schopné snímat povrch s vyšším rozlišením. Nevýhodou předchozího řešení je také přítomnost 100 mm široké DPS. Tato nevýhoda se ještě prohloubila při přechodu na širší 300 mm válce.

Další část práce popisuje modifikaci tohoto snímače o doplnění bodového snímacího čipu.

1.4 Plošná kamera

Tyto kamery používají ke snímání plošné obrazové senzory. Jedná se tedy o převod optického obrazu na elektrický signál, pomocí přeměny dopadajícího světla na elektrický náboj. Tyto kamery mají dvě dimenze, což znamená, že snímají n řádků o počtu m bodů neboli pixelů. Protože dochází ke snímání více řádků, jsou schopné nasnímat celý objekt najednou.

Využívá se polovodičových senzorů typu CCD nebo CMOS. Princip vyčítání informace je patrný z následujícího obrázku (Obrázek 2).



Obrázek 2 – Srovnání přenosu informace CCD a CMOS senzoru [4]

CCD senzory posouvají generovaný náboj z pixelu na pixel a převedou jej na napětí na výstupním uzlu. Zatímco CMOS senzory převádí náboj na napětí uvnitř každého pixelu. [4]

Z toho vyplývají i některé hlavní rozdíly mezi technologiemi CCD a CMOS. CCD senzory mají pomalejší vyčítání informace a větší náchylnost na šum oproti CMOS sensorům, kde má každá buňka vlastní vyčítací obvod. CCD mají nedokonalou vzájemnou izolaci pixelů způsobenou přeléváním náboje.

Volba senzoru tedy závisí především na aplikaci. Například pro strojové vidění, kdy je kladen důraz na velkou citlivost snímání (například při zkoumání vad materiálu), jsou vhodnější CCD senzory. Jsou vhodnější i pro digitální fotoaparáty.

V následujících bodech je stručně uveden souhrn výhod a nevýhod CCD technologie.

Výhody CCD obrazových snímačů:

- lineární odezva na intenzitu světla,
- přímý lineární digitální obraz
- schopnost akumulace náboje, mohou nashromáždit dostatek světla ze slabých zdrojů světla,
- minimální geometrické zkreslení,
- odolnost proti magnetickým polím,
- široký spektrální rozsah.

Nevýhody CCD obrazových snímačů:

- vlastní šum,
- přelévání náboje,
- postupné vyčítání informace.

Výhody CMOS obrazových snímačů:

- každá buňka má vlastní vyčítací obvody
- možnost vyčítání po jednom pixelu,
- rychlejší čtení najednou,
- méně energeticky náročné,
- levné.

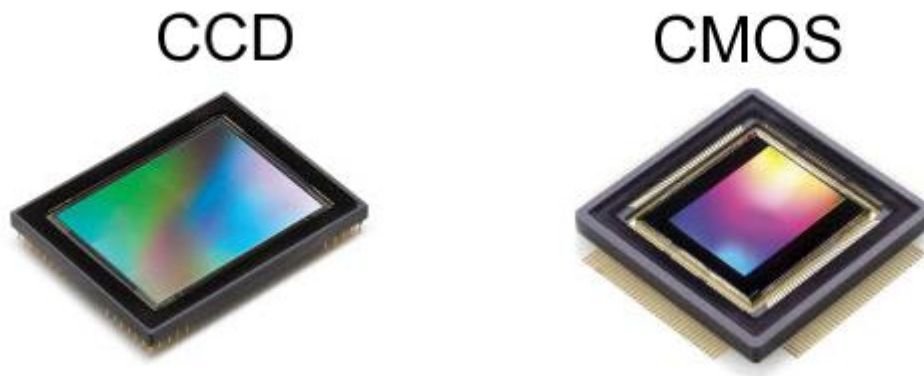
Nevýhody CMOS obrazových snímačů:

- nižší citlivost oproti CCD snímačům. [5]

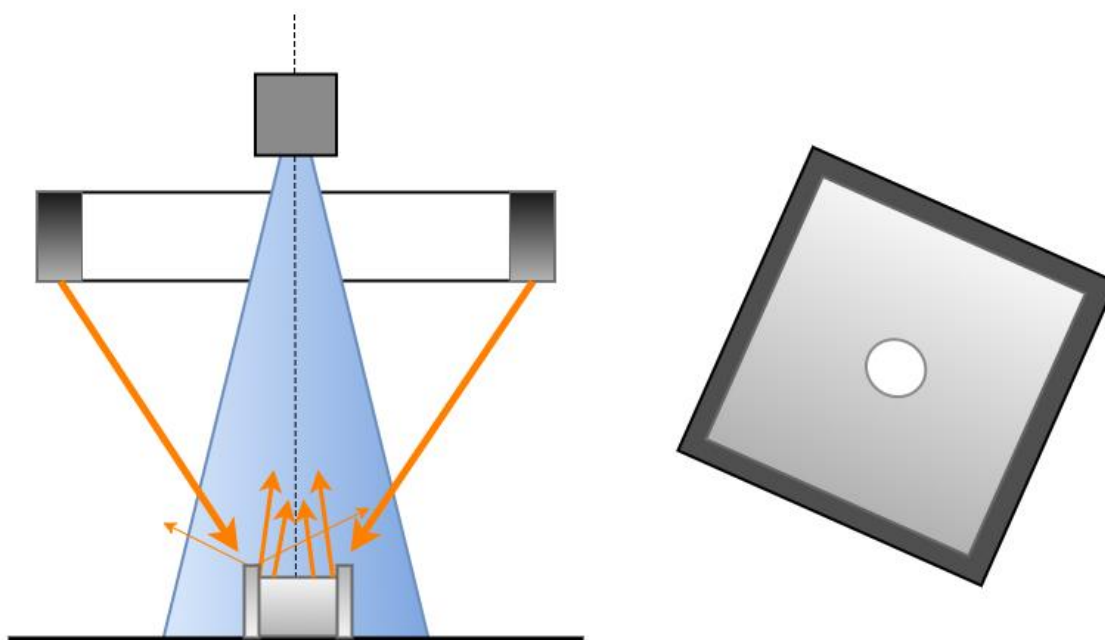
Při snímání pohybujícího se předmětu je nutné dobu vystavení dopadajícímu světlu neboli expoziční čas zkrátit na minimální hodnotu, abychom se vyhnuli rozmazání obrazu. Při takovém zkrácení expozičního času, získáme příliš tmavý snímek. Pro kvalitnější snímek je tedy nutné mít kvalitní zdroj světla. Jelikož snímáme celý objekt najednou, je nutné rovnoměrně a s velkou intenzitou osvětlit celou snímanou plochu objektu.

To je však zbytečné řešení, stejných výsledků můžeme dosáhnout jiným postupem bez řešení problémů s osvětlením. [6]

Na následujících obrázcích je ukázka plošných CCD a CMOS obrazových senzorů (Obrázek 3) a speciálního osvětlení, kde je uprostřed připraven otvor určený pro kameru, aby se zajistila rovnoměrnost rozložení světla na snímaný objekt (Obrázek 4).



Obrázek 3 - Ukázka CCD a CMOS obrazových snímačů [7]



Obrázek 4 – Kruhové osvětlení princip

Snímací zařízení využívající 2D snímací kameru je na pracovišti FEI vyvíjeno paralelně v průběhu roku 2018 a není předmětem této práce.

1.5 Řádková kamera

Kamery o jedné dimenzi nazývané řádkové kamery, fungují na téměř stejném principu jako dvoudimenzionální kamery s plošnými senzory. Taktéž využívají polovodičové CCD a CMOS obrazové snímače, které však snímají pouze jeden řádek o několika pixelech. Na následujícím obrázku (Obrázek 5) je zobrazen lineární CCD a CMOS obrazový snímač.



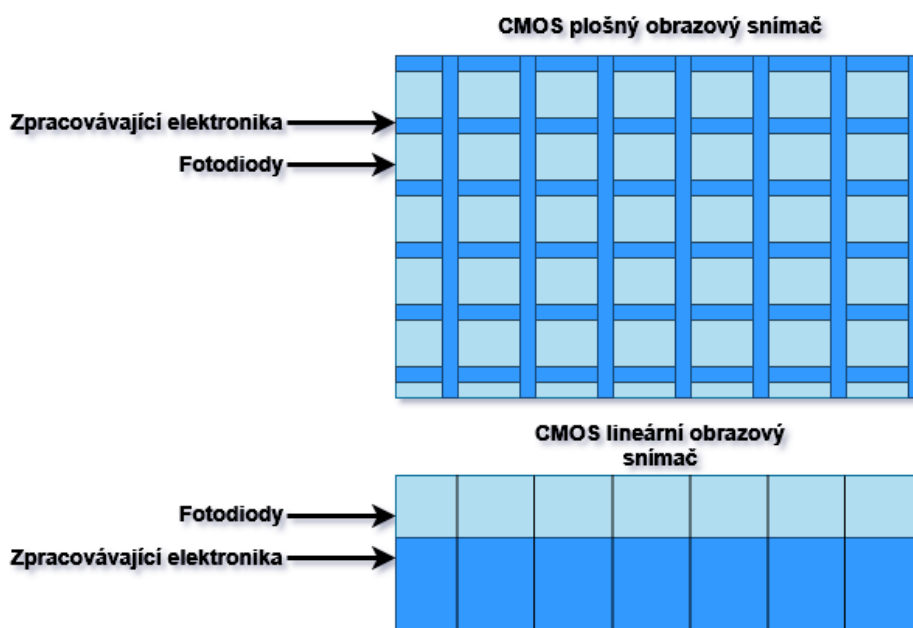
Obrázek 5 – CCD a CMOS lineární obrazový snímač [7]

Aby kamera mohla nasnímat celý objekt, využívá se toho, že se buď pohybuje snímáný objekt anebo se pohybuje snímač. Tento princip snímání je tedy vhodný pro strojové vidění.

Protože úkolem této diplomové práce je nasnímat rotující kartáč, toto řešení se nabízí jako vhodné.

Lineární snímač je až několikanásobně citlivější ve srovnání s plošným senzorem. Proto může snímat s velmi krátkým expozičním časem a vysokou rychlostí v řádu desítek tisíc řádků za sekundu. Zároveň situace s nasvícením snímaného místa se výrazně zjednodušuje. Postačí intenzivní liniové světlo, které soustřeďuje veškerý světelný tok do úzké linky. Také z pohledu optiky je řádková kamera lepším řešením. Vady a nepřesnosti objektivu se projevují pouze v jednom směru. Jednou z velkých výhod je také rozlišení. Současnými řádkovými kamerami lze nasnímat obraz v příčném rozlišení až 16 tisíc bodů. Podélné rozlišení závisí pouze na frekvenci a době snímání kamery. Tedy vlastně na tom, kolik řádků se rozhodneme nasnímat. Takovéto parametry nenabízí žádná komerčně dostupná maticová kamera. [8]

Důvod vyšší citlivosti řádkové kamery je ukázán na obrázku (Obrázek 6) plošného a lineárního CMOS senzoru.



Obrázek 6 – Plošný a lineární CMOS senzor architektura

Zatímco u maticového senzoru zaujímá část plochy pixelu zpracovávající elektronika, u lineárního senzoru je celá plocha pixelu vyhrazena pro světlocitlivou buňku a elektronika je umístěna zespodu. Tedy snímací plocha je využita celá. Z toho důvodu má řádková kamera až dvakrát vyšší citlivost oproti klasické kameře při stejné velikosti pixelu. [8]

Vzhledem k tomu, že je nutné skládat řádky, je nutné řízení kamery. Většina řádkových kamer umožňuje nastavení všech důležitých parametrů, jako je frekvence snímání, délka expozice a další. Používají se tyto základní režimy.

1.5.1 Volnoběžný režim

Při volnoběžném režimu je nastavena pevná frekvence snímání a počet řádků. Tento způsob se dá použít pouze v případě, kdy lze zajistit konstantní rychlost pohybu snímaného objektu. Jinak by docházelo k deformacím obrazu.

1.5.2 Externí synchronizace

Na digitální vstupy kamery se připojí digitální čidlo nebo enkodér. Spouštění expozice jednotlivých řádků je řízeno pulzy z enkodéru. Tento způsob řízení kamery je vhodné použít v případě, kdy rychlost pohybu snímaného objektu kolísá, nebo se mění. Kromě spouštění každého řádku je možné využít ještě další vstup kamery pro určení začátku rámce, tj. jednoho celistvého obrazu (například spuštění od přítomnosti výrobku na pásu).

1.5.3 Binning

Neboli slučování sousedních pixelů. Pro snímání při extrémně špatných světelných podmínkách je možno využít tzv. binning. Snímací čip se přepne do takového režimu, kdy logicky sloučí vždy dva sousední pixely, které se pak chovají jako jeden pixel s dvojnásobnou plochou. Důsledkem je zdvojnásobení citlivosti kamery a zvýšení maximální snímkovací frekvence při současném snížení rozlišení kamery na polovinu. Zorné pole se v tomto případě nezmění. [9]

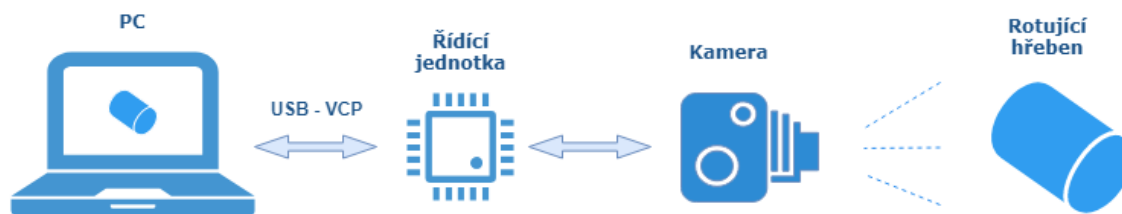
2 Návrh vlastního řešení

Na Fakultě elektrotechniky a informatiky na katedře elektrotechniky se vyskytl požadavek externího zadavatele na vývoj prototypu pro stanovení stupně zanesení povrchu rotujícího hřebenu bezdotykovou cestou. Existuje více způsobů kontroly, ale průmyslové a strojové vidění má mnoho nesporných výhod a je velice populární. Velkou výhodou je, že pro člověka je to snadno srozumitelný a velice přirozený způsob získávání informace o aktuálním stavu stroje. Jako snímací zařízení je zvolena lineární kamera. Zde je využito faktu, že snímané zařízení se samo pohybuje a kamera tedy zvládne nasnímat celý objekt s větší citlivostí a lepším rozlišením než například plošná kamera. Zároveň tato volba zjednodušuje situaci s osvětlením, které hraje zásadní roli při snímání obrazu. Očekávaným výsledkem návrhu snímací kamery je snímek, který je vyhodnocován algoritmem na stanovení stupně zanesení.

2.1 Popis systému

Zařízení je tvořeno snímací kamerou, která má za úkol zaznamenat aktuální stav zkoumaného objektu. Řídící jednotkou, která ovládá snímací kameru, vyčítá aktuální data ze snímací kamery a zajišťuje komunikaci s nadřazeným systémem, kam vyčtená data posílá k dalšímu zpracování. Nadřazený systém zajišťuje vizualizaci stavu zkoumaného objektu a vyhodnocení stupně zanesení.

Následující obrázek (Obrázek 7) demonstuje architekturu zařízení.



Obrázek 7 – Schéma systému

Řídící jednotku v tomto systému představuje vývojový kit Discovery s procesorem STM32F407VG. Procesor řídí lineární CCD snímač ve snímacím zařízení. Discovery kit disponuje USB rozhraním, na kterém byl vytvořen virtuální COM port pro sériovou komunikaci s počítačem. Kit Discovery obsahuje stabilizátor napětí, a proto je možné snímací zařízení z něho napájet.

Jako nadřazený systém je využíváno PC, v němž probíhá vyčítání a zpracování dat v Matlabu. Instrument Control Toolboxem byl vytvořen skript na vyčítání dat ze sériového portu a následně zobrazí získaná data ve formě obrázku a stanoví stupeň znečištění.

Řešení snímací kamery se řídí především vybraným lineárním snímačem. Pro tento snímač byla vyvinuta DPS a byl vybrán vhodný objektiv a osvětlení. Bylo taky nutné objektiv k desce připevnit ve správné vzdálenosti od senzoru a zároveň ho mechanicky chránit před poškozením a nečistotami. Z toho důvodu byl vyroben kryt, který umožňuje montáž objektivu.

2.2 Řídící jednotka

Při hardwarovém návrhu systému byla předem známá potřeba komunikačního rozhraní a mikroprocesoru ke konverzi signálu a řízení senzoru. Pokud se nejedná o sériovou výrobu, ale pouze o vývoj jednoho zařízení, je ideální zvolit vývojový kit, který v případě potřeby může fungovat i jako programátor. Byl zvolen vývojový kit Discovery. Jeho pořizovací cena, je nižší než by stála výroba jedné DPS a obsahuje vše potřebné pro vývoj a umožňuje dodatečné změny, které v návrhu již vyrobené DPS nejsou možné.

Tento vývojový kit obsahuje procesor STM32F407VG. Má předem vyvedené všechny porty. Je využit jako zdroj napájení pro kameru. Na vývojovém kitu jsou umístěny základní prvky jako tlačítko, které bylo využito k externímu přerušení. LED diody, na indikaci stavu. Obsahuje jedno USB rozhraní pro snadné napájení z počítače a další, které bylo využito na posílání dat do PC.

Funkce vývojového kitu Discovery:

- STM32F407VGT6 32-bitový MCU s jádrem ARM Cortex-M4F, 1 MB Flash, 192 KB RAM v LQFP100 pouzdře,
- On-board ST-LINK/V2 připojení s přepínáním volby módu použití kitu jako stand-alone ST-LINK/V2 (se SWD konektorem pro debugování a programování),
- napájení desky přes USB nebo z externího zdroje 5 V,
- napájení externí aplikace pomocí: 3 V a 5 V,
- LIS302DL, ST MEMS pohybový sensor, 3-osý digitální akcelerometr,
- MP45DT02, ST MEMS audio sensor, všesměrový digitální mikrofon,
- CS43L22, audio DAC s driverem třídy D pro speaker,
- dvě tlačítka (user a reset)
- USB OTG FS s micro-AB konektorem,
- rozšiřovací konektor pro všechny LQFP100 I/O pro rychlé připojení k vývojovým deskám a jednoduchému měření. [10]

2.3 Kamera

Návrh snímací kamery se zabývá volbou vhodného snímacího senzoru a návrhem DPS pro tento senzor. Výběrem objektivu pro stanovenou vzdálenost, ve které bude kamera umístěna a montáží objektivu k DPS. Volbou dostatečně silného osvětlení, které nebude nevhodně ovlivňovat výstup z kamery a algoritmem, který kameru ovládá a získává z ní výstupní data a následným zpracováním nasnímaných dat.

2.3.1 Výběr senzoru

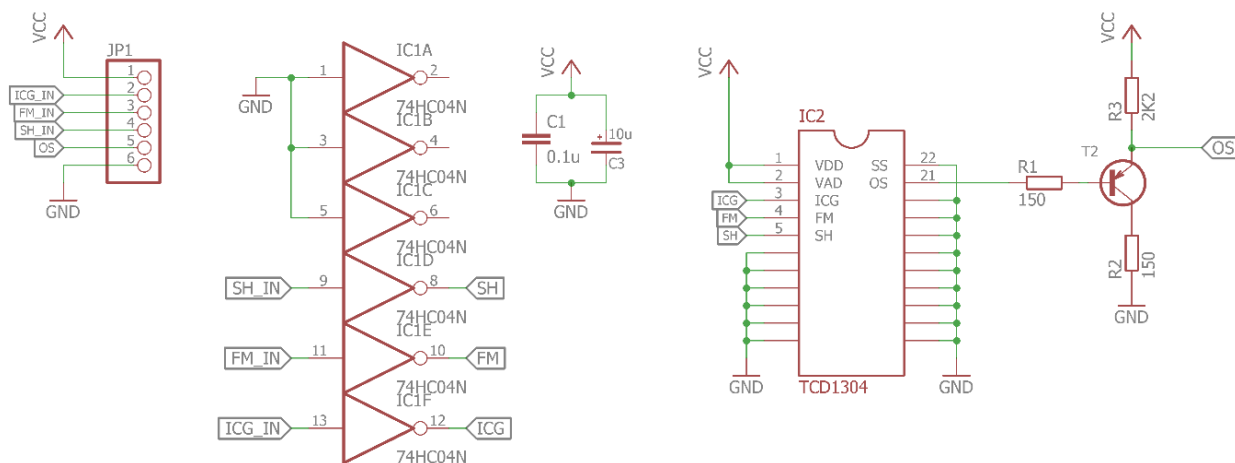
Při výběru obrazového snímače byly zohledněny požadavky na vhodnou strukturu senzoru a jeho technologii. Důležitým faktorem například byla i dostupnost na trhu. Plošné obrazové senzory mají dodací lhůtu až dva roky. Nejedná se o příliš dostupné zboží. Jelikož se tato práce zabývá snímáním rotujícího objektu, je lineární senzor dokonce vhodnějším řešením.

Při výběru snímacích senzorů je výběr ze dvou technologií, CCD a CMOS. Senzory CCD mají obecně vyšší citlivost snímání a z teoretické části diplomové práce vyplývá, že jsou vhodnější volbou. Jako snímač obrazu byl kvůli nejlepší dostupnosti a dobrému rozlišení (3694 pixelů) zvolen lineární obrazový senzor TCD1304DG.

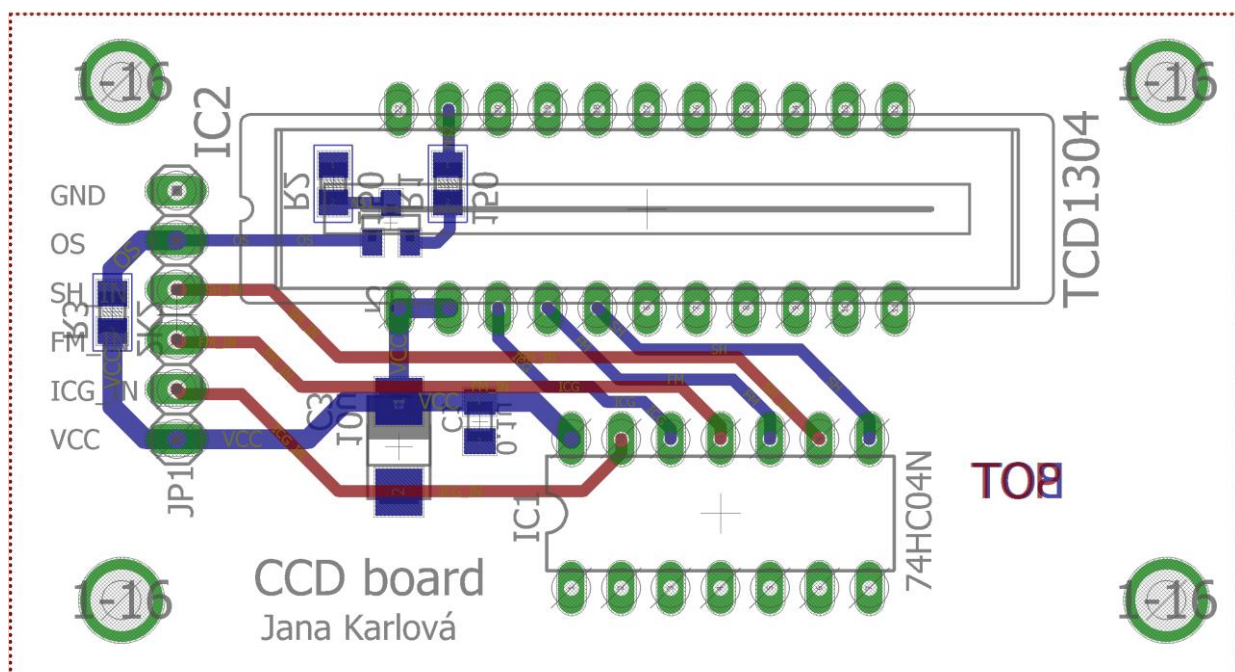
2.3.2 Návrh DPS

Pro obrazový snímač byla navržena deska v softwaru Eagle. Při návrhu desky bylo zásadní rozmístění součástek. Ohledy byly brány především na omezení proudových smyček a byla snaha o co nejkratší spoje. Ke snížení impedance pomohlo rozvedení větší části zemního vodiče ze spodní strany desky. Většina součástek byla zvolena v pouzdře SMD, kromě součástek TCD1304DG u které nebylo na výběr a hradlo 74HC04N. Hradlo bylo vybráno v pouzdře s drátovými vývody, protože umožňovalo přístup k vývodům senzoru ze spodu. Tím se zmenšili rozměry navrhované desky, protože šlo umístit senzor blíž k hradlu a nebylo zapotřebí proklovů, nebo složitějšího obcházení jiných spojů. Vzhledem k tomu, že se počítalo s použitím vývojového kitu Discovery, nebylo třeba implementovat A/D převodníky pro analogový výstup ze senzoru ani stabilizaci napětí a byla navržena dle doporučeného zapojení. Deska obsahuje pin lištu na vstupy řídicích signálů a napájení. Filtrační kondenzátory, bipolární tranzistor na zesílení výstupního signálu a logické hradlo.

Na následujících obrázcích (Obrázek 8, Obrázek 9) je zobrazeno schéma zapojení a navržená deska, na které byly vytvořeny otvory na upevnění DPS do krytu kamery.



Obrázek 8 – Schéma zapojení



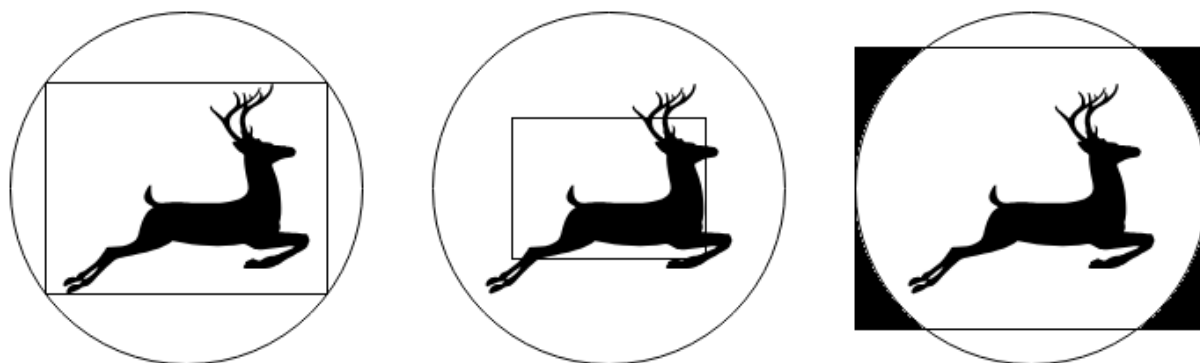
Obrázek 9 – Navržená deska

2.3.3 Výběr objektivu

Jelikož snímáný objekt bude ve vzdálenosti přibližně 30cm, bylo nutné vybrat vhodný objektiv. Zde se brala v potaz především velikost snímacího senzoru (41.6 x 9.69 mm z toho snímací plocha 29,1 mm) a bylo nutno určit ohniskovou vzdálenost. Pro takto velký snímač je zapotřebí objektiv, který umí vykreslit obraz na takto velkou snímací plochu senzoru. Tedy formát objektivu by neměl být menší než formát obrazového senzoru. Při použití objektivu s menším formátem se nedostane světlo na okraje senzoru a paprsky světla se

promítnou pouze na středovou část senzoru a dochází k vinětaci, která se projeví jako černé okraje.

Následující obrázek slouží jako ilustrační k porovnání vlivu velikosti formátu objektivu a snímacího senzoru na fotografii. V prvním případě je stejně velký formát senzoru i objektivu, v dalším větší formát objektivu než snímacího senzoru a poslední ilustruje větší formát senzoru než formát objektivu.



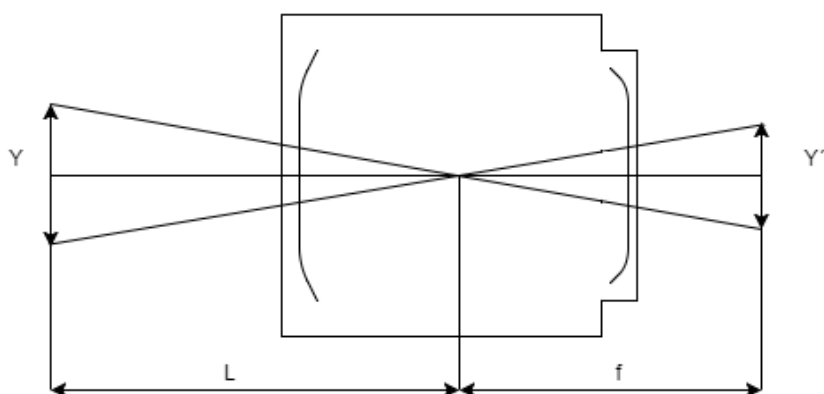
Obrázek 10 – Srovnání formátu senzoru a objektivu

Dostatečně velký formát mají speciální průmyslové objektivy, dělané na tyto typy senzorů. Jedná se ale o velice nákladnou záležitost v cenovém rozpětí několika desítek tisíc korun. Proto další vhodná varianta jsou fotografické objektivy, které sice nejsou o moc levnější. Navíc má většina fotografických objektivů bez připojeného napájení uzavřenou clonu. Potřeba napájení clony by zbytečně komplikovalo návrh DPS a ovládání objektivu.

Kvalitou a cenově přijatelnou variantou je starší typ fotografického objektivu, který má všechny prvky ovladatelné manuálně a pokryje dostatečnou plochu senzoru.

Další parametr je clona. Clona reguluje množství světla procházejícího objektivem. Žádaná je nízká hodnota. Typické clonové číslo fotoobjektivů, které je vhodné na tuto aplikaci 2,8.

Určení ohniskové vzdálenosti, stačilo přibližně podle následujícího vzorce. Jednotlivé vzdálenosti nutné pro výpočet jsou vysvětleny na následujícím obrázku (Obrázek 11).



Obrázek 11 – Výpočet ohniskové vzdálenosti

Rovnice na výpočet ohniska:

$$f = Y' \cdot \frac{L}{Y}$$

kde Y – velikost snímaného objektu,

Y' – velikost obrazu,

L – vzdálenost objektu,

f – ohnisková vzdálenost.

Velikost snímaného objektu Y představuje rotující hřeben. Velikost obrazu Y' představuje snímací plochu obrazového senzoru. Vzdálenost objektu L je vzdálenost rotujícího kartáče od kamery a ohnisková vzdálenost f je vzdálenost mezi středem čočky a senzorem. Je to vlastnost objektivu, kterou bylo potřeba určit.

$$Y = 300 \text{ mm},$$

$$Y' \doteq 30 \text{ mm},$$

$$L = 300 \text{ mm},$$

$$f = Y' \cdot \frac{L}{Y} = 30 \cdot \frac{300}{300} = 30 \text{ mm}$$

Po dosažení vyšla ohnisková vzdálenost 30 mm. Z důvodu rezervy a nastavitelnosti krytu kamery, který umožňuje měnit ohniskovou vzdálenost, byl zvolen objektiv s větší ohniskovou vzdáleností, která umožňuje dát kameru dál od snímaného objektu Tessar Carl Zeiss s ohniskem 50mm a clonou F2.8.

2.3.4 Montáž objektivu k DPS

Dalším důležitým bodem byla montáž objektivu k desce se senzorem, kde je zásadní dodržet přesnou vzdálenost objektivu s určitým nastavením clony, ohniskové vzdálenosti, zaostření na objekt a další. Zároveň bylo nutné mechanicky chránit sensor před nečistotami a poškozením. Ideální varianta byla vytvoření krytu se závitem M42 pro upevnění objektivu a možností upevnění DPS, aby nedocházelo k nechtěnému rozostření. Byl navržen jednoduchý kryt, který tyto požadavky splňuje navíc s možností přišroubování na stativ, aby se dal prototyp upevnit. Zároveň je kryt nastavitelný pro případ změny vzdálenosti objektu od kamery. Na následujících obrázcích (Obrázek 12, Obrázek 13) je zobrazena celá kamera, skládající se z navržené DPS přimontované ke krytu, kryt kamery v rozloženém a složeném stavu a objektiv.



Obrázek 12 – Kamera v rozloženém stavu



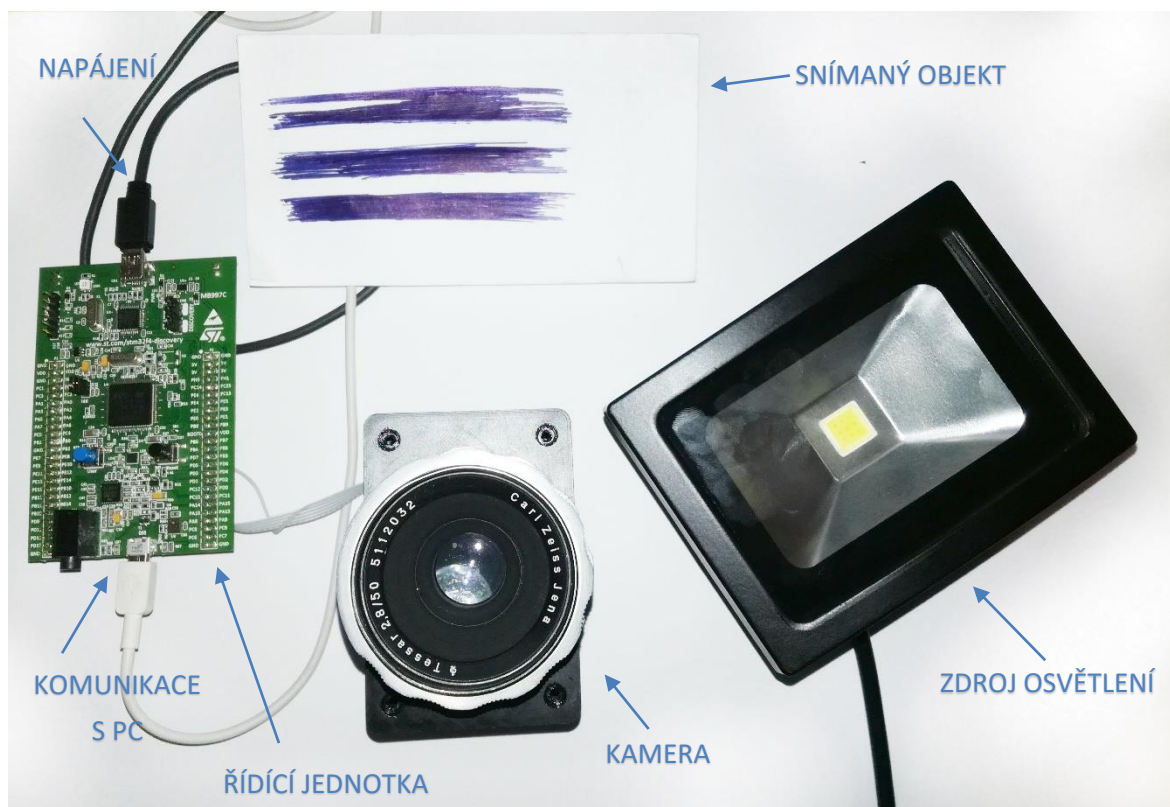
Obrázek 13 – Kamera ve složeném stavu

2.3.5 Osvětlení

Obrazový snímač TCD1304 je citlivý na infračervené světlo. Při působení infračerveného světla může dojít ke zhoršení vlastností, včetně zhoršení rovnoměrnosti rozlišení atd. Proto je třeba použít zdroj světla bez infračervené složky, jako je například denní světlo, fluorescenční lampa nebo zelené fluorescenční světlo. U zdrojů osvětlení jako jsou zářivky, je nutná vysoká frekvence několik desítek kHz a víc, protože nízké frekvence, jako je 50 Hz nebo 60 Hz, způsobují blikání. LED diody mohou být také použity jako světelný zdroj v aplikacích s odpovídající integrační dobou nebo pro vysoce citlivé zařízení. [11]

Na průmyslové snímání kamerou se běžně používají velmi silné zdroje světla. Především kvůli okolnímu rušivému světlu, jako je denní světlo nebo umělé osvětlení v místnosti. Tyto rušivé vlivy se dají minimalizovat odstíněním, to ale vždy není možné. Pak je nutné využít osvětlovač, který je schopen vytvořit řádově vyšší osvětlení než nežádoucí zdroje. Dalším rušivým vlivem může být změna polohy osvětlovače. Proto je nutné volit osvětlovací plochu tak, aby při změně polohy objektu nedocházelo k odlišnému vytváření kontrastu v jasovém obrazu. Důležité je dosáhnout co nejvyššího kontrastu zájmové části, oproti oblastem, které nejsou předmětem zkoumání. Téměř výhradně se používají osvětlovače s LED diodami jako zdroji světla. Vykazují dlouhou životnost a vlastnosti jejich světla se téměř nemění. Pro řádkové kamery se běžně používají liniové osvětlovače, to však není běžně dostupná a levná věc. Pro tuto diplomovou práci byl zvolen reflektor LED Floodlight PROFI 10W, se světelným tokem 800 lumenů. Byl zvolen kvůli dobré dostupnosti a ceně. Jeho konstrukce navíc umožňuje snadné upevnění.

Souhrn celé výsledné navržené sestavy je na následujícím obrázku (Obrázek 14).



Obrázek 14 – Snímací systém

2.3.6 Softwarové řešení

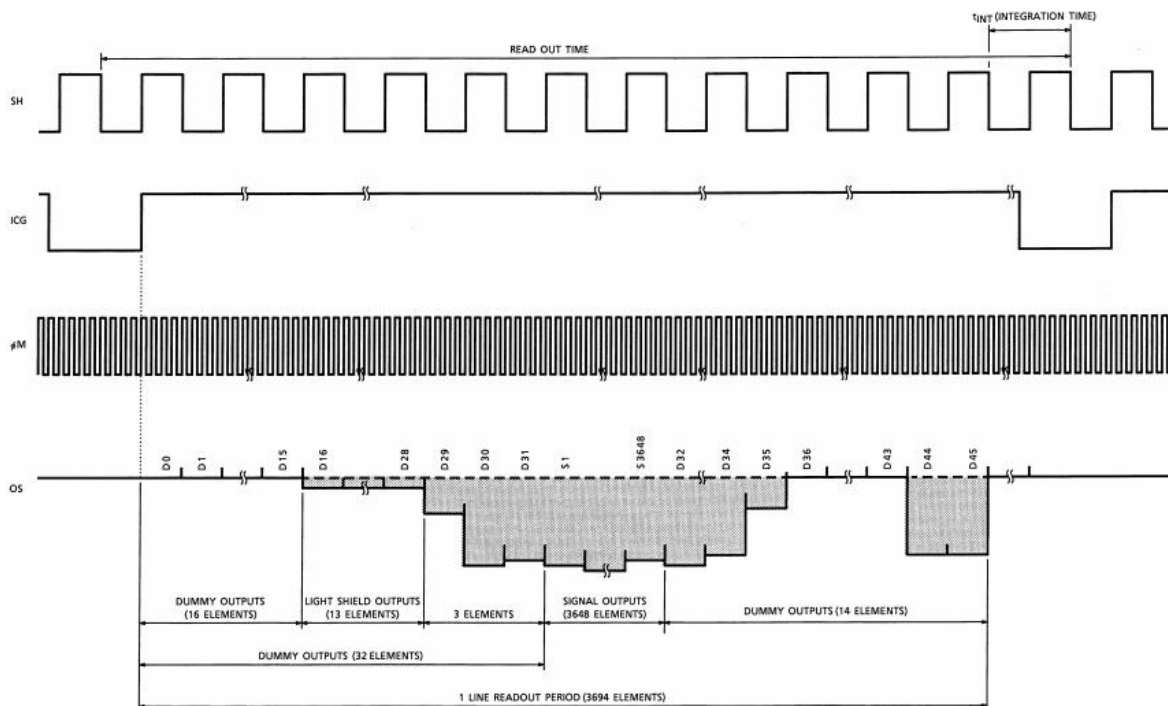
V této kapitole je nejdříve obeznámení s řízením senzoru TCD1304DG a jeho požadavky na časování. Celý algoritmus je založen na vhodném využívání periférií, které mikroprocesory STM32 nabízejí. Jedna z hojně využívaných periférií jsou časovače, kterým je věnována podkapitola řízení senzoru TCD1304DG, v níž jsou uvedeny výpočty vyplývající právě z požadavků časování. V následující podkapitole konfigurace periférií je pak shrnuto nutné nastavení periférií, kterých je zapotřebí a na základě čeho byl vygenerován základní projekt z programu STM32CubeMX, který posloužil jako šablona obslužného programu. V poslední podkapitole je pak shrnut popis hlavního algoritmu.

2.3.6.1 Popis řízení senzoru TCD1304DG

V této části úlohy bylo zapotřebí řídit lineární obrazový snímač a získat výstupní data ze snímače a ty následně odeslat do PC k dalšímu zpracování.

Správné řízení senzoru vyplývá z následujícího časového diagramu (Obrázek 15) a následujících tabulek z datasheetu TCD1304DG.

TIMING CHART (Use electric shutter function)



Obrázek 15 – Časový diagram senzoru TCD1304 při použití elektronické závěrky [1]

Z časového diagramu je vidět, že pro správné řízení senzoru je zapotřebí minimálně tři signálů. Řídící hodiny f_M a synchronizační signály ICG a SH. Z toho integrační čas neboli citlivost snímání určuje perioda signálu SH a signál ICG určuje počátek a konec výstupu.

CLOCK CHARACTERISTICS ($T_a = 25^\circ\text{C}$) ($4.0\text{V} > V_{AD} = V_{DD} = 3.0\text{V}$)

CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX	UNIT
Master Clock Frequency	f_{fM}	0.8	2	2.4	MHz
Data Rate	f_{DATA}	0.2	0.5	0.6	MHz

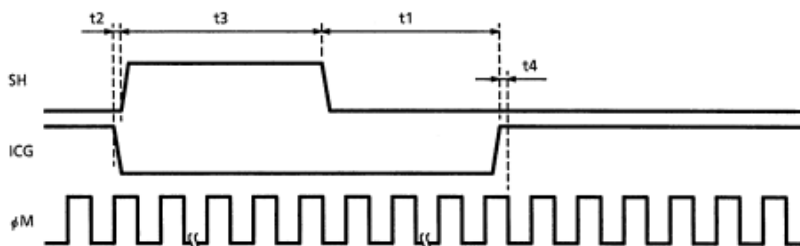
Obrázek 16 – Časová charakteristika senzoru TCD1304 [1]

Vzhledem k tomu, že výstup ze snímače TCD1304DG je analogový, je nutné nastavit i A/D převodník. A/D převodník je nutné spouštět ve vhodný okamžik. Ten určuje signál ICG, respektive jeho perioda, která určuje počátek a konec čtení dat. Čtení dat je zajištěno tím, že časovač ICG pulzu spustí další časovač, který řídí rychlost vyčítání dat, tedy vzorkovací frekvenci.

Pro správné řízení a vyčítání dat je nutné nastavit čtyři časovače. Z toho tři generují PWM signály na ovládání senzoru a jeden řídí rychlost převodu A/D převodníku.

Pro synchronizační pulzy jsou stanovena kritéria, která je nutno dodržet. Z následujících časových požadavků vyplývá, že signál ICG (elektronická závěrka) musí být ve stavu logické 0 a SH signál naopak ve stavu logické 1 a je lehce opožděn za signálem ICG a důležité je trvání pulzu ICG po sestupné hraně SH pulzu. Při řízení senzoru se osvědčila šířka pulzu ICG téměř stejně dlouhá jako perioda signálu SH.

TIMING REQUIREMENTS



CHARACTERISTIC	SYMBOL	MIN	TYP.	MAX	UNIT
ICG Pulse DELAY	t1	1000	5000	?	ns
Pulse Timing of ICG and S H	t2	100	500	1000	ns
SH Pulse Width	t3	1000	?	?	ns
Pulse Timing of ICG and f M	t4	0	20	*	ns

*: You keep f M "High" Level.

Note: If you use electronic shutter function. $t_{INT}(\text{MIN.}) = 10\mu\text{s}$

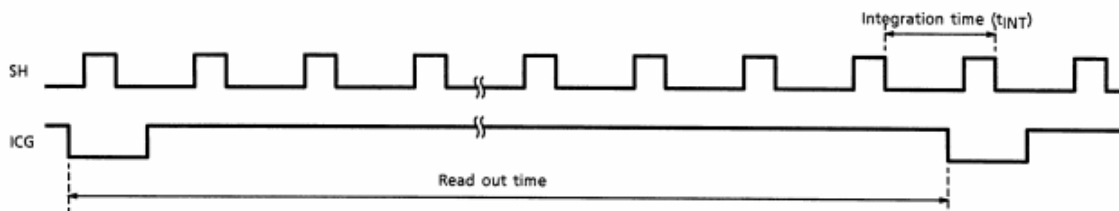
Obrázek 17 – Časové požadavky senzoru TCD 1304 [1]

Z časových požadavků při použití elektronické závěrky je jasné, že pulz SH má minimální periodu $10\mu\text{s}$ a ICG pulz musí být natolik dlouhý, aby se stihla vyčíst všechna data.

USE ELECTRONIC SHUTTER

Pulse Timing of SH and ICG

· SH cycle = T_{int}



$t_{INT}(\text{MIN.}) = 10\mu\text{s}$

You have always same SH pulse width (t3).

Obrázek 18 – Časování signálů ICG a SH za použití elektronické závěrky

Následující výpočty a zadané hodnoty stanovují mezní hodnoty period a šířek pulzů, parametry:

- řídicí frekvence $f_M = 2 \text{ MHz}$,
- rychlost dat $f_{DATA} = 0,5 \text{ MHz}$,
- počet pixelů senzoru: $N = 3694$,
- minimální perioda SH: $T_{SH} = 10 \mu\text{s}$,
- šířka pulzu SH: minimálně $1 \mu\text{s}$, zvoleno $2 \mu\text{s}$,
- minimální perioda ICG:

$$T_{ICG} = \frac{N}{f_{DATA}} = \frac{3694}{500000 \text{ Hz}} = 7,4 \text{ ms},$$

- šířka pulzu ICG: minimálně

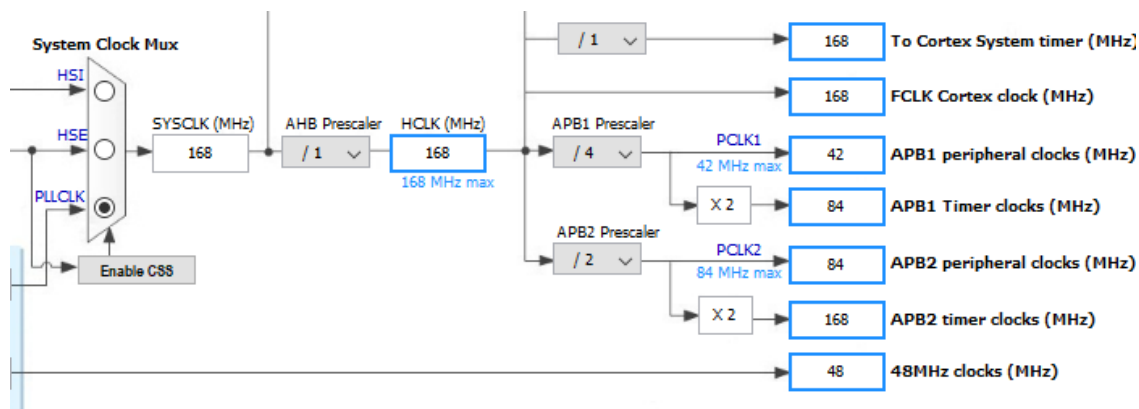
$$\tau = t_2 + t_3 + t_1 = (0,5 + 2 + 5) \mu\text{s} = 7,5 \mu\text{s},$$

zvoleno $9,5 \mu\text{s}$.

2.3.6.2 Konfigurace periférií v STM32CubeMX

V aplikaci STM32CubeMX byly nastaveny základní periferie, jako časovače, A/D převodník a USB rozhraní. Poté byl vygenerován celý projekt, který byl nadále upravován v IDE Keil μ Vision5.

Pro systémové hodiny $HCLK = 168 \text{ MHz}$, řídicí frekvenci a vypočtené periody včetně střídání uvedené v části řízení senzoru, je zapotřebí nastavit časovače. Pro výpočet hodnot předděliček a period časovačů, je nutné zjistit jaká je hodnota hodin časovačů. Pro správné určení hodin je nutné znát na jakou sběrnici APBx je časovač připojen. Hodnota hodin časovačů byla poté vyčtena z konfigurace hodin v programu STM32CubeMX jak ukazuje následující obrázek (Obrázek 19).



Obrázek 19 – Konfigurace hodin časovačů

Pro signál SH byl zvolen časovač TIM2, pro signál ICG časovač TIM5.

- předdělička časovače SH:

$$PSC_{SH} = \frac{Clk_{TIM2}}{f_M} = \frac{84 \text{ MHz}}{2 \text{ MHz}} = 42$$

- perioda časovače SH:

$$T_{CNT SH} = T_{SH} \cdot f_M = 10 \mu s \cdot 2 \text{ MHz} = 20$$

- šířka pulzu časovače SH:

$$t_{SH} = \frac{T_{CNT SH} \cdot t[\%]}{100\%} = \frac{20 \cdot 20}{100} = 4$$

- předdělička časovače ICG:

$$PSC_{ICG} = \frac{Clk_{TIM5}}{f_M} = \frac{84 \text{ MHz}}{2 \text{ MHz}} = 42$$

- perioda časovače ICG:

$$T_{CNT ICG} = T_{ICG} \cdot f_M = 7,4 \text{ ms} \cdot 2 \text{ MHz} = 14\,800 \doteq 15000$$

- šířka pulzu časovače ICG:

$$t_{ICG} = \frac{T_{CNT ICG} \cdot t[\%]}{100\%} = \frac{15000 \cdot 0,125}{100} = 19$$

- předdělička časovače f_M :

$$PSC_{f_M} = \frac{Clk_{TIM3}}{f_M} = \frac{84 \text{ MHz}}{2 \text{ MHz}} = 42$$

Při nastavování časovačů je nutné invertovat signály, vzhledem k hradlu 74HC04N, které je zapojeno v obvodu. V následující tabulce je souhrn nastavení (Tabulka 1).

Tabulka 1 – Souhrn nastavení časovačů s nejnižší citlivostí

Časovač	Určení	TimClk	APB	Režim	PSC	T _{CNT}	Pulz
TIM3	f _M	SysClk/4	1	PWM	42	1	1
TIM2	SH	SysClk/4	1	PWM	42	20	4
TIM5	ICG	SysClk/4	1	PWM + IT	42	15000	19
TIM8	ADC trigger	SysClk/2	2	IT	174	-	-

Při tomto nastavení však byla příliš nízká citlivost snímání a například v místnosti s umělým osvětlením byla při použití objektivu citlivost snímání nedostačující. Tyto hodnoty jsou vhodné například pro přímé denní světlo a zároveň jako mezní hodnoty, pod kterými není vhodné senzor TCD1304DG používat.

Další tabulky (Tabulka 2, Tabulka 3) uvádějí vhodnější nastavení. Již bez výpočtů, jsou uvedeny vzorové hodnoty s vyšší citlivostí neboli vyšší hodnotou periody SH, jako další možné režimy snímání. Zde už se především hledělo na to, aby perioda SH byla celistvým násobkem periody ICG, tedy aby platilo:

$$n \cdot T_{CNT\ SH} = T_{CNT\ ICG},$$

a aby šířka pulzu ICG, byla téměř stejně dlouhá jako perioda SH.

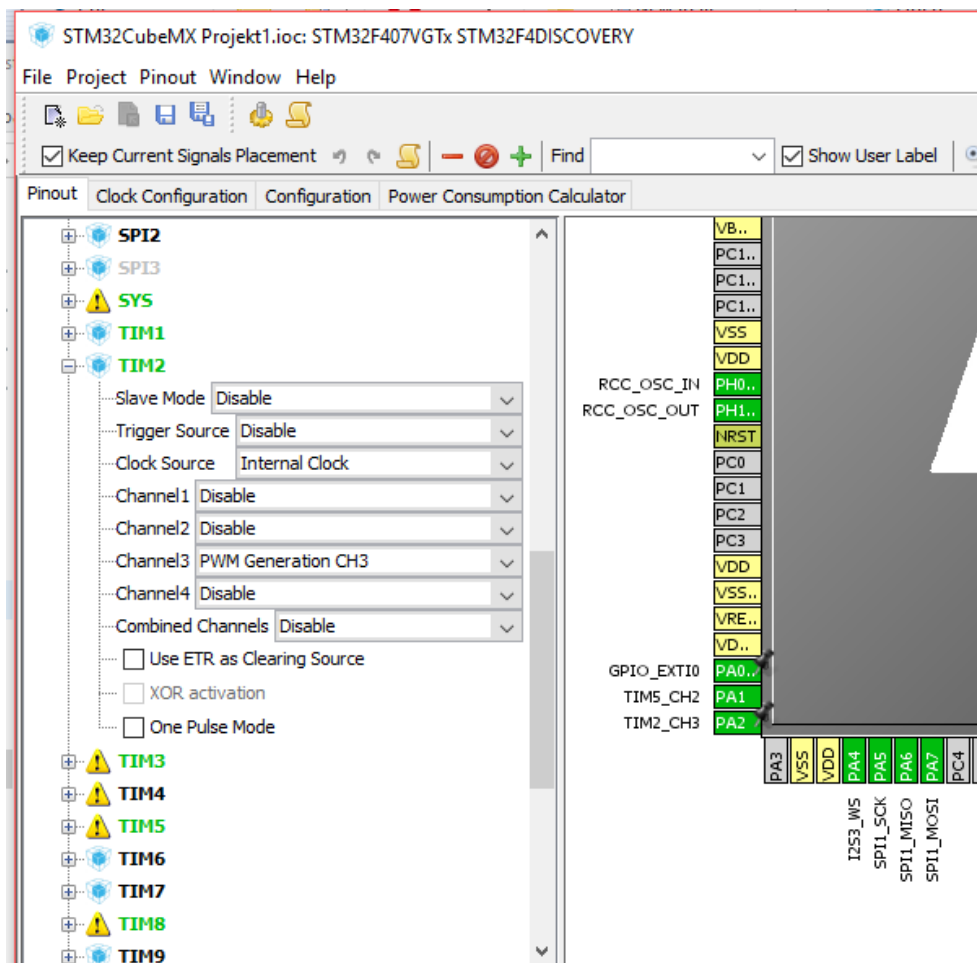
Tabulka 2 – Režim umělého osvětlení s vyšší intenzitou

Časovač	Určení	Režim	PSC	T _{CNT}	pulz	polarita
TIM3	f _M	PWM	42	1	1	high
TIM2	SH	PWM	42	120	4	low
TIM5	ICG	PWM + IT	42	16320	119	high
TIM8	ADC trigger	IT	186	-	-	-

Tabulka 3 – Režim umělého osvětlení vhodný například se světlem ve větší vzdálenosti

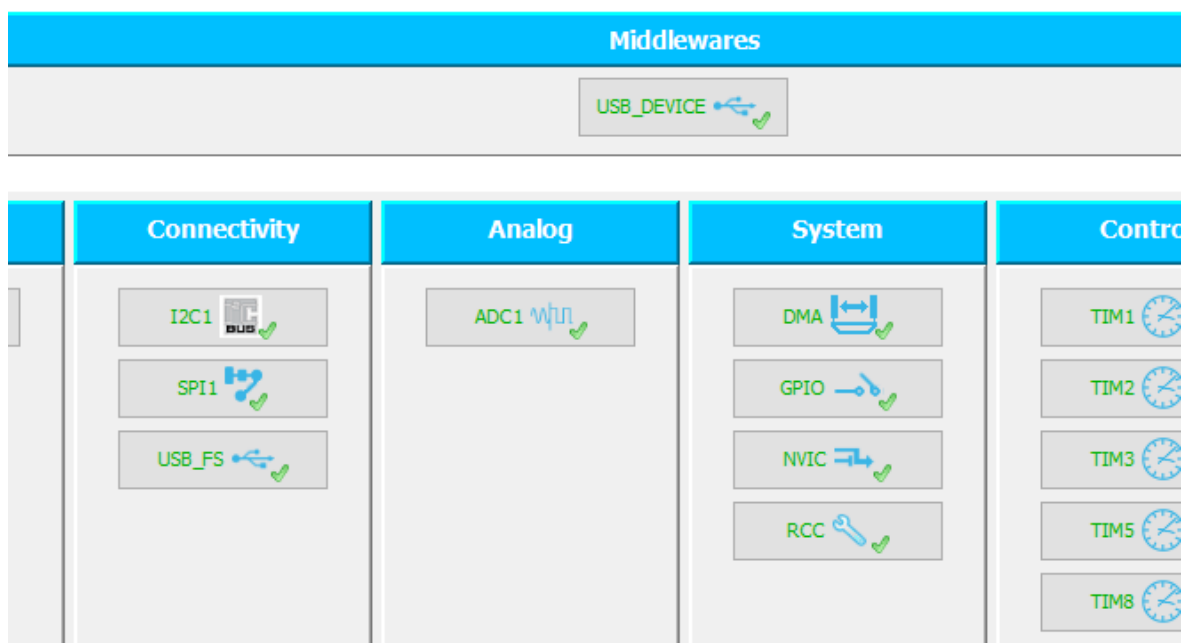
Časovač	Určení	Režim	PSC	T _{CNT}	pulz	polarita
TIM3	f _M	PWM	42	1	1	high
TIM2	SH	PWM	42	300	4	low
TIM5	ICG	PWM + IT	42	16800	299	high
TIM8	ADC trigger	IT	191	-	-	-

Na dalších obrázcích je ukázka projektu diplomové práce v STM32CubeMX.



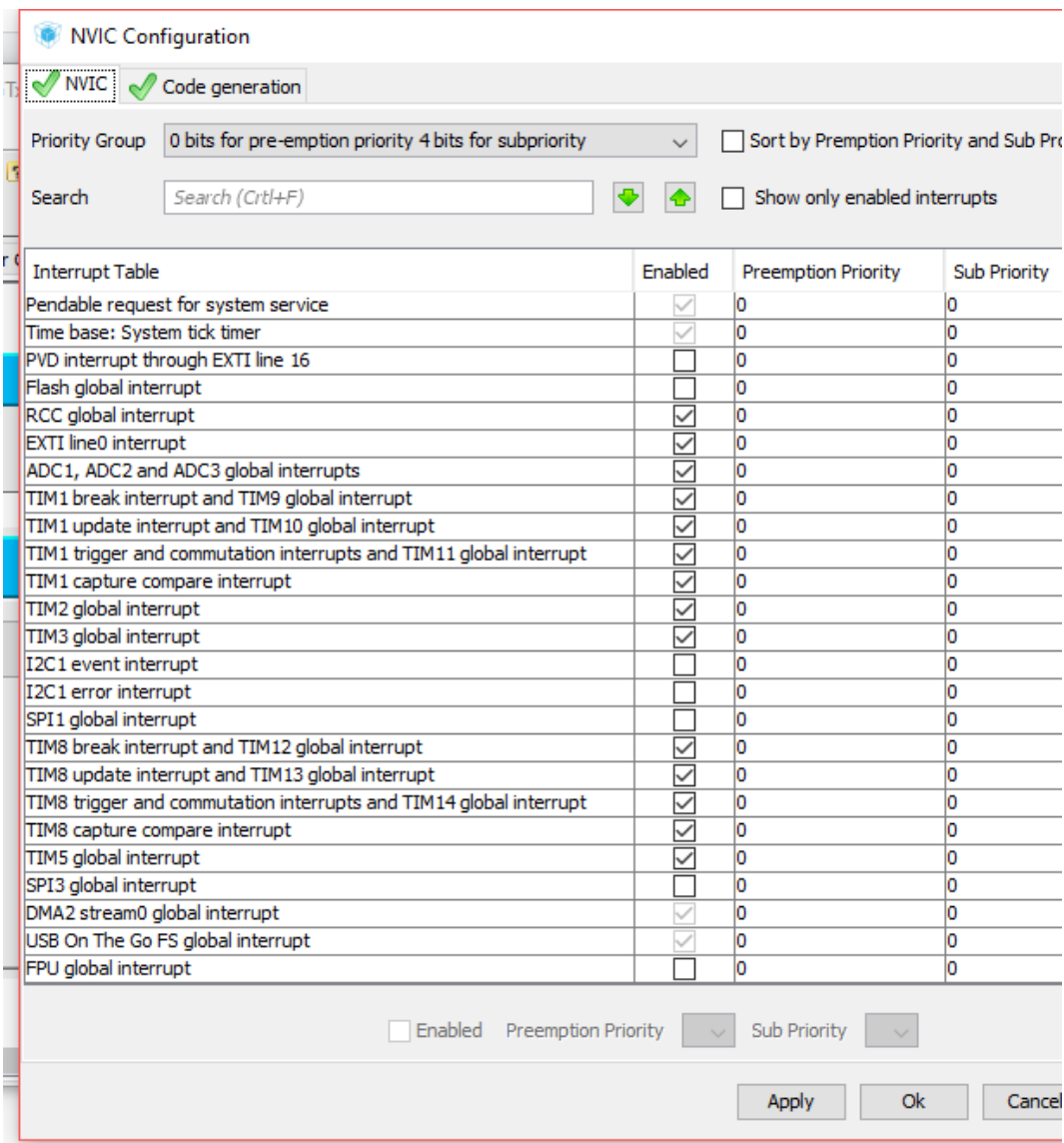
Obrázek 20 – Zapojení vstupněvýstupních pinů procesoru

V záložce pinout je možné vybrat periférie, které jsou používány. V této záložce je přehled využívaných pinů. STM32CubeMX nedovolí zabrat již využitě piny a hlídá tak uživatele. Při rozkliknutí jednoho pinu je vidět, jaké má předvolené možnosti. Například GPIO Output nebo kanál Timeru. Při návrhu diplomové práce se například stalo, že byla potřeba využití tlačítka, které je na stejném pinu jako kanál časovače, který byl využíván. Tímto nástrojem bylo umožněno promyslet reorganizaci s co nejmenšími zásahy ve zdrojovém kódu.



Obrázek 21 – Konfigurace periférií

V záložce konfigurace je možné přehledně nastavit jednotlivé periférie. Je zde například i přehled všech povolených přerušení. Což je užitečné pro rychlou kontrolu. Při vývoji algoritmu se například stalo, že jeden časovač neměl povolené přerušení a zde byl problém nalezen.



Obrázek 22 – NVIC

AD převodník byl nastaven na rozlišení 8 bitů s externím triggerováním časovačem TIM8 na náběžnou hranu. Vzhledem k množství dat a tedy velikosti bufferu (počtu pixelů) je vhodné využít DMA s circular módem.

Přenos dat byl naprogramován nejjednodušší možnou cestou, kterou nabízí vývojový kit Discovery. Bylo využito USB rozhraní. Softwarově byl vytvořen virtuální sériový port na USB OTG FS.

Okamžik snímání je nutné synchronizovat s otáčkami kartáče. Jako vhodné řešení se nabízí externí přerušení vyvolané signálem přivedeným na pin kitu. Jelikož se jedná o prototyp, je sice moment snímání vyvolán externím přerušením, ale místo signálu je vyvoláváno tlačítkem, na pinu PA0 nastaveným na sestupnou hranu. Z principu nezáleží na tom, zda je přerušení vyvoláno tlačítkem či signálem.

2.3.6.3 *Popis algoritmu*

Na začátku algoritmu jsou definovány tři režimy snímání a nastavitelný počet snímaných řádků. Defaultně je zvolen režim místnosti s reflektorovým osvětlením a uživatel má možnost změny přímo ve vývojovém prostředí pro STM32.

Inicializace

Zahrnuje inicializaci všech konfigurovaných periférií:

- DMA,
- časovačů,
- ADC,
- GPIO,
- HAL,
- USB DEVICE,
- hodin a dalších.

Většinu konfigurace je zajištěna STMCubemMX, kromě některých časovačů, které jsou měněny na základě režimu.

Přerušeni vyvolané stiskem tlačítka

V momentě vyvolání externího přerušeni tlačítkem, které je připojeno na pin PA0, se spustí časovače použité na generování signálu řídicích hodin, signálu SH, signálu ICG pomocí PWM. Dojde tedy ke startu PWM těchto časovačů:

- TIM3
- TIM5
- TIM2

Jejichž vstupy jsou vyvedeny přímo do obrazového senzoru a je nutný jejich kontinuální běh. Společně s PWM se spustí základní režim s přerušeni časovače TIM5 představující signál ICG, tedy režim base interrupt.

Nastaví se počáteční hodnota registru CNT, která zajišťuje vzájemný posun signálů ICG a SH. Zároveň s tím se nastaví proměnná start na požadovanou hodnotu, která umožňuje start konverze A/D převodníku s DMA.

Přerušeni vyvolané časovačem TIM5

Tato obsluha přerušeni slouží ke spuštění konverze. Dojde k ní tehdy, dojde-li k přerušeni vyvolaného tímto časovačem představující ICG, který určuje počátek a konec výstupních dat.

Přerušeni je vyvoláno tehdy, napočítá-li časovač TIM5 do hodnoty PeriodaICG, která je definována pomocí defíne na začátku programu.

Spuštění konverze je zajištěno tím, že tento časovač spouští ve svém přerušení časovač TIM8, který určuje vzorkovací frekvenci a triggeruje A/D převodník. Časovač TIM8 je spuštěn v základním režimu s přerušením, tedy base IT.

Pokud je toto splněno, program se vrátí do hlavní smyčky programu. Dojde ke spuštění konverze funkcí HAL_ADC_Start_DMA, která spustí A/D převodník. A/D převodník poté měří v pravidelných intervalech, které jsou řízeny časovačem TIM8 a hodnoty se automaticky ukládají do bufferu v RAM pomocí automatického DMA přenosu bez účasti jádra, dokud není načten požadovaný počet vzorků.

Tím je načten jeden řádek. Po dokončení převodu jednoho řádku o 3694 8bitových hodnotách, se vyvolá přerušení dokončení konverze A/D převodníku.

Přerušení ADC dokončení konverze

V tomto přerušení se inkrementuje proměnná j představující počet převedených řádků. Zastaví se časovač TIM8, který triggeruje A/D převod, aby nedocházelo k posunu snímaných dat. Celý buffer se poté odešle do počítače pomocí funkce CDC_Transmit_FS přes virtuální sériový port pomocí USB rozhraní.

Po odeslání dat a dokončení obsluhy tohoto přerušení se program opět vrátí do hlavní smyčky programu.

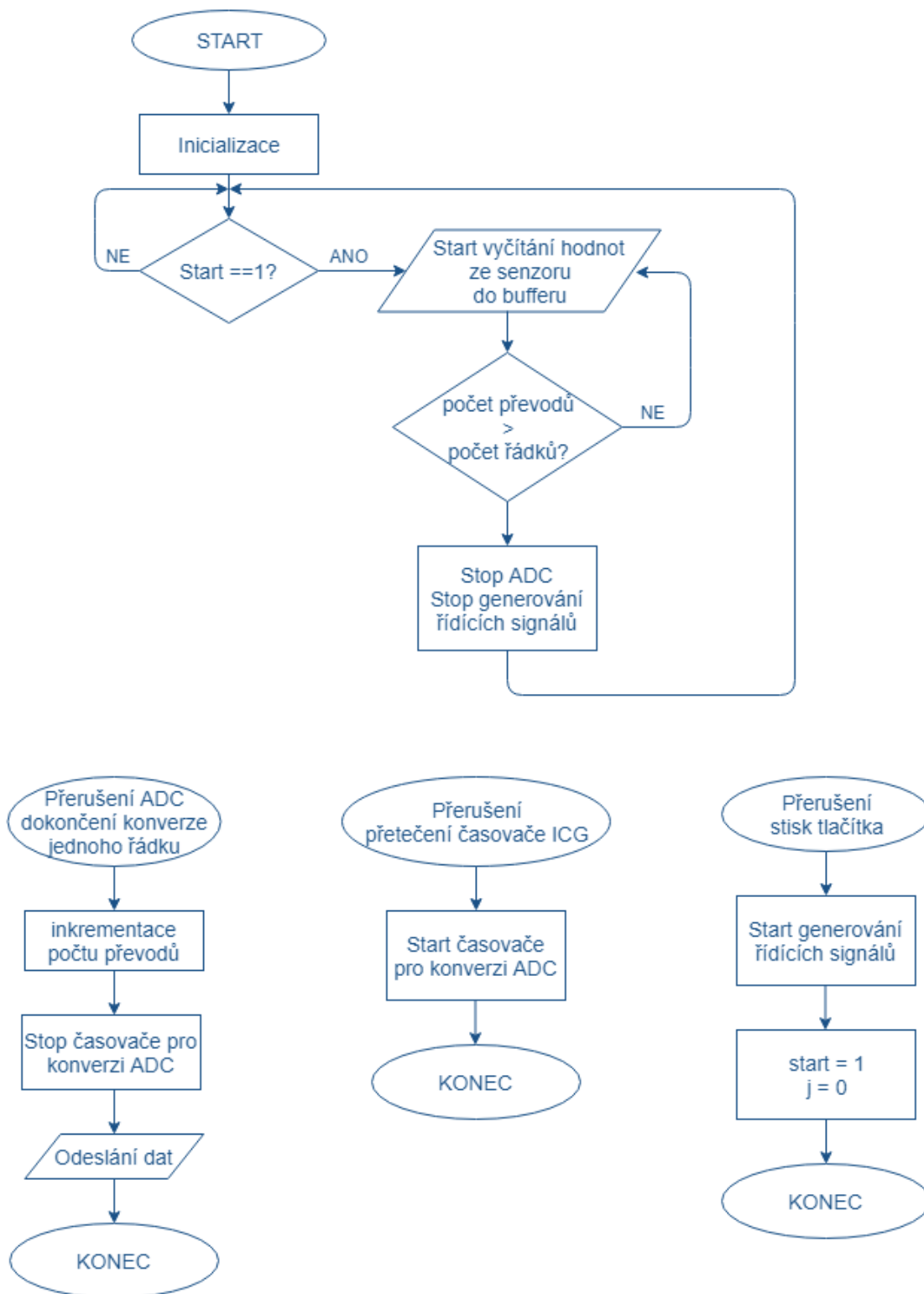
Návrat do hlavní smyčky programu

V hlavní smyčce programu je podmínka, která kontroluje, zda počet převedených řádků je nižší než počet řádků žádaných.

Pokud nebylo dosaženo žádaného počtu převedených řádků, všechny kroky se opakují, dokud není dosaženo požadovaného počtu.

V momentě dosažení žádaného počtu řádků dojde v hlavní smyčce programu k ukončení činnosti všech použitých časovačů. K opětovnému spuštění časovačů dojde až vyvoláním dalšího externího přerušení.

Následující vývojový diagram popisuje funkci algoritmu.

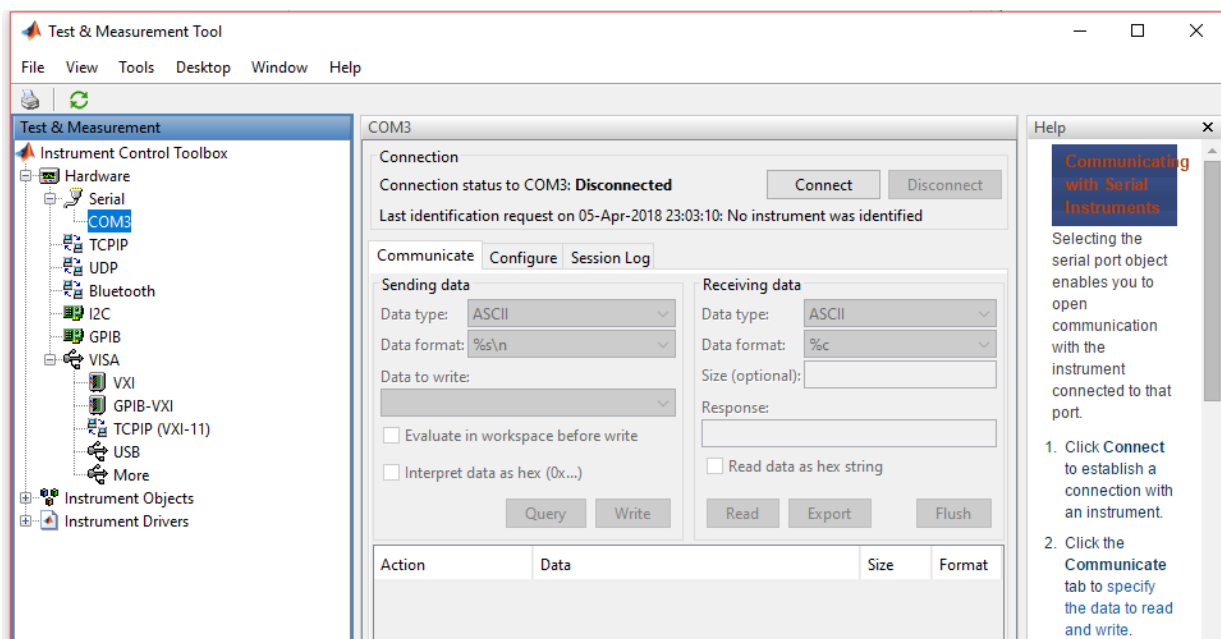


Obrázek 23 – Vývojový diagram

2.3.6.4 Příjem a zpracování dat

Program pro příjem dat v počítači byl vytvořen v Matlabu, který byl zvolen pro pohodlnou práci s větším množstvím dat a dobře zvládnutými maticovými operacemi, včetně vhodných nástrojů pro zpracování obrazu.

Na vytvoření kódu pro příjem dat bylo využito Instrument Control toolboxu, v kterém stačí zprovoznit sériovou komunikaci přes daný COM port. Na následujícím obrázku je ukázka toolboxu.



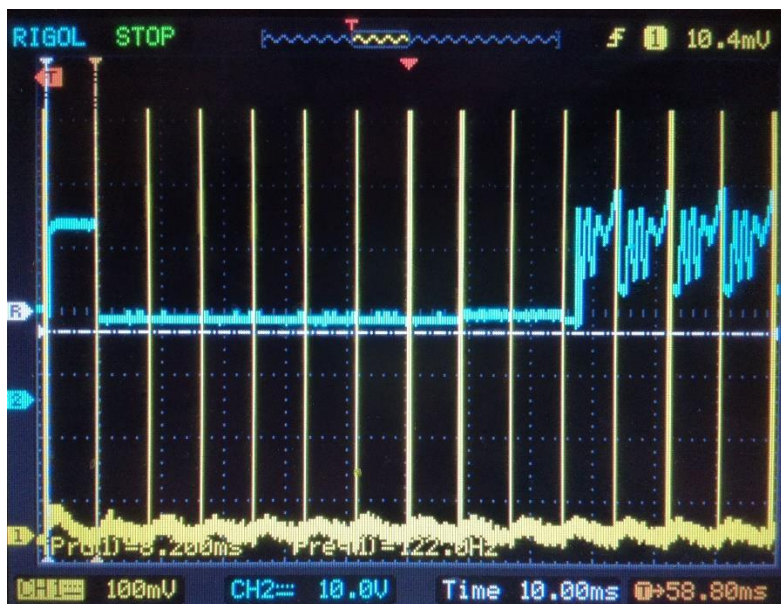
Obrázek 24 – Instrument Control Toolbox

Stačilo vyhledat připojená zařízení k PC a zvolit rozhraní, přes které je zařízení připojeno. Poté bylo navázáno spojení pomocí tlačítka Connect. Instrument Control toolbox má tři záložky. Komunikace, konfigurace a především protokol relace. V záložce komunikace se dá vyslat příkaz nebo naopak žádost o příjem dat. V záložce konfigurace se dají nastavit parametry relace, jako například přenosová rychlost, bitové uspořádání nebo velikost přijímaných dat. Poslední záložka protokol relace, všechny příkazy a nastavení zaznamenává ve formě kódu, který se dá následně používat jako šablona pro skript.

Výhodou tohoto způsobu zprovoznění komunikace je univerzálnost. Tímto způsobem se dá snadno zprovoznit například vzdálené ovládání například osciloskopu, nebo generátoru signálu přes LAN.

Samotný příjem dat nestačí. Jelikož je použita řádková kamera, bylo potřeba na další zpracování dat složit snímek z nasnímaných řádků jednoho objektu. A tím vytvořit obrazovou matici.

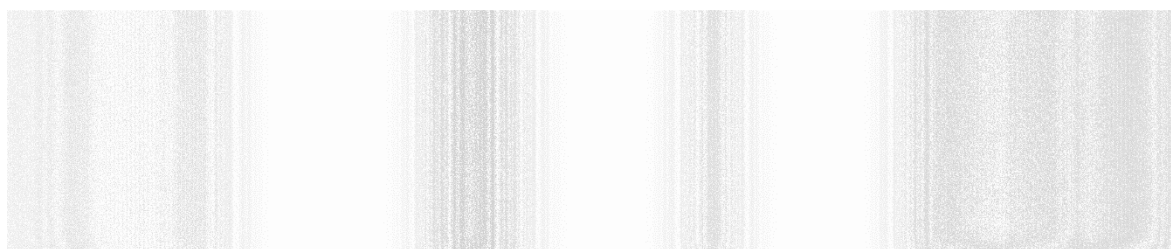
V aplikačních poznámkách TCD1304DG bylo uvedeno a při měření výstupu ověřeno, že při prvním spuštění snímače je nutno zahodit několik prvních řádků při prvním spuštění snímače. Na následujícím snímku z osciloskopu je vidět výstup (tyrkysová) ze snímače po prvním spuštění.



Obrázek 25 – Změřený výstup z obrazového senzoru

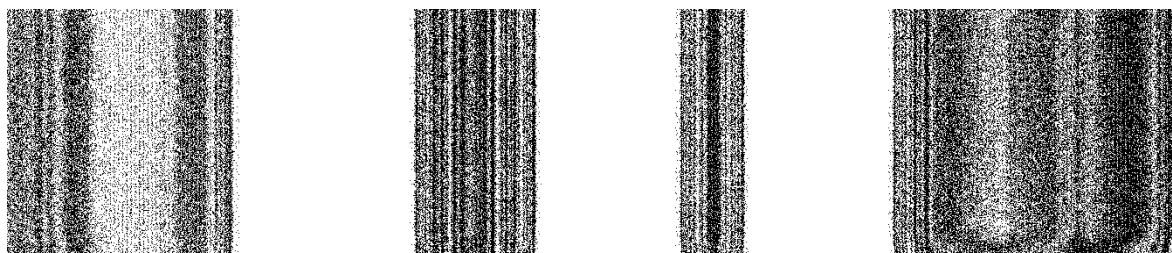
Při skládání snímku, je tedy několik prvních řádků vynecháno.

Obrazový senzor snímá černobíle. Po složení nasnímaných řádků, vzniklých ze vzorkovaných dat, byla získána obrazová matice obsahující hodnoty jasu. Obrazová matice je zobrazena na následujícím obrázku (Obrázek 26).



Obrázek 26 – Složený snímek z nasnímaných dat

Tato obrazová matice byla pomocí thresholdu převedena do binární podoby (Obrázek 27).



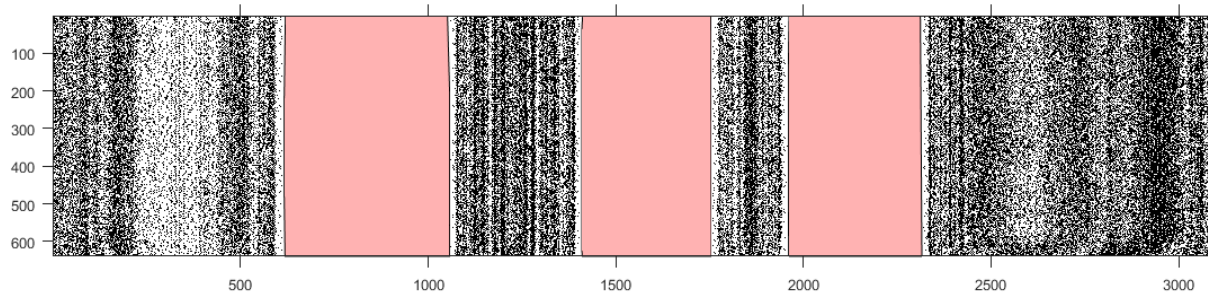
Obrázek 27 – Binární podoba obrázku

Morfologickými operacemi byla vytvořena maska, která sjednocuje plochy (Obrázek 28). Maska představuje zanesené plochy. Byla použita k vyhledání počtu bodů, reprezentujících zanesení. Z bodů je stanoveno procentuální zanesení.

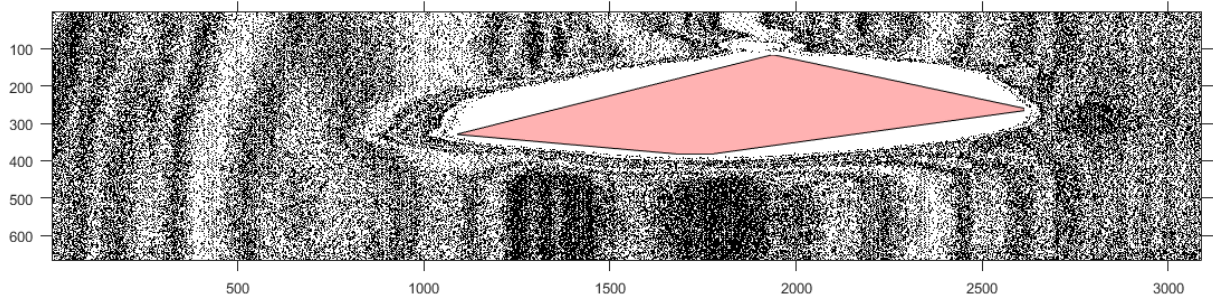


Obrázek 28 – Maska vytvořená morfologickými operacemi

Vzniklá maska je poté vykreslena červeně pro lepší představu do binárního obrázku, jak je znázorněno na následujících ukázkách (Obrázek 29, Obrázek 30).



Obrázek 29 – Stanovené procento zanesení 36,2 %



Obrázek 30 – Stanovené procento zanesení 13%

3 Snímky pořízené kamerou

3.1 Snímek celého objektu

Pro nasnímaní celého objektu řádkovou kamerou je třeba udržet konstantní rychlost pohybu kamery nebo tělesa. V cílové aplikaci je tento požadavek zajištěn mechanickou vazbou rotujícího kartáče a převodovky s pohonem. Počátek snímání je zajištěn indukčním snímačem.

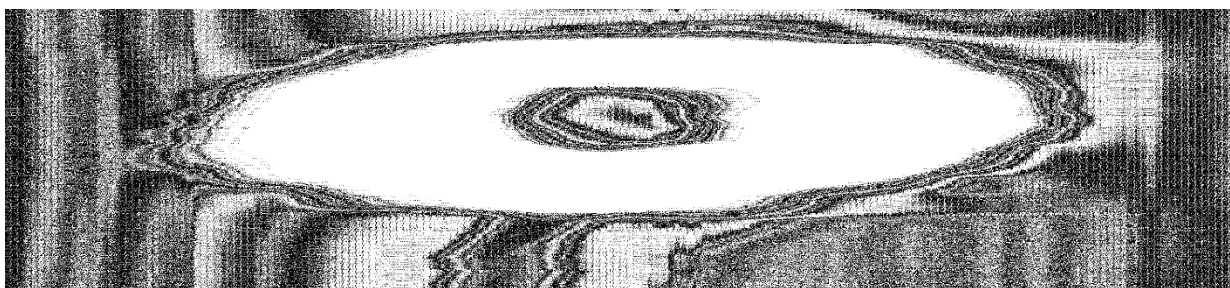
Pro potřeby oživení HW a optimalizace SW zařízení byly provedeny testy mimo cílový stroj. Na následujících obrázcích je nasnímano těleso, které bylo drženo a posouváno rukou, aby bylo zachyceno celé. Jelikož snímáný objekt byl držen v rukou, je na snímcích vidět, že došlo k deformaci snímku způsobenými nekonstantní rychlostí pohybu a jemnými otřesy ruky. Proto jsou další demonstrační snímky pořízené na nepohyblivém tělese. Těleso vždy představuje světlá oblast, snímek totiž nebyl invertován z toho důvodu, že jsem měla světlý podklad a tmavé objekty. V případě detekování zanesení rotujícího kartáče, by situace byla obráceně. Skript v Matlabu je však připraven na obě možnosti.

První obrázek je vždy složený snímek z řádků a druhý je již převedený do binární podoby pomocí prahu na zvýraznění kontrastu.

Na prvních dvou obrázcích je nasnímaná gumička do vlasů.

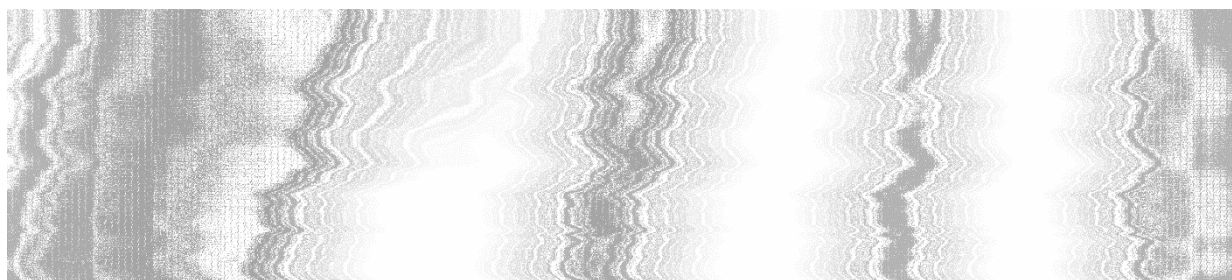


Obrázek 31 – Gumička nasnímaná kamerou

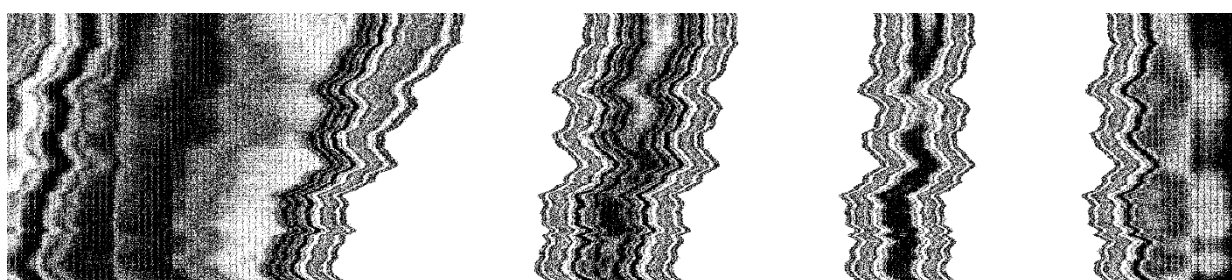


Obrázek 32 – Obrázek gumičky po úpravě v Matlabu

Na těchto snímcích je pokus o zachycení čar, nakreslených na papír, které jsou dále používány jako referenční snímaný objekt.



Obrázek 33 – Snímek tří čar na papíře



Obrázek 34 – Snímek tří čar na papíře po úpravě v Matlabu

3.2 Režimy snímání

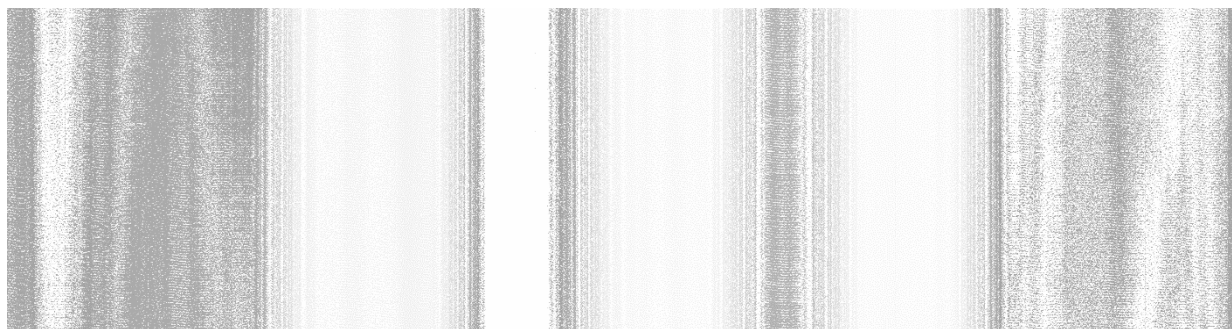
Po namontování objektivu na kameru, bylo zjištěno, že nejnižší citlivost snímání je v místnosti nedostačující. Bylo nutné navrhnout další režimy pro různou intenzitu osvětlení. Následující snímky demonstrují vliv zvoleného režimu a osvětlení. Z této části diplomové práce vyplývá, který režim je vhodný do jakých podmínek nebo naopak naprosto nevhodný. Při snímání tělesa se měnila intenzita osvětlení s denním časem. Ač je při testování snaha o odstínění denního světla (až na případy demonstrující chování režimu za denního světla). Tato část experimentu je velice důležitá, ne vždy je totiž možné denní světlo úplně blokovat.

Zároveň je vhodné znát chování snímacího zařízení v reálných podmínkách. Při měření a vytváření vyhodnocujícího algoritmu se totiž ukázalo, že na správné vyhodnocení snímku má největší vliv právě dobře zvolený režim a osvětlení. Snímek se sice daří vyhodnotit, i když je velmi světlý (nižší intenzita jasu). Co ale vadí výrazně, je nerovnoměrné rozložení osvětlení, které může způsobit světlé nebo příliš tmavé plochy v obraze nebo příliš intenzivní osvětlení, které může snímek znehodnotit úplně.

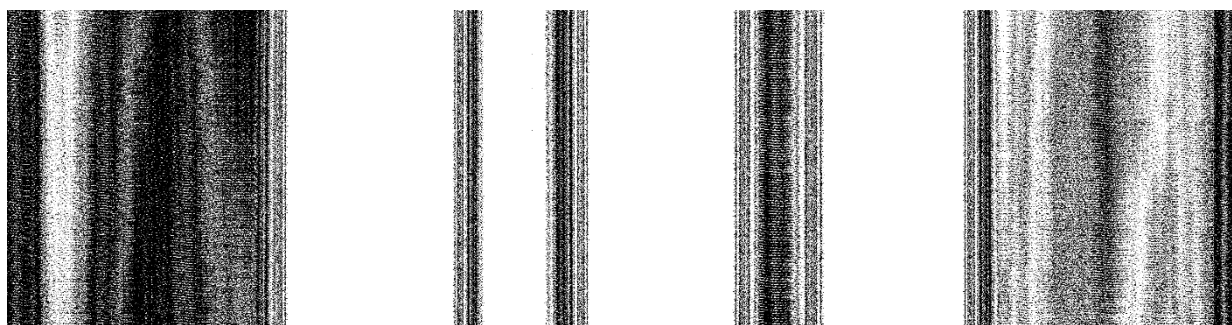
3.2.1 Režim 1

Režim s nejnižší citlivostí neboli nejkratší dobou expozice je vhodný pouze pro snímání za přímého denního světla, které dopadá přímo na snímáný objekt.

V místnosti s umělým osvětlením ani s reflektorem není senzor schopný nasnímat použitelné výsledky. Za denního přímého světla však funguje nejlépe, zatímco ostatní režimy selhávají. Na snímcích je dobře vidět i struktura papíru.



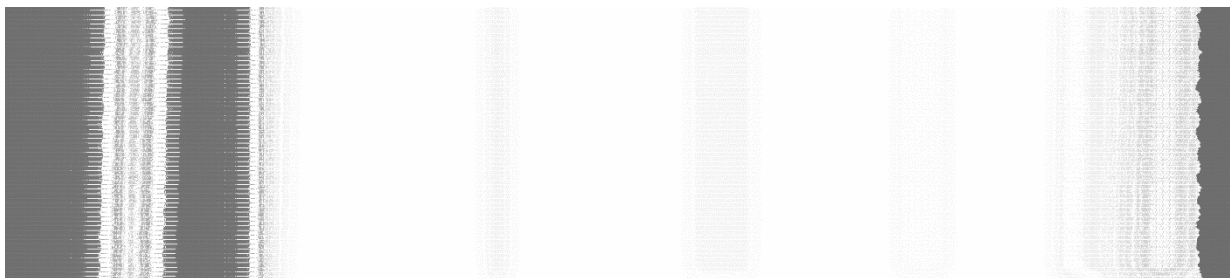
Obrázek 35 – Snímání objektu za přímého denního světla a použití režimu 1



Obrázek 36 – Snímek po úpravě v Matlabu

3.2.2 Režim 2

Na dalších snímcích je Režim 2 s vyšší citlivostí. Na dalších snímcích není snímáný objekt na přímém světle a je natočený jiným směrem. Není použito žádné stínění a zdroj světla je stále příliš silný. Tmavá barva reprezentuje ve skutečnosti světlou. Na snímku je vidět, že za takovýchto podmínek režim selhává a osvětlení je příliš silné.

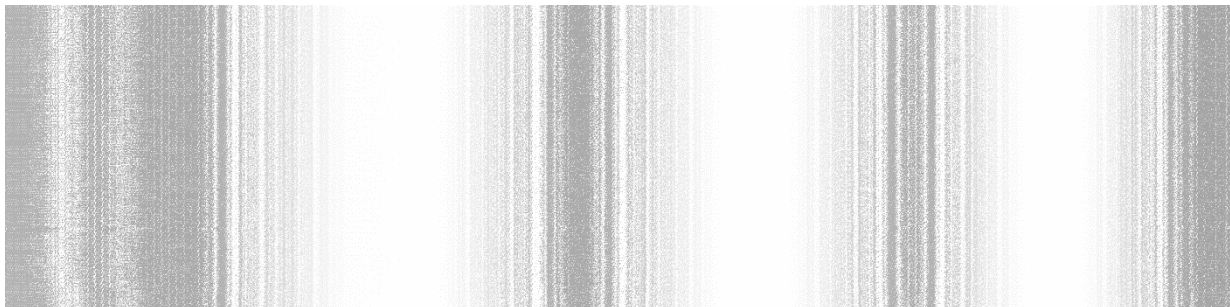


Obrázek 37 – Režim 2 za použití nepřímého denního světla

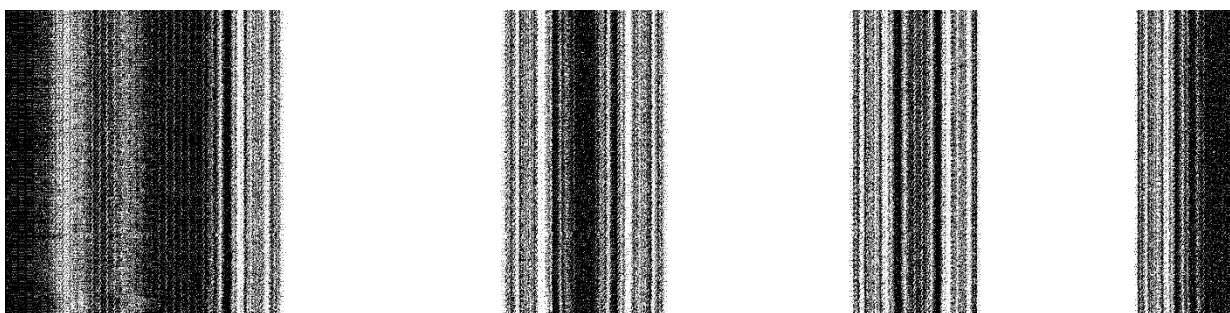


Obrázek 38 – Režim 2 za použití nepřímého denního světla po úpravě v Matlabu

Na následujících snímcích je použit Režim 2 za denního světla, které je odstíněno žaluziemi. Jedná se tedy o snímek v místnosti za použití umělého zdroje světla. Jako zdroj světla je použit reflektor.

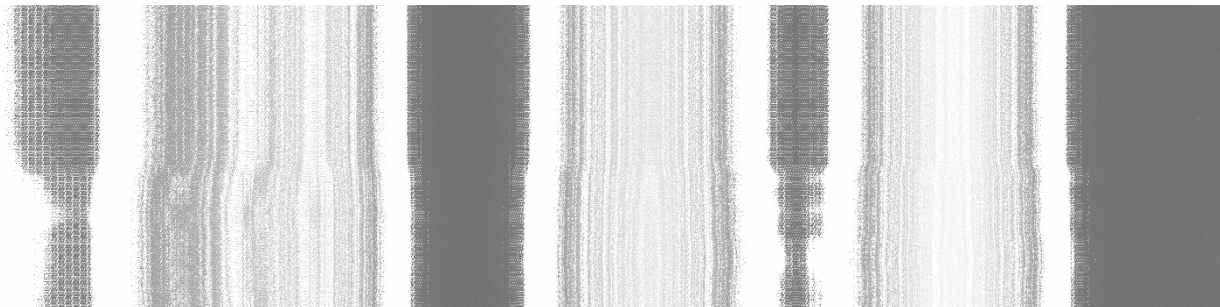


Obrázek 39 – Režim 2 v místnosti s použitím reflektoru jako zdroje osvětlení



Obrázek 40 – Režim 2 v místnosti s použitím reflektoru jako zdroje osvětlení po úpravě v Matlabu

Na dalším snímku je demonstrováno, že i vzdálenost umístěného reflektoru hraje velkou roli. Podmínky při snímání jsou stejné a to místnost s umělým osvětlením. Na těchto obrázcích byl reflektor umístěn příliš blízko a deformuje obraz.



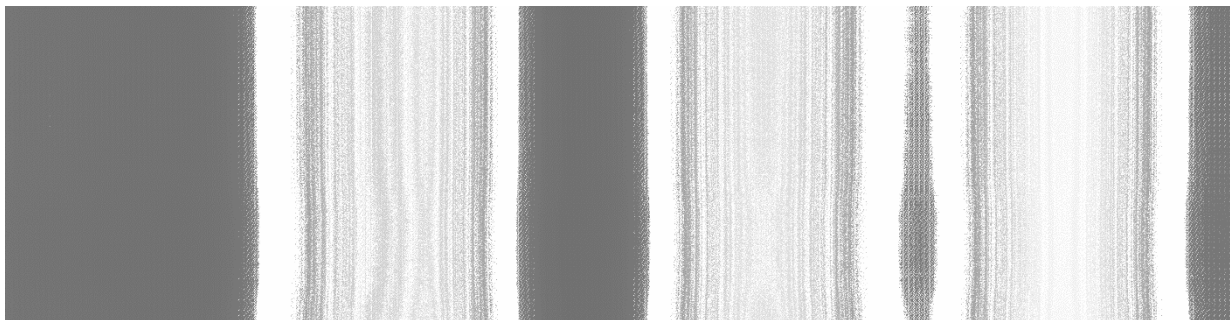
Obrázek 41 – Režim 2 s reflektorem umístěným příliš blízko



Obrázek 42 – Režim 2 s reflektorem umístěným příliš blízko po úpravě v Matlabu

3.2.3 Režim 3

Na těchto snímcích je vyzkoušen nejcitlivější Režim 3. První snímky jsou za přímého denního světla, kdy je dosaženo velkého kontrastu. Osvětlení je, ale příliš intenzivní a na snímku se tvoří bílé okraje okolo objektu a dochází k deformaci obrazu.



Obrázek 43 – Režim 3 za přímého denního světla

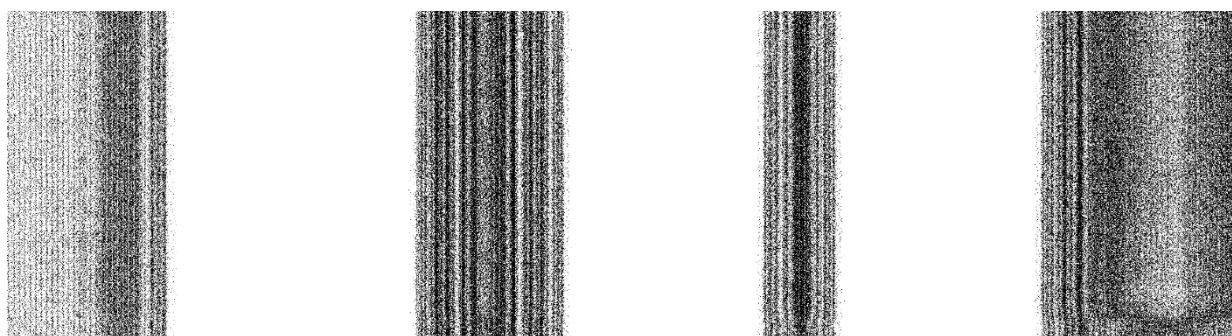


Obrázek 44 – Režim 3 za přímého denního světla po úpravě v Matlabu

Na dalších snímcích je nepřímé denní světlo bez odstínění. Snímky jsou pořizovány v místnosti bez jakéhokoliv umělého zdroje osvětlení. Při pořizování těchto snímků se jedná o jinou denní dobu než na předchozích obrázcích a do místnosti nezářilo tak silné světlo. Dosažené výsledky se ukázali jako dobré. První snímek sice působí světle, ale po úpravě v Matlabu byly vytaženy obrysy čar.

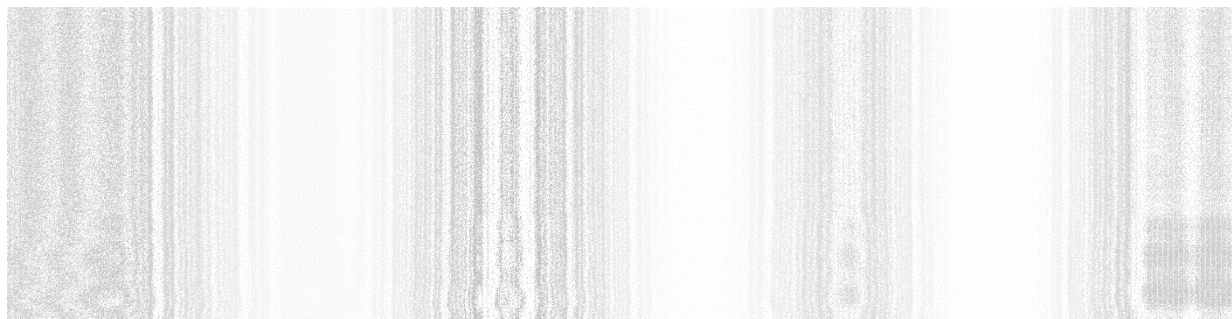


Obrázek 45 – Režim 3 za nepřímého denního světla

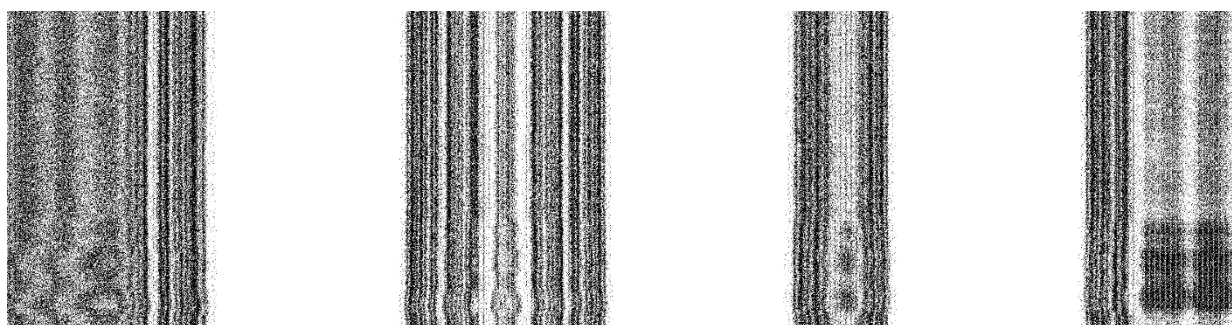


Obrázek 46 – Režim 3 za nepřímého denního světla po úpravě v Matlabu

Na následujících snímcích je Režim 3 v místnosti za použití reflektoru jako zdroje osvětlení. Reflektor je nutné použít z větší vzdálenosti. Jinak by mohl být příliš silným zdrojem osvětlení. Při správném umístění reflektoru jsou získány podobné výsledky jako v předchozím případě.



Obrázek 47 – Režim 3 za umělého osvětlení umístěného ve větší vzdálenosti

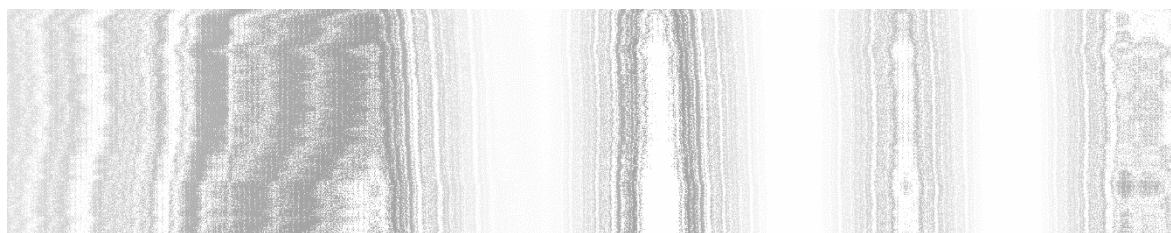


Obrázek 48 – Režim 3 za umělého osvětlení umístěného ve větší vzdálenosti

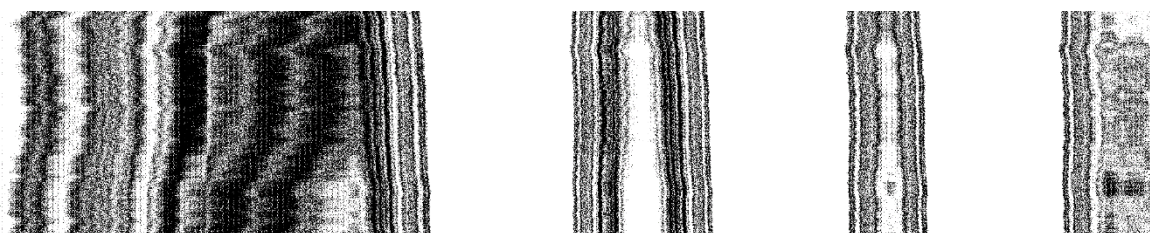
3.3 Vady obrazu při nevhodném umístění sestavy

Při pořizování snímků, bylo zřejmé, že kromě deformací obrazu pohybem, nebo intenzitou světla či nevhodně zvolenou citlivostí, mělo také umístění osvětlení velký vliv. Na dalších snímcích je zachyceno nevhodné umístění reflektoru a vliv nerovnoměrného rozložení jasu na výsledný snímek. Obrázky slouží jako demonstrační a proto byl reflektor umístěn blízko pro zesílení efektu.

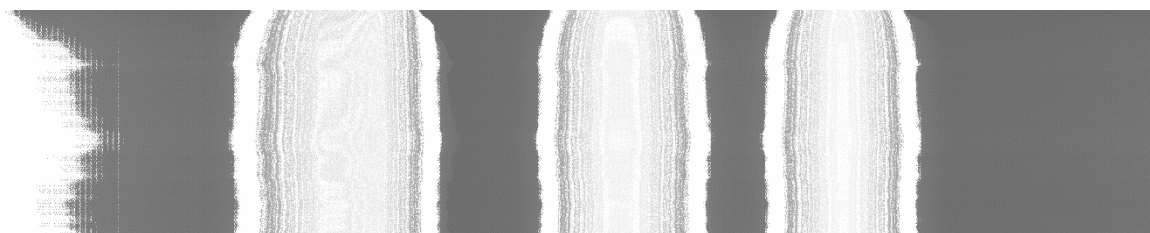
Na těchto snímcích je reflektor umístěn ze shora. Vlivem nerovnoměrného rozložení nasvícení objektu dojde k zúžení čar.



Obrázek 49 – Reflektor umístěn ze shora



Obrázek 50 – Reflektor umístěn ze shora po úpravě v Matlabu

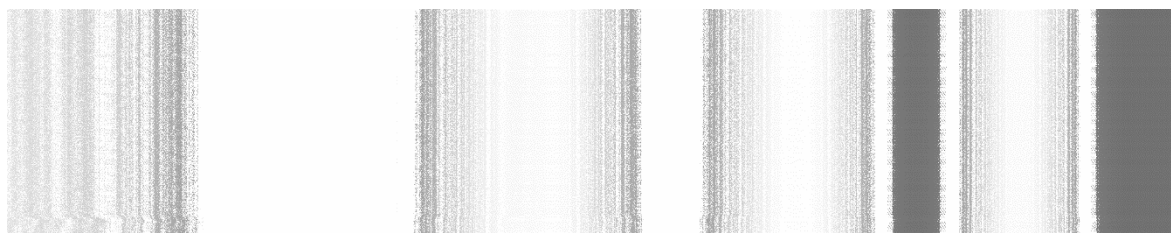


Obrázek 51 – Reflektor umístěn ze shora a blíž ke snímanému objektu

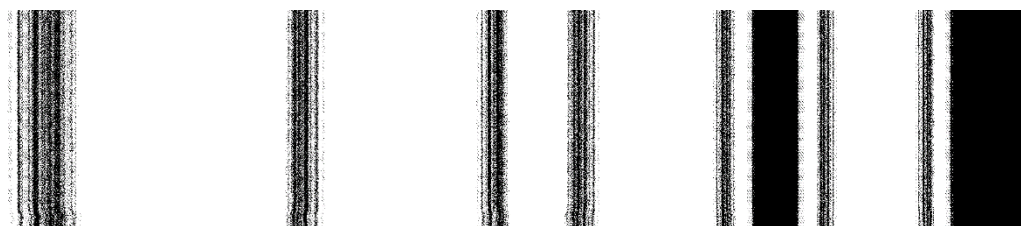


Obrázek 52 – Reflektor umístěn ze shora po úpravě v Matlabu

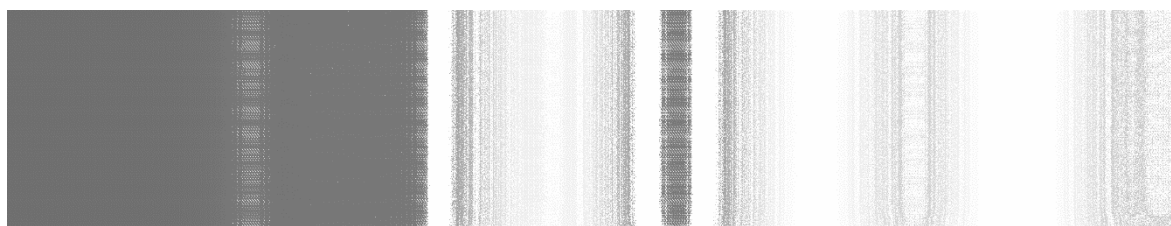
Zde je reflektor umístěn napravo a poté nalevo od snímaného objektu. Na obrázcích je vidět, z které strany je reflektor zrovna umístěn, protože na té straně je výraznější kontrast.



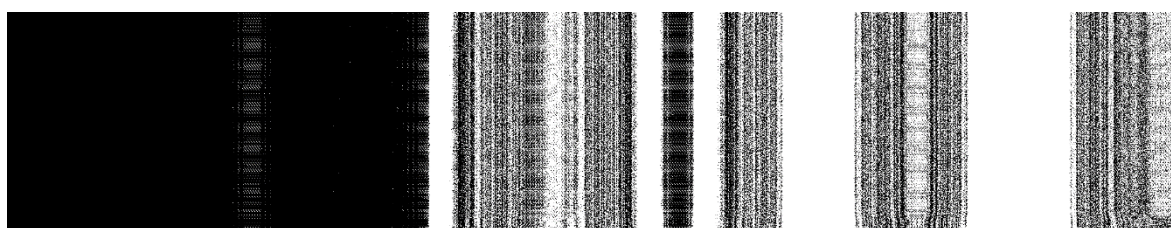
Obrázek 53 – Reflektor umístěn na pravé straně



Obrázek 54 – Reflektor umístěn na pravé straně po úpravě v Matlabu



Obrázek 55 – Reflektor umístěn na levé straně



Obrázek 56 – Reflektor umístěn na levé straně po úpravě v Matlabu

Závěr

Všechny zadané cíle práce se podařilo splnit. V první části práce byl proveden rozbor možných řešení. Plošná snímací kamera byla vyloučena vzhledem k vývoji, který již na pracovišti FEI probíhá.

Bylo navrženo nové snímací zařízení s vlastní navrženou DPS s lineárním obrazovým senzorem TCD1304DG, který byl pro tuto aplikaci mnohem vhodnější volbou. Zvolený senzor má více než 4x lepší rozlišení v horizontální ose a ve vertikální ose záleží pouze na uživateli. S lepším fotografickým objektivem s nastavitelnými parametry pro ostření a podobně.

Hlavním přínosem diplomové práce je popis a ovládání obrazového snímače a tedy vývoj algoritmu pro nové snímací zařízení. Včetně jeho celého sestavení od výběru objektivu až po vyrobení krytu pro kameru.

Vzhledem k rozsahu této komplexní problematiky bylo upuštěno od konfigurace externí DRAM a data jsou vyčítána do interní SRAM CPU. Vzhledem k nízkému počtu bodů lineárního snímače je toto řešení akceptovatelné. Interní SRAM poskytuje teoreticky prostor až pro 65 řádků v plném rozlišení snímače.

Synchronizace kamery se snímaným kartáčem je řešena externím přerušením od indukčního čidla.

Pro vizualizaci snímku a vyhodnocení dat byl vyvinut algoritmus v jazyce Matlab.

Prostor pro modifikaci je zejména ve vyhodnocujícím algoritmu. Dosavadní je sice dostačující, ale na poměrně jednoduchém principu. Zato je algoritmus rychlý a jeho princip je univerzální, protože stanovuje procentuální poměr bílé a černé v obraze pomocí binarizace obrazu a morfologických operací. Další modifikace budou provedeny na základě výsledků testů v ostrém provozu na česacím stroji.

Během vývoje zařízení bylo zjištěno při ověřování funkčnosti experimentálním snímáním, že osvětlení hraje velkou roli. Také expoziční doba měla významný vliv, proto byly vypočteny tři snímací režimy s různou citlivostí snímání, které byly testovány v závěru práce. Testované režimy byly použity při různých světelných podmínkách a z této části vyplynula jejich vhodnost použití. V závěru práce byly zároveň demonstrovány případy nevhodné instalace osvětlení, například umístěného příliš z blízka.

Literatura

- [1] *Dokumentace TCD1304DG* [online]. Japanese: Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, 2004 [cit. 2018-09-02]. Dostupné z: <https://tcd1304.files.wordpress.com/2016/07/tcd1304dg.pdf>
- [2] MALTONI, Davide. *Handbook of fingerprint recognition*. 2nd ed. London: Springer, c2009. ISBN 9781848822542.
- [3] *NDT Education Resource Center: The Collaboration for NDT Education* [online]. USA: Iowa State University, 2014 [cit. 2018-09-02]. Dostupné z: www.ndt-ed.org
- [4] *Stefano Meroli: an engineer at CERN* [online]. 2015 [cit. 2018-09-02]. Dostupné z: http://meroli.web.cern.ch/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html
- [5] DOBROVOLNÝ, Martin. *Principy snímání obrazové a zvukové informace, principy snímacích prvků, přenos obr. signálu*. Pardubice, 2010. Výukový materiál. UPCE.
- [6] *ROBOTIQ* [online]. Canada: ROBOTIQ, 2016 [cit. 2018-09-02]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/1d-2d-3d...-what-kind-of-vision-system-should-i-use-for-my-application>
- [7] *Teledyne DALSA: CCD vs. CMOS* [online]. Canada: A Teledyne Technologies company, 2011 [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: <https://www.teledynedalsa.com/en/learn/knowledge-center/ccd-vs-cmos/>
- [8] *Atesystem* [online]. Ostrava: ATEsystem, 2011 [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: <http://kamery.atesystem.cz/know-how/line-scan-velky-pruvodce-radkovymi-kamerami/dil-1-radkove-kamery-typy-a-technologie/>
- [9] *Průmyslové-kamery.cz* [online]. Praha: ELCOM, 2011 [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: <https://www.prumyslove-kamery.cz/clanky-a-aktuality/clanky?pg=443>
- [10] *Discovery kit with STM32F407VG MCU: User manual* [online]. STMicroelectronics, 2017 [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/70/fe/4a/3f/e7/e1/4f/7d/DM00039084.pdf/files/DM00039084.pdf/jcr:content/translations/en.DM00039084.pdf

[11] *Application Notes and Technical Articles* [online]. Japanese: Toshiba [cit. 2018-09-03]. Dostupné z: https://tcd1304.files.wordpress.com/2016/07/c2_all1.pdf

