



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

HDR (HIGH DYNAMIC RANGE) SNÍMÁNÍ S ŘÁDKOVOU KAMEROU

HDR (HIGH DYNAMIC RANGE) IMAGE CAPTURE USING LINE-SCAN CAMERA

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Říha

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Peter Honec, Ph.D.

BRNO 2022

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Radim Říha

ID: 221013

Ročník: 3

Akademický rok: 2021/22

NÁZEV TÉMATU:

HDR (high dynamic range) snímání s řádkovou kamerou

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Vytvořte přípravek pro podporu HDR snímání dat pomocí řádkové kamery pomocí dvou metod. 1. řízením délky expozice kamery externím pulsem a 2. řízením délky záblesku triggerovaného světla. Pro realizaci zvolte vhodný hardware pro časování – mikroprocesor, hradlové pole apod.

1. Seznamte se s řádkovými kamerami a principem jejich řízení a snímání.
2. Navrhněte způsob řízení expoziční doby nebo délky záblesku externího osvětlení pulsem.
3. Vyberte vhodný hardware (mikroprocesor PIC, Atmel, ST... nebo hradlové pole) a osvětlení.
4. Sestrojte HW pro řízení (řadič) délky expozice nebo délky záblesku.
5. Otestujte, nasnímejte HDR obraz s různými expozicemi nebo různými osvětleními.
6. Z nasnímaných dat vytvořte HDR obraz.
7. Zhodnoťte

DOPORUČENÁ LITERATURA:

HLAVAC V., SONKA M., BOYLE R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, ISBN 978-0495082521

Termín zadání: 7.2.2022

Termín odevzdání: 23.5.2022

Vedoucí práce: Ing. Peter Honec, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá návrhem systému pro řízení řádkových kamer, který umožňuje záznam HDR snímků. Práce nejprve seznamuje s řádkovými kamerami a principem HDR snímání. Následuje návrh řídicího systému a vysvětlení funkcionality jednotlivých signálů a rozhraní.

Dále budou vybrány komponenty a navržen kontroler jako mikrokontroler s podpůrnými obvody, umožňujícími komunikaci a řízení ostatních bloků systému.

Následuje návrh, osazení a oživení DPS kontroleru spolu s vytvořením krabičky.

Další část práce popíše firmware, který byl vyvíjen a doladován během návrhu hardware.

Také bude navržena aplikace určená k řízení systému a zpracování obrazu.

Na závěr dojde k otestování funkcionality systému s prototypem osvětlení a zhodnocení.

Klíčová slova

Řádková kamera, vysoký dynamický rozsah (HDR), řízení expoziční doby, řízení délky záblesku, zpracování obrazu

Abstract

This bachelor's thesis is focused on designing a system for controlling line scan cameras, which allows HDR image acquisition. The thesis first explains line scan cameras and the principle of HDR acquisition. Design of the control system and explanation of the individual signals and interfaces follows.

Next the components are chosen, and the controller is designed as a microcontroller with additional circuitry, allowing for communication and control of other system blocks.

Design, assembly, and evaluation of the controller PCB including the design of the box follows.

The next part of the thesis explains the firmware, which was designed and tweaked during the hardware design stage.

The application for controlling the system and image processing is designed next.

In the final part, the whole system functionality is tested with a prototype of the lighting and the system is evaluated.

Keywords

Line scan camera, high dynamic range (HDR), exposure time control, flash duration control, image processing

Bibliografická citace

ŘÍHA, Radim. *HDR (high dynamic range) snímání s řádkovou kamerou* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142664>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Peter Honec.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	Radim Říha
VUT ID studenta:	221013
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2021/22
Téma závěrečné práce:	HDR (high dynamic range) snímání s řádkovou kamerou

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 22. května 2022

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM TABULEK.....	9
ÚVOD	10
1. ŘÁDKOVÉ KAMERY, PRINCIP JEJICH ŘÍZENÍ A SNÍMÁNÍ.....	12
1.1 PRINCIP ŘÁDKOVÝCH KAMER.....	12
1.2 TYPY ŘÁDKOVÝCH KAMER.....	12
1.2.1 Monochromatické kamery.....	12
1.2.2 Barevné kamery s optickým hranolem	12
1.2.3 Trilineární kamery	13
1.2.4 Kamery s barevným kódováním	14
1.3 ŘÍZENÍ ŘÁDKOVÝCH KAMER.....	16
1.4 HDR SNÍMÁNÍ S ŘÁDKOVOU KAMEROU.....	16
2. ZPRACOVÁNÍ HDR OBRAZU	18
2.1 GENEROVÁNÍ RADIČNÍCH MAP	18
2.2 MAPOVÁNÍ TONALITY	19
3. NÁVRH ŘÍZENÍ EXPOZIČNÍ DOBY A DÉLKY ZÁBLESKU OSVĚTLENÍ	21
4. VÝBĚR VHODNÉHO HARDWARE	22
4.1 ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY	22
4.1.1 Řídicí obvod	22
4.1.2 USB-UART převodník.....	23
4.1.3 Logické obvody	23
4.1.4 RS-422 transceiver.....	23
4.2 KONEKTORY.....	23
5. NÁVRH A SESTROJENÍ ŘÍDICÍHO HW	24
5.1 NÁVRH KONTROLERU	24
5.1.1 USB – UART převodník	24
5.1.2 RS-422 transceiver.....	24
5.1.3 Demultiplexor výstupu světla	25
5.1.4 Multiplexor HW vstupu spouštění	26
5.1.5 Konektory pro připojení kamery, osvětlení a externích signálů.....	27
5.1.6 Mikrokontroler.....	27
5.1.7 Výsledná DPS.....	28
5.2 NÁVRH DPS KONEKTORŮ	30
5.2.1 Propojení konektorů s kontrolerem.....	30
5.2.2 Výsledná DPS.....	30
5.3 NÁVRH KRABÍČKY.....	32
6. NÁVRH FIRMWARE A POPIS NASTAVENÍ	33
6.1 BĚH PROGRAMU	33
6.2 NASTAVENÍ KONTROLERU	35

6.3	PŘÍKLADY TYPICKÝCH NASTAVENÍ A PRŮBĚHŮ SIGNÁLŮ	36
7.	NÁVRH APLIKACE PRO ZPRACOVÁNÍ OBRAZU	38
7.1	POSTUP ZPRACOVÁNÍ OBRAZOVÝCH DAT	38
7.2	UI.....	39
8.	TESTY SYSTÉMU	41
9.	ZÁVĚR.....	47
	LITERATURA.....	48
	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	50
	SEZNAM PŘÍLOH.....	52

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Architektura kamery s optickým hranolem [5].....	13
1.2	Architektura trilineární kamery Piranha4 Color [15]	13
1.3	Konfigurace Bayerova filtru kamery Basler sprint [17].....	14
1.4	Konfigurace filtru kamery E2v ELIIXA+ 16K/8K CP [18]	15
1.5	Režimy záznamu kamery E2v ELIIXA+ 16K/8K CP [18]	15
1.6	Příklad složení HDR obrazu z několika snímků [6]	17
2.1	Funkce odezvy kamery.....	18
2.2	Váhová funkce hat.....	19
2.3	Křivka logaritmické globální komprese	20
3.1	Blokové schéma řídicího systému.....	21
4.1	Konektory kontroleru [10].....	23
5.1	Schéma USB – UART převodníku.....	24
5.2	Schéma RS-422 transceiverů.....	25
5.3	Schéma demultiplexoru.....	26
5.4	Schéma multiplexoru.....	26
5.5	Schéma plošek pro připojení DPS konektorů	27
5.6	Schéma mikrokontroleru	28
5.7	Vrchní vrstva DPS kontroleru	29
5.8	Spodní vrstva DPS kontroleru	29
5.9	Schéma konektorů	30
5.10	Vrchní vrstva DPS konektorů.....	30
5.11	Spodní vrstva DPS konektorů	31
5.12	Model krabičky	32
6.1	Vývojový diagram firmware	33
6.2	Blokové schéma čítače TC0 mikrokontroleru [8]	34
6.3	Očekávané průběhy signálů – jeden pulz	37
6.4	Očekávané průběhy signálů – tři pulzy	37
7.1	Zpracování barevného HDR snímku	39
7.2	UI aplikace	40
8.1	Měřené průběhy signálů – tři pulzy.....	42
8.2	Měřené průběhy signálů – detail	43
8.3	Snímky baterie – délka expozice a délka záblesku.....	43
8.4	Snímky kondenzátoru – výběr doby expozice.....	44
8.5	Snímky baterie – zašumělý obraz.....	45
8.6	Snímky baterie – HDR zpracování.....	45
8.7	Snímky baterie – složení RGB	46
8.8	Snímky baterie – porovnání barevných snímků	46

SEZNAM TABULEK

4.1	Parametry mikrokontroleru ATmega328PB [8]	22
5.1	Pravdivostní tabulka demultiplexoru.....	26
5.2	Funkce pinů konektorů.....	31
6.1	Seznam nastavení kontroleru.....	35
6.2	Význam hodnot enumerovaných nastavení.....	36

ÚVOD

Kamerové systémy se v dnešní době stávají standardem v mnoha oblastech průmyslu, dopravy, lékařství apod. Bez dohledu automatizovaných kamerových systémů je dnes nepředstavitelná většina produkce. Jednou z podoblastí kamerových systémů jsou systémy založené na řádkových kamerách (line-scan), které se s výhodou oproti plošným kamerám (area-scan) uplatňují pro snímání s vysokým rozlišením, snímání pohybujícího se materiálu, letecké/družicové skenování velkých oblastí atd.

Bohužel už není u řádkových kamer pravidlem přítomnost HDR režimu (high dynamic range) nebo barevného snímání při zachování nízké pořizovací ceny kamery.

Cílem této bakalářské práce je navrhnout řídicí systém, který umožní pomocí klasické řádkové kamery snímat HDR obraz. Systém bude sloužit zejména ke snímání obrazu ve zhoršených a měnících se světelných podmínkách, nebo ke snímání scén s velkým dynamickým rozsahem. Příkladem využití je snímání identifikačních štítků vlaků. Štítky mohou být různě osvětleny, opotřebený, nebo mohou mít různou odrazivost. Kvalita snímků bez použití HDR tedy závisí na správném nastavení expoziční doby, které se může výrazně měnit s každým snímkem.

Hardware byl uzpůsoben zejména poskytnuté kameře, která má možnost ovládání délky expozice délkou pulzu. Je ale implementována i možnost řízení délky záblesku externího osvětlení, která umožňuje použití i s kamerami bez řízení délky expozice pulzem. Řízení externího osvětlení také umožňuje snímat barevný obrázek černobílými kamerami pomocí několika světél o různých vlnových délkách a následného skládání barevných složek.

Kapitola 1 popisuje technologii a využití řádkových kamer, podrobněji způsob jejich řízení a HDR snímání.

Kapitola 2 se zabývá použitými metodami zpracování obrazu, které umožňují vytváření HDR snímku z několika LDR snímků a jeho zobrazení.

Hrubý návrh byl proveden v kapitole 3. Bylo vytvořeno a odsouhlaseno blokové schéma systému, na kterém je založený celý návrh HW. Byla také vytvořena kostra firmware, která sloužila k ověření základní funkcionality.

Kapitola 4 pojednává o výběru vhodných součástek. Výběr ovlivňovaly především předchozí zkušenosti s jednotlivými komponentami, což výrazně urychlilo návrh.

Návrh celého řídicího obvodu popisuje kapitola 5. DPS byla z důvodu montáže konektorů a jednodušších případných budoucích změn rozdělena na dvě samostatné. Schéma je rozděleno do bloků, jejichž funkčnost je popsána v podkapitolách. Dále byl proveden návrh obou DPS, které byly zaslány do výroby a ručně osazeny.

Následovalo oživení a otestování kontroleru s kostrou firmware a dokončení firmware, popsaného v kapitole 6. Poté proběhl i návrh krabičky, do které byl celý kontroler zabudován.

Následně byla vytvořena aplikace pro PC umožňující nastavení kontroleru a kamery, záznam a zpracování obrazu v reálném čase a generování barevných snímků.

Závěrem proběhly testy systému, měření časových průběhů, snímání obrazu různými způsoby a zhodnocení celé práce.

1. ŘÁDKOVÉ KAMERY, PRINCIP JEJICH ŘÍZENÍ A SNÍMÁNÍ

1.1 Princip řádkových kamer

Hlavní rozdíl mezi standardní plošnou kamerou a řádkovou kamerou je ve způsobu snímání obrazu. Zatímco plošná kamera zachycuje celý snímek v jednom kroku, řádková kamera snímá pouze jediný řádek pixelů. Pro zachycení celého objektu je nutné, aby se objekt nebo kamera pohybovala. Snímek je následně vytvářen spojováním jednotlivých řádků. Často je využíváno osvětlení s vysokou svítivostí pro minimalizaci nutné doby expozice, což dovoluje maximalizovat frekvenci zachycování řádků a možnou rychlost pohybu.

Každý pixel v době expozice akumuluje náboj úměrný dopadajícímu světlu. Následně jsou náboje zachyceny registrem, zpracovány a digitalizovány. Mezitím probíhá expozice následujícího řádku. Frekvence vyčítání jednotlivých řádků se nazývá „line rate” a je vyjadřována v kHz.

Řádkové kamery vynikají ve vytváření plošných snímků válcových objektů, snímání velmi velkých objektů s velkým rozlišením a snímání objektů v neustálém pohybu. Aplikace řádkových kamer jsou široké a různorodé. Především jsou výhodné pro kontrolu materiálu jako např. papír, polovodiče, solární panely, role kovu, vláken a textilií [1].

1.2 Typy řádkových kamer

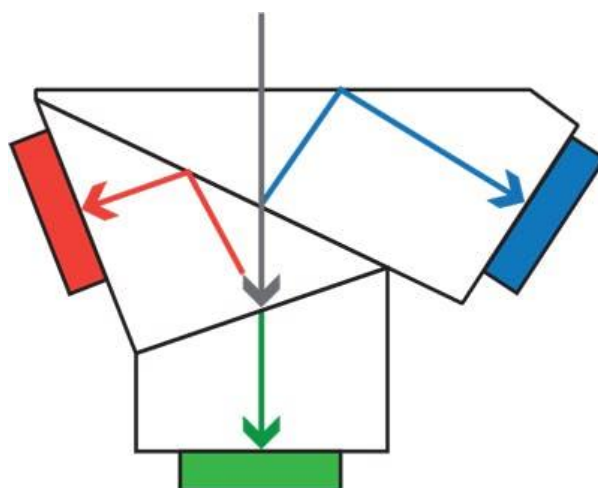
1.2.1 Monochromatické kamery

Monochromatické řádkové kamery snímají pouze černobílý obraz, ale přesto jsou stále oblíbené. Hodí se ke kontrole materiálu, třídění, balení a aplikacím souvisejícím s dopravou. Mívají často větší bitovou hloubku, lepší dynamický rozsah a menší spotřebu než srovnatelné barevné kamery.

Typické šířkové rozlišení je 1 tisíc až 16 tisíc pixelů a typický line rate v řádu desítek až stovek kHz [3] [4].

1.2.2 Barevné kamery s optickým hranolem

Jedná se o nejstarší metodu snímání barevného obrazu řádkovou kamerou. Kamera obsahuje optický hranol, který rozkládá dopadající světlo na červenou, zelenou a modrou složku. Ty dopadají na 3 samostatné senzory. Rané verze těchto kamer byly náchylné k vibracím, a proto nebyly velmi oblíbené. Provedení znázorňuje obrázek 1.1 [5].



Obrázek 1.1 Architektura kamery s optickým hranolem [5]

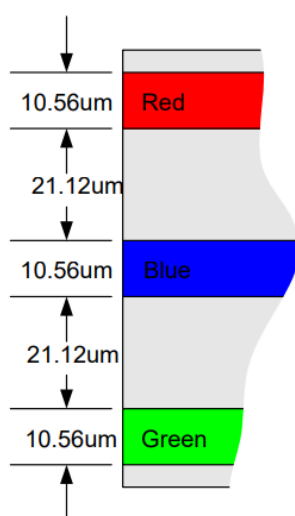
1.2.3 Trilineární kamery

Tyto kamery využívají senzorů se třemi řádky pixelů na jednom substrátu. Rozdělení barev tímto způsobem je ovšem problematické z důvodu prostorového posuvu jednotlivých složek, který je nutné kompenzovat.

Některé řádkové kamery, jako např. Teledyne DALSA Piranha4 Color, kompenzují prostorový posun automaticky snímáním jednotlivých složek s určitým časovým odstupem. Pro správné fungování je však nutné, aby se snímáný objekt za jednu periodu snímání řádku posunul o vzdálenost shodnou s šířkou pixelu (pixel musí být čtvercový).

Původní trilineární kamery využívaly CCD čipů, později CMOS čipů. CMOS technologie přinesla výrazné zvýšení rychlosti snímání za nižší cenu.

Jedná se o výrazně robustnější technologii než rozklad optickým hranolem. [5][15]

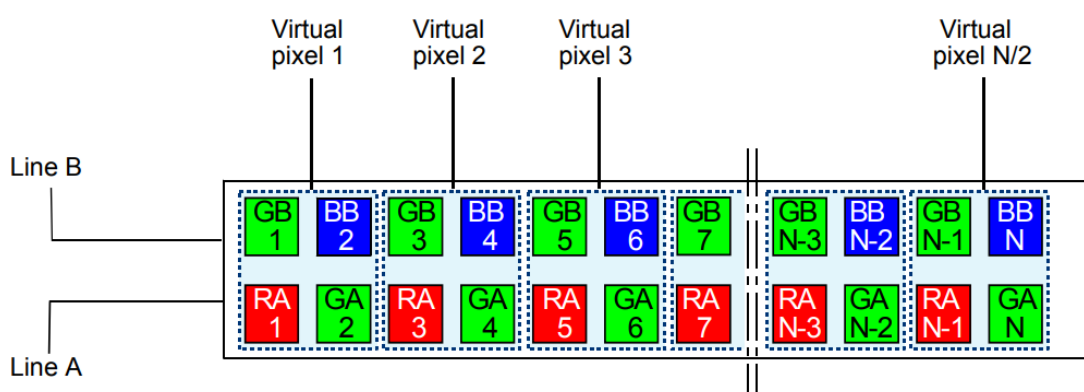


Obrázek 1.2 Architektura trilineární kamery Piranha4 Color [15]

1.2.4 Kamery s barevným kódováním

Barevné řádkové kamery často využívají Bayerova filtru. Jedná se o uspořádání jednoho modrého, jednoho červeného a dvou zelených filtrů (také označováno RGBG), které bere v potaz zvýšenou citlivost lidského oka na zelenou barvu.

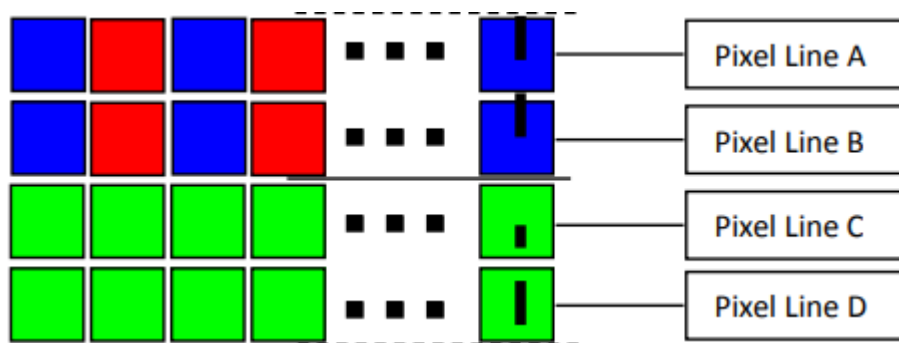
Data z takového senzoru lze zpracovávat několika způsoby. Barevné složky lze přímo získat ze čtveřic subpixelů, čímž ovšem klesne výsledné rozlišení na polovinu. Pokud je vyžadováno plné rozlišení, lze použít některou z metod debayerizace (také demozaikování), která interpoluje hodnoty barevných složek nepřítomných v určitém pixelu na základě okolních pixelů. [16]



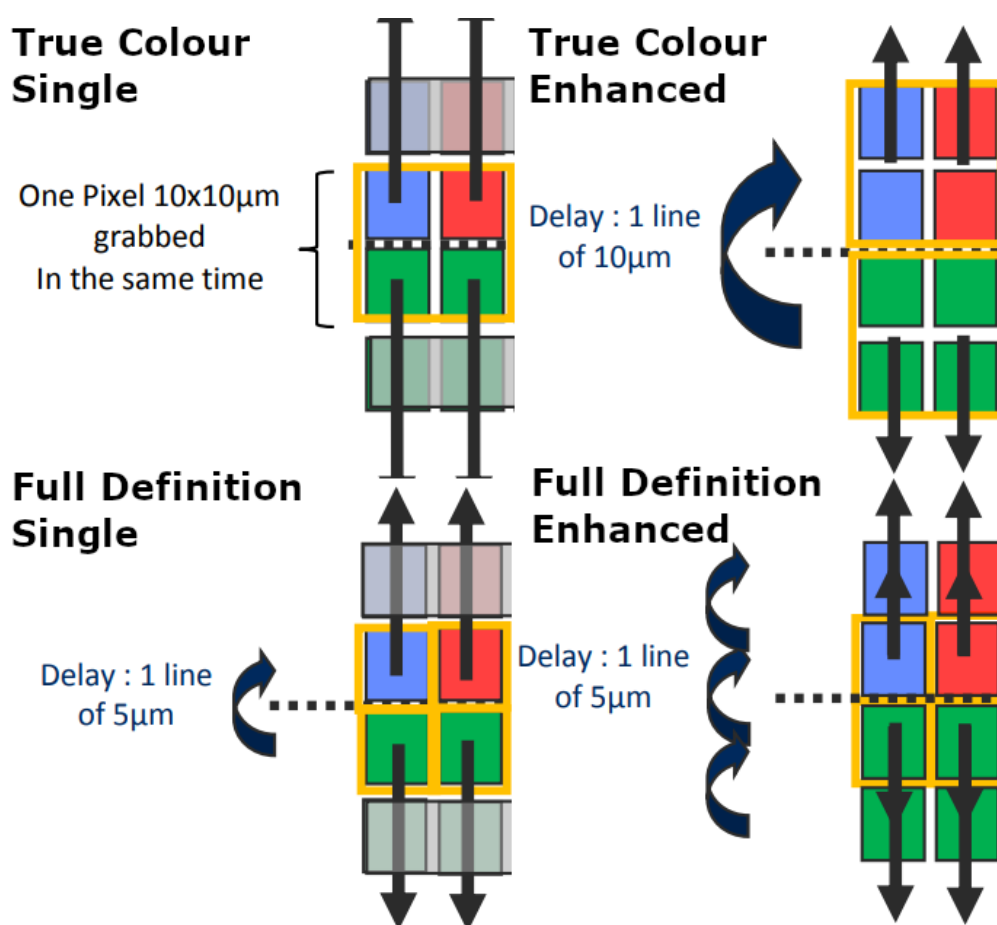
Obrázek 1.3 Konfigurace Bayerova filtru kamery Basler sprint [17]

Příkladem kamery s Bayerovým filtrem je Basler sprint, která umožňuje několik režimů záznamu. V režimu RGB probíhá expozice obou řádků (Line A, Line B) současně, subpixely se automaticky organizují do virtuálních pixelů a hodnoty zelených složek jsou průměrovány. V režimu Raw Line kamera poskytuje přímo hodnoty jednotlivých pixelů a je nutné provést debayerizaci. [17]

Některé kamery poskytují komplexnější konfiguraci filtru k dosažení lepší reprezentace barev a více možností záznamu. Příkladem je kamera E2v ELIIXA+ 16K/8K CP. Disponuje režimy True Colour Single/Enhanced (obdoba režimu RGB Basler sprint) a Full Definition Single/Enhanced (obdoba režimu Raw Line Basler sprint). [18]



Obrázek 1.4 Konfigurace filtru kamery E2v ELIIXA+ 16K/8K CP [18]



Obrázek 1.5 Režimy záznamu kamery E2v ELIIXA+ 16K/8K CP [18]

1.3 Řízení řádkových kamer

U řádkových kamer je třeba řídit několik důležitých parametrů, především dobu expozice. Příliš dlouhá doba expozice vyústí v přesvětlený snímek, zatímco příliš krátká doba v tmavý snímek. Kamery se tedy nehodí pro snímání při denním světle, protože jeho intenzita je značně nahodilá. Nejjednodušší metodou zaručení správné expozice je využití osvětlení s konstantní svítivostí, pokud je to možné.

Dále je vhodné řídit rychlost zaznamenávání řádků (line rate nebo také „lps“), aby nedocházelo ke zbytečnému převzorkování. Často se využívá inkrementálního snímače (např. rotačního enkodéru), který synchronizuje rychlost snímání s rychlostí otáčení objektu či rychlostí pohybu dopravníku.

Řádkové kamery poskytují uživateli velké množství dalších nastavení, přístupná pomocí přiřazeného software nebo API. Mezi ně patří rozlišení výsledného obrazu, posun obrazu v ose X (pokud je šířka obrazu menší než šířka snímacího čipu), formát pixelových dat, nastavení analogového zpracování obrazu, doby expozice, funkcionality jednotlivých vstupů a výstupů, rozhraní pro přenos obrazových dat a jiné [2].

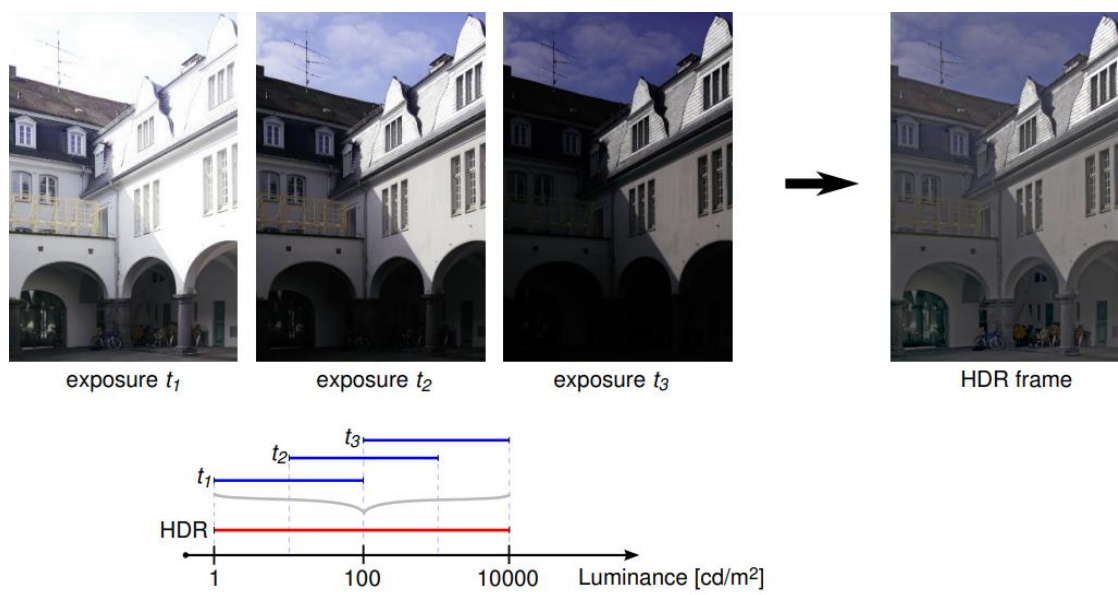
1.4 HDR snímání s řádkovou kamerou

Důvěryhodné zachycení reálného objektu je často nemožné kvůli malému dynamickému rozsahu běžných řádkových kamer. Dynamický rozsah je rozsah svítivostí, které kamera dokáže zachytit. Tento rozsah je daleko menší než rozsah lidského oka. Proto používáme metody HDR snímání obrazu, které dokáží zvýšit dynamický rozsah snímku bez nutnosti použití lepší kamery.

HDR snímání, kterým se práce zabývá, spočívá v zachycení několika snímků stejné scény s různými osvětleními nebo různou délkou expozice a následném spojení LDR snímků v jeden HDR snímek. Skládání snímků je naznačeno na obrázku 1.6 [6].

Zachycení snímků s různou dobou expozice s řádkovou kamerou je problematictější oproti řešení s plošnou kamerou v rychlosti změny nastavení. Zatímco u plošné kamery stačí měnit dobu expozice každého snímku, u řádkové kamery je třeba měnit expozici každého řádku. Změna tohoto nastavení z řídicího počítače v řádech kHz je nemyslitelná, a proto bylo v rámci této práce zvoleno řízení pomocí dedikovaného hardware.

Stejného efektu lze docílit řízením délky záblesku osvětlení, pokud není možné řídit dobu expozice hardwarovým signálem (např. pokud to kamera neumožňuje). Délka expozice v tomto režimu je nastavena na maximální potřebnou hodnotu. Osvětlení je aktivní pouze určitou část expoziční doby a tím řídí množství dopadeného světla na kamerový senzor.



Obrázek 1.6 Příklad složení HDR obrazu z několika snímků [6]

2. ZPRACOVÁNÍ HDR OBRAZU

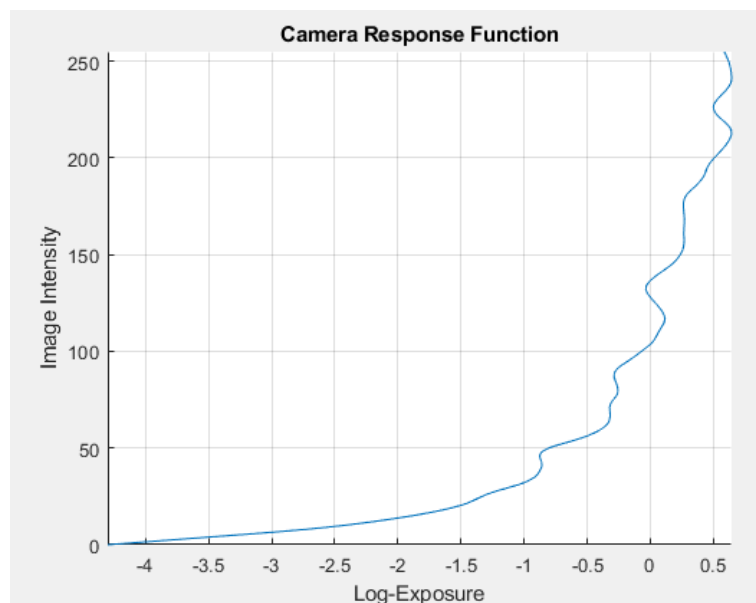
Zatímco k reprezentaci LDR snímku stačí většinou rozsah 8 bitů pro každý kanál, HDR snímek vyžaduje daleko vyšší rozsah hodnot. Jas bývá uložen jako desetinné číslo, reprezentující skutečné ozáření bodů. Takovýto snímek se nazývá také radianční mapa. [11]

2.1 Generování radiančních map

Pro vytvoření radianční mapy z několika LDR snímků bylo vyvinuto hned několik postupů. Cílem je nalézt hodnotu dopadajícího světla na každý pixel senzoru. V této práci bylo využito postupu popsaného v práci Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs. Radiance určitého pixelu se vypočítá jako

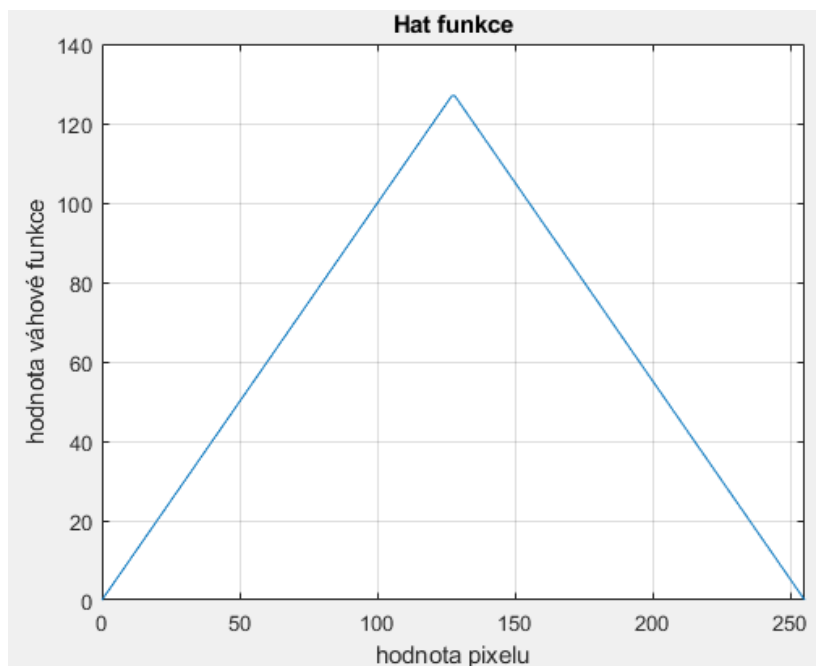
$$\ln(E_i) = \frac{\sum_{j=1}^P \omega(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln(\Delta t_j))}{\sum_{j=1}^P \omega(Z_{ij})} \quad (2.1)$$

kde $\omega(Z_{ij})$ je váhová funkce a $g(Z_{ij})$ je funkce odezvy kamery. Výpočet se provádí pro všechny dostupné snímky (počet snímků P musí být alespoň 2). Funkce odezvy je neznámá a je třeba ji aproximovat. Metody pro nalezení funkce jsou složité a časově náročné, ale jakmile je funkce nalezena, lze ji použít pro rychlý přepočítání hodnot pixelů na radianci jakéhokoliv snímku zachyceného danou kamerou. [11] [12] Pro jednoduchost byla využita MATLAB funkce `camresponse`, která aproximuje funkci na základě několika snímků. Jako zdroj bylo nasnímáno 10 snímků s rozlišením 2048x2048 px o expozičních 50-1000 μ s. Výsledná funkce je následující



Obrázek 2.1 Funkce odezvy kamery

Váhová funkce má za úkol potlačit hodnoty pixelů, které jsou blízko saturace, jelikož se dá předpokládat, že tato data budou méně odpovídat reálným hodnotám. Váhových funkcí je používáno hned několik, například funkce hat.



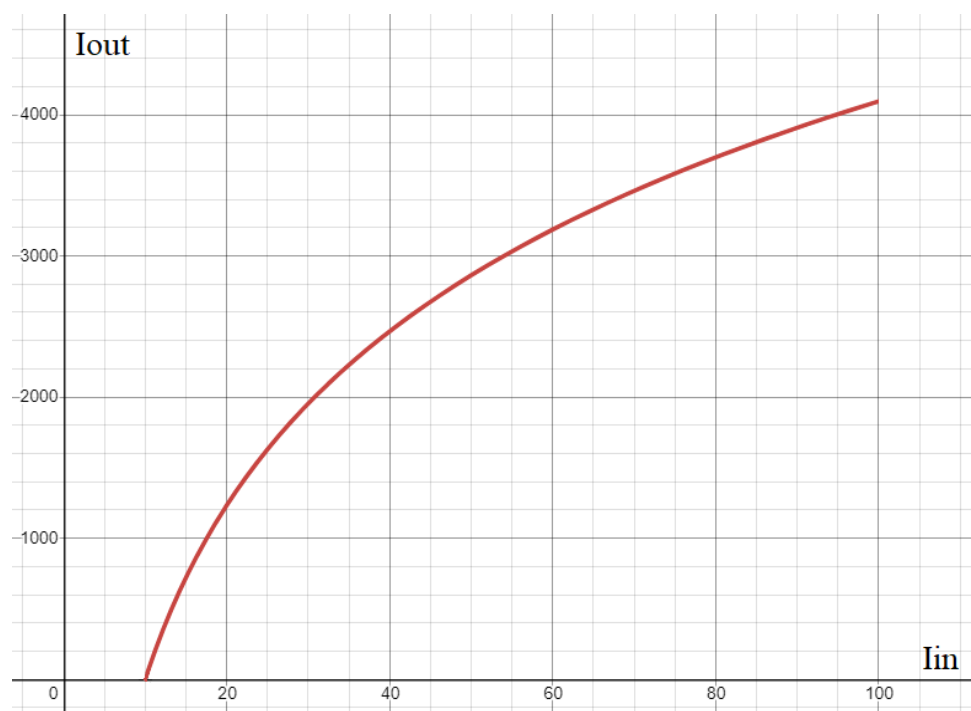
Obrázek 2.2 Váhová funkce hat

2.2 Mapování tonality

Jelikož běžná zobrazovací zařízení nemají dostatečný rozsah jasu k zobrazení HDR snímku, je třeba dynamický rozsah přizpůsobit zobrazovači. K tomu se využívá různých metod mapování tonality. V této práci byla zvolena metoda logaritmické globální komprese pro svoji jednoduchost a rychlost výpočtu.

$$I_{out} = \frac{\log(I_{in}) - \log(I_{min})}{\log(I_{max}) - \log(I_{min})} * D_{max} \quad (2.2)$$

Kde D_{max} odpovídá maximální hodnotě výstupu (např. pro barevnou hloubku 12 bit $D_{max} = 2^{12} - 1$). Rozsah I_{min} až I_{max} je převeden na rozsah 0 až D_{max} , přičemž jsou světlá místa převedena do užší oblasti než místa tmavá. To zohledňuje vnímání lidského oka, které vykazuje logaritmickou závislost vnímaného jasu na jasu fyzikálním. [12] [13] Příkladem kompresní křivky pro rozsah I_{in} 10 až 100 je obrázek 2.3.



Obrázek 2.3 Křivka logaritmické globální komprese

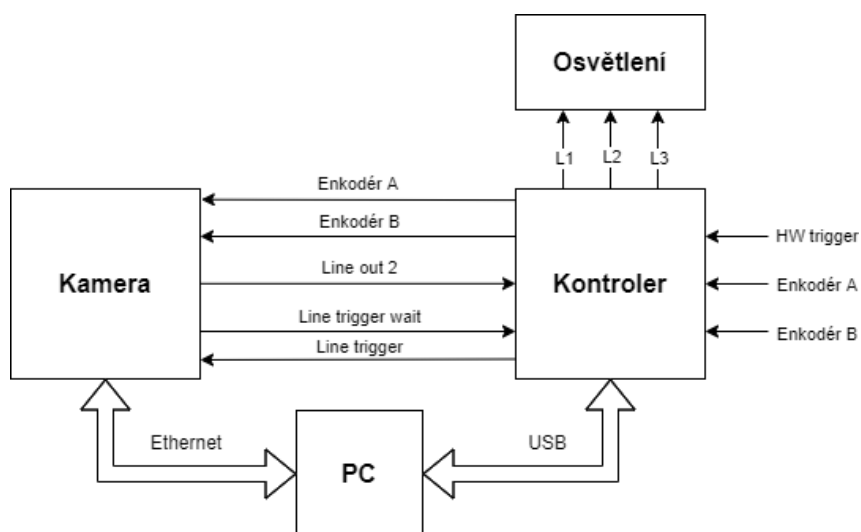
3. NÁVRH ŘÍZENÍ EXPOZIČNÍ DOBY A DÉLKY ZÁBLESKU OSVĚTLENÍ

Pro maximální univerzálnost výsledného řešení byly implementovány možnosti řízení míry expozice řízením expoziční doby kamery i délkou záblesku externího osvětlení. Celé řešení je navrženo tak, že PC komunikuje jen s kontrolerem, který přebírá veškeré řízení kamery. PC je s kamerou propojen jen pomocí ETH pro příjem dat a konfiguraci kamery.

K návrhu byl využit model ethernetové kamery Basler racer raL6144-16gm a vývojová deska arduino UNO. Tato kamera má k dispozici tři vstupní a dvě výstupní konfigurovatelné linky využívající rozdílové signály standardu RS-422. První vstupní linka byla konfigurována jako „line trigger“ signál (start expozice řádku) a první výstupní linka jako „line trigger wait“ signál (indikace čekání na další řádek). Dále byla délka expozice nastavena na šířku pulzu line trigger. Změnou šířky pulzu je tedy možné libovolně měnit délku expozice každého řádku a změnou frekvence pulzů měnit line rate. Expozici není možné začít, pokud stále probíhá zpracování předešlého řádku. Ke kontrole tohoto stavu je využit výstupní signál line trigger wait. [7]

Dále systém obsahuje signály L1, L2 a L3 pro řízení externího osvětlení (linky RS-422), signály „Enkodér A“ a „Enkodér B“ pro řízení kamery nebo kontroleru z externího rotačního enkodéru a signál „HW trigger“ pro spouštění z libovolné externí elektroniky. Signál „line out 2“ není využit a je připojen ke kontroleru jako rezervní. Kontroler je s řídicím PC propojen pomocí USB rozhraní. Blokové schéma celého systému je znázorněno na obrázku 3.1.

Funkce v režimu řízení expoziční doby délkou záblesku externího osvětlení je obdobná jako při řízení délkou pulzu. Kontroler spíná podle potřeby výstupní linky L1, L2 a L3, zatímco kamera automaticky exponuje řádek.



Obrázek 3.1 Blokové schéma řídicího systému

4. VÝBĚR VHODNÉHO HARDWARE

4.1 Elektronické součástky

Kontroler je napájen přímo z USB portu. Je tedy žádoucí, aby všechny součástky pracovaly s napájecím napětím 5 V \pm 5 % a celkový odběr byl menší než 500 mA.

4.1.1 Řídicí obvod

Kamera Basler racer raL6144-16gm umožňuje maximální frekvenci zaznamenávání řádků 17 kHz. [7] Při použití mikrokontroleru s PWM čítačem řízeným přímo z hodinového signálu bez děličky je tento kmitočet teoreticky dosažitelný už při kmitočtu hodinového signálu 36 kHz. Je ovšem třeba zároveň obsluhovat UART rozhraní (pro komunikaci přes USB), sledovat stav signálu line trigger wait a konfigurovat šířky jednotlivých pulzů. Minimální potřebný kmitočet hodin pro uspokojivý chod s přijatelnou frekvenční nestabilitou řídicích pulzů byl odhadnut na 8 Mhz. Návrh s využitím hradlového pole byl zavržen kvůli velké náročnosti, cenové nedostupnosti a vysokému odběru.

Požadavky na mikrokontroler jsou následující: UART rozhraní, přesný zdroj hodinového signálu o kmitočtu alespoň 8 MHz, 1 standardní a 2 PWM čítače s hardwarovými výstupy, 12 digitálních V/V pinů (bez započtení programovacího rozhraní), EEPROM paměť, velikost FLASH paměti alespoň 16 kB, velikost RAM alespoň 1 kB.

Byl vybrán mikrokontroler ATmega328PB a krystalový rezonátor 16 MHz s tolerancí 10 ppm.

Tabulka 4.1 Parametry mikrokontroleru ATmega328PB [8]

Features	ATmega328PB
Pin count	32
Flash (KB)	32
SRAM (KB)	2
EEPROM (KB)	1
General Purpose I/O pins	27
SPI	2
TWI (I ² C)	2
USART	2
ADC	10-bit 15ksps
ADC channels	8
AC propagation delay	400ns (Typical)
8-bit Timer/Counters	2
16-bit Timer/Counters	3
PWM channels	10

4.1.2 USB-UART převodník

Mikrokontroler nedisponuje USB rozhraním a je nutné využít USB-UART převodník. Byl vybrán převodník FT232R pro dobrou spolehlivost, jednoduchost návrhu a dostupnost ovladačů. Nevýhodou převodníku je vysoká cena, kterou ovšem kompenzují výše zmíněné výhody.

4.1.3 Logické obvody

Mikrokontroler musí být schopen generovat rychlé pulzy na výstupech line trigger, L1, L2 a L3. Využití samostatných čítačů pro každý výstup by bylo nepraktické a zabralo by výstupy potřebné pro jiné funkce. Byl tedy navržen logický obvod pro demultiplexování jednoho výstupu čítače na výstupy L1, L2 a L3. Byly zvoleny logické obvody řady 74HC z důvodu dobré dostupnosti, popularity a obstojné rychlosti.

4.1.4 RS-422 transceiver

Ke komunikaci s kamerou a osvětlením byl vybrán obousměrný RS-422 transceiver DS8921 pro vysokou rychlost a dobrou dostupnost.

4.2 Konektory

Kontroler obsahuje USB konektor pro připojení k řídicímu PC a konektory pro připojení kamery, osvětlení a externích signálů. Rozhraní pro připojení k PC sloužící k nastavení kontroleru nemusí být velmi rychlé a postačil USB 2.0 konektor. Byl zvolen typ B pro dobré mechanické vlastnosti. Pro připojení signálů byly zvoleny konektory typu IDC s roztečí kontaktů 2 mm díky malým rozměrům a nízké ceně. Konektor kamery má konfiguraci kontaktů 2x6 a konektory osvětlení a externích signálů konfiguraci 2x4.



USB B 2.0



IDC 2x4 zásuvka



IDC 2x4 zástrčka

Obrázek 4.1 Konektory kontroleru [10]

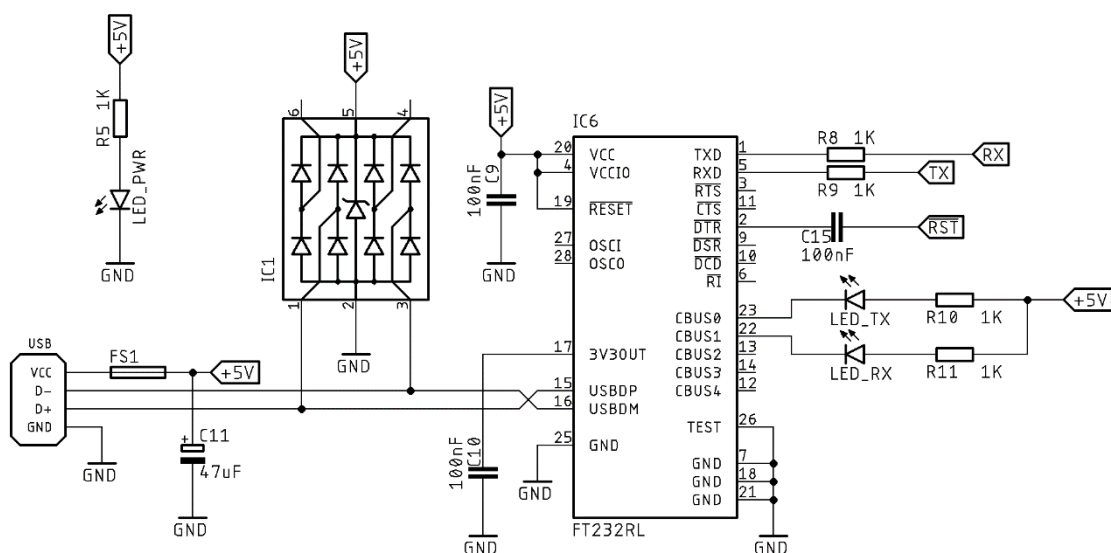
5. NÁVRH A SESTROJENÍ ŘÍDICÍHO HW

Návrh schémat a DPS proběhl v návrhovém programu EAGLE.

5.1 Návrh kontroleru

5.1.1 USB – UART převodník

Návrh je založen na integrovaném převodníku FT232RL. LED_TX a LED_RX indikují aktivitu linek RX a TX, které jsou připojeny na UART rozhraní mikrokontroleru. Kondenzátor C15 zajišťuje resetování mikrokontroleru na sestupné hraně invertovaného signálu DTR. Tento reset dostane bootloader mikrokontroleru na krátkou chvíli do režimu nahrávání a umožní nahrát firmware přes USB rozhraní. [9] LED_PWR indikuje napájení obvodu. IC1 je diodová síť, určená k ochraně obvodu před napěťovými špičkami na napájecí větvi a vstupech D+ a D-.



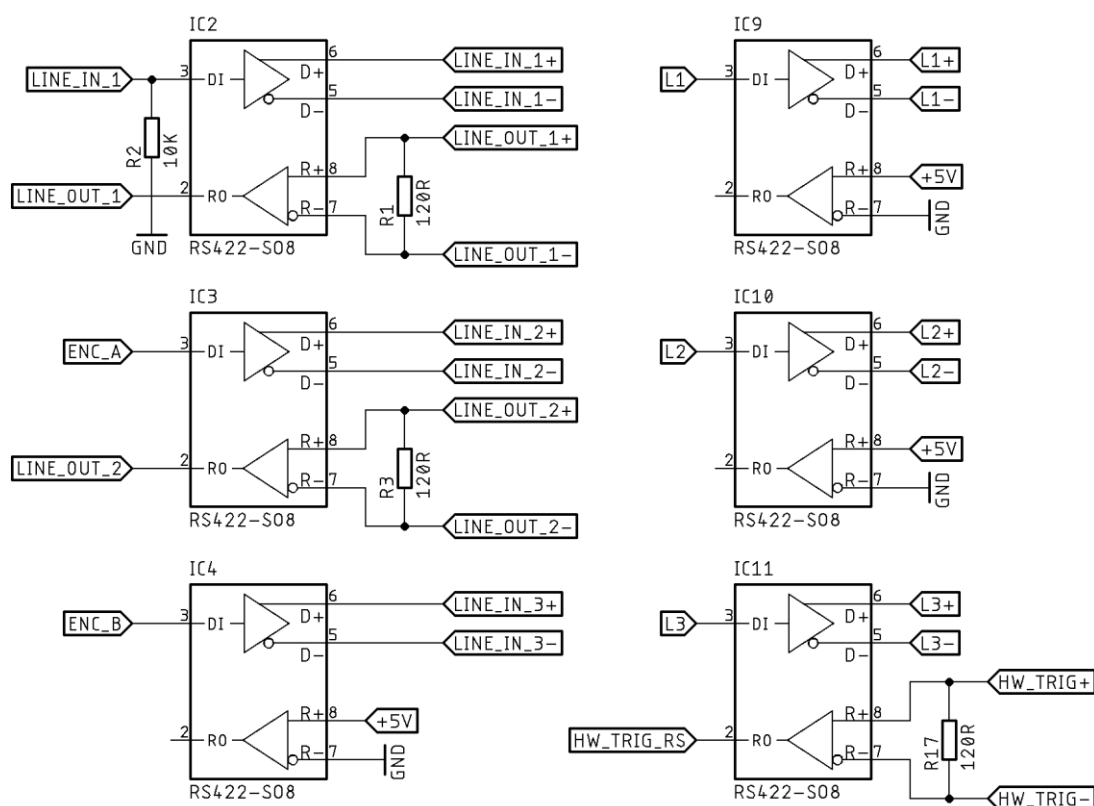
Obrázek 5.1 Schéma USB – UART převodníku

5.1.2 RS-422 transceiver

Byl vybrán obousměrný transceiver DS8921 s 1 vstupní a 1 výstupní linkou. Budeme potřebovat 3 výstupní linky pro připojení kamery, 3 výstupní linky pro připojení osvětlení, 2 vstupní linky kamery a 1 vstupní linku hardwarového spouštění. Celkem je tedy třeba 6 transceiverů. Vstupní linky jsou zakončeny 120 ohmovými rezistory.

Na první vstupní linku kamery je připojen výstup mikrokontroleru, který generuje signál spouštění záznamu řádku. Na druhou a třetí vstupní linku jsou připojeny výstupy

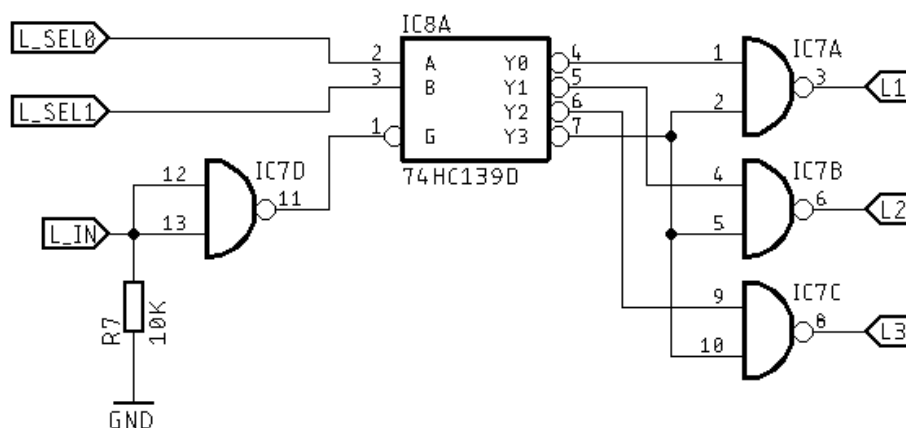
enkodéru. Na výstupy L1, L2, a L3 je připojen demultiplexor znázorněný v sekci 5.1.3. Vstup hardwarového spouštění je připojen k multiplexoru, popsanému v sekci 5.1.4.



Obrázek 5.2 Schéma RS-422 transceiverů

5.1.3 Demultiplexor výstupu světél

Obvod demultiplexuje výstup čítače mikrokontroleru OC0B na výstupy L1, L2 a L3. Výstup je vybírán pomocí signálů L_SEL0 a L_SEL1. Schéma a pravdivostní tabulka navržené logiky je na obrázku 5.3 a v tabulce 5.1. Nevýhodou tohoto řešení je, že je možné vyslat signál pouze na jeden z výstupů Lx (nebo na všechny zároveň, ale nelze navolit libovolnou kombinaci výstupů). Toto omezení je ovšem přijatelné. Je nepravděpodobné, že bychom potřebovali spínat v jednotlivých krocích různé kombinace světél. Nejpravděpodobnějším využitím je připojení červeného, zeleného a modrého světla na výstupy L1, L2 a L3 a postupné spínání jednotlivých světél, nebo připojení stejných světél na jeden či více výstupů a spínání všech zároveň. Řešení je tedy dostačující.



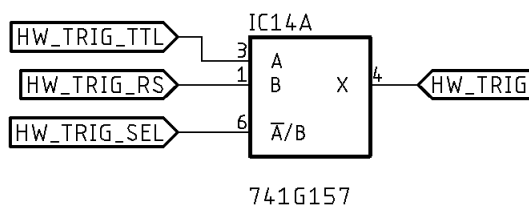
Obrázek 5.3 Schéma demultiplexoru

Tabulka 5.1 Pravdivostní tabulka demultiplexoru

L_IN	L_SEL0	L_SEL1	L1	L2	L3
X	0	0	L_IN	0	0
X	0	1	0	L_IN	0
X	1	0	0	0	L_IN
X	1	1	L_IN	L_IN	L_IN

5.1.4 Multiplexor HW vstupu spouštění

Vstup HW spouštění je realizován jako linka RS-422 i TTL vstup. Mikrokontroler disponuje pouze dvěma nezávislými vstupy přerušení INT0 a INT1, ale INT0 je již využit pro signál kamery line trigger wait. Aby nebylo nutné použít vstupy PCINT, což by vyžadovalo vyšší složitost firmware, byl navržen obvod pro multiplexaci na vstup INT1. Pro výběr HW spouštění z linky RS-422 nebo TTL vstupu byl využit obvod 74LVC1G157. Vstup je vybírán výstupem mikrokontroleru HW_TRIG_SEL.

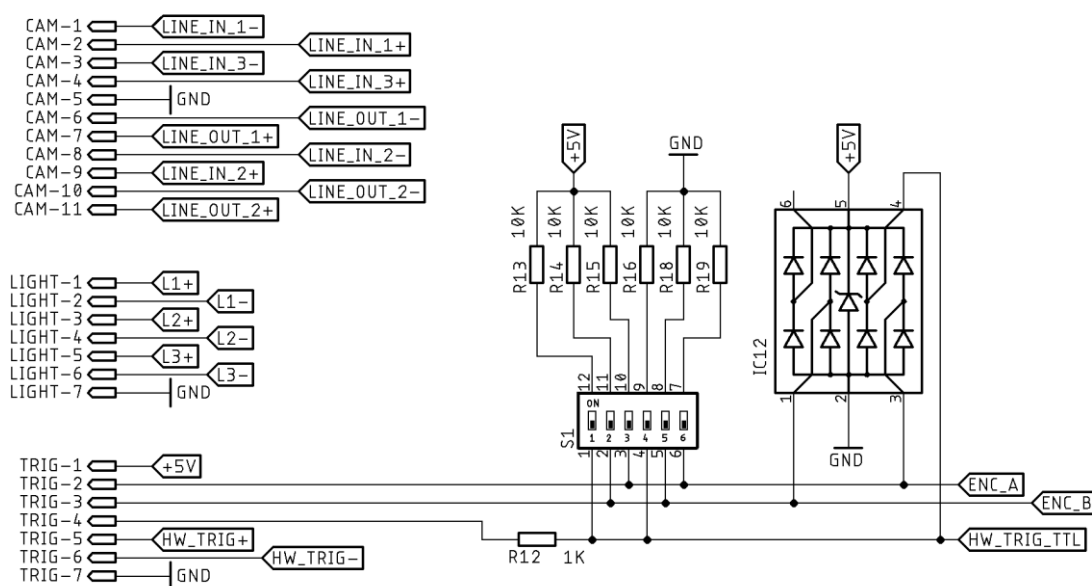


Obrázek 5.4 Schéma multiplexoru

5.1.5 Konektory pro připojení kamery, osvětlení a externích signálů

Je vhodné, aby kabely byly připojovány paralelně s DPS kontroleru. To vyžaduje konektory pájitelné do DPS v pravoúhlém provedení, které často není dostupné, nebo panelové konektory připojované vodiči, jejichž montáž je pracná. Proto byly konektory přesunuty na samostatnou DPS, která se k DPS kontroleru připojí pod pravým úhlem pomocí SMD plošek.

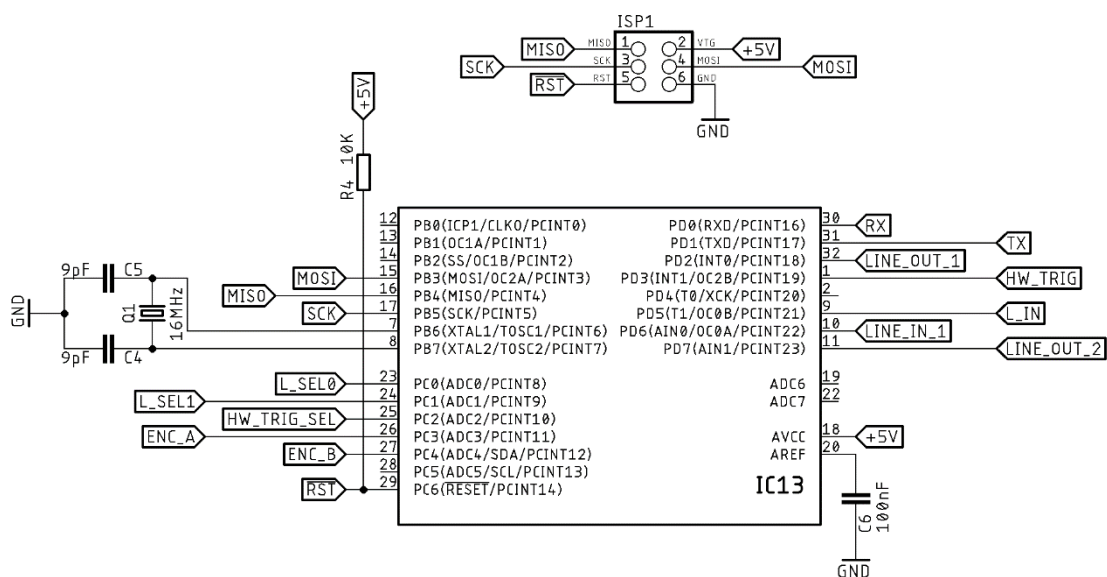
Schéma na obrázku 5.5 znázorňuje připojení signálů k jednotlivým ploškám. Dále je zde spínač S1, který umožňuje konfiguraci pullup a pulldown rezistorů na TTL vstupech enkodéru a HW spouštění. IC12 je diodová síť, sloužící k ochraně TTL vstupů před napěťovými špičkami.



Obrázek 5.5 Schéma plošek pro připojení DPS konektorů

5.1.6 Mikrokontroler

Schéma na obrázku 5.6 znázorňuje připojení výše zmíněných bloků k mikrokontroleru. Krystalový rezonátor Q1 se zatěžovacími kondenzátory C4 a C5 generuje stabilní a přesný hodinový signál. Rezistor R4 drží reset mikrokontroleru v neaktivním stavu. ISP1 je konektor pro nahrávání firmware pomocí ISP programátoru, jako např. atmel ICE nebo arduino s příslušným firmware.



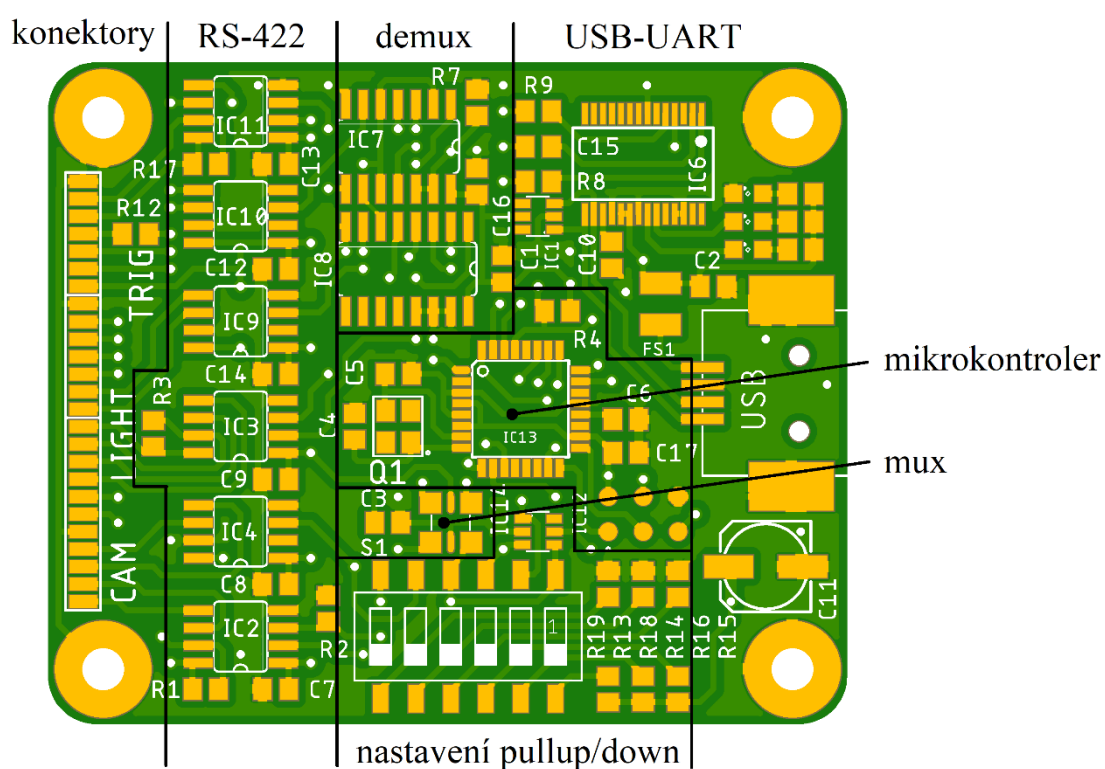
Obrázek 5.6 Schéma mikrokontroleru

5.1.7 Výsledná DPS

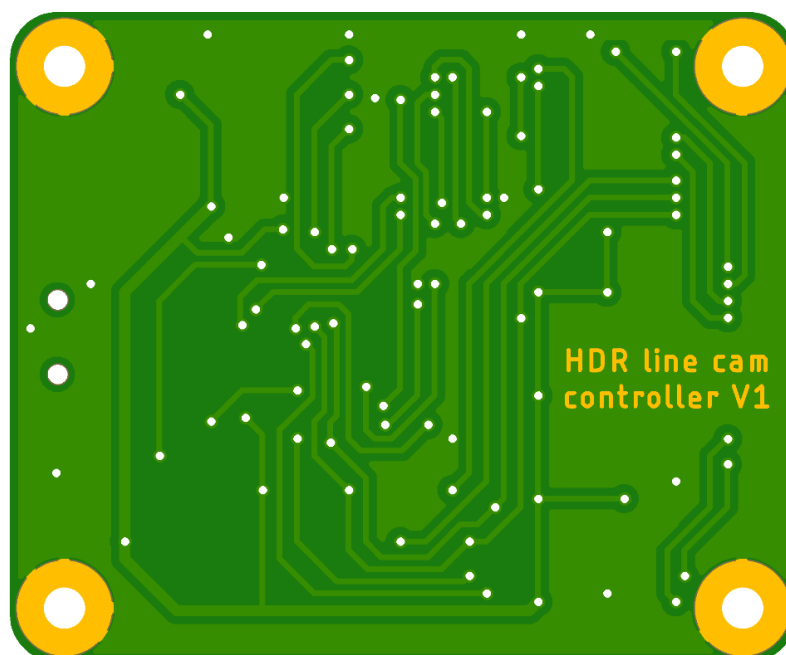
Všechny součástky byly zvoleny v SMD provedení pro minimalizaci potřebného místa na DPS a umožnění automatického osazování.

Výsledná DPS je dvojvrstvá a je členěna na jednotlivé schématické bloky. Obsahuje také filtrační keramické kondenzátory napájení každého integrovaného obvodu, které nejsou výše zmíněny.

Návrh byl proveden v souladu s návrhovými pravidly výrobce JLCPCB, který DPS dodal. Výsledné rozměry jsou 48x58 mm. Byl použit substrát FR4-Standard Tg 130-140C tloušťky 1,6 mm a povrchová úprava olovnatým cínem HASL.



Obrázek 5.7 Vrchní vrstva DPS kontroleru

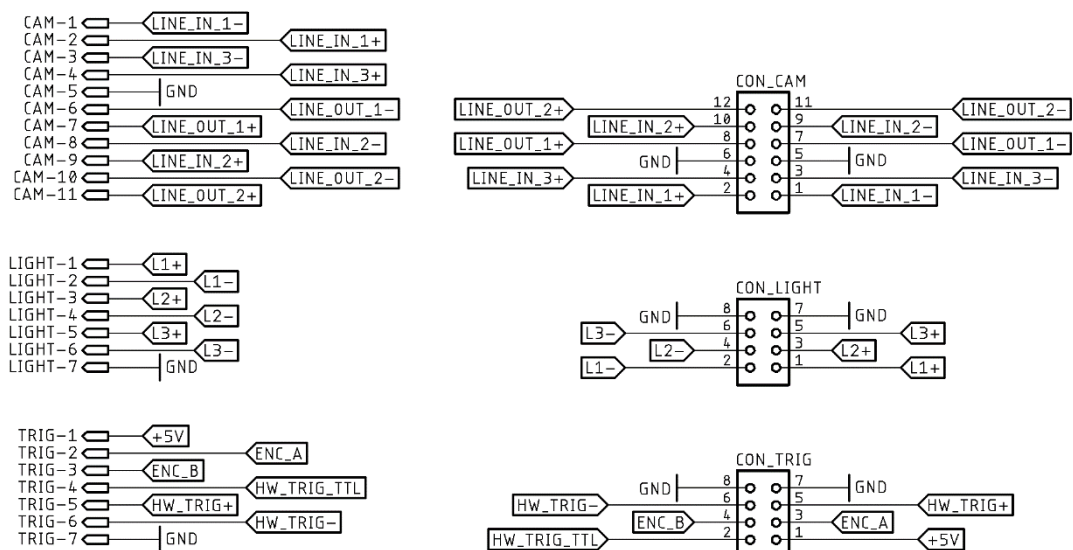


Obrázek 5.8 Spodní vrstva DPS kontroleru

5.2 Návrh DPS konektorů

5.2.1 Propojení konektorů s kontrolerem

Schéma znázorňuje propojení SMD plošek pájených k DPS kontroleru s IDC konektory pro připojení kamery (CON_CAM), osvětlení (CON_LIGHT) a externích signálů (CON_TRIG).

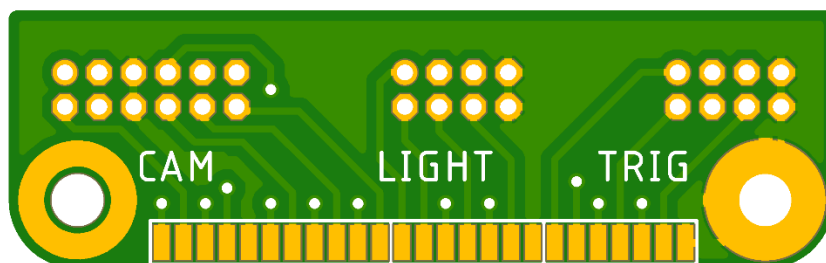


Obrázek 5.9 Schéma konektorů

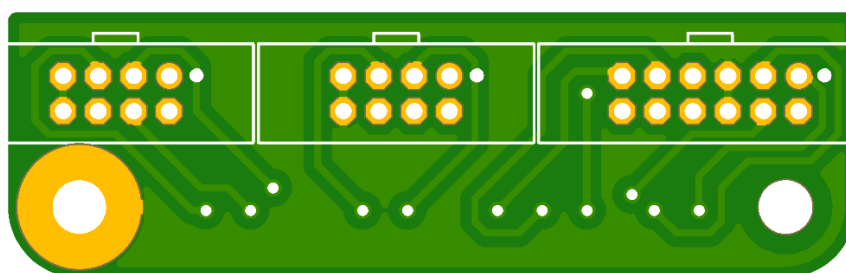
5.2.2 Výsledná DPS

Konektory IDC byly zvoleny v provedení THT pro vyšší mechanickou odolnost. Specifikace je stejná jako pro DPS kontroleru.

Mapování signálů na piny konektorů je v tabulce 5.2.



Obrázek 5.10 Vrchní vrstva DPS konektorů



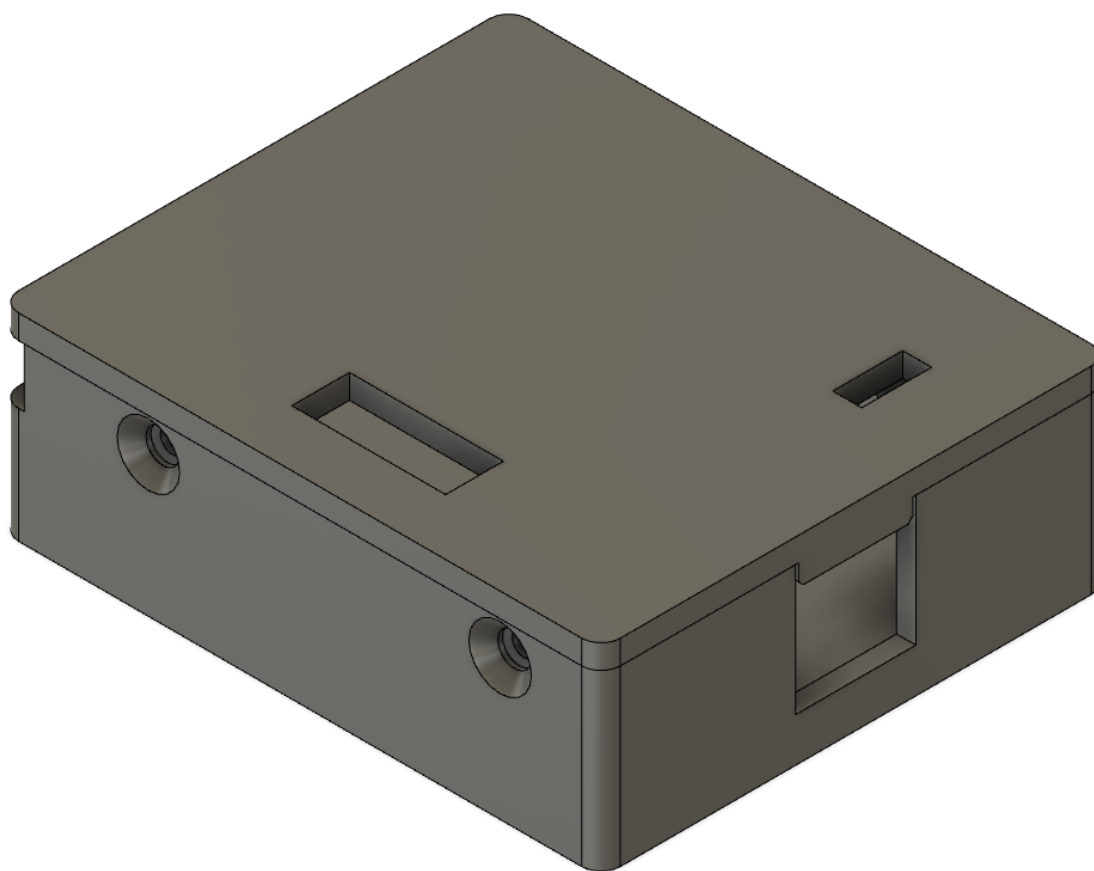
Obrázek 5.11 Spodní vrstva DPS konektorů

Tabulka 5.2 Funkce pinů konektorů

Konektor	Pin	Funkce
Kamera (CON_CAM)	1	IN 1 -
	2	IN 1 +
	3	IN 3 -
	4	IN 3 +
	5	GND
	6	GND
	7	OUT 1 -
	8	OUT 1 +
	9	IN 2 -
	10	IN 2 +
	11	OUT 2 -
	12	OUT 2 +
Osvětlení (CON_LIGHT)	1	L1 +
	2	L1 -
	3	L2 +
	4	L2 -
	5	L3 +
	6	L3 -
	7	GND
	8	GND
Ext. signály (CON_TRIG)	1	+5V
	2	HW trigger TTL
	3	Encoder A
	4	Encoder B
	5	HW trigger +
	6	HW trigger -
	7	GND
	8	GND

5.3 Návrh krabičky

Jako metoda výroby krabičky byl zvolen 3D tisk. Návrh proběhl v programu Fusion 360 a výroba na tiskárně Prusa Mini s tryskou $\varnothing 0,25$ mm. Byl zvolen PLA filament pro jeho nízkou cenu a tepelnou roztažnost. Tělo krabičky obsahuje otvory pro konektory a víko otvory pro nastavení přepínačů a indikační LED. DPS je uchycena pomocí šroubů M3 a víko pomocí vrutů $\varnothing 3$ mm. Na víko byl nalepen štítek s popiskami.

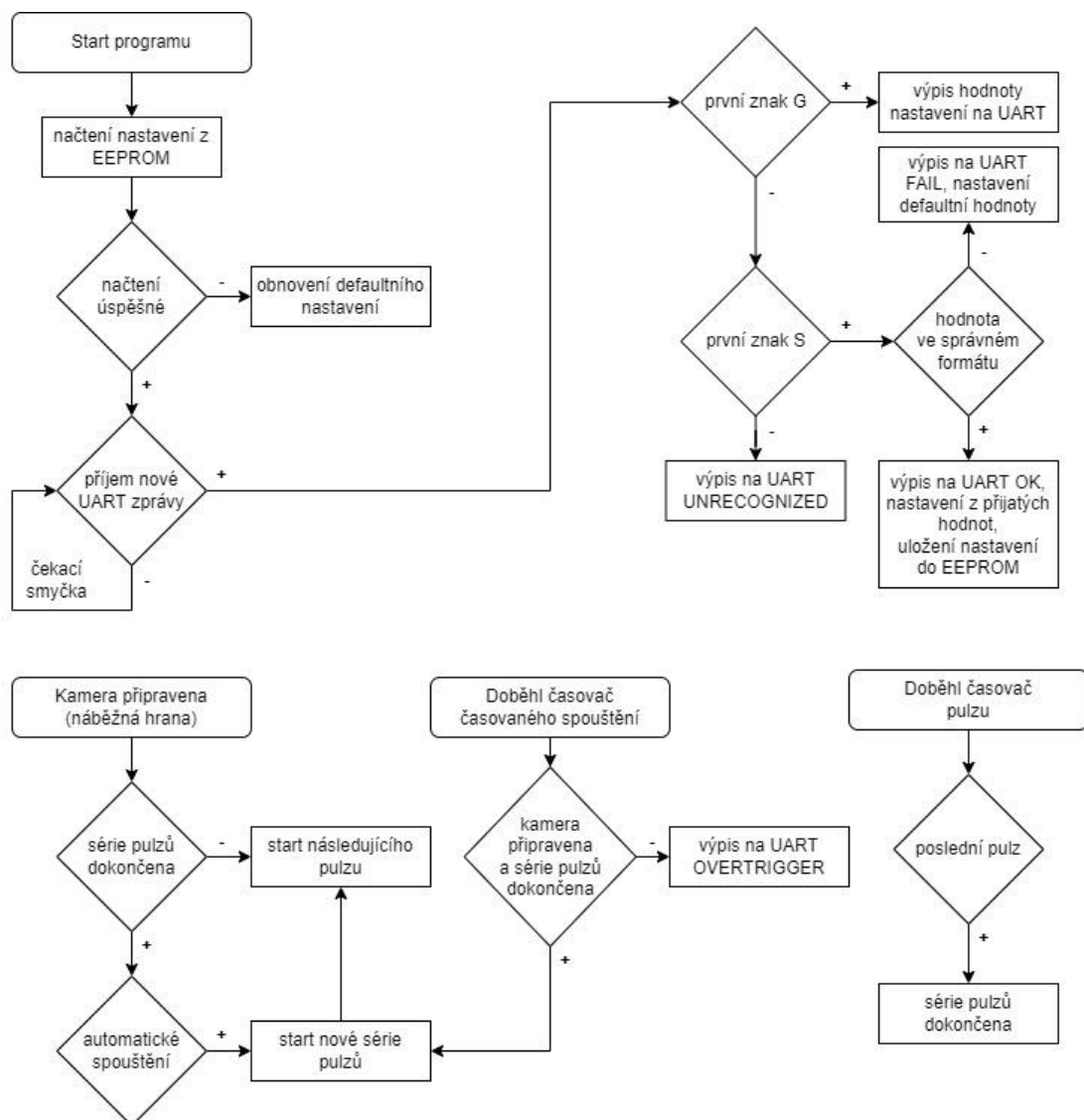


Obrázek 5.12 Model krabičky

6. NÁVRH FIRMWARE A POPIS NASTAVENÍ

Firmware byl navržen v prostředí ATMEL Studio 7.0. Většina funkcí kontroleru, jako obsluha UART rozhraní a generování pulzů, je řízena pomocí přerušení. Délka pulzů je generována výstupem HW čítače pro dosažení minimální časové nestability. Všechny důležité vstupy vyvolávají přerušení a jsou zpracovávány v obslužných rutinách.

6.1 Běh programu



Obrázek 6.1 Vývojový diagram firmware

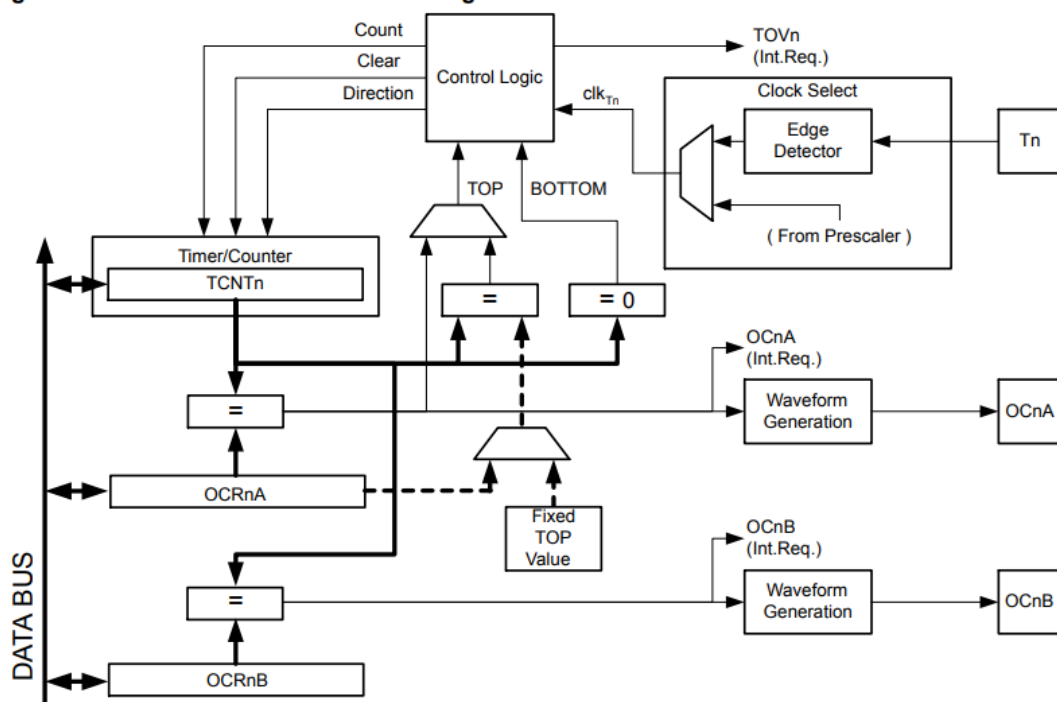
Pro jednoduchost byly ve vývojovém diagramu vynechány šipky návratu do čekací smyčky ze všech koncových procesů.

Podrobný popis generování pulzů:

Generování pulzů zprostředkovává čítač TC0 mikrokontroleru. Tento osmibitový čítač disponuje dvěma hardwarovými výstupy OC0A a OC0B. Výstup OC0A je použit pro spínání signálu kamery line trigger zatímco OC0B pro spínání osvětlení. Jelikož čítač neumožňuje generování pouze jediného pulzu, je zvolen kompromis režimu rychlého PWM společně s vyvoláním přerušování při shodě s registrem OCR0A, které čítač zastaví. Start nové série pulzů nejprve vynuluje proměnnou pro počítání aktuálního generovaného pulzu. Start každého pulzu začíná nastavením předděličky a registru OCR0x dle periody požadovaného pulzu. Následuje výběr výstupu OC0A/B a nastavení signálů L_SELx demultiplexoru dle požadovaného výstupu pulzu. Hodnota čítače je nastavena na hodnotu těsně před přetečením a čítač je odstartován. Program se vrací do hlavní smyčky, kde kontroluje stav UART rozhraní.

Po prvním hodinovém signálu čítač přeteče a nastaví zvolený výstup na log. 1. Tento přístup generuje krátkou prodlevu před odstartováním pulzu v závislosti na nastavení předděličky, ale zaručuje minimální časovou nestabilitu. Jakmile čítač dosáhne hodnoty OCR0A, je výstup nastaven zpět na log. 0. Další pulzy jsou startovány s náběžnou hranou signálu line trigger wait. Pokud byl právě dokončený pulz poslední nastavený, série pulzů je ukončena a program čeká na nové spuštění.

Figure 18-1. 8-bit Timer/Counter Block Diagram



Obrázek 6.2 Blokové schéma čítače TC0 mikrokontroleru [8]

6.2 Nastavení kontroleru

Kontroler obsahuje několik nastavení týkajících se řízení kamery a osvětlení. Jsou měnitelná posláním znaku S (set), třípísmenné zkratky a nové hodnoty nebo hodnot oddělených čárkami přes USB rozhraní. Každá zpráva musí být ukončena znakem nového řádku. Kontroler signalizuje úspěšnost změny nastavení odpovědí OK, FAIL nebo UNRECOGNIZED, pokud není zkratka rozpoznána. Nastavovaná hodnota musí ležet v definovaném rozsahu, jinak je nastavení neúspěšné a hodnota se změní na inicializační. Aktuální nastavení lze z kontroleru vyčíst posláním znaku G (get) a zkratky. Nastavení je uloženo v paměti EEPROM a po restartu kontroleru se automaticky obnoví. Kompletní výčet nastavení je v tabulce 6.1.

Tabulka 6.1 Seznam nastavení kontroleru

Název nastavení	Zkratka	Rozsah	Příklad volání	Max počet hodnot
pulse output	PUO	0...8	SPUO1,0	10
pulse period	PUP	2...10000	SPUP10,50	10
trigger source	TRS	0...4	STRS1	1
timed trigger period	TTP	4...65535	STTP500	1
hw trigger polarity	HTP	0...3	SWTP0	1
restore defaults	RST	-	SRST	0

Pulse output

Výběr výstupu pro jednotlivé řídicí pulzy. Udává zároveň kolik řádků bude zaznamenáno při jednom spuštění. Je možné nastavit až 10 pulzů, každý na libovolný výstup.

Pulse period

Nastavení periody jednotlivých pulzů. Počet nastavených hodnot musí být stejný jako počet nastavených výstupů (příkazem PUO). Rozsah periody je 2 μ s až 10000 μ s.

Trigger source

Výběr zdroje spouštění. Při každém spouštěcím signálu kontroler provede jeden či více pulsů, v závislosti na nastavení PUO a PUP.

Timed trigger period

Ovlivňuje nastavení periody časovaného spouštění, pokud je časované spouštění aktivní (TRS = 2). Rozsah periody je 4 μ s až 65535 μ s.

HW trigger polarity

Určuje, s jakou polaritou je kontroler spouštěn z externího signálu „HW trigger“.

Restore defaults

Obnoví tovární nastavení kontroleru (PUO0, PUP1000, TRS0, TTP65535, HTP0).

Tabulka 6.2 Význam hodnot enumerovaných nastavení

Název nastavení	Hodnota	Alias	Význam
pulse output	0	T	pulz na vstup kamery line trigger
	1	L1	pulz na výstup L1
	2	L2	pulz na výstup L2
	3	L3	pulz na výstup L3
	4	L_ALL	pulz na všechny výstupy Lx
	5	L1T	pulz na výstup L1 a line trigger
	6	L2T	pulz na výstup L2 a line trigger
	7	L3T	pulz na výstup L3 a line trigger
	8	LT_ALL	pulz na všechny výstupy Lx a line trigger
trigger source	0	NONE	spouštění zastaveno
	1	FREE	automatické spouštění
	2	TIMED	časované spouštění
	3	HW	spouštění ze vstupu HW trigger
	4	ENCODER	spouštění ze vstupu enkodér A(B)
hw trigger polarity	0	RISING	HW spouštění na náběžné hraně
	1	FALLING	HW spouštění na sestupné hraně
	2	HIGH	HW spouštění s logickou úrovní 1
	3	LOW	HW spouštění s logickou úrovní 0

6.3 Příklady typických nastavení a průběhů signálů

Nejjednodušším využitím kontroleru je snímání obrazu s jednou dobou expozice řízením šířky pulzu line trigger s maximálním možným line rate.

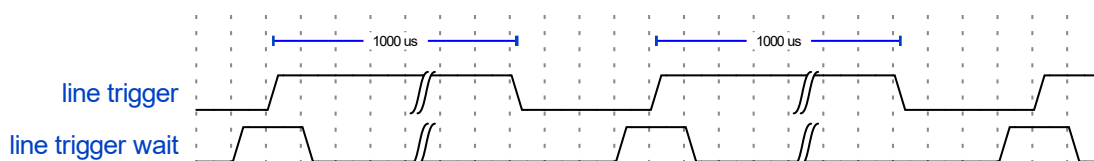
V tomto režimu je nastavení následující:

PUO0 – 1 pulz na výstup line trigger

PUP1000 – šířka pulzu např. 1000 μ s

TRS1 – automatické spouštění

Při automatickém spouštění kontroler čeká, až kamera signalizuje připravenost signálem line trigger wait. Následně vygeneruje jeden impuls na vstupu kamery line trigger o definované šířce a opět čeká, až bude kamera připravena ke snímání dalšího řádku.



Obrázek 6.3 Očekávané průběhy signálů – jeden pulz

Typickou konfigurací pro zaznamenání HDR obrazu by mohlo být například následující nastavení:

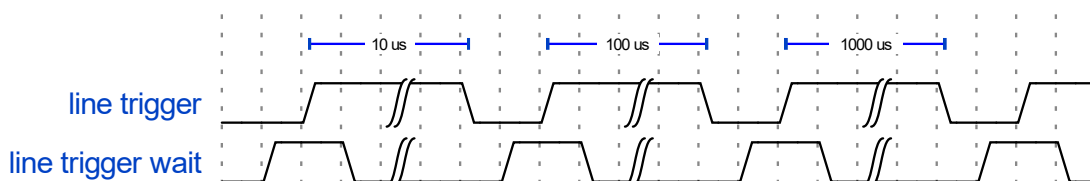
PU00,0,0 – 3 pulzy na výstup line trigger

PUP10,100,1000 – šířka pulzů 10, 100 a 1000 µs

TRS1 – automatické spouštění

Po spuštění kontroler vygeneruje tři pulzy o definovaných šířkách (po každém pulzu kontroluje stav line trigger wait). Poté se automaticky opět spouští a cyklus se opakuje.

Každé spuštění tedy zaznamená tři řádky o různých expozicích, ze kterých bude možné později složit HDR obraz.



Obrázek 6.4 Očekávané průběhy signálů – tři pulzy

Ostatní režimy spouštění se liší pouze způsobem odstartování sekvence pulzů. V režimu časovaného spouštění se kontroler snaží řídit nastavenou dobou TTP. Pokud nejsou po uplynutí nastavené doby všechny pulzy dokončeny a kamera připravena, signalizuje kontroler chybu hláškou OVERTRIGGER a zastaví spouštění (TRS = 0). V režimu HW spouštění se kontroler řídí externím signálem HW trigger dle nastavené polarity (HTP). Signály přicházející příliš rychle ignoruje a signalizuje je hláškou OVERTRIGGER.

7. NÁVRH APLIKACE PRO ZPRACOVÁNÍ OBRAZU

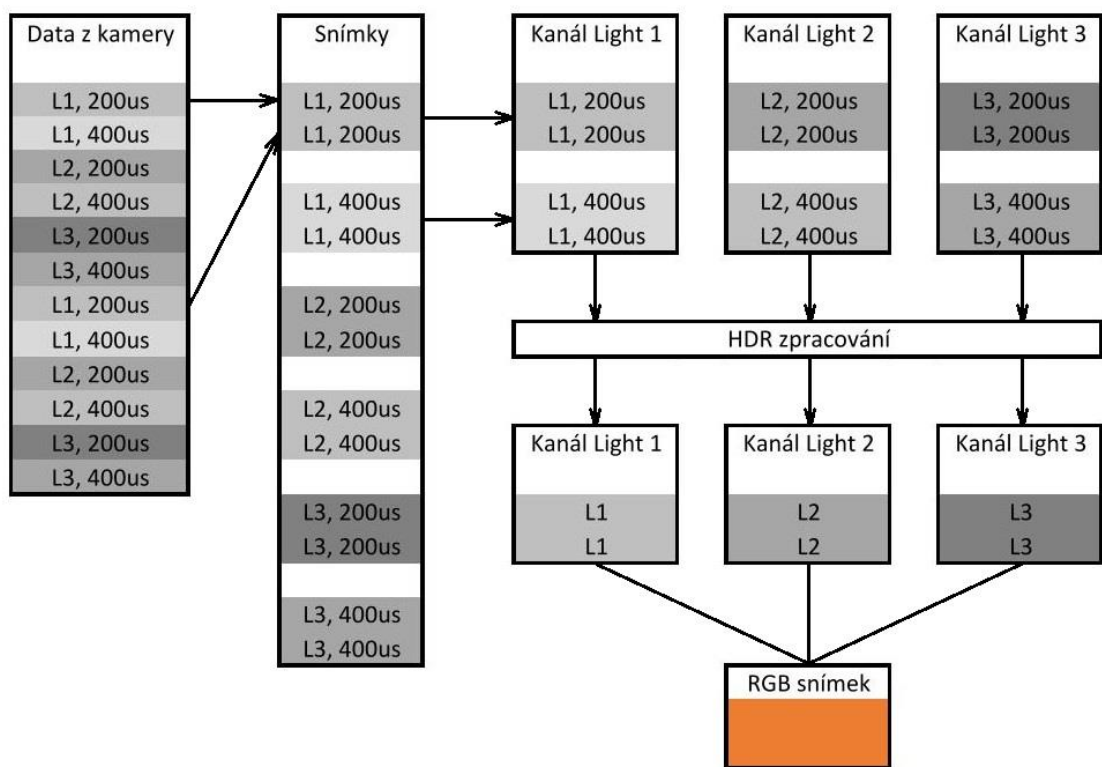
Aplikace pro PC umožňuje jednoduché nastavení kontroleru a kamery, zpracování HDR obrazu v reálném čase a generování barevných snímků. Byla vytvořena v prostředí Visual Studio 2019 v jazyce C# s použitím frameworku .NET. K tvorbě UI byl využit grafický subsystém WPF. Komunikaci s kamerou Basler zprostředkovává SDK dodávaný s balíčkem Basler pylon.

7.1 Postup zpracování obrazových dat

Data z kamery se zpracovávají vždy po příjmu celého snímku. Jednotlivé řádky jsou rozděleny do příslušných snímků, je jim přiřazena doba expozice a jsou sdruženy do kanálů dle výstupu, který byl při záznamu aktivní. Pokud je vybrána možnost zpracování HDR, je provedeno vytvoření radianční mapy a mapování tonality na každém kanálu zvlášť.

Zpracování HDR dle vzorce (2.1) je provedeno s funkcí odezvy kamery, která byla dříve získaná pomocí MATLAB a uložena jako vyhledávací tabulka. Výpočet byl dále urychlen předpočítáním hodnot logaritmu expozičních dob do vyhledávací tabulky. Při mapování tonality dle vzorce (2.2) lze předpočítat celý jmenovatel i číselový člen $\log(I_{min})$ (které jsou konstantní pro celý obraz) a výpočet je relativně časově nenáročný.

Při výběru možnosti složení RGB se kanály Light 1 až 3 smíchají do barevného obrazu. Obrázek 7.1 znázorňuje celý proces zpracování barevného HDR snímku o rozměrech 1x2 px se dvěma dobami expozice pro každé světlo.

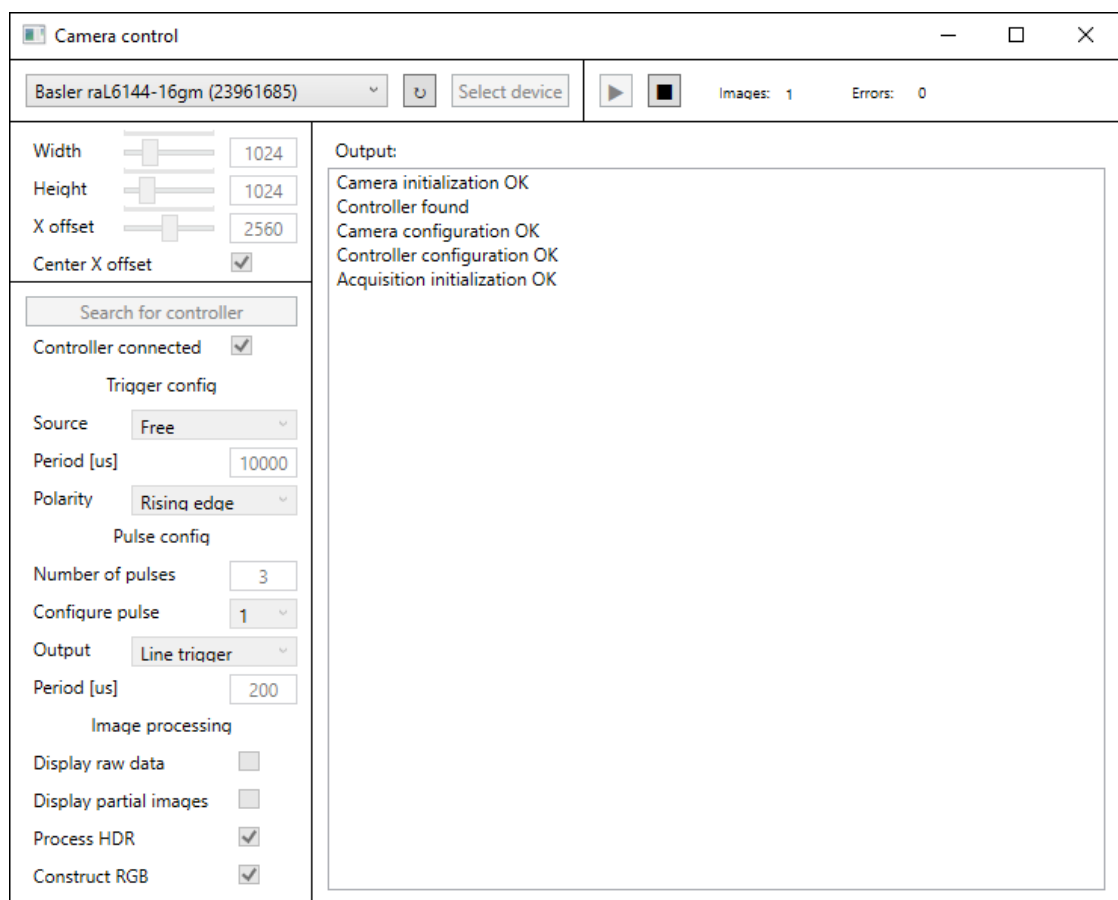


Obrázek 7.1 Zpracování barevného HDR snímku

7.2 UI

Po připojení kamery a kontroleru jsou zpřístupněna nastavení rozměrů obrazu, spouštění, generování pulzů a zpracování obrazu. Rozměry obrazu jsou vždy omezeny aktuálním nastavením počtu pulzů (např. při nastavení dvou pulzů je maximální nastavitelná výška obrazu poloviční než skutečné maximum kamery). Nastavené rozměry jsou tedy skutečné rozměry zpracovaného obrazu, ne rozměry snímaných dat. Okno Output vypisuje informace o běhu programu.

Po spuštění se zpracované snímky zobrazují v samostatných oknech a indikátory Images a Errors ukazují počty úspěšně a neúspěšně přijatých snímků. Při příliš velké rychlosti záznamu nebo vysokém rozlišení nemusí být zpracování dostatečně rychlé, data přicházející před dokončením zpracování budou ignorována a započítají se do Errors (prakticky se tak děje jen při volbě HDR).



Obrázek 7.2 UI aplikace

8. TESTY SYSTÉMU

Na závěr byl vytvořen prototyp osvětlení, který sloužil pouze k ověření funkčnosti. Toto osvětlení bylo zhotoveno přilepením RGB LED pásku ke hliníkovému chladiči a připojením nutné elektroniky, která umožňuje řízení z kontroleru. Osvětlení je napájeno ze zásuvkového adaptéru 12 V. Elektronika se skládá ze tří RS-422 transceiverů, tří MOSFET tranzistorů typu N spínajících jednotlivé barvy a regulátoru napájecího transceiveru. Elektronika byla zhotovena na univerzální DPS.

Odběr kontroleru za chodu byl 150 mA, což je dostatečně nízká hodnota pro napájení z USB 2.0 portu.

Následující průběhy z osciloskopu byly změřeny v režimu automatického spouštění s nastavením tří pulzů o periodách 10, 20 a 30 μ s. Sonda A (horní, modrá) je připojena k signálu line trigger a sonda B (spodní, červená) k signálu line trigger wait.

Z obrázku 8.1 je patrné, že kontroler se chová dle očekávání. Jakmile kamera signalizuje připravenost signálem line trigger wait, kontroler po krátké prodlevě aktivuje line trigger na požadovanou dobu, zatímco line trigger wait se vrací do log. úrovně 0. Jakmile je kamera opět připravena, cyklus se opakuje. Prodleva mezi náběžnou hranou line trigger wait a vygenerováním signálu line trigger je způsobena tím, že kontroler musí reagovat na přerušení, nastavit a odstartovat čítač. Její délka je cca 9 μ s.

Na obrázku 8.2 je zachycen detail prvního pulzu. Je vidět, že délka pulzu line trigger je v rámci rozlišovací schopnosti časové základny přesně 10 μ s. Žádná časová nestabilita nebyla patrná. Kamera reaguje na vstup téměř okamžitě a zpracování řádku trvalo cca 2 μ s (šířka obrazu byla nastavena na 2048 px).

Dále byl proveden záznam snímků s různými nastaveními. Na obrázku 8.3 jsou dva totožné snímky, zaznamenány různými režimy. Snímek vlevo byl pořízen v režimu řízení délky expozice signálem line trigger (osvětlení svítilo neustále) a snímek vpravo v režimu řízení délky záblesku osvětlení (doba expozice tohoto snímku byla dvojnásobná než předešlého). Snímky jsou téměř nerozlišitelné, tudíž oba režimy jsou si rovnocenné.

Obrázek 8.4 znázorňuje jedno z možných využití systému. Obraz je zaznamenáván se třemi dobami expozice zároveň a rozložen do jednotlivých snímků, z kterých je možné vybrat manuálně ten nejvhodnější pro danou intenzitu osvětlení.

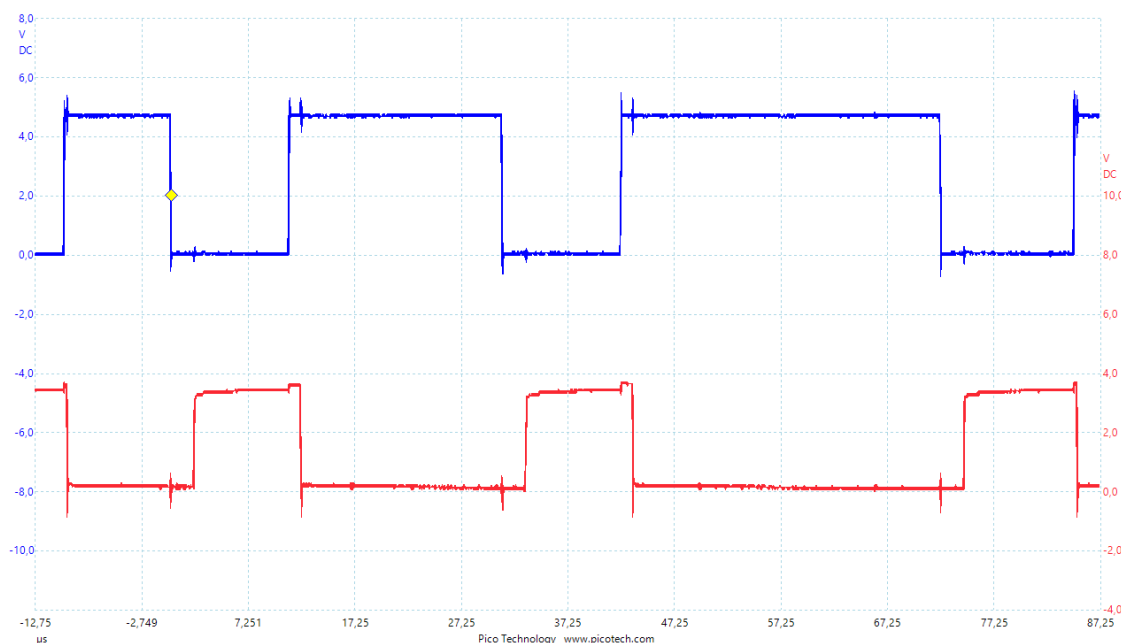
Při záznamu HDR snímku není třeba vybírat vhodný zdroj, ale je třeba sledovat, zda se snímky příliš nepřiblížily extrémům snímacího rozsahu kamery. V takovém případě bude obraz zrnitý a zašumělý. Obrázek 8.5 byl vytvořen za pomoci zdrojů s velmi nízkou dobou expozice (10 a 20 μ s, původní obraz nerozpoznatelný). Světlejšímu zdroji byl uměle zvýšen jas a kontrast. Lze pozorovat, že HDR zpracování nijak neredukuje šum, ale vytváří obraz s přijatelným jasnem a kontrastem.

Obrázek 8.6 ukazuje HDR zpracování s kvalitními zdroji. Lze zde ovšem pozorovat nedostatky použitého globálního mapování tonality (popsáno v kapitole 2). Některé detaily HDR snímku nejsou tak zřetelné, jak se jeví na snímku s expoziční dobou 800 μ s.

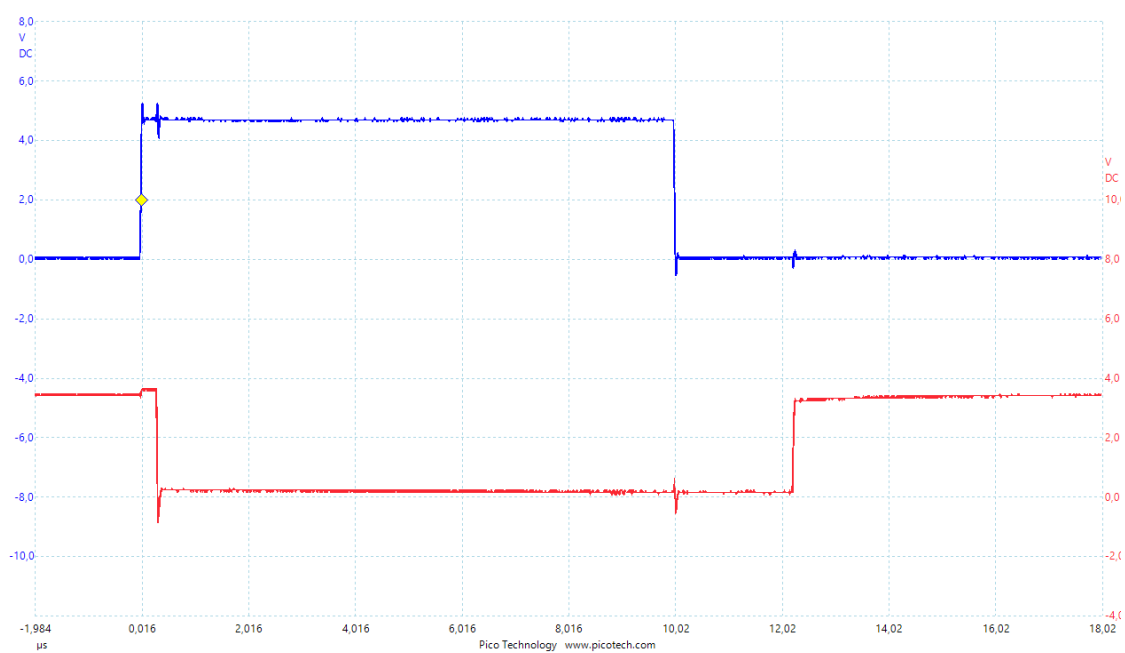
Globální mapování spojí nejvyšší jas ve snímku s maximální výstupní hodnotou a nejnižší jas s minimální. To způsobí razantní kompresi celého snímku a ztrátu detailu v oblastech s malým rozsahem jasu. Lokální metody mapování tonality tento problém řeší zesvětlením tmavých oblastí a ztmavením světlých oblastí za účelem zvýšení dostupného rozsahu pro každou oblast. Tyto metody jsou ovšem daleko výpočetně náročnější než globální mapování, a proto nebyly v práci testovány.

Obrázek 8.7 ukazuje složení barevného obrazu za pomoci RGB osvětlení. Zdrojem bylo 6 snímků, pro každou z barevných složek 2 doby expozice. Na každém kanále bylo provedeno HDR zpracování. Reprezentace barev výsledného snímku je uspokojivá.

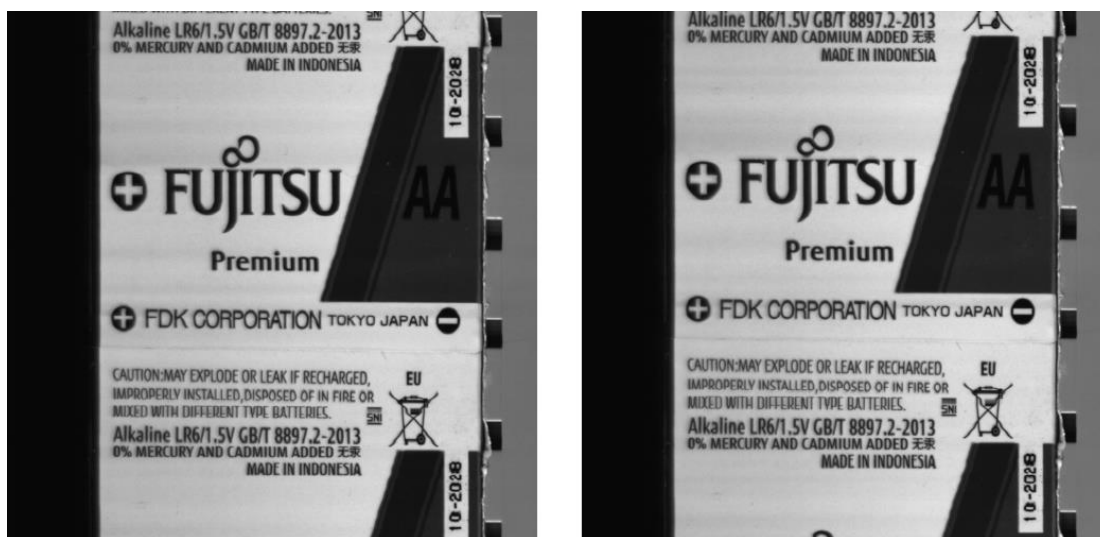
Srovnání barevných snímků s a bez použití HDR je na obrázku 8.8. Snímky byly upraveny na přibližně stejný jas a kontrast. HDR snímek lépe reprezentuje reálné barvy baterie, lze si všimnout menšího rozmazání tenkých textů a mírného potlačení odlesků.



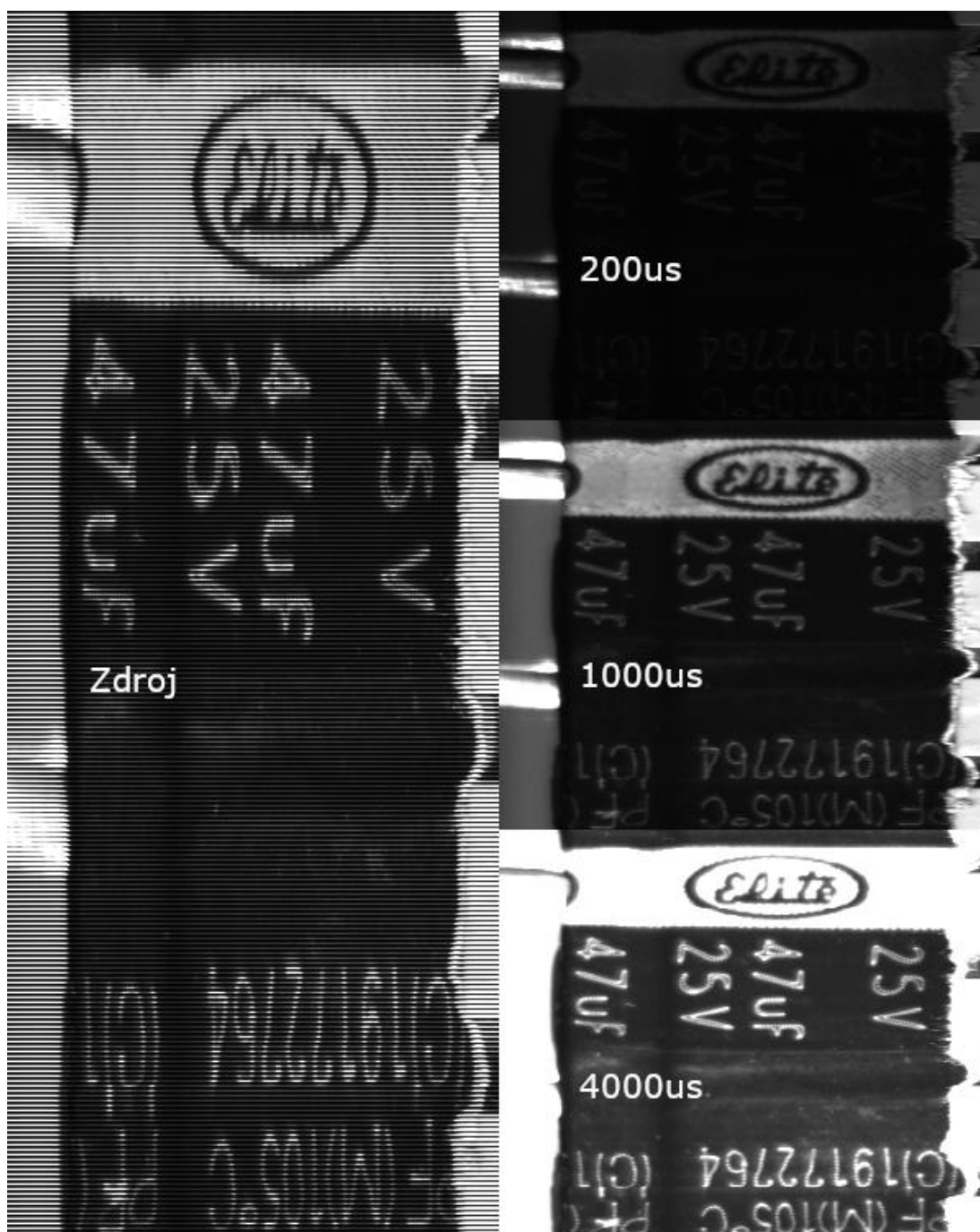
Obrázek 8.1 Měřené průběhy signálů – tři pulzy



Obrázek 8.2 Měřené průběhy signálů – detail



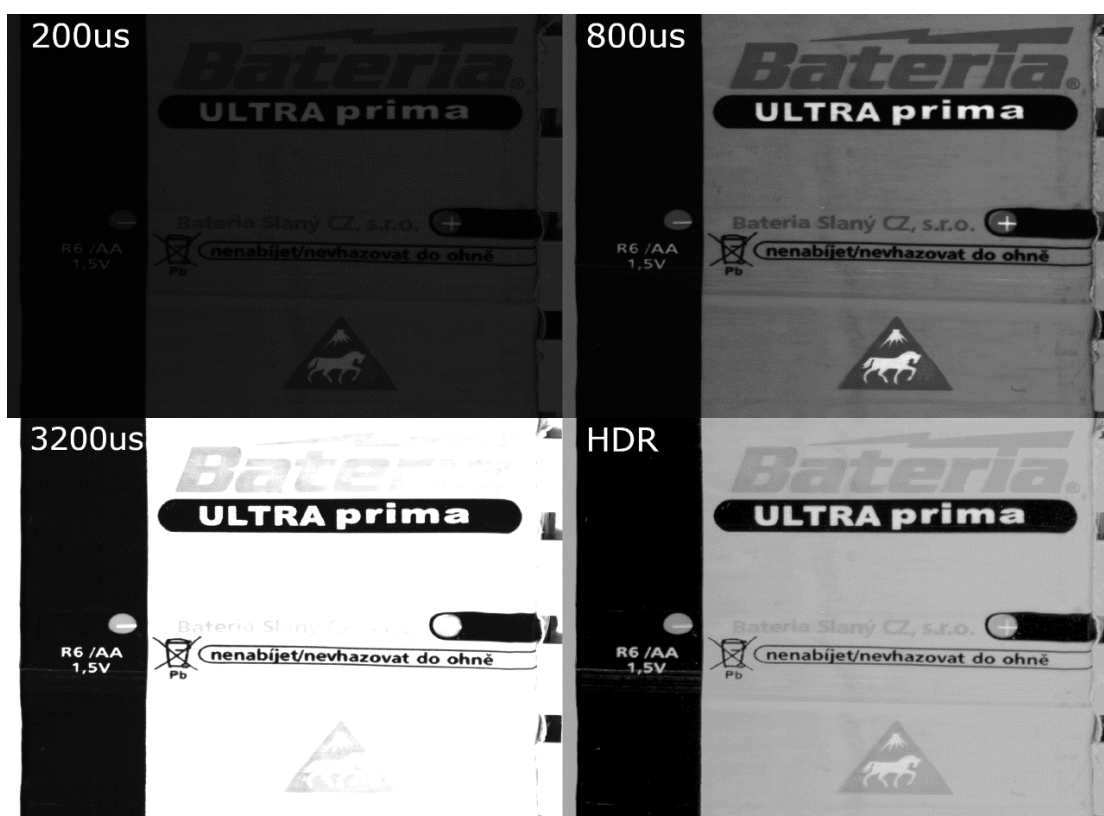
Obrázek 8.3 Snímky baterie – délka expozice a délka záblesku



Obrázek 8.4 Snímky kondenzátoru – výběr doby expozice



Obrázek 8.5 Snímky baterie – zašumělý obraz



Obrázek 8.6 Snímky baterie – HDR zpracování



Obrázek 8.7 Snímky baterie – složení RGB



Obrázek 8.8 Snímky baterie – porovnání barevných snímků

9. ZÁVĚR

Cíl bakalářské práce, čímž bylo vytvoření systému umožňujícího záznam HDR obrazu řádkovou kamerou, byl splněn. Některé navržené funkcionality ovšem nebyly z důvodu časové tísně implementovány ve firmware nebo nebyly otestovány. To se týká například spouštění externím signálem a spouštění z enkodéru.

Hlavní funkcionalita, což je záznam HDR obrazu pomocí řízení expoziční doby nebo délky záblesku externího osvětlení s automatickým spouštěním, je ovšem kompletní.

Nad rámec zadání byla implementována možnost snímat barevný obraz, která se nabízela vzhledem k univerzálně navrženému kontroleru využítemu pro HDR. Možnost snímat barevný obraz touto běžnou řádkovou černobílou kamerou je zajímavým a jistě užitečným rozšířením práce.

Při návrhu a výrobě kontroleru nevystaly žádné závažné problémy a byla použita hned první verze DPS.

Výsledný kontroler je schopen generovat pulzy s téměř neměřitelnou časovou nestabilitou a bylo by možné jej použít i s kamerami s vyšším maximálním line rate. Omezením je dlouhá prodleva odstartování pulzu, kterou by bylo možné zredukovat efektivnějším programováním.

Budoucím rozšířením této práce by mohlo být zkoumání lepších metod generování radiančních map a především lokálního mapování tonality, optimalizace rychlosti zpracování obrazu, možnost vytváření videozáznamu a implementace ostatních režimů spouštění.

LITERATURA

- [1] RIEMER, Klaus. Understanding the Fundamentals of Line Scan Cameras. Pharmamanufacturing.com [online]. 2017 [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <https://www.pharmamanufacturing.com/articles/2017/understanding-the-fundamentals-of-line-scan-cameras/>
- [2] Basler Product Documentation [online]. [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://docs.baslerweb.com/>
- [3] Basler racer Series [online]. [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.baslerweb.com/en/products/cameras/line-scan-cameras/racer/>
- [4] Line scan cameras [online]. [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.stemmer-imaging.com/en/products/category/line-scan-cameras/>
- [5] LIU, Jake. How color line scan camera technology has evolved. Vision-systems.com [online]. 2017 [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.vision-systems.com/home/article/16737578/how-color-line-scan-camera-technology-has-evolved>
- [6] MANTIUK, Rafał, Karol MYSZKOWSKI a Hans SEIDEL. High Dynamic Range Imaging [online]. 2016 [cit. 2021-11-13]. Dostupné z: <https://www.cl.cam.ac.uk/~rkm38/pdfs/mantiuk15hdri.pdf>
- [7] Basler racer USER'S MANUAL FOR GigE VISION CAMERAS [online]. Basler, 2019 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: https://www.baslerweb.com/fp-1556548672/media/downloads/documents/users_manuals/AW00118308000_racer_GigE_User_Manual.pdf
- [8] ATmega328PB Datasheet [online]. Microchip Technology, 2017 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001906A.pdf>
- [9] FT232R USB UART IC Datasheet [online]. Future Technology Devices International Limited, 2020 [cit. 2021-12-21]. Dostupné z: https://ftdichip.com/wp-content/uploads/2020/08/DS_FT232R.pdf
- [10] Transfer Multisort Elektronik [online]. Transfer Multisort Elektronik sp. z o.o., 2022 [cit. 2022-01-02]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/>
- [11] DEBEVEC, Paul E. a Jitendra MALIK. Recovering High Dynamic Range Radiance Maps from Photographs [online]. 1997 [cit. 2022-04-11]. Dostupné z: <http://www.pauldebevec.com/Research/HDR/debevec-siggraph97.pdf>
- [12] KUPKA, Petr. Snímání obrazu s vysokým dynamickým rozsahem [online]. 2017 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=150330
- [13] VANČURA, Jan. Tone-mapping HDR obrazů [online]. 2010 [cit. 2022-04-13]. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=117511

- [15] Piranha4 Cameras [online]. Teledyne Dalsa, 2019 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z:
<https://www.stemmer-imaging.com/media/uploads/cameras/dalsa/83/83145-Teledyne-DALSA-Piranha-4-CL-Color-2k-4k-Manual.pdf>
- [16] Bayer filter [online]. 2022 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Bayer_filter
- [17] Basler sprint USER'S MANUAL FOR COLOR CAMERAS [online]. Basler, 2015 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z:
<https://machinevisionstore.com/content/downloads/basler/SprintColorUsersManual.pdf>
- [18] ELIIXA+ 16k/8k CXP Cmos Multi-Line Colour Camera [online]. Teledyne Dalsa, 2017 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z:
https://www.g4.com.tw/userfiles/files/Datasheet/teledyne_dalsa_industrial_camera_line_scan_eliixa_16k_8k_cxp_color.pdf

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
HDR	High Dynamic Range (vysoký dynamický rozsah)
LDR	Low Dynamic Range (nízký dynamický rozsah)
HW	hardware
SW	software
ETH	ethernet
API	Application Programming Interface (rozhraní pro programování aplikací)
CCD	Charge Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (elektricky vymazatelná paměť pouze pro čtení)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (univerzální asynchronní přijímač-vysílač)
FLASH	nevolatilní elektricky programovatelná paměť s libovolným přístupem
RAM	Random Access Memory (paměť s náhodným přístupem)
PWM	Pulse Width Modulation (pulzně šířková modulace)
V/V	Vstupně/Výstupní
USB	Universal Serial Bus (univerzální sériová sběrnice)
IDC	Insulation-Displacement Connector
LED	Light-Emitting Diode (elektroluminiscenční dioda)
TTL	Transistor-Transistor Logic (tranzistorově-tranzistorová logika)
DPS	Deska Plošných Spojů
SMD	Surface Mount Device (součástka pro povrchovou montáž)
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (tranzistor se strukturou kov-oxid-polovodič řízený polem)
UI	User Interface (uživatelské rozhraní)
WPF	Windows Presentation Foundation
SDK	Software Development Kit (sada vývojových nástrojů)

Symboly:

E_i	Ozáření pixelu	(W*m ⁻²)
Z_{ij}	Hodnota pixelu	(-)
Δt_i	Doba expozice	(s)

I_{in}	Vstupní svítivost pixelu	(cd)
I_{out}	Výstupní svítivost pixelu	(cd)
I_{min}	Minimální svítivost obrazu	(cd)
I_{max}	Maximální svítivost obrazu	(cd)
D_{max}	Maximální výstupní svítivost	(cd)

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - PROJEKT V EAGLE, PŘILOŽEN NA CD.....	53
PŘÍLOHA B - PROJEKT V ATMEL STUDIO, PŘILOŽEN NA CD	54
PŘÍLOHA C - MODEL Y KRABÍČKY, PŘILOŽENY NA CD.....	55
PŘÍLOHA D - PROJEKT VE VISUAL STUDIO, PŘILOŽEN NA CD	56
PŘÍLOHA E - FOTOGRAFIE KONTROLERU	57
PŘÍLOHA F - FOTOGRAFIE SYSTÉMU	58

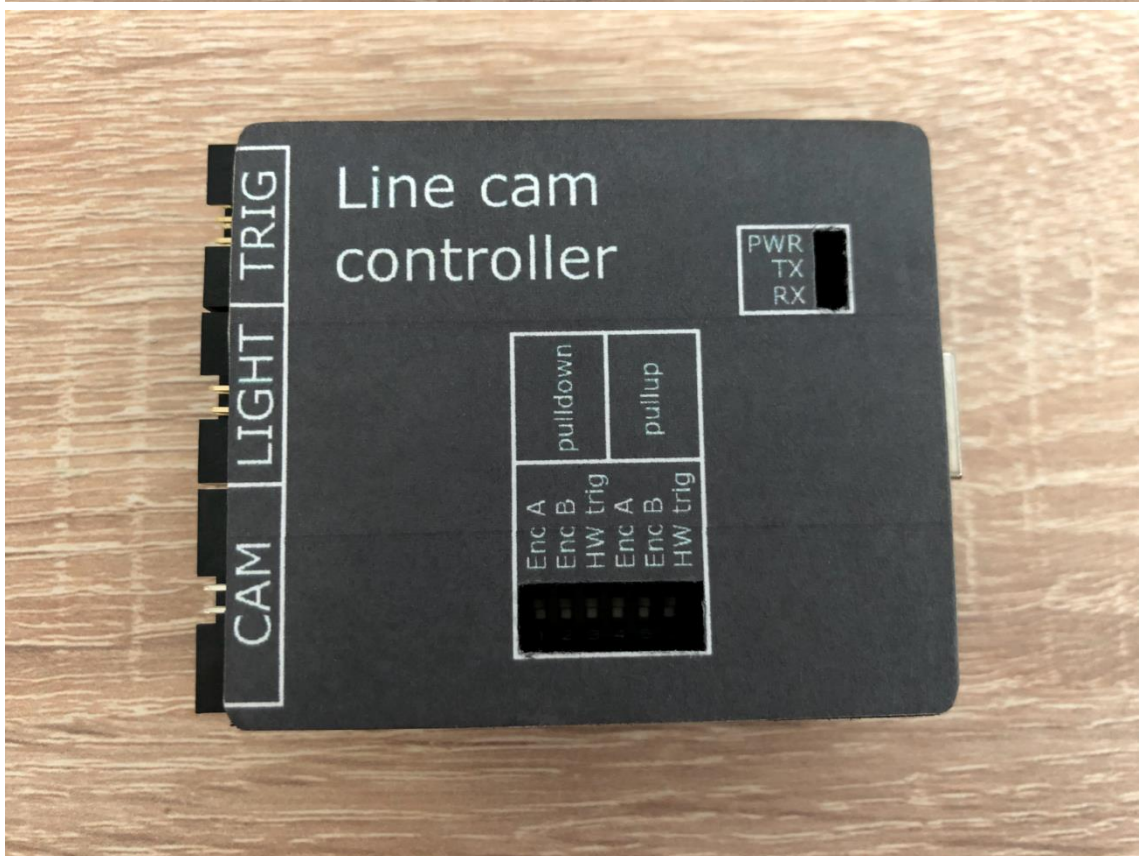
Příloha A - Projekt v EAGLE, přiložen na CD

Příloha B - Projekt v ATMEL Studio, přiložen na CD

Příloha C - Modely krabičky, přiloženy na CD

Příloha D - Projekt ve Visual Studio, přiložen na CD

Příloha E - Fotografie kontroleru



Příloha F - Fotografie systému

