

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Robustní algoritmus detekce kuličky na nakloněné rovině
Jiří Touška

Bakalářská práce
2020

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jiří Touška**
Osobní číslo: **I16280**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Téma práce: **Robustní algoritmus detekce kuličky na nakloněné rovině**
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

Zásady pro vypracování

Pro výukový přípravek „kulička na nakloněné ploše“ demonstrující obecné regulační procesy vytvořte vhodné SW vybavení. Zvolte vhodné již existující HW řešení v podobě vývojového kitu a připojte k němu CMOS kameru. Vytvořte algoritmus detekce plochy a separace kuličky na ploše založený na metodách obrazové detekce a implementujte do HW. Maximální perioda regulační smyčky nesmí přesáhnout 200ms. Ověřte fungování detekce za různých světelných podmínek. Algoritmus musí fungovat zcela autonomně a musí umožnit správnou detekci i v případě zanesení chyby uživatelem. Dále vytvořte vizualizační SW pro OS Windows, či Android s možností ovlivnění parametrů PID regulátoru a vizualizací polohy kuličky na ploše.

Rozsah pracovní zprávy: **30-40**
Rozsah grafických prací: **10**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Matoušek D., Práce s mikrokontroléry Atmel AVR, BEN technická literatura, Praha 2006, ISBN: 80-7300-209-4

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

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. května 2020**



L.S.

Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
děkan

Ing. Jan Pídanič, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 17. prosince 2019

Prohlašuji:

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

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

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 4. 8. 2020

Jiří Touška

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Martinu Dobrovolnému, Ph.D., za odborné vedení při tvorbě této bakalářské práce, za cenné rady a vlídný přístup po celou dobu tvorby bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině a přátelům, kteří mi byli oporou po celou dobu mého studia, za což jim velmi děkuji.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá realizací SW řízení pro existující přípravek „kulička na ploše“. Algoritmus udržuje kuličku na předem určené pozici. Kulička je snímána kamerovým snímačem. Důležitou částí řídicího algoritmu, je detekce kuličky užitím metod digitálního zpracování obrazu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Zpracování obrazu, OV7670, STM32F4, regulace polohy, detekce kuličky

TITLE

Robust algorithm for ball detection on inclined plane

ANNOTATION

This Bachelor thesis deals with the realization of SW control for existing tool “ball on the plane”. Algorithm keeps ball on predefined position. The ball is captured by camera sensor. An important part of algorithm is ball detection using methods of digital image processing.

KEYWORDS

Image processing, OV7670, STM32F4, position control, ball detection

OBSAH

Seznam obrázků	9
Seznam zkratek	10
Úvod	11
1 Úvod do problematiky	12
1.1 Stav přípravku	12
1.2 Požadovaný výsledek práce	12
1.3 Předpokládaný postup práce	12
2 Představení přípravku	14
1.4 Mechatronická skříň	15
1.4.1 Napájecí zdroj	15
1.4.2 Krokové motory s řídicími moduly	15
1.5 Balanční deska	15
1.6 Teleskopické rameno	15
1.7 Kulička	15
3 Princip funkce přípravku	17
3.1 Digitální zpracování obrazu	17
3.2 Předzpracování obrazu	17
3.2.1 Jasová transformace	17
3.2.2 Geometrická transformace	18
3.2.3 Lokální předzpracování obrazu	18
3.2.4 Mediánová filtrace	18
3.3 Segmentace obrazu na objekty	19
3.3.1 Prahování (Thresholding)	19
3.3.2 Houghova Transformace	19
3.4 Analýza vhodných metod detekce a trasování objektu	20
3.4.1 Optický tok	20
3.4.2 Rozdílová metoda	20
3.4.3 RGB-HSV	21
3.4.4 Vertikální a horizontální součty obrazové matice	21

3.4.5	Zvolená metoda.....	22
3.5	Regulace.....	22
3.5.1	Dvoustavová regulace.....	22
3.5.2	PID regulátor.....	23
4	Architektura řídicího systému	24
4.1	Volba řídicího modulu.....	24
4.2	Využití periférie procesoru a jejich popis	25
4.2.1	FSMC.....	25
4.2.2	I2C	26
4.2.3	USART	26
4.2.4	SPI.....	27
4.2.5	DMA	28
4.2.6	DCMI.....	29
4.2.7	Timer3.....	29
4.3	Konverzní vývojová deska.....	30
4.4	Volba kamerového modulu.....	30
4.4.1	Vlastnosti kamerového modulu	30
4.4.2	Konfigurace kamerového modulu	31
4.4.3	Formát obrazových dat	31
5	Volba algoritmu a výsledného řešení	32
6	Realizace SW řízení Přípravku	35
6.1	Inicializace periférií	35
6.2	Uživatelské rozhraní	36
6.3	Vyhledávání referencí.....	37
6.4	Regulační smyčka	37
6.4.1	Příjem dat z kamerového modulu.....	38
6.4.2	Určení pozice kuličky a její regulace.....	39
7	Počítačová aplikace.....	40
	Závěr	41
	Použitá literatura	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 Diagramové znázornění přípravku	13
Obrázek 2 Fotografie přípravku	14
Obrázek 3 Použité kuličky při tvorbě práce	16
Obrázek 4 Ukázka mediánového filtru	18
Obrázek 5 Grafické zobrazení HSV [5]	21
Obrázek 6 Příklad dvoustavové regulace [6]	22
Obrázek 7 PID regulátor v regulační smyčce [7]	23
Obrázek 8 Diagram řídicího systému	24
Obrázek 9 Fotografie řídicího modulu a konverzní desky	25
Obrázek 10 Blokový diagram FSMC [10]	25
Obrázek 11 Datagram I2C sběrnice [11]	26
Obrázek 12 Ukázka datagramu USART [12]	27
Obrázek 13 Ukázka zapojení SPI se čtyřmi SLAVE obvody[13]	27
Obrázek 14 Implementace dvou DMA kontrolérů v STM32F429 [10]	28
Obrázek 15 Propojení kamerového modulu s procesorem [14]	29
Obrázek 16 Konverzní vývojová deska [15]	30
Obrázek 17 Fotografie kamerového modulu	31
Obrázek 18 Ukázka tří RGB formátů a jejich uspořádání v paměti [16]	31
Obrázek 19 Příklad přijatého snímku	32
Obrázek 20 Skokový rozdíl hodnot kuličky oproti balanční desce	33
Obrázek 21 Výsledný akumulátor v případě binárního obrazu zatíženého šumem	34
Obrázek 22 Inicializace řídicího systému	35
Obrázek 23 Fotografie hlavní obrazovky uživatelského rozhraní	36
Obrázek 24 Diagram pohybu v uživatelském rozhraní	36
Obrázek 25 Diagram regulační smyčky	37
Obrázek 26 Struktura FIFO bufferu [7]	38
Obrázek 27 Počítačová aplikace pro parametrizaci přípravku	40
Obrázek 28 Přehled zpráv určených pro komunikaci počítačové aplikace s přípravkem	40

SEZNAM ZKRATEK

SCCB	Serial Camera Control Bus
FSMC	Flexible Static Memory Controller
DCMI	Digital Camera Interface
DMA	Direct Memory Access
USART	Universal Synchronous/ Asynchronous Receiver Transmitters
I2C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
LCD	Liquid Crystal Display
RGB	Red, Green, Blue
HSV	Hue, Saturation, Value
VGA	Video Graphics Array
HW	Hardware
SW	Software
FPU	Floating-point unit
SAI	Serial audio interface
SDIO	Secure Digital Input Output
USB	Universal Serial Bus
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
HT	Houghova Transformace
USART	Universal Synchronous/Asynchronous Receiver and Transmitter
FIFO	First In, First Out

ÚVOD

Cílem této bakalářské práce bylo vybrat vhodné HW vybavení pro školní přípravek kulička na ploše a doplnit přípravek nutnou elektroinstalací. Následně vytvořit programový algoritmus pro získání snímku z kamerového modulu. Provést analýzu snímku, nalézt kuličku a upravit její pozici do požadované lokace.

Součástí práce je také počítačová aplikace pro vizualizaci pozice kuličky a možnost parametrizovat nastavení přípravku.

Přípravek má následně sloužit ke studiu a testování volby parametrů PID regulátorů.

1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Úkolem přípravku je přemístit kuličku z jakékoliv polohy na balanční desce do předem zadané polohy. Ke správné regulaci polohy kuličky dopomáhají programově implementované PID regulátory, jejichž parametry lze pomocí počítačové aplikace upravovat.

Přípravek má sloužit studentům jakožto učební pomůcka v předmětu regulace a automatizace. Důležitou kapitolou předmětu je princip funkce a parametrizace PID regulátorů.

Studenti si budou moci názorně vyzkoušet jak jednotlivé parametry PID a jejich hodnota ovlivňuje regulaci pozice kuličky a ověřit si své teoretické znalosti v praxi.

1.1 Stav přípravku

Přípravek je mechanicky dokončen. Obsahuje motory a nutnou elektroniku k jejich pohybu, balanční desku a interní napájecí zdroj. Je nutné doplnit řídicí a kamerový modul, jejich mechanické ukotvení na přípravek a kabelový svazek zajišťující napájení těchto modulů a jejich následné řízení motorů.

1.2 Požadovaný výsledek práce

Výsledkem práce by měl být SW pro řídicí modul, který dokáže z obrazových dat získaných z kamerového modulu spolehlivě určit aktuální pozici kuličky na balanční desce přípravku. Následně zajistit její přesunutí, případně udržení, v předem požadované poloze. Další částí práce je aplikace pro počítač, pomocí které lze parametrizovat nastavení přípravku.

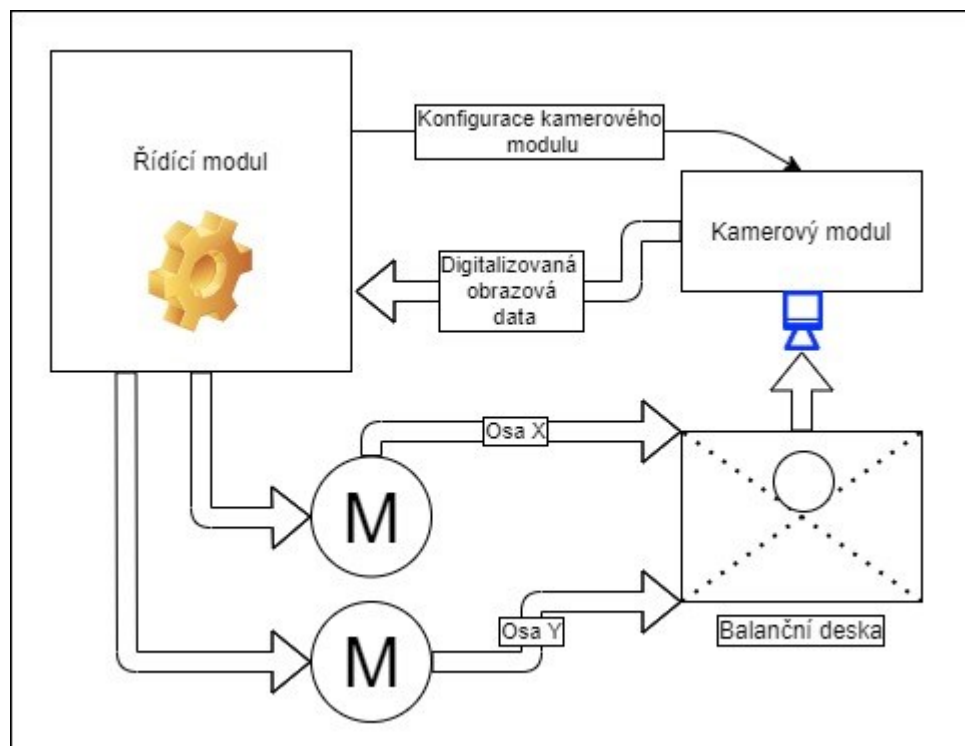
1.3 Předpokládaný postup práce

- 1) Výběr vývojového kitu STM, který bude zastávat funkci řídicího modulu
- 2) Výběr kamerového modulu určeného ke snímání plochy balanční desky
- 3) Doplnění výše zmíněných nutných částí (elektroinstalace, ukotvení modulů)
- 4) Analýza vhodného způsobu řešení SW algoritmů pro detekci kuličky a jejich implementace
- 5) Vytvoření algoritmu pro řízení motorů přípravku a uživatelské rozhraní přípravku.
- 6) Vytvoření aplikace pro počítač umožňující parametrizaci přípravku

Mým cílem je navrhnout a implementovat SW řízení s maximálně zjednodušenou obsluhou.

Přípravek bude možno uvést do provozu pouze za pomoci řídicího modulu bez potřeby počítačové aplikace. V tomto režimu bude použito výchozí nastavení přípravku, které nemusí zabezpečit správnou regulaci kuličky na požadovanou pozici.

Pro následné upravování PID regulátorů bude sloužit počítačová aplikace, pomocí které bude možné vyčíst a upravit požadovanou pozici kuličky nebo vyčíst a upravit parametry PID regulátorů. V případě ztráty komunikace mezi přípravkem a aplikací, bude přípravek nadále schopen pracovat s posledním přijatým nastavením a to až do vypnutí přípravku.



Obrázek 1 Diagramové znázornění přípravku

2 PŘEDSTAVENÍ PŘÍPRAVKU

Přípravek je tvořen z teleskopického ramene, balanční desky a mechatronické skříně. V této formě byl přípravek zpřístupněn ke zhotovení práce.

Pro funkci přípravku bylo nutné doplnit kabelový svazek zajišťující signálové a napájecí rozhraní. Tento svazek je odpojitelný od mechatronické skříně pro případné rozebrání a snadnější transport celého přípravku.

V následující části budou jednotlivé prvky popsány podrobněji.



Obrázek 2 Fotografie přípravku

1.4 Mechatronická skříň

Ve skříni je uložena elektronika zajišťující napájení celého přípravku a dva krokové motory s řídicími moduly. Součástí je také konektor D-Sub DA-15 na který je připojeno 5 V napájení, řídicí signály motorů a signály z čidel.

1.4.1 Napájecí zdroj

Přípravek je napájen rozvodnou sítí o napětí 220 V 50 Hz. Zdroj tvoří toroidní transformátor a deska stabilizátoru s výstupním napětím 5 V a symetrickým výstupem 24 V.

1.4.2 Krokové motory s řídicími moduly

Krokové motory zajišťují náklon balanční desky ve dvou rovinách. Hřídelky motorů jsou osazeny řemenicemi se zajištěnými lanky připojenými k balanční desce. Na hřídelkách je umístěn plechový ukazatel. Ukazatel je využit k protnutí infračervených závor použitých jako limitní čidla v kladném a záporném směru. Krokové motory jsou řízeny dvěma signály. První signál určuje směr rotace, druhý signál svou náběžnou hranou spouští pohyb motoru o jeden krok.

1.5 Balanční deska

Na balanční desku je umístěna kulička. Deska je usazena a vystředěna pomocí čepu umístěného na vrchní části mechatronické skříně. V rohách desky jsou úchyty pro ocelová lanka transformující úhel natočení motorů na náklon balanční desky.

1.6 Teleskopické rameno

Na rameni je umístěn řídicí HW a kamerový modul. Rameno je možno výškově nastavit, díky čemuž lze využít různé kamerové moduly a objektivy.

1.7 Kulička

Kulička nebyla u přípravku přítomna. Bylo tedy nutné ji vymodelovat a následně vytisknout na 3D tiskárně. Průměr použité kuličky je 38 mm.

Výběr kuličky úzce souvisel s návrhem algoritmu detekce kuličky. V dalších částech práce bude věnováno prostor pro objasnění této volby.



Obrázek 3 Použité kuličky při tvorbě práce

3 PRINCIP FUNKCE PŘÍPRAVKU

Úkolem přípravku je sejmout snímek balanční desky s kuličkou pomocí kamerového modulu a následně data přenést do řídicího modulu. Řídicí modul provede pomocí metod digitálního zpracování obrazu detekci kuličky a určí její aktuální polohu na balanční desce. Pomocí softwarově řešených PID regulátorů vypočítá novou korekci náklonu desky pro pohyb kuličky do požadované pozice na desce.

3.1 Digitální zpracování obrazu

Hlavním bodem práce bylo navrhnout algoritmus pro bezdotykové snímání pozice kuličky a to s využitím kamerového systému a algoritmů pro celočíselné programování. Bylo nutné zvolit a navrhnout vhodnou sekvenci algoritmů a jejich vzájemnou provázanost pro robustní detekci kuličky na balanční desce.

Celý přístup byl realizován výhradně SW za pomoci metod digitálního zpracování obrazu. Digitální zpracování obrazu je disciplína zabývající se zpracováním digitálních obrazových dat.

V následujících podkapitolách jsou představeny různé metody předzpracování a zpracování obrazu.

3.2 Předzpracování obrazu

Před využitím metod pro detekci objektů v obrazu je vhodné obrazová data předzpracovat pro přesnější, jednodušší a rychlejší užití metod vyhledávání objektů. Předzpracování obrazu slouží k potlačení poruch vzniklých v průběhu snímání a digitalizace obrazu.

3.2.1 Jasová transformace

Jasová transformace se užívá k potlačení poruch jasu nasnímaného obrazu a dále například ke zvýraznění některých detailů v obraze [2]. Poruchy mohou být způsobeny např. nerovnoměrným osvětlením nebo různou odrazivostí snímaného povrchu apod. V některých případech může užití jasové transformace vést ke ztrátě informace.

3.2.2 Geometrická transformace

Geometrická transformace slouží k potlačení zkreslení obrazu. Toto zkreslení může být způsobeno například vlivem optiky snímače nebo nedodržením pravého úhlu optické osy snímače ke snímané ploše [2]. Další možností užití je posouvání, zvětšování, pootáčení nebo zkosení obrazu.

3.2.3 Lokální předzpracování obrazu

Mezi metody lokálního zpracování obrazu patří hlavně postupy zaměřené na filtraci šumu, ostření obrazu, detekci hran apod.[2]. Výsledná hodnota bodu po užití těchto metod závisí vždy jen na lokálním okolí odpovídajícího bodu vstupního obrazu.

3.2.4 Mediánová filtrace

Filtrace užívaná k potlačení šumu v obrazu [2]. Jde o velmi často užívaný typ filtrace. Medián je číslo, které se nachází uprostřed uspořádané posloupnosti. Metoda přiřadí každému bodu v obrazu novou hodnotu určenou jako medián z jeho lokálního okolí. Nevýhodou této metody je rozostření hran v obrazu. Rozostření je tím výraznější, čím je okolí určené k výpočtu mediánu větší.



Obrázek 4 Ukázka mediánového filtru

3.3 Segmentace obrazu na objekty

Segmentace obrazu si klade za cíl oddělit popředí obrazu od pozadí a zvýraznit zájmové oblasti, které jsou dále analyzovány a zpracovávány. Důležitou vlastností segmentace je snížení objemu zpracovávaných dat.

3.3.1 Prahování (Thresholding)

Metoda určená k separaci zájmových bodů či oblastí v obraze od pozadí [1]. Standardně se prahování užívá na obrazových datech v odstínech šedi. Principem funkce je určení prahové hodnoty jasu v obraze, všem datům s hodnotami většími než prahová hodnota je přiřazena hodnota 1, ostatním hodnota 0. Prahová hodnota může být jedna globální pro všechna vstupní obrazová data, nebo více pro lokální oblasti s různými hodnotami prahu. Tím vznikne binární obraz, ve kterém hodnoty 1 určují zájmové body a ty jsou následně vyšetřovány dalšími metodami.

Výhody této metody

- Jednoduchá aplikace metody
- Metodu lze využít i na data, jež nejsou jen v odstínech šedi – jako v této práci
- Rychlost této metody

3.3.2 Houghova Transformace

Metoda určená k hledání jednoduchých geometrických útvarů např. úsečka nebo kružnice. HT používá k hledání objektů data ve formě binárního obrazu o rozměru $M \times N$ a datový prostor s výstupem analýzy nazývaný akumulátor o stejném prostorovém rozměru. Například při analýze binárního obrazu o rozměru 20x20 buněk je zapotřebí akumulátor opět o rozměru 20x20 buněk. Při obrazovém zpracování dat je počet buněk běžně roven počtu pixelů ve vyšetřovaném obraze.

V této práci je hledaným objektem kulička. Bude tedy použita HT pro hledání kružnice o poloměru kuličky. Pro každý vyšetřovaný bod binárního obrazu je vypočteno kružnicové okolí o průměru hledané kružnice a hodnoty buněk akumulátoru jsou v těchto bodech inkrementovány o 1. Po vyšetření všech zájmových bodů v binárním obraze nalezneme maxim v akumulátoru. Pozice tohoto maxima označuje střed hledaného objektu popsaného námi hledanou kružnicí.

3.4 Analýza vhodných metod detekce a trasování objektu

Existuje mnoho metod, které dokáží řešit zadaný úkol této práce. Následuje popis různých algoritmů s odůvodněním jejich vhodnosti pro tuto práci.

3.4.1 Optický tok

Metoda optického toku se využívá k sledování pohybujícího se objektu, nasnímaného na sekvenci snímků [3]. Výsledkem této metody, je vektor nesoucí informaci o směru a rychlosti pohybu. Algoritmus dokáže detekovat různě směry pohybu a otáčení objektů. Algoritmus umožňuje detekci z mnoha způsobů snímaných snímků:

- Pohyblivá kamera – statická scéna
- Statická kamera – pohyblivá scéna
- Pohyblivá kamera – pohyblivá scéna

V případě **statická kamera – pohyblivá scéna** může dojít k situaci, kdy se hledaný objekt stane nehybným, následně se stává pro tuto metodu neviditelný. Přeneseno na tuto práci jde např. o stav kdy je kulička v požadované pozici nebo těsně po spuštění operace přípravku. V obou těchto stavech se dá předpokládat, že kulička bude nehybná. Z tohoto důvodu nebylo užití této metody uvažováno.

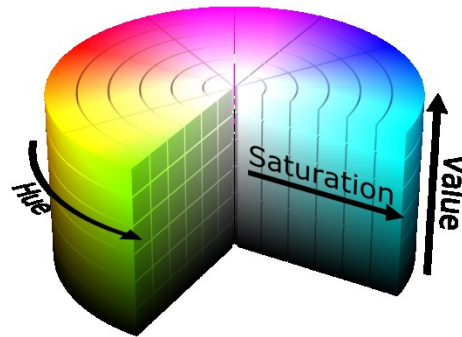
3.4.2 Rozdílová metoda

Metoda využívá pro detekci objektu rozdíl mezi dvěma snímky [3]. Metoda je algoritmicky velmi jednoduchá. Vyžaduje ovšem znalost snímku bez kuličky, nebo udržování minulého snímku a ten odečítat od aktuálně pořízeného snímku. Nevýhodou této metody je vysoká závislost odečítaného snímku na světelných podmínkách. V případě proměnlivého osvětlení scény dochází k výraznému výskytu chyb při odečtu.

Vzhledem k nutnosti pravidelného obnovování referenčního snímku pro odečet a vysoké světelné závislosti byla tato metoda i přes svou jednoduchou implementaci nevyužita v konečném řešení.

3.4.3 RGB-HSV

Metoda spočívá v převodu barevného modelu z RGB do HSV modelu [4]. HSV barevný model je nejvíce přiblížen principu vnímání barev lidského oka. Oproti modelu RGB, který je založen na aditivním míchání barev, jsou barvy ve formátu HSV definovány přirozeně. Je tímto vyřešen problém změny odstínu vybrané barvy při zachování její sytosti.



Obrázek 5 Grafické zobrazení HSV [5]

Význam jednotlivých složek:

Hue (H) – definuje tón barvy na barevném kotouči v rozsahu 0° až 360° .

Saturation (S) – určuje barevnou sytost. Představuje množství šedi v poměru k odstínu. Je udáván v procentech od 0% (šedá) až 100% (plně sytá barva).

Value (V) – udává množství bílého světla

Za pomoci tohoto modelu je oproti RGB mnohem snazší detekovat kuličku známé barvy. Což je hlavní výhoda této metody. Metoda nebyla využita, jelikož zvolený postup, který bude dále vysvětlen, je nezávislý na barvě kuličky. Výpočet převodu mezi modely by tedy zbytečně zatížil procesor a prodloužil dobu výpočtu.

3.4.4 Vertikální a horizontální součty obrazové matice

Velmi jednoduchá metoda, jejímž výstupem je v případě této práce přímo pozice kuličky. Metoda je nezávislá na barvě kuličky. Princip této metody spočívá v sečtení všech hodnot v daném sloupci obrazové matice. Tento postup se provede pro všechny sloupce v matici. Následně se hledá významná změna hodnoty mezi jednotlivými součty. Dá se předpokládat, že ve sloupci s nejvyšší hodnotou se nachází střed kuličky. Ten samý postup se aplikuje pro řádky dané matice. Tímto způsobem dojde k přesnému určení X a Y pozice kuličky na balanční desce.

Tato metoda je velmi jednoduchá, rychlá a lehce aplikovatelná do procesoru. Důvodem proč nebyla tato metoda zvolena je její předchozí užití v jiné Diplomové práci na témže přípravku jako tato práce.

3.4.5 Zvolená metoda

Pro svou jednoduchost bylo zvoleno segmentování obrazu pomocí prahování. Na výsledný binární obraz bude dále aplikována Houghova transformace jejímž výstupem bude pozice kuličky na balanční desce a její následná regulace.

3.5 Regulace

Regulací nazýváme proces pro automatické udržování hodnoty regulované veličiny na požadované hodnotě. V této práci jde o automatickou regulaci pozice kuličky.

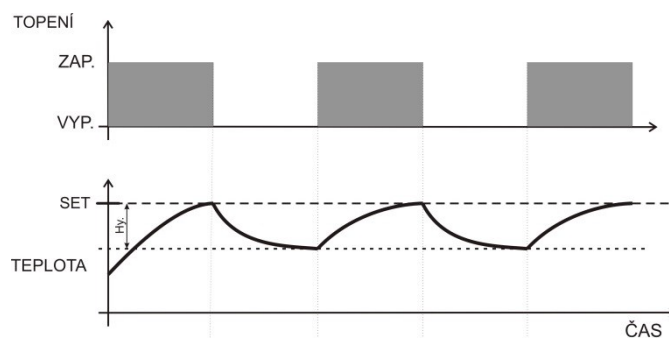
Existuje mnoho způsobů regulace, v následujících podkapitolách budou představeny dva nejpoužívanější.

3.5.1 Dvoustavová regulace

Dvoustavová regulace je využívána v méně náročných aplikacích. V závislosti na aktuální hodnotě regulované soustavy dochází k zapnutí či vypnutí akčního členu, který provádí regulaci. Principiálně tedy není možné dosáhnout nenulové regulační odchylky – rozdílu žádané a aktuální hodnoty. Měřená hodnota při regulaci kmitá kolem žádané hodnoty. Regulační odchylku lze snížit snížením hystereze.

Pro nepřesnost této metody regulace ji nebylo možno v práci použít.

Tato metoda je nevhodná pro užití v této práci. Neposkytuje dostatečnou přesnost regulace.

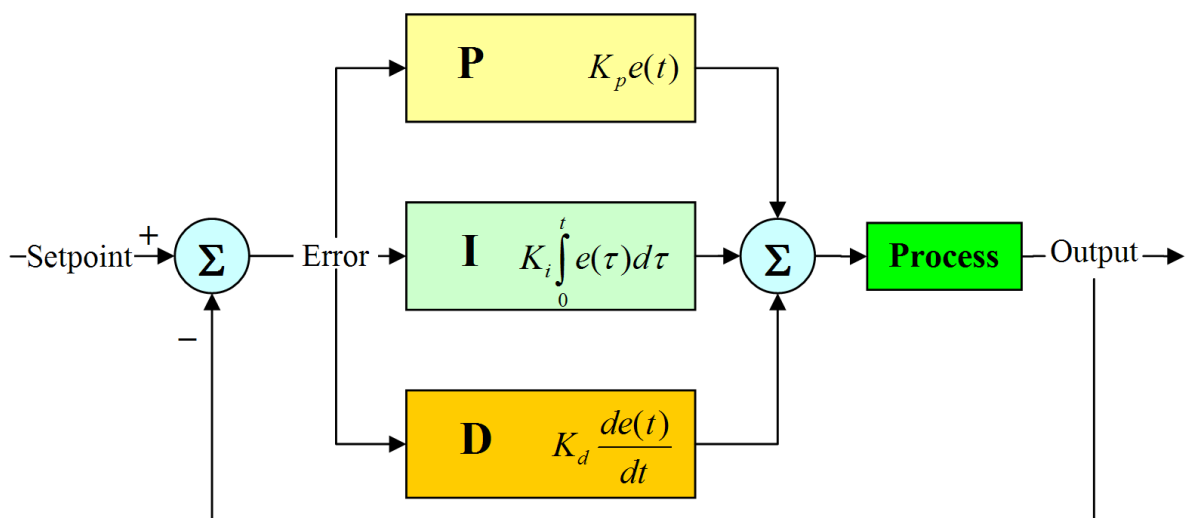


Obrázek 6 Příklad dvoustavové regulace [6]

3.5.2 PID regulátor

PID regulace je jeden z nejpoužívanějších algoritmů pro přesné řízení regulované veličiny [6]. Tento princip regulace umožňuje přesnější regulaci než dvoustavová regulace. Na rozdíl od dvoustavové regulace je regulace pomocí PID spojitá. Dochází tím k přesné regulaci regulované soustavy. PID regulátor se skládá ze tří složek:

- Proporcionální – akční veličina je přímo úměrná regulační odchylce.
- Integrovaná – akční veličina je přímo úměrná integrálu regulační odchylky
- Derivační – akční veličina je přímo úměrná derivaci regulační odchylky

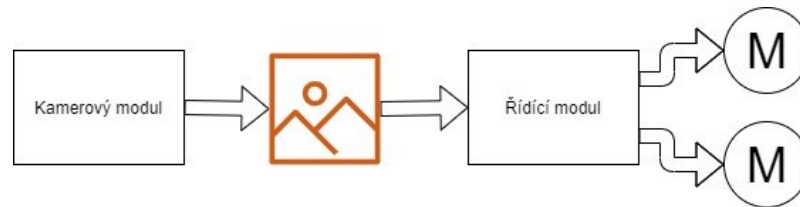


Obrázek 7 PID regulátor v regulační smyčce [7]

Aktuální hodnota regulované veličiny je přivedena na vstup PID regulátoru, kde proběhne výpočet jednotlivých složek v závislosti na jejich koeficientech. Výstup PID regulátoru je přiveden do akčního členu, který provede regulaci.

4 ARCHITEKTURA ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

Řídicí systém se skládá z řídicího modulu a kamerového modulu. Řídicí modul určí pozici kuličky na snímku získaného pomocí kamerového modulu, a provede její korekci náklonem desky pomocí krokových motorů. Následující podkapitoly jsou věnovány jeho popisu.



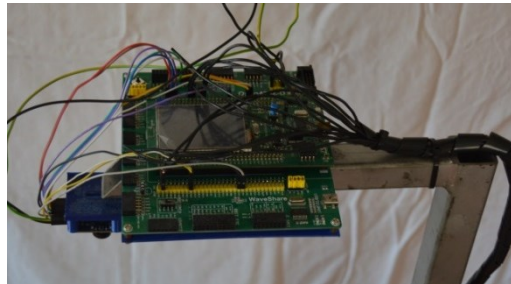
Obrázek 8 Diagram řídicího systému

4.1 Volba řídicího modulu

Pro řízení přípravku byl zvolen vývojový modul STM32F429IDISCOVERY. Modul byl vybrán pro jeho dobrou dostupnost, nízkou cenu, osazení středně výkonným procesorem a velkou oblíbenost v uživatelské komunitě. Kompletní technická specifikace modulu je dostupná na [8]. Modul je vybaven procesorem STM32F429ZIT6. Podrobnosti o tomto mikroprocesoru lze nalézt zde [9]. Pro tuto práci jsou důležité především tyto parametry:

- **Jádro**
 - ARM Cortex – M4 32-bitové, FPU
 - Frekvence až 180 MHz
- **Paměť**
 - 2Mb Flash (paměť programu)
 - 256 kB SRAM (paměť dat)
 - FSMC (SRAM, PSRAM, SDRAM, CF, NOR a NAND paměti)
- **Komunikační sběrnice**
 - 3 x I2C
 - 4 x USART
 - 6 x SPI
- **DMA řadič (16 streamů)**

- **DCMI**
 - 8 až 14ti-bitový paralelní přenos dat
 - Rychlost až 54 Mbit/s



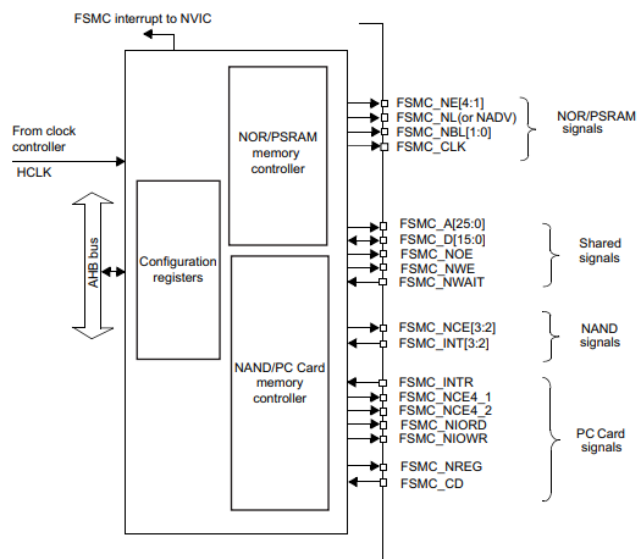
Obrázek 9 Fotografie řídicího modulu a konverzní desky

4.2 Využití periferie procesoru a jejich popis

V následujících podkapitolách jsou představeny a vysvětleny funkce jednotlivých periférií užitých pro funkci přípravku. Kompletní technické specifikace jsou dostupné v [10].

4.2.1 FSMC

Periferie procesoru umožňující připojení různých druhů externích pamětí a jejich následné užití skrze interní adresy procesoru. Z hlediska programování se tedy externí paměť chová jako část interní paměti procesoru a lze s ní díky tomu velmi jednoduše pracovat.

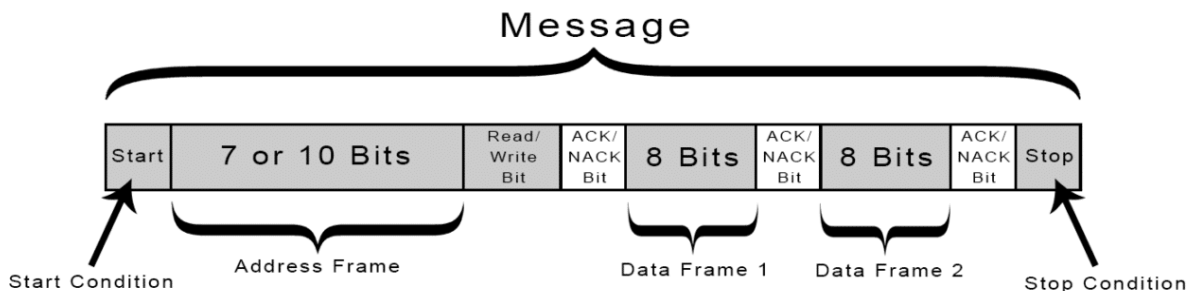


Obrázek 10 Blokový diagram FSMC [10]

V mém návrhu byla FSMC použita pro připojení SDRAM, která je součástí použitého vývojového modulu. Využití SDRAM je nutné pro uložení obrazových dat při rozlišení 640x480 pixelů. Pro snímky v nižším rozlišení je velikost interní paměti procesoru dostatečná.

4.2.2 I2C

Sériový, synchronní komunikační Master-Slave protokol [11]. Lze jej nalézt ve velkém množství různých integrovaných obvodů. Je tvořen dvěma vodiči, první vodič označovaný jako SDA slouží k přenosu dat, druhý vodič označovaný jako SCL přenáší synchronizační hodinový signál. Komunikace je striktně polo-duplexní. Může tedy probíhat pouze jedním směrem, který se ovšem může měnit. Datagram znázorňující komunikaci je vyobrazen na Obrázek 11.



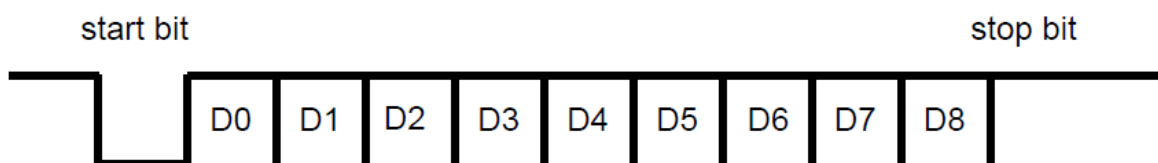
Obrázek 11 Datagram I2C sběrnice [11]

Tato komunikace je v zařízení využita pro přenos konfiguračních dat z řídicího modulu do kamerového modulu. Tím je definováno například rozlišení snímku nebo přenášený formát obrazových dat z kamerového modulu do řídicího modulu.

4.2.3 USART

Sériové rozhraní pro přenos dat mezi zařízeními v obou směrech [12]. Má možnost pracovat v synchronním nebo asynchronním režimu. Pro přenos jsou využity rámce o velikosti od 5 do 9 bitů. Jsou rozděleny jedním START bitem a jedním nebo dvěma STOP bity. Jednotlivé rámce je možné opatřit paritním bitem pro následnou kontrolu rámce.

Tato periferie přenáší parametrizační data mezi přípravkem a počítačovou aplikací.

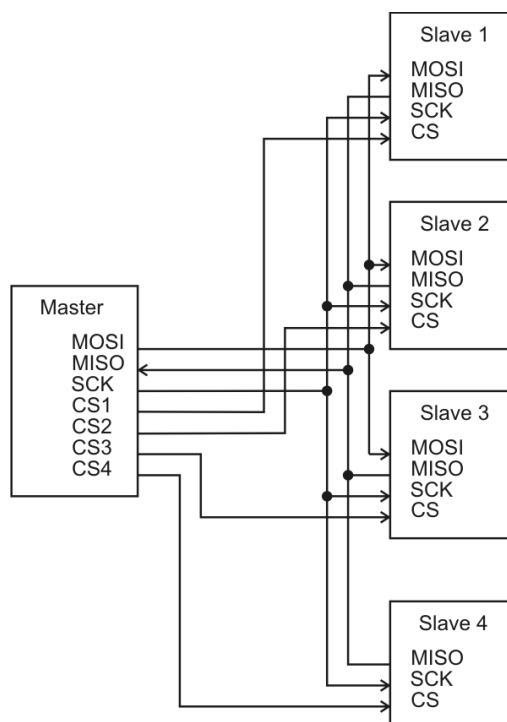


Obrázek 12 Ukázka datagramu USART [12]

4.2.4 SPI

Sériová duplexní sběrnice typu MASTER – SLAVE [13]. Je tvořena 4 signálovými vodiči. Trojice linek je sdílená všemi účastníky. Hodinový signál často označovaný jako SCK, linka přenášející data z Masteru do Slave označovaný jako MOSI a linka přenášející data ze Slave do Master označovaná jako MISO. Poslední signál určuje aktuálně vybraný Slave, který smí komunikovat s Master obvodem. Tento signál se označuje CS. Na sběrnici tedy může být teoreticky neomezeně Slave obvodů, ale komunikace probíhá vždy pouze s jedním Master obvodem zvoleným obvodem.

SPI sběrnice je v práci užívaná pro přenos dat grafiky a textu na LCD displeji, který slouží jako uživatelské rozhraní.

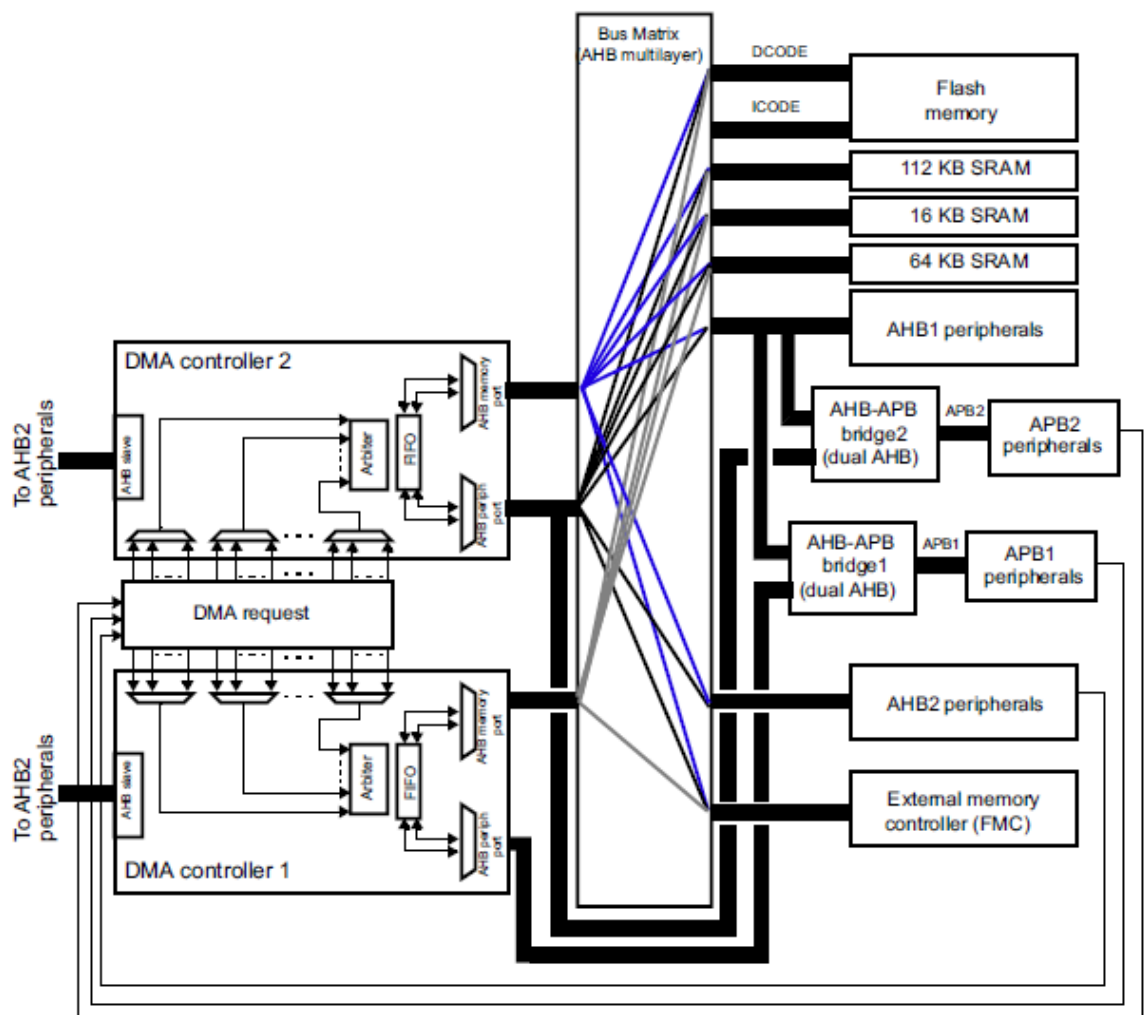


Obrázek 13 Ukázka zapojení SPI se čtyřmi SLAVE obvody[13]

4.2.5 DMA

Při DMA se o přípravu dat nestará přímo procesor ale pomocný DMA řadič, který přenes data z paměti a připraví je do registrů [10]. Odsud jsou data nadále zpracovány procesorem. Tento systém přístupu data umožňuje zpracovávat procesoru jiné instrukce, zatímco dochází k přípravě dat a to jen s minimálními vlastními zásahy. Data jsou připraveny dříve a je ušetřen čas.

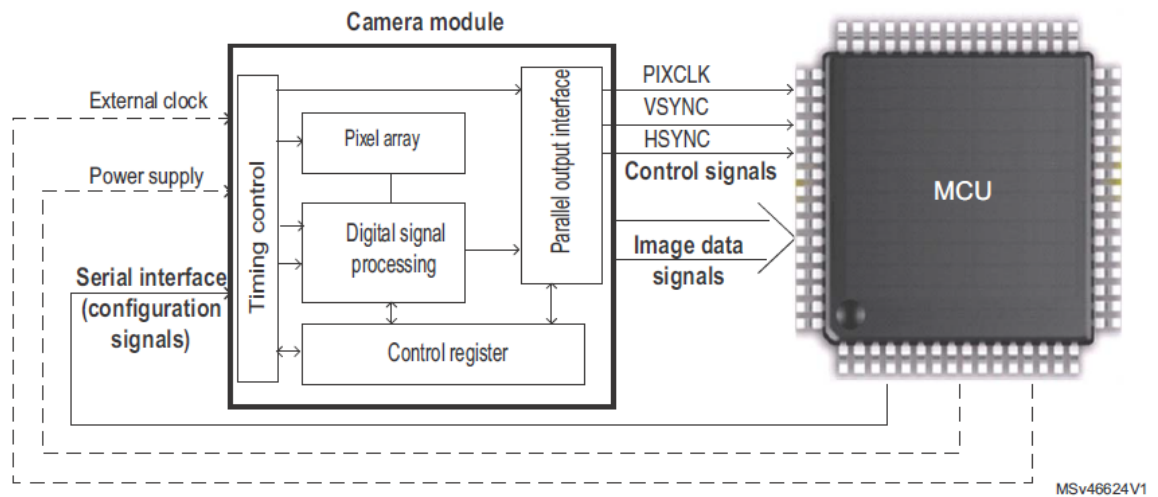
V této práci dochází k využití DMA při přesunu obrazových dat z kamery do externí paměti připojené k procesoru, skrze výše zmíněný FSMC, odeslaných skrze DCMI sběrnici.



Obrázek 14 Implementace dvou DMA kontrolérů v STM32F429 [10]

4.2.6 DCMI

Periferie určená přímo pro připojení digitálních kamer a pro přenos jejich obrazových dat [14]. Data jsou přenášena paralelně po sériové sběrnici. Lze přenášet originální nekomprimovaná data nebo komprimovaná data ve formátu JPEG.



Obrázek 15 Propojení kamerového modulu s procesorem [14]

4.2.7 Timer3

Univerzální 16bitový časovač. Pracuje zcela nezávisle na ostatních časovačích, může s nimi být v případě potřeby synchronizován [10].

V této práci je časovač použit pouze pro periodickou kontrolu stisku ovládacích tlačítek. Při dokončení čítacího cyklu dojde k přerušení programu a ověření zda jsou tlačítka stisknuta. Následně dojde k resetování čítače a návratu k hlavnímu programu.

4.3 Konverzní vývojová deska

Jelikož má řídicí modul vyvedené konektory směrem pod sebe, je přístup k nim a jeho ukotvení problematické. Z tohoto důvodu byla přidána konverzní deska Open429Z-D. Tato konverze usnadňuje přístup k vývodům modulu z vrchu a ze stran a lze ji připevnit za pomoci šroubového spojení. Dokumentaci k této desce lze nalézt v [15].



Obrázek 16 Konverzní vývojová deska [15]

4.4 Volba kamerového modulu

Jako obrazový snímač byl zvolen CMOS kamerový modul OV7670. Jedná se o velmi běžný a cenově dostupný modul vyráběný v mnoha provedeních. Opět se jedná o velmi často užívaný modul v různých projektech.

4.4.1 Vlastnosti kamerového modulu

Mezi důležité vlastnosti modulu patří:

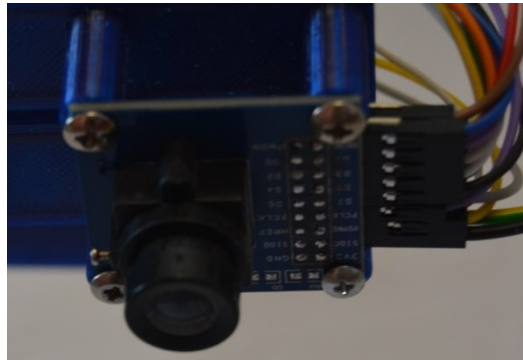
- **Obrazové formáty:** RGB565/555/444/GRB 4:2:2/Raw RGB/YUV/YCbCr 4:2:2
- **Rozlišení:** VGA/QVGA/QQVGA/CIF/QCIF/QQCIF
- **Objektiv pro zaostření obrazu**

4.4.2 Konfigurace kamerového modulu

Kamerový modul lze konfigurovat pomocí sběrnice SCCB která je kompatibilní s I2C rozhraním. Pro potřeby této práce bylo důležité následující nastavení:

- Velikost rozlišení snímku – 640x480 pixelů – délka 10 pixelů odpovídá 11,5 mm
- Výstupní obrazový formát RGB565

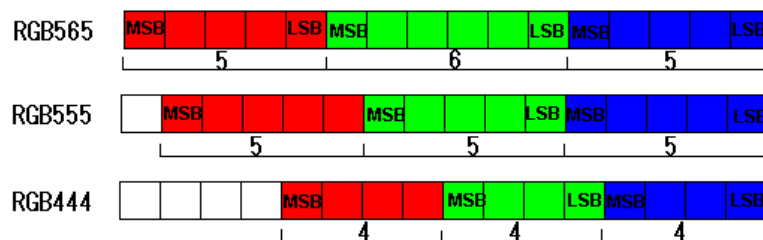
Tyto parametry jsou do kamerového modulu nahrány při inicializaci kamery prováděné při spuštění přípravku.



Obrázek 17 Fotografie kamerového modulu

4.4.3 Formát obrazových dat

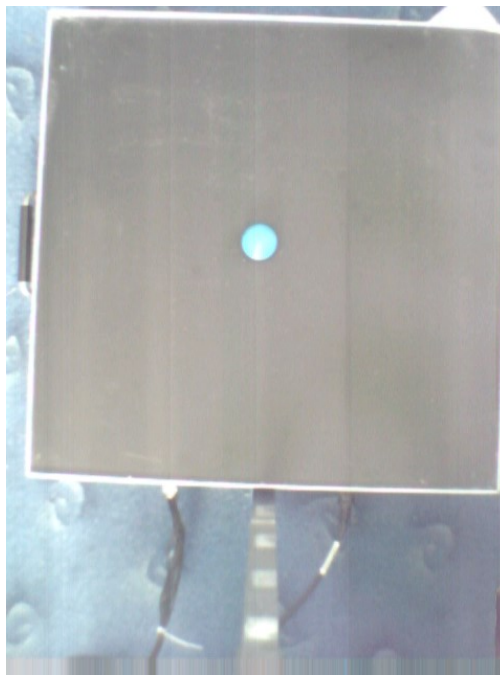
Data jsou z kamerového modulu vysílány ve formátu RGB565. Každý pixel v obraze je zastoupen 16bitovou hodnotou. V této hodnotě jsou zastoupeny 3 barevné složky – červená, zelená a modrá. Červené složce náleží 5 nejvýznamnějších bitů, následuje 6 bitů určených pro zelenou barvu a posledních 5 bitů je vyhrazeno barvě modré. Lidské oko je citlivé na zelenou barvu více než na ostatní, z tohoto důvodu je zelené barvě přidán 1 informační bit navíc.



Obrázek 18 Ukázka tří RGB formátů a jejich uspořádání v paměti [16]

5 VOLBA ALGORITMU A VÝSLEDNÉHO ŘEŠENÍ

První snahou byla identifikace kuličky pomocí barvy a její následné separování pomocí prahování. Rozlišení bylo zvoleno 640x480 pixelů. Aby bylo možné kuličku správně identifikovat i s možností chybně nasnímaného obrazu byl zvolen průměr kuličky 38mm. Kamerový modul odesílá data v barevném modelu RGB. Domníval jsem se tedy, že volba modré barvy kuličky bude značným zjednodušením pro výsledné hledání. Má představa byla, že v přijatých obrazových datech bude výrazný výskyt modré barvy dobře rozpoznatelný a že bude snadné určit přesnou minimální hodnotu prahu, která dokáže bezpečně odfiltrovat pozadí desky a ponechá jen kuličku.

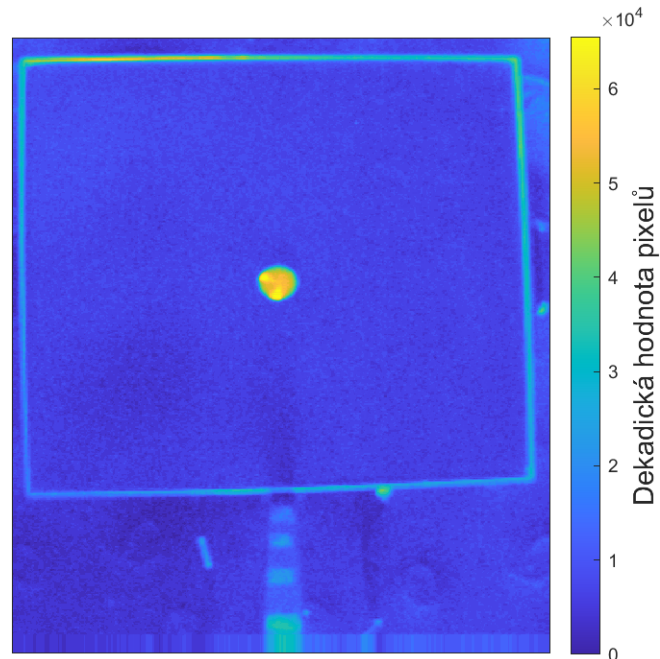


Obrázek 19 Příklad přijatého snímku

Následně bylo zjištěno, že vlivem různé intenzity dopadajícího světla se výrazně mění i interpretace barev obrazu snímaného kamerovým modulem. Z přijatých dat bylo patrné, že se barva kuličky pohybuje v příliš širokém intervalu a mezi všemi složkami RGB. Provedl jsem následně pokus i s jinými barvami – zlatá, lesklá červená a lesklá zelená. Ovšem ani pro jednu ze zmíněných barev jsem nebyl schopen naleznout prahovou hodnotu, kterou by bylo možné použít při různém okolním osvětlení.

Při analýze obrazových dat jsem zjistil, že dekadická hodnota pixelů v místě kuličky je vždy skokově vyšší než hodnota na jiných místech desky. Provádím tedy aritmetický průměr hodnot z předem určených míst na balanční desce. Jejich vzdálenost byla volena tak aby

nebylo možné detekovat kuličku na více než jednom z těchto bodů ve stejný čas. Tato hodnota je násobena hodnotou 1,8. Tím dojde ke zdvižení hodnoty prahu nad hodnotu možného šumu snímku, ne ovšem přes hodnotu kuličky.

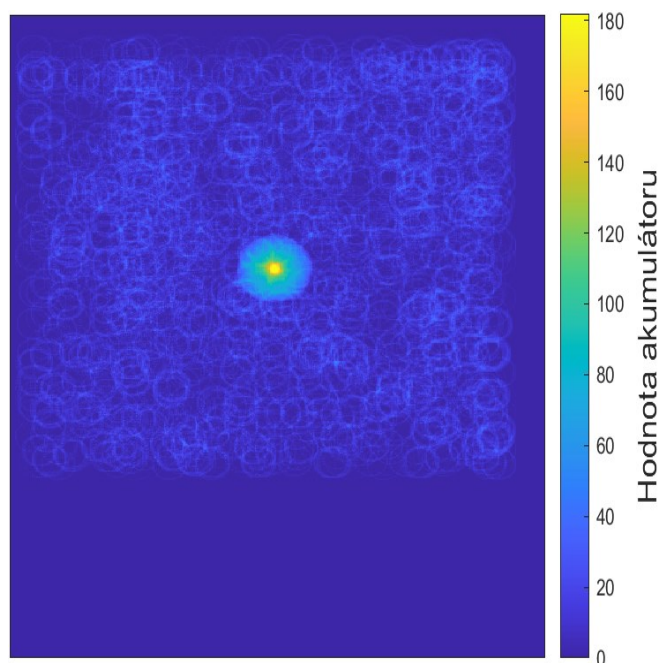


Obrázek 20 Skokový rozdíl hodnot kuličky oproti balanční desce

Tato volba umožňuje užití různé barvy kuličky, za podmínky že je zvolená barva rozdílná od barvy balanční desky.

Užitím prahování dojde ke vzniku binárního obrazu. Stále ovšem zůstává na snímku patrný stříbrný rantl balanční desky. Aby bylo jisté, že se oblast rantlu nedostane do prohledávaných dat náklonem balanční desky, bylo nutné omezit prohledávaný prostor balanční desky. I v případě že by se kulička nacházela v krajní poloze desky, díky zvolené velikosti kuličky nehrozí, že by ji nebylo v krajích balanční desky díky tomuto omezení detekovat.

Na binární obraz je užita Houghova transformace, s výše zmíněným omezení jen na oblast balanční desky. Výstupem HT je pozice kuličky v analyzovaném snímku. I v případě, že se přenesou šum do binárního obrazu, má HT velmi přesný výsledek jak je vidět na Obrázek 21. Na obrázku si lze všimnout, že výpočet jak bylo zmíněno výše, probíhá pouze na zmenšené oblasti balanční desky.



Obrázek 21 Výsledný akumulátor v případě binárního obrazu zatíženého šumem

Následně je tato pozice přepočítána vůči středu balanční desky. Aby však bylo možné s těmito souřadnicemi dále pracovat, je nutné provést rotaci souřadnicového systému o 45° , právě tehdy odpovídají osy X a Y směřům motorů, které regulují náklon balanční desky.

Takto získané souřadnice kuličky vstupují do SW řešených PID regulátorů. Ty v závislosti na regulačních konstantách, aktuální vypočtené pozice kuličky a požadované pozice kuličky určí počet kroků a směr otočení obou motorů.

Hodnoty natočení motorů jako relativní počet pulzů. Směr motoru je určen znamínkem hodnoty pulzů. V případě kladné hodnoty je deska nakláněna směrem od teleskopického ramene, při záporné hodnotě je náklon opačný.

Postupným nakláněním desky dojde k posuvu kuličky do požadované pozice.

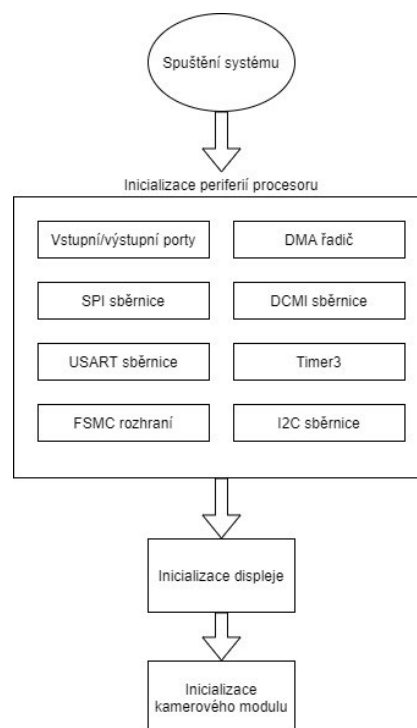
6 REALIZACE SW ŘÍZENÍ PŘÍPRAVKU

V následujících podkapitolách jsou představeny jednotlivé části programu a popis jejich funkce. Kód programu je psán v programovacím jazyce C. K sepsání bylo využito programovací prostředí Keil μ Vision 5.

6.1 Inicializace periférií

Aby bylo možné využívat jednotlivé periférie procesoru je zapotřebí nadefinovat jejich základní parametry a uvést je do funkce. Základní parametry byly definovány pomocí programu STM32CubeMX. Program má velmi intuitivní a jednoduché ovládání a s jeho pomocí lze provést základní přípravu všech periférií procesoru, včetně nastavení vývodů procesoru jako vstupní či výstupní piny. Program následně vygeneruje základní soubory projektu s inicializačními funkcemi a jejich voláním na začátku kódu.

Do inicializace FSMC kontroléru bylo nutné doplnit inicializační sekvenci pro následné operování s připojenou externí pamětí [17]. Po inicializaci periférií dochází k inicializaci LCD displeje umístěného na řídicím modulu. Jakmile je displej inicializován, je na něm zobrazován aktuální stav přípravku. Nakonec je provedena inicializace kamerového modulu. Tímto je inicializace dokončena a dojde k vykreslení obrazovky menu.



Obrázek 22 Inicializace řídicího systému

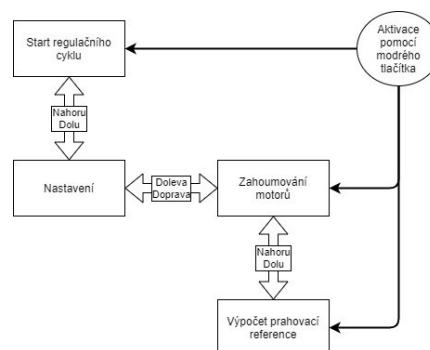
6.2 Uživatelské rozhraní

Přípravek lze ovládat pomocí joysticku umístěného na konverzní desce, potvrzovacího tlačítka a LCD displeje umístěných na řídicím modulu. Uživatelské rozhraní bylo tvořeno co nejjednodušší a přehledné. Uživatel je díky tomu dobře informován v jakém stavu se systém nachází.



Obrázek 23 Fotografie hlavní obrazovky uživatelského rozhraní

Vzhled obrazovek byl zvolen jako dvě grafická tlačítka. Aktivní tlačítko je podbarveno červenou barvou. Volbu tlačítka a pohyb mezi obrazovky lze pomocí výše zmíněného joysticku. Výběr tlačítka se provádí pohybem joysticku nahoru a dolů, doleva nebo doprava. Potvrzení uživatelské volby je provedeno po stisknutí modrého uživatelského tlačítka na řídicím modulu. Návrat do předchozí obrazovky je realizován pomocí pohybu joysticku do levé strany.



Obrázek 24 Diagram pohybu v uživatelském rozhraní

Program v procesoru běží v nekonečné smyčce. Aby nedocházelo k neustálému překreslování displeje a tím i zbytečnému zatěžování procesoru, je menu tvořeno pomocí dvou proměnných **Menu1** a **Menu1_T**. Při pohybu joysticku dojde ke změně hodnoty proměnné **Menu1_T**. Tyto proměnné jsou mezi sebou porovnávány při každém průchodu

programu. V případě že jsou rozdílné, dojde k vykreslení obrazovky dle hodnoty proměnné, na displej. Následně jsou jejich hodnoty vyrovnány. Tím je zajištěno, že při dalším průchodu programem již nedojde k dalšímu překreslení displeje.

6.3 Vyhledávání referencí

Aby bylo možné spustit přípravek do regulačního režimu, musí být provedeno zahoumování obou motorů. Motory si v této sekvenci pomocí ukazatele naleznou pozici limitních pozic čidel a vrátí se na pozici uprostřed těchto čidel. Tím je balanční deska uvedena do roviny a je zajištěno, že nedojde k natočení za limitní čidla. Následně je možné provést výpočet prahové hodnoty desky.

Tato funkce není pro spuštění systému nutná, základní prahová hodnota ovšem nemusí vyhovovat aktuálním světelným podmínkám.

6.4 Regulační smyčka

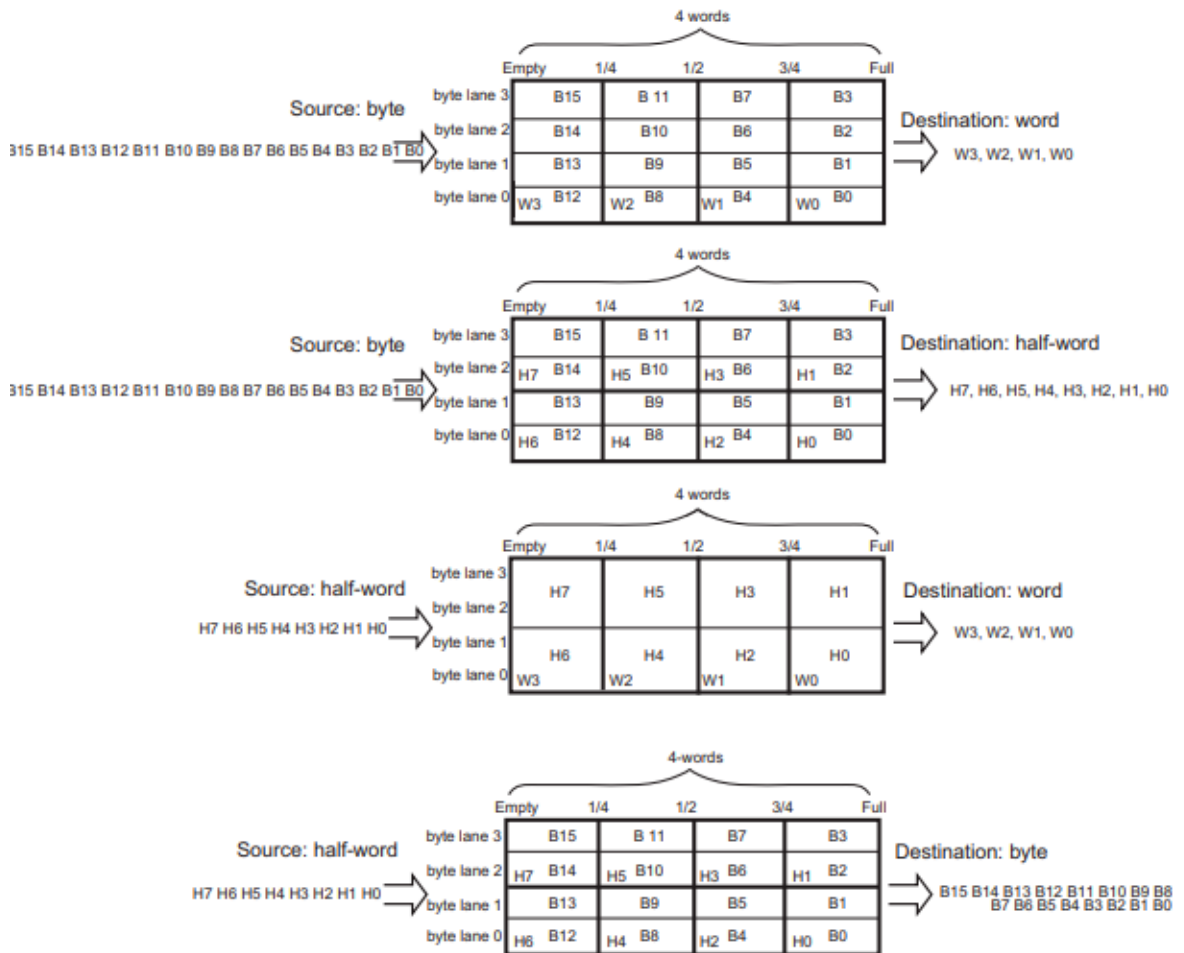
Po spuštění regulačního režimu systém, až do svého vypnutí, neustále opakuje regulační smyčku. Regulační smyčka je tvořena pomocí 2 kroků sekvence. Při regulaci je možné pomocí počítačové aplikace měnit parametry PID regulátorů a číst a měnit nastavenou požadovanou pozici kuličky. Aktuální pozice kuličky je při každé iteraci programu odeslána pomocí rozhraní USART. V dalších podkapitolách je objasněna funkce regulační smyčky i s vysvětlením některých částí zdrojového kódu.



Obrázek 25 Diagram regulační smyčky

6.4.1 Příjem dat z kamerového modulu

První část sekvence zajišťuje příjem obrazových dat. Kamerový modul vysílá data po 32bitových slovech. Tedy hodnotu 2 pixelů naráz. DMA přenos umožňuje automatické rozdělení dat pomocí interního FIFO bufferu. Tím jsou data rozdělena a každému pixelu náleží 16bitová hodnota, která přesně odpovídá obrazovému formátu RGB565. Která jsou následně uložena v externí paměti.



Obrázek 26 Struktura FIFO bufferu [10]

6.4.2 Určení pozice kuličky a její regulace

Obrazová data jsou převedena na binární obraz pomocí prahování. Zároveň je provedeno vynulování celého akumulátoru.

Následuje provedení Houghovy transformace pro každý platný bod tohoto binárního obrazu. A její výstup HT je uložen do akumulátoru.

Následně je nalezena nejvyšší hodnota akumulátoru. Adresa této hodnoty určuje pozici středu kuličky na balanční ploše. Tyto souřadnice jsou vázány na celý snímek. Proto dochází k jejich přepočítání a pootočení souřadného systému, tak aby souřadnice korespondovali se středem balanční desky a osy odpovídali úhlopříčkám balanční desky. Před dalším zpracováním jsou souřadnice odeslány pomocí USART rozhraní.

Souřadnice kuličky jsou dále předány SW řešeným PID regulátorům. V závislosti na volbě jejich parametrů dojde k výpočtu počtu kroků obou motorů. Směr rotace motorů je dán znamínkem hodnoty počtu kroků.

Poslední částí je funkce, která provede rotaci motorů. Tím dojde k náklonu desky. Pokaždé než dojde k vyslání pulzů pro natočení motoru je kontrolováno čidlo koncové polohy v daném směru. V případě vybavenosti čidla ve směru rotace je zbývající počet kroků přeskočen.

Po dokončení výše zmíněných úkonů dojde k provedení kontroly, zda má sekvence pokračovat nebo být ukončena. V případě pokračování regulačního módu dochází k dalšímu opakování regulační smyčky.

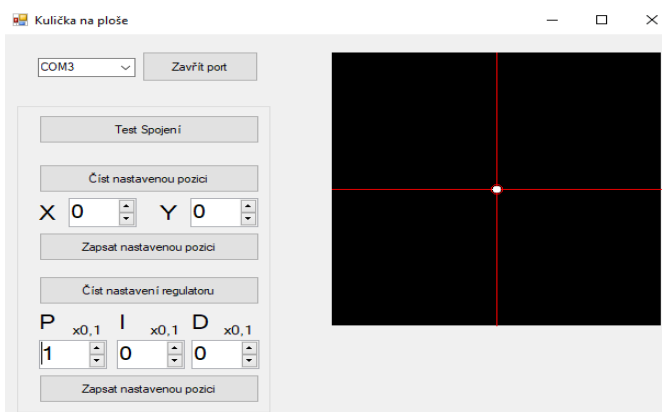
Dle zadání práce má být maximální doba regulační odchylky 200 milisekund. Při tvorbě programu byla doba regulace změřena pomocí přepnutí výstupního pinu do logické jedničky po dobu vykonávání jednoho cyklu regulační smyčky. Doba tohoto pulzu byla změřena pomocí logického analyzátoru. Je zatížena chybou doby potřebnou k přepnutí pinu z logické nuly do logické jedničky a zpět. Průměrná doba pulzu je 171 milisekund.

7 POČÍTAČOVÁ APLIKACE

Počítačová aplikace byla řešená jako samostatná a přípravek je spustitelný se základním nastavením i bez použití této aplikace. Je tím zajištěna funkce i v případě ztráty komunikace aplikace s přípravkem - například odpojením kabelu při regulačním módu přípravku. Pro kontrolu komunikace obsahuje aplikace tlačítko, jehož stiskem se provede test.

Uživatel může tlačítek vyčíst nebo změnit hodnotu PID regulátorů a požadovanou pozici kuličky. Dále je v aplikaci znázorněna aktuální pozice kuličky pomocí bílé značky a požadovaná pozice pomocí červeného terče.

V případě přijetí zprávy přípravkem dojde k vyvolání přerušování a v jeho obsluze dojde k vykonání požadovanému příkazu.



Obrázek 27 Počítačová aplikace pro parametrizaci přípravku

Aplikace komunikuje s přípravkem pomocí USART sběrnice. Komunikace probíhá pomocí předem definovaných zpráv. Délka zprávy vysílaná aplikací je vždy 8 byte a odpověď od přípravku je o délce 7 byte, v datovém typu char.

	LSB		MSB					
Zápis nastavené pozice kuličky [+20;-15]	W	P	pozice X1	pozice X2	pozice X3	Pozice Y1	Pozice Y2	pozice Y3
Čtení nastavené pozice kuličky [+20;-15]	R	P	X	X	X	X	X	X
Test Spojení	T	X	X	X	X	X	X	X
Čtení hodnot regulátoru	R	R	X	X	X	X	X	X
Zápis hodnot regulátoru	W	R	Kp1	Kp2	Ki1	Ki2	Kd1	Kd2

	LSB	MSB					
Odpověď pozice kuličky	P	pozice X1	pozice X2	pozice X3	Pozice Y1	Pozice Y2	pozice Y3
Odpověď na test spojení	T	T	T	T	T	T	T
Odpověď hodnoty regulátoru	R	Kp1	Kp2	Ki1	Ki2	Kd1	Kd2
Odpověď požadovaná pozice kuličky	C	pozice X1	pozice X2	pozice X3	Pozice Y1	Pozice Y2	pozice Y3

Obrázek 28 Přehled zpráv určených pro komunikaci počítačové aplikace s přípravkem

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout SW řízení přípravku Kulička na ploše. Přípravek byl dodán v hotovém stavu bez výpočetních HW částí. Zvolil jsem řídicí a kamerový modul a doplnil přípravek nutnou elektroinstalací pro připojení těchto modulů. Součástí práce bylo také vytvoření počítačové aplikace pro parametrizaci přípravku. V teoretické části této práce, jsou popsány různé metody digitálního zpracování obrazu a metody užívané pro detekci objektů.

Praktická část práce se věnuje popisu vybraných modulů a jejich parametrům, postupu volby výsledného algoritmu a jeho programovému zpracování. A popisu počítačové aplikace.

Výsledný algoritmus práce dokáže pracovat s různými barvami kuliček. S lesklými barvami kuliček dosahuje algoritmus lepších výsledků, funguje ovšem i s matnými barvami. Maximální doba regulační smyčky byla určena zadáním na 200 milisekund. Naměřená doba regulační smyčky je průměrně 171 milisekund. Tato hodnota velmi překonala můj osobní odhad, který byl okolo 30 milisekund. Regulace tedy není zcela hladká. V případě snížení rozlišení by došlo menšímu objemu zpracovávaných dat a regulace by byla plynulejší.

Práci lze dále rozšířit přidáním trajektorie, po které by kulička měla jezdit. Program mikroprocesoru je koncipován tak aby bylo možné jej do budoucna dále upravovat. Pro toto rozšíření při zachování algoritmus HT a rozlišení 640x480 pixelů by bylo vhodnější osadit přípravek řídicím modulem s výkonnějším typem procesoru.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] DOBEŠ, Michal. *Zpracování obrazu a algoritmy v C#*. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-233-6.
- [2] KELLER, Petr. *Bezkontaktní měření rozměrů zpracováním digitálního obrazu*. Liberec, 2003. Doktorská práce. Technická Univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Vedoucí práce Pokorný Přemysl.
- [3] ŠILAR, Zdeněk. *Metody obrazové detekce obsazenosti železničního přejezdu*. Pardubice, 2013. Disertační práce. Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Dobrovolný Martin.
- [4] VŠETIČKA, Václav. *Digitální filtry pro obrazová data*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce Číka Petr.
- [5] HSV. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 7.8.2019 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/HSVSTM32F429IDISCOVERY>. *STMicroelectronics* [online]. c2020 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/32f429idiscovery.html>
- [6] Základy teorie ON/OFF a PID regulace. *Dixell: Elektronické měřicí a regulační přístroje* [online]. Praha: Logitron, c1999-2020 [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.dixell.cz/teorie-regulace/>
- [7] PID regulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/PID_regul%C3%A1tor
- [8] 32F429IDISCOVERY. *STMicroelectronics* [online]. c2020 [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/32f429idiscovery.html>
- [9] STM32F429ZI. *STMicroelectronics* [online]. c2020 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-high-performance-mcus/stm32f4-series/stm32f429-439/stm32f429zi.html

- [10] *Reference manual: STM32F405/415, STM32F407/417, STM32F427/437 and STM32F429/439 advanced Arm®-based 32-bit MCUs* [online]. Revize 18. 2019 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00031020-stm32f405-415-stm32f407-417-stm32f427-437-and-stm32f429-439-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [11] BASICS OF THE I2C COMMUNICATION PROTOCOL. *Circuit Basics* [online]. [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>
- [12] UART (USART) – komunikujte sériově po dvou vodičích. ZAVAVOV [online]. c2020, 23.4.2014 [cit. 2020-07-22]. Dostupné z: <http://www.zavavov.cz/cz/elektrotechnika/komunikacni-sbernice/67-uart-usart-komunikujte-seriove-po-dvou-vodicich/>
- [13] DUDKA, Michal. SPI Rozhraní. *Tajned* [online]. c2016-2020, 2. prosince 2016 [cit. 2020-07-25]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2016/12/spi-rozhrani/>
- [14] *Application note: Digital camera interface (DCMI) for STM32 MCUs* [online]. 2017 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00373474-digital-camera-interface-dcmi-on-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf
- [15] Open429Z-D. *Waveshare: Wiki* [online]. 21 March 2017 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://www.waveshare.com/wiki/Open429Z-D>
- [16] JESPERSEN, Thomas. Color object tracking with STM32 + OV7725. *TKJ Electronics* [online]. c2009 - 2019, 27 January 2014 [cit. 2020-07-26]. Dostupné z: <http://blog.tkjelectronics.dk/2014/01/color-object-tracking-with-stm32-ov7725/>
- [17] MAJERLE, Tilen. Library 14: Working with SDRAM on STM32F429 Discovery. *STM32F4 Discovery: Libraries and tutorials for STM32F4 series MCUs by Tilen Majerle* [online]. [2014], 18 May 2014 [cit. 2020-08-04]. Dostupné z: <https://stm32f4-discovery.net/2014/05/library-14-working-with-sdram-on-stm32f429-discovery/>