

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA MĚŘENÍ



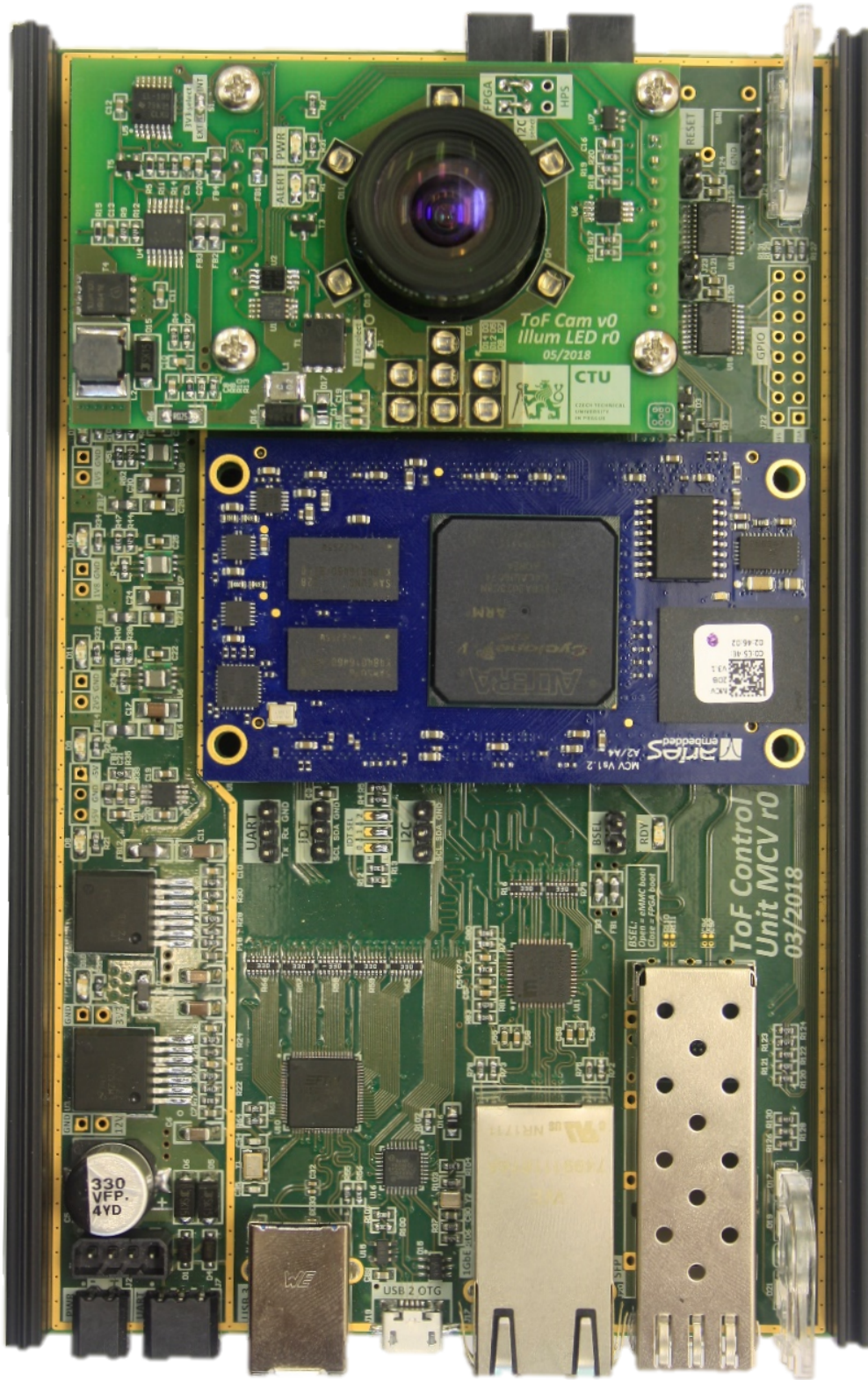
DIPLOMOVÁ PRÁCA

Riadiaca jednotka ToF kamery

Autor:
Bc. Stanislav DROZD

Vedúci práce:
Ing. Ján TOMLAIN

Praha, máj 2018



Názov práce: Riadiaca jednotka ToF kamery

Autor: Bc. Stanislav Drozd

Katedra (ústav): Katedra měření

Vedúci bakalárskej práce: Ing. Ján Tomlajn

e-mail vedúceho: tomlajan@fel.cvut.cz

Abstrakt Kamery založené na technológii Time-of-Flight (ToF) ponúkajú cenovo dostupné a výpočtne nenáročné riešenie snímania trojrozmerného priestoru v reálnom čase. Prvá časť tejto diplomovej práce si kladie za cieľ oboznámiť čitateľa so základným princípom tejto technológie a jej aktuálnymi možnosťami. Na základe prieskumu dostupných ToF kamier a snímačov je navrhnutý koncept vlastného riešenia konštrukcie riadiacej jednotky pre vybraný ToF snímač OPT8241 od firmy Texas Instruments. Jadrom riadiacej jednotky je programovateľné hradlové pole v kombinácii s dvojjadrovým procesorom ARM – Cyclone V. Ďalšia časť tejto práce sa venuje hardvéru riadiacej jednotky, od schematickeho návrhu až po dizajn DPS. Výsledkom je funkčný prototyp kamery typu Time-of-Flight, určený pre zdokonaľovanie tejto technológie skúmaním nových riadiacich a filtračných algoritmov.

Kľúčové slová: Time-of-Flight, ToF, kamera, 3D, meranie vzdialenosti

Title: ToF camera control unit

Author: Bc. Stanislav Drozd

Department: Department of Measurement

Supervisor: Ing. Ján Tomlajn

Supervisor's e-mail address: tomlajan@fel.cvut.cz

Abstract Cameras based on Time-of-Flight (ToF) principle offer cost-effective solution for real-time 3-D imaging using only a low computing power. The first part of this diploma thesis aims at informing the reader about the basic principle of this technology and its current possibilities. The concept of a custom control unit for the selected TOF sensor OPT8241 by Texas Instruments is designed based on a research of available ToF cameras and sensors. The hearth of the control unit is a FPGA combined with dual-core ARM processor – Cyclone V. Another part of this work is focused on the hardware of the control unit from the schematic design to the design of the PCB. The result is a functional prototype of the Time-of-Flight camera designed with a view to improve this technology by offering a device for testing new control and filtering algorithms.

Keywords: Time-of-Flight, ToF, camera, 3-D, distance measurement

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Drozd** Jméno: **Stanislav** Osobní číslo: **420375**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra měření**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**
Studijní obor: **Senzory a přístrojová technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Riadiaca jednotka ToF kamery

Název diplomové práce anglicky:

ToF Camera Control Unit

Pokyny pro vypracování:

Navrhněte a realizujte ucelenou řídicí jednotku snímače Time-of-flight (ToF) kamery. V rámci navrhovaného řešení implementujte vybraný ToF snímač spolu s řídicím kontrolérem na bázi SoC (System-on-the-chip) pro řízení a přenos dat. Hlavné komunikační rozhraní s nadřazeným systémem zvolte USB 3.0 a/alebo Ethernet. Analyzujte vhodnost využití SoC FPGA obvodů pro tuto úlohu. Práce by měla obsahovat teoretický rozbor technologie ToF spolu s dostupnými obvody, kompletnou koncepci navrhované HW platformy a jej hlavním výsledkem by měl být kompletný ucelený prototypový modul ToF kamery.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Texas Instruments, Introduction to the Time-of-Flight (ToF) System Design
- [2] A fast and flexible HW/SW co-processing framework for Time-of-Flight 3D imaging (Electronic ISBN: 978-1-5386-0472-4)
- [3] Texas Instruments, OPT8241 3D Time-of-Flight Sensor
- [4] Intel, Cyclone V Hard Processor System - Technical Reference Manual

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Ján Tomlain, katedra měření FEL

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

Datum zadání diplomové práce: **16.10.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **25.05.2018**

Platnost zadání diplomové práce:

do konce letního semestru 2018/2019

Ing. Ján Tomlain
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prehlasujem, že som predloženú prácu vypracoval samostatne a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s *Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací*.

V Prahe dňa 24. mája 2018

Bc. Stanislav Drozd

Týmto by som sa chcel poďakovať Ing. Radkovi Sedláčkovi, PhD. za možnosť pracovať na tejto zaujímavej téme a v neposlednom rade by som rád poďakoval vedúcemu práce, Ing. Jánovi Tomlainovi, za cenné rady, vecné pripomienky a ústretovosť pri tvorbe diplomovej práce.

Obsah

Abstrakt	iv
Zadanie práce	iv
1. Úvod	1
2. Technológia ToF	3
2.1. Základný princíp	3
2.2. Podrobná analýza	4
2.2.1. Pulzná metóda I-ToF	4
2.2.2. CW metóda I-ToF	5
2.3. Porovnanie ToF s ďalšími 3D snímačmi	7
2.3.1. Stereokamera vs. ToF	7
2.3.2. Štrukturované svetlo vs. ToF	8
3. Aktuálny stav technológie ToF	11
3.1. Možnosti využitia	11
3.2. Porovnanie dostupných kamier	12
3.3. Porovnanie dostupných snímačov	15
4. Požiadavky na hardvér	17
4.1. Vývojový modul OPT8241-CDK-EVM	17
4.1.1. Kontrolér OPT9221	17
4.2. Výber procesorovej jednotky	18
4.2.1. Prepojenie ToF senzoru s kontrolérom	18
4.2.2. Prepojenie kontroléru s okolím	20
4.2.3. Intel SoC FPGA	23
4.3. Finálny návrh štruktúry riadiacej jednotky	24
5. ToF kamera – návrh zapojenia	27
5.1. Napájanie	27
5.1.1. LMZ12003 – 3 A Simple Switcher	28
5.1.2. LMZ21701 – 1 A Simple Switcher	30
5.1.3. LM2687 – napäťový invertor	31
5.1.4. TPS7A4700 – ultra-nízkošumový napäťový stabilizátor	32
5.2. Resetovací obvod	33
5.3. USB 2.0	33
5.4. USB 3.0	34
5.5. Gigabit Ethernet	36
5.6. Time-of-Flight snímač	37
5.7. MCV modul	38
6. ToF kamera – návrh DPS	39
6.1. Chladenie ToF snímaču	41
7. Osvetľovač – návrh zapojenia	43
7.1. Prúdový zdroj	43

7.2. IR modul	44
8. Osvetlovač – návrh DPS	47
9. Záver	49
Zoznam skratiek	51
Zoznam obrázkov	53
Zoznam tabuliek	55
Prílohy	61
A. Schémy	I
A.1. GPIO a SD karta	I
A.2. MCV modul	II
B. Obsah priloženého CD	V

1 Kapitola 1.

Úvod

Počítače v dnešnej dobe zohrávajú dôležitú úlohu v rôznych aspektoch našich životov a je ťažké, predovšetkým pre mladšie generácie, predstaviť si bez nich svoj každodenný život. Spočiatku boli počítače využívané najmä pri riešení komplikovaných matematických výpočtov. Z dôvodu vysokej ceny výpočtového výkonu si ich spočiatku mohli dovoliť iba univerzity a veľké spoločnosti, čo sa ale zmenilo s príchodom osobných počítačov v sedemdesiatych rokoch minulého storočia. Tieto malé, ale na tú dobu výkonné, stroje priniesli nové technologické vymoženosti do malých firiem, či bežných domácností. Trh sa začal zameriavať aj na menej technicky zdatných používateľov, čo vyžadovalo prívetivejšiu interakciu človeka s počítačom. To malo za následok vývoj grafického rozhrania, ako aj intuitívneho spôsobu ovládania – klávesnice a myši.

V nasledujúcich rokoch zaznamenal počítačový priemysel obrovský rozmach. Výpočtový výkon sa podstatne zvyšoval, zatiaľ čo sa výrobné náklady a rozmery znižovali. Počítače tak čoraz viac prenikajú do našich životov z rôznych strán. Vreckové zariadenia nám poskytujú prístup na internet z takmer ktoréhokoľvek kúta našej planéty. Multimediálne systémy v našich obývačkách čoraz dôveryhodnejšie reproduktujú rôzne digitálne audiovizuálne nahrávky. Bez počítačom riadených systémov sa pomaly nezaobídeme v automobiloch, na výrobných linkách alebo v nemocniciach.

Nové formy počítačových systémov, ktoré sa svojim konceptom postupne prestávajú podobať osobným počítačom, ako ich poznáme z histórie, vyžadujú nové formy interakcie. Myš s klávesnicou nie sú vždy ideálnym prostriedkom pre ovládanie počítača. V posledných rokoch nastal veľký pokrok v oblasti dotykových obrazoviek a rozpoznávania reči. Ukázalo sa, že nie je jednoduché navrhnuť systém, ktorý by bol dostatočne spoľahlivý a robustný. Čo sa týka rozpoznávania reči, okrem správnej identifikácie hlasových povelov je taktiež problém rozlíšiť, ktoré slovné príkazy sú smerované systému a ktoré sú iba súčasťou bežnej konverzácie. Dotykové obrazovky však zaznamenali väčší úspech a stali sa tak neoddeliteľnou súčasťou dnešných inteligentných telefónov. V kombinácii so systémom rozpoznávania gest tak poskytujú používateľovi plnohodnotnú náhradu za kombináciu klávesnice a myši.

Ako to už býva, človek je neustále nespokojný s tým čo má a tak ustavične túži po niečom novom. Pridaním tretieho rozmeru do konceptu rozpoznávania gest odstraňuje potrebu využívania povrchov citlivých na dotyk. Tým sa blížime k pravému významu gestikulácie, ako prirodzenému spôsobu neverbálnej ľudskej komunikácie. [19]

Tento cieľ je uskutočniteľný vďaka novému typu kamery, nazývanému Time-of-Flight, skráteno ToF. Takáto kamera poskytuje hodnotu vyjadrujúcu vzdialenosť pre každý pixel zvlášť, vďaka čomu je možné určiť 3D štruktúru snímaného objektu. Na základe tejto technológie je možné obísť všetky aktuálne využívané spôsoby získavania 3D obrazu použitím obyčajných 2D kamier, ktoré nie sú dostatočne robustné a navyše sú náročné na výpočtový výkon, a pristúpiť priamo k ďalšiemu kroku – spracúvaniu už hotových 3D máp, ktoré kamera poskytuje. Aktuálne bežne dostupné ToF kamery na trhu ponúkajú dostatočný výkon (typicky rozlíšenie od 320×240 px pri snímkovej frekvencii nad 60 fps) pre nasadenie v úlohe rozpoznávania gest. Toto však nie je ani zďaleka jediná oblasť, v ktorej môžu byť takéto kamery využité.

Spojenie ToF a bežných farebných kamier je možné využiť pri vytváraní plnohodnotných trojrozmerných modelov reálnych objektov, detekcii pohybu či rozpoznávaní tváre. Taktiež je možné prepojiť viac

ToF kamier pre zlepšenie pokrytia snímanej scény. [20]

Technologický vývoj v oblasti strojového videnia historicky viedol k zvýšeniu kvality a efektivity v priemyselnom sektore, najmä v spojení s robotickou automatizáciou technologických procesov. Ďalší pokrok v automatizácii vyžaduje zlepšenie technológie strojového vnímania, čomu ToF kamera nepochybne pomáha. 3D zobrazenie, v ktorom každý pixel reprezentuje hĺbku, resp. vzdialenosť príslušného bodu scény, sa stáva čoraz rozšírenejším najmä preto, že takýto zobrazovací mechanizmus je ideálny pre reprezentáciu okolia strojmi. [28]

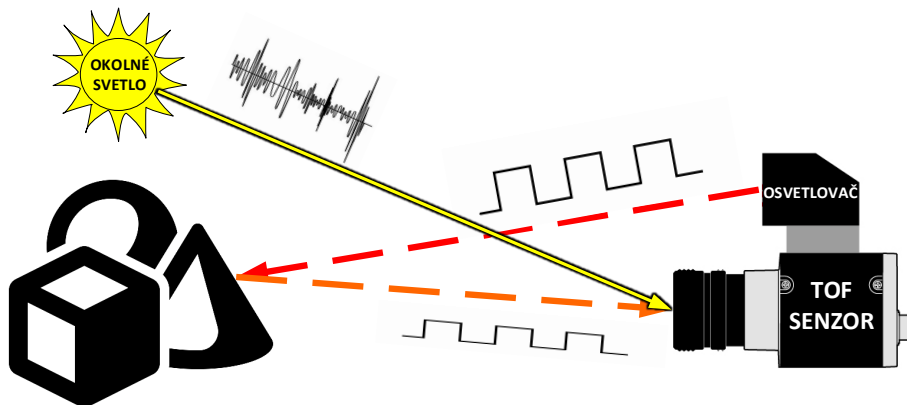
V prvej časti tejto práce je opísaný princíp snímania technológiou ToF nasledovaný prieskumom aktuálne dostupných snímačov, ako aj hotových produktov na trhu. Ďalšia časť pojednáva o návrhu riadiacej jednotky pre takýto snímač, vrátane rozboru použiteľných komunikačných rozhraní, ktorého výsledkom je bloková schéma. Posledná časť opisuje návrh Time-of-Flight kamery od schématických návrhov až po funkčný prototyp. Takáto kamera bude primárne určená pre výskum v oblasti technológie ToF a pre účely testovania rôznych vyhodnocovacích a filtračných algoritmov pre zefektívnenie a spresnenie aktuálne zaužívaných postupov.

Kapitola 2.

2 Technológia ToF

Pod skratkou ToF, alebo presnejšie 3D ToF, si predstavujeme technológiu, ktorá podľa firmy Texas Instruments [27] prináša revolúciu v odbore počítačového videnia. Argumentom pre toto tvrdenie je fakt, že spomínaná technológia je založená na 3D snímaní okolia pomocou cenovo dostupnej matice pixelov typu CMOS v kombinácii s aktívnym zdrojom modulovaného svetla. Kompaktné rozmery konštrukcie a jednoduchá obsluha, spolu s vysokou presnosťou a rýchlosťou snímania, otvárajú široké možnosti uplatnenia ToF kamier v rôznych priemyselných odvetviach, v oblasti logistiky, robotiky alebo napríklad v úlohe zaisťovania bezpečnosti osôb.

2.1. Základný princíp



Obr. 2.1.: Princíp snímania metódou ToF

Princíp merania vzdialenosti metódou 3D time of flight spočíva v osvetľovaní plochy pred snímačom modulovaným svetlom v IR spektre. Meraním fázového posunu odrazeného signálu je následne vyhodnocovaná vzdialenosť pre každý pixel zvlášť, čím vzniká hĺbková mapa snímaného objektu. [40] Tento princíp je ilustrovaný na obrázku 2.1.

2.2. Podrobná analýza

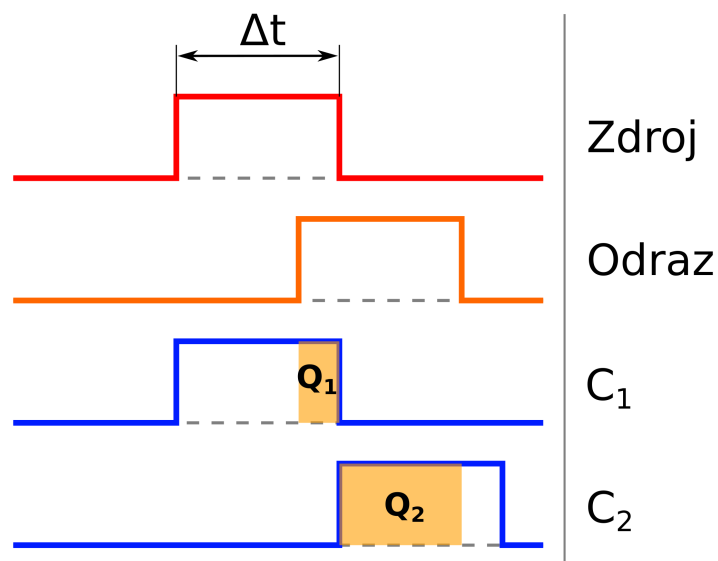
Osvetľovaciu jednotku typicky tvorí laser alebo LED s vlnovou dĺžkou okolo 850 nm , ktorá sa podľa CIE zaraduje do pásma IR-A. Žiarenie typu IR-A sa vyznačuje hlbokou penetráciou do pokožky a taktiež schopnosťou prieniku až na sietnicu, no aj napriek tomu nie je pre človeka viditeľné.[21]

Obrazový senzor, citlivý na rovnakú vlnovú dĺžku, premieňa energiu fotónov na elektrický prúd. Je dôležité si uvedomiť, že v bežných (neideálnych) podmienkach do senzoru vstupuje okrem odrazeného žiarenia z osvetľovača aj zložka rušivého žiarenia v podobe okolitého svetla. Informáciu o vzdialenosti meraného objektu nesie pochopiteľne iba zložka odrazeného žiarenia pochádzajúca z osvetľovača. Z uvedeného vyplýva, že vysoká zložka okolitého svetla redukuje odstup užitočného signálu od šumu (SNR).

Meranie vzdialenosti metódou ToF je možné dosiahnuť dvomi metódami - priamou a nepriamou. Priama metóda (D-ToF) sa opiera o meranie času medzi vyslaním pulzu osvetľovačom a jeho následnou detekciou senzorom. Tento princíp nie je celkom vhodný, pretože vyžaduje veľmi rýchly fotodetektor, ako napr. SPAD. Navyše je potrebná aj rýchla elektronika vyhodnocovacieho obvodu, keďže dosiahnutie rozlíšenia v rádoch milimetrov vyžaduje časovanie pulzov dĺžky jednotiek pikosekúnd. Takto krátke spínacie hrany je takmer nemožné dosiahnuť pri izbovej teplote s kremíkovými súčiastkami. Nepriama metóda (I-ToF) funguje na princípe merania fázového rozdielu medzi vyslaným a prijatým signálom, čiže v porovnaní s D-ToF nejde o presnú detekciu jednotlivých fotónov, ale o integráciu ich množiny, čo znižuje nároky na rýchlosť riadiacej a vyhodnocovacej elektroniky. [7]

Pre detekciu fázového posunu medzi vyžiareným a prijatým signálom je potrebné, aby bol zdroj svetla pulzný alebo modulovaný kontinuálnou vlnou (CW), typicky v tvare obdĺžnika alebo sínusoidy. Bežnejším typom je obdĺžnikový signál pre jeho jednoduchšiu realizáciu pomocou digitálnych obvodov. [20]

2.2.1. Pulzná metóda I-ToF



Obr. 2.2.: Pulzná metóda I-ToF

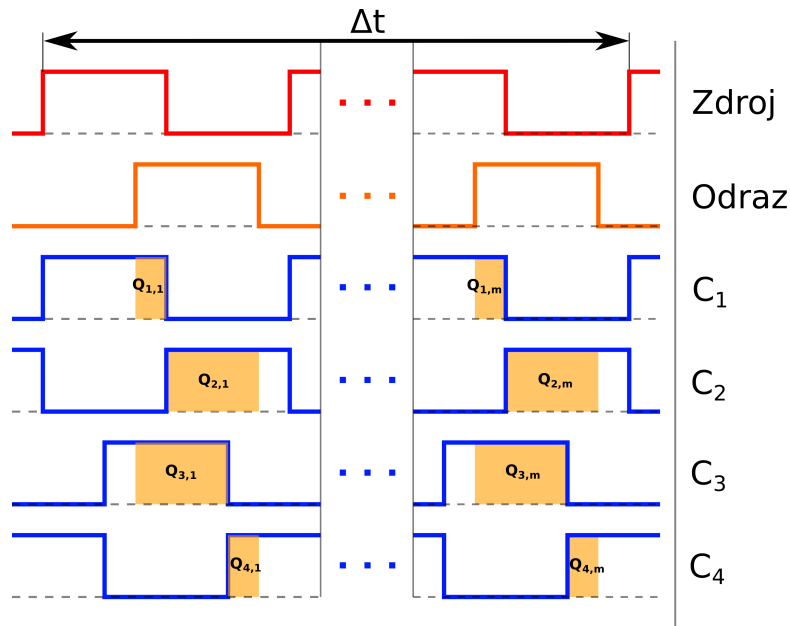
Pulzná metóda je pomerne jednoduchá. Osvetľovač vyšle pulz dĺžky Δt a jeho odraz je vzorkovaný pomocou dvoch, voči sebe o 180° fázovo posunutých, okien (C_1 a C_2) po dobu Δt . Tento dej prebieha paralelne pre všetky pixely. Elektrické náboje (Q_1 a Q_2) naakumulované počas tejto doby vzorkovania sú zmerané a následne použité pri prepočte na vzdialenosť podľa vzorca 2.1.

$$d = \frac{1}{2} c \Delta t \left(\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \right) \quad (2.1)$$

Kde:

- d [m] je vzdialenosť objektu od kamery
- c [m/s] je rýchlosť svetla v mieste merania
- Δt [s] je doba trvania vyslaného pulzu a súčasne aj dĺžka integračných okien C_1 a C_2
- Q_n [C], $n \in \{1, 2\}$ je náboj naintegrovaný počas trvania príslušného okna C_n

2.2.2. CW metóda I-ToF



Obr. 2.3.: Metóda kontinuálnej vlny I-ToF

Metóda kontinuálnej vlny, na rozdiel od pulznej metódy, zachytí počas doby merania väčšie množstvo vzoriek. V prípade 4 vzoriek (2.3) sú integračné okná rozfázované s krokom 90° . Pomocou tejto techniky je možné určiť fázový posun medzi vyslaným a prijatým signálom (φ) a hľadanú vzdialenosť objektu (d) s použitím nasledujúcich vzorcov:

$$\varphi = \arctan \left(\frac{Q_3 - Q_4}{Q_1 - Q_2} \right) \quad (2.2)$$

$$d = \frac{c}{2f} \cdot \frac{\varphi}{2\pi} \quad (2.3)$$

Meranú pixelovú intenzitu (A) a offset (B) potom získame nasledovným spôsobom:

$$A = \frac{\sqrt{(Q_1 - Q_2)^2 + (Q_3 - Q_4)^2}}{2} \quad (2.4)$$

$$B = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4}{4} \quad (2.5)$$

Na prvý pohľad sa môže zdať, že zložitosť tejto metódy je, v porovnaní s pulznou, neopodstatnená. Pri bližšom skúmaní si ale môžeme všimnúť, že členy $(Q_3 - Q_4)$ a $(Q_1 - Q_2)$ napomáhajú zníženiu konštantného offsetu merania. Okrem toho, pomer členov vo fázovej rovnici znižuje multiplikatívnu chybu merania vzdialenosti, ktorú zapríčiňuje napr. zosilnenie či útlm systému alebo zmeny intenzity odrazeného žiarenia.

Amplitúda odrazenej vlny (A) a offset (B) majú vplyv na presnosť merania. Odchýlku merania vzdialenosti pomocou týchto členov môžeme vyjadriť vzorcom 2.6.

$$\sigma = \frac{c}{4\sqrt{2}\pi f} \cdot \frac{\sqrt{A+B}}{c_d A} \quad (2.6)$$

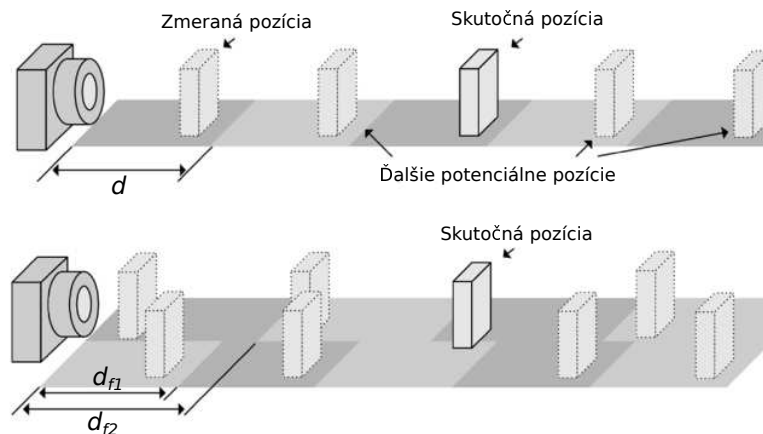
Modulačný kontrast (c_d) vyjadruje schopnosť ToF senzoru oddeľovať a zbierať fotoelektróny z užitočného signálu. Amplitúda A je funkciou optického výkonu, zatiaľ čo offset B je funkciou okolného osvetlenia a offsetu zvyšku systému. Z rovnice 2.6 potom vyplýva, že veľká amplitúda spolu s vysokým modulačným kmitočtom a vysokým modulačným kontrastom napomáhajú k zvyšovaniu presnosti, zatiaľ čo príliš veľký offset vedie k saturácii, čo naopak znižuje presnosť merania. Nie je to ale také jednoduché, ako by sa mohlo zdať. Pri vysokých frekvenciách sa, so zvyšujúcou sa modulačnou frekvenciou, z dôvodu fyzikálnych vlastností kremíka, začína znižovať modulačný kontrast. Tento fakt určuje horný limit použiteľnej modulačnej frekvencie – tzv. roll-off. ToF snímače, ktoré majú vyšší roll-off, majú vo všeobecnosti aj vyššiu presnosť.

Skutočnosť, že CW metóda sa opiera o meranie fázového rozdielu, ktorý sa pretočí vždy po 2π , poukazuje na fakt, že pri meraní vzdialenosti vzniká aliasing. Vzdialenosť, v ktorej tento aliasing nastáva, sa označuje „ambiguity distance“ – d_{amb} (voľne tento pojem môžeme preložiť ako „nejednoznačná vzdialenosť“) a je definovaná ako:

$$d_{amb} = \frac{c}{2f} \quad (2.7)$$

Keďže sa fáza pretáča s periódou 2π , tak d_{amb} je súčasne aj maximálna detekčná vzdialenosť. Pre zvýšenie dosahu takéhoto ToF snímača stačí znížiť modulačnú frekvenciu. Po zohľadnení vzorca 2.6 to však bude mať za následok aj zníženie presnosti merania.

V prípade, že takýto kompromis neprichádza do úvahy, existuje riešenie aj tohoto problému. Reč je o multifrekvenčnej technike, ktorá umožní rozšírenie dosahu bez nutnosti znižovania modulačnej frekvencie. Táto technika spočíva v pridaní jednej alebo viacerých modulačných frekvencií. Každé modulačnej frekvencii bude zodpovedať iná nejednoznačná vzdialenosť a skutočná vzdialenosť predmetu bude tá, ktorá sa bude zhodovať pre všetky použité modulačné frekvencie. Dvojfrekvenčná technika je naznačená na nasledujúcom obrázku.



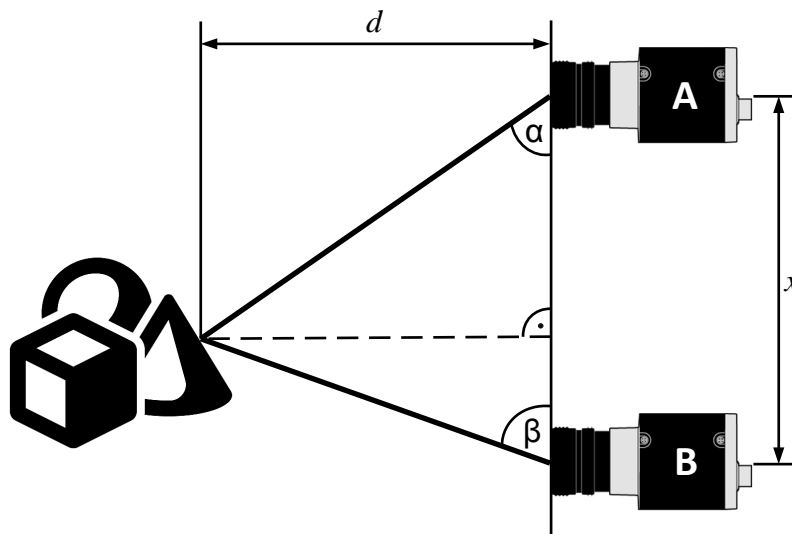
Obr. 2.4.: Zväčšenie dosahu pomocou dvojfrekvenčnej metódy
Zdroj: [27]

Symbole použité vo vyššie uvedených vzorcoch

- φ [rad] – fázový posun medzi vyžiareným a detekovaným signálom po odraze
- Q_n [C], $n \in \{1, 2, 3, 4\}$ – náboj naintegrovaný počas trvania príslušného okna C_n , v súčte počas celej doby integrácie (Δt) – $Q_n = \sum_{i=1}^m Q_{n,i}$
- d [m] – vzdialenosť objektu od kamery
- c [m/s] – rýchlosť svetla v mieste merania
- f [Hz] – modulačná frekvencia
- A [C] – pixelová intenzita (amplitúda)
- B [C] – offset
- σ – smerodajná odchýlka merania vzdialenosti
- c_d – modulačný kontrast
- d_{amb} – ambiguitná distance – nejednoznačná vzdialenosť

2.3. Porovnanie ToF s ďalšími 3D snímačmi

2.3.1. Stereokamera vs. ToF



Obr. 2.5.: Princíp merania vzdialenosti stereokamerou

Stereokamera vo všeobecnosti pozostáva z dvoch kamier s usporiadaním podobným ľudským očiam, medzi ktorými je známa a konštantná vzdialenosť (x). Zamerajme sa na jediný bod v priestore. Ak tento bod vidia obe kamery a súčasne sú voči sebe posunuté (ako naznačuje Obr. 2.5), musí byť tento bod na záberoch z oboch kamier na rozdielnej pozícii. Ak budeme reprezentovať použité kamery modelom dierkovej komory (princíp camera obscura), tak pozícia skúmaného bodu môže byť vyjadrená pomocou rovinného

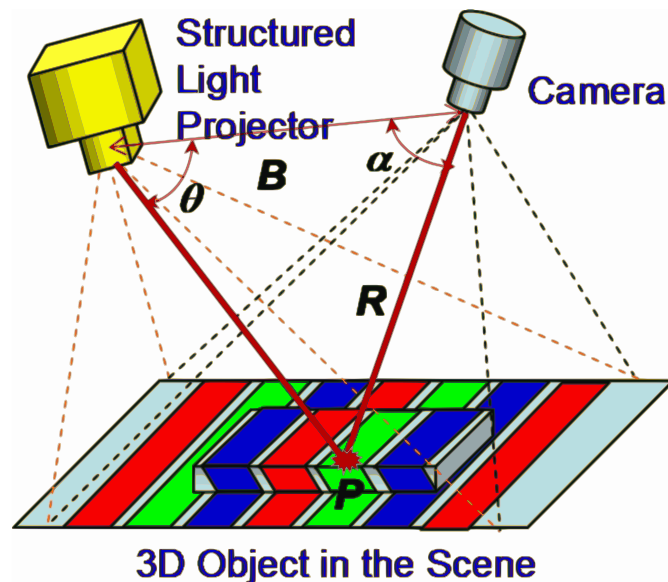
uhlu, označme ho α pre kameru A a β pre kameru B . Na základe týchto hodnôt môžeme vyjadriť vzdialenosť d , medzi rovinou kamier a skúmaným bodom, nasledovne:

$$d = \frac{x}{\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{1}{\tan \beta}} \quad (2.8)$$

Hlavnou výzvou pri implementácii technológie pracujúcej na princípe stereokamery, je riešenie problému zhody. Inými slovami, ak sa zameriame na jeden bod zachytený kamerou A , je komplikované určiť, ktorý bod mu korešponduje v obraze kamery B . Kým nie je hľadaný bod (resp. vo väčšine prípadov množina bodov) jednoznačne určený v obrazoch oboch kamier, nie je možné správne vyčíslíť vzdialenosť. Riešenie problému zhody zahŕňa zložité a výpočtovo náročné algoritmy. Pre zabezpečenie čo najlepšej korelácie, je taktiež dôležité dostatočné osvetlenie objektu a rozmanitosť farieb. Nedodržanie spomínaných požiadaviek znižuje presnosť stereokamery, napr. meranie vzdialenosti jednofarebnej steny. ToF metóda nepozná takéto limity, pretože jej výsledok nezávisí na farbe či textúre monitorovaného objektu.

Odchýlka merania stereokamerou je kvadratickou funkciou vzdialenosti. Pre porovnanie, aj ToF senzor, ktorý pracuje s odrazeným svetlom je citlivý na vzdialenosť. Tento nedostatok je však v prípade potreby možné napraviť zvýšením intenzity osvetľovača. Táto hodnota môže byť navyše použitá ako metrika dôveryhodnosti pre maximalizáciu presnosti použitím Kalmanovho filtra.

2.3.2. Štrukturované svetlo vs. ToF



Obr. 2.6.: Princíp merania vzdialenosti štrukturovaným svetlom
Zdroj: [27]

Metóda štrukturovaného svetla (angl. Structured-Light) pracuje na princípe osvetľovania objektu známym vzorom, zosnímania takto osvetleného objektu a následnej analýze deformácie tohoto vzoru v dôsledku zakriveného povrchu skúmaného objektu. Pre získanie jednej hĺbkovej mapy je často potrebných niekoľko, za sebou nasledujúcich kódových, či fázovo posunutých, vzorov. To vo výsledku vedie k nižšej snímkovej frekvencii. [15] Nižšia snímková frekvencia so sebou prináša isté obmedzenia, predovšetkým v tom, že snímaný objekt by mal byť relatívne nehybný pre zamedzenie „rozmazávania“ premietaného vzoru. Odrazený vzor je taktiež náchylný na optickú interferenciu s okolitým svetlom. Hlavnou výhodou štrukturovaného svetla je fakt, že dokáže dosiahnuť relatívne vysoké priestorové (X-Y) rozlíšenie s použitím bežných DLP projektorov a farebných HD kamier.

Pre porovnanie, ToF kamera je menej náchylná na mechanické usporiadanie a okolité svetelné podmienky. Okrem toho, je taktiež kompaktnější, čo sa fyzických rozmerov týka. Aktuálne dostupné ToF kamery majú spravidla nižšie rozlíšenie ako systémy štrukturovaného svetla, ale to sa postupom času rapídne zvyšuje.

Porovnanie ToF kamery so stereokamerou a štrukturovaným svetlom je názorne zobrazené v tabuľke 2.1.

Vlastnosti	Time-of-Flight	Stereokamera	Štrukturované svetlo
Zložitosť SW	Nízka	Vysoká	Stredná
Cena zariadenia	Stredná	Nízka	Vysoká
Fyzické rozmery	Malé	Malé	Veľké
Odozva	Rýchla	Stredne rýchla	Pomalá
Presnosť	Stredná	Nízka	Vysoká
Funkčnosť – nízke osvetlenie	Dobrá	Slabá	Dobrá
Funkčnosť – vysoké osvetlenie	Dobrá	Dobrá	Slabá
Spotreba energie	Prispôsobiteľná	Nízka	Stredná
Dosah	Prispôsobiteľný	Obmedzený	Prispôsobiteľný
Uplatnenie			
Hry	✓	✓	
3D filmy		✓	
3D skenovanie	✓		✓
Ovládanie UI	✓		
Rozšírená realita	✓	✓	

Tab. 2.6: Porovnanie 3D snímacích technológií
(Zdroj dát: [27])

Z uvedenej tabuľky vyplýva, že ToF kamera je cenovo výhodným riešením všade tam, kde sa vyžaduje presná hĺbková analýza nezaťažaná chybou, ktorú by mohli spôsobiť nepriaznivé svetelné podmienky z okolia, či nevhodne zvolené pozadie skenovaného objektu. Jej kompaktné rozmery sú taktiež výhodou pri nasadení v širokej škále aplikácií.

3 Kapitola 3.

Aktuálny stav technológie ToF

V súčasnosti automatizácia technologických procesov v priemyselných odvetviach vyžaduje 3D dáta pre analýzu okolitého priestoru. Pre navigáciu a riadenie v robotických systémoch je zase veľmi dôležitá vysoká rýchlosť získavania týchto 3D máp pre ich následnú analýzu a rýchle plánovanie ďalších krokov. Novo vyvinuté 3D ToF kamery sú už na trhu dostupné za pomerne priaznivé ceny a vďaka svojim mimoriadne dobrým technickým špecifikáciám postupne nahrádzajú staršie 3D skenery. V jednotke ToF kamery sa osvetľovacou jednotkou emituje modulovaný signál a cieľová vzdialenosť sa určí na základe doby prijatia tohoto signálu prijímacou jednotkou po jeho odraze. Nemecká firma PMD Technologies vyvinula už okolo roku 2000 3D senzor pracujúci na princípe Time-of-Flight, ktorý pokrýva širokú škálu aplikácií vďaka vysokej miere integrácie a efektívnej výrobe. [18]

Nevhodná štruktúra povrchu snímaných objektov a ani nedostatočné osvetlenie objektu nemá vplyv na výslednú kvalitu obrazu pri použití ToF kamier. V porovnaní so stereokamerami sú výpočtovo nenáročnejšie a v porovnaní s laserovými skenermi majú vyššiu snímkovú frekvenciu a kompaktnějšíe rozmery samotného senzoru. Tieto výhody robia z ToF kamery vhodný prostriedok pre trojrozmerné snímanie a počítačovú rekonštrukciu pohybu objektov. [9]

V literatúre sa často uvádzajú nasledujúce prednosti ToF kamier:

- Jednoduchosť – v porovnaní s inými systémami počítačového 3D videnia je tento systém veľmi jednoduchý a kompaktný, neobsahuje žiadne pohyblivé časti a osvetľovač býva umiestnený hneď vedľa objektívu.
- Účinnosť – pre získanie informácie o vzdialenosti je potrebný len veľmi malý výpočtový výkon.
- Rýchlosť – v porovnaní s laserovými skenermi, ktoré pozostávajú z pohyblivých častí a merajú vzdialenosti skúmaného objektu bod po bode, ToF kamery zachytia celú scéneriu jedným snímkom so snímkovou frekvenciou dosahujúcou až 150 fps.

3.1. Možnosti využitia

ToF kamery si, aj napriek svojej krátkej existencii, stihli nájsť uplatnenie v rôznych úlohách, ako napríklad:

- robotika - vyhýbanie sa prekážkam [54]
- hľadanie zranených osôb v neprístupnom teréne pomocou mobilných robotov [51]
- plánovanie trasy pre robotické manipulátory [50]
- 3D mapovanie okolia [23]
- navigačné a bezpečnostné systémy vozidiel a invalidných vozíkov [5]
- sledovanie objektov v exteriéri [12]
- SLAM [6]

- mapovanie budov [1]
- monitoring dýchania na základe pohybu [34]
- rozšírená realita [33]
- rozpoznávanie gest [22]
- sledovanie pohybu ľudského tela bez použitia referenčných značiek [35]
- upratovanie domácností humanoidnými robotmi [3]
- interakcia človeka so strojom [11]

3.2. Porovnanie dostupných kamier

V priebehu rokov sa na trhu postupne objavilo zopár výrobcov, ktorí ponúkali kamery typu Time-of-Flight. Niekoľko rokov prevládali výrobcovia ako CSEM/MESA Imaging, PMD Technologies, Canesta a 3DV Systems. Len nedávno sa začali na trhu objavovať aj iné spoločnosti, poskytujúce vlastné senzorové technológie, alebo integrujúce existujúce technológie do vlastných kamier. Ide o firmy ako Basler, Infineon či Texas Instruments. Porovnanie vybraných produktov od výrobcov samotných senzorov je v nasledujúcej kapitole.

Typickým zástupcom prvých špičkových ToF kamier je SR4000, ktorá bola vyvinutá v Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique (CSEM) – Obr. 3.1a – a teraz ju vyrába a distribuuje švajčiarska firma MESA Imaging. Je založená na princípe merania fázového posunu a rozlíšenie senzoru je $176 \times 144 \text{ px}$. Modulačná frekvencia je 30 MHz . S takouto modulačnou frekvenciou dosahuje maximálnu detekčnú vzdialenosť 5 m . Presnosť merania je $0,5\%$ z rozsahu 2 m , čo predstavuje odchýlku maximálne 5 mm . Táto chyba merania je udávaná ako zmena medzi dvomi po sebe nasledujúcimi obrázkami. Absolútna chyba merania je stanovená na 10 mm v kalibrovanom rozsahu kamery. SR4000 podporuje okrem základnej modulačnej frekvencie 30 MHz aj nasledujúce: $14,5 \text{ MHz}$, 15 MHz , $15,5 \text{ MHz}$, 29 MHz , 31 MHz . To poskytuje jednoznačnú snímáciu vzdialenosť v rozmedzí približne $5 - 10 \text{ m}$. SR4000 dosahuje snímkovú frekvenciu do 54 fps a uhol záberu $43,6^\circ$. [32]

CamCube (Obr. 3.1b) od nemeckej spoločnosti PMD Technologies ponúka o niečo vyššie rozlíšenie – $204 \times 204 \text{ px}$, ale princíp snímania je taktiež založený na meraní fázy odrazeného signálu. Jeho výhodou v porovnaní s inými kamerami je držiak objektívu typu CS-Mount, ktorý umožňuje jednoduchú výmenu objektívu. Táto kamera je vybavená dvomi masívnymi osvetľovacími jednotkami uchytenými po bokoch snímacieho modulu. Každý osvetľovač je navyše vybavený aktívnym chladičom v podobe ventilátora, zatiaľ čo SR4000 sa zvláda chladiť pasívne. [52]

ZCam (Obr. 3.1c) je cenovo dostupná ToF kamera vyvinutá izraelskou spoločnosťou 3DV Systems, založená na pulznom princípe snímania s použitím elektronickej uzávierky. Poskytuje súčasne farebný aj hĺbkový obraz s rozlíšením $320 \times 280 \text{ px}$. Napriek vyššiemu rozlíšeniu poskytuje zábery v horšej kvalite ako vyššie spomínané konkurenčné produkty. Primárne bola určená pre herný priemysel. [53] V roku 2009 bola firma 3DV Systems kúpená spoločnosťou Microsoft v rámci projektu Natal.

Najmenšia ToF kamera bola vyvinutá v CSEM ako projekt EU s názvom ARTTS (Obr. 3.1d). Jej rozmery sú iba $38 \times 38 \times 35,4 \text{ mm}$. Jej rozlíšenie je $176 \times 144 \text{ px}$ a podporuje modulačné frekvencie až do 80 MHz . Okrem kompaktných rozmerov je jej výhodou aj nízka spotreba, čo umožňuje jej napájanie priamo z USB portu počítača, nepotrebuje teda žiadne externé napájanie.

Medzi najmodernejšie kamery rozhodne patrí „Time-of-Flight Camera“ od firmy Basler (Obr. 3.1e). VGA rozlíšením ($640 \times 480 \text{ px}$) prekonáva všetky doteraz spomínané modely, avšak zaostáva za nimi svojou vzorkovacou frekvenciou 20 fps .

Unikátom medzi ToF kamerami je StarForm (Obr. 3.1f) so vzorkovacou frekvenciou až 450 fps v burst móde (zачytenie $1,3 \text{ s}$ záznamu) a rozlíšením až $1280 \times 1024 \text{ px}$.

Technické parametre, ktoré bolo možné dohľadať sú zhrnuté v tabuľke 3.1.



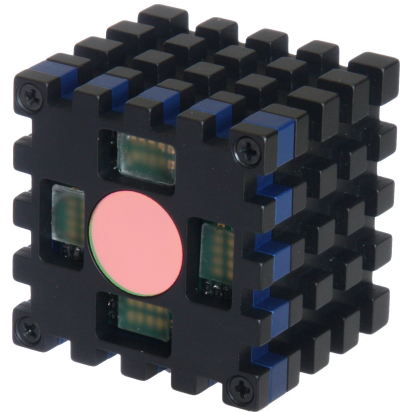
(a) SR4000 (MESA Imaging)



(b) CamCube (PMD Technologies)



(c) ZCam (3DV Systems)



(d) ARTTS (CSEM)



(e) Basler Time-of-Flight Camera



(f) StarForm (Odos Imaging)

Obr. 3.1.: Príklady ToF kamier
Zdroje: [4, 8, 19, 28]

	SR4000	CamCube	ZCam	ARTTS	Basler	StarForm
Rozlíšenie [px]	176 × 144	204 × 204	320 × 240	176 × 144	640 × 480	1280 × 1024
Snímková frekvencia [fps]	54	25	60		20	30/450
Detekčná vzdialenosť [m]	10	7	3		13	8+
Modulačná frekvencia [MHz]	30	20	50	80		
Absolútna chyba merania [mm]	10		20		10	10
Teplotný drift [mm/K]					0,7	
Zorné pole [°]	43,6	podľa objektívu	60		57 × 43	podľa objektívu
Vlnová dĺžka [nm]			870		850	905
Veľkosť snímača					1/4"	23 mm (1 1/3")
Veľkosť pixelu [μm]		45 × 45				14 × 14
Rozmery [mm]				38 × 38 × 35,4	142 × 62 × 76	Kamera: 80 × 80 × 104 Osvetľovače: 45 × 70 × 75
Hmotnosť [g]					450	1500
Komunikačné rozhranie			USB 2.0	USB	Gigabit Ethernet	Gigabit Ethernet
Napájanie				USB	24 V, 15 W	12 V, 20 W
Uchytenie objektívu	integrovateľný	CS-Mount	integrovateľný	integrovateľný	integrovateľný	C-Mount
Krytie					IP30	

Tab. 3.1: Porovnanie vybraných ToF kamier

3.3. Porovnanie dostupných snímačov

Cieľom tejto práce je návrh riadiacej jednotky, preto bolo bezpodmienečne nutné nájsť vhodný senzor, implementujúci meranie vzdialenosti technológiou ToF, s ktorým by navrhovaná jednotka komunikovala. Pri hľadaní bol kladený dôraz na výrobcu poskytovanú podporu a nákupnú dostupnosť u dodávateľov elektronických súčiastok. Prehľad skúmaných snímačov je uvedený v tabuľke 3.2. Keďže sa jedná o relatívne nové produkty, tak katalógové listy jednotlivých snímačov obsahujú rôznu hĺbku informácií. Najrozsiahlejšou dokumentáciou z pojednávaných senzorov disponuje snímač OPT8241 od spoločnosti Texas Instruments. Výrobca tohto snímača dokonca poskytuje samostatnú vývojovú dosku obsahujúcu snímač, kontrolér, osvetľovač a optické prvky. OPT8241 v sebe kombinuje ToF senzor, optimálne navrhnutý analógovo-digitálny prevodník a univerzálny programovateľný časovač (TG). Tento snímač ponúka rozlíšenie QVGA ($320 \times 240 \text{ px}$) pri snímkovej frekvencii 150 fps , čomu zodpovedá 600 vyčítaní analógových dát za sekundu. Vstavaný časovač riadi reset, moduláciu, vyčítavanie aj digitalizačnú sekvenciu. Programovateľnosť tohoto časovača ponúka flexibilitu pri procese optimalizácie v rôznych smeroch, ako napr. výkon, potlačenie rušivého vplyvu okolia, či SNR). [45]

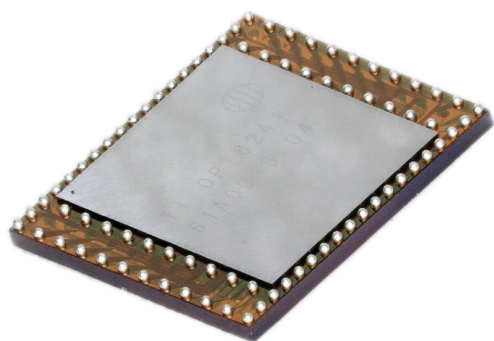
Druhým predstaviteľom z radov ToF snímačov je MLX75023 od belgickej firmy Melexis. Podobne ako OPT8241 poskytuje rozlíšenie QVGA so snímkovou frekvenciou až 600 fps . Veľkým nedostatkom je však výstupný formát dát, ktorý je v tomto prípade analógový s adresovaním po jednotlivých pixeloch. Melexis k tomuto senzoru našťastie ponúka aj kontrolér s A/D prevodníkom, avšak ani v katalógu od tohoto kontroléru nie je presne špecifikovaná výsledná snímková frekvencia, ale je zrejmé, že pre získanie jedného obrázku sú potrebné 4 sady analógových dát, čiže vo výsledku nepresiahne 150 fps . [29]

Snímač IRS1125C od firmy Infineon sa svojim rozlíšením $352 \times 288 \text{ px}$, od vyššie spomínaných, príliš nelíši. Snímková frekvencia je o tretinu nižšia (100 fps) a ostatné parametre nie je jednoduché dohľadať, pretože voľne dostupný je iba prezentačný leták [24], ktorý okrem množstva superlatívov neponúka dostatok technických špecifikácií. Ani dostupnosť u dodávateľov elektronických súčiastok nie je ideálna. Podľa [10] tento snímač podporuje modulačnú frekvenciu až 100 MHz .

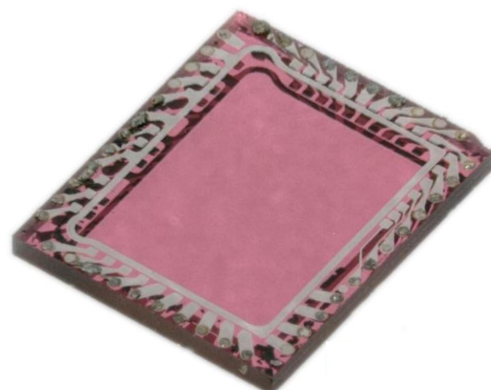
Zaujímavým senzorom sa javí výrobok spoločnosti ST Microelectronics s typovým označením VL53L0X. Jedná sa o jednobitový senzor vzdialenosti pracujúci taktiež na princípe Time-of-Flight, konkrétne D-ToF (obsahuje SPAD). Ide o aktuálne najmenší dostupný ToF senzor. So spotrebou okolo $1,5 \text{ mA}$, dosahom až 2 m a odchýlkou merania okolo $\pm 5 \%$ sa javí ako ideálny nástupca senzoru priblíženia aktuálne využívaného v mobilných telefónoch. [36]

	Texas Instruments OPT8241	Melexis MLX75023	Infineon IRS1125C	ST Microelectronics VL53L0X
Rozlíšenie [px]	320×240	320×240	352×288	1
Snímková frekvencia [fps]	<150	<600	<100	
Vlnová dĺžka [nm]	850	850	850	940
Demodulačná frekvencia [MHz]	10 – 100	<40	<100	
Detekčná vzdialenosť [m]				2
Komunikačné rozhrania	CMOS (16 bit, 50 MHz) LVDS (600 Mb/s)	Digital control Analog data	MIPI CSI-2	I2C
Veľkosť snímača	$1/3''$	$1/3''$		
Veľkosť pixelu [μm]	15×15	15×15		
Pracovný teplotný rozsah [$^{\circ}\text{C}$]	0 – 70	-40 – 105		-20 – 70
Typ puzdra	78COG	BGA44		Optical LGA12
Rozmery puzdra [mm]	$8,8 \times 7,9 \times 0,7$	$6,6 \times 5,5 \times 0,6$		$4,4 \times 2,4 \times 1$
Napájacie úrovne [V]	1,5; 1,8; 3,3	2; 3,3		2,6 – 3,5
Orientačná cena [$\text{K}\text{č}$]	1000	600	2100	100

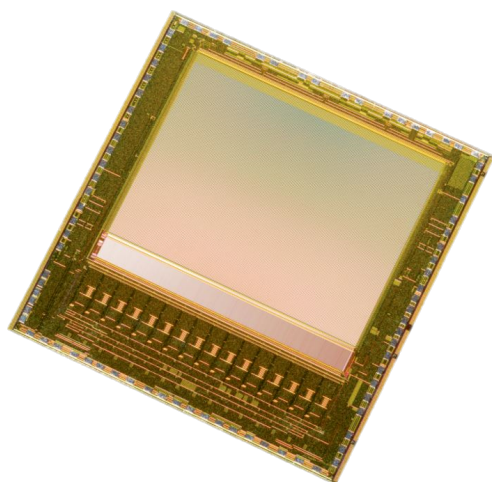
Tab. 3.2: Porovnanie vybraných ToF snímačov



(a) OPT8241 (Texas Instruments)



(b) MLX75023 (Melexis)



(c) IRS1125C (Infineon)



(d) VL53L0X (ST Microelectronics)

Obr. 3.2.: Príklady ToF snímačov
Zdroje: [26, 37–39]

4 Kapitola 4.

Požiadavky na hardvér

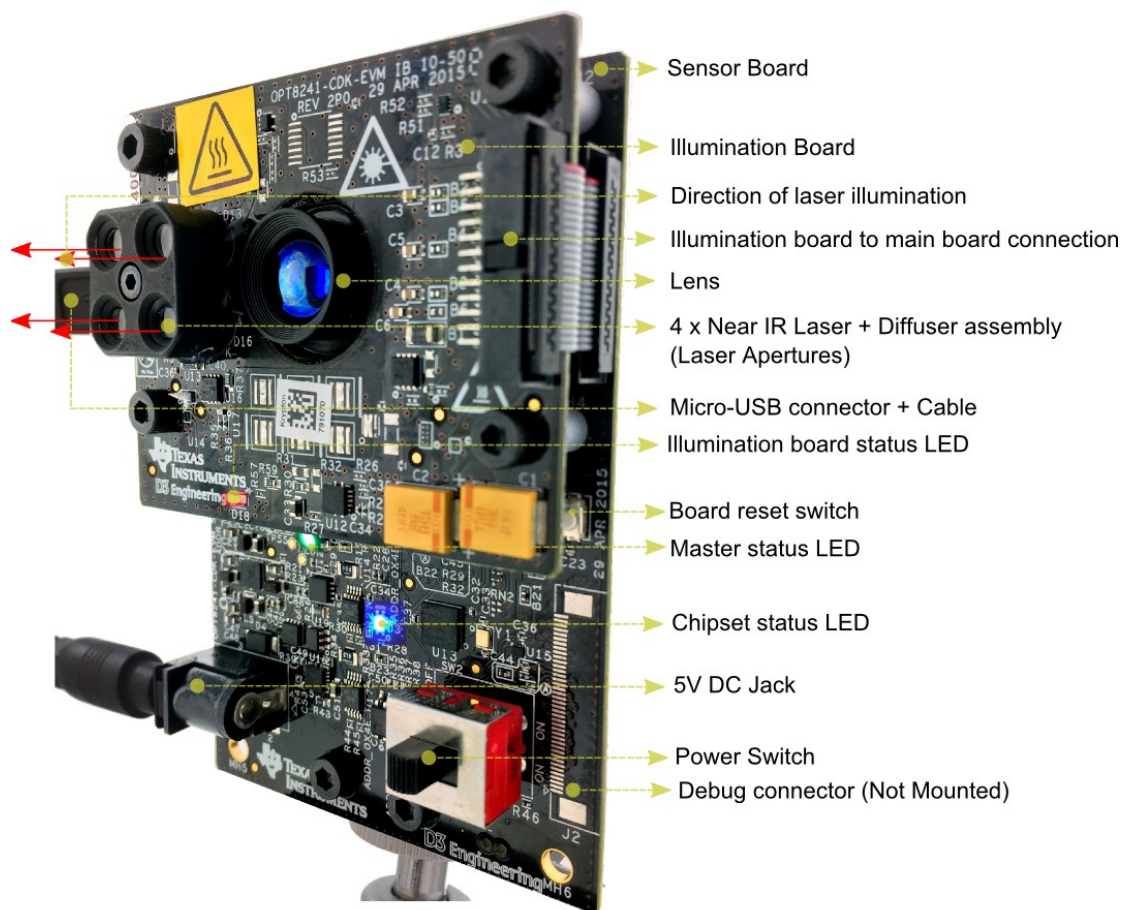
Dôležitým krokom pre túto prácu bol výber snímacieho modulu, aby bolo možné bližšie špecifikovať komunikačné rozhrania medzi vybraným snímacím modulom a navrhovanou riadiacou jednotkou, s dostatočnou rezervou dimenzovať výkon procesorovej jednotky a v neposlednom rade zvoliť vhodné rozhrania pre transfer zosnímaných a predspracovaných hĺbkových obrazov do počítača pre ich nasledovnú analýzu a grafickú reprezentáciu. Na základe porovnania dostupných snímačov v časti 3.3 bol vybraný 3D ToF čip OPT8241 od firmy Texas Instruments pre jeho dobrú dostupnosť u dodávateľov elektronických súčiastok a predovšetkým pre podrobnú technickú dokumentáciu, ktorá bola zásadným nedostatkom v prípade IRS1125C. Snímač MLX75023 má síce dostatočne podrobnú dokumentáciu, ale v tomto prípade bola hendikepom absencia integrovaného ADC, resp. iba analógový výstup. Nutné použitie externého A/D prevodníku by predstavovalo zbytočnú komplikáciu pri návrhu DPS. VL53L0X nie je vhodný z pochopiteľného dôvodu - rozlíšenie 1 pixel je nepostačujúce pre plnohodnotnú ToF kameru a naskladanie viacerých takýchto snímačov do matice by nebolo rozumné ako po technickej, tak ani ekonomickej stránke.

4.1. Vývojový modul OPT8241-CDK-EVM

OPT8241-CDK-EVM je oficiálny vývojový modul pre testovanie funkčnosti ToF senzoru OPT8241 od spoločnosti Texas Instruments. Okrem samotného senzoru obsahuje tento modul aj kontrolér OPT9221 pre spracovanie nameraných dát, kompletnú osvetľovaciu jednotku a aj objektív. [46] Stačí len zapnúť napájanie, pripojiť k počítaču a nainštalovať príslušný obslužný softvér. K tomuto modulu sú dostupné kompletne schematické podklady vrátane súpisov použitých súčiastok.

4.1.1. Kontrolér OPT9221

OPT9221 je obvod určený pre výpočet hĺbkových dát z digitalizovaných dát z ToF senzoru (primárne ide o OPT8241). Zo senzoru číta dáta prostredníctvom LVDS rozhrania a riadiace signály mu vysiela cez špecializované rozhrania, zatiaľ čo konfigurácia prebieha po I²C zbernici. Pre jeho funkciu je potrebná externá pamäť typu DDR2 využívaná pri aritmetických operáciách. V tomto vývojovom module je použitá DDR2 SDRAM MT47H32M16HR s veľkosťou 512 Mb. Spracované dáta z kontroléru obsahujú okrem informácie o vzdialenosti jednotlivých pixelov aj amplitúdu odrazeného signálu a úroveň rušivého okolitého žiarenia. Tieto dopĺňajúce informácie sa môžu využiť pri neskoršej aplikácii filtrovania či maskovania, za účelom dynamického riadenia procesu merania na základe konkrétnych požiadavok systému, v ktorom bude táto kamera nasadená. Obrazová frekvencia na výstupe tohoto testovacieho modulu je iba 60 *fps*. Komunikácia medzi kontrolérom a nadradeným systémom prebieha prostredníctvom paralelného CMOS rozhrania zloženého zo synchronizačného, 8 dátových a 8 riadiacich signálov. [47] V prípade tohoto vývojového modulu je spomínané komunikačné rozhranie privedené do programovateľného USB 2.0 radiča CY7C68053 pre zjednodušenie pripojenia k PC. Keďže cieľom tejto práce je návrh riadiacej jednotky pre potreby testovania vlastných algoritmov pre vyhodnocovanie a spracúvanie nameraných dát,



Obr. 4.1.: Vývojový modul OPT8241-CDK-EVM
Zdroj: [46]

bude lepšie pristupovať priamo k surovým dátam zo snímača a vyhodnocovaciu logiku implementovať vo vlastnom kontroléri.

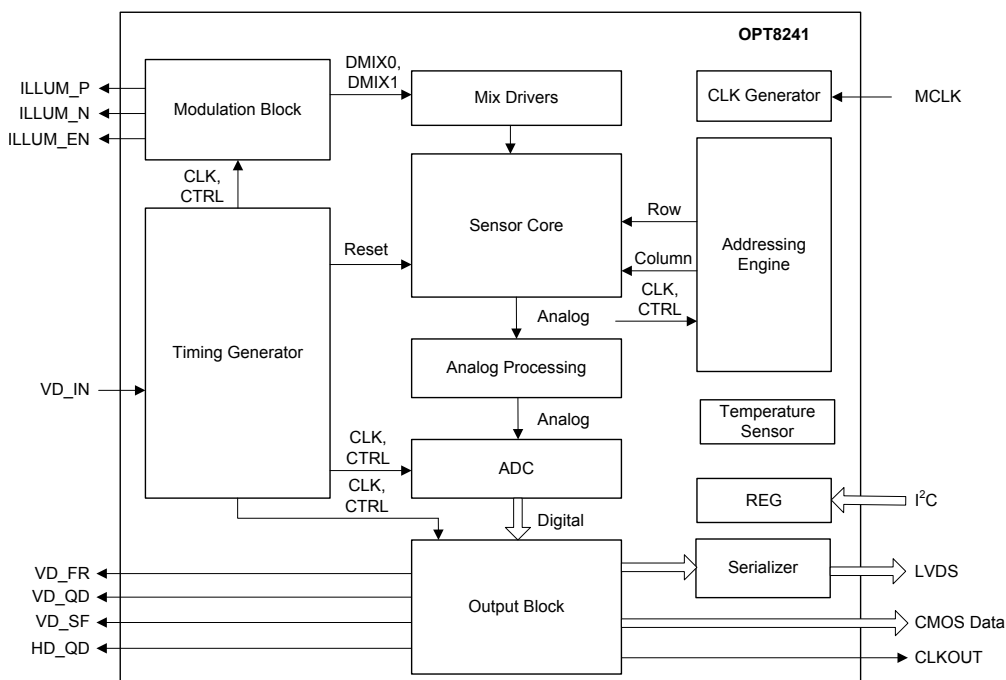
4.2. Výber procesorovej jednotky

Na základe rozhodnutia, použiť v úlohe snímacieho prvku 3D ToF modul OPT8241, je potrebné zvoliť procesorovú jednotku, ktorá bude poskytovať:

1. hardvérovú kompatibilitu s vybraným ToF snímačom,
2. dostatočný výkon pre spracovanie získaných dát,
3. možnosť pripojenia k počítaču pre následnú analýzu a ukladanie väčšieho objemu dát.

4.2.1. Prepojenie ToF senzoru s kontrolérom

ToF snímač OPT8241, ako je možné vidieť na blokovej schéme (Obr. 4.2), disponuje dvojicou rôznych komunikačných rozhraní – paralelným a sériovým. Paralelným je rozhranie typu CMOS (DDR) šírky 16 bitov, spolu s hodinovým a obrazovými synchronizačnými signálmi. Toto rozhranie pracuje na hodinovej frekvencii 50 MHz. Keďže sa jedná o rozhranie typu DDR, tak dátová frekvencia bude dvojnásobná,



Obr. 4.2.: OPT8241 – bloková schéma

Zdroj: [45]

čiže 100 MHz. Sériové rozhranie je typu LVDS v nasledujúcom zložení: 3 dátové páry a 2 hodinové páry (jeden bitový a druhý pre celé vzorky). Toto rozhranie poskytuje prenosovú rýchlosť až 600 Mb/s. V CMOS móde je prúdový odber vstupno-výstupnej časti snímača 20 mA, zatiaľ čo pri LVDS iba 2 mA.

V ideálnom prípade by mali byť k navrhovanému kontroléru pripojené obe rozhrania, aby bola podporovaná myšlienka, že bude slúžiť v prvej verzii ako vývojový modul. Týmto spôsobom bude možné vyskúšať oba spôsoby komunikácie a bez hardvérových úprav ich jednoducho porovnať.

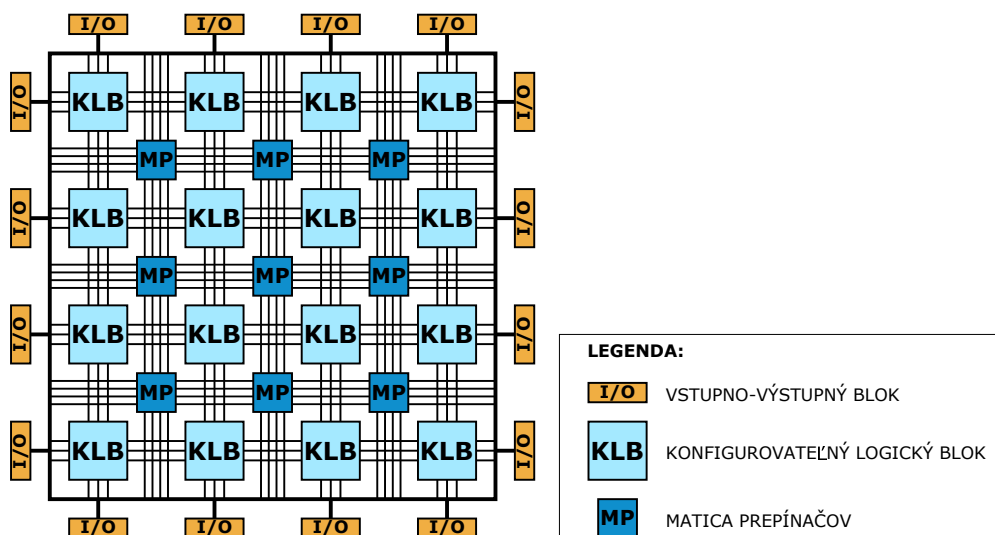
Uvažujme maximálnu obrazovú frekvenciu (150 fps) a maximálne rozlíšenie (320 × 240 px). Senzor sníma dvojkanalovo, pre každý kanál poskytuje 2 B dát (12 b fázovej korelácie a 4 b reprezentujúce vplyv okolitého osvetlenia). Maximálny dátový dok potom bude nasledovný: $(2 \times 16) \times (320 \times 240) \times 150 \doteq 369 \text{ Mb/s}$. OPT8241 teda dokáže vygenerovať až 46 megabajtov za sekundu.

Ak uvažíme fakt, že by procesorová jednotka mala podporovať vyššie uvedené komunikačné rozhrania a súčasne spracúvať pomerne veľké množstvo dát, nad ktorými budú vykonávané rôzne binárne operácie, tak sa pre túto úlohu javí ako najvhodnejšie riešenie programovateľné hradlové pole (FPGA).

FPGA

Programovateľné hradlové pole – FPGA – je integrovaný obvod, ktorý môže byť naprogramovaný podľa konkrétnych požiadaviek. Pozostáva z rekonfigurovateľných logických blokov a prepojov, rôznych špeciálnych blokov a vstupno/výstupných pinov. Na obrázku 4.3 je naznačená základná štruktúra hradlového poľa.

Logické bloky sú schopné vykonávať elementárne, ale i zložité výpočtové funkcie, či poskytovať úložný priestor v podobe pamäťových buniek. Hradlové polia sú v mnohých ohľadoch podobné programovateľným čipom ROM, ktoré sú obmedzené na stovky hradiel, zatiaľ čo FPGA ich môže obsahovať milióny. Jednou z jeho výhod je možnosť preprogramovania, na rozdiel od integrovaných obvodov špeciálne navrhnutých pre konkrétne účely. V prípade potreby môže byť interná štruktúra nahradená novou a tým upravená funkcionálnosť celého obvodu.



Obr. 4.3.: Štruktúra FPGA

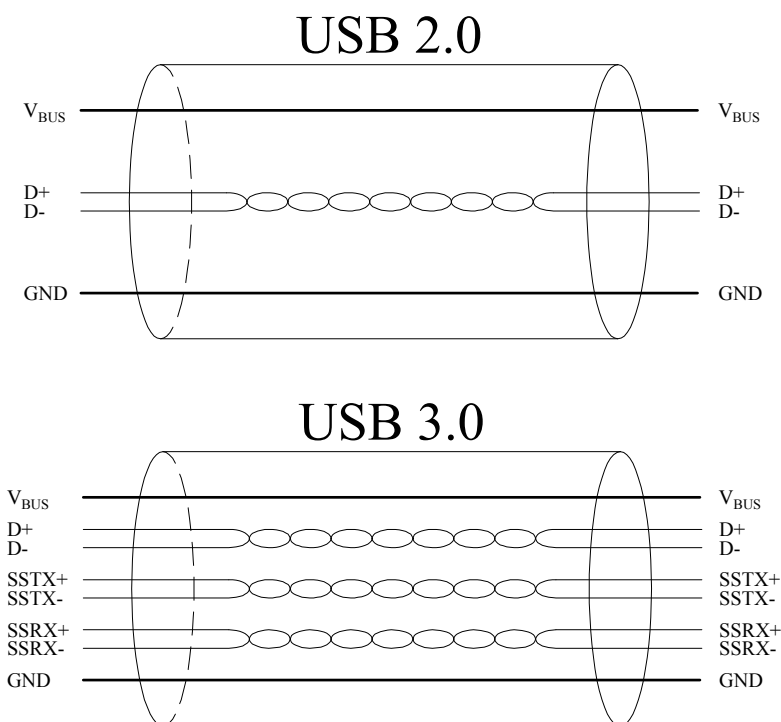
4.2.2. Prepojenie kontroléru s okolím

Na základe testov reálnej rýchlosti rozhrania USB 2.0, ktoré vykonala spoločnosť Cypress vychádza reálna použiteľná rýchlosť tejto zbernice na 43,8 MB/s. [48] V 4.2.1 bolo vypočítané, že ToF snímač OPT8241 dokáže vygenerovať až 46 MB dát za sekundu. Môžeme sa len domnievať, prečo vývojová doska OPT8241-CDK-EVM neposkytuje obrazovú frekvenciu 150 fps ako samotný snímač, ale iba 60 fps. Je možné, že znížením obrazovej frekvencie sa výrobca snaží zabezpečiť stabilitu USB zbernice. Je ale isté, že ak je takýto spôsob pripojenia postačujúci (aj keď s istými obmedzeniami) vo vývojovom module, tak by USB rozhranie nemalo chýbať ani v našom kontroléri. Pre ešte vyššiu prenosovú rýchlosť by mohla byť ideálnejšia novšia verzia – USB 3.0.

USB 2.0 vs. 3.0

USB rozhranie je vo vývoji už od roku 1993. Prvé oficiálne špecifikácie USB 1.0 boli predstavené v januári 1996. Prenosové rýchlosti boli rozdelené do dvoch kategórií: 1,5 Mb/s – „Low Speed“ určené primárne pre ovládače (myš, klávesnica, joystick, ...) a 12 Mb/s – „Full Speed“ pre zariadenia vyžadujúce vyššie dátové toky, ako napr. diskové jednotky. Nástupcom tohoto štandardu sa stalo koncom roku 2001 USB 2.0, ktoré prinieslo obrovský skok v prenosovej rýchlosti, a to až na 480 Mb/s. Zvýšená dátová priepustnosť USB zbernice umožnila súčasné pripojenie viacerých vysoko rýchlostných koncových zariadení, akým je napr. CD napáľovačka či digitálna kamera. Postupom času aj takáto rýchlosť prestávala postačovať novým periférnym zariadeniam a tak v roku 2010 prišlo na trh prvé zariadenie podporujúce štandard USB 3.0. Okrem iných vylepšení priniesol tento štandard aj nový prenosový režim nazývaný „SuperSpeed“ (SS), umožňujúci prenos rýchlosťou až 5 Gb/s (625 MB/s), čo je viac než 10-krát viac ako umožňovala predošlá verzia. Na USB 3.0 kábloch sú použité nové typy konektorov a zástrčky sú od predchodcov rozlíšiteľné buď modrou farbou, alebo iniciálkami SS.

Základným fyzickým rozdielom medzi USB 2.0 a USB 3.0 je počet vodičov. Nová topológia výrazne zlepšuje využitie zbernice, čo vedie k zvýšeniu prenosovej rýchlosti. USB 2.0 využíva 4 vodiče (z toho 2 dátové), ktoré umožňujú poloduplexnú komunikáciu. V takejto architektúre sa používa jediný obojsmerný dátovod (data pipe), v ktorom prúdia dáta v ľubovoľnom čase vždy iba jedným smerom. V porovnaní s tým, prináša USB 3.0 ešte 4 dátové vodiče navyše, čo umožňuje vytvorenie unicastového „dual-simplex“ dátového rozhrania. Vďaka tomu je možné využívať 2 jednosmerné dátovody (IN a OUT) spolu s riadiacimi signálmi pre každý dátovod. [17]



Obr. 4.4.: Porovnanie komunikačných vodičov USB 2.0 a 3.0

Zvýšenie prenosovej rýchlosti USB rozhrania vďaka štandardu USB 3.0 umožnilo výrobcovi kamier pre strojové videnie vyrábať vysokorýchlostné kamery s USB rozhraním. Vďaka vysokej prenosovej rýchlosti je možné používať kamery s vyšším rozlíšením a aj s vyššou obrazovou frekvenciou, čo prispieva k výkonnosti a stabilnej funkčnosti celých systémov počítačového videnia.

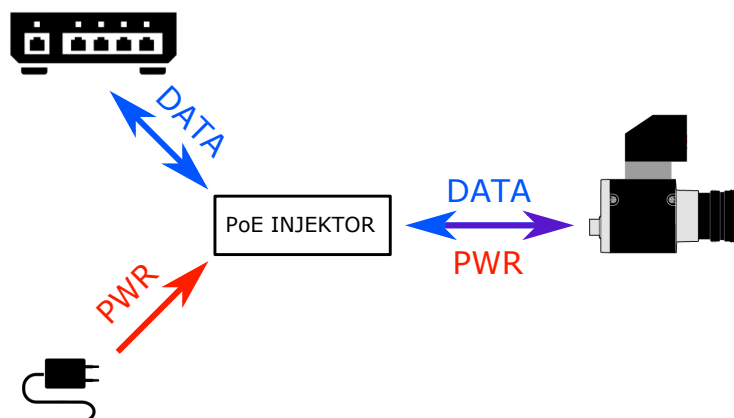
Je zrejmé, že implementácia rozhrania USB 3.0 v riadiacej jednotke ToF kamery zabezpečí jej jednoduchú pripojiteľnosť k bežnému počítaču, keďže v dnešnej dobe už väčšina PC takýmto rozhraním disponuje.

Pripojenie kamery priamo k PC vyrieši USB rozhranie, ale čo ak bude potrebné obsluhovať kameru na diaľku? Jednou z možností je mať pripojenú ToF kameru do počítačovej siete, resp. k internetu, prostredníctvom iného počítača a ten ovládať vzdialene. Toto riešenie je však nepraktické. Oveľa používateľsky prívetivejšie by bolo, ak by bolo možné pripojiť do počítačovej siete (LAN) priamo kameru. Vhodné riešenie pripojenia do LAN je buď prostredníctvom metalickej alebo optickej kábeláže. Bezdrôtové pripojenie, napr. s využitím technológie WiFi, nie je vhodným riešením predovšetkým z dôvodu nižšej prenosovej rýchlosti, ako aj zvýšenej zahltenosti prenosového pásma v niektorých oblastiach, čo má za následok zníženie stability pripojenia. Navyše pri tomto type kamery sa predpokladá vyššia spotreba oproti bežným kamerám, spôsobená energetickou náročnosťou osvetľovača. Preto sa pri návrhu ani nepočíta s batériovým napájaním a je teda bezpredmetné zamýšľať sa nad bezdrôtovou komunikáciou, keďže mobilita celej kamery už bude obmedzená napájacím zdrojom.

Výhoda Ethernetu spočíva v tom, že sa stal najrozšírenejšou technológiou budovania počítačových sietí typu LAN. V súčasnej dobe je ethernetové rozhranie s konektorom RJ-45 štandardným rozhraním prevažnej väčšiny notebookov, ako aj stolných počítačov. Používa sa najčastejšie verzia Ethernetu s krútenými dvojlinkami (100 alebo 1000 Mb/s). Koaxiálne vedenie (10 Mb/s) sa už prakticky ani nepoužíva, no do popredia prichádzajú optické vlákna, využívané primárne pre stavbu chrbtových sietí. Výhody optického vlákna spočívajú predovšetkým v odolnosti voči elektromagnetickému rušeniu, nízkom útlme a galvanickom oddelení koncových zariadení. Optické vlákna sa pre ich priaznivé vlastnosti využívajú

aj v laboratórnych podmienkach ako dobrá náhrada metalického komunikačného vedenia.

Ethernetové rozhranie na ToF kamere určite nájde svoje uplatnenie aj vďaka jednoduchému pripojeniu k internetu. V akademickej sieti ČVUT je navyše stále možné priradiť koncovému zariadeniu statickú verejnú IP adresu a tak s ním jednoducho komunikovať z celého sveta. Pri použití konektora RJ-45 je taktiež možné implementovať funkciu PoE, čiže napájať koncové zariadenie priamo prostredníctvom sieťového káblu. V tejto etape projektu však na napájanie nie je kladený veľký dôraz, preto bude dôraz kladený na funkčnosť riadiacej jednotky. Prípadné optimalizácie sú plánované až pri ďalšej revízii.



Obr. 4.5.: Napájanie kamery pomocou PoE

Pre ešte väčšiu variabilitu komunikačného rozhrania je ideálne tzv. SFP. V kamere bude pripravený SFP slot, do ktorého sa následne vloží modul podľa požadovaného prenosového média, ktorým môže byť napríklad metalický vodič, či optické vlákno (jednovidové alebo aj mnohovidové). SFP transceivery sú na trhu dobre dostupné, líšia sa rôznorodosťou podporovanej technológie, aj prenosovou rýchlosťou. Gigabitový Ethernet je však samozrejmosťou.



(a) Gigabit Ethernet RJ-45 (Cisco)



(b) 1,25 Gb/s, optický jednovidový, 1310 nm

Obr. 4.6.: Porovnanie SFP transceiverov
Zdroje: [13, 16]

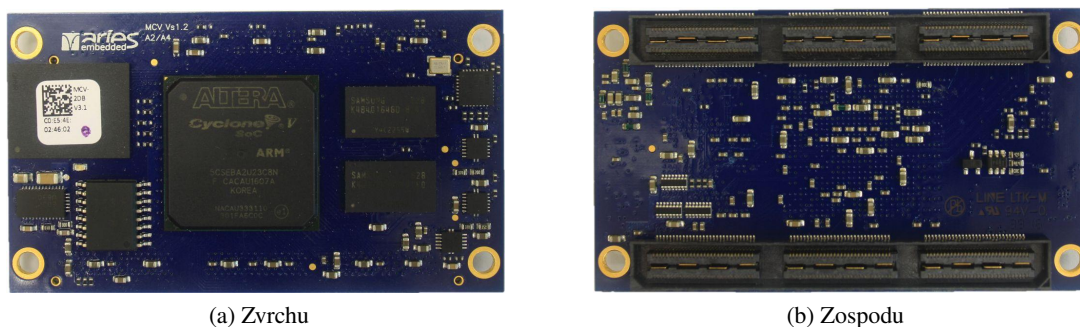
4.2.3. Intel SoC FPGA

Ako už bolo spomenuté, pre priame spracúvanie surových dát z kamery bude použité hradlové pole a ďalšie operácie, s už predspracovanými dátami, budú prebiehať v PC. Prečo ale tento nápad nevylepšiť?

Altera, resp. Intel, ponúka vo svojom portfóliu tzv. SoC FPGA. Tieto SoC spájajú multijadrový ARM procesor, periférie a pamäťové radiče (spolu označované ako HPS – „Hard Processor System“) spolu s FPGA cez interné vysokorychlostné rozhranie. [25] Výrobca poskytuje rôzne druhy takýchto zariadení, ale špeciálne pre účely spracovania a vyhodnocovania záberov z kamier odporúča model s označením Cyclone V.

Takéto prepojenie hradlového poľa a procesorového systému poskytnú ešte širšie možnosti spracovania a analýzy nasnímaných hĺbkových záberov. O rýchle výpočty, koreláciu a filtráciu surových dát sa postará hradlové pole, zatiaľ čo v procesorovej časti, nad operačným systémom Linux, pobežia skripty pre pokročilú analýzu týchto predspracovaných dát. Konfigurácia a grafické zobrazenie dôležitých veličín môže prebiehať napríklad prostredníctvom vstavaného webového rozhrania.

Nemecká firma Aries embedded ponúka moduly osadené práve vyššie spomínaným SoC FPGA Cyclone V pod označením MCV.

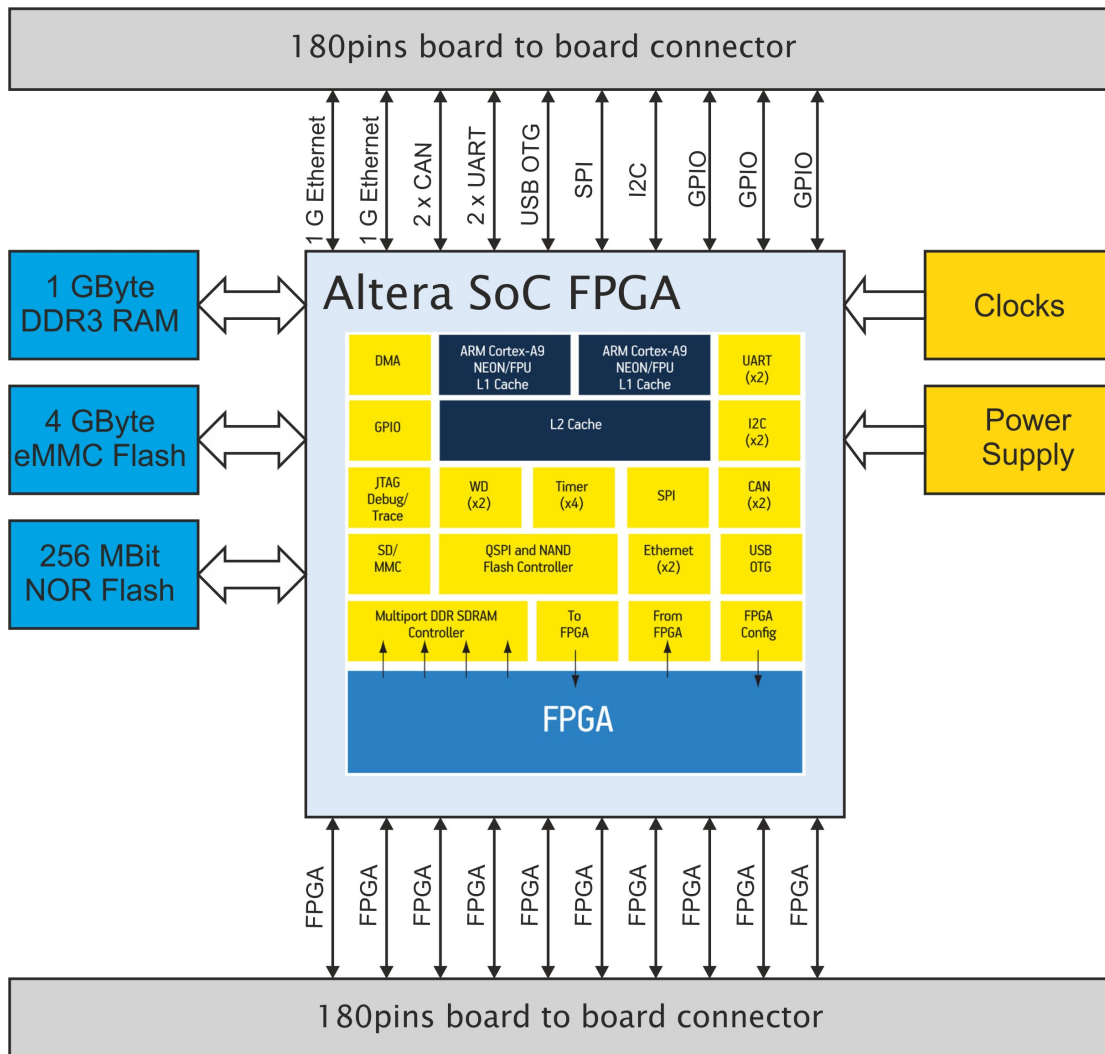


Obr. 4.7.: MCV (Aries embedded)

Vlastnosti [2]

- až 110 KLE, 112 DSP blokov a šesť 2,5 Gb/s transceiverov
- dvojjadrový 800 MHz ARM Cortex A9
- 1 GB DDR3 RAM
- 4 GB eMMC
- 143 FPGA signálov
- 66 HPS signálov
- programovateľný zdroj hodinových signálov
- HPS periférie:
 - Gigabit Ethernet
 - UART
 - CAN
 - SPI
 - I²C
 - USB
- rozmery 74 × 42 mm

Prepojenie s klientským zariadením je realizované prostredníctvom dvojice 180-pinových konektorov typu QSH, ako je vidieť na blokovej schéme (Obr. 4.8).



Obr. 4.8.: MCV - bloková schéma

Zdroj: [2]

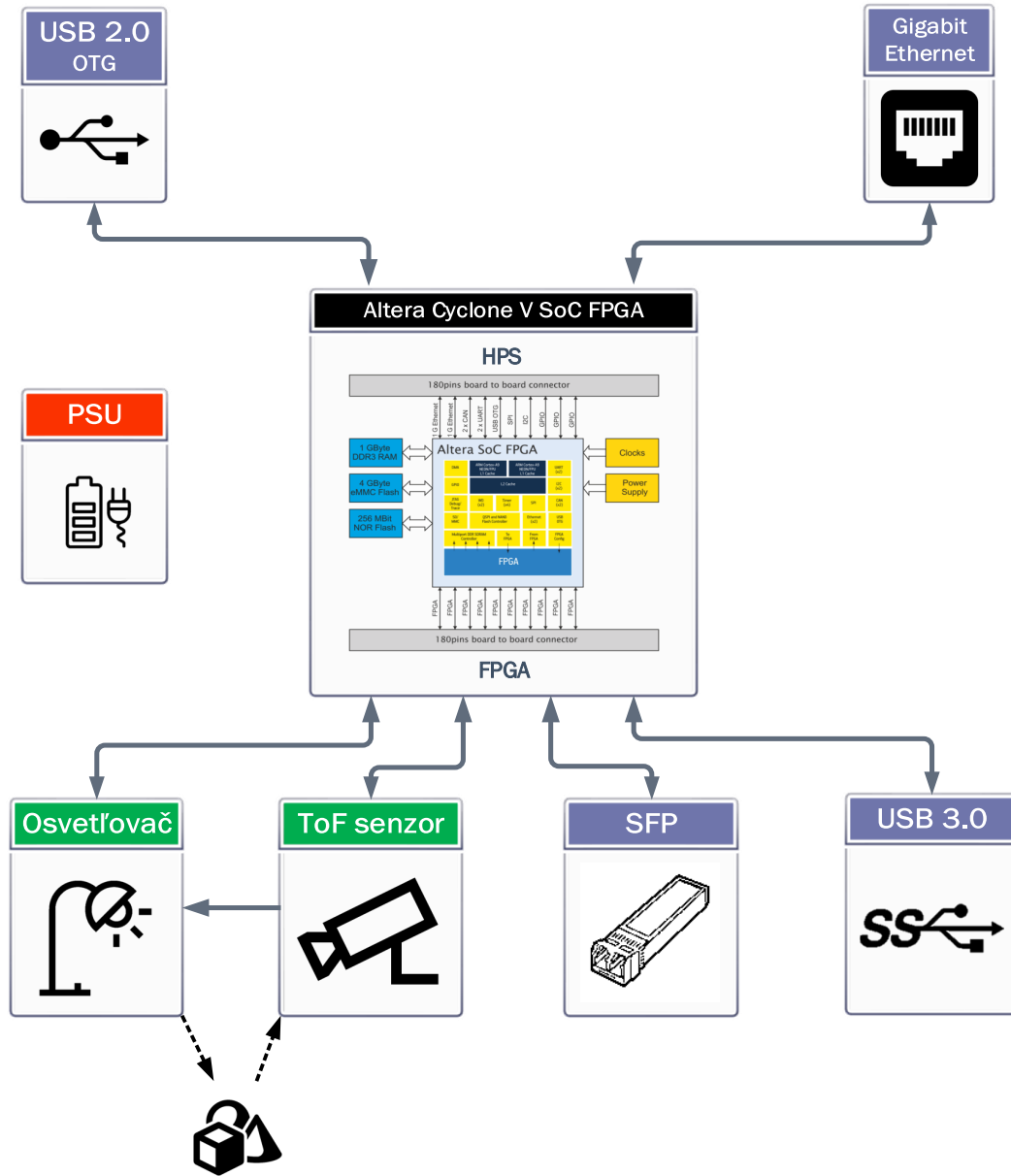
Vďaka modularite je možné po navrhnutí riadiacej jednotky tieto moduly podľa potreby zamieňať za iné z ponuky Aries embedded, prípadne si navrhnuť vlastný podľa konkrétnych požiadaviek. V takom prípade odpadá nutnosť prerábania celého zariadenia, akoby tomu bolo pri osadení SoC FPGA priamo na DPS kamery.

4.3. Finálny návrh štruktúry riadiacej jednotky

Na základe súčastí zvolených v predchádzajúcich sekciách vznikol blokový návrh zapojenia riadiacej jednotky, zobrazený na obrázku 4.8.

USB 2.0 OTG umožní kontroléru zastávať úlohu hostiteľa pre pripojenie externých zariadení, ako napr. sieťovej karty či flash disku, alebo môže byť v roli klientského zariadenia pre komunikáciu s PC. Gigabit Ethernet poskytne dobrú konektivitu pre odosielanie dát na vzdialený server, či pre možnosť konfi-

gurácie kamery prostredníctvom webového rozhrania alebo SSH pripojenia. Komunikačné rozhranie SFP aj USB 3.0 je fyzicky pripojené k FPGA, čo ale nebráni HPS časti aby tieto rozhrania využívala. Môže k nim pristupovať prostredníctvom interného prepojenia - HPS mostu. PSU – zdrojová časť – zabezpečuje napájanie celej riadiacej jednotky, vrátane periférnych rozhraní a osvetľovacieho modulu.



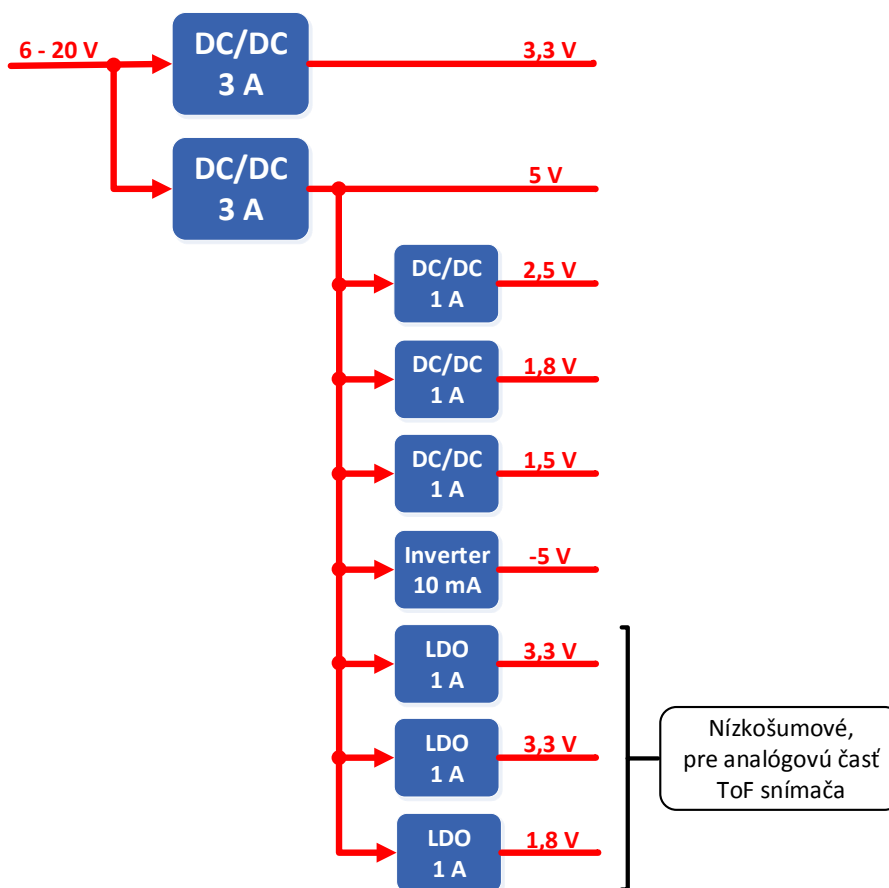
Obr. 4.9.: Bloková schéma navrhovanej ToF kamery

5 Kapitola 5.

ToF kamera – návrh zapojenia

5.1. Napájanie

Pre správnu funkciu celého zariadenia je potrebné zabezpečiť rôzne napäťové úrovne. O túto úlohu sa stará celá rada napäťových regulátorov, ako je možné vidieť na obrázku 5.1.



Obr. 5.1.: Bloková schéma napájacej sekcie

Vstupné napätie pre napájanie celej jednotky bolo určené na 12 V, čo sa bežne používa nielen v la-

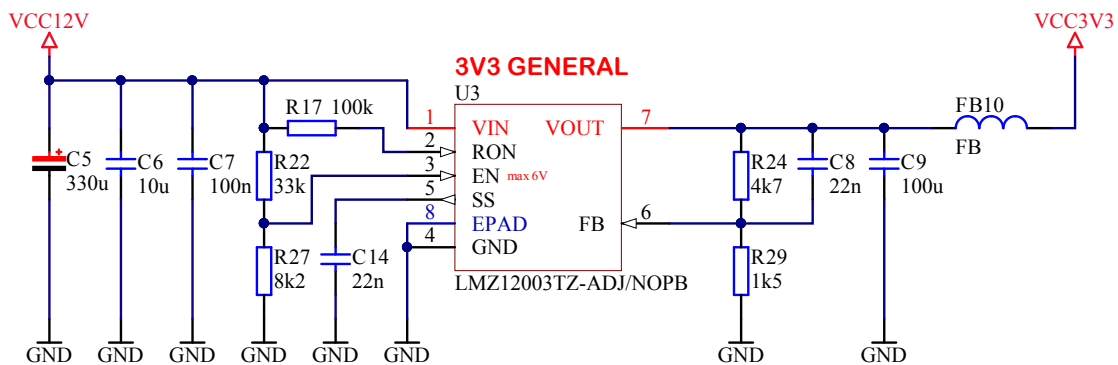
boratóriách. Skutočný podporovaný rozsah napájacích napätí je od 6 V po 20 V. V prvej fáze sa vstupné napätie zníži dvojicou výkonných spínaných napáňových meničov na 3,3 V a 5 V. Maximálne prúdové zaťaženie oboch je 3 A. Napätie 3,3 V sa využíva priamo na napájanie väčšiny digitálnych obvodov. 5 V slúži na napájanie USB klientskeho zariadenia a osvetľovača. Toto napätie sa ďalej znižuje v podružných spínaných zdrojoch na úrovne 2,5 V, 1,8 V a 1,5 V pre napájanie ďalších nízkonapáňových častí digitálnych obvodov. Napáňový invertor pracujúci na princípe nábojovej pumpy vytvára záporné napätie pre predpätie substrátu ToF snímača. Pre zabezpečenie stabilnej úrovne napájacích napätí analógovej časti ToF snímača sú použité špeciálne nízkošumové lineárne stabilizátory. Pre zvýšenie účinnosti celého zariadenia sú taktiež radené za znižujúci DC/DC menič s výstupným napätím 5 V. Všetky podružné stabilizátory (okrem napáňového invertora) sú dimenzované na maximálny prúd 1 A, čo evokuje, že by aj ich nadradený menič mal poskytovať prúd ekvivalentný minimálne ich súčtu. Táto podmienka však nie je splnená a ani sa nepredpokladá, že by boli všetky tieto podružné meniče súčasne vyťažené na maximum. V skutočnosti bude odber každého z nich v rádoch desiatok mA. Je ale dobré, keď sú značne predimenzované. To zabezpečí aj pokrytie vyšších špičkových odberov, ktoré v digitálnej technike vôbec nie sú ojedinelé.

5.1.1. LMZ12003 – 3 A Simple Switcher

V prvom kroku sa vstupné napätie znižuje na hodnoty 3,3 V a 5 V pomocou spínaných zdrojov od firmy Texas Instruments. Ide o integrované obvody známe pod označením „Simple Switcher“. Ako názov napovedá, ide o jednoducho použiteľný spínaný zdroj. S maximálnym prúdovým zaťažením 3 A a induktorom integrovaným priamo v puzdre, zabezpečuje jednoduchý návrh a vysokú účinnosť (až 92 %), čím sa stáva ideálnym riešením pri návrhu rôznych zariadení. Poskytuje taktiež množstvo ochrán:

- tepelná poisťka;
- nízke napätie na vstupe;
- skrat na výstupe;
- prepätie na výstupe;
- obmedzenie výstupného prúdu.

Rozsah vstupných napätí je 4,5 V – 20 V a výstupné napätie je nastaviteľné odporovým deličom v rozsahu 0,8 V – 6 V. [41]



Obr. 5.2.: LMZ12003 – schéma zapojenia

Na Obr. 5.2 je schéma zapojenia napáňového meniča LMZ12003 pre výstupné napätie 3,3 V. Pre 5 V je zapojenie, ako aj postup pri výpočtoch, analógické.

Napáňový delič zložený z rezistorov R_{22} a R_{27} slúži na vypnutie meniča pri poklese pod určitú hranicu. Táto vlastnosť je ideálna pri batériovom napájaní, pre zamedzenie ich úplného vybitia. Komparačná hodnota pre zapnutie meniča je 1,18 V. Hodnoty rezistorov je možné vypočítať podľa vzťahu:

$$\frac{R_{22}}{R_{27}} = \frac{U_{IN\ MIN}}{1,18} - 1 \quad (5.1)$$

kde $U_{IN\ MIN}$ [V] je hraničná hodnota vstupného napätia pre zapnutie/vypnutie meniča. Pre zabránenie kmitania je interne aplikovaná hysterézia veľkosti 90 mV. Pre účely navrhovaného zapojenia je dôležité vypnutie pri poklese napätia pod 6 V. Dosadením do vzťahu 5.1 získame pomer:

$$\frac{R_{22}}{R_{27}} = 4,08 \approx \frac{33\ k\Omega}{8,2\ k\Omega} \quad (5.2)$$

Hodnotu výstupného napätia U_{OUT} určuje delič z rezistorov R_{24} a R_{29} podľa vzťahu:

$$U_{OUT} = 0,8 \left(1 + \frac{R_{24}}{R_{29}} \right) \quad (5.3)$$

Pre požadované napätie $U_{OUT} = 3,3\ V$ určíme pomer rezistorov R_{24} a R_{29} po odvodení a dosadení nasledovným spôsobom:

$$\frac{R_{24}}{R_{29}} = \frac{U_{OUT}}{0,8} - 1 = 3,125 \approx \frac{4,7\ k\Omega}{1,5\ k\Omega} \quad (5.4)$$

Kondenzátor C_8 zabezpečuje zlepšenie odozvy na skokovú zmenu prúdu. Jeho hodnota je zvolená na základe odporúčania výrobcu, ktorý ju určil experimentálnym spôsobom.

Kondenzátor C_{14} slúži na nastavenie spomalenia nábehu (soft-start). Jeho hodnotu určuje vzťah:

$$C_{14} = t_{ss} \cdot \frac{8\ \mu A}{0,8\ V} \quad (5.5)$$

kde t_{ss} predstavuje dobu nábehu výstupného napätia. $C_{14} = 22\ nF$ je odporúčaná minimálna hodnota a zodpovedá času $t_{ss} = 2,2\ ms$.

Minimálna odporúčaná hodnota výstupného kondenzátora C_9 je 10 μF . Pre zvlnenie výstupného napätia do 33 mV uvádza datasheet [41] ako ideálnu hodnotu výstupného kondenzátora 52 μF s dodatkom, že v ich referenčných moduloch sú osadené až 100 μF kondenzátory.

Rezistorom R_{17} sa nastavuje spínacia frekvencia podľa vzťahu:

$$f_{SW} \cong R_{17} \frac{U_{OUT}}{1,3 \times 10^{-10}} \doteq 250\ kHz \quad (5.6)$$

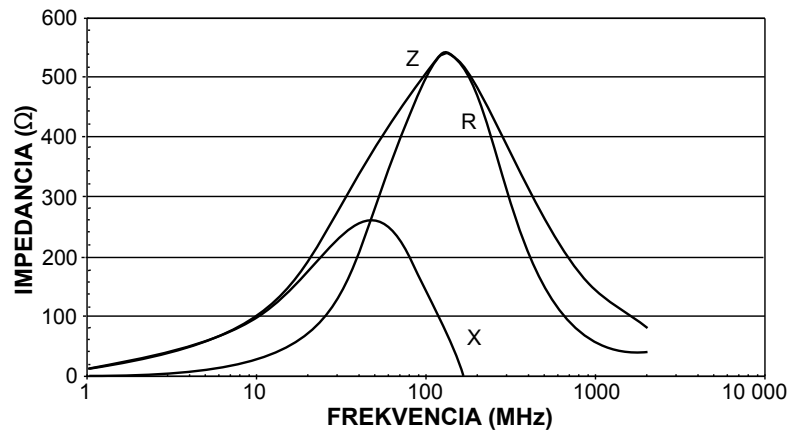
Keďže spínacia frekvencia nie je v tomto zapojení kritická, bola zvolená podľa obrázku 21, datasheetu [41], na úroveň, kedy testovací modul u výrobcu vykazoval najnižšie hodnoty vyžarovaného rušenia.

Kondenzátory $C_5 - C_7$ slúžia na vyhladenie zvlnenia vstupného napätia. Simple Switcher obsahuje integrovaný kondenzátor s kapacitou 0,47 μF , čo nie je ani zďaleka dostatočné. Keďže nie sú zadané konkrétne požiadavky, ktoré by bolo potrebné splniť, bude požadované zvlnenie vstupného napätia $\Delta U_{IN} = 1\ \% U_{IN}$, čiže pre $U_{IN} = 12\ V$ bude $\Delta U_{IN} = 120\ mV$. Pre maximálny prúd $I_{MAX} = 3\ A$ a spínaciu frekvenciu $f_{SW} = 250\ kHz$ potom platí:

$$C_{IN} \geq I_{MAX} \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \left(1 - \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} \right) \frac{\Delta U_{IN}}{f_{SW}} = 29\ \mu F \quad (5.7)$$

Pre čo najlepšie vyhladenie aj tých najvyšších frekvencií je C_{IN} zložený z 3 kondenzátorov s rôznymi kapacitami, ktoré sú fyzicky na DPS zoradené tak, aby najmenší z nich bol najbližšie k zdroju rušenia.

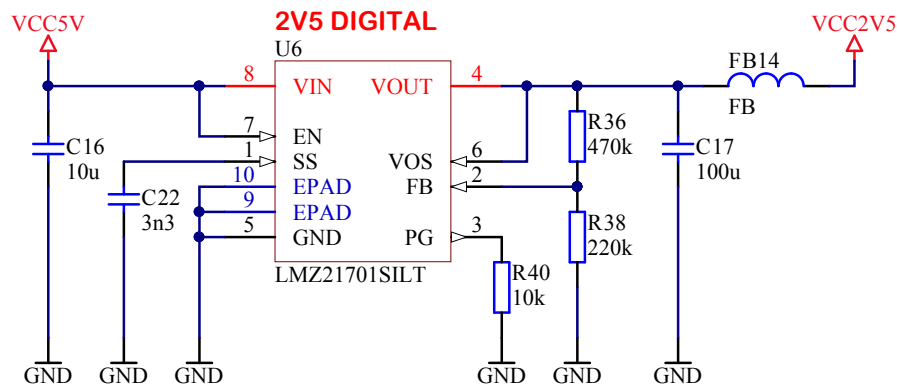
Feritová perla FB_{10} slúži na potlačenie vysokofrekvenčného rušenia vďaka zvyšujúcej sa impedancii s narastajúcou frekvenciou. Závislosť impedancie na frekvencii je typicky podobná priebehu na obrázku 5.3. Na trhu sú dostupné feritové perly s rôznymi charakteristikami, umožňujúce prispôsobenie ich výberu konkrétnym požiadavkám navrhovaného zariadenia.



Obr. 5.3.: Frekvenčná charakteristika feritovej perly Vishay ILHB-1206 600 Ω
Zdroj: [49]

5.1.2. LMZ21701 – 1 A Simple Switcher

LMZ21701 je ďalším spínaným zdrojom z rodiny Simple Switcherov od firmy Texas Instruments. Zapojením je ešte jednoduchší ako vyššie spomínaný LMZ12003 a svojimi kompaktnými rozmermi – $3,5 \times 3,5 \times 1,75 \text{ mm}$ sa hodí všade tam, kde nie je veľa miesta nazvyš, ale je potrebný vysoký výkon. Rozsah vstupného napätia je $3 \text{ V} - 17 \text{ V}$ a rozsah výstupného napätia $0,9 \text{ V} - 6 \text{ V}$. Najvyššie dosiahnuteľná účinnosť je až 95 % a maximálny výstupný prúd 1 A. [42]



Obr. 5.4.: LMZ21701 – schéma zapojenia

Kondenzátor C_{22} slúži na nastavenie spomalenia nábehu (soft-start). Jeho hodnotu určuje vzťah:

$$C_{14} = t_{ss} \cdot \frac{2,9 \mu\text{A}}{1,25 \text{ V}} \quad (5.8)$$

kde t_{ss} predstavuje dobu nábehu výstupného napätia. $C_{22} = 1 \text{ nF}$ je odporúčaná minimálna hodnota a zodpovedá času $t_{ss} = 430 \mu\text{s}$. Pre obmedzenie prípadných prúdových špičiek pri štarte je lepšie tento čas trochu predĺžiť. Hodnote $C_{22} = 3,3 \text{ nF}$ zodpovedá doba nábehu $t_{ss} = 1,42 \text{ ms}$.

Power Good (PG) výstup je určený pre signalizovanie stavu dosiahnutia požadovaného výstupného napätia. Tento výstup je typu open-drain, čo znamená, že pre správnu funkciu vyžaduje externý pull-up rezistor. V tomto prípade nebude funkcia PG využitá, preto môže zostať spomínaný výstup nepripojený, alebo spojený rezistorom s nulovým potenciálom pre zabezpečenie nulového napätia na tomto výstupe v každom okamihu.

Hodnotu výstupného napätia U_{OUT} určuje delič z rezistorov R_{36} a R_{38} podľa vzťahu:

$$U_{OUT} = 0,8 \left(1 + \frac{R_{36}}{R_{38}} \right) \quad (5.9)$$

Veľkosť prúdu tečúceho týmto deličom by mala byť väčšia ako $2 \mu A$ a komparačná úroveň je nastavená na $0,8 V$. Z toho vyplýva, že hodnota rezistoru R_{38} by nemala presiahnuť $400 k\Omega$. Pre požadované napätie $U_{OUT} = 2,5 V$ určíme pomer rezistorov R_{36} a R_{38} , po odvodení a dosadení, nasledovným spôsobom:

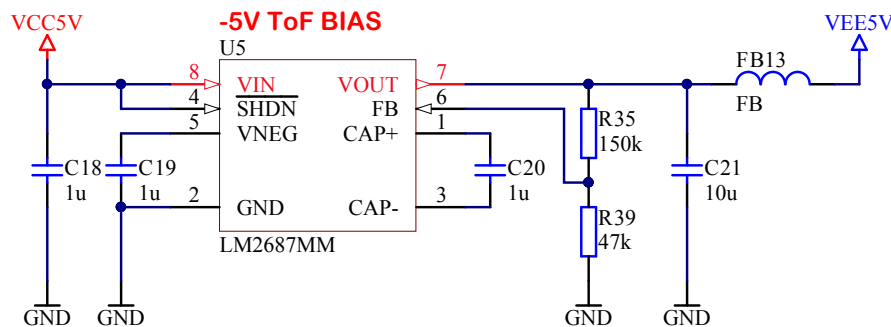
$$\frac{R_{36}}{R_{38}} = \frac{U_{OUT}}{0,8} - 1 = 2,125 \approx \frac{470 k\Omega}{220 k\Omega} \quad (5.10)$$

Ako vstupný kondenzátor je použitý $10 \mu F$ s nízkym sériovým odporom a dobrou teplotnou charakteristikou dielektrika X7R. Keďže sú takéto meniče na DPS umiestnené vo väčšom počte, relatívne blízko seba, a každý je vybavený takýmto kondenzátorom na rovnakej napájacej vetve, tak bude hodnota $10 \mu F$ bohato postačovať.

Pre zabezpečenie dostatočnej stability výstupného napätia je odporúčaná hodnota výstupného kondenzátora v rozsahu $10 \mu F - 200 \mu F$. Po zohľadnení priestorového usporiadania a faktu, že na DPS bude ešte množstvo blokovacích kondenzátorov pri každom integrovanom obvode, ktoré sa pripočítajú k výslednej kapacite, bola zvolená hodnota výstupného kondenzátora na $C_{17} = 100 \mu F$.

5.1.3. LM2687 – napäťový invertor

LM2687 je nízkošumový nastaviteľný kapacitný napäťový invertor od firmy National Semiconductor (dnes už Texas Instruments). Poskytuje výstupný prúd do $10 mA$ pri účinnosti až 91% a zvlnení výstupného napätia iba $1 mV$. Rozsah vstupného napätia je $2,7 V - 5,5 V$ a rozsah výstupného napätia $-1,5 V - -5,2 V$. Pre minimalizáciu zvlnenia a výstupného odporu pracuje na frekvencii okolo $100 kHz$. [31]



Obr. 5.5.: LM2687 – schéma zapojenia

Výstupné napätie U_{OUT} sa nastavuje pomocou odporového deliča, pozostávajúceho z rezistorov R_{35} a R_{39} .

$$U_{OUT} = U_{FB} \left(\frac{R_{35}}{R_{39}} + 1 \right) \quad (5.11)$$

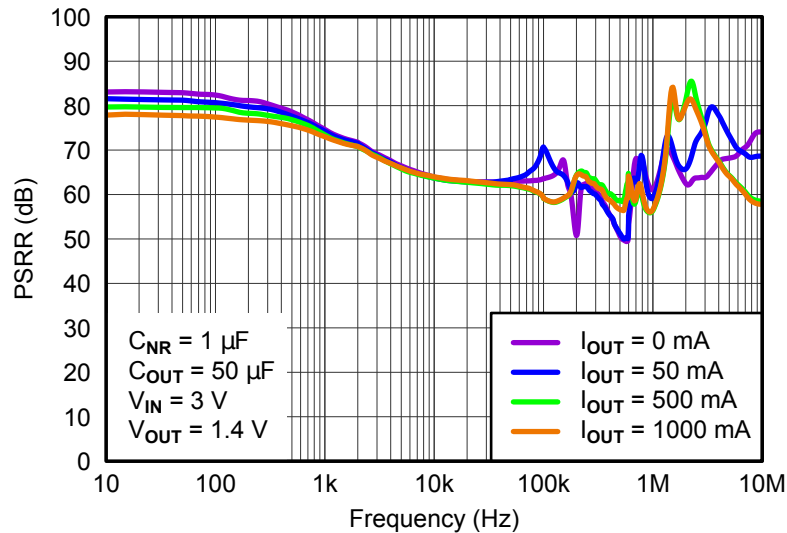
Spätnoväzobné komparačné napätie je interne nastavené na $U_{FB} = -1,2 V$. Prúd tečúci do vstupu FB $I_{FB} < 100 nA$. Prúd deličom by mal byť aspoň 10-krát vyšší, čo umožňuje zvoliť hodnotu spodného rezistora v rozsahu do $1 M\Omega$. Hodnoty rezistorov pre napäťový delič sa pre požadované výstupné napätie U_{OUT} určia nasledovne:

$$\frac{R_{35}}{R_{39}} = \frac{U_{OUT}}{U_{FB}} - 1 = 3,167 \approx \frac{150 k\Omega}{47 k\Omega} \quad (5.12)$$

V tomto prípade bude prúd deličom okolo $25 \mu A$, čo sa javí ako vhodný kompromis medzi stabilitou a nízkou spotrebou.

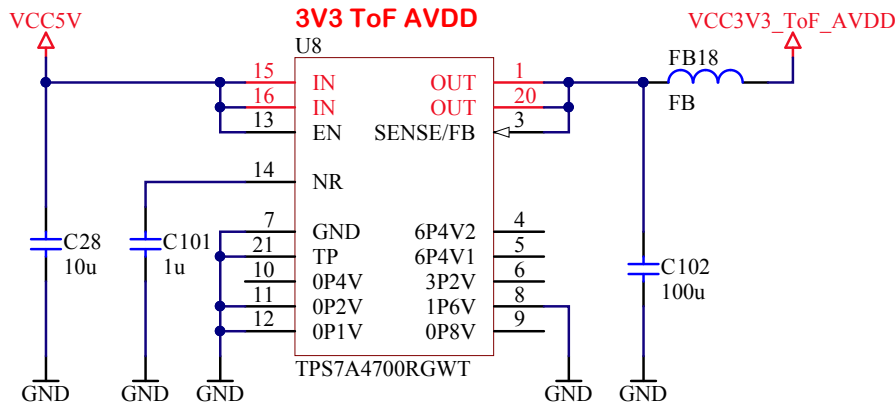
5.1.4. TPS7A4700 – ultra-nízkošumový napáťový stabilizátor

Pre kvalitné meranie odrazeného žiarenia ToF snímačom je veľmi dôležité zabezpečiť stabilné napájacie napätie analogovej časti ToF snímača. O túto úlohu sa stará trojica ultra-nízkošumových napáťových stabilizátorov typu LDO. Hodnotu zašumenia výstupného napätia výrobca vyčíslil na $4 \mu V_{RMS}$. Potlačenie zvlnenia vstupného napätia – PSRR – je až 82 dB pre 100 Hz a viac než 55 dB v rozsahu $10 \text{ Hz} - 10 \text{ MHz}$ a pri maximálnom zaťažení ($I_{OUT} = 1 \text{ A}$), ako je možné vidieť na Obr. 5.6.



Obr. 5.6.: TPS7A4700 – PSRR
Zdroj: [43]

Rozsah vstupného napätia je až do 36 V a výstupné napätie je jednoducho programovateľné pomocou pripojenia konkrétnych pinov na GND, na základe požadovaného výstupného napätia, čím odpadá nutnosť použitia externého napáťového deliča. Vďaka vysokej miere potlačenia vstupného rušenia je vhodným aj pre zaradenie za spínaný zdroj. [43]



Obr. 5.7.: TPS7A4700 – schéma zapojenia

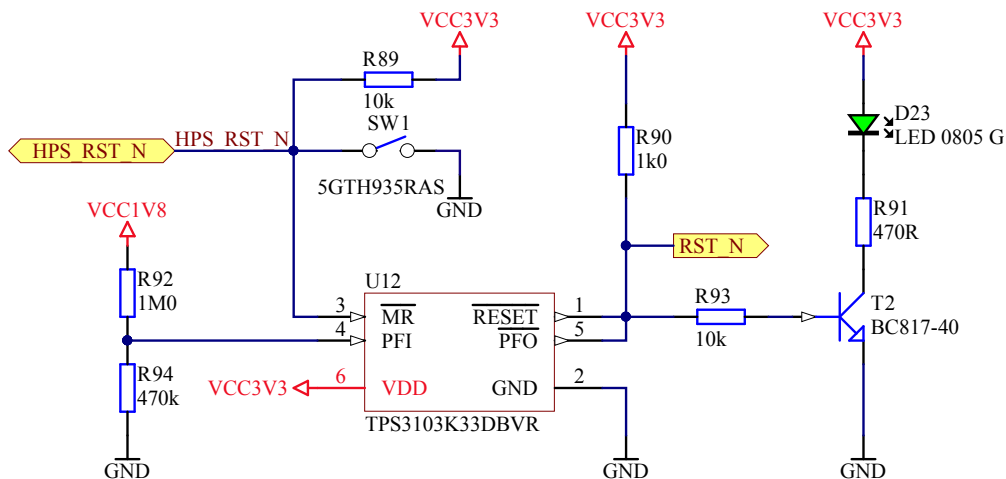
Ako je možné vidieť, na schéme (Obr. 5.7), tento obvod vyžaduje len minimálne množstvo externých súčiastok. Okrem vstupného a výstupného kondenzátora sa tu nachádza ešte jeden kondenzátor. C_{101} slúži na redukciu šumu ako externá súčiastka zabudovaného RC filtra a súčasne ovplyvňuje dobu nábegu. Interne nastavená hodnota výstupného napätia je $1,4 \text{ V}$ a pripájaním ďalších príslušných pinov na GND

sa toto napätie rôzne zvyšuje. V súčte je tak možné nastaviť U_{OUT} na akúkoľvek hodnotu v rozsahu od 1,4 V po 20,5 V, s krokom 100 mV.

5.2. Resetovací obvod

Resetovací obvod je založený na integrovanom obvode TPS3103 od TI a zabezpečuje 2 primárne funkcie:

1. reset periférnych rozhraní, vrátane riadiaceho modulu;
2. spustenie príslušných obvodov až po úplnom nabehnutí všetkých zdrojov.



Threshold voltage = 0.551V (VCC1V8 = 1,72V)

Obr. 5.8.: TPS3103 – schéma zapojenia

Väčšina použitých radičov disponuje resetovacím vstupom. Na tento vstup sa pripája výstup spomínaného obvodu TPS3103. Reset je možné vyvolať dvomi spôsobmi – hardvérovo alebo softvérovo. Hardvérový spôsob spočíva v stlačení tlačidla SW1. Softvérovo je možné vyvolať reset z HPS, čo sa využíva napr. pri reštarte operačného systému.

Druhou vlastnosťou zapojenia na obrázku 5.8 je, že drží výstup resetovaný, pokiaľ na vstupe PFI (Power-fail input) nestúpne napätie nad úroveň 0,551 V. Vďaka napäťovému deliču, pozostávajúcemu z rezistorov R_{92} a R_{94} , trvá tento stav do doby, kým nestúpne napätie vetvy 1,8 V nad úroveň 1,72 V. Keďže je doba nábehu DC/DC meniča, zabezpečujúceho toto napätie, nastavená ako najdlhšia zo všetkých, tak je isté, že po jeho nábehu sú už všetky ostatné zdroje stabilizované.

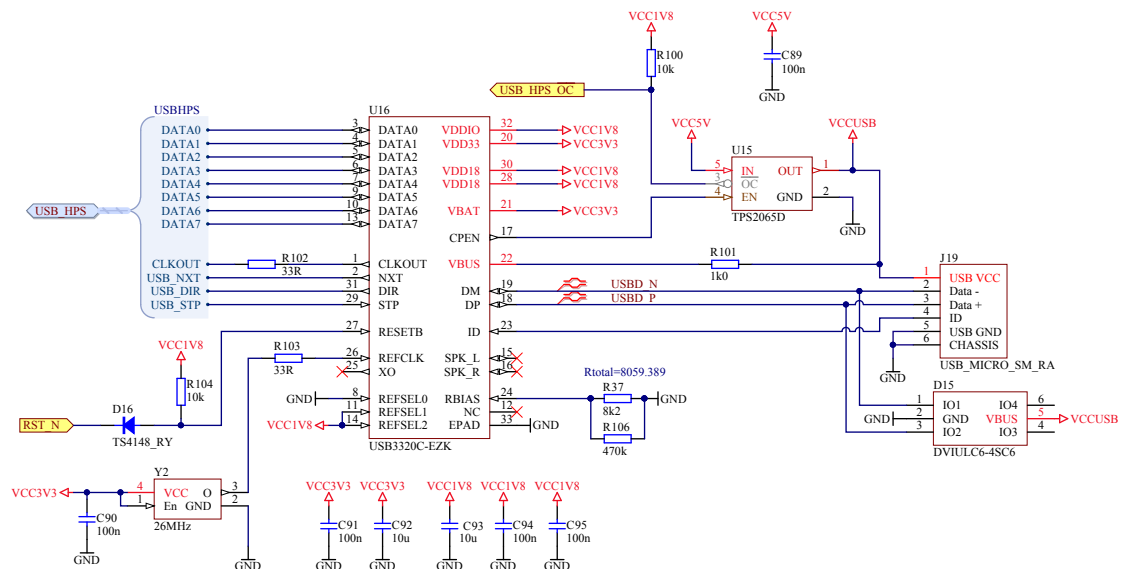
Funkčnosť obvodu je signalizovaná svetelnou diódou D_{23} .

5.3. USB 2.0

O konektivitu pomocou rozhrania USB 2.0 sa stará radič fyzickej vrstvy (PHY) USB3320 od firmy Microchip. Jeho prednosťou je, okrem možnosti konfigurácie, aj natívna podpora štandardu OTG. Okrem ESD ochrán na I/O pinoch poskytuje taktiež prepäťovú ochranu až do 30 V. Pre komunikáciu s HPS využíva ULPI (UTMI+ Low Pin Interface) rozhranie pozostávajúce z 12 vodičov – 8 dátových, 3 riadiace a 1 hodinový signál. [30]

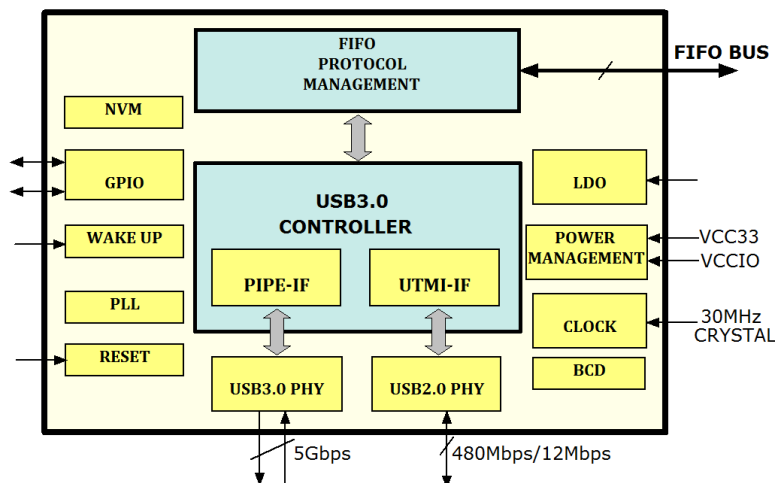
Typ USB konektora je „Micro-B“ pre jeho používanosť v množstve zariadení, ako aj dobrú dostupnosť konvertorov na typ „A“ pre použitie v režime OTG.

Pre zvýšenie ESD imunity je pridaná ochrana v podobe samostatnej súčiastky – DVIULC6.



Obr. 5.9.: USB3320 – schéma zapojenia

5.4. USB 3.0

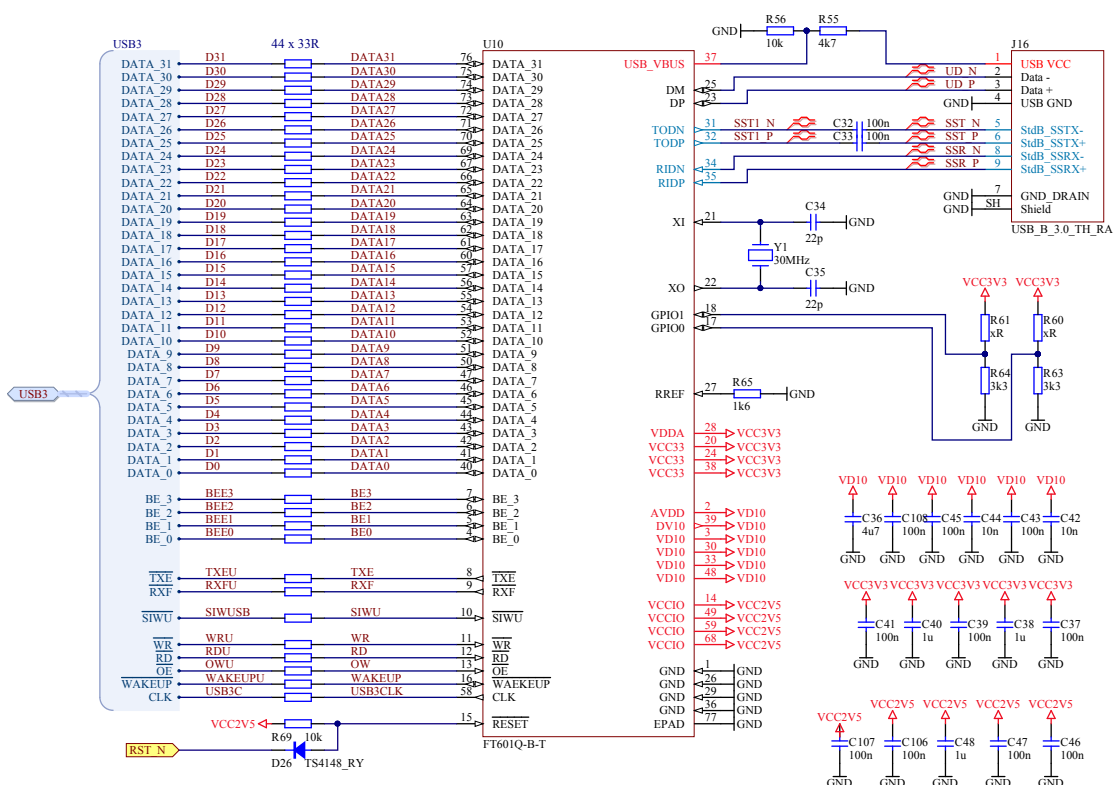


Obr. 5.10.: FT601 – bloková schéma

Zdroj: [14]

USB 3.0 pripojenie je sprostredkované pomocou USB – FIFO prevodníku FT601. Ako je možné vidieť na blokovej schéme (Obr. 5.10), okrem USB 3.0 Super Speed režimu (5 Gb/s) je spätne kompatibilný aj s USB 2.0 High Speed (480 Mb/s) a Full Speed (12 Mb/s). Radič zabezpečuje obojsmernú konverziu medzi USB protokolom a paralelnou FIFO zbernicou šírky 32 bitov. Táto súčiastka značne zjednodušuje návrh, vďaka tomu, že nevyžaduje veľké množstvo externých súčiastok, čo demonštruje aj schéma zapojenia (Obr. 5.11).

Sériové odpory na dátovej zbernici slúžia na zníženie javu, nazývaného „ringing“, objavujúceho sa pri skokovej zmene napäťovej úrovne. Tento jav sa vyskytuje pri signáloch s rýchlymi hranami a vyznačuje sa krátkym prekritom a dlhou dobou doznievania, čo je spôsobené parazitnými kapacitami a indukčnosťami.



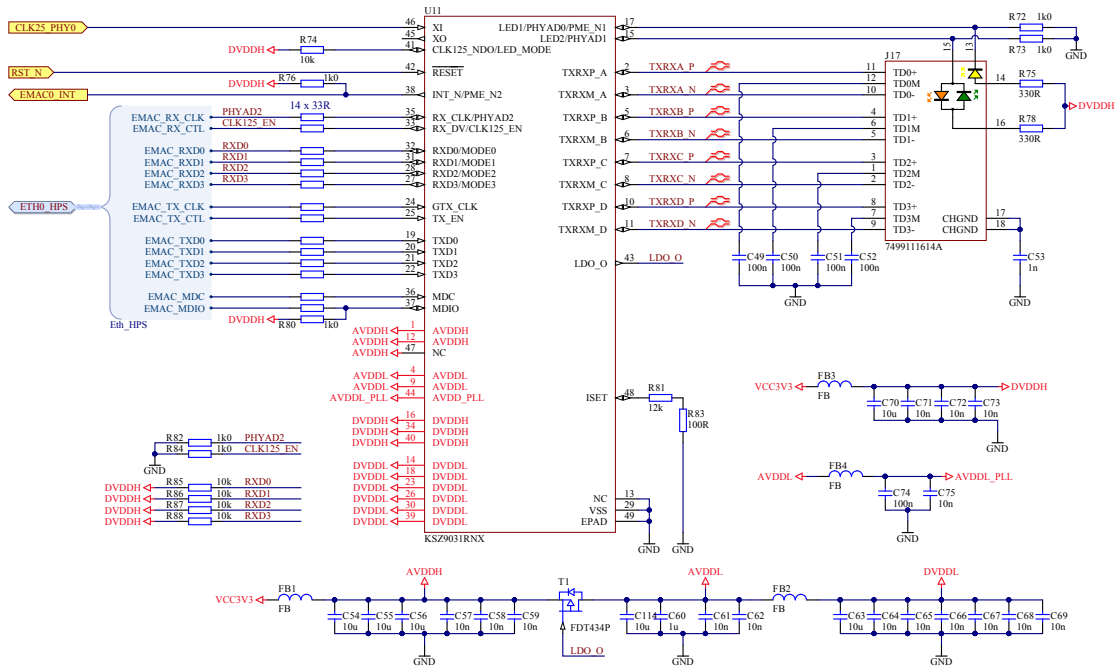
Obr. 5.11.: FT601 – schéma zapojenia

fami v obvode. Ide o nechcený jav, ktorého dôsledkom je, okrem energetických strát, a tým spôsobeným vyžarovaním tepla, taktiež elektromagnetické rušenie. V extrémnych prípadoch to môže mať za následok aj presluchy medzi susednými vodičmi, čo môže spôsobiť zarušenie komunikačného kanálu. Pre obmedzenie vzniku tohoto javu sa k zdroju signálu umiestňujú malé sériové odpory a pri návrhu DPS sa taktiež rieši impedančné prispôbenie.

Ďalším dôležitým prvkom sú lokálne blokované kondenzátory (angl. decoupling capacitors), ktoré slúžia ako lokálny zdroj energie pre prípad impulzných odberov. Je dôležité umiestniť ich čo najbližšie ku každému napájaciemu pinu obvodu. Bez týchto kondenzátorov by sa, vplyvom parazitnej indukčnosti spojov na DPS, zanašalo rušenie do napájacej vetvy a v mieste impulzného odberu by nastávali výkyvy napätia, čo by mohlo viesť aj k dysfunkcii celého obvodu.

5.5. Gigabit Ethernet

Funkciu ethernetového radiča zastáva KSZ9031RNX od Microchipu s RGMII rozhraním. RGMII rozhranie je fyzické prepojenie medzi PHY a MAC, čiže v rámci OSI modelu predstavuje prepojenie fyzickej a spojovej vrstvy. Úlohu PHY zastáva radič KSZ9031RNX a MAC je implementované v HPS. RGMII je rozhranie typu DDR, čo znamená, že jednému hodinovému taktu odpovedajú 2 bity na dátovom vodiči. Pozostáva z vysielačej časti, z HPS do PHY, a z prijímacej časti, z PHY do HPS. Každá časť je zložená z hodinového, 4 dátových a jedného kontrolného signálu, ako je možné vidieť na obrázku 5.12.



Obr. 5.12.: KSZ9031RNX – schéma zapojenia

Jednou z výhod tohoto obvodu je LDO stabilizátor, ktorý má implementovaný. Jedinou požiadavkou pre jeho funkciu je pripojenie externého tranzistoru, ktorým si následne generuje napätie 1,2 V pre napájanie digitálnej časti jadra obvodu. Vďaka tomu stačí k tomuto obvodu priviesť len jedinú napáťovú úroveň – 3,3 V.

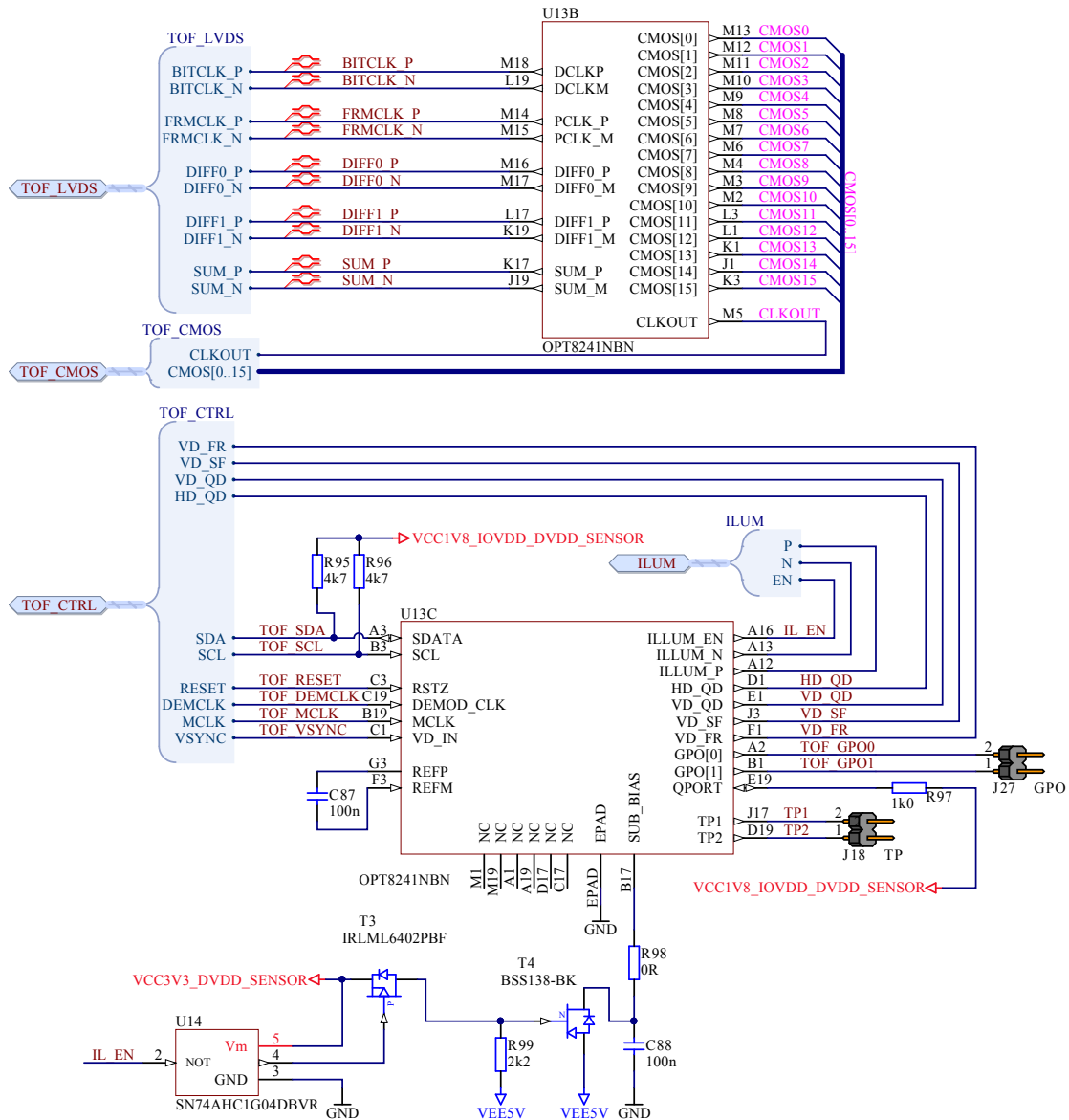
Pri návrhu tohoto zapojenia bol kladený veľký dôraz predovšetkým na správne blokovanie napájacieho napätia, čomu nasvedčuje aj množstvo použitých keramických kondenzátorov rôznych hodnôt.

Samozrejmosťou je funkcia nazývaná „Autonegotiation“, ktorá umožňuje automatickú konfiguráciu prenosovej rýchlosti (10/100/1000 Mb/s), ako aj duplex (plný/polovičný). Podporuje aj mnoho ďalších funkcií, ako napríklad WoL pre vzdialené zapnutie zariadenia prostredníctvom ethernetu, či automatickú detekciu a korekciu prehodených dátových párov v ethernetovom kábli.

Pre ušetrenie miesta na DPS bol zvolený konektor RJ-45 s integrovanými transformátormi od firmy Würth Elektronik.

5.6. Time-of-Flight snímač

V kapitole 4 bol vybraný ToF snímač, ktorý mal byť následne pripojený k riadiacej jednotke. Na základe porovnania s konkurenčnými modelmi bol vybraný OPT8241 od firmy Texas Instruments. Ako už bolo spomenuté, disponuje dvojicou rôznych komunikačných rozhraní – sériovým i paralelným. Pre väčšiu variabilitu pri návrhu softvéru sú na FPGA vyvedené obe rozhrania, ako naznačuje schéma na nasledujúcom obrázku.



Obr. 5.13.: OPT8241 – schéma digitálnej časti

Okrem hradlového poľa sa tento modul pripája aj priamo k osvetľovaču prostredníctvom trojice signálov: ILLUM_EN, ILLUM_N a ILLUM_P. Signálom ILLUM_EN sa nastaví na hodnotu H pri spustení snímania. Tým sa aktivuje osvetľovač a súčasne sa pripojí záporné predpätie (-5 V) k substrátu. Zvyšné 2 signály slúžia na moduláciu vyžarovaného svetla a sú navzájom inverzné – ILLUM_N je aktívny v úrovni L a ILLUM_P je naopak aktívny v úrovni H.

5.7. MCV modul



Obr. 5.14.: MCV SoM

Schémy zapojenia MCV modulu sú, z dôvodu ich veľkosti, umiestnené v prílohe A.2. Vďaka integrácii všetkých dôležitých podporných súčiastok pre SoC Cyclone V priamo na MCV module je práca s ním pomerne jednoduchá. FPGA ponúka veľkú variabilitu pripojenia periférnych obvodov vďaka množstvu GPIO pinov, ktoré sú rozdelené do skupín, kde každá môže pracovať s inou napäťovou úrovňou. Je preto ideálne, pripájať jednotlivé komunikačné rozhrania k tomuto modulu súčasne s návrhom DPS, pre čo najlepšie rozvrhnutie súčiastok a obmedzenie kríženia komunikačných vedení.

Pre zabezpečenie chodu RTC obvodu je navrhnuté zapojenie so zálohovacou batériou CR1220. Jej pripojením cez diódový OR zabezpečí napájanie RTC obvodu v prípade, že batéria nie je založená v držiaku a kamera je zapnutá, a súčasne bráni priamemu spojeniu tejto batérie s napájacím zdrojom.

Konektor J_8 slúži na programovanie hodinového zdroja IDT5V49EE904, umiestneného na MCV SoM. S použitím trojice letovacích prepajok $S_2 - S_4$ sa potom volí jedna zo šiestich konfigurácií hodinového zdroja.

Z HPS časti je, okrem už spomenutých rozhraní, vyvedené I_2C na konektor J_5 a UART na konektory J_6 a J_7 . Na tomto UARTe je prístupná linuxová konzola. Z tohoto dôvodu je konektor J_7 na DPS vyvedený na čelný panel, čím poskytuje lepší prístup ku konzole v prípade zmontovanej krabičky.

Pre bootovanie linuxového jadra z externej pamäti je pripravený slot na microSD kartu. Samozrejme je pre tento účel možné využiť aj USB rozhranie, ale nie je celkom vhodné, aby bolo bootovacie médium, počas ostrej prevádzky, pripojené zvonku zariadenia.

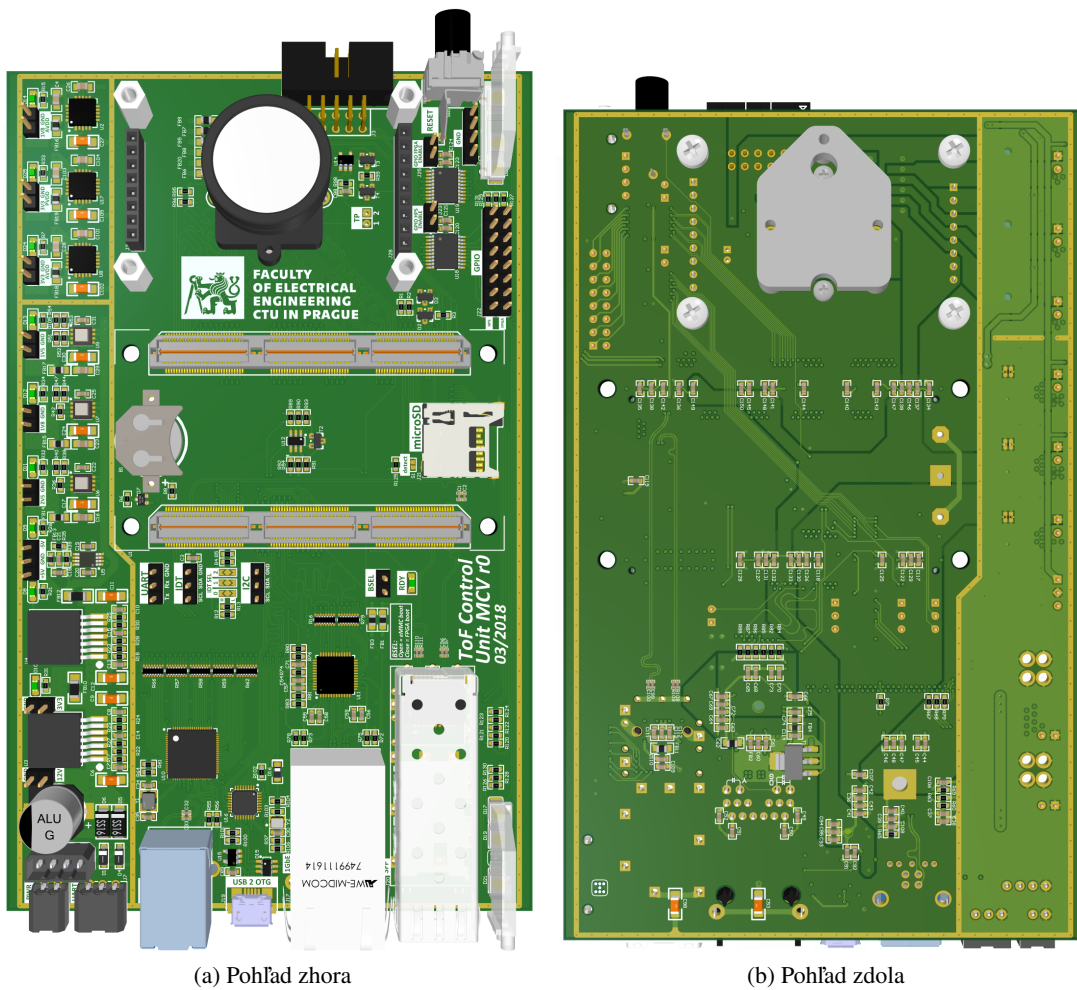
Programovanie FPGA je riešené 10-pinovým PFL konektorom, na ktorý je privedené rozhranie JTAG.

Modulácia vyžarovaného svetla z osvetľovača je priamo riadená z ToF snímaču, avšak prostredníctvom I_2C rozhrania je možné regulovať výkon osvetľovača a vyčítavať teplotu zo senzoru umiestneného pri spínacom tranzistore a výkonových IR LED.

Signalizáciu rôznych stavov zabezpečuje trojica LED diód na spodnej aj vrchnej strane zariadenia. Tieto LED sú riadené priamo z FPGA.

6 Kapitola 6.

ToF kamera – návrh DPS



Obr. 6.1.: 3D model DPS kamery

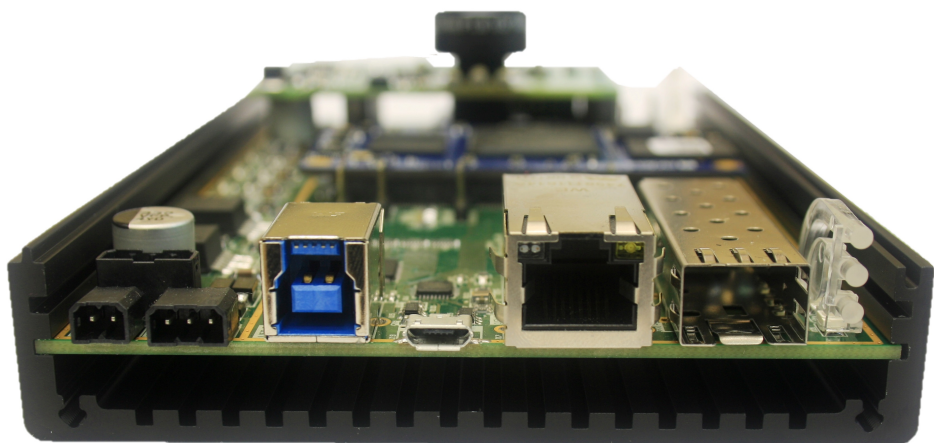
Základom riadiacej jednotky je 6-vrstvá doska plošných spojov v zložení, od vrchu dole: vrchná signálová vrstva, GND, dve vnútorné signálové, napájacia a následne spodná signálová vrstva. Zloženie vrstiev DPS je naznačené v tabuľke 6.1.

	Layer Name	Type	Material	Thickness (mm)
	Top Overlay	Overlay		
	Top Solder	Solder Mask/Coverlay	Surface Material	0.01016
1	Top Layer	Signal	Copper	0.018
	Dielectric 1	Dielectric	Core	0.146
2	GND	Internal Plane	Copper	0.036
	Dielectric 5	Dielectric	Prepreg	0.507
3	IN1	Signal	Copper	0.036
	Dielectric 6	Dielectric	Core	0.137
4	IN2	Signal	Copper	0.036
	Dielectric 3	Dielectric	Prepreg	0.507
5	PWR	Internal Plane	Copper	0.036
	Dielectric 4	Dielectric	Core	0.146
6	Bottom Layer	Signal	Copper	0.018
	Bottom Solder	Solder Mask/Coverlay	Surface Material	0.01016
	Bottom Overlay	Overlay		

Tab. 6.1: Usporiadanie vrstiev DPS

Zdrojová časť sa nachádza pozdĺž ľavého okraja, čo najďalej od ostatných komponentov. Na spodnej strane, hneď pri napájacom konektore, sú prvé 2, najvýkonnejšie, DC/DC meniče, nasledované ďalšími podružnými. Najvyššie 3 zdroje v tomto usporiadaní sú nízkošumové lineárne stabilizátory pre napájanie analógovej časti ToF snímača. Každý jeden napäťový menič je vybavený konektorom pre overenie správnej funkcie meraním výstupného napätia. Pre jednoduchšiu diagnostiku prislúcha každému meniču aj jedna svetelná dióda signalizujúca jeho funkciu. Pre obmedzenie prieniku elektromagnetického rušenia, zo zdrojovej časti smerom k ďalším obvodom, je celá zdrojová sekcia obkolesená 1 mm širokým rámkom pripojeným na GND prechodkami s rozstupom 3 mm. Takýmto rámom je obkolesená celá DPS kamery pre zvýšenie elektromagnetickej imunity celého zariadenia.

Na spodnej hrane sú lokalizované všetky dôležité konektory komunikačných rozhraní.



Obr. 6.2.: Konektory komunikačných rozhraní

Konektory zľava:

- napájanie 6 V – 20 V;
- UART linuxovej konzoly;
- USB 3.0, typ B;
- USB 2.0 OTG, typ Micro-B;
- Gigabit Ethernet RJ-45;
- SFP.

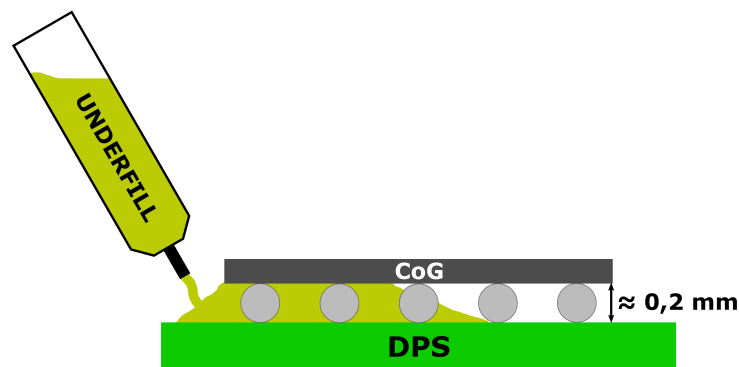
Vedľa SFP konektoru je ešte svetlovod pre dovedenie LED signálov na spodný panel. Rovnaký svetlovod s LED, kopírujúci tie isté stavy, je lokalizovaný aj na vrchnej strane DPS.

V strednej časti je, z pochopiteľných dôvodov, umiestnený MCV modul, do ktorého sa hviezdicovito napájajú všetky okolité periférie.

Nad MCV modulom sa nachádza ToF snímač OPT8241 spolu s objektívom, GPIO konektor s vyvedenými I/O pinmi z FPGA aj HPS (8 z každého), resetovacie tlačidlo a programovací JTAG konektor.

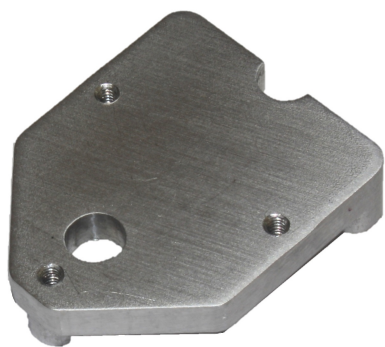
6.1. Chladenie ToF snímača

Najkomplikovanejšou časťou návrhu bol samotný ToF snímač. Puzdro tohoto snímača je typu CoG (Chip-on-Glass), čiže prakticky sklenené. Tu nastáva problém s odvodom tepla z dôvodu absencie klasickej chladiacej plôšky, aká sa bežne vyskytuje napríklad pri QFN puzdrách. Riešením je technológia nazývaná „Capillary Underfill Dispensing“. Jej podstata spočíva v podliatí už osadenej súčiastky špeciálnou epoxidovou živicom, ktorá zabezpečí prenos tepla zo skleneného povrchu súčiastky do odmaskovanej medenej chladiacej plochy na DPS.

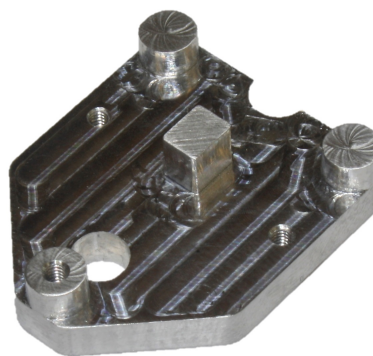


Obr. 6.3.: Princíp „underfill“ technológie

Túto technológiu však nezvláda ani popredná česká firma, zaoberajúca sa osadzovaním plošných spojov, ktorá využíva jedny z najmodernejších technológií. Na základe tohoto zistenia bolo navrhnuté vlastné riešenie problému chladenia CoG súčiastky, spočívajúce v priložení, na mieru vyrobeného, hliníkového chladiča zo zadnej strany, skrz otvor v DPS. Fotografie zhotoveného chladiča sú na obrázku 6.4.



(a) Pohľad zhora



(b) Pohľad zdola

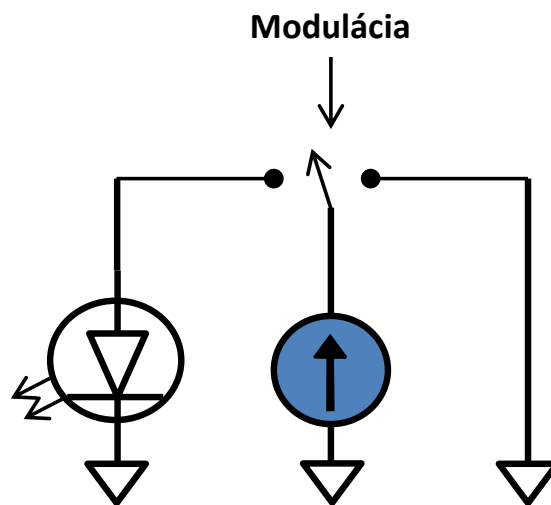
Obr. 6.4.: Chladič

Celý chladič je k DPS prichytený trojicou skrutiek M2. V mieste styku chladiča a ToF snímača je medzera približne $0,3\text{ mm}$, ktorú vyplňa teplovodivá silikónová (elektricky nevodivá) pasta.

7 Kapitola 7.

Osvetľovač – návrh zapojenia

Osvetľovač, ako názov napovedá, sa stará o osvetľovanie scény pred kamerou na základe modulačného signálu z ToF snímača. Podstatu celého zapojenia demonštruje nasledujúci obrázok:



Obr. 7.1.: Osvetľovač - princíp činnosti
Zdroj: [44]

Základom je prúdový zdroj, ktorého výstup je striedavo uzemňovaný a pripájaný k IR diódam. Tým sa eliminuje doba stabilizácie zdroja, ktorá by bola nutná v prípade jeho periodického vypínania a zapínania. Takéto riadenie by v rádoch desiatok MHz ani nebolo realizovateľné.

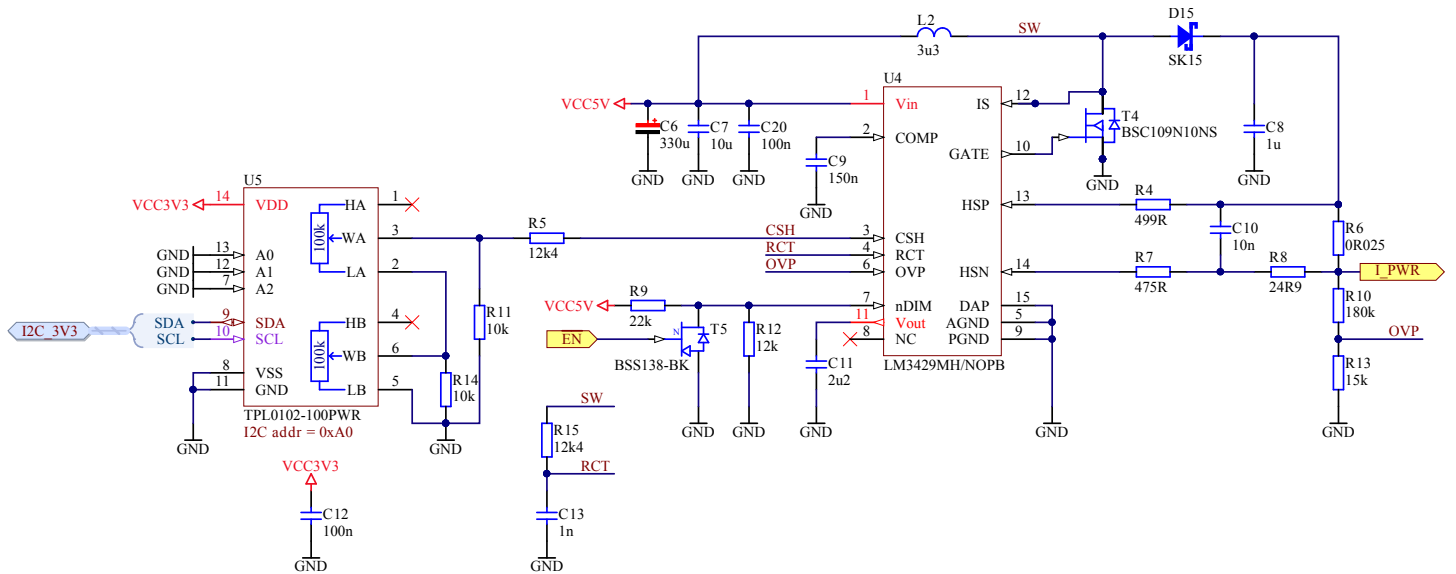
7.1. Prúdový zdroj

Zdroj konštantného prúdu zabezpečuje integrovaný obvod LM3429 priamo určený na napájanie LED. Jeho pozitívnou vlastnosťou je prepäťová ochrana a možnosť nastavenia snímacieho napätia.

Pomocou digitálneho potenciometra TPL0102 je možné nastaviť výstupný prúd. Maximálny prúd je nastavený, keď je hodnota oboch kanálov potenciometra na úrovni 0Ω :

$$I_{PWR} = 1,24 \frac{R_4}{R_6 R_5} = 2 \text{ A} \quad (7.1)$$

Minimálny prúd je dosiahnuteľný pri maximálnej hodnote oboch kanálov potenciometra, čo predstavuje $100 \text{ k}\Omega$.



Obr. 7.2.: Schéma zapojenia prúdového zdroja

$$I_{PWR} = 1,24 \frac{R_4}{R_6 (R_5 + R_{11} \parallel (100 \text{ k}\Omega + (R_{14} \parallel 100 \text{ k}\Omega)))} = 1,15 \text{ A} \quad (7.2)$$

Takýmto zapojením potenciometra je možné dosiahnuť jemné nastavenie výstupného prúdu a tým aj vyžarovaného výkonu.

Vstupom „nDIM“ je možné tento zdroj uspať, čo sa hodí v čase, keď je kamera zapnutá, ale meranie neprebíha.

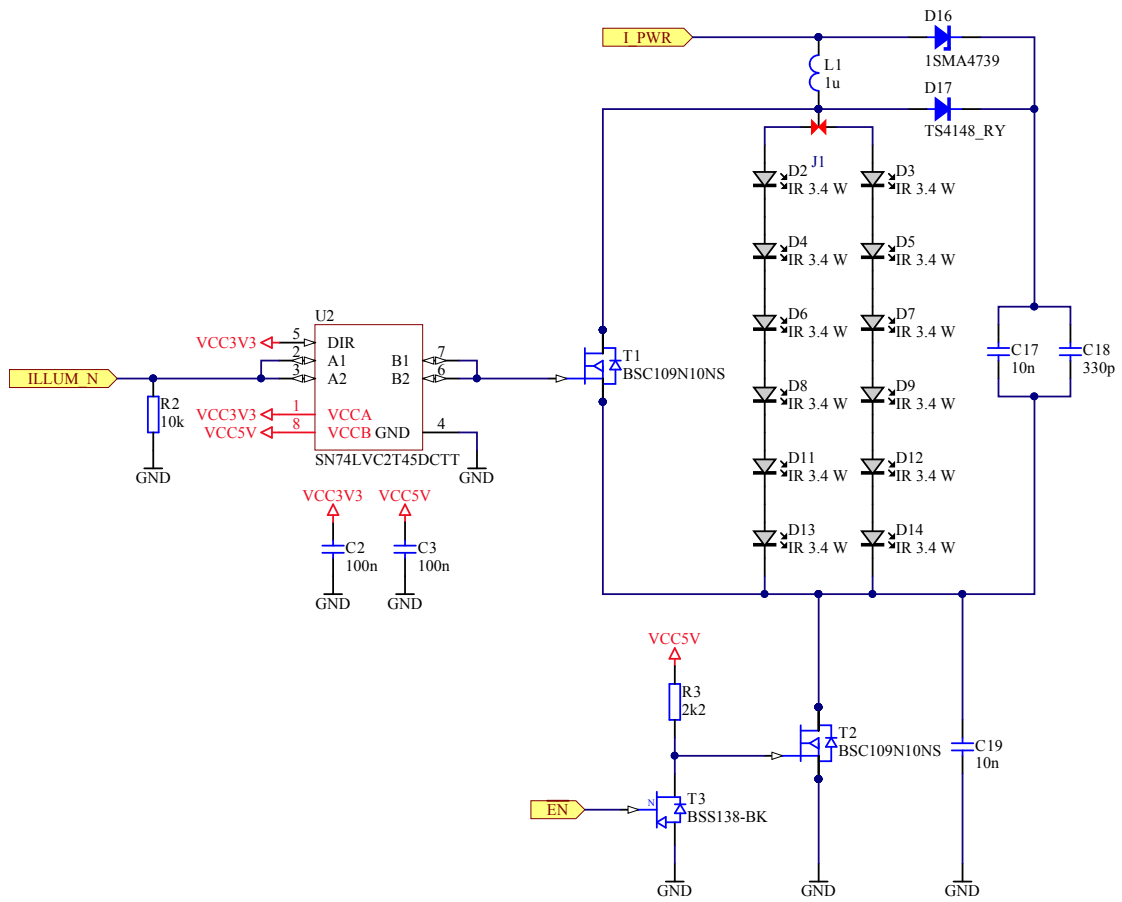
7.2. IR modul

IR modul pozostáva z dvoch okruhov. V každom je šesť sériovo zapojených IR diód SFH4715S s trvalým prúdom (v priepustnom smere) $I_F = 1 \text{ A}$ a pulzným prúdom až 5 A . Vlnová dĺžka emitovaného žiarenia je 850 nm , čo spadá do blízkeho IR spektra. S vyžarovacím uhlom 90° by mali byť vhodným prvkom pre rovnomerné ožiarenie scény pred snímačom. 2 okruhy sú z dôvodu fyzického usporiadania na DPS. Jeden okruh je zoradený okolo objektívu s ekviangulárnym rozostupom a druhý okruh je v jednom bode pod objektívom. Voľba okruhu sa realizuje letovacou prepajkou.

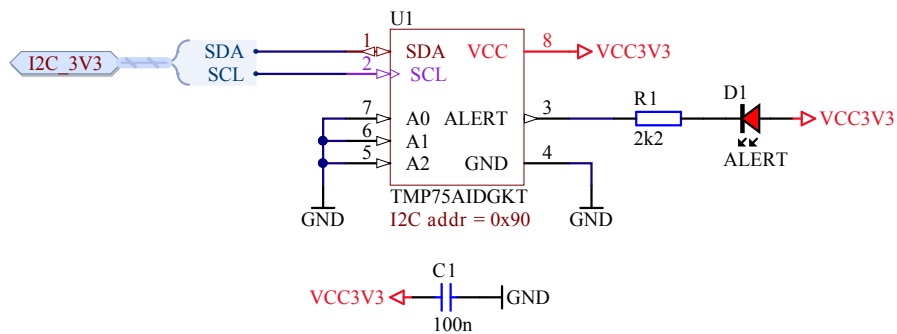
Zopnutím tranzistora T_1 dôjde k vykráteniu vetvy s IR diódami a presmerovaniu toku prúdu. O jeho spínanie sa stará oddelovač SN74LVC2T45, ktorý dokáže pracovať na frekvencii až 400 MHz . Okrem zvýšenia gateového napätia tranzistoru T_1 funguje aj ako tvarovač signálu.

Tranzistor T_2 odpája celý obvod súčasne s vypnutím prúdového zdroja.

Monitorovanie teploty v mieste najväčších tepelných strát – v blízkosti spínacieho prvku a IR diód – zabezpečuje I_2C teplomer TMP75.



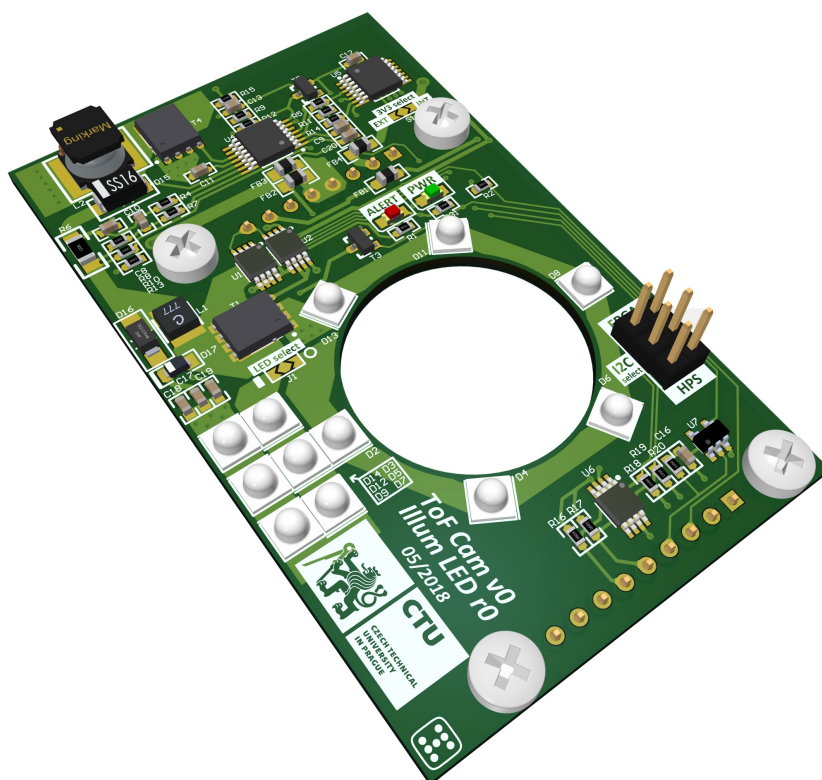
Obr. 7.3.: Schéma zapojenia IR modulu



Obr. 7.4.: TMP75 – Schéma zapojenia

8 Kapitola 8.

Osvetľovač – návrh DPS



Obr. 8.1.: 3D model DPS osvetľovača

DPS osvetľovača je svojím rozložením a počtom súčiastok pomerne jednoduchá. Jeden okruh IR diód je rozložený okolo okružia objektívu, zatiaľ čo diódy druhého okruhu sú koncentrované v jednom bode pod objektívom. Dvojaké rozloženie slúži pre porovnanie vplyvu rozloženia žiaričov na výslednú kvalitu merania.

Na spodnej strane sa nachádzajú prevodník napäťových úrovní pre I_2C ($1,8\text{ V} \leftrightarrow 3,3\text{ V}$). Na vrchnej strane je obvod prúdového zdroja spolu s digitálnym potenciometrom.

9 Kapitola 9.

Záver

Cieľom tejto práce bolo navrhnuť riadiacu jednotku snímača typu Time-of-Flight. Tento hlavný cieľ bol rozdelený do niekoľkých čiastkových cieľov, ktoré pozostávali primárne z týchto častí: štúdium technológie ToF, analýza dostupných technologických možností a hotových produktov na trhu, koncepcia vlastného riešenia ToF kamery a návrh prototypu zariadenia.

Prvá časť (kapitola 2) oboznamuje čitateľa s princípom ToF. V úvode tejto kapitoly je prezentovaný základný princíp, ktorý je následne rozoberaný do väčšej hĺbky. V rámci tejto analýzy sú preberané 2 základné prístupy k vyhodnocovaniu vzdialenosti objektov pred kamerou, a taktiež možnosť rozšírenia dosahu pomocou kombinácie rôznych modulačných frekvencií. V závere tejto časti sú priblížené aj iné spôsoby trojrozmerného snímania, konfrontované s metódou ToF a následne, pre porovnanie, zhrnuté do tabuľky.

Druhým krokom bola analýza aktuálneho stavu technológie ToF. Táto analýza spočívala v hľadaní oblastí využitia takýchto kamier a následnom prieskume trhu pre porovnanie predávaných ToF kamier a samostatných snímačov. Na základe porovnania snímačov bol, pre účely tejto práce, vybraný modul OPT8241 od firmy Texas Instruments, predovšetkým pre vhodné technické parametre.

Pre návrh riadiacej jednotky boli postupne komponované požiadavky na výsledný hardvér. Ako riadiaci obvod bol vybraný MCV modul osadený SoC Cyclone V, ktorý v sebe integruje hradlové pole spolu s dvojjadrovým procesorom ARM. Taktiež bola zvolená množina komunikačných rozhraní pozostávajúca z USB 2.0 aj 3.0, Gigabit Ethernetu, a pre väčšiu variabilitu aj SFP modulu umožňujúceho optickú konektivitu k sieti LAN s rýchlosťou až 1 Gb/s . Výsledkom tejto časti je bloková schéma reprezentujúca navrhovanú ToF kameru.

Na základe blokovej schémy bola ďalej navrhnutá kompletná riadiaca jednotka pozostávajúca z 2 samostatných DPS (základná doska + osvetľovací modul). Postup schématického návrhu bol rozobraný od napájacích zdrojov až po ToF snímač. V rámci návrhu DPS vznikol problém so zabezpečením chladenia snímača, ktorý pozostáva zo skleneného puzdra. Uznávaným spôsobom je použitie špeciálnej techniky, vstreknutie pasty priamo pod osadený čip, čo však v našich končinách nie je bežnou praxou. Tento problém sa podarilo obísť výrobou špeciálneho chladiča, ktorý zabezpečí dostatočný odvod tepla zo snímača. V rámci osvetľovacieho modulu boli, pre možnosť porovnania, navrhnuté 2 spôsoby ožarovania scény pred snímačom – kruhový a bodový.

Výsledkom tejto práce je funkčný prototyp ToF kamery, špeciálne navrhnutý pre účely ďalšieho vývoja a skúmania nových možností, ktoré ponúka táto obzvlášť zaujímavá technológia. Ďalším cieľom je vývoj algoritmov pre efektívne spracúvanie a filtrovanie nameraných hodnôt, ako aj skúmanie nelinearity merania a možností jej kalibrácie. Je zrejmé, že technológia ToF má veľký potenciál nahradiť niektoré aktuálne používané a zaužívané možnosti 3D snímania. Vďaka vysokej obrazovej frekvencii, dobrej funkčnosti aj v neosvetlených priestoroch, nezávislosti na štruktúre a farbe snímaného povrchu, či nenáročnosti na vysokom výpočtovom výkone, sa javí ako vhodný adept pre nasadenie v rôznych odvetviach – od automatizácie priemyselnej výroby, cez zdravotníctvo až po spotrebnú elektroniku. Dôvod, prečo sa táto technológia ešte nedostala do povedomia širokej verejnosti nie je jasný, ale vďaka zlepšujúcej sa dostupnosti ToF snímačov na trhu, spolu s pomerne priaznivou cenou, môžeme očakávať jej vzostup.

Zoznam skratiek

3D	Three-Dimensional – Trojrozmerný (priestor)
ADC,A/D	Analog-to-Digital Converter – Analógovo digitálny prevodník
CAN	Controller Area Network
CIE	International Commission on Illumination
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CoG	Chip-on-Glass – Čip na skle
CSEM	Swiss Center for Electronics and Microtechnology
CW	Continuous-Wave – Kontinuálna vlna
D-ToF	Direct Time-of-Flight – Priama metóda ToF
DC	Direct Current – Jednosmerný prúd
DDR	Double Data Rate
DLP	Digital Light Processing
DPS	Doska plošných spojov
DSP	Digital Signal Processor – Digitálny signálny procesor
ESD	Electrostatic Discharge – Elektrostatický výboj
EU	European Union – Európska Únia
FIFO	First In First Out – Prvý dnu, prvý von
FPGA	Field Programmable Gate Array – Programovateľné hradlové pole
fps	Frames Per Second – Počet snímkov za sekundu
GPIO	General-Purpose Input/Output – Multifunkčné vstupno-výstupné (rozhranie)
HD	High Definition – Vysoké rozlíšenie
HPS	Hard Processor System
I-ToF	Indirect Time-of-Flight – Nepriama metóda ToF
I/O	Input/Output – Vstup/Výstup
IP	Internet Protocol
IR	Infrared Radiation – Infračervené žiarenie
LAN	Local Area Network – Lokálna počítačová sieť
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LDO	Low-Dropout Regulator – Stabilizátor s nízkym úbytkom napätia

LED	Light-Emitting Diode – Luminiscenčná dióda
LVDS	Low-Voltage Differential Signaling
MAC	Medium Access Control – Riadenie prístupu k médiu
OSI	Open System Interconnection (reference model)
PC	Personal Computer – Osobný počítač
PHY	Physical Layer – Fyzická vrstva
PoE	Power over Ethernet – Napájanie prostredníctvom dátového káblu
PSRR	Power Supply Rejection Ratio – Činiteľ potlačenia rušenia z napájacieho zdroja
PSU	Power Supply Unit – Napájací zdroj
px	Pixel
QVGA	Quarter Video Graphics Array
RGMII	Reduced Gigabit Media-Independent Interface – Redukované, gigabitové, na médiu nezávislé, rozhranie
ROM	Read-Only Memory – Permanentná pamäť
SDRAM	Synchronous Dynamic Random-Access Memory
SFP	Small Form-factor Pluggable (transceiver)
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping – Simultánna lokalizácia a mapovanie
SNR	Signal-to-Noise Ratio – Odstup signál-šum
SoC	System on a Chip – Systém na čipe
SoM	System on a Module – Systém na module
SPAD	Single-Photon Avalanche Diode
SPI	Serial Peripheral Interface – Sériové periférne rozhranie
SSH	Secure Shell – Zabezpečený prístup k príkazovému interpretovaču
SW	Software – Softvér
TG	Timing Generator – Časovač
TI	Texas Instruments
ToF	Time-of-Flight
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter – Asynchrónne sériové rozhranie
UI	User Interface – Používateľské rozhranie
USB	Universal Serial Bus – Univerzálna sériová zbernica
UTMI	USB 2.0 Transceiver Macrocell Interface
WoL	Wake on LAN
ČVUT	České vysoké učení technické

Zoznam obrázkov

2.1. Princíp snímania metódou ToF	3
2.2. Pulzná metóda I-ToF	4
2.3. Metóda kontinuálnej vlny I-ToF	5
2.4. Zväčšenie dosahu pomocou dvojfrekvenčnej metódy	6
2.5. Princíp merania vzdialenosti stereokamerou	7
2.6. Princíp merania vzdialenosti štrukturovaným svetlom	8
3.1. Príklady ToF kamier	13
3.2. Príklady ToF snímačov	16
4.1. Vývojový modul OPT8241-CDK-EVM	18
4.2. OPT8241 – bloková schéma	19
4.3. Štruktúra FPGA	20
4.4. Porovnanie komunikačných vodičov USB 2.0 a 3.0	21
4.5. Napájanie kamery pomocou PoE	22
4.6. Porovnanie SFP transceiverov	22
4.7. MCV (Aries embedded)	23
4.8. MCV - bloková schéma	24
4.9. Bloková schéma navrhovanej ToF kamery	25
5.1. Bloková schéma napájacej sekcie	27
5.2. LMZ12003 – schéma zapojenia	28
5.3. Frekvenčná charakteristika feritovej perly Vishay ILHB-1206 600 Ω	30
5.4. LMZ21701 – schéma zapojenia	30
5.5. LM2687 – schéma zapojenia	31
5.6. TPS7A4700 – PSRR	32
5.7. TPS7A4700 – schéma zapojenia	32
5.8. TPS3103 – schéma zapojenia	33
5.9. USB3320 – schéma zapojenia	34
5.10. FT601 – bloková schéma	34
5.11. FT601 – schéma zapojenia	35
5.12. KSZ9031RNX – schéma zapojenia	36
5.13. OPT8241 – schéma digitálnej časti	37
5.14. MCV SoM	38
6.1. 3D model DPS kamery	39
6.2. Konektory komunikačných rozhraní	40
6.3. Princíp „underfill“ technológie	41
6.4. Chladič	42
7.1. Osvetľovač - princíp činnosti	43
7.2. Schéma zapojenia prúdového zdroja	44
7.3. Schéma zapojenia IR modulu	45
7.4. TMP75 – Schéma zapojenia	45
8.1. 3D model DPS osvetľovača	47

A.1. Ostatné periférie - schéma zapojenia	I
A.2. MCV modul - schéma zapojenia (časť 1/2)	II
A.3. MCV modul - schéma zapojenia (časť 2/2)	III

Zoznam tabuliek

2.1. Porovnanie 3D snímacích technológií	9
3.1. Porovnanie vybraných ToF kamier	14
3.2. Porovnanie vybraných ToF snímačov	15
6.1. Usporiadanie vrstiev DPS	40

Použitá literatúra

- [1] ALMANSA-VALVERDE, S. – CASTILLO, J. C. – FERNÁNDEZ-CABALLERO, A. Mobile robot map building from time-of-flight camera. *Expert Systems with Applications*. 2012, 39, 10, s. 8835–8843.
- [2] ARIES EMBEDDED. *MCV Hardware Manual* [online]. ARIES Embedded GmbH, Jún 2017. [cit. 21. 5. 2018]. Dostupné z: <ftp://ftp.aries-embedded.de/products/MCV/hardware/MCVHardwareManual.pdf>.
- [3] ATTAMIMI, M. et al. Visual recognition system for cleaning tasks by humanoid robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2013, 10, 11, s. 384.
- [4] BASLER. *tof 640 - 20gm 850nm Basler Time-of-Flight* [online]. 2018. [cit. 11. 5. 2018]. Dostupné z: https://www.baslerweb.com/fp-1478427532/media/editorial/product_images/camera_series/tof_1/ToF_f_1_670x500px__x250.jpg.
- [5] BOSTELMAN, R. et al. Applications of a 3D range camera towards healthcare mobility aids. In *Networking, Sensing and Control, 2006. ICNSC'06. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on*, s. 416–421. IEEE, 2006.
- [6] CASTANEDA, V. – MATEUS, D. – NAVAB, N. SLAM combining ToF and high-resolution cameras. In *Applications of Computer Vision (WACV), 2011 IEEE Workshop on*, s. 672–678. IEEE, 2011.
- [7] CHARBON, E. et al. SPAD-based sensors. In *TOF range-imaging cameras*. Berlin: Springer, 2013. s. 11–38. doi: 10.1007/978-3-642-27523-4_2. ISBN 978-3-642-27522-7.
- [8] DEYLE, T. *Low-Cost Depth Cameras (aka Ranging Cameras or RGB-D Cameras) to Emerge in 2010?* [online]. Marec 2010. [cit. 11. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.hizook.com/blog/2010/03/28/low-cost-depth-cameras-aka-ranging-cameras-or-rgb-d-cameras-emerge-2010>.
- [9] DROESCHEL, D. et al. Robust Ego-Motion Estimation with ToF Cameras. In *ECMR*, s. 187–192, 2009.
- [10] DRUML, N. et al. A fast and flexible HW/SW co-processing framework for Time-of-Flight 3D imaging. *Microelectronics Reliability*. 2018, 81, s. 64–76.
- [11] DU, H. et al. A virtual keyboard based on true-3D optical ranging. In *Proceedings of the British Machine Vision Conference*, 1, s. 220–229, 2005.
- [12] FALIE, D. – BUZULOIU, V. Wide range time of flight camera for outdoor surveillance. In *Micro-waves, Radar and Remote Sensing Symposium, 2008. MRRS 2008*, s. 79–82. IEEE, 2008.
- [13] FIBERTRONICS. *SFP Fiber Optic Modules, 1.25Gbps Singlemode 1310nm, 40km* [online]. 2016. [cit. 20. 5. 2018]. Dostupné z: <https://www.fibertronics-store.com/images/1476366891272-880830356.jpeg>.

- [14] FTDI. *FT600Q-FT601Q IC Datasheet (USB 3.0 to FIFO Bridge)* [online]. FTDI, Jún 2015. [cit. 23.5.2018]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT600Q-FT601Q%20IC%20Datasheet.pdf.
- [15] GENG, J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial. *Advances in Optics and Photonics*. 2011, 3, 2, s. 128–160.
- [16] GENISYS. *Cisco Ethernet RJ-45 Gigabit Ethernet SFP Module* [online]. 2015. [cit. 20.5.2018]. Dostupné z: <http://genisyscorp.com/wp-content/uploads/2013/09/378928-B21.jpg>.
- [17] GUPTA, A. USB 3.0 vs USB 2.0: A quick reference summary for the busy engineer. *Cypress Semiconductor*. 2014.
- [18] HAGEBEUKER, D.-I. B. – MARKETING, P. A 3D time of flight camera for object detection. *PMD Technologies GmbH, Siegen*. 2007.
- [19] HAKER, M. *Gesture-based interaction with time-of-flight cameras*. PhD thesis, University of Lübeck, 2011.
- [20] HANSARD, M. et al. *Time-of-Flight Cameras: Principles, Methods and Applications*. Springer Briefs in Computer Science. London : Springer-Verlag, 2013. doi: 10.1007/978-1-4471-4658-2. ISBN 9781447146582.
- [21] HENDERSON, R. *Wavelength Considerations* [online]. 2007. [cit. 8.5.2018]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20071028072110/http://info.tuwien.ac.at/iflt/safety/section1/1_1_1.htm.
- [22] HOLTE, M. B. – MOESLUND, T. B. – FIHL, P. View-invariant gesture recognition using 3D optical flow and harmonic motion context. *Computer Vision and Image Understanding*. 2010, 114, 12, s. 1353–1361.
- [23] HUHLE, B. – JENKE, P. – STRASSER, W. On-the-fly scene acquisition with a handy multi-sensor system. *International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications*. 2008, 5, 3-4, s. 255–263.
- [24] INFINEON. *REAL3 image sensor family: 3D depth sensing based on Time-of-Flight* [online]. Infineon, November 2015. [cit. 15.5.2018]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-REAL3+Image+Sensor+Family-PB-v01_00-EN.PDF?fileId=5546d462518ffd850151a0afc2302a58.
- [25] INTEL. *Intel user-customizable SoC FPGAs* [online]. 2017. [cit. 11.5.2018]. Dostupné z: https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/br/br-soc-fpga.pdf.
- [26] KOIFMAN, V. *PMD and Infineon Present Improved ToF Sensors* [online]. December 2015. [cit. 11.5.2018]. Dostupné z: <http://image-sensors-world.blogspot.cz/2015/12/pmd-and-infineon-present-improved-tof.html>.
- [27] LI, L. Time-of-Flight Camera – An Introduction. *SLOA190B – Technical White Paper*. Január 2014. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf>.
- [28] LOGAN, R. – WALLS, K. *Advances in Imaging: Pulsed laser illumination enables high-resolution 3D imaging* [online]. August 2014. [cit. 11.5.2018]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-50/issue-10/features/advances-in-imaging-pulsed-laser-illumination-enables-high-resolution-3d-imaging.html>.

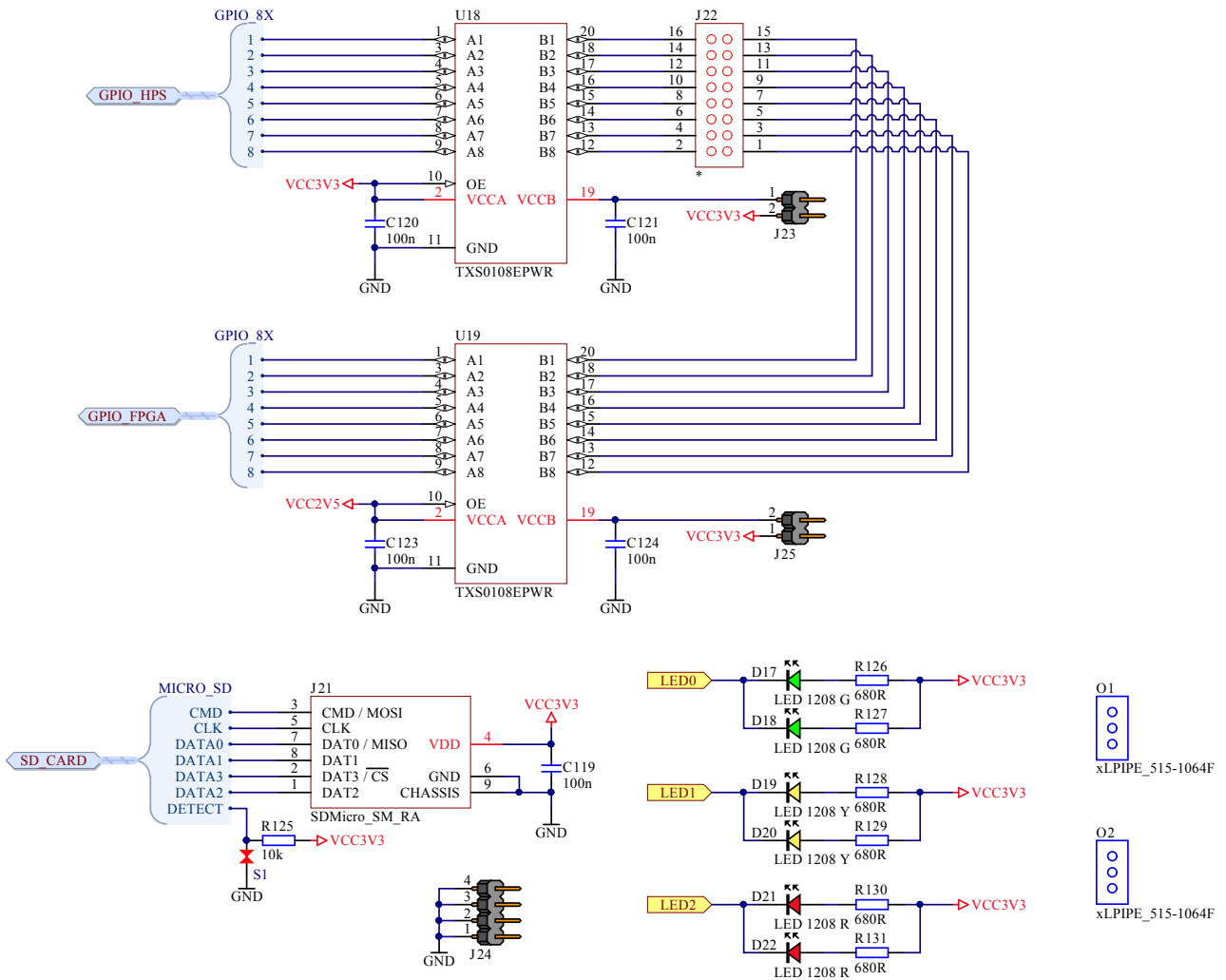
- [29] MELEXIS. *MLX75023 Time-of-Flight Sensor Array* [online]. Melexis, Apríl 2018. [cit. 15.5.2018]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/datasheet/2/734/MLX75023-Datasheet-Melexis-1128722.pdf>.
- [30] MICROCHIP. *Highly Integrated Full Featured Hi-Speed USB 2.0 ULPI Transceiver* [online]. Microchip, 2014. [cit. 23.5.2018]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00001792E.pdf>.
- [31] NATIONAL SEMICONDUCTOR. *LM2687 Low Noise Regulated Switched Capacitor Voltage Inverter* [online]. National Semiconductor, Apríl 2003. [cit. 22.5.2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2687.pdf>.
- [32] OGGIER, T. et al. An all-solid-state optical range camera for 3D real-time imaging with sub-centimeter depth resolution (SwissRanger). In *Optical Design and Engineering*, 5249, s. 534–546. International Society for Optics and Photonics, 2004.
- [33] PEARS, N. – LIU, Y. – BUNTING, P. *3D imaging, analysis and applications*. 3. London : Springer, 2012.
- [34] PENNE, J. et al. Robust real-time 3D respiratory motion detection using time-of-flight cameras. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*. 2008, 3, 5, s. 427–431.
- [35] SCHWARZ, L. A. et al. Estimating human 3d pose from time-of-flight images based on geodesic distances and optical flow. In *Automatic Face & Gesture Recognition and Workshops (FG 2011), 2011 IEEE International Conference on*, s. 700–706. IEEE, 2011.
- [36] ST MICROELECTRONICS. *VL53L0X: World's smallest Time-of-Flight ranging and gesture detection sensor* [online]. STMicroelectronics, Apríl 2018. [cit. 15.5.2018]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/group3/b2/1e/33/77/c6/92/47/6b/DM00279086/files/DM00279086.pdf/jcr:content/translations/en.DM00279086.pdf>.
- [37] ST MICROELECTRONICS. *World Record : VL53L0X, the Smallest Time-of-Flight Sensor Gets More Powerful* [online]. August 2016. [cit. 11.5.2018]. Dostupné z: <https://blog.st.com/vl53l0x-time-flight-sensor/>.
- [38] SYSTEM PLUS CONSULTING. *Melexis Time of Flight Imager for Automotive Applications* [online]. 2018. [cit. 11.5.2018]. Dostupné z: http://www.systemplus.fr/wp-content/uploads/2017/07/Melexis_MLX75023_Automotive_3D_ToF_Imager_System_Plus_Consulting_2-120x95.jpg.
- [39] SYSTEM PLUS CONSULTING. *Texas Instruments' Time of Flight Image Sensor for Industrial Applications* [online]. 2018. [cit. 11.5.2018]. Dostupné z: http://www.systemplus.fr/wp-content/uploads/2017/07/Texas_Instruments_OPT82421_Industrial_3D_ToF_imager_System_Plus_Consulting-120x84.jpg.
- [40] TEXAS INSTRUMENTS. *About 3D time of flight* [online]. Texas Instruments, 2018. [cit. 8.5.2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/sensing-products/optical-sensors/3d-time-of-flight/overview.html>.
- [41] TEXAS INSTRUMENTS. *LMZ12003 3-A Simple Switcher Power Module with 20-V Maximum Input Voltage* [online]. Texas Instruments, August 2015. [cit. 22.5.2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmz12003.pdf>.
- [42] TEXAS INSTRUMENTS. *LMZ21701 1 A SIMPLE SWITCHER Nano Module with 17 V Maximum Input Voltage* [online]. Texas Instruments, November 2014. [cit. 22.5.2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmz21701.pdf>.

- [43] TEXAS INSTRUMENTS. *TPS7A470x 36-V, 1-A, 4- μ V RMS, RF LDO Voltage Regulator* [online]. Texas Instruments, September 2014. [cit. 23. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps7a47.pdf>.
- [44] TEXAS INSTRUMENTS. *Introduction to the Time-of-Flight (ToF) System Design* [online]. Texas Instruments, 2013. [cit. 8. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/sbau219d/sbau219d.pdf>.
- [45] TEXAS INSTRUMENTS. *OPT8241 3D Time-of-Flight Sensor* [online]. Texas Instruments, Jún 2015. [cit. 15. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt8241.pdf>.
- [46] TEXAS INSTRUMENTS. *OPT8241 CDK Evaluation Module: Quick Start Guide* [online]. Texas Instruments, Február 2017. [cit. 17. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/sbou156b/sbou156b.pdf>.
- [47] TEXAS INSTRUMENTS. *OPT9221 Time-of-Flight Controller* [online]. Texas Instruments, Jún 2015. [cit. 17. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/opt9221.pdf>.
- [48] VAKKANTULA, R. S. K. *Streaming Data Through Isochronous or Bulk Endpoints on EZ-USB FX2 and FX2LP* [online]. Cypress, August 2008. [cit. 17. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.cypress.com/file/139866/download>.
- [49] VISHAY. *High Current Multilayer Ferrite Beads* [online]. Vishay, Jún 2012. [cit. 22. 5. 2018]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/2243805.pdf>.
- [50] WEINGARTEN, J. W. – GRUENER, G. – SIEGWART, R. A state-of-the-art 3D sensor for robot navigation. In *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, 3, s. 2155–2160. IEEE, 2004.
- [51] WIEDEMANN, M. et al. Analysis and characterization of the PMD camera for application in mobile robotics. *IFAC Proceedings Volumes*. 2008, 41, 2, s. 13689–13694.
- [52] XU, Z. et al. Smart pixel: photonic mixer device (PMD); new system concept of a 3D-imaging camera-on-a-chip. In *Proceedings of the International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, s. 259–264, 1998.
- [53] YAHAV, G. – IDAN, G. J. – MANDELBOUM, D. 3D imaging camera for gaming application. In *Consumer Electronics, 2007. ICCE 2007. Digest of Technical Papers. International Conference on*, s. 1–2. IEEE, 2007.
- [54] YUAN, F. et al. Laser-based navigation enhanced with 3D time-of-flight data. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA'09. IEEE International Conference on*, s. 2844–2850. IEEE, 2009.

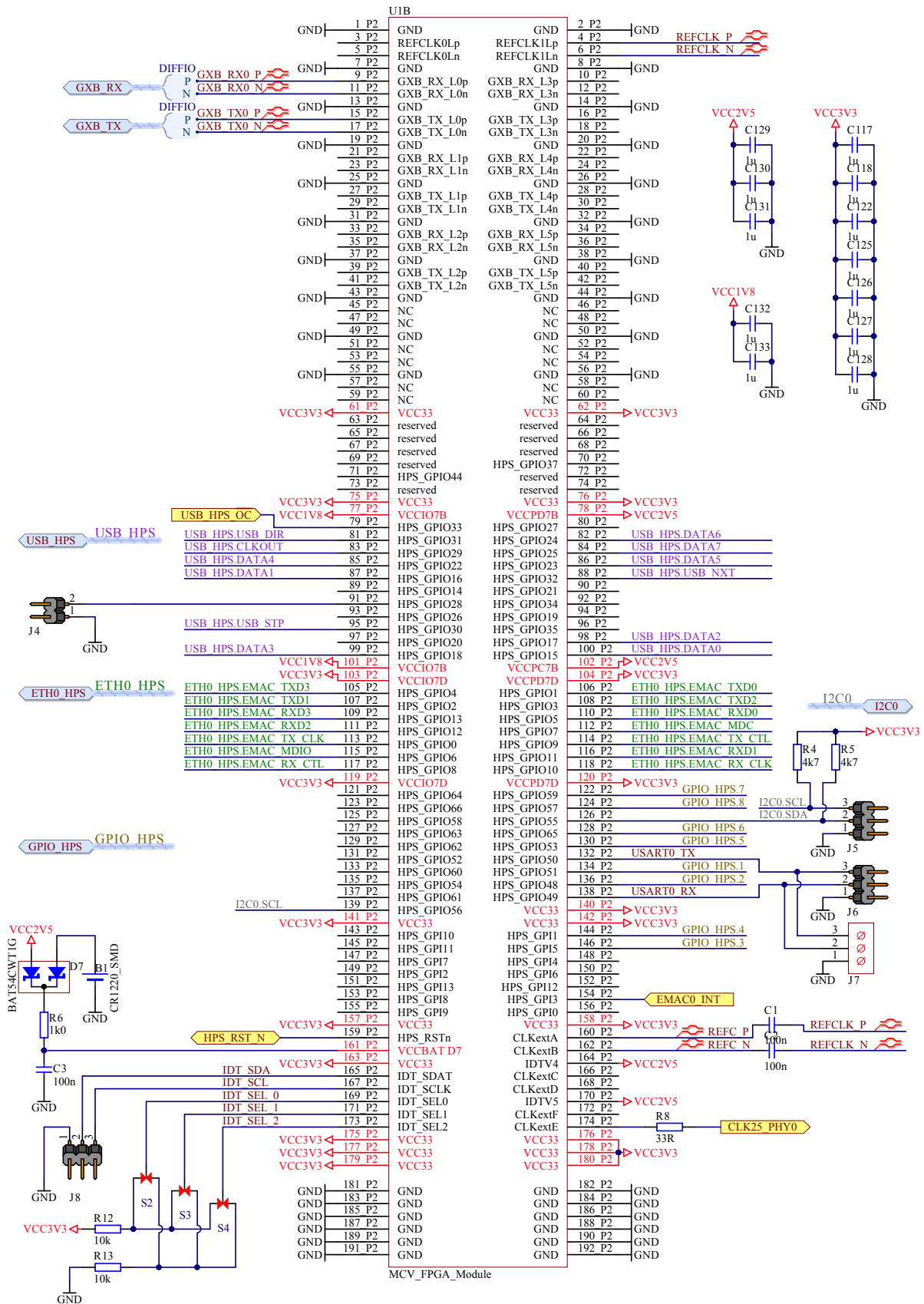
Prílohy

A Príloha A. Schémy

A.1. GPIO a SD karta



Obr. A.1.: Ostatné periférie - schéma zapojenia



Obr. A.3.: MCV modul - schéma zapojenia (časť 2/2)

B Príloha B.

Obsah priloženého CD

CD	
├ DP_Drozd_Stanislav_2018.pdf	Text diplomovej práce
└ obrazky	Obrázky použité v texte diplomovej práce