VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

ROBOTICKÝ STOLNÍ FOTBAL DETEKCE POLOHY PROTIHRÁČE

ROBOTICS TABLE FOOTBALL – POSITION DETECTION OF OPPONENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE Radek Otradovský
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. et Ing. Stanislav Lang
SUPERVISOR

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	**Radek Otradovský**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. et Ing. Stanislav Lang**
Akademický rok:	2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Robotický stolní fotbal - detekce polohy protihráče

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce bude zahrnovat rešerši problematiky realizace robotického stolního fotbalu. Předmětem práce bude návrh řešení snímání polohy herních os protihráče. Následovat bude implementace a ověření navrženého řešení.
Práce bude realizována ve spolupráci s firmou B+R Automatizace s r.o., která poskytne pro realizaci technické prostředky.

Cíle bakalářské práce:

- Proveďte stručnou rešerši v oblasti robotického stolního fotbalu.
- Seznamte se s produkty společnosti B&R Automation.
- Diskutujte možná řešení snímání poloh herních os protihráče.
- Vyberte vhodné řešení a proveďte jeho realizaci.
- Ověřte funkčnost vytvořeného řešení.

Seznam doporučené literatury:

MAREČEK, P. Robotický stolní fotbal. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. et Ing. Stanislav Lang.

JEDINÝ, L. Robotický stolní fotbal. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 88s. Vedoucí diplomové práce Ing. et Ing. Stanislav Lang.

MAŇAS, M. Teorie her a její aplikace, SNTL, Praha, 1991

B&R Automation, http://www.br-automation.com/cs/

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Předmětem této bakalářské práce je návrh snímacího zařízení k detekci polohy čtyř nezávislých os protihráče automatu robotického stolního fotbalu a programový výstup aplikovatelný pro program herní strategie. V úvodu je srovnání dosud vyvinutých řešení. Dále je provedeno srovnání a výběr vhodných snímačů aplikovatelných na danou konstrukci stolu. Pro konkrétní řešení je pak vybrán vhodný modul k integraci do řídícího systému a následuje testování funkčnosti celého systému. Implementační část zahrnuje návrh konstrukce pro detekci a zároveň další nutné změny v konstrukci stroje k uvedení do provozu.

ABSTRACT

The aim of this thesis is design of the sensing device to detect the positions of the four independent human axes robotic table soccer and create an output program applicable to game strategy. In the introduction is comparison of previously developed solutions. Next part is the comparison and selection of appropriate sensors applicable to the design table. For specific solutions then select a suitable module for integration into the control system and then test the functionality of the system. Implementation part of the proposal includes the design of construction for detection and next includes all necessary upgrades in the construction of the machine ware to commissioning.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotický stolní fotbal (dále jen RSF), B&R Automatizace, optický snímač, reflexní snímač.

KEYWORDS

Robotics table soccer, B&R Automation, optical sensor, reflex sensor.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OTRADOVSKÝ, R. *Robotický stolní fotbal - detekce polohy protihráče.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 56 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. et Ing. Stanislav Lang.

PODĚKOVÁNÍ

Za vznik této práce chci poděkovat Romanu Parákovi a Lubomíru Bubeníkovi, za spolupráci na robotickém stolním fotbalu. Dále panu Ing. L. Novotnému za odbornou pomoc s novými konstrukčními prvky při úpravách designu a Ing. Romanu Mužíkovi za odborné rady. Zejména chci poděkovat Barboře Maťátkové za nepřímou, avšak nezbytně nutnou pomoc k dokončení práce.

Dále chci poděkovat mému vedoucímu práce Ing. et Ing. Stanislavu Langovi při korekci a úpravách písemného provedení práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. et Ing. Stanislava Langa a s použitím literatury uvedené v seznamu literatury.

V Brně dne 24. 5. 2017 ……

Radek Otradovský

OBSAH

1 ÚVOD 15

2 MOTIVACE A SOUČASNÝ STAV 17

3 VYVINUTÁ ŘEŠENÍ 18

3.1 Chronologický přehled 18
3.1.1 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg 19
3.1.2 The Georgia Institute of Technology 20
3.1.3 The University of Akron, Polytechnická Univerzita v Ohio 21
3.1.4 The Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne in Switzerland 22
3.1.5 Katedra řídící techniky, Fakulta Elektrotechnická na ČVUT v Praze 22
3.1.6 Automatický stolní fotbal od společnosti Pilz GmbH & Co. KG 23
3.2 Srovnání existujících řešení 23

4 SPOLEČNOST B&R 24

4.1 Použité komponenty a jejich charakteristika 24
4.2 Programovací prostředí Automation Studio 27

5 VÝBĚR VLASTNÍHO ŘEŠENÍ 28

5.1 Diskuze možných řešení detekce 28
5.2 Stanovení maximální přípustné odchylky 30
5.3 Testování a výběr snímačů 31

6 REALIZACE 35

6.1 Výpočet aktuální polohy 35
6.2 Popis funkce systému 39
6.3 Konstrukční provedení 40
6.4 Testování funkčnosti a přesnosti programu 42

7 ZÁVĚR 47

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 49

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ 51

10 SEZNAM PŘÍLOH 53

10.1 Příloha 1 – Schéma detekce polohy os 54
10.2 Příloha 2 – Detekce polohy figurek 55
10.3 Příloha 3 – Detekce natočení os 56

1 ÚVOD

Idea moderní společnosti je dle mého názoru:

„Více volného času pro lidstvo při stálé, popř. rostoucí produkci díky využití lidského potenciálu, nikoliv fyzické energie“.

Idea je to poněkud optimistická, je však je realizovatelná alespoň z poloviny. K tomu je zapotřebí zaměření se na průmyslovou automatizaci ve výrobě. Automatizace výroby vede vědce, vývojáře a konstruktéry ke stálému posouvání hranic ve vývoji centrálně řízených robotických výrobních komplexů. Vývoj se také zaměřuje na kooperaci robotů s lidmi díky propracovaným bezpečnostním systémům. Hranice určující pokrok ve světě industrializace a automatizace nám neustále dokazují, že téměř jakákoliv „Verneovská idea“ může být realizována, pokud má alespoň dostatečný kapitál ke své realizaci.

Existuje mnoho společností v oboru průmyslové automatizace, které své “Know How” dokazují světu svými netradičními a ojedinělými návrhy. Ty mají vzbudit patřičný dojem a zvýšit tak prestiž společnosti na trhu. Jedním takovým příkladem je i rakouská společnost B&R Automatizace, která ve spolupráci se studenty z technických fakult z VUT v Brně vytvořila exemplář robotického stolního fotbalu (dále jen RSF), který má dokázat pokrok především v dynamice řízení a v rychlosti odezvy systému na různorodé situace.

Realizace tohoto projektu proběhla již v roce 2015/16 díky konstrukčnímu návrhu od Ing. Petra Marečka a programu herní strategie od Ing. Lukáše Jediného. Bohužel realizace nebyla dokončena do provozního stavu, proto se projekt v roce 2016/17 znovu otevřel.

Zaměření bakalářské práce je primárně na detekci polohy figurek protihráče v reálném čase. Cílem je vylepšení herní strategie, především pro ofenzivní účely.

V první části práce je představení dosud existujících řešení RSF. Jednotlivé projekty jsou představeny chronologicky, podle svého vývoje a technického zpracování. V práci popisuji principy funkce daných řídících systémů se zaměřením na detekci polohy figurek protihráče. Závěrem srovnávám použité způsoby detekce polohy pro případnou inspiraci k vlastnímu řešení.

Následuje představení společnosti B&R Automatizace a produkty jejího portfolia, které jsou součástí RSF.

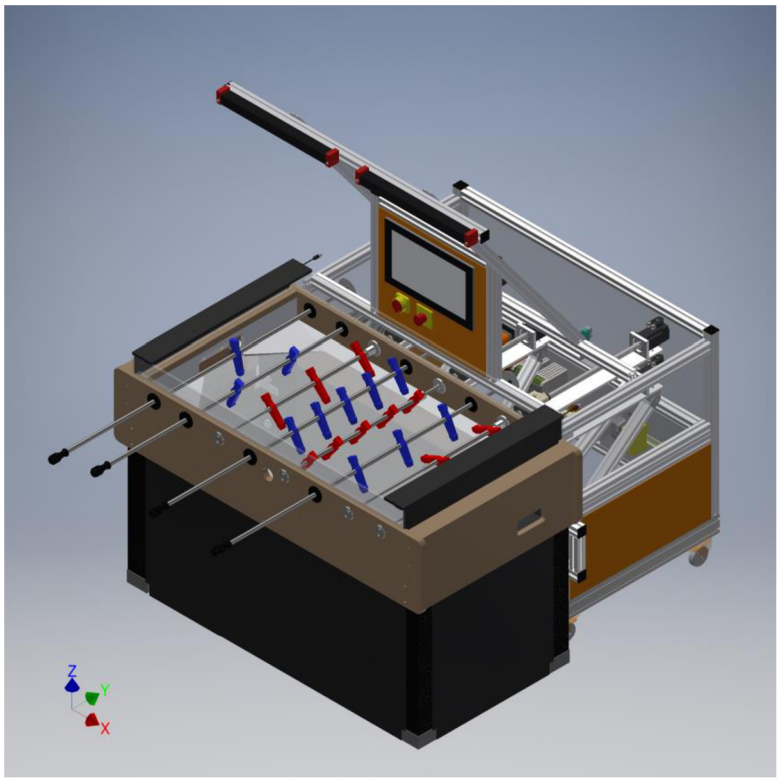
V další kapitole je výběr vlastního řešení detekce polohy. Výběr provádím z použitelného spektra vhodných řešení s popisem funkce detekce. Podle zadaných kritérií provádím výběr vhodných snímačů k testování funkčnosti, přesnosti a rychlosti odezvy. Závěrem vybírám konkrétní řešení pro vlastní realizaci.

Poslední kapitola je zaměřená na realizaci vlastního řešení. Zde popisuji funkci programu, způsob uchycení, hodnocení funkčnosti a spolehlivost systému.

2 MOTIVACE A SOUČASNÝ STAV

Zadané téma vystihuje ohromný potenciál v průmyslové automatizace a její využití v praxi. Vzhledem k zaměření mé budoucí kariéry jsem si zvolil dané téma. Vystihuje totiž jak vývoj stroje, jeho automatizaci, tak jeho zavedení do provozu.

Současný stav Robotického stolního fotbalu (dále jen RSF) z VUT v Brně, ve spolupráci s B&R Automatizace, je výstižně znázorněn na obrázku č. 1.



Obrázek 1 – Robotický stolní fotbal [1]

Cílem hry robotického stolního fotbalu je dostat balónek do soupeřovi branky pomocí plastových figurek umístěných na rotačně posuvných tyčích. Tyče protihráčů mají madla k jejich ovládání, na druhou stranu automat ovládá pohyby servomotory a lineárními motory, řízenými řídícím systémem. Ve hře proti sobě stojí dva hráči a robotický automat. Vítězem je ten, kdo jako první dostane deset balónků do soupeřovi branky.

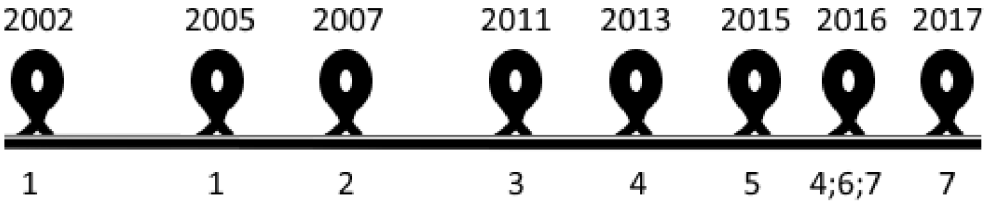
Herní strategie automatu je řízena řídícím systémem a díky výkonným parametrům průmyslového PC je zajištěna rychlá dynamika systému pro časové náročné operace přesného polohování. Detekci polohy balónku a zpracování obrazu umožňuje inteligentní, monochromatická kamera od firmy Cognex, komunikující přes datový protokol POWERLINK. Bezpečnost při manipulaci v herním poli zajišťují světelné závory od firmy Datalogic, umístěné v ochranném krytu z tvrzeného plexiskla. Přídavná konstrukce je manipulovatelná a odnímatelná, spojená se stolem šroubovými spoji. Tím je zajištěná nahraditelnost celého stolního fotbalu v případě poškození [1].

3 VYVINUTÁ ŘEŠENÍ

Kapitola poukazuje na již existující řešení Robotického stolního fotbalu (dále jen RSF). Popisuji zde funkci systémů a způsob detekce polohy protihráče, pokud je zde vyřešen. Projekty jsou řazeny chronologicky v následujících podkapitolách. V závěrečné podkapitole je srovnání existujích řešení, dále hodnocení positiv a negativ.

3.1 Chronologický přehled

Na časové ose (viz obrázek 2) jsou chronologicky řazena existující řešení, která jsou podrobněji představena v následujících podkapitolách.



Obrázek 2 – Časová osa vyvinutých řešení

1. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg a jeho komerční úprava od firmy Gauselman AG (3.1.1)
2. The Georgia Institute of Technology (3.1.2)
3. The University of Akron, Polytechnická Univerzita v Ohio (3.1.3)
4. The Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland (3.1.4)
5. Katedra řídící techniky, Fakulta Elektrotechnická na ČVUT v Praze (3.1.5)
6. Automatický stolní fotbal od společnosti Pilz GmbH & Co. KG (3.1.6)
7. Ústav automatizace a informatiky, Fakulta strojního inženýrství na VUT v Brně (3.1.7)

3.1.1 Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Jedno z prvních řešení RSF bylo vyvinuto v roce 2002 za účelem výzkumu umělé inteligence a robotiky. Hlavní princip herní strategie je založen na snímání obrazu herní plochy vysokofrekvenční kamerou, která je umístěna nad herní plochou a snímá jak polohu balónku, tak i polohu a natočení hráčů. Kompletní funkční cyklus trvá 20 [ms] (milisekund). Zahrnuje zpracování dat obrazu a reakci systému. Jelikož je kamera umístěna nad herním polem, může docházet ke stínění balónku figurkou hráče, popř. herní tyčí. Tento problém je vyřešen programově, kdy nejbližší poslední známá poloha balónku je přiřazena nejbližšímu hráči, tzv. „*Vlastník balónku*“. V takovém případě dochází k zarovnání hráčů ve směru hry do stejné polohy. Při neznámé poloze míčku se všechny figurky hráčů ustaví do základní polohy.
Samotná detekce polohy protihráče výpočtem z obrazu kamery má dle mého názoru své nevýhody. První nevýhoda je vytíženost kamery. Kvůli velkému množství dat z kamery zpracovávaných v systému v reálném čase se snižuje rychlost zpracování obrazů a zároveň i rychlost odezvy řídícího systému. Druhou nevýhodou je pohled kamery shora. Monochromatická kamera nerozezná orientaci natočení hráče, jestli směřuje dolů, nebo nahoru. Jelikož osa natočení figurek hráče má dvě polohy, jednu ve druhém a druhou ve třetím kvadrantu, popř. v prvním a ve čtvrtém kvadrantu. Řídící systém tedy musí předpokládat, že daná poloha figurky vždy směřuje dolů a brání tak průchodu balónku, i když ve skutečnosti může směřovat nahoru a průchodu nebrání. [2].

Translační pohyb jednotlivých os je uskutečňován díky servomotorům a řemenovým lineárním motorům, kde translaci zajišťuje řemen spojující oba konce jedné osy s lineárním motorem pod herní deskou. Uložení servomotoru je pevně spojeno s jedním koncem herní osy a posouvá se spolu s osou. Rotaci zajišťuje servomotor, který řemenovým převodem roztáčí ozubené kolo spojené s herní osou. Přídavná ocelová konstrukce je pevně přišroubovaná k hernímu stolu. [1]

V roce 2005 byl tento mechanismus přepracován a designově upraven firmou Gauselman AG do komerční podoby (viz obrázek 3), kde je zajištěna i bezpečnost při manipulaci v herním poli. Cena prototypu se pohybuje kolem 600 000 Kč. [2]

Obrázek 3 - Komerční podoba od firmy Gauselman AG [2]

3.1.2 The Georgia Institute of Technology

Na řešení RSF vyvinuté v Technologickém institutu ve státě Georgia v roce 2007 měli studenti velmi malý rozpočet, konkrétně uvedli 500 USD a starý počítač. Jednalo se o čtyřčlennou skupinu studentů z elektrotechnické a informatické fakulty. Jak autoři uvádějí, nedostatky jejich řešení spočívaly nejen v nízkém rozpočtu, ale také v nedostatečné konstrukci celého mechanismu. Převáděný torzní moment ze servomotoru na osu hráčů nemá konkurence schopnou razanci, servomotory mají rozsah rotace pouhých 90°, systém neobsahuje žádné bezpečnostní prvky a nerozebíratelnost celého mechanismu neumožňuje jeho snadný transport. Dalším nedostatkem je neautonomnost řídícího systému. Ve spojení s operačním systémem Windows se rychlost snímání kamery zpožďuje a má tak přímý vliv na rychlost odezvy celého systému. Výsledek je patrný na obrázku 4. [3]

Obrázek 4 - Řešení Technologického institutu v Georgii [3]

Řešení detekce balónku pracuje na principu snímání kamerou. Byla zde použita web-kamera s parametry rozlišení 1,3 [Mpx] (Megapixel) a reálnou rychlostí snímání 15 [FPS] (Frames per second), spojená datovým kabelem přes USB (Universal Serial Bus) s počítačem. Počítač posílá příkazy přes sériovou linku do PIC (Programmable Interface Controler). [3]

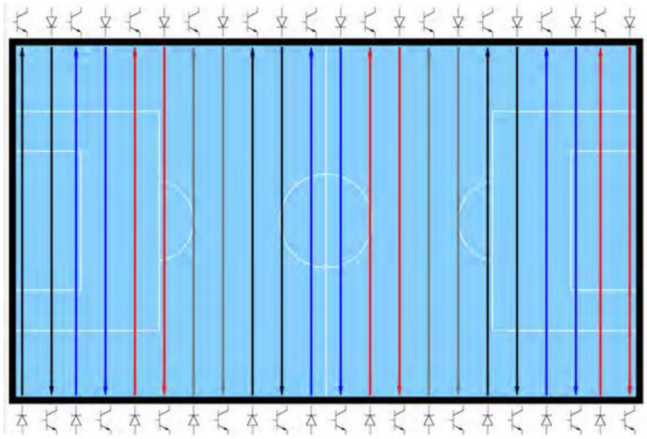
Pohony zajišťují servomotory, kde jeden zajišťuje rotaci a druhý posuv všech čtyř os. Posuv je realizován hřebenem a ozubeným kolem. Detekce protihráče zde není vyřešena, herní strategie je založena na prediktivním algoritmu určení přibližné polohy balónku po odrazu. [3]

3.1.3 The University of Akron, Polytechnická Univerzita v Ohio

Řešení vyvinuté na Univerzitě města Akron ve státě Ohio je unikátní v detekci polohy balónku. Doposud jediné řešení, které pro detekci nepoužívá kameru, ale uspořádané páry LED diod s fototranzistory. Diody vyzařující infračervené světlo (IR LED).

Diody s fototranzistory jsou rozloženy ve vodorovném směru v počtu 117 párů a v příčném směru v počtu 68 párů (viz obrázek 5). Při přerušení paprsku diody dojde k poklesu výstupního proudu ve fototranzistoru. Pomocí komparátoru je výstup z fototranzistorů digitalizován a posílán do mikroprocesoru.

Polohu balónku a detekci vstřelených gólů určují změny proudů fotorezistorů jak v příčném, tak ve vodorovném směru. Výhodou tohoto řešení je rychlá odezva systému. Nevýhodou naopak je možnost ovlivňování fotorezistorů sousedícími diodami. Jako opatření proti tomuto nežádoucímu jevu autoři zahloubili diody do bočních stěn stolu ve vzdálenosti 32 [cm] (centimetrů) od sebe. [4]



Obrázek 5 – Řešení párových dvojic IR LED a fototranzistorů [4]

Pohyby os zajišťují lineární pohony pro posuv a krokové motory pro rotaci. Detekce polohy figurek protihráče zde není aplikována. Herní strategie je založena na poloze balónku a má dvě hlavní rozdělení. Obrana a útok, kde obrana je rozdělena do dvou fází podle toho, kdo balónek ovládá. Jde o jednoduchou a aktivní obranu. [4]

3.1.4 The Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne in Switzerland

Řešení RSF studentů a pedagogů z Lausane ve Švýcarsku lze rozdělit na dva prototypy. První provedení RSF zhotovila v roce 2013 dvojice Martin Savary a Cyril Picard s velmi dynamickým pohybem os. První servomotor je umístěn kolmo k posuvné ose, řemenem je spojený s ozubeným kolem a takto jsou pevně spojené k přídavné konstrukci. Pevně k řemeni je připojen posuvný suport, na kterém je umístěný druhý servomotor, který i při unášivém posuvu suportu otáčí příslušnou osou automatu. Řemen se otáčí pouze v daných mezích v obou směrech, zato velmi precizně a rychle. Detekce polohy balónku je zajištěna kamerou umístěnou zespodu stolu. Detekce polohy figurek protihráče v tomto prototypu není vyřešena. [5]

Na druhém řešení RSF se podílela dvojice student Léo Sibut a Dr. Christophe Salzmann v roce 2016. Došlo k obměně celého systému. Herní strategie byla doplněna o polohu figurek protihráče. Jako první přišli s řešením detekce pomocí laserových snímačů. Princip detekce polohy herní osy spočívá v detekci dvou vzdáleností. Na koncích všech čtyř os protihráčů jsou umístěny přídavné plastové násady ve tvaru šneku se značným stoupáním. Čelo násady je zarovnané do roviny a snímáno prvním laserovým snímačem. V případě rotace se detekovaná vzdálenost nemění. Naopak vlivem rotace se vzdálenost mezi snímačem a šnekem, měřená druhým snímačem, mění. Rozdíl těchto vzdáleností určuje úhel natočení, který lze přepočítat z výšky stoupání šneku. Tato metoda je velice efektivní a precizní, ale na druhou stranu je velice nákladná. Posuv je realizován lineárním pohonem na pevné vodicí tyči a rotace je realizována pomocí pevně uchyceného servomotoru na konci osy. [6]

3.1.5 Katedra řídící techniky, Fakulta Elektrotechnická na ČVUT v Praze

Řešení, s nímž přišel v roce 2015 Vojtěch Myslivec z ČVUT v Praze, se nijak zvlášť neliší od předchozích návrhů. Jeho inovací je umístění kamery nad herní plochou stolu. Ve svém projektu porovnává funkčnost dvou kamer, jedné se snímkovací frekvencí (dále jen S.F.) 60 [FPS] a rozlišením 1280x1024 [px] a druhé se S.F. 98 [FPS] a rozlišením 320x240 [px]. Autor zjistil, že může snížit čas zpracování obrazu z cca 25,5 [ms] na cca 13 [ms] snížením rozlišení kamery. Zvýšení kontrastu mezi balónkem a herní plochou docílil nasvícením herní plochy LED diodami, přebarvením mantinelů hřiště na bílou barvu a balónku na černou barvu.

Pohyby zajišťují servomotory pevně uchycené ke konstrukci stolu, otáčející kuličkovými šrouby. Rotaci osy zajišťuje druhý servomotor, otáčející osou napnutým řemenovým převodem. Detekce polohy protihráčových figurek zde není řešena. [7]

3.1.6 Automatický stolní fotbal od společnosti Pilz GmbH & Co. KG

Řešení RSF od firmy Pilz je profesionálně zpracované po stránce funkčnosti systému, bezpečnosti a designu celého komplexu. Jako jedno z prvních řešení obsahuje bezpečnostní prvky jako je bezpečnostní světelná závora, nebo tlačítka centrálního vypnutí. U dalších prvků jako jsou pohony a detekce balónku je použito jedno z výše uvedených řešení. Detekce polohy figurek protihráče zde není řešena. Kamera umístěná zespodu stolu detekuje polohu balónku. Pohyb osy automatu zajišťují dva servomotory. První servomotor otáčí kuličkovým šroubem a tím posouvá vodicí tyč pevně spojenou herní osou a druhý servomotor otáčí řemenovým převodem s osou a zajišťuje tak rotaci osy. [8]

Obrázek 6 – Řešení firmy Pilz [9]

3.2 Srovnání existujících řešení

Se zaměřením na detekci polohy figurek protihráče z výše uvedených řešení jsou možnosti detekce buď laserovým odměřováním, nebo detekcí z kamery. V uvedených řešeních se konstruktéři příliš nezabývali detekcí polohy figurek protihráče, ale pouze balónku.

Metoda laserovým odměřování je i přes své precizní výsledky příliš nákladná a metoda odměřováním polohy hráčů z kamery zase snižuje rychlost zpracování snímků obrazu, což je pro účely rychlé a dynamické odezvy celého systému nepřípustné. Pro vhodné řešení detekce polohy musím nejprve analyzovat dostupné možnosti senzoriky na trhu a na základě jejich testování z nich vybrat optimální možnost pro vlastní řešení.

4 SPOLEČNOST B&R

Společnost B&R Automation založili v roce 1979 Erwin Bernecker a Josef Rainer se sídlem v rakouském městě Eggelsberg. Celým názvem se firma jmenovala: *„Bernecker + Rainer Industrie Elektronik Ges.m.b.H. (B&R).“* [10]

Firma se zaměřuje na aplikaci řídících systémů podle potřeb zákazníka, dále vyrábí komponenty pro řízený pohyb a funkci celého systému. Výroba komponent a rovněž školení nových pracovníků probíhá převážně v Rakousku. Na český trh se firma dostala v roce 1997 jako B+R Automatizace s první pobočkou v Brně. [10]

Od dubna 2017 je firma B&R Automation součástí skupiny ABB Group. [10]

Obrázek 7 – Produkty firmy B&R [11]

4.1 Použité komponenty a jejich charakteristika

Komponenty od společnosti B&R Automation, které jsou použity v daném řešení RSF, charakterizují podstatnou část portfolia firmy. Přes řídící PLC, obrazový výstup, komunikační moduly, servozesilovače a motory, dále zdroje a bezpečnostní prvky. Jednotlivé komponenty jsou popsány z hlediska parametrů a funkce v této kapitole.

Řídící systém RSF je integrován v průmyslovém, kompaktním, výkonném počítači Automation PC 2100, který obsahuje všechna potřebná rozhraní jako jsou USB 2.0, USB 3.0, dvě rozhraní pro Gigabit Ethernet a rozhraní pro přídavné moduly. Jedním z použitých modulů je i PC modul typu *5ACCIF01.FPSC-000*, který obsahuje 4 jádrový procesor Intel Atom s označením *5PPC2100_BY44_000*. Frekvence jádra je taktovaná na 1910 [MHz], použitá operační paměť typu *DDR3 SDRAM* má velikost 4 [GB]. Modul komunikuje přes datový protokol POWERLINK. Počítačový modul je spojený se zobrazovacím, automatickým panelem *Automation Panel 5AP933.156B*, který používá grafickou kartu Intel HD. [12]

Panel obsahuje dotykovou LED obrazovkou o velikosti 15.6" s HD rozlišením o velikosti 1366x768 [px] (16:9) a je rozšířen o Multi-touch technologii, která reaguje na více dotyků při ovládání. Panel je znázorněn na obrázku 8. [12]

Další použité komponenty jsou moduly, které zajišťují komunikaci přídavného hardwaru s řídícím systémem. Jsou to jednotlivé dílčí plátky (*Slice*), které se zasouvají do sebe (obrázek 9). Moduly jsou kategorizovány do tříd podle technologie, kterou využívají. Výrobce tím garantuje maximální variabilitu a seskupení podle potřeb koncových zákazníků. První třídou jsou moduly X20 (Obr. 8), které standardně komunikují přes protokol RS232, Ethernet, USB, nebo POWERLINK pro komunikaci v reálném čase. Koncepce komunikace umožňuje připojení až 250 plátků vstupních, nebo výstupních modulů, tj. až 3000 komunikačních kanálů řízených jedním procesorem. V našem případě je použito pět modulů, z toho dva moduly analogových vstupů, dva moduly digitálních vstupů a jeden modul digitálních výstupů. [14]

Další třídou jsou I/O moduly. Z hlediska funkce jsou obdobné s předchozími X20 moduly, nicméně jsou koncipovány pro sběr dat přímo u stroje. Takový typ modulu sice není použit v RSF, nicméně je vhodné se o něm zmínit. Jeden modul nahrazuje jak vstupní, tak výstupní moduly a je zobrazen vpravo na obrázku 9. [15]

Poslední třídou jsou moduly X20 s technologií „safety“, pracující s bezpečnostním protokolem TÜV Rheinland. Ten umožňuje aplikace s inteligentní bezpečnostní technologií s rychlou odezvou systému. Díky této technologii lze naprogramovat chytré reakce pozastavující chod jen části stroje, popř. výrobní linky. Pro ilustraci jsou i tyto žluté moduly zobrazeny na obrázku 8. Pro dané řešení RSF jsou použity dva bezpečnostní moduly X20. [16]

Obrázek 8 – APC 2100 panel [12, 13]

Obrázek 9 – Systém X20 a I/O modul [14, 15]

K ovládání pohonů a jejich přesnému polohování slouží servozesilovače ACOPOS (*Advanced Coordinated Optimized Positioning*). V daném řešení byl použit konkrétně ACOPOS micro (Obr. 9). Byl vyvinut k řízení synchronních a asynchronních motorů napájených do 3 x (24–80) [V]. Součástí servozesilovače jsou integrované brzdné odpory a odrušovací filtry EMC (Electro Magnetic Compability). Procesor sleduje zatížení výkonových částí servozesilovače a podle zatížení upravuje jeho funkci. Výkonové zatížení se počítá z naměřených teplot motorů, kondenzátorů, rezistorů atd. Tímto lze určit, jaký výkon lze z motoru dostat, aniž by došlo k přetížení a následnému poškození motoru. Pro dané řešení, které plně nezatěžuje motory, lze předpokládat delší dobu životnosti bez poškození vlivem přetěžování. Polohu o natočení motoru dodávají zpětnou vazbou inkrementální snímače typu EnDat s rozlišením přes 500 000 pozic na otáčku. Tím lze kontrolovat polohu natočení servomotorů. [17]

Pro dané řešení RSF jsou použity dva typy motorů. První typ je čtyřpólový synchronní servomotor 8LVA23.B1030D100-0 o nominální rychlosti otáčení 3000 [min^{-1}] a nominálním kroutícím momentem 0,360 [Nm]. Pro ilustraci je znázorněn na obrázku 9 spolu s lineárním motorem od firmy Linmot *PS01 23x80* s kontrolovatelným výsuvem až 780 [mm] a s tolerancí polohy až 0,05 [mm]. [18, 19]

Obrázek 10 – Servomotor 8LVA23 & ACOPOS micro [17]

Obrázek 11 – LinMot PS01 [19]

Dalšími prvky portfolia firmy B&R jsou napájecí zdroje. V daném řešení je použit zdroj napětí s označením 0PS1100.1 (viz obrázek 12), se vstupním napětím v rozsahu (100–240) [V], výstupním napájecím napětím 24 [V] a výstupním proudem 10 [A] pro jednu fázi. Výrobce garantuje spolehlivý provoz díky funkci přerušení napájení při plném zatížení a vysokému MTBF (*Mean Time Between Failures*), tj. nízká výpadkovost zdroje, která je pro daný zdroj uváděna jako > 500 000 hodin. Zdroj je vhodný pro použití v rozsahu teplot od -25 [°C] do +70 [°C]. [20]

Obrázek 12 – Zdroj 0PS1100.1 [20]

Obrázek 13 – Automation Studio [21]

4.2 Programovací prostředí Automation Studio

Veškerá programová část práce je vytvořena ve vývojovém software Automation Studio (dále jen AS), který je v současné době ve čtvrté generaci svého vývoje. Software vznikl již v roce 2000. V AS lze programovat textovými i grafickými jazyky, které definuje norma *IEC EN 61 131-3*. Jsou to IL (*Instruction List*), ST (*Structured Text*), LD (*Ladder Diagram*), FBD (*Function Block Diagram*) a SFC (*Sequential Function Chart).* AS obsahuje i další programovací jazyky jako jsou C++, ANSI C atd. [21, 22]

V AS lze simulovat funkčnost programu pomocí simulačního virtuálního hardware, tzv. ARsim, který pracuje v reálném čase.

V současné době lze využít tzv. „*Mapp komponenty*“, které mají usnadnit práci programátora. Jde o předpřipravené knihovny, které spolu komunikují. Jsou to knihovny zejména pro pohyb motorů (*Motion Control*), bezpečnost systému (S*afety*), uživatelské účty (*User*), databáze a recepty (*Recipes*), zobrazení a vizualizaci (*Mapp View*) a mnoho dalších. V herní strategii RSF od Romana Paráka jsou tyto Mapp komponenty použity. Dále zde programuje vlastní funkční bloky v programu C++. Nicméně pro detekci polohy a natočení jsem zvolil programování ve strukturovaném textu (ST). [21]

5 VÝBĚR VLASTNÍHO ŘEŠENÍ

Kapitola je zaměřená na diskuzi možných řešení detekce polohy i natočení. Z vybraných možností na základě preferencí společnosti B+R následuje výběr snímačů. Závěrem je zde jejich zhodnocení a výběr vlastního řešení detekce.

Níže uvedené poznatky jsem nabyl na základě konzultací s odborníky v oboru snímací techniky, konkrétně z firem Sick AG, AJP-Tech se snímači z firmy Baumer Holding AG a dále z firmy B&R Automatizace.

5.1 Diskuze možných řešení detekce

V první fázi diskuze se zaměřím na detekci polohy. Z vyvinutých řešení vyplývá, že detekce polohy odměřováním laserovým snímačem je vhodná metoda. Metoda je přesná, tolerantní vůči odchylkám snímané plochy, s rychlou odezvou a lineální závislostí, nicméně je značně nákladná. Proto je tato metoda pro naše řešení nevhodná. Její alternativou je odměřování optickým snímačem. Ten pracuje na podobném principu odrazu světelného paprsku od snímané plochy a vyhodnocení vlnové délky světla. Nevýhody jsou zdánlivě zanedbatelné, alespoň za předpokladu, že se jeví jako levnější varianta laserového snímače bez značných rozdílů, a proto je tato metoda vhodná k testování pro dané řešení.

Další možností detekce polohy je výpočet polohy ze snímků z kamery, která detekuje polohu balónku. Narůstající počet hlídaných hodnot z kamery je nepřímo úměrný s rychlostí snímků z kamery, která naopak klesá. Proto je metoda pro dané řešení nevhodná. Snahou projektu RSF je minimalizovat reakční dobu celého systému, a to v čase do 2 ms (milisekund). Vzhledem k výpočtům rychlostí balónku a počtu snímků, které v reálném čase stihnou zaznamenat polohu a rychlost balónku v bakalářské práci Lubomíra Bubeníka [23], lze tuto metodu detekce polohy figurek protihráče výpočtem ze snímků dané z inteligentní kamery vyloučit. Navíc náklady na vysokofrekvenční kameru jsou mnohonásobně vyšší, než je přijatelná cena na celý systém detekce polohy.

Detekovat vzdálenost lze i velmi levně, např. metodou měřením odporu ve vysouvající tyči. Připevní-li se odporový drátek k tyči s dostatečným prokluzem, aby tyč mohla volně rotovat, lze tuto metodu aplikovat a měřením odporu ve vysunuté tyči tak početně určit délku výsuvu. Problém ovšem nastane, když dojde k přetržení drátku. Vzhledem k velkým výchylkám všech pohyblivých os lze tuto metodu vyloučit.

Další možností je inkrementální snímač, který je aplikován v mechanismu rotačního kolečka u PC myši. Principiálně jde o přímý kontakt gumového kolečka s tyčí, který vlivem výsuvu rotuje kolečkem, které je rotační osou napojené na inkrementální snímač. Problém opět nastane při vlastní rotaci posuvné tyče, popř. při jejím přílišném vychylování. Z toho lze vyvodit závěr, že veškeré možnosti přímého kontaktu s posuvně rotační osou lze vyloučit z důvodu proměnlivosti tuhosti tyče.

Další možné metody detekce polohy musí tedy být na principu odměřování nepřímým kontaktem s osou. Jednou z dalších možností je detekce ultrazvukovým snímačem, který zaznamenává odražený ultrazvuk a vypočítává polohu z vlnové délky. Ten je ovšem pro dané řešení nevhodný ze dvou důvodů. Za prvé kvůli ultrazvuku může dojít k prasknutí skla, které slouží jako herní plocha a za druhé odražené ultrazvukové vlny od sousedních snímačů se mohou navzájem ovlivňovat.

Jednou z vhodných metod pro dané použití se jeví použití magnetického snímače, detekující změnu magnetického pole magnetu, který by se připevnil na konec posuvné tyče. Magnetická lišta by byla umístěna v dostatečně vzdálené poloze od tyče, aby nedošlo k jejímu poškození a zároveň aby dostatečně detekovala změnu magnetického pole. Vzhledem k předpokládaným parametrům snímače lze tuto metodu vybrat k testování pro dané řešení.

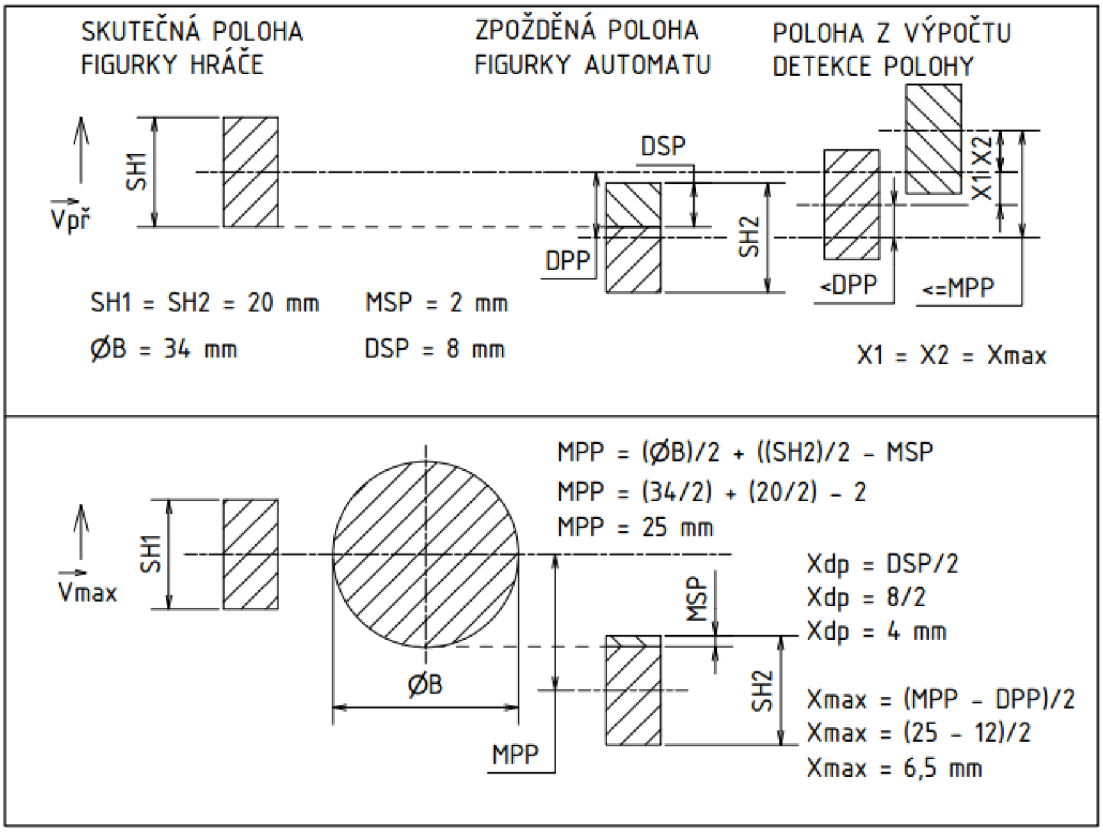
Další část diskuze se zaměřuje na detekci natočení herních os. Vzhledem k vyvinutým řešením, které se tímto tématem zabývala, se opět vracíme k řešení ze švýcarské polytechnické univerzity v Lausanne. Jde o odměřování vzdálenosti laserovými snímači rovné plošiny a šikmé šroubovice, u které se vlivem natočení mění vzdálenost mezi rovinnou ploškou a danou šroubovicí. Nicméně náklady na pořízení laserových snímačů v potřebném počtu jsou příliš velké a opět tuto metodu musím vyloučit.

Vzhledem k požadavkům pro dané řešení lze opomenout určení natočení ve stupních, protože pro plynulou funkci systému stačí znát dva stavy a to stav, kdy figurky brání průchodu balónku a kdy nebrání. Tím se mohu zaměřit na jednodušší a levnější možnosti snímání. Jednou z možností je snímač s potlačeným pozadím. Předpokládám, že na konec herních tyčí upevním rotační disk s výřezem o stejném úhlu, jaký zabírá figurka bránící průchodu balónku. Snímač s potlačeným pozadím při detekci překážky (rotační disk) má jiný stav na výstupu než při průchodu paprsku za překážku. Metoda měření natočení se zdá vhodná bez zřetelných nedostatků, proto ji volím pro testování.

Další možností je detekce úhlové výseče rotačního disku reflexním snímačem. Tato metoda vyžaduje nikoliv vyříznutý rotační disk, ale plný disk s výsečí definovanou reflexní páskou. Princip detekce se nemění, stále kontroluje dva stavy blokace a průchodu balónku. Uvedená metoda určení natočení je také vhodná k testování.

5.2 Stanovení maximální přípustné nepřesnosti určení polohy

Maximální přípustná nepřesnost výpočtu polohy protihráče z programu musí být taková, aby i při vzájemném pohybu os figurka automatu dostatečně zasahovala do plochy figurky protihráče z vypočítané polohy detekce. Schéma na obrázku 14 ukazuje vzájemnou polohu průřezů plošek figurek při jejich posouvání.



Obrázek 14 – Schéma vzájemné polohy figurek při posuvech os

Vzhledem k různým schopnostem lidských hráčů předpokládám rozsah rychlostí posuvu protihráče (0,5–1,5) [m/s]. Zpoždění systému (ZS) je dáno jedním funkčním cyklem programu (FC) za 2 [ms] a reakční dobou motorů (RDM) za 10 [ms]. Celkové zpoždění systému (ZS) je tedy 12 [ms]. Za daný čas se hráč posune danou rychlostí o (6–18) [mm]. Aby herní automat dostatečně odstínil případnou střelu, měl by zasahovat do doporučené stíněné plochy figurky (DSP), jejíž hodnotu jsem stanovil v rozsahu posuvů hráčů na 8 [mm]. Minimální přípustná stíněná plocha (MSP) musí být alespoň taková, aby při střele došlo ke změně trajektorie balónku, tj. alespoň 2 [mm]. Z tohoto předpokladu plyne, že při celkovém zpoždění systému (ZS) 12 [ms] a při maximálním přípustném posunutí (MPP) bude protihráč dosahovat maximální přípustné rychlosti posuvu (V_{max}), jejíž hodnota je dána ze vztahu 5.2.1.

5.2.1 V_{max} = MPP / ZS = 25 [mm] / 12 [ms] = 2,083 [m/s]

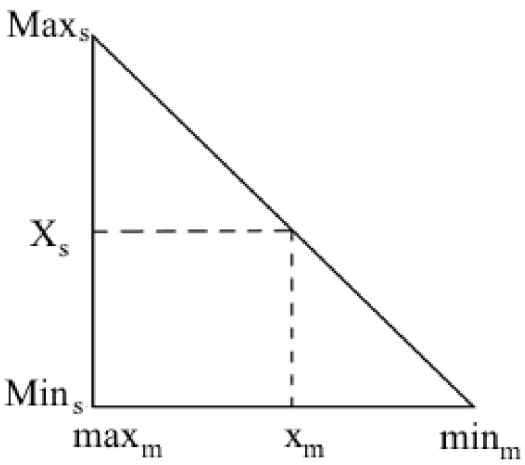
Maximální přípustná nepřesnost výpočtu určení polohy osy (X_{max}) a doporučená nepřesnost výpočtu (X_{dp}) jsou vyjádřeny v obrázku 14.

Musím konstatovat, že při překročení maximální rychlosti posuvu protihráče (V_{max}), systém nebude schopen zareagovat z důvodu příliš velkého zpoždění systému a detekce polohy v takovém okamžiku postrádá význam. Vzhledem k mým zkušenostem s hraním stolního fotbalu mohu konstatovat, že většina průměrných hráčů nepřekročí výše vypočítanou maximální rychlost posuvu.

5.3 Ověření funkčnosti a výběr snímačů

K testování přesnosti a spolehlivosti snímačů polohy a natočení jsem vybral konkrétní typy snímačů (viz kapitola 5.1) od preferovaných dodavatelů společností B+R Automatizace. Jejich výrobní parametry mají vhodné předpoklady ke správné funkci detekce. Účelem testování je kontrola doby odezvy, určení maximálního rozsahu snímání s minimální četností výpadků. K testování jsem si vybral dva typy snímačů na měření polohy a dva snímače na měření natočení.

Kontrolu přesnosti u optického snímače určím srovnáním hodnot z ručního odměření s vypočítanými hodnotami polohy z odměřených hodnot testovaného snímače. Výpočet je stanoven na základě lineárního vztahu mezi skutečnou vzdáleností a hodnotami ze snímače. Nepřesnost odměřování úměrně roste s nepřesností měřiče a hodnota tak nemusí být přesně určena, nicméně k posouzení vhodnosti metody snímání to stačí. Výpočtové srovnání jsem vypracoval na principu určení pěti hodnot délek v určeném rozsahu a k daným vzdálenostem jsem odměřil hodnoty snímačem. Krajní odměřené hodnoty snímače jsem dosadil do aproximačního vztahu (5.3.2) a dopočítal tři hodnoty polohy. Tyto hodnoty jsem porovnal s ručně naměřenými hodnotami v milimetrech. Pro posouzení funkčnosti a relativní přesnosti je nízký počet měření dostačující.



Obrázek 15 – Závislost měřené hodnoty snímače na skutečné poloze

Hodnoty Min_s a Max_s v obrázku 15 značí krajní meze snímače a X_s je aktuální poloha snímače. Dále min_m a max_m značí krajní meze měřené vzdálenosti a x_m je aktuální poloha měřené vzdálenosti. Výslednou hodnotu vzdálenosti porovnávám v tabulce 1.

5.3.1 $$\frac{(X_s - Min_s)}{(Max_s - Min_s)} = \frac{(x_m - min_m)}{(max_m - min_m)}$$

5.3.2 $$x_m = min_m + \frac{(x_s - Min_s) * (max_m - min_m)}{(Max_s - Min_s)}$$

OPTICKÝ SNÍMAČ FADK 14/4470/S14/IO				
Poloha	**Data snímače X_s [SU]**	**Výpočet ze snímače [mm]**	**Ruční měření x_m [mm]**	**Srovnání hodnot [mm]**
Min poloha	3964,40	50,00	50,00	0
1. poloha	6012,60	79,95	75,00	4,95
2. poloha	12002,80	155,84	150,00	5,84
3. poloha	15968,10	206,07	200,00	6,07
Max poloha	19751,50	250,00	250,00	0
Celkový průměr hodnot srovnání [mm]				**5,62**

Tabulka 1 – Pozorování nelinearity optického snímače

Z tabulky 1 vyplývá, že hodnoty polohy dané výpočtem z odměřených vzdáleností se blíží k hodnotám ručního měření. Jejich nepřesnost je ovšem zřejmá a s ohledem na přibližné hodnoty lze konstatovat, že s rostoucí odměřovanou vzdáleností nelinearita hodnot snímače roste. Z kapitoly 5.2 o přípustné nepřesnosti odměřování snímačem vychází, že doporučená nepřesnost může nabývat hodnot až 6,5 [mm]. Z hodnot uvedených v tabulce 1 tedy vyplývá, že optický snímač detekuje polohu v přípustném rozsahu. Z toho důvodu mohu konstatovat, že optický snímač vyhovuje pro dané účely detekce polohy.

Kontrolu přesnosti u magnetického snímače neprovádím, neboť dodavatel uvádí dočasnou nedostupnost daného snímače na českém trhu a v daný termín testování nešlo zboží dodat. Kvůli tomu jsem se pokusil sehnat magnetický snímač u další doporučené společnosti. Nicméně k dispozici jsem dostal magnetický inkrementální snímač na měření detekce polohy magnetického pásku se střídavým magnetickým polem. Daný snímač je vhodný pro měření polohy u velmi přesných polohovacích zařízení, jako je např. posuvný suport, popř. pojízdný stůl, kde nejsou tak značné výchylky jako v případě detekce polohy posuvně rotační osy RSF. Princip inkrementálního snímače tedy nelze reálně aplikovat pro dané účely.

Testování	Detekce polohy		
Parametry od výrobce	**Optický snímač FADK 14/4470/S14/IO**	**Magnetický snímač MPA-359THTP0**	**Magnetický snímač MLFK 08G2101/S35A**
Doba odezvy	<3 [ms]	1.15 [ms]	<3.5 [ms]
Měřící rozsah	50 … 400 [mm]	359 [mm]	dle potřeby
Chyba měření	1.5–4 [mm]	> 0.6 [mm] 1) *	0.5 ... 2.5 [mm]
Výstupní signál	Analog	Analog, IO-Link	Digital PNP
Testované parametry (v našich ztížených podmínkách)			
Naměřený rozsah	54 … 403 +/- 5 [mm]	-	-
Nepřesnost	5,62 [mm]	-	-
Doplňující informace	Rychlý a přesný	Nedodáno k testování	Vysoké nároky na přesné uložení
1)* - 0.03 % FSR (Full Scale Range – Celkový měřící rozsah)			

Tabulka 2 – Ověření parametrů snímačů detekce polohy

Testováním jediné metody detekce polohy nelze výsledky srovnávat. Nicméně vzhledem k relativně malým nepřesnostem detekce polohy, cenové dostupnosti a preferencím společnosti B+R lze optický snímač *FADK 14/4470/S14/IO* označit jako vhodný pro dané řešení.

Pro rovnání snímačů k určení natočení figurek protihráče jsem vybral dva snímače (kapitola 5.1), které nejsou v přímém kontaktu s rotační tyčí a mají vhodné předpoklady k určování natočení i při značném vychýlení snímaného disku (do 1,5°). Jedná se o reflexní snímač, detekující polohu reflexní pásky a optický snímač s potlačeným pozadím, detekující výřez v rotačním disku. Parametry garantované dodavateli jsou spolu s hodnotami z testování uvedeny v tabulce 3.

Testování	Detekce rotace	
Parametry od výrobce	**Reflexní snímač WL2S-2P3230/1/063572**	**Optický snímač s PP* O500 GP-11096064**
Měřící rozsah	0.0 … 550 [mm]	60 … 400 [mm]
Chyba měření	<1.5 °	<1 °
Výstupní signál	Digital PNP	Digital PNP
Testované parametry (v našich ztížených podmínkách)		
Měřící rozsah	35 … 462 [mm]	51 … 279 [mm]
Nepřesnost	1.5–3.5 °	2–3 °
Doplňující informace	Reaguje jen na reflexní pásku	Nedostatečně stíní pozadí, tudíž malý rozsah
PP* - Optický snímač s potlačeným pozadím		

Tabulka 3 – Ověření parametrů snímačů detekce natočení

Měření natočení jsem prováděl jednoduchým experimentem. Snímače jsem upevnil pevně do roviny stolu a zároveň kolmo k nejdelší hraně. Na stole jsem měl papír, na který jsem obkresloval polohu natočení destičky. První čára byla kolmá ke stejné hraně stolu a potom jsem pro každý snímač určil maximální úhel vychýlení, při kterém ještě detekovali kladnou hodnotu na výstupu. Pro oba testované snímače jsem pak určil maximální úhel vychýlení přepočítáním z rozměrů destičky a měřením pravítkem. Hodnoty z měření jsem zaznamenal do tabulky 3.

Snímač s potlačeným pozadím byl nedostačující pro naše účely, neboť jeho senzorická schopnost potlačit pozadí je značně závislá na vzdálenosti pozadí od snímané plochy. Pozadí stolu pravděpodobně není dostatečně daleko od vzdálenosti snímaného disku, protože snímač nezaznamenával požadovanou hodnotu i když měl. Vzhledem k nemožnosti prodloužit vzdálenost stolu od snímaných disků, nelze snímač použít pro detekci natočení.

Na druhou stranu reflexní snímač má vynikající schopnost detekovat reflexní pásku i při velkých náklonech rotačního disku. Tato vlastnost se jistě bude hodit, i když s rostoucí výchylkou házení tyče se bude disk úměrně natáčet a to způsobí, že rozsah nalepené reflexní pásky nebude dostačující, popř. bude zabírat příliš velkou plochu. Nicméně detekce rotace je druhotná a téměř ve všech stavech ofensivní hry se dá předpokládat, že protihráč figurkami brání ve hře. I to lze zajistit podmíněně v programu herní strategie. Z výše uvedených důvodů pro vlastní práci detekce natočení volím reflexní snímač *WL2S-2P3230/1/063572*.

Obrázek 16 – Vybraný reflexní snímač

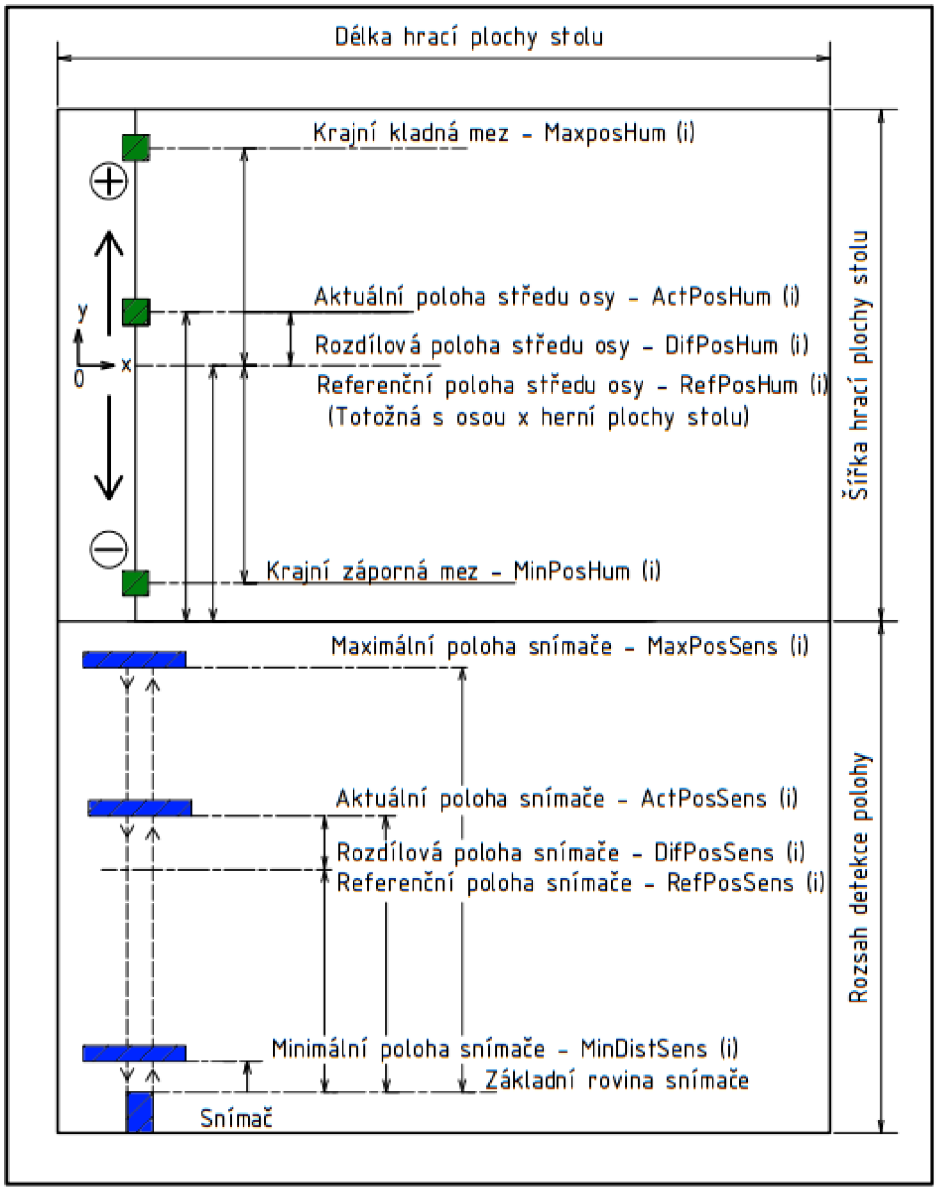
Obrázek 17 – Vybraný optický snímač

6 REALIZACE

V této kapitole se zaměřuji na vlastní realizaci systému detekce polohy. Kapitola obsahuje popis funkce výpočtu vzdálenosti figurek z hodnot snímače, určení natočení, návrh uchycení snímačů a popis funkčních schémat znázorňujících princip činnosti funkčních bloků, které jsou součástí programu herní strategie Romana Paráka. [25]

6.1 Výpočet aktuální polohy

Princip funkce detekce polohy vyplývá ze schématu na obrázku 18, kde je zobrazen pohled shora na polohy figurek v hracím poli. Anglické zkratky značí pojmenování proměnných ve funkčním bloku detekce polohy os.



Obrázek 18 – Schéma funkce detekce

Na obrázku 16 zelený čtverec uprostřed znázorňuje aktuální polohu středu herní osy protihráče (jednu ze čtyř možných os: 1. osa brankáře, 2. osa obránců, 3. osa záložníků a 4. osa útočníků). Prostřední modrý obdélník znázorňují polohu snímaného disku jedné z os. Schéma znázorňuje závislost mezi aktuální polohou figurky protihráče a aktuální hodnotou snímače (viz Rovnice 6.1.1).

6.1.1 $$(APH_i - RPH_i) * TK_i = APS_i - RPS_i \qquad i = \{1; 2; 3; 4\}$$

6.1.2 $$TK_i = \frac{MaxS_i - MinS_i}{2\ x\ MaxH_i} = \frac{MaxS_i - MinS_i}{2\ x\ |MinH_i|}$$

6.1.3 $$APH_i = RPH_i + \frac{APS_i - RPS_i}{TK_i}$$

Vztah 6.1.1 vyjadřuje závislost mezi rozdílem aktuální polohy hráče (APH_i) od jeho referenční hodnoty (RPH_i) a rozdílem aktuální polohy snímače (APS_i) od referenční hodnoty snímače (RPS_i). Jednotky snímače jsou větší než jednotky polohy figurek, proto aby platila rovnost jednotek, musíme vynásobit rozdíl polohy hráče transformační konstantou jednotek (TK_i), která je popsána vztahem 6.1.2. Transformační konstanta vyjadřuje poměr celkového rozsahu daného snímače ku celkovému rozsahu dané osy hráče. Vzhledem k tomu, že hlavními jednotkami polohy v programu herní strategie RSF jsou jednotky „*Unit*“ [U], tak i zde jsou použity stejné jednotky dané závislostí 1 [mm] = 10 [U]. Jednotky snímače jsem nazval [SU], což je z anglického překladu „*Sensor Unit*“.

Výpočet aktuální polohy středů os se určuje ze vztahu 6.1.3. Rozsahy posunutí všech os, krajní meze pohybu a polohy jednotlivých figurek jsou zobrazeny ve výkresu rozložení figurek v herním poli (Příloha 4). Ze zadaných hodnot vycházím při výpočtech transformačních konstant a referenčních hodnot.

Princip výpočtu polohy je podobný jako u testování optického snímače (viz kapitola 5.3) s tím rozdílem, že rozsah poloh figurek hráče je dán kladnou a zápornou polohou. Rozsah snímaného disku naopak leží od minimální meze k maximální. Souřadný systém herní plochy stolu (viz Příloha 4) určuje polohu všech objektů v poli. Jeho osa X symetricky dělí herní plochu napříč herním polem a osa Y leží v rovině branky robotického automatu.

Referenční hodnota snímače je střední hodnota krajních mezí. Referenční hodnota polohy osy je vždy nulová, neboť vždy leží v počátku osy Y. Krajní meze osy mají stejnou velikost, avšak opačnou orientaci. Meze snímače jsou dány snímačem při minimálních a maximálních výsuvech herních os.

Výstupní hodnoty všech snímačů v klidném stavu herní osy (tj. stav kdy se osa nehýbe) jsou nestálé a kmitají kolem rovnovážné polohy. Tento jev jsem nazval jako „*Šum hodnot snímače*“.

Při rotaci osy bez posuvu je šum hodnot snímače ještě větší a dosahuje hodnot řádu stovek jednotek snímače [SU] od rovnovážné polohy. Vzhledem k faktu, že jednotky snímače v měřeném rozsahu jsou v desetitisících, je tento šum z hlediska změny polohy nevýrazný. Nicméně i na nepatrné změny aktuální polohy musí reagovat lineární motory. Reakce lineárních motorů na tyto nepatrné výchylky způsobuje kmitavý pohyb herních os. Dlouhodobým používáním se tak výrazně sníží jejich životnost. Proto jsem u všech herních os protihráče zavedl veličinu, kterou jsem nazval *„Přípustný šum (PS)“ a v* programu jsem zavedl doplňující podmínku, která říká:

„Pokud je posunutí snímače od předchozí zaznamenané polohy menší než hodnota přípustného šumu dané osy, potom hodnota aktuální polohy je dána předchozí zaznamenanou hodnota.“

V případě většího posunutí, než je hodnota přípustného šumu daného snímače, pak určuji polohu výpočtem z aktuální polohy snímače.

Hodnoty naměřených krajních mezí snímačů, včetně hodnot přípustného šumu jednotlivých os a krajních mezí rozsahů figurek protihráče jsou uvedeny v tabulce 4.

Měření	Rozsah snímače			Rozsah figurek protihráče	
Osa	Min poloha [SU]	Max poloha [SU]	Přípustný šum [SU]	Záporná poloha [U]	Kladná poloha [U]
Brankář	11188	29428	1109	-1025	1025
Obránce	6741	32585	1371	-1385	1385
Záloha	18930	30590	1236	-660	660
Útok	14295	32532	1080	-975	975

Tabulka 4 – Tabulka rozsahů krajních mezí

Obr. 4:

Transformační konstanty jednotek (TK_i) jsou vypočítány ze vztahu 6.1.2 a jsou dány v tabulce 5, spolu s rozsahy a referenčními hodnotami snímačů a středů os.

Výpočet	Hodnoty snímače		Hodnoty figurek protihráče		Transformační konstanta [SU]/[U]
Osa	Referenční hodnota [SU]	Rozsah snímače [SU]	Referenční hodnota [U]	Rozdíl mezí [U]	
Brankář	20308	18240	0	2050	8,897561
Obránce	19663	25844	0	2770	9,329964
Záloha	24760	11660	0	1320	8,833333
Útok	23414	18237	0	1950	9,352308

Tabulka 5 – Tabulka vypočítaných konstant

Výpočtem ze vztahu 6.1.3 zjistíme aktuální polohy středů herních os protihráče. K určení polohy jednotlivých figurek musíme definovat posunutí každé figurky vůči středu osy. Toto posunutí je konstantní pro všechny figurky, proto výpočet polohy každé figurky je dán součtem aktuální polohy příslušné osy a posunutí vůči středu (viz rovnice 6.1.4). Všechna posunutí jsou dána v tabulce 6 a vycházejí z výkresu rozložení figurek v herním poli (Příloha 4).

Osa	Figurka (X)**	Poloha figurky vůči středu tyče [U]	Základní poloha středu tyče [U]
Brankář	A	0	0
Obránce	B	-1200	0
	C	1200	0
Záloha	D	-2400	0
	E	-1200	0
	F	0	0
	G	1200	0
	H	2400	0
Útok	I	-2100	0
	J	0	0
	K	2100	0
(X)** _ Značka figurky (Příloha 4 - Rozložení figurek v poli)			

Tabulka 6 – Tabulka posunutí figurek vůči středu osy

6.1.4 $$APF_i = APH_i + PFV_j \qquad i = \{1; 2; 3; 4\} \quad j = \{1; 2; \ldots; 10\}$$

Ze vztahu 6.1.4 vyplývá, že aktuální poloha dané figurky je rovna součtu aktuální polohy středu příslušné osy a posunutí dané figurky vůči středu osy.

Princip výpočtu aktuální polohy středu osy a figurek je zřejmý. V další podkapitole se zaměřím na další možné stavy, které řeší funkční bloky programu detekce. Všechny funkční bloky jsou součástí knihovny detekce polohy, která je nahrána na CD (Příloha 9).

6.2 Popis funkce systému

Podkapitola 6.1 je zaměřená na způsob výpočtu poloh figurek z aktuálních hodnot snímačů. Nyní se zaměřím na strukturu jednotlivých funkčních bloků, jejich funkci a vzájemný vztah mezi detekcí natočení a detekcí polohy.

První funkční blok určuje aktuální polohu středů všech čtyř herních os protihráče. Jeho struktura je znázorněna funkčním schématem (Příloha 1). Nejprve určí počáteční hodnoty nutné pro výpočet, tj. referenční hodnoty, meze a poměrové transformační konstanty. Než se přejde k výpočtu polohy, zavolá funkční blok natočení (Příloha 3). Jediným cílem funkčního bloku je ověřit funkčnost reflexního snímače a posoudit stav natočení. V případě, že figurka balónku nebrání, je určení polohy momentálně nepodstatné a pro danou osu se výpočet neprovádí. V opačném případě cyklus výpočtu polohy pokračuje. Ten je vymezen hned několika podmínkami. První a zároveň hlavní podmínka říká:

„*Pokud je hodnota snímače v povoleném rozsahu snímače, snímač polohy je v provozním stavu a pokud rozdíl aktuální polohy od polohy v předchozím stavu (na počátku to je referenční poloha) je větší než hodnota přípustného šumu příslušné osy, potom proveď výpočet podle vztahu 6.1.3.*“

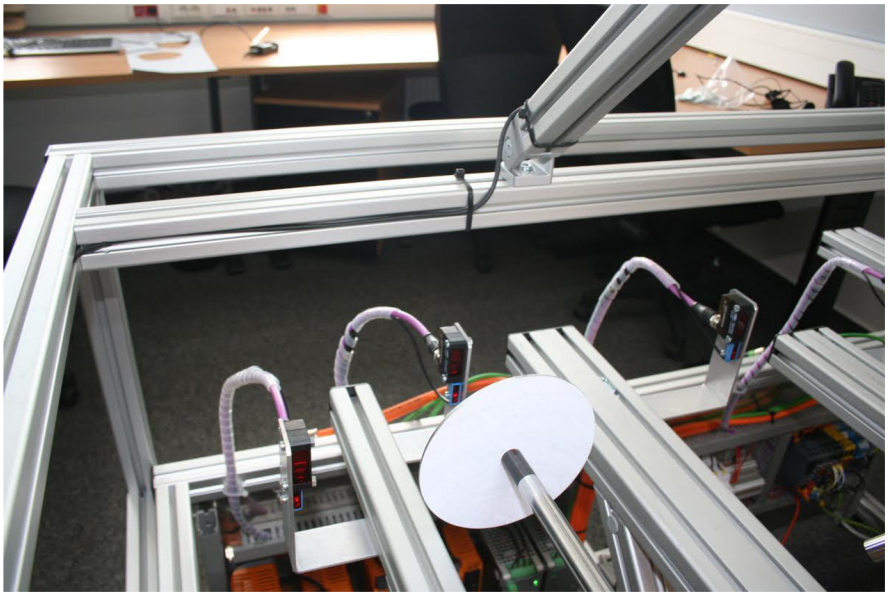
Výpočet aktuální polohy probíhá jen při splnění výše uvedených podmínek. Všechny další stavy značí nějaký nedostatek, ať už je to hodnota snímače mimo rozsah snímače, nebo snímač polohy není provozu schopný. V případě větší hodnoty snímače, než je maximální hodnota rozsahu, automaticky přiřazuji maximální hodnotu daného rozsahu. U minimální hodnoty snímače to platí opačně. V případě výpadku snímače polohy, hra musí stále pokračovat, a proto se nastaví aktuální poloha předchozí zaznamenanou hodnotou. Jakmile bude snímač schopný provozu a jsou splněny další podmínky výpočtu, tak se aktuální poloha znovu přepočítá a do příštího výpočtu se nastaví nová hodnota polohy předchozího stavu.

Snímač polohy ukazuje vždy nějakou hodnotu, i když není v provozuschopném stavu. Ovšem v případě, že dojde k jeho odpojení, nebo ke zkratu, výstupní hodnotou se stane nula, nebo hodnoty v jejím blízkém okolí. V takovém případě nastavuji hodnotu snímače referenční hodnotou. Program herní strategie Romana Paráka tedy počítá i s touto možností, kdy systém detekce polohy protihráče nefunguje. [25]

Po dokončení cyklu ověřování podmínek a určení aktuální polohy všech os protihráče, zavolá funkční blok určující polohu jednotlivých figurek. Ze vztahu 6.1.4 vyplývá, že k určení polohy stačí přičíst polohu posunutí každé figurky k aktuální poloze středu příslušné osy. Tím je dokončený kompletní cyklus, který se po 2 [ms] opět opakuje.

6.3 Konstrukční provedení

Vzhledem k již existujícím přídavným konstrukcím z hliníkových T-profilů, určených k uchycení motorů, jsem se rozhodl o vytvoření takových držáků snímačů, které mohou být k dané konstrukci připevněné. Zároveň snímače musí směřovat kolmo ke snímaným diskům, umístěných na koncích posuvných tyčí. Jelikož mezi herní osou brankáře a obránce protihráče není žádná podpůrná konstrukce, musel jsem vytvořit přídavnou konstrukci po vzoru již existujících konstrukcí (viz Příloha 8). Doplňující výrobní výkresy jsou součástí CD (Příloha 9). S novou přídavnou konstrukcí jsem musel dva držáky snímačů zkrátit, neboť vzdálenost mezi osami se zkrátila na polovinu, tj. 75 [mm]. Zbývající dva držáky jsou vzdáleny 150 [mm] od osy snímání (viz Příloha 5 a 6). Na obrázku 19 je znázorněna realizace detekce natočení a polohy.



Obrázek 19 – Řešení detekce polohy

Na obrázku 19 jsou vidět dva typy držáků snímačů a způsob uchycení snímačů. V pravé části obrázku je vidět původní nosná konstrukce na uložení motorů (motory zde nejsou zobrazeny, protože se v současné době dokončují ve výrobě z hlediska plynulého chodu os automatu). Dále je zde odlehčená, přídavná konstrukce pro držáky snímačů, snímaný disk s prodloužením tyče.

Z experimentálních pokusů vyplynulo, že tyč protihráče se může zasouvat až do kluzného pouzdra. Vzhledem k možnosti deformace snímaného disku jsem musel všechny herní osy prodloužit. Z hlediska pevnosti a stálosti spoje jsem zvolil šroubový spoj s vějířovou podložkou. Do otvorů na koncích tyčí jsem nechal vyřezat vnitřní závit a jako prodlužující prvek jsem nechal vyrobit soustružené silonové kolíky o stejném průměru jako jsou herní tyče (viz Příloha 7). V nich je vyřezán vnitřní závit z čela prodloužení, aby šlo spojit šroubem se snímaným diskem. Výkres disku je součástí CD (Příloha 9). Jde o plechový disk o průměru 140 [mm]. Poloměr disku je maximální roztečná vzdálenost snímačů od sebe.

Při testování funkčnosti systému bylo největší překážkou vyladění kolmosti snímaných disků vůči světelným paprskům snímačů. Další problém nastal, když jsem zjistil aktuální průhyb herních tyčí po návratu z výroby. Házení nejdelší osy (osa obránce) zvětšovalo hodnoty šumu snímače natolik, že jsem musel počítat s hodnotami snímače pouze v omezeném rozsahu natočení, tj. takové natočení, kdy figurka protihráče ještě brání průchodu balónku. Úhel natočení jsem určoval experimentálně pro každou osu zvlášť. Rozsah natočení jsem si naznačil na uchycený disk, na který jsem nalepil reflexní pásku.

Součástí mé konstrukční činnosti na RSF byla tvorba ochranného plexiskla, které jsme museli zesílit. Dále jsem se podílel na konstrukčním řešení detekce vstřelené branky, kde jsme realizovali původní návrh Ing. Petra Marečka. Program detekce vstřelené branky realizoval Lubomír Bubeník. Světelné závory detekující vstřelenou branku jsou patrné z obrázku 20. Z obrázku je také vidět žlutá bezpečnostní světelná závora, která v případě detekce nežádoucího tělesa v herním poli vypne chod celého automatu. Její uložení je právě v ochranném plexiskle.

Obrázek 20 – Řešení detekce branky a světelné závory

Posledním významným konstrukčním projektem, na kterém jsem se podílel je uchycení světel zvyšujících kontrast mezi herní plochou a balónkem, pro efektivnější detekci polohy balónku. Vzhledem k problému s odrazem světla do kamery při umístění světel ze spodu stolu, jsme po řadě testování dospěli k alternativnímu řešení, které znamenalo uchycení světel z vrchu stolu. Vzhledem k dobrým zkušenostem s firmou Seko-K s.r.o. jsem se rozhodl o přídavnou konstrukci ze stejných T-profilů. Výsledek je patrný z aktualizované vizualizace modelu (Obrázek 1) a z fotografie aktuálního stavu RSF (Obrázek 21).

Obrázek 21 – Aktuální stav Robotického stolního fotbalu

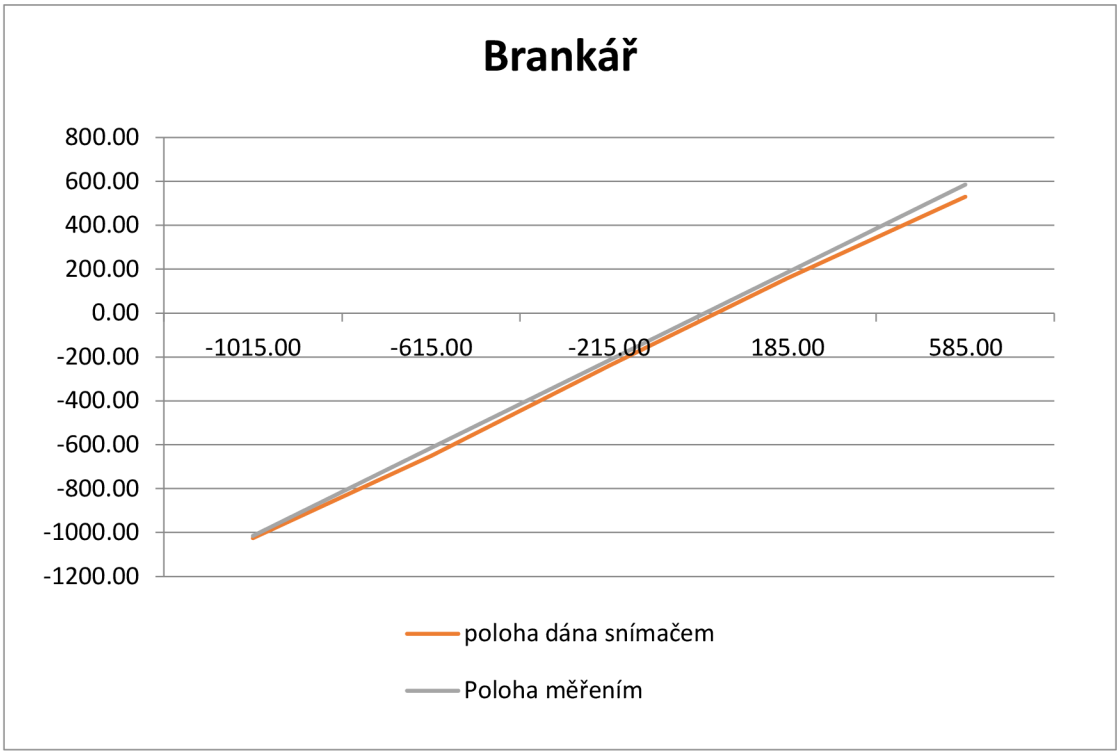
6.4 Testování funkčnosti a přesnosti programu

V této podkapitole srovnávám ručně naměřené hodnoty s výsledkem výpočtu programu. Pro každou osu jsem odměřil sérii hodnot v různých polohách posunutí všech herních os protihráče. Vzhledem k tomu, že polohy jednotlivých figurek jsou konstantní vůči středům tyčí, srovnání provádím pouze k jednotlivým středům os. Hodnoty jsou uvedené ve srovnávací tabulce (Tabulka 7), kde jedna výsledná poloha je dána výpočtem z programu a druhá hodnota je odměřena ručním měřidlem od bočnice stolu. Odměřené hodnoty jsou přepočítány do souřadného systému stolu (Příloha 4). Postup výpočtu programu je uveden v kapitole 6.1.

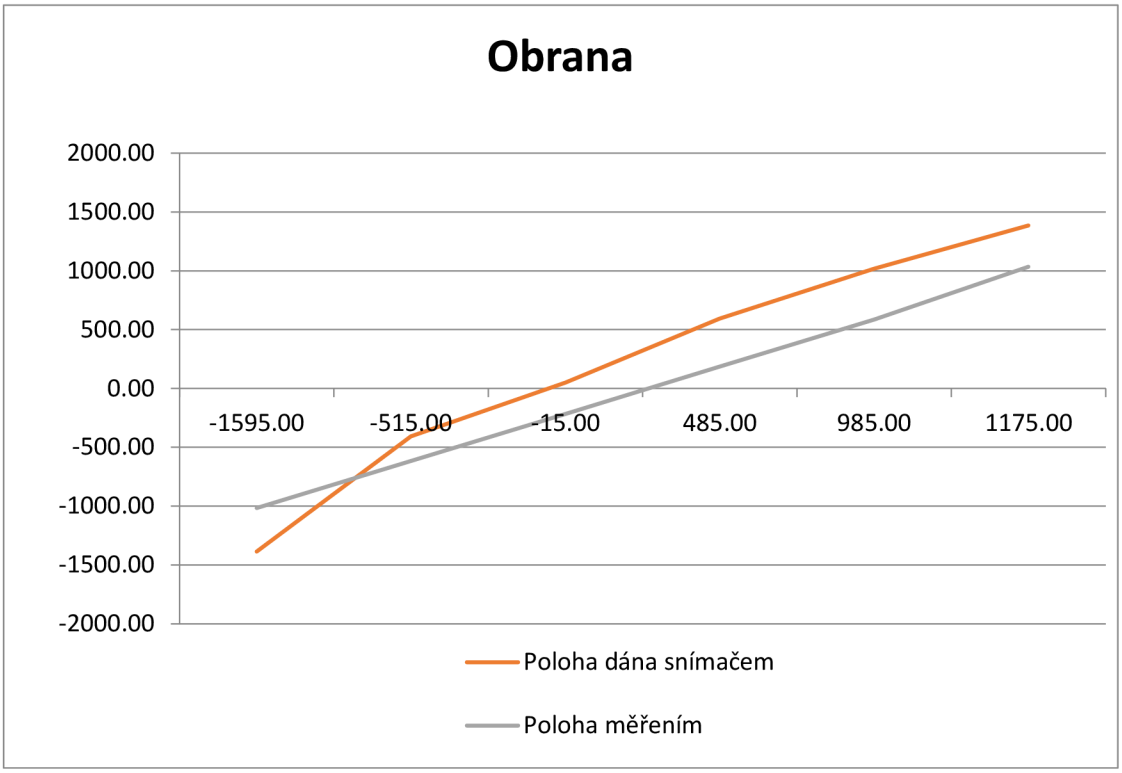
Osa	Číslo měření	Vypočítaná poloha z programu [U]	Odměřená poloha v SS* [U]	Rozdíl hodnot [U]
Brankář	**1**	-1025.00	-1015.00	10.00
	2	-650.74	-615.00	35.74
	3	-239.84	-215.00	24.84
	4	158.36	185.00	26.64
	5	530.03	585.00	54.97
Obránce	**1**	-1385.00	-1595.00	-210.00
	2	-406.00	-515.00	-109.00
	3	49.52	-15.00	-64.52
	4	594.75	485.00	-109.75
	5	1018.33	985.00	-33.33
Záloha	**1**	-660.00	-665.00	-5.00
	2	-273.96	-315.00	-41.04
	3	9.06	-15.00	-24.06
	4	251.55	185.00	-66.55
	5	521.21	385.00	-136.21
Útok	**1**	-975.00	-965.00	10.00
	2	-594.02	-615.00	-20.98
	3	-136.70	-215.00	-78.30
	4	331.63	185.00	-146.63
	5	806.16	685.00	-121.16
SS*_ Souřadný systém herní plochy stolu				
Přepočet jednotek: 1 [mm] = 10 [U]				

Tabulka 7 – Srovnávací tabulka poloh středů tyčí

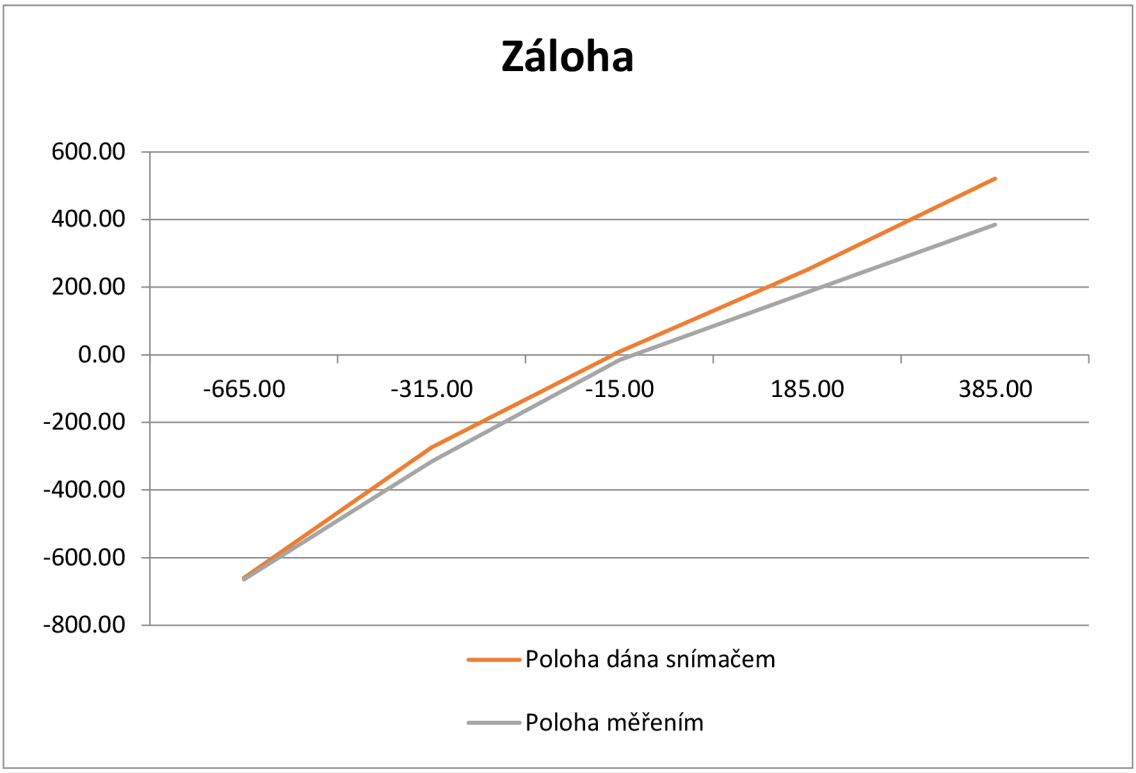
Ve srovnávací tabulce (Tabulka 7) jsou vidět rozdílové hodnoty, které jsou větší než maximální přípustná nepřesnost výpočtu (X_{max}) (kapitola 5.2). Pro posouzení chybovosti a kritických poloh při detekci polohy jsem naměřené hodnoty vykreslil do srovnávacích grafů (Graf 1, 2, 3 a 4).



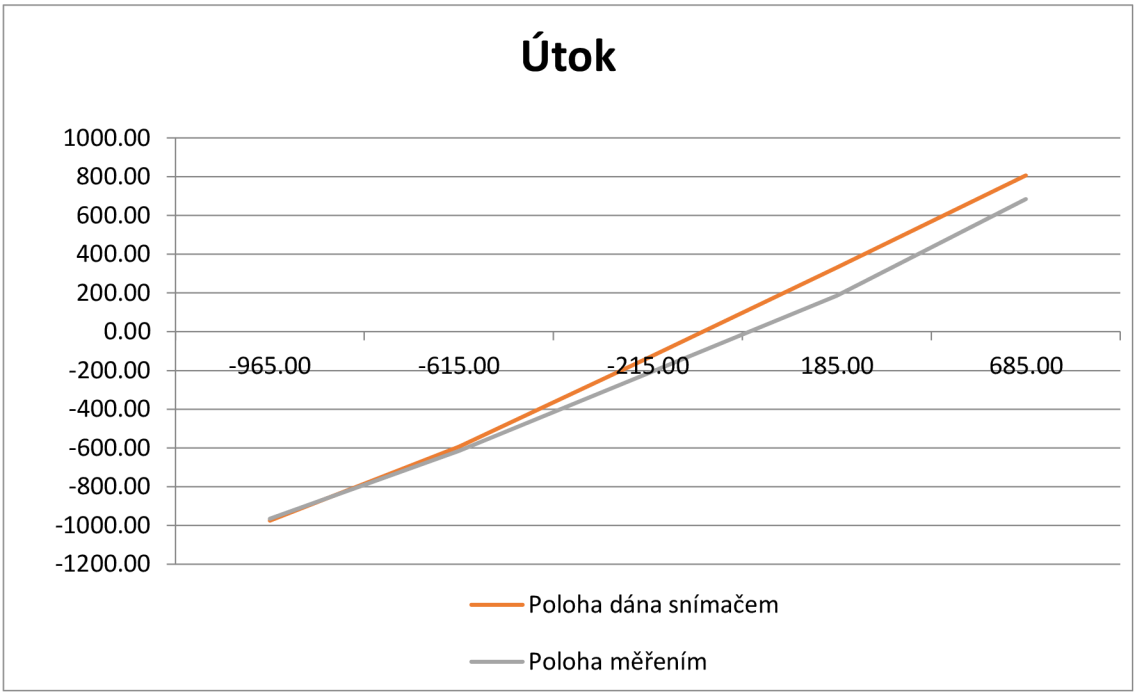
Graf 1 – Srovnávací graf poloh osy brankáře



Graf 2 – Srovnávací graf poloh osy obrany



Graf 3 – Srovnávací graf poloh osy zálohy



Graf 4 – Srovnávací graf poloh osy útoku

Ze srovnávacích grafů vyplývá, že u všech snímaných tyčí se s rostoucí vzdáleností snímaného disku od snímače zvětšuje nepřesnost odměřování. Nejkritičtější osa je jednoznačně osa obrany. Vzhledem k tomu, že tři z pěti naměřených hodnot jsou větší než maximální přípustná nepřesnost výpočtu (X_{max}) a jen jedna hodnota je v doporučeném rozsahu, lze konstatovat, že detekce polohy osy obránce nesplňuje zadané předpoklady ke správné funkci detekce polohy. Jak už jsem zmínil v kapitole 6.3, osa obránce při vlastní rotaci viditelně hází a tím snímaný disk relativně mění svoji polohu. To je s největší pravděpodobností hlavní příčinou naměřených dat s vysokou nespolehlivostí.

Osy zálohy a útoku splňují požadované nároky na přesnost polohování alespoň v první polovině snímaného rozsahu. Poté rozdílové hodnoty rostou až na dvojnásobek maximální přípustné nepřesnosti výpočtu (X_{max}).

Jednoznačně nejlepší výsledky detekce polohy jsou naměřeny u osy brankáře. Nepřesnost výpočtu od vypočítaných hodnot je v celé délce v doporučeném rozsahu a s rostoucí vzdáleností disku od snímače příliš neroste.

V závěrečném zhodnocení musím přihlédnout nejen ke zpracovaným výsledkům, ale i ke skutečnosti, že experimentálně zjištěná data jsou vzhledem k našim ztíženým experimentálním podmínkám odměřena s relativní chybou.

Možnosti zvýšení přesnosti detekce jsou omezené a závislé na geometrických vlastnostech rotěčně posuvných tyčí. Jejich vycentrováním, popř. kalibrací lze dosáhnout přesnějších výsledků odměřování. Dále je to experimentální zajištění kolmosti mezi snímanými disky a příslušnými snímači.

Testování funkčnosti systému detekce polohy a natočení v provozním stavu prozatím nebylo možné provést, neboť v současné době nejsou nainstalovány pohoné jednotky všech herních os automatu a testování funkčnosti celého systému doposud neproběhlo. To je plánované do konce května 2017.

7 ZÁVĚR

Jedním z cílů práce bylo seznámit čtenáře s robotickým stolním fotbalem (dále jen RSF) a s vybranými produkty společnosti B+R Automatizace, které jsou jeho součástí. Pro plastickou představu jsou zde zobrazena již existující řešení RSF. Popisuji zde způsoby využití pohonů při pohybech herních os, možnosti detekce polohy balónku a hlavně se zaměřuji na způsoby detekce polohy a natočení figurek protihráče.

Na základě diskuze o možných a použitelných metodách detekce polohy a natočení vybírám z hlediska požadovaných technických parametrů nejvhodnější metody k testování jejich funkčnosti a spolehlivosti. Na základě výsledků z testování vybraných snímačů vybírám konkrétní snímače pro realizaci vlastního řešení detekce polohy a natočení figurek protihráče, které je popsáno v poslední kapitole (kapitola 6). Zde popisuji způsob výpočtu aktuální polohy a aplikaci výpočtu v programu detekce. Program detekce je součástí hlavního programu herní strategie RSF. Programem mám na mysli tři funkční bloky, které tvoří knihovnu detekce polohy. První funkční blok řeší aktuální polohu středů herních os, druhý řeší posunutí všech figurek vůči příslušným středům a třetí řeší natočení figurek. Knihovna je v příloze na CD. Popis funkce a struktury funkčních bloků je znázorněn funkčními diagrami v příloze a je popsán v kapitole 6.2.

Součástí realizace je také konstrukční činnost nejen na vlastním řešení systému detekce, ale i na doplňujících úpravách RSF. Zejména jde o úpravy prvků, jako jsou bezpečnostní kryt, nosná konstrukce držáku světel, konstrukce detekce vstřelené branky, nebo úprava vizualizace do aktuálního stavu.

V poslední kapitole testuji funkčnost systému detekce polohy a natočení na základě testovaných dat. Testování RSF v herním režimu nebylo doposud provedeno, neboť pohonné jednotky doposud nebyly dokončeny ve výrobě. Ukázalo se, že nastavit herní osu automatu, složenou ze tří částí, z hlediska minimalizace geometrických tolerancí uložení pohyblivých částí je značně náročná operace. Proto jsme se museli obrátit na zkušené Inženýry ze společnosti Seko-K, kteří nám pomáhají tento problém vyřešit.

Hodnocení funkčnosti systému detekce polohy a natočení figurek protihráče provádím na základě posouzení testovacích dat z kapitoly 6.4. Požadavky detekce polohy jsou zejména na přesnost a rychlou odezvu. V případě rychlosti odezvy měřených dat jsou požadavky splněny, neboť výpočet z programu stíhá reagovat v každém cyklu (< 2 ms). V případě přesnoti detekce už požadavky splněny nejsou u všech herních herních os protihráče. Zejména je tu problém s detekcí polohy nejdelší herní osy (osa obránce). Osa byla nejspíš poškozena vlivem konstrukčních úprav a transportu. Házení tyče je natolik velké, že téměř v celém měřícím rozsahu ovlivňuje polohu snímaného disku a tím i hodnotu výpočtu. Rozdíl naměřené hodnoty od vypočítané hodnoty z programu je ve většině snímaného rozsahu větší, než maximální přípustná nepřesnost výpočtu, kterou jsem určil v kapitole 5.2.

Detekce polohy u ostatních herních os je relativně úspěšná, zejména pak osa brankáře vykazuje velmi přesné určení polohy. Ze získaných dat jsem zjistil, že nepřesnost výpočtu polohy roste se vzdáleností snímaného disku od optického snímače.

Detekce natočení vykazuje vysokou spolehlivost z hlediska správného určení polohy natočení figurek i přes větší geometrické tolerance, jako jsou házení tyčí, nebo kolmost snímaných disků vůči příslušným herním osám.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] MAREČEK, Petr. *Robotický stolní fotbal,* Brno, květen 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí diplomové práce Ing. et Ing. Stanislav Lang.

[2] WEIGEL, Thilo. *KiRo: A Table Soccer Rob ot Ready for the Ma rket*. Institut für Informatik, Universität Freiburg, 2002, , 2-6 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <ftp://ftp.informatik.uni-freiburg.de/documents/papers/ki/weigel-ki2005.pdf>.

[3] AEBERHARD, Michael, S. Connelly, E. Tarr a N. Walker. *Single Player Foosball Table with an Autonomous Opponent*. Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology. Atlanta, 2007, 114 [cit. 2017-05-22]. Vedoucí práce Dr. James Hamblen. Dostupný z: <http://www.eskibars.com/projects/foosball_robot/final_rpt.pdf>.

[4] ALSALIHI, A.; Najjar, K.; Van Scoy, B.; Zifer, J. *Automated Foosball Table: Project Design Report*. The University of Akron, Akron, 2011, 69 [cit. 2017-05-22]. Supervisor Dr. Hartley, Dr. Tran. Dostupný z: <https://www.uakron.edu/dotAsset/1e2fb3d4-8c59-475e-9473-ed98b2504f17.pdf>.

[5] PESSINA, Laure-Anne. Robots that fold and play table football. *SCHOOL OF ENGINEERING STI: École polytechnique fédérale de Lausanne EPFL* [online]. Lausanne, 2013 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://sti.epfl.ch/page-97901-en.html>.

[6] Robot beats humans at table football: News From World. *Https://www.youtube.com/* [online]. 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=73uxpRIXBJc>.

[7] MYSLIVEC, Vojtěch. *Robotický stolní fotbal*, Praha, květen 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra řídící techniky. Vedoucí diplomové práce Ing. Pavel Burget, Ph.D.

[8] Servo drive technology that amazes!: Pilz_INT. *Https://www.youtube.com/* [online]. 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=OjhggBhvPMU>.

[9] Pilz at Motek 2016: safe drive solutions for assembly and handling technology. *Pilz: The spirit of safety* [online]. Ostfildern, 2016 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://www.pilz.com/en-INT/company/press/messages/articles/088991>.

[10] B&R: Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik Ges.m.b.H. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <https://de.wikipedia.org/wiki/B%26R>.

[11] B&R. *B&R Perfection in Automation* [online]. 2017, [cit. 3. května 2017]. Dostupný z: <http://www.br-automation.com/en/perfection-in-automation/>.

[12] B&R. *B&R Perfection in Automation* [online]. 2017, [cit. 3. května 2017]. Dostupný z: < https://www.br-automation.com/en/products/industrial-pcs/panel-pc-2100-ap5000-swing-arm-multi-touch/>.

[13] B&R. *B&R Perfection in Automation* [online]. 2017, [cit. 3. května 2017]. Dostupný z: <https://www.br-automation.com/en/products/industrial-pcs/panel-pc-2100-multi-touch/>.

[14] B&R. *B&R Perfection in Automation* [online]. 2017, [cit. 3. května 2017]. Dostupný z: <https://www.br-automation.com/en/products/control-systems/x20-system/>.

[15] B&R. *B&R Perfection in Automation* [online]. 2017, [cit. 3. května 2017]. Dostupný z: <https://www.br-automation.com/en/products/io-systems/compact-io-system/io-with-x2x-link/7xx40850-1/>.

[16] B&R. *B&R Perfection in Automation* [online]. 2017, [cit. 3. května 2017]. Dostupný z: <https://www.br-automation.com/en/products/safety-technology/>.

[17] ACOPOSmicro: ACOPOSmicro drive system. *Https://www.br-automation.com/en/* [online]. Eggelsberg [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.br-automation.com/en/products/motion-control/acoposmicro/.

[18] 8LVA compact motor: Dynamic compact motors. *Https://www.br-automation.com/en/* [online]. Eggelsberg [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.br-automation.com/en/products/motion-control/8lva-compact-motor/.

[19] PS01-23x80: Stator, cable 1m, connector D-Sub-9(m). *Http://shop.linmot.com/E* [online]. Spreitenbach [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://shop.linmot.com/E/index.php?PS01-23x80&page=product/Details&product No=0150-1201

[20] Single-phase power supplies: 0PS1100.1. *Https://www.br-automation.com/en/* [online]. Eggelsberg [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.br-automation.com/en/products/power-supplies/single-phase-power-supplies/0ps11001/.

[21] Software: B&R Automation Studio 4. *Https://www.br-automation.com/en/* [online]. Eggelsberg [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://www.br-automation.com/en/products/software/.

[22] URBAN, Luboš. Programování PLC podle normy IEC EN 61131-3 – víc než jednotné jazyky: Norma IEC EN 61131-3. *AUTOMA: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2005 (2) [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: http://automa.cz/cz/casopis-clanky/programovani-plc-podle-normy-iec-en-61131-3-vic-nez-jednotne-jazyky-2005_02_30310_1237.

[23] BUBENÍK, Ľ. *Model robotického stolního fotbalu.* Brno, 2017. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Automatizační a měřicí techniky.

[24] FADK 14I4470/S14/IO - Distance sensors. *http://www.baumer.com/* [online]. Frauenfeld [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: www.baumer.com/int-en/products/productfinder/FADK_14U4470_S14_IO./

[25] PARÁK, Roman. *Robotický stolní fotbal – herní strategie*, Brno, 2017, 50 s. Diplomová práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedúci diplomovej práce Ing. et Ing. Stanislav Lang.

9 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

RSF	Robotický stolní fotbal
B&R (B+R)	Bernecker & Rainer
PC	Počítač
I/O	Input/Output (Vstupy a výstupy)
SU	Jendotky snímače (Sensor Unit)
U	Jednotky polohy RSF (Unit)
max_m	Maximální mez odměřené vzdálenosti
min_m	Minimální mez odměřené vzdálenosti
x_m	Aktuální poloha odměřené vzdálenosti
MAXs	Maximální mez snímače
MINs	Minimální mez snímače
Xs	Aktuální poloha snímače
ØB	Průměr balónku
SH1	Šířka hrací plošky hráče
SH2	Šířka hrací plošky automatu
V_{max}	Maximální přípustná rychlost posuvu protihráče
$V_{př}$	Přípustná rychlost posuvu protihráče
X_{max}	Maximální nepřesnost výpočtu polohy protihráče
X_{dp}	Přípustná nepřesnost výpočtu polohy protihráče
DPP	Doporučené posunutí hráče
MPP	Maximální přípustné posunutí hráče
DSP	Doporučená stíněná plocha figurky
MSP	Minimální stíněná plocha figurky
FC	Doba funkčního cyklu programu
RDM	Reakční doba motorů
ZS	Celková doba zpoždění systému
APH	Aktuální poloha osy hráče
RPH	Referenční poloha hráče
APS	Aktuální poloha snímače
RFS	Referenční poloha snímače
TK	Transformační konstanta
PS	Přípustný šum snímače
Obrázek 1	Robotický stolní fotbal [1]
Obrázek 2	Časová osa vyvinutých řešení
Obrázek 3	Komerční podoba od firmy Gauselman AG [2]
Obrázek 4	Řešení Technologického institutu v Georgii [3]

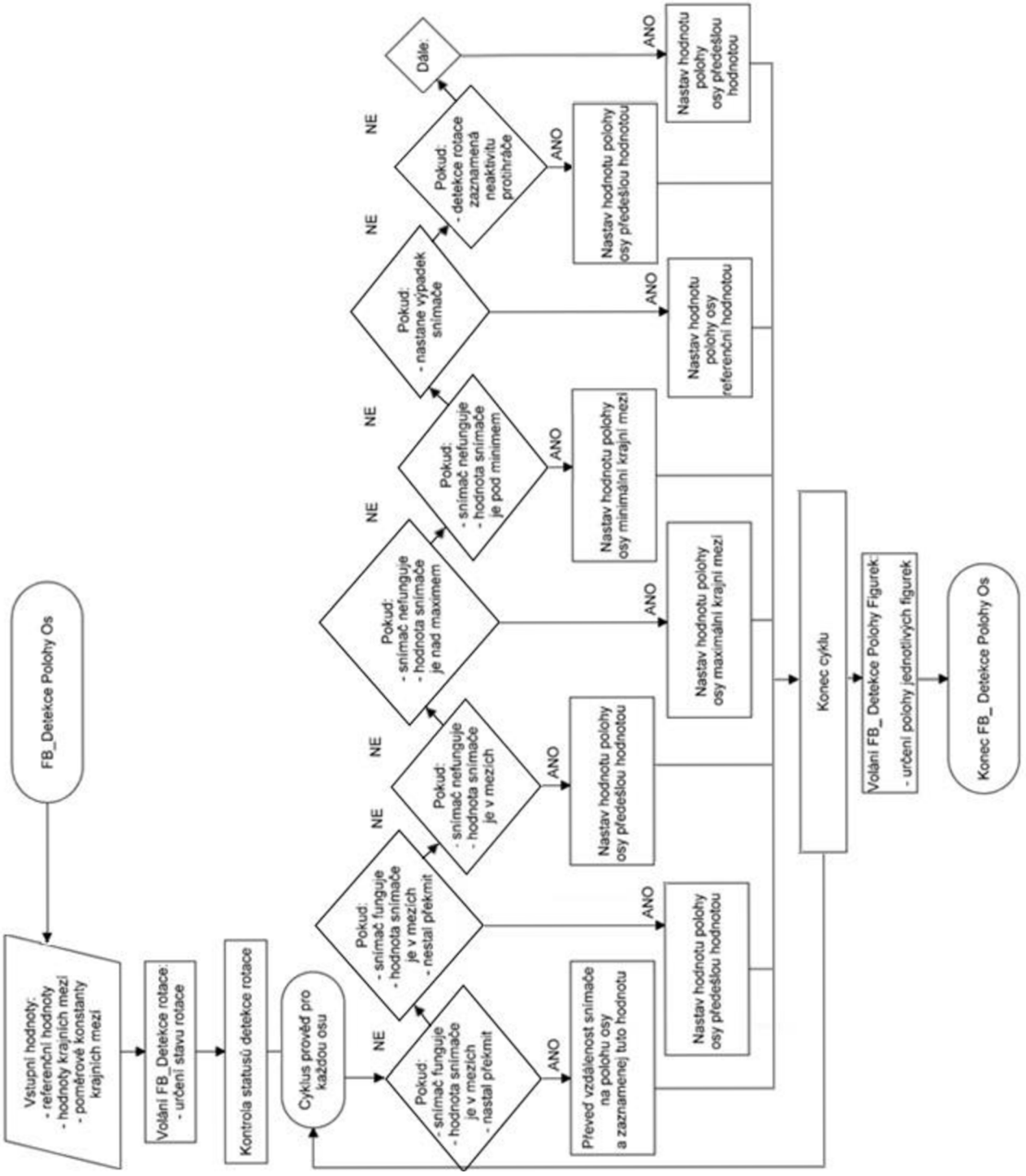
Obrázek 5	Řešení párových dvojic IR LED a fototranzistorů [4]
Obrázek 6	Řešení firmy Pilz [9]
Obrázek 7	Produkty firmy B&R [11]
Obrázek 8	APC 2100 panel [12, 13]
Obrázek 9	Systém X20 a I/O modul [14, 15]
Obrázek 10	Servomotor 8LVA23& ACOPOS micro [17]
Obrázek 11	LinMot PS01 [19]
Obrázek 12	Zdroj 0PS1100.1 [20]
Obrázek 13	Automation Studio [21]
Obrázek 14	Schéma vzájemné polohy figurek při posuvech os
Obrázek 15	Závislost měřené hodnoty snímače na skutečné poloze
Obrázek 16	Vybraný reflexní snímač
Obrázek 17	Vybraný optický snímač
Obrázek 18	Schéma funkce detekce
Obrázek 19	Řešení detekce polohy
Obrázek 20	Řešení detekce branky a světelné závory
Obrázek 21	Aktuální stav Robotického stolního fotbalu
Tabulka 1	Pozorování nelinearity optického snímače
Tabulka 2	Ověření parametrů snímačů detekce polohy
Tabulka 3	Ověření parametrů snímačů detekce natočení
Tabulka 4	Tabulka rozsahů krajních mezí
Tabulka 5	Tabulka vypočítaných konstant
Tabulka 6	Tabulka posunutí figurek vůči středu osy
Tabulka 7	Srovnávací tabulka poloh středů tyčí
Graf 1	Srovnávací graf poloh osy brankáře
Graf 2	Srovnávací graf poloh osy obrany
Graf 3	Srovnávací graf poloh osy zálohy
Graf 4	Srovnávací graf poloh osy útoku

10 SEZNAM PŘÍLOH

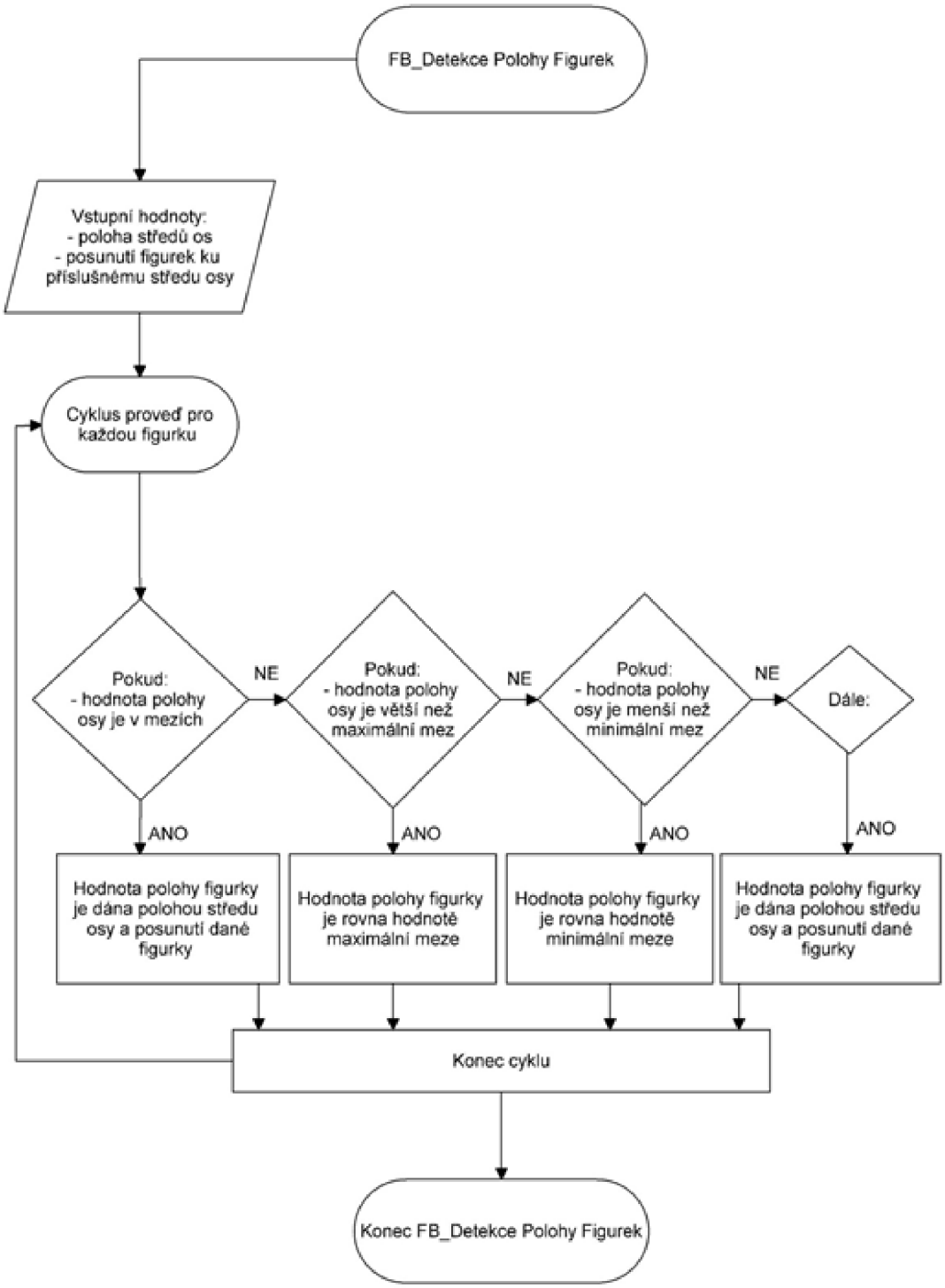
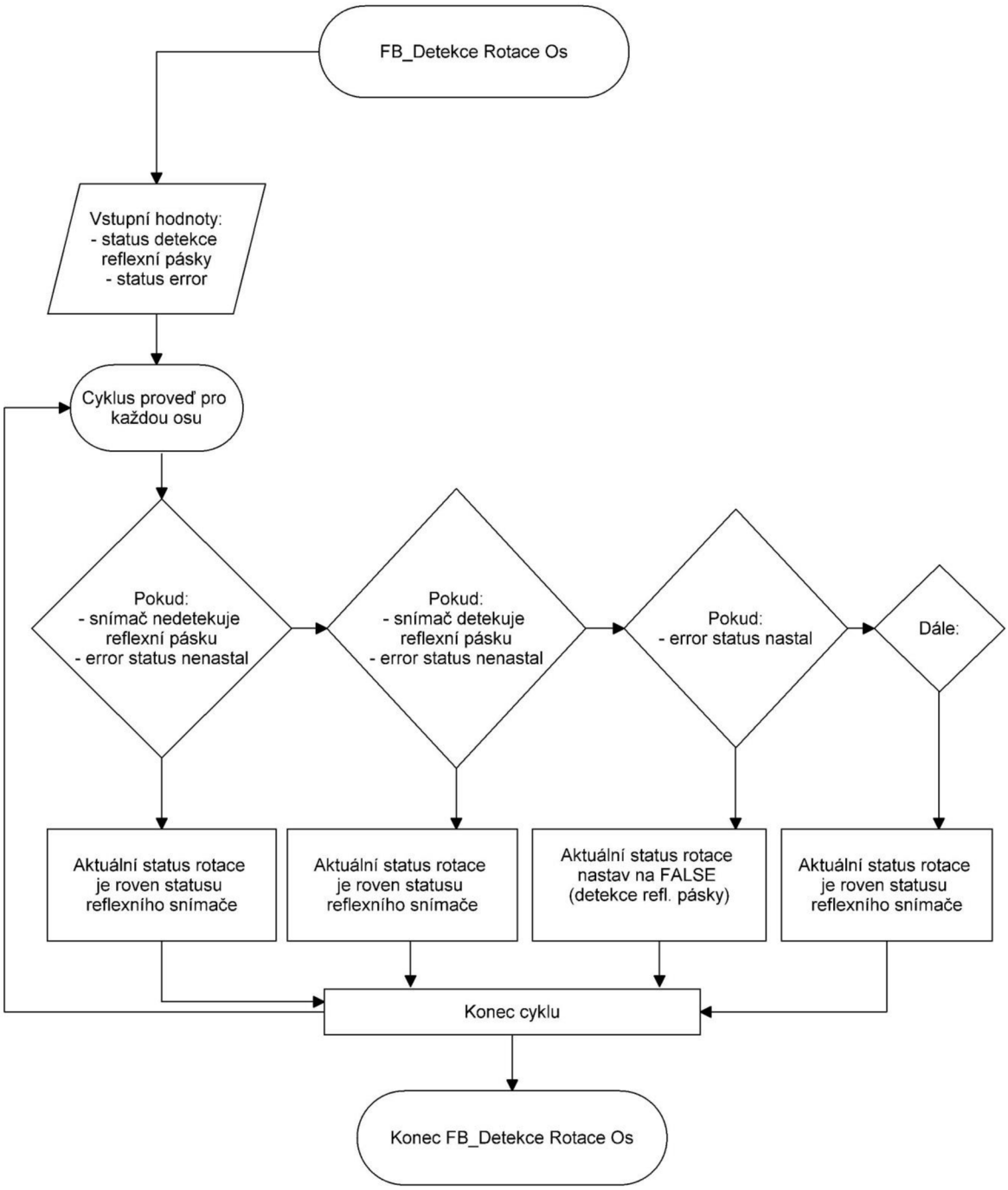
Příloha 1 – Schéma detekce polohy os
Příloha 2 – Schéma detekce polohy figurek
Příloha 3 – Schéma detekce natočení os
Příloha 4 – Výkres rozložení figurek v herním poli
Příloha 5 – Výrobní výkres držáku snímačů DS-01
Příloha 6 – Výrobní výkres držáku snímačů DS-02
Příloha 7 – Výrobní výkres prodloužení tyčí PR-01
Příloha 8 – Výkres sestavy přídavné konstrukce PK-01
Příloha 9 – CD; Součástí CD disku jsou:

- Celý dokument
- Všechny výrobní a doplňující výkresy nad rámec práce
- Knihovna funkčních bloků určující polohu a natočení os protihráče

10.1 Příloha 1 – Schéma detekce polohy os



10.2 Příloha 2 – Detekce polohy figurek



10.3 Příloha 3 – Detekce natočení os