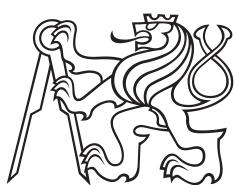


Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky

Rozšíření badmintonového stroje

Petr Kohout

Program: Kybernetika a robotika

Obor: Systémy a řízení

květen 2015

Vedoucí práce: Ing. Pavel Burget, Ph.D.

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Petr Kohout**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Rozšíření badmintonového stroje**

Pokyny pro vypracování:

1. Rozšiřte stávající badmintonový stroj o další dvě osy pro změnu elevace a azimutu.
2. Implementujte tréninkové plány s maximálním využitím možností stroje. Navrhněte a realizujte uživatelské rozhraní a dbejte na jeho snadnou a intuitivní použitelnost.
3. Provedte měření přesnosti úderů v různých situacích.
4. Na základě zkušeností z testování detailně analyzujte průběh točivého momentu na jednotlivých osách.
5. Spolupracujte na vytvoření nové mechanické konstrukce stroje, který bude mít nižší hmotnost a bude snadněji přenositelný.
6. Navrhněte pohony a řídicí jednotku přímo na míru pro novou konstrukci.

Seznam odborné literatury:

- [1] Chan, C. M., Rossmann, J. S. Badminton shuttlecock aerodynamics: synthesizing experiment and theory. Sports Eng (2012) 15:61–71. DOI 10.1007/s12283-012-0086-7
- [2] Programming manual for CPU 1486. B&R Automation.
- [3] Motion control with B&R products. B&R Automation.

Vedoucí: Ing. Pavel Burget, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 20. 2. 2015

Poděkování / Prohlášení

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Ing. Pavlu Burgetovi, Ph.D. za cenné rady a pomoc při řešení problémů. Dále bych rád poděkoval Ing. Milanovi Bartošovi, CSc. za výrobu konstrukce stroje a konzultace k mechanice. V neposlední řadě také děkuji Mgr. Michalovi Turoňovi za možnost testovat stroj na kurtu a za konzultace při tvorbě tréninkových programů. Dále bych rád poděkovat firmě B&R za zapůjčení PLC X20CP3586 a powerlinkové karty V1.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 21. 5. 2015

.....

Abstrakt / Abstract

Tato práce se zabývá rozšířením stávajícího badmintonového stroje o možnost změny elevace a azimutu. Dále se zabývá problematikou automatických tréninkových programů, jejich implementací do stroje, uživatelským rozhraním a testováním. V další části je rozebrán točivý moment na jednotlivých osách a z těchto poznatků jsou odvozeny požadavky na motory právě navrhovaného prototypu. Nakonec jsou shrnuty požadavky na novou konstrukci, a navrhнута řídicí a výkonová jednotka pro řízení nového stroje.

Klíčová slova: Bakalářská práce, badminton, trénink, nadhazování míčků, točivý moment, PLC

This thesis deals with enhancement of the current badminton machine on possibility to change elevation and azimuth. It also deals with the issue of automated training programs and their implementation into the machine, user interface and testing. In the next section is analyzed torque on each axis and from these knowledge are derived requirements for engines to new prototype. Finally there are summarized requirements for the new construction and suggested control and power unit for control new machine.

Keywords: Bachelor thesis, badminton, shuttlecock shooting, training, torque, PLC

Title translation: Enhancement of the badminton machine

Obsah /

1 Úvod	1
2 Původní stav.....	2
2.1 Popis konstrukce	2
2.2 Řízení.....	3
3 Konkurenční řešení.....	4
3.1 Knight Trainer	4
3.2 Apollo Badminton Trainer	5
3.3 Siboasi.....	6
3.4 Porovnání konkurence	7
4 Prototyp 2	8
4.1 Popis konstrukce	8
4.1.1 Ladění podavače	8
4.2 Elektrické zapojení.....	9
4.3 Dynamické parametry	10
4.3.1 Parametry PID regulá- torů polohy.....	10
4.3.2 Elevace	10
4.3.3 Azimut	11
4.3.4 Kotouče	12
4.3.5 Podavač	12
4.4 Měření přesnosti úderů	13
4.4.1 Statické měření střelby rovně před sebe	14
4.4.2 Měření závislosti dole- tu na otáčkách kotoučů..	14
4.4.3 Dynamické měření presnosti při střídání stran	15
4.4.4 Dynamické měření presnosti při střídání vzdálenosti	15
4.4.5 Závěr měření	15
5 Algoritmus řízení	17
5.1 Struktura programu	17
5.2 Výpočet doletu	18
6 Uživatelské rozhraní.....	20
6.1 Volba a nastavení tréninko- vého programu	20
6.2 Chod tréninkového programu .	21
6.3 Manuální režim a servisní obrazovka	22
7 Analýza točivého momentu	24
7.1 Kotouče	24
7.2 Elevace	24
7.3 Azimut	25
8 Tréninkové programy	26
8.1 Zadní část	27
8.2 Střední část	27
8.3 Na síť	28
8.4 Celý kurt	29
8.5 Na raketu.....	29
8.6 Příjem servisu	29
9 Prototyp 3	31
9.1 Návrh konstrukce	31
9.1.1 Kotouče	31
9.1.2 Podavač	31
9.1.3 Nastavení směru	32
9.2 Návrh pohonů	32
9.3 Návrh řídicího systému	32
9.3.1 Výkonová jednotka.....	32
9.3.2 Výpočetní jednotka	34
9.3.3 Ovládání a uživatelské rozhraní	35
10 Závěr	36
Literatura	37
A Seznam zkratek	39
B Obsah přiloženého CD	40

Tabulky / Obrázky

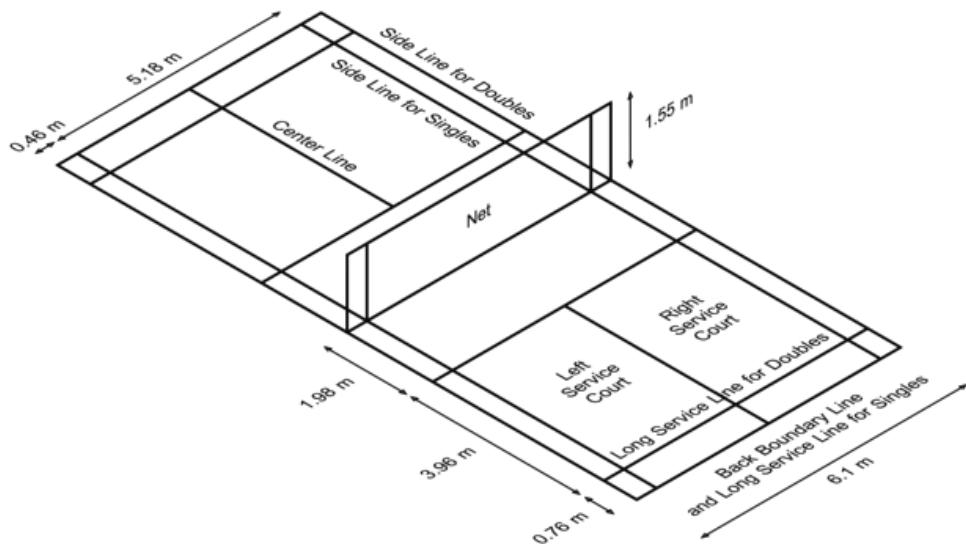
3.1. Porovnání konkurence.....	7	1.1. Badmintonový kurt.....	1
4.1. Naměřené hodnoty při střelbě rovně před sebe do vzdálenosti 4 m.	14	2.1. 3D model prvního prototypu. ...	2
4.2. Naměřené hodnoty při střelbě rovně před sebe do vzdálenosti 9,4 m.	14	2.2. 3D model podavače.....	3
4.3. Měření doletu v závislosti na otáčkách kotoučů.	14	3.1. Knight Trainer [1].	4
4.4. Naměřené hodnoty při střídání stran.	15	3.2. Apollo Badminton Trainer [2]....	5
4.5. Naměřené hodnoty při střídání vzdálenosti.	16	3.3. Siboasi SS-YB-8000 [3].....	6
		4.1. 3D model druhého prototypu.	8
		4.2. Podávací ramena vytištěná na 3D tiskárně.	9
		4.4. PLC B&R X20CP3586 [4].	9
		4.3. Schema zapojení rozvaděče. ...	10
		4.5. Graf pohybu z polohy -45° do polohy 45°	11
		4.6. Graf pohybu z polohy 90° do polohy 100°	11
		4.7. Graf pohybu z polohy 90° do polohy 100° se sníženým zrychlením.	11
		4.8. Graf pohybu z polohy -15° do polohy 10°	11
		4.9. Výkres kotouče.	12
		4.10. Roztočení podavače	13
		4.11. Dynamické měření přesnosti při střídání stran.	13
		4.12. Dynamické měření přesnosti při střídání vzdálenosti.....	13
		4.13. Závislost dostřelu na rychlosti otáčení kotoučů.	15
		5.1. Vývojové prostředí Automation studio.	17
		5.2. Vývojový diagram automatického řízení.	18
		6.1. Vizualizace - Výběr tréninkového programu	20
		6.2. Vizualizace - Nastavení tréninkového programu	21
		6.3. Vizualizace - Chod programu..	21
		6.4. Vizualizace - Manuál	22
		6.5. Vizualizace - Servis	23
		8.1. Badmintonový kurt - zóny dopadu míčků	26
		8.2. Tréninkové programy - střelba do zadní části kurtu	27
		8.3. Tréninkové programy - střelba do střední části kurtu	28

8.4.	Tréninkové programy - obraz na ve střední části kurtu	28
8.5.	Tréninkové programy - střel- ba na/za síť	29
9.1.	Výkonová jednotka	33
9.2.	Raspberry Pi [5]	34

Kapitola 1

Úvod

Badminton je velmi starý a v poslední době populární sport. Jedná se o sport, kdy protivníci, případně dvojice protivníků, pomocí raketky odpalují opeřený míček přes síť. Hra probíhá na kurtu o délce 13,4 m a šířce 5,18 m, u čtyřhry je kurt široký dokonce 6,1 m. Výška sítě je 1,55 m.



Obrázek 1.1. Badmintonový kurt [6]

V roce 1992 se badminton stal olympijským sportem a není divu, jedná se totiž o nejrychlejší raketový sport. Rychlosť smeče přesahuje i 300 km/h. Aby však hráči dokázali podávat takovýto výkon, je zapotřebí tvrdého tréninku. Takový trénink ovšem není náročný pouze pro hráče, ale také pro trenéra. K usnadnění tréninku slouží právě badmintonový stroj. Ten je určen k nadhazování míčků, často v takovém tempu, jaké by bylo pro trenéra dlouhodobě neudržitelné.

U badmintonového stroje jsou kladený vysoké nároky, hlavně na rychlosť podávání míčků a na dynamiku nastavení směru odpalu. Tyto nároky vyplývají z požadovaných tréninkových programů viz. kapitola 8.

Tato bakalářská práce svým obsahem navazuje na bakalářskou práci Ondřeje Maslikiewicze [7] a rozšiřuje možnosti stroje o nastavení azimutu a elevace. Dále se tato práce bude zabývat návrhem nové konstrukce a výběrem nové řídicí jednotky a akčních jednotek, novým uživatelským rozhraním a samotným algoritmem řízení.

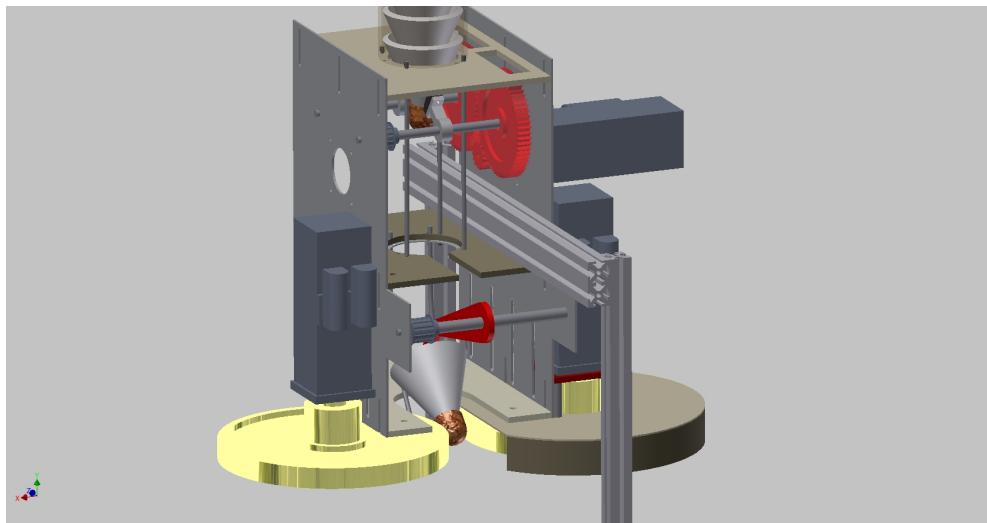
Kapitola 2

Původní stav

V této kapitole je uveden popis badmintonového stroje před započetím úprav provedených v rámci této práce.

2.1 Popis konstrukce

Původní konstrukce byla tvořena dvěma, protiběžně rotujícími kotouči, zásobníkem na badmintonové míčky a podávacím ramenem. Celá konstrukce je vidět na Obrázku 2.1.



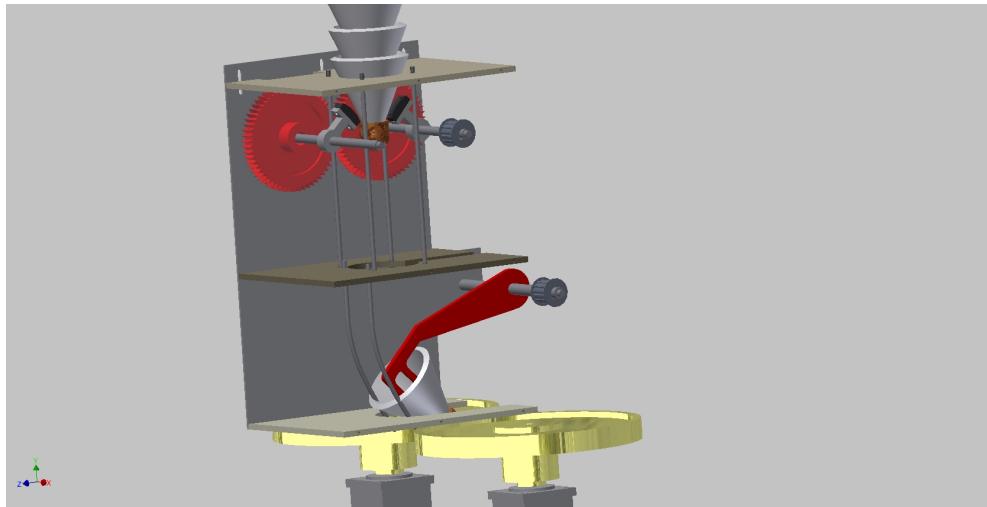
Obrázek 2.1. 3D model prvního prototypu.

Jako pohon kotoučů a podávacího ramene, byly použity synchronní motory firmy B&R 8MSA2S.R0-42-Rev.D0. Tyto motory mají krouticí moment pouze 0,2 Nm, což celkem limituje možné zrychlení. Pro každý kotouč je použit jeden motor a tyto motory byly pak pomocí virtuální převodovky synchronizovány.

Kotouče byly vyrobeny ze silonu a měly průměr 198 mm. Na tyto kotouče byla pomocí kovového mezikruží natažena guma z duše k automobilu. Tímto pogumováním je zvýšeno tření mezi kotouči a míčkem. Bohužel tato guma nebyla přilepena, a proto se při vysokých rychlostech nafukovala.

Podavač je tvořen zásobníkem na míčky, ve tvaru tubusu. Na konci je zúžení, o které se míček při samovolném pohybu dolů zasekně. Pomocí dvou proti sobě umístěných podavačů je míček posunut o patro níže, kde je opět zúžení. V tomto zúžení je poté míček nabráň pomocí otočného ramene, které míček dopraví mezi kotouče (viz Obrázek 2.2)

První prototyp neměl nastavitelný azimut ani elevaci odpalu, a proto byl pro opravdový badmintonový trénink téměř nepoužitelný. Celý tento prototyp sloužil pouze k ověření principu odpalu a technických možností konstrukce, jako je dostřel a možnosti podavače.



Obrázek 2.2. 3D model podavače.

2.2 Řízení

K řízení bylo použito PLC firmy B&R X20CP1485. Toto PLC mělo poměrně malou paměť RAM, z tohoto důvodu mohlo být ovládací rozhraní pouze s rozlišením 320 x 240. Motory byly řízeny pomocí servozesilovačů ACOPOS 8V1010. Tyto servozesilovače měly dvě rozšiřující karty. Karta AC114 slouží pro komunikaci přes sběrnici POWERLINK a zajišťuje komunikace s PLC. Druhá použitá karta je resolverová karta AC122 a slouží k zajištění polohové zpětné vazby od motorů.

Řídicí program byl napsán ve vývojovém prostředí Automation studio. Projekt byl rozdělen do několika částí balíčků. Balíček Hlavni_motor, Prevodovka a Odpalovani sloužily k řízení jednotlivých motorů. Dále v balíčku Ostatni byly funkce starající se o chod celého stroje. Funkce KontrolAut se starala o chod automatických programů a jednalo se o jednoduchý stavový automat. Další funkcí byla funkce KontrolServis, která zajišťovala řízení stroje v manuálním režimu. Opět se jednalo o stavový automat. Ovládací rozhraní bylo implementováno pomocí VNC serveru, mělo rozlišení 320x240 a bylo umístěno v balíčku Vizualizace.

Kapitola 3

Konkurenční řešení

Jako dnes už u téměř každého výrobku, i pro badmintonový stroj existuje konkurence. V této kapitole je uvedeno několik nejvýznamějších konkurenčních výrobků s popisem funkce a parametrů.

3.1 Knight Trainer

Prvním zástupcem konkurence je Knight Trainer (viz Obrázek 3.1). Zařízení je montovalo na stativu s nastavitelnou výškou od 1,98 m do 2,4 m. Stativ je montován na kolečkách, tím je zajištěna mobilita zařízení. Stroj dokáže vystřelit až 2,5 košíku za sekundu, s tím, že zásobník pojme 50 košíků. Zařízení se ovládá pomocí infračerveného ovladače, kterým lze měnit frekvenci střelby a rychlosť vystřeleného míčku. Zařízení neumí automaticky měnit směr ani elevaci. Knight Trainer je možné propojit s druhým zařízením a využít tak možnosti střílet na dvě různá místa a s dvojnásobnou frekvencí.



Obrázek 3.1. Knight Trainer [1].

3.2 Apollo Badminton Trainer

Další zástupce konkurenčních výrobků je Apollo Badminton Trainer zobrazený na obrázku 3.2. Zařízení je opět montováno na stativu s kolečky, u kterého se dá nastavit výška v rozmezí 1,3 m až 1,8 m. Zásobník má kapacitu 250 košíků a zvládá vystřelit jeden košík za 1,2 s. Rozsah na natočení azimutu je 180°. Nastavení elevace zvládá v rozsahu -15° až 65° . Rychlosť výstřelu je nastavitelná až do 209 km/h. Nastavení směru lze provádět manuálně nebo automaticky podle některého ze zvolených tréninkových programů. Lze naprogramovat až 9 tréninkových programů pomocí připojeného PC. Ovládání na kurtu potom probíhá pomocí bezdrátového ovladače. K tomuto stroji lze opět připojit druhý, čímž lze získat dvojnásobnou frekvenci odpalu, tedy 0,65 s a dvojnásobnou kapacitu zásobníku.



Obrázek 3.2. Apollo Badminton Trainer [2].

3.3 Siboasi

Jedná se o stroj britské společnosti Siboasi. Tato společnost dodává několik typů strojů, které se převážně liší pouze možnostmi tréninkových programů. Zařízení je jako ostatní konkurence montováno na stativu s kolečky a integrovaným zvedacím systémem s možností zvednutí do výšky až 2,3 m. Zásobník na míčky má kapacitu 110 košíků. K ovládání stroje slouží LCD display na stroji a dálkové ovládání. Stroj obsahuje 16 předdefinovaných simulačních programů s možností vytváření vlastních u vyšší řady. U levnějšího typu nelze vytvářet vlastní programy. Rychlosť výstřelu je možno nastavit v rozsahu 30 km/h až 150 km/h. Stroj dokáže střílet míček každých 2 až 12 s. K napájení stroje lze použít rozvodnou síť 230 V/50 Hz nebo integrovaný akumulátor s výdrží 4 až 6 h.



Obrázek 3.3. Siboasi SS-YB-8000 [3].

3.4 Porovnání konkurence

	Knight Trainer	Apollo Badminton Trainer	Siboasi
Výška	1,98 m - 2,4 m	1,3 m - 1,8 m	až 2,4 m
Perioda výstřelů	2,5 košíků za s	košík za 1,2 s	košík za 2 s až 12 s
Zásobník	50 košíků	250 košíků	110 košíků
Azimut	Manuálně	Automaticky	Automaticky
Elevace	Manuálně	Automaticky	Automaticky
Rychlosť odpalu		až 209 km/h	30 km/h až 150 km/h
Ovládání	dálkové ovládání	PC dálkové ovládání	LCD display dálkové ovládání
Tréninkové programy	Manuálně	9 programovatelných pomocí PC	16 pevných + programovatelné

Tabulka 3.1. Porovnání konkurence.

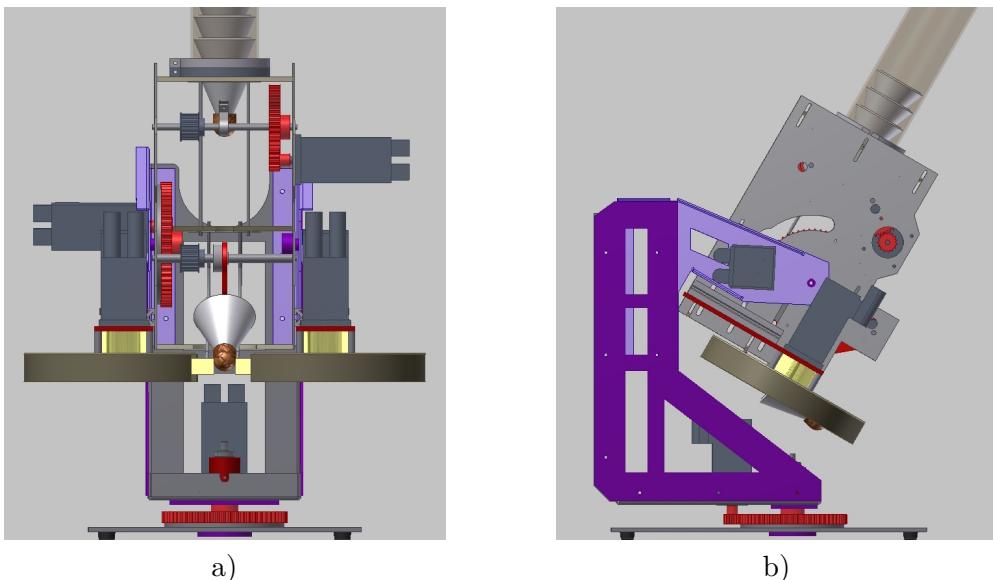
Kapitola 4

Prototyp 2

Druhý prototyp vychází z původního stroje, ke kterému přidává možnost změny elevace a azimutu. Konstrukce je opět tvořena rotujícími kotouči a podávacím rámene.

4.1 Popis konstrukce

Celá konstrukce je vidět na Obrázku 4.1. Původní konstrukce je nyní umístěna na kloubu. Tím je zajištěna možnost nastavovat elevaci výstřelu. Zařízení je také otočné, čímž jsme získali možnost měnit směr, jakým poletí vystřelený míček.

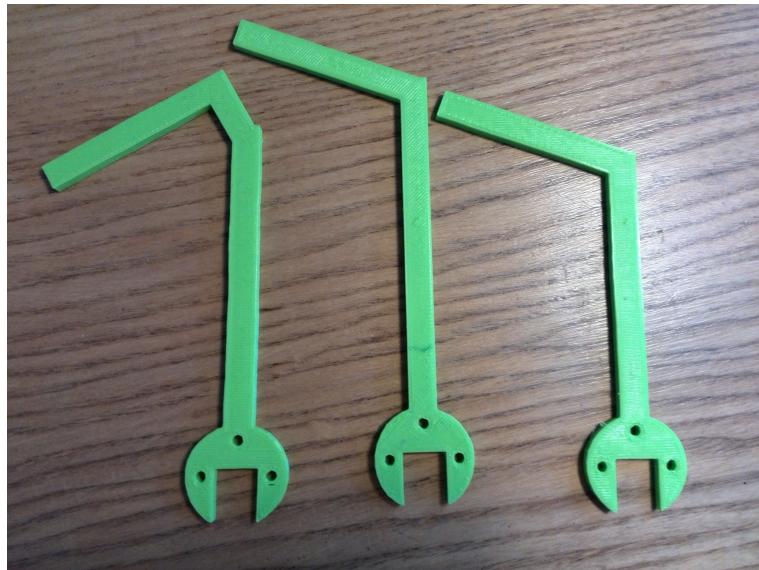


Obrázek 4.1. 3D model druhého prototypu.

Dále bylo třeba vyztužit celou konstrukci, jelikož byla nestabilní a při rychlé změně azimutu se rozkmitala. Při testování na kurtu se objevil další problém, a to neodladěný podavač, který podával míčky takovým způsobem, že z nich kotouče otrhávaly peří a tím míčky ničily. Dále se občas stalo, že se opěrný drát rozkmital a podávací rameno se o něj zachytilo.

4.1.1 Ladění podavače

Po detailním zkoumání podavače bylo rozhodnuto, že tvar podávacího ramene je nevhovující. Pro určení správného tvaru byla využita technologie 3D tisku. Bylo vyzkoušeno několik různých tvarů podávacího ramene (viz Obrázek 4.2). Nakonec byl vybrán tvar, který je uveden na obrázku 4.2 vpravo. Tento tvar byl vybrán proto, že při nabírání košíku nedochází k zasekávání podavače a míček je poté dopraven mezi kotouče vždy stejně, navíc nedochází k otrhávání peří.



Obrázek 4.2. Podávací ramena vytištěná na 3D tiskárně.

4.2 Elektrické zapojení

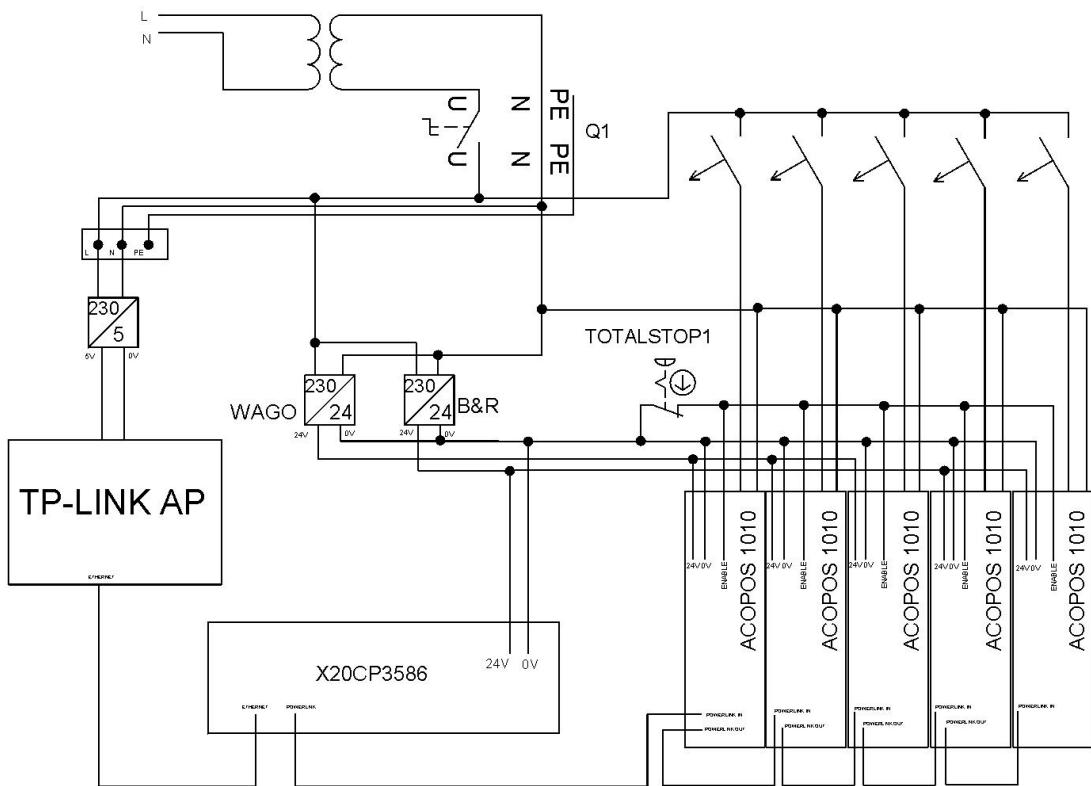
Ke stávajícímu zapojení byl přidán další motor B&R 8MSA2S.R0-42-Rev.D0. K pohonu nastavení elevace je použit silnější motor B&R 8LSA25.R0060D000-0 Rev.C4. Tento silnější motor má krouticí moment 0.6 Nm. I přesto, že byl na nastavení elevace použit silnější motor, tak se tento motor přibližně po minutě přehřál a servozesilovač spadl do chyby. Proto muselo být přidáno závaží, které vyvážilo celý mechanizmus.

Ke stávajícím servozesilovačům ACOPOS 8V1010 byly přidány dva, které byly zapojeny stejným způsobem jako servozesilovače dotedl namontované. Přidané servozesilovače jsou napájeny ze zdroje od firmy B&R. K zařízení byl také přidán access point díky čemuž lze zařízení ovládat pomocí technologie WiFi například z mobilního telefonu. Toto AP je napájeno ze servisní zásuvky. Kompletní zapojení rozvaděče po rozšíření je na obrázku 4.3.

Zbytek zapojení zůstal stejný jako na počátku práce. Stroj je tedy pořád napájen ze sítě 230 V/50 Hz. Servořadiče ACOPOS v sobě mají velký filtrační kondenzátor, který je zapojen proti zemnicímu vodiči. Při nabíjení tohoto kondenzátoru by tudíž docházelo k odpojování obvodu proudovým chráničem, proto je napájení realizováno přes oddělovací transformátor.



Obrázek 4.4. PLC B&R X20CP3586 [4].



Obrázek 4.3. Schema zapojení rozvaděče.

Za transformátorem je umístěn hlavní vypínač, kterým se vypíná napájení stroje. Na silové napájení jsou přes jističe připojeny silové vstupy servozesilovačů ACOPoS. Posledním zařízením připojeným na 230 V jsou zdroje stejnosměrného napětí 24 V. Zdroje jsou zde dva, jeden od firmy B&R, kterým je mimo nově připojených servozesilovačů napájeno PLC B&R X20CP3586 (Obrázek 4.4). Druhým zdrojem je zdroj WAGO, ten napájí zbylé tři servozesilovače. Nulový potenciál obou zdrojů je spojený a přes rozpínací tlačítko TOTAL STOP je přiveden na vstupy ENABLE všech servozesilovačů. Servozesilovače komunikují s řídicím systémem pomocí sběrnice POWERLINK.

4.3 Dynamické parametry

K určení dynamických parametrů bylo provedeno několik experimentů. Cílem bylo zjistit maximální možnosti stroje a porovnat je s požadavky, které vyplývají z kapitoly 8.

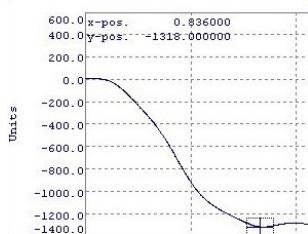
4.3.1 Parametry PID regulátorů polohy

Dynamické parametry závisí na nastavení PID regulátoru polohy v servozesilovačích. Po přidání motorů pro nastavení azimutu a elevace bylo potřeba tyto parametry regulátorů nastavit. Parametry jsem se pokoušel ladit pomocí Zieger-Nicholsovy metody, ale vzhledem k omezenému rozsahu pohybu nebylo možno systém patřičně rozkmitat. Z tohoto důvodu jsem přistoupil k experimentálnímu nastavení konstant.

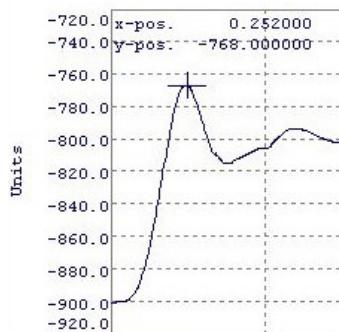
4.3.2 Elevace

Z obrázku 4.5 vyplývá, že pohyb z polohy -45° do polohy 45° trval 0,8 s. Tento pohyb je téměř bez překmitu, bohužel při pohybu kratším než 20° má motor moc malý kroutící

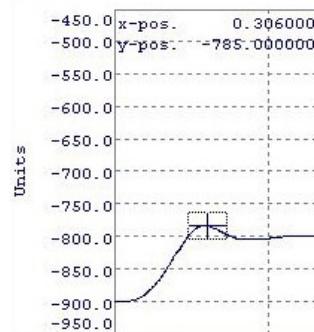
moment a tak nezvládne stroj ubrzdit a dochází k velkému překmitu, což je vidět na obrázku 4.6. V tomto případě trvá pohyb do ustálení přibližně 0,75 s. Proto je potřeba při takto krátkém přesunu snížit hodnotu zrychlení. Při snížení zrychlení o $60 \frac{RPM}{s}$ se zmenší překmit a doba do ustálení se zkrátí přibližně na 0,5 s.



Obrázek 4.5. Graf pohybu z polohy -45° do polohy 45° .



Obrázek 4.6. Graf pohybu z polohy 90° do polohy 100° .

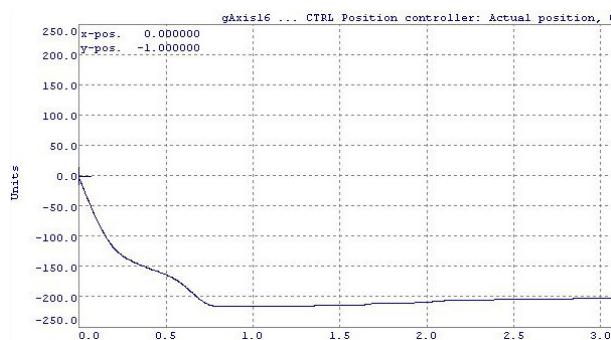


Obrázek 4.7. Graf pohybu z polohy 90° do polohy 100° se sníženým zrychlením.

Z požadavků na tréninkové programy (viz Kapitola 8) vyplývá, že maximální požadovaná změna elevace je asi 45° . Tuto změnu stroj zvládne přibližně za 0,5 s.

■ 4.3.3 Azimut

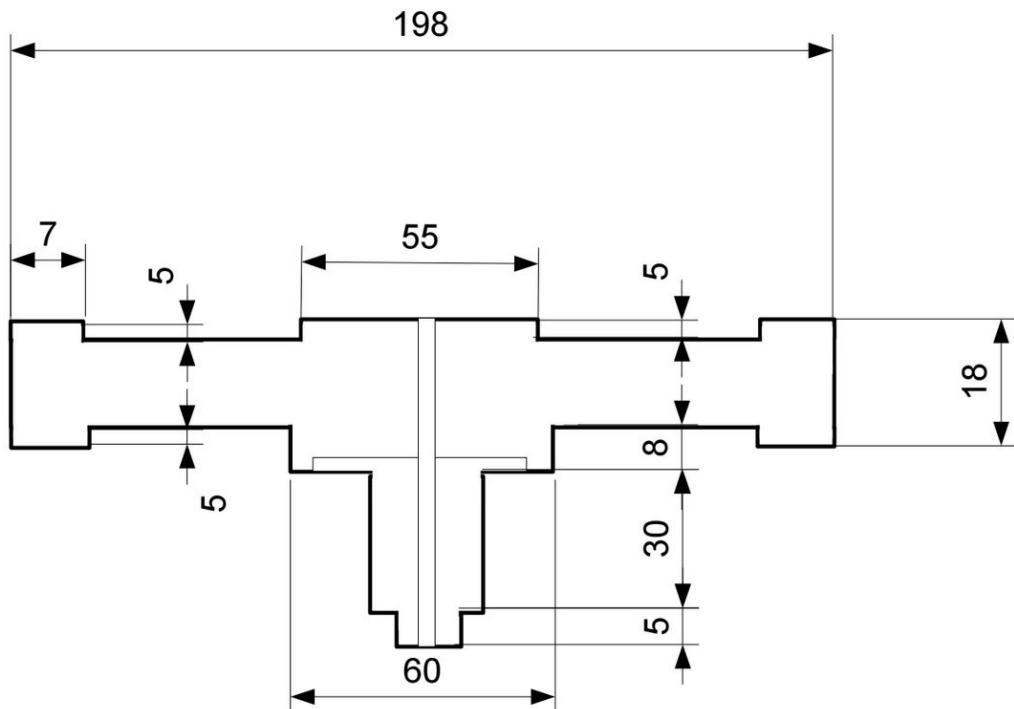
Dynamické parametry azimutové osy jsou o něco horší, celý stroj je totiž celkem težký a takto slabý motor nedokáže zajistit požadované zrychlení. Motor pro nastavení azimutu má pouze 0,2 Nm, což nestačí ani pro udržení polohy, proto motor dokáže pracovat přibližně minutu, poté již je teplota motoru kritická a servozesilovač motor odpojí. Při přesunu o 25° dostáváme hodnotu 2 s. Bohužel pohyb je velmi pomalý z důvodu malého zrychlení (viz Obrázek 4.8), při nastavení vyššího zrychlení se motor přehřeje hned po několika provedených pohybech s tímto zrychlením.



Obrázek 4.8. Graf pohybu z polohy -15° do polohy 10° .

■ 4.3.4 Kotouče

Požadavky na zrychlení kotoučů, opět vyplývají z kapitoly 8. V nejrychlejším režimu je potřeba měnit otáčky v rozsahu přibližně 2000 RPM za sekundu. Tuto změnu otáček by, v ideálním případě, bylo potřeba stihnout za 0,3 s. Teoretické parametry vyplývají z momentu setrvačnosti kotouče a motoru a točivého momentu motoru. Moment setrvačnosti kotouče vyplývá z rozměrů (viz Obrázek 4.9) a hmotnosti kotouče. K tomuto momentu setrvačnosti musíme připočítat moment setrvačnosti rotoru.



Obrázek 4.9. Výkres kotouče.

Moment setrvačnosti kotouče byl vypočítán pomocí programu Inventor a vyšel 2003,4 $kg \cdot mm^2$. Z dokumentace k motoru bylo zjištěno, že moment setrvačnosti rotoru je 60 $kg \cdot mm^2$. Maximální zrychlení je dán vztahem (1).

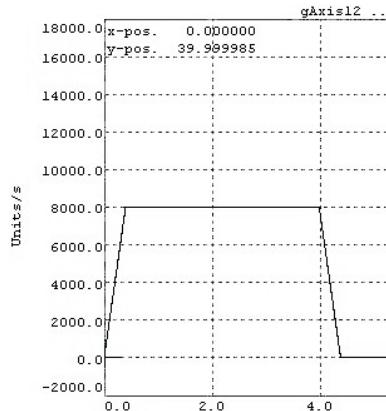
$$\alpha = \frac{M}{J} \quad (1)$$

Kde α je úhlové zrychlení, M je moment síly a J je moment setrvačnosti. Moment síly dostáváme z dokumentace k motoru, kde jsme zjistili, že maximální stálý moment je 0,2 Nm a maximální špičkový moment je 0,8 Nm. Vzhledem k tomu, že rychlosť otáčení měníme pouze jednou během jednoho výstřelu a v případě tohoto prototypu je maximální perioda výstřelu okolo 1 s, můžeme počítat s momentem síly blížícím se maximálnímu špičkovému zatížení. V našem případě použijeme 0,7 Nm. Jako maximální zrychlení tedy po dosazení do vztahu (1) dostáváme hodnotu 339,25 $rad \cdot s^{-2}$.

■ 4.3.5 Podavač

Požadavky na podavač, které jsou dány v kapitole 8, jsou velmi náročné. V nejrychlejším režimu je potřeba střílet 3 míčky za vteřinu. Této rychlosti nejsme schopni dosáhnout, pokud budeme po každém výstřelu podavač zastavovat, ale můžeme jí dosáhnout pouze

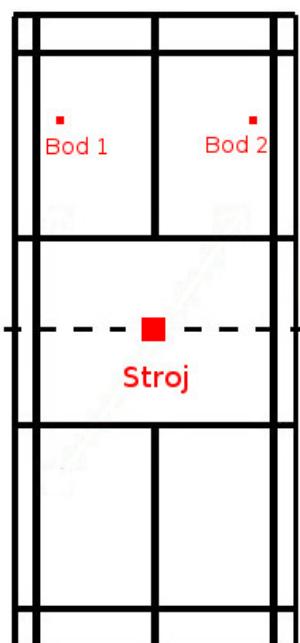
v případě, že podavač roztočíme na potřebnou rychlosť a vystřílíme všechny míčky najednou. V tomto režimu chvíli trvá než se podavač roztočí na požadovanou rychlosť (viz Obrázek 4.10). Maximální zrychlení je opět dán momentem setrvačnosti a točivým momentem motoru.



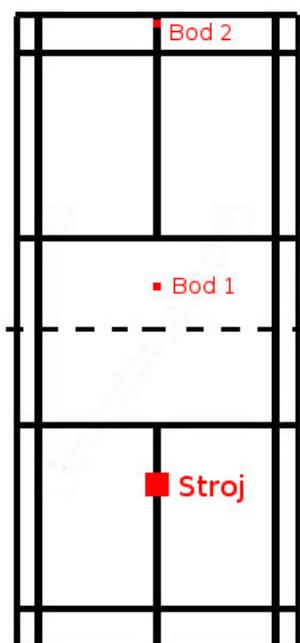
Obrázek 4.10. Roztočení podavače.

4.4 Měření přesnosti úderů

Úkolem tohoto měření bylo zjistit přesnost úderů v různých situacích. Samotné měření bylo rozděleno na čtyři části. V každé z těchto částí bylo určeno několik poloh, do kterých se stroj trefoval a byla měřena vzdálenost dopadu míčku od cílového bodu. Každé měření bylo provedeno několikrát, aby se eliminovala chyba měření. Cílem těchto měření bylo zjistit, zda je výpočet dostřelu, použitý v automatických režimech, dostatečně přesný a zjistit závislost doletu míčku na otáčkách kotoučů.



Obrázek 4.11. Dynamické měření přesnosti při střídání stran.



Obrázek 4.12. Dynamické měření přesnosti při střídání vzdálenosti.

■ 4.4.1 Statické měření střelby rovně před sebe

V prvním měření byl určen pouze jeden bod a stroj střílel přímo před sebe. Určená vzdálenost byla 4 m při prvním měření a 9,4 m při druhém měření. Podle teoretického výpočtu dostřelu 4 m odpovídají otáčky 1000 RPM při elevaci 45°. Dostřelu 8 m odpovídají otáčky 3500 RPM. Tímto se určí závislost rozptylu na konkrétním míčku.

Míček	Vzdálenost od cílového bodu [cm]
1	25
2	25
3	35
4	27
5	25

Tabulka 4.1. Naměřené hodnoty při střelbě rovně před sebe do vzdálenosti 4 m.

Průměrná vzdálenost dopadu míčku od cílového bodu při střelbě do vzdálenosti 4 m je 27,4 cm, rozptyl naměřených hodnot je $14,44 \text{ cm}^2$.

Míček	Vzdálenost od cílového bodu [cm]
1	13
2	20
3	45
4	13
5	40

Tabulka 4.2. Naměřené hodnoty při střelbě rovně před sebe do vzdálenosti 9,4 m.

Průměrná vzdálenost dopadu míčku od cílového bodu při střelbě do vzdálenosti 9,4 m je 26,2 cm, rozptyl naměřených hodnot je $186,16 \text{ cm}^2$.

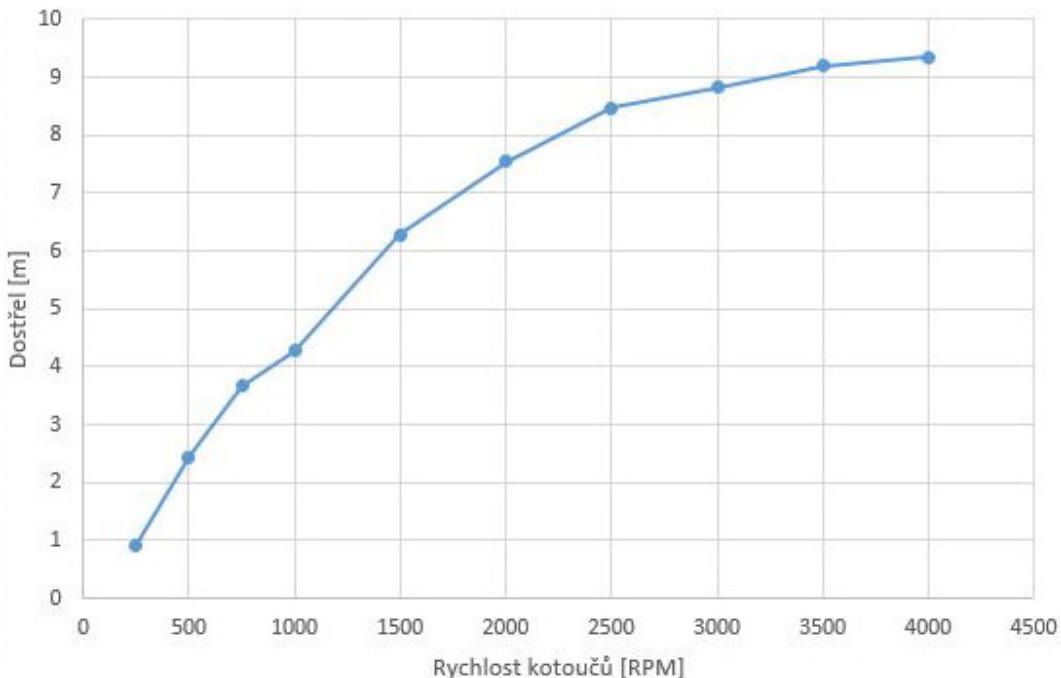
Jak je vidět z naměřených hodnot, tak při střelbě do větší vzdálenosti se zvětšuje také rozptyl a to z toho důvodu, že při zvyšující se době letu se více projeví rozdíly mezi jednotlivými košíky.

■ 4.4.2 Měření závislosti doletu na otáčkách kotoučů

Otáčky [RPM]	Dolet [m]
250	0,93
500	2,435
750	3,675
1000	4,27
1500	6,28
2000	7,54
2500	8,47
3000	8,83
3500	9,2
4000	9,35

Tabulka 4.3. Měření doletu v závislosti na otáčkách kotoučů.

Závislost dostřelu na otáčkách kotoučů je uvedena na obrázku 4.13.



Obrázek 4.13. Závislost dostřelu na rychlosti otáčení kotoučů.

Míček	Vzdálenost od bodu 1 [cm]	Vzdálenost od bodu 2 [cm]
1	12	5
2	15	6
3	5	0
4	2	14
5	8	2

Tabulka 4.4. Naměřené hodnoty při střídání stran.

■ 4.4.3 Dynamické měření přesnosti při střídání stran

V druhém měření byly určeny dva body vzdálené 4,5 m od sebe a ve vzdálenosti 4 m od sítě (viz Obrázek 4.11). Stroj střídal strany a střílel postupně na oba body.

V toto měření byla měřena přesnost střelby při střídání stran. Průměrná vzdálenost dopadu míčků od bodu 1 je 6,4 cm a od bodu 2 5,4 cm. Rozptyl jednotlivých měření je byl u bodu 1 $23,44 \text{ cm}^2$ a u bodu 2 $23,04 \text{ cm}^2$.

■ 4.4.4 Dynamické měření přesnosti při střídání vzdálenosti

Poslední měření mělo za úkol zjistit přesnost střelby při změně vzdálenosti, do které stroj střílí. Opět byly zvoleny dva body rovně před strojem. První bod byl ve vzdálenosti 4,5 m a druhý ve vzdálenosti 8 m (viz Obrázek 4.12).

Průměrná vzdálenost dopadu míčků od bodu 1 je 2 cm a od bodu 2 21 cm. Rozptyl od bližšího bodu byl $2,8 \text{ cm}^2$ a od vzdálenějšího $224,8 \text{ cm}^2$.

■ 4.4.5 Závěr měření

Z naměřených hodnot vyplývá že vztah použitý pro výpočet doletu je pro naše účely dostatečně přesný. Při statickém měření bylo zjištěno jaký vliv na přesnost mají různé míčky a z naměřených hodnot vyplývá, že s narůstající vzdáleností se zvyšuje rozptyl

Míček	Vzdálenost od bodu 1 [cm]	Vzdálenost od bodu 2 [cm]
1	2	5
2	5	32
3	0	40
4	2	26
5	1	2

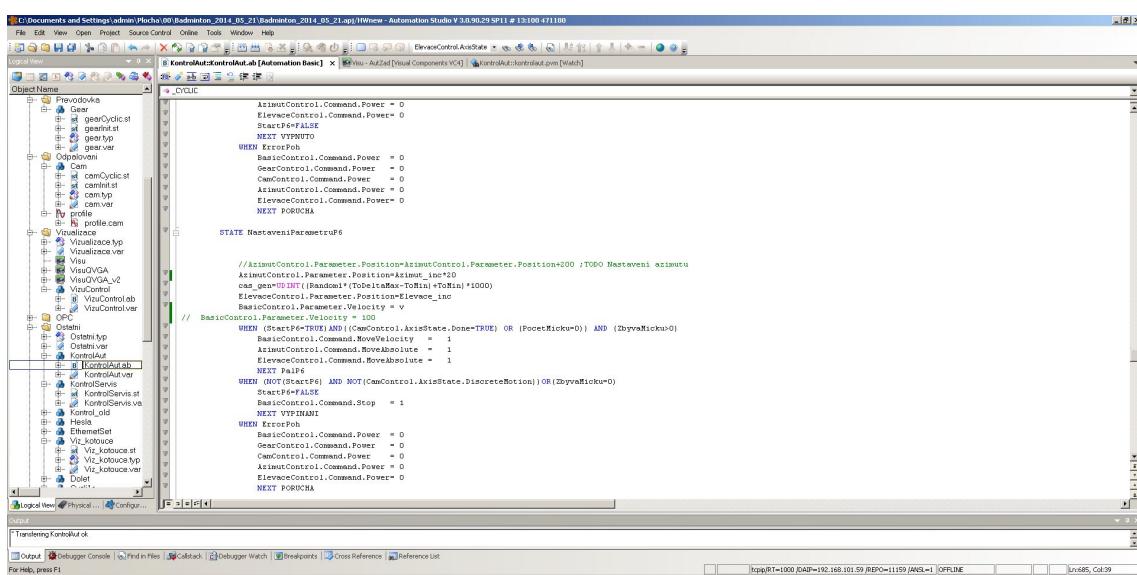
Tabulka 4.5. Naměřené hodnoty při střídání vzdálenosti.

dopadajících míčků. Tento rozptyl míčků se zvyšuje protože při střelbě na větší vzdálenost se zvýší doba letu a projeví se jakýkoliv rozdíl mezi košíky. Při střídání stran je rozptyl okolo jednotlivých bodů téměř stejný. Ze změrené závislosti doletu na otáčkách motoru je vidět že od otáček 3500 RPM se dostřel zvyšuje už minimálně.

Kapitola 5

Algoritmus řízení

V této kapitole je popsána struktura řídicího programu. Použité PLC se dá programovat v několika jazycích, já k programování zvolil strukturovaný text a B&R Automation Basic. K programování je použit software Automation studio (viz Obrázek 5.1). Dále je zde popsán výpočet teoretického doletu míčku a popis vývojového diagramu automatického režimu.



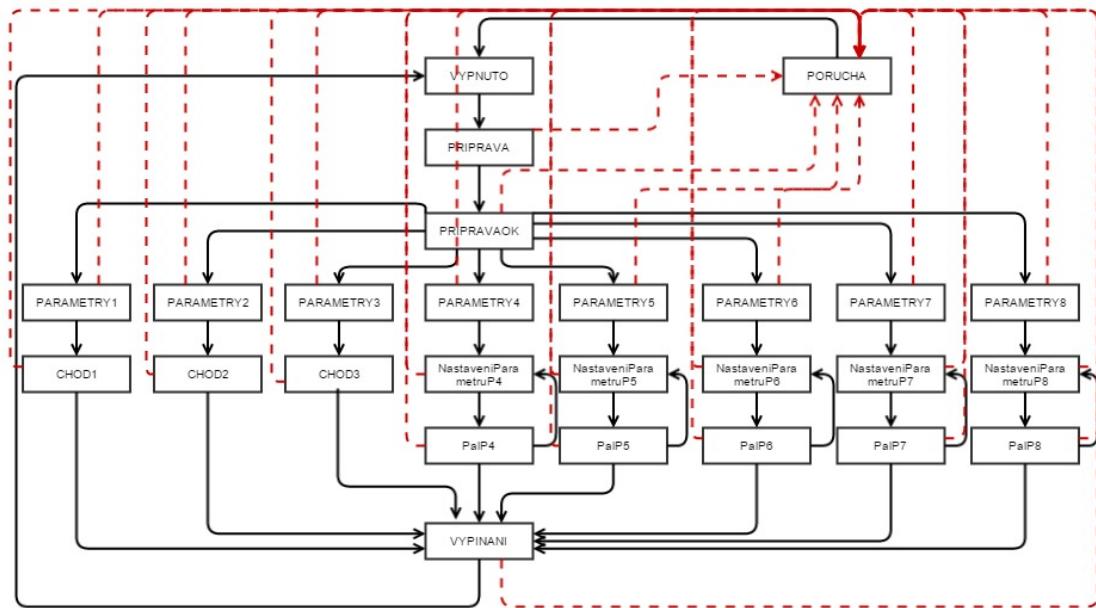
Obrázek 5.1. Vývojové prostředí Automation studio.

5.1 Struktura programu

Samotný program je rozdělen do balíčků a funkcí. Balíčků je velké množství a slouží zde pro inicializaci a řízení motorů. Všechny řídicí funkce jsou v balíčku Ostatní. Nejdůležitější funkcí je KontrolAut. Tato funkce se automaticky volá každých 100 ms a slouží k řízení odpalu při automatických tréninkových programech. Jedná se o stavový automat, jehož struktura je uvedena na obrázku 5.2. V této funkci jsou také přednastaveny počáteční parametry jednotlivých programů.

Ve stavu VYPNUTO je stroj v klidu a čeká na spuštění některého z programů. Po nastartování tréninkového programu přechází do stavu PRIPRAVA, kde dochází ke spuštění motorů a vynulování relativních počítadel polohy. Po úspěšném spuštění motorů následuje stav PRIPRAVAOK, kde je spuštěna virtuální převodovka a stavový automat se dělí na jednotlivé programy. Každý tréninkový program má tři stavy. První stav například PARAMTRY4 pro čtvrtý tréninkový program slouží k inicializaci startovních parametrů programu. Dalším stavem je NastaveniParametruP4, který vypočítá nové hodnoty parametrů pro další výstřel. Po tomto stavu následuje stav PalP4 ve kterém dojde k odpalu míčku a přechází se zpět k NastaveniParametruP4. Tyto stavy

jsou ale pouze u nově přidaných tréninkových programů, u náhodných programů, které byly obsaženy v prvním prototypu je pouze stav PARAMETRY a CHOD. Nakonec jsou zde stavy VYPINANI a PORUCHA. Stav VYPINANI slouží k vypnutí probíhajícího tréninkového programu. Dojde k zastavení všech pohonů a vypnutí motorů. Do stavu PORUCHA se stroj dostane při jakékoli chybě pohonů, na diagramu znázorněno červenými přerušovanými šipkami.



Obrázek 5.2. Vývojový diagram automatického řízení.

5.2 Výpočet doletu

Pro většinu tréninkových programů je naprosto klíčová znalost doletu míčku v závislosti na nastavení rychlosti kotoučů a elevace. Trajektorie letu košíku je balistická křivka. Při letu košíku navíc dochází k jeho přetočení a oscilacím, proto je popis trajektorie letu velmi složitý. Popisem křivky letu se zabývají například práce [8] a [9]. Bohužel nejsou známy parametry popisující chování míčku ve vzduchu, proto nelze spočítat dostřel přesně. Dalším problémem je rozdíl mezi různými míčky, při výpočtu by bylo potřeba zohlednit například i materiál nebo stáří míčku. V neposlední řadě je nutné znát i rychlosť košíku při opuštění stroje. Tato rychlosť se teoreticky rovná obvodové rychlosťi kotoučů, ale z důvodu prokluzu míčku mezi kotouči bude vždy menší. Proto nikdy nespočítáme dostřel přesně a výpočet bude vždy jen přibližný. V práci [10] je odvozen vztah (1) který celkem dobře approximuje dolet míčku v závislosti na počáteční rychlosťi, nastavené elevaci a aerodynamické délce. Je zde také odvozeno že při vysokých rychlosťech už dolet míčku nezávisí na počáteční rychlosťi. Tento jev se nazývá „aerodynamická zed“:

$$x = \frac{L \cdot \cos(\varphi)}{2} \cdot \ln \left(1 + 4 \cdot \left(\frac{v_0}{v_{inf}} \right)^2 \cdot \sin(\varphi) \right) \quad (1)$$

kde x je vzdálenost, ve které se míček nachází ve stejně výšce, z jaké byl vystřelen v metrech. L je aerodynamická délka opět v metrech. Dále je zde φ , což je počáteční úhel

elevace. V neposlední řadě vztah obsahuje počáteční rychlosť košíku v_0 a maximální pádovou rychlosť v_{inf} . Obě rychlosťi se dosazují v $m \cdot s^{-1}$.

Odvozením konkrétní trajektorie míčku se zabývá práce [8] kde je uvedeno také porovnání ruzných typů košíků a jejich trajektorií.

Parametr, který je závislý na konkrétním košíku, je aerodynamická délka L. V tomto parametru se projevuje každá nesymetrie míčku. Parametr je také závislý na váze, materiálu a opotřebení košíku. Hodnoty tohoto parametru byly experimentálně odvozeny v práci [9]. V této práci je odvozeno, že košíky vyrobené z peří mají tuto délku přibližně $L=6,5$ m a plastové košíky přibližně $L=7$ m. Z těchto hodnot vyplývá, že míčky vyrobené z plastu jsou rychlejší a mají větší dolet.

Změřené údaje popisující možnosti stroje jsou uvedeny v kapitole 4.4.

Kapitola 6

Uživatelské rozhraní

Oproti původnímu prototypu bylo také rozšířeno uživatelské rozhraní. Původní vizualizace byla z důvodu omezené paměti použitého PLC pouze v rozlišení 320 x 240. I přesto, že PLC použité v druhém prototypu má dostatek paměti pro spuštění vizualizace v rozlišení FullHD, zvolil jsem rozlišení nižší, a to pouze 800 x 600. Takovéto rozlišení jsem zvolil hlavně proto, aby bylo možné stroj ovládat i pomocí mobilního telefonu. Celá vizualizace je vytvořena ve dvou jazycích, a to v češtině a angličtině. Nastavení jazyka lze provést v servisní obrazovce. Na každé obrazovce je v pravém horním rohu tlačítko pro zobrazení nápovědy k dané obrazovce a tlačítko s varováním na chybu stroje.

6.1 Volba a nastavení tréninkového programu

Pro běžný provoz je použit automatický režim. V tomto režimu je na výběr několik automatických režimů, které je možno přepínat a nastavovat parametry pomocí vizualizace. Popis jednotlivých tréninkových programů je uveden v kapitole 8.

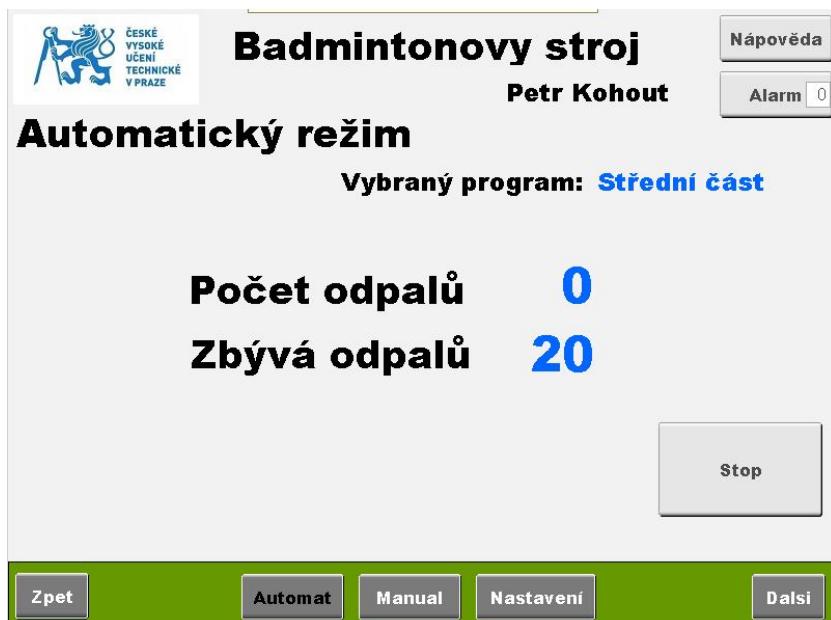


Obrázek 6.1. Vizualizace - Výběr tréninkového programu.

Po vybrání tréninkového programu je možnost nastavit jednotlivé parametry programu jako je rychlosť kotoučů, perioda odpalu nebo například počet míčků k odpalu (viz Obrázek 6.2).



Obrázek 6.2. Vizualizace - Nastavení tréninkového programu.



Obrázek 6.3. Vizualizace - Chod programu.

6.2 Chod tréninkového programu

Po spuštění některého z automatických režimů je po celou dobu tréninku zobrazena obrazovka, na které je ukázán počet odpálených a zbývajících míčků. Z této obrazovky je také možno kdykoliv trénink ukončit.

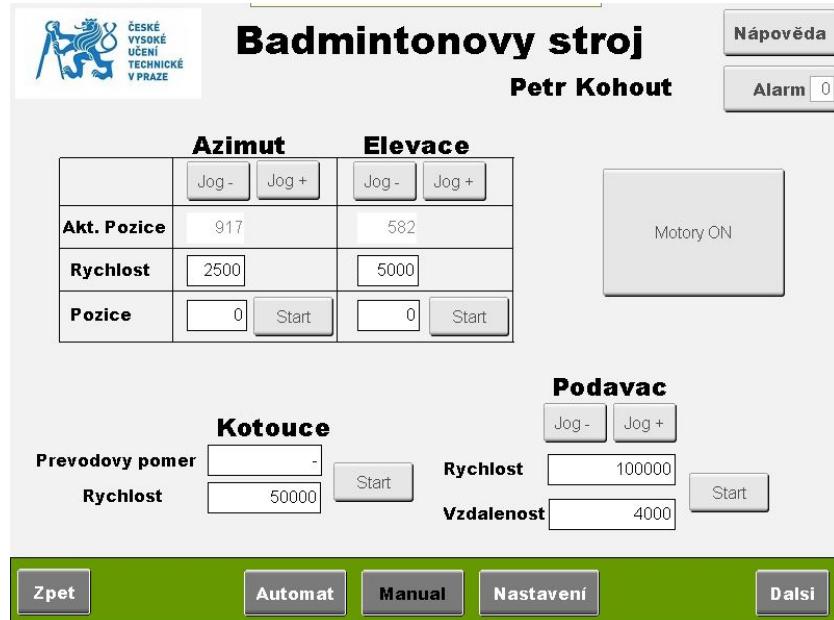
Z Obrázku 6.3 je vidět, že jsou zde i některé základní parametry režimu.

Při chodu tréninkového programu je potřeba aby se trenér ani hráč nemuseli zabývat případnými chybami pohonů. Proto muselo být vyřešeno jak se z takovéto chyby automaticky zotavit. O zotavení z chyby se stará fukce pro automatické potvrzování chyby. Tato funkce je implementována v obsužné funkci ke každému z motorů. Pokud dojde

v odstavení některého z motorů kvůli chybě a zároveň je požadavek na pohyb tohoto motoru, automaticky se spustí funkce, která chybu potvrdí a pokusí se znovu spustit motor. V případě že se automatické potvrzení povede, tak uživatel zaznamená pouze velmi krátký výpadek.

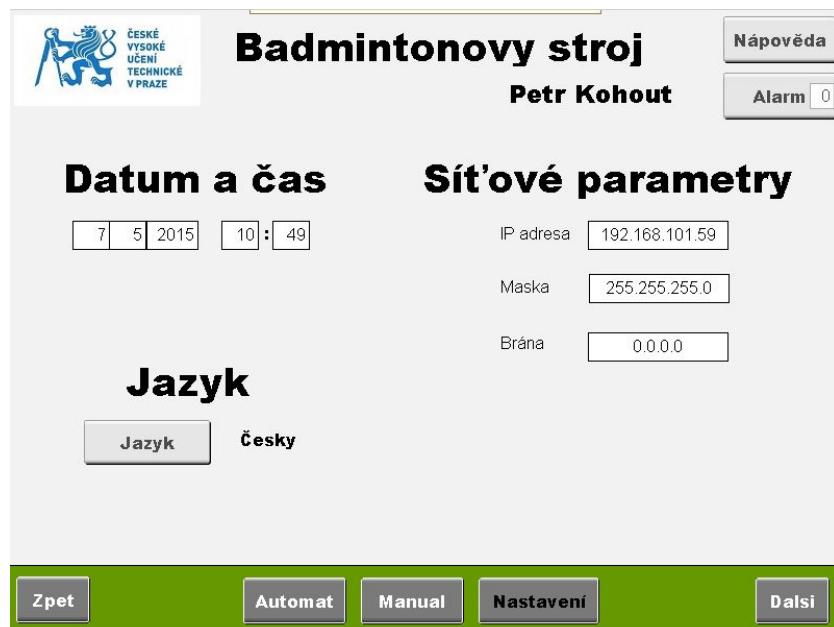
6.3 Manuální režim a servisní obrazovka

Manuální režim slouží k ručnímu nastavení směru, roztočení motorů a k provedení ručního odpalu. Tento režim slouží například k měření parametrů stroje.



Obrázek 6.4. Vizualizace - Manuál.

Servisní obrazovka Obrázek 6.5 je určena k nastavení parametrů PLC a vizualizaci. Je zde možnost přepnout mezi anglickým a českým jazykem, dále je zde možnost nastavit čas a síťové parametry PLC. Síťové parametry by měly být nastaveny s ohledem na nastavení AP TP-Link, aby nenastalo to, že by byl stroj v jiné podsíti než AP, čímž by se znemožnila komunikace.



Obrázek 6.5. Vizualizace - Servis.

Kapitola 7

Analýza točivého momentu

Obsahem této kapitoly je podrobná analýza točivého momentu na jednotlivých osách. Tato analýza je potřeba ke správné volbě motorů pro nový prototyp.

7.1 Kotouče

Jak již bylo uvedeno v kapitole 4, maximální rychlosť kotoučů, ktorá má smysl, je 4000 RPM. Při vyšších rychlostech otáčení totiž míček při dotyku s povrchem kotouče prokluzuje a rychlosť odpalu se nezvyšuje. Dále z kapitoly 8 vyplývá, že je potřeba vešteré změny rychlosťi stihnout za 1 s. Velký moment je zapotřebí pouze při změně rychlosťi otáčení kotoučů. Největší změny jsou při střídání střelby do zadní části kurtu a blízko sítě. Při takovémto režimu dochází ke změně otáček asi o 2000 RPM. Potřebný točivý moment motoru vypočítáme podle vzorce (1).

$$M = \alpha \cdot J \quad (1)$$

kde M je moment síly potřebný pro požadované zrychlení v Nm. J je moment setrvačnosti kotouče a rovná se $2063,4 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ (viz kapitola 4), je potřeba jej dosazovat v jednotce $\text{kg} \cdot \text{mm}^2$ a α je úhlové zrychlení, které vyplývá z uvedených hodnot a je rovno $209,44 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$. Úhlové zrychlení je potřeba dosazovat v $\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$.

Po převedení na správné jednotky a dosazení do vztahu (1) je tedy minimální požadovaný točivý moment motoru $0,432 \text{ Nm}$.

7.2 Elevace

Pro výpočet momentu potřebného pro pohyb osy elevace neznáme přesnou hodnotu momentu setrvačnosti. Tu ale můžeme přibližně odvodit ze zkušeností se strojem a úhlového zrychlení, které stroj zvládá. Maximální zrychlení, které bylo vyzkoušeno a motor jej ještě zvládá, je $450 \frac{\text{RPM}}{\text{s}}$, tedy $\alpha = 47,12 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2}$. Použitý motor má moment $0,6 \text{ Nm}$, špičkově až $2,4 \text{ Nm}$. Počítat budeme s momentem $M=2 \text{ Nm}$. Moment setrvačnosti můžeme odhadnout dosazením do vzorce (2).

$$\alpha = \frac{M}{J} \quad (2)$$

Po dosazení dostáváme hodnotu $J = 42444,8 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$. Tato hodnota je samozřejmě pouze velmi hrubým odhadem dané veličiny, ale pro naše účely je tento odhad dostačující.

Z kapitoly 8 dostaneme nejvyšší změnu elevace, a za jaký čas je potřeba tuto změnu stihnout. Nejnáročnejší na změnu elevace bude opět režim při kterém je zapotřebí pokrýt celý kurt, zde je nutné stíhat měnit elevaci v rozsahu asi 45° az 65° , tedy o 20° . Tuto změnu je potřeba provést za 1 s. Požadované úhlové zrychlení určíme ze vztahu pro dráhu rovnoměrně zrychleného pohybu (viz rovnice (3)).

$$s = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot t^2 \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{2 \cdot s}{t^2} \quad (4)$$

Po dosazení do vztahu (4) dostáváme požadované zrychlení $80^\circ \cdot s^{-2}$ tedy $1,396 rad \cdot s^{-2}$. Toto požadované zrychlení není nijak kritické a po dosazení do vztahu (1) dostáváme minimální požadovaný točivý moment motoru 0,06 Nm.

7.3 Azimut

Podobně jako u elevace tak ani u azimu neznáme přesnou hodnotu momentu setrvačnosti, takže jej musíme odhadnout stejným způsobem. Nastavené zrychlení, které stroj ještě zvládá, i když krátkodobě, je $45 \frac{RPM}{s}$ to znamená $4,71 rad \cdot s^{-2}$. Na osu azimutu je použit slabší motor než na osu elevace z toho důvodu, že silnější motor má větší rozměry a tak se motor do mechanické konstrukce nevezde. Použitý motor má stálý moment 0,2 Nm a špičkový 0,8 Nm. Vzhledem k tomu, že motor vydrží pracovat jen krátkodobě, tak budeme pracovat se špičkovým momentem.

Opět dosadíme do vztahu (2) a dostáváme hodnotu momentu setrvačnosti $169851,4 kg \cdot mm^2$. Opět se ale jedná pouze o hrubý odhad.

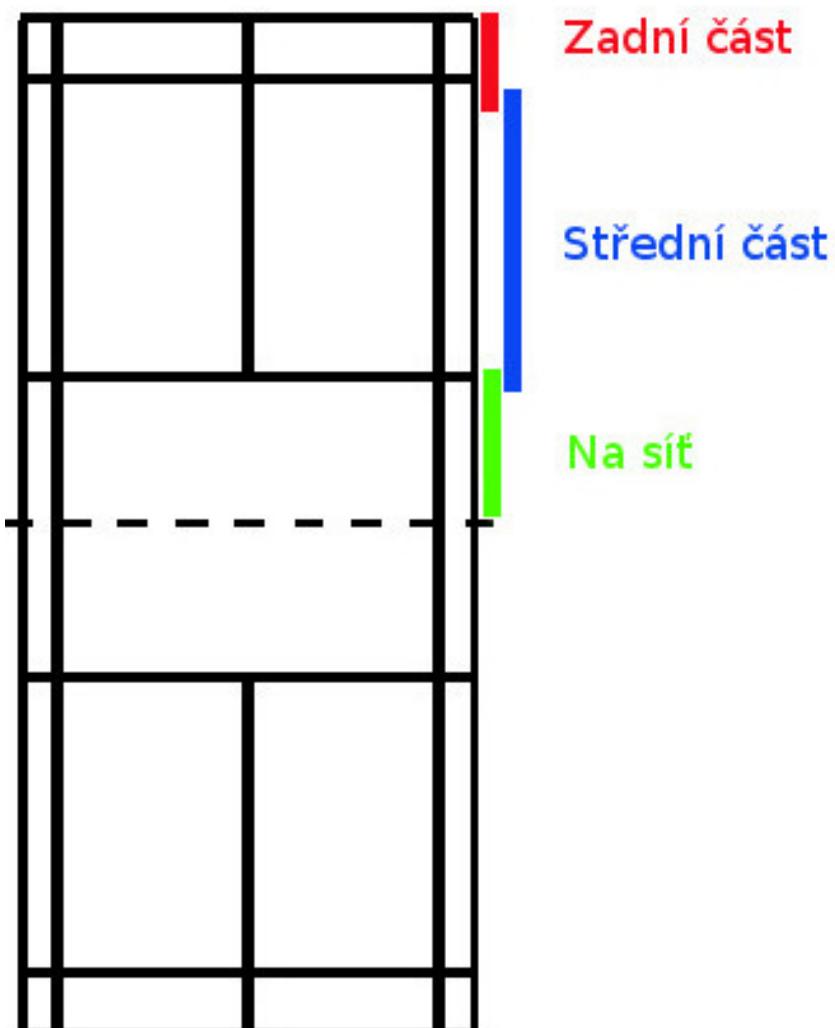
Nejvyšší změna azimutu je z hodnoty -60° na hodnotu 60° , tedy o 120° . Tuto změnu je opět potřeba sihnout za 1 s. Tuto hodnotu bohužel kvůli parametrům motoru nejsme schopni dosáhnout. Po dosazení do vztahu (4) dostáváme požadované zrychlení $8,378 rad \cdot s^{-2}$. Zde už se jedná o celkem vysoké zrychlení, což se také projeví na požadovaném točivém momentu, který dostaneme dosazením požadovaného zrychlení a momentu setrvačnosti do vztahu (1). Po provedení výpočtu dostáváme hodnotu 1,423 Nm.

Kapitola 8

Tréninkové programy

Požadavky na stroj byly konzultovány s badmintonovým trenérem Mgr. Michalem Tuřoňem a podle těchto požadavků a možností stroje byly sestaveny jednotlivé automatické režimy. Všechny tyto režimy byly implementovány do stroje. U každého z dále uvedených programů jsou uvedeny ideální parametry a parametry, kterých je schopen tento prototyp dosáhnout. Dále je také uvedeno s jakým omezením je který program implementován.

Tréninkové programy jsou rozděleny podle části kurtu, do které jsou stříleny míčky. Jednotlivé zóny jsou znázorněny na obrázku 8.1.



Obrázek 8.1. Badmintonový kurt - zóny dopadu míčků.

V badmintonu existuje několik druhů úderů, které je potřeba procvičit. Každý typ úderu vyžaduje jinou křivku letu a jinou razanci úderu.

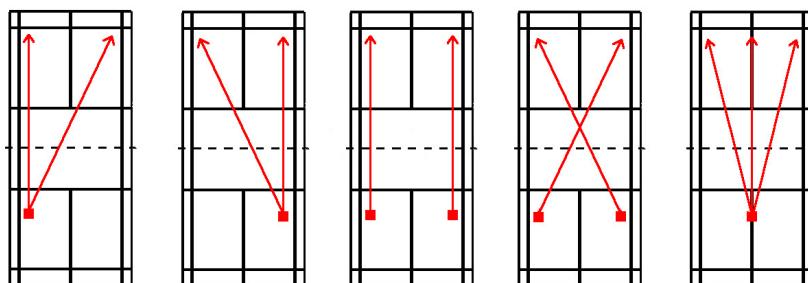
8.1 Zadní část

Prvním automatickým režimem je střelba do zadní části kurtu. Při tomto režimu hráč procvíčuje odehrávku míčů, které letí na zadní čáru. Takovéto míče mají celkem specifickou křivku letu, která je závislá na tom, jaký druh úderu se procvíčuje.

V zadní části se procvíčují tři druhy úderů. První z nich je **Klír**. Jedná se o úder ze zadní části kurtu, který letí obloukem do zadní části soupeřovy poloviny [11]. Přihrávka na tento úder tedy pochopitelně musí letět do zadní části. Tato přihrávka letí obloukem na zadní čáru. Při testování na kurtu byl určen jako ideální úhel elevace 60° .

Dalším z úderů procvíčovaných v zadní části je **Drop**. Tento úder je odehrán, podobně jako Klír, ze zadní části kurtu s tím rozdílem, že po odehrání košík dopadá v blízkosti síť [11]. Přihrávka na tento úder je téměř stejná, jako při přihrávce na Klír.

Posledním z úderů, procvíčovaných ze zadní části hřiště, je **Smeč**. Smeč je velmi prudký úder letící šikmo dolů do soupeřovy poloviny kurtu [11]. Přihrávka na smeč opět letí velkým obloukem na zadní čáru.



Obrázek 8.2. Tréninkové programy - střelba do zadní části kurtu.

Při střelbě do zadní části kurtu by měl stroj ideálně střílet přibližně jeden míček za sekundu v závislosti na obtížnosti programu. Dále by měl stroj střídat strany, na kterou míček letí, a to buď pravidelně, nebo nepravidelně. Možnosti jsou střílet z jedné strany, nebo z prostředku kurtu. Další možností je použít dva stroje, každý na jedné straně kurtu, které budou střílet přímo před sebe, případně křížem (viz obrázek 8.2). Z toho také vyplývá požadavek na rychlosť změny azimutu, která by se měla stihnout dřív, než bude vypálen další míček.

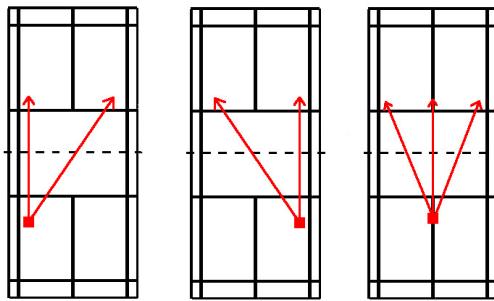
Protože je potřeba střílet přes celý kurt, tak je nutná i poměrně vysoká rychlosť otáček kotoučů. Při testování na kurtu je jednalo o obvodovou rychlosť přibližně $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

S druhým prototypem jsme schopni dosáhnout pouze periody 5 s hlavně kvůli nastavení azimutu, které je velmi pomalé. Implementace ve stroji pokrývá přihrávku na všechny tři údery hrané ze zadní části kurtu a pokrývá všechny možnosti nastavení směru na obrázku 8.2. Jediné omezení tohoto režimu je perioda ve variantách, u kterých je potřeba měnit směr odpalu.

8.2 Střední část

Druhý režim je pro střelbu do střední části kurtu. Hráč procvíčuje odehrávání míčů, které padají do hřiště mezi první a zadní čárou. Prvním úderem, který se procvíčuje, je **Drajv**. Jedná se o plochý úder hraný těsně před tělem a letící těsně nad páskou síť [11].

Ideální perioda střel je v tomto režimu jeden košík za 1,5 s až 2 s, opět ale závisí na obtížnosti programu. Stroj by měl střídat strany a znova je zde možnost střílet z

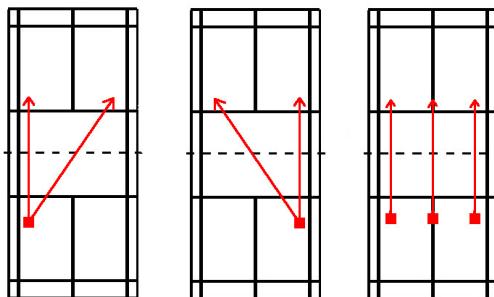


Obrázek 8.3. Tréninkové programy - střelba do střední části kurtu.

jedné poloviny kurtu nebo z prostřed. Režim střídání stran by měl být nastavitelný s možností pravidelného, nebo náhodného střídání stran. Přestavení do nové polohy je opět potřeba stihnout mezi výstřely.

V tomto režimu je klíčová změna stran, proto druhý prototyp zvládá pouze jeden míček za 5 s. Jiné omezení implementace ve stroji nemá.

Ve střední části se také hraje **Obrana** proti smeči. Pro tento úder je potřeba dostat stroj nad úroveň sítě. Stroj střílí prudký úder směrem dolů. Rychlostí kotoučů lze měnit sílu smeče. Požadavek na frekvenci je v tomto případě jeden míček za 2 s. Dalším důležitým požadavkem je nejnižší možný dostřel, tím je myšleno, jak blízko k síti dokáže stroj zasmečovat. Tento dostřel závisí na výšce, ze které stroj střílí a také na maximální velikosti záporné elevace.



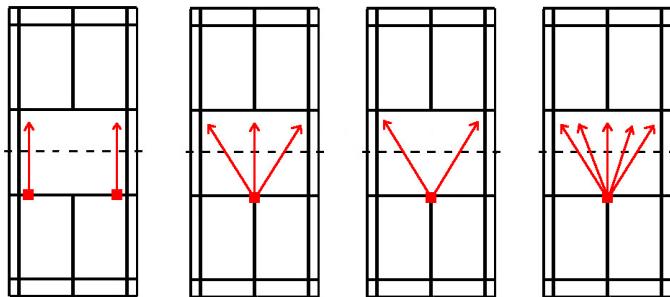
Obrázek 8.4. Tréninkové programy - obrana ve střední části kurtu.

Stroj by měl mít možnost pokrýt co největší plochu a pokud možno střídat strany. Opět je zde možnost střílet z jedné strany kurtu, případně použít více spolupracujících strojů. U našeho prototypu je sice tento režim implementován, ale protože stroj má celkem krátké kably a spolu s rozvaděčem je relativně těžký, bylo by velmi obtížné zvednout stroj nad síť. Skutečné parametry by ale měly být stejné jako u předchozího režimu, tudíž jeden míček za 5 s.

8.3 Na síť

Míče, které dopadají těsně za síť, se nazývají **Krásas**. Při tomto tréninkovém programu je potřeba střílet přibližně jeden košík za 1 s až 2 s. Stroj by měl pravidelně či nepravidelně střídat strany, případně strany a střed sítě. Další možnosti je nepravidelně pokrýt celou šířku sítě.

Druhou možností hry na síti je **Sklepnutí**. Oproti kraťasu míčky nepadají těsně za síť, ale jsou prudší a letí těsně nad sítí. Tyto míče je potřeba nastřelovat alespoň z první čáry. Perioda míčků je stejná jako u kraťasu a možnosti směrů jsou rovněž stejné.



Obrázek 8.5. Tréninkové programy - střelba na/za síť.

Prototyp 2 tento režim zvládá bez problémů, pokud budeme měnit směr průběžně. Bohužel z důvodu slabého motoru na ose azimutu, zvládá tento režim pouze krátkodobě. Při střídání stran není reálné zvládnout tento režim s druhým prototypem.

■ 8.4 Celý kurt

Tréninkový program **Celý kurt** je spojením střelby do zadní čáry kurtu společně se střelbou těsně za síť. Při střelbě je nutné pokrýt celý kurt a je potřeba střílet košík za 1 s až 2 s. Při tomto tréninkovém programu je několik možností sřelby. Tyto možnosti jsou znázorněny na obrázku. Je zde možnost střídat krátkou a dlouhou střelu, případně různé režimy, jako dva dlouhé, jeden krátký nebo jeden dlouhý a dva krátké, případně dlouhou střelu rovně před sebe a krátkou křížem.

Při testu bylo naměřeno, že prototyp 2 zvládá tento režim bez problémů při střelbě rovně a pouze střídání krátký dlouhý míč. Při změně směru má stroj opět problém se slabým motorem na ose azimutu a tak zvládá vystřelit jeden košík za 4 s.

■ 8.5 Na raketu

Poslední a nejrychlejší tréninkový program je nahazování na raketu. Tento režim nemusí být hrán přes síť. Režim spočívá v tom, že stroj velmi rychle pálí míčky před sebe. Při nejvyšší obtížnosti by měly být odpáleny tři míčky za vteřinu. Takovéto rychlosti by nebyl trenér schopen dosáhnout. V tomto režimu není potřeba měnit směr a vše závisí pouze na podavači míčků.

Ve stroji je tento režim implementován s tím, že tři míčky za vteřinu jsou v možnostech stroje. Co stroj nezvádá je průběžně měnit periodu odpalu.

■ 8.6 Příjem servisu

Při tréninku je samozřejmě potřeba také procvičit příjem podání. Opět je nutné rozlišovat druh podání. Prvním druhem podání je **Krátké podání**. V ideálním případě letí míček těsně nad páskou a padá přesně na přední podávací čáru.

Druhý typ podání, který je potřeba procvičit je tzv. **Flick**. Jedná se o dlouhé ploché

podání, které v ideálním případě padá na zadní podávací čáru [11].

Oba druhy mají stejné požadavky. Stroj by měl pokrýt celou šířku kurtu a střílet přibližně jeden míček za sekundu. Další možností je nepravidelně střídat oba druhy podání.

Tento režim v našem prototypu prozatím není implementován, ale skutečné parametry by měly být stejné, jako režim střelby do zadní části kurtu.

Kapitola 9

Prototyp 3

Třetí a finální prototyp je prozatím ve stavu návrhu. V této kapitole jsou uvedeny informace týkající se návrhu nového prototypu. Nový stroj by měl mít podstatně menší hmotnost, aby byl schopen splnit požadavky uvedené v kapitole 8. Dalším aspektem pro návrh nového stroje byla cena. Stroj by měl využívat levnější řídicí systém než dosavadní dva prototypy.

Ovládání by mělo být co nejvíce intuitivní a fungovat i bez nutnosti připojit jiná zařízení jako notebook či mobilní telefon.

9.1 Návrh konstrukce

Jak již bylo řečeno, jedním z hlavních požadavků na novou konstrukci je, aby byla co nejlehčí. Hmotnost je důležitá jak kvůli snížení nároků na motory, tak i z důvodu přenosnosti stroje.

9.1.1 Kotouče

Konstrukce kotoučů bude oproti prototypu 2 menší, a to z důvodu snížení momentu setrvačnosti. Moment setrvačnosti kotouče se dá přibližně spočítat podle vztahu (1).

$$J = \frac{1}{12} \cdot m \cdot r^2 \quad (1)$$

Pokud průměr kotouče zmenšíme na 99 mm, tedy na polovinu, a pokud bychom kotouče vyrobili ze stejného materiálu, dostali bychom se na čtvrtinu hmotnosti. Po dosazení do vztahu (1) nám vyjde, že se moment setrvačnosti kotouče zmenší na $\frac{1}{16}$ původního momentu.

Problémem při zmenšení průměru je, že je potřeba zachovat maximální požadovanou obvodovou rychlosť. U původního kotouče byla maximální rychlosť motorů 4500 RPM, což odpovídá obvodové rychlosti $46,653 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro zachování této obvodové rychlosti, při polovičním průměru, je potřeba mít rychlosť otáčení alespoň 9000 RPM.

S ohledem na snížený moment setrvačnosti, můžeme určit přibližné požadované parametry motoru. Protože se zmenšením kotoučů je potřeba měnit otáčky kotoučů v dvojnásobném rozsahu než u prototypu 2, bude požadovaný moment motoru alespoň $\frac{1}{8}$ původního požadovaného momentu, tedy 0,054 Nm.

Další změnou oproti druhému prototypu je, že mezera mezi kotouči bude menší než je průměr hlavičky, a kotouče budou mezi sebou odpruženy. Tím se zajistí optimální přenos energie na košík, aniž by se deformoval.

9.1.2 Podavač

Na původním stroji byl podavač tvořen otočným ramenem, které podalo míček mezi kotouče. Tento podavač byl nevhodující hlavně kvůli tomu, že míček byl při podání mezi kotouči v ležící poloze. V této poloze tak došlo k tomu, že byl míček protažen mezi kotouči i peřím a tím se výrazně snížovala jeho životnost.

V novém stroji by měl být podavač řešen jiným způsobem. Nejvíce bude podávací rameno ve tvaru kříže, který bude pod míčkem. Tím, jak se bude kříž otáčet, dojde k posunutí míčku mezi kotouče.

9.1.3 Nastavení směru

Jak již bylo uvedeno, je potřeba dosáhnout co nejlepších dynamických parametrů, proto je nutné, aby pro nastavení směru nebylo třeba pohybovat celým strojem. Z tohoto důvodu se nejvíce bude pohybovat pouze kotouči a podavačem míčků. Tento přístup má ovšem nevýhodu v omezeném rozsahu pohybu. Pro splnění požadavků na tréninkové programy je potřeba mít rozsah pohybu pro elevaci alespoň -25° až 60° . Požadovaný rozsah pohybu azimutu je alespoň -60° až 60° .

9.2 Návrh pohonů

Při výběru pohoných jednotek jsem vycházel z analýzy točivého momentu (viz kapitola 7) a předpokládaných úprav. Z těchto informací byla odhadnuta maximální požadovaná rychlosť otáčení motoru a požadovaný točivý moment motoru. S ohledem na požadované vlastnosti motorů budou pro pohon kotoučů dva stejnosměrné bezkartáčové motory. Navržený typ motoru je od firmy Anaheim Automation, konkrétně typ BLY174S-24V-12000. Tento motor má točivý motor 0,09 Nm a maximální rychlosť otáčení 12000 RPM. K nastavení směru se jeví jako nejhodnější řešení krokové motory. Krokové motory mají pro tuto aplikaci tu výhodu, že není potřeba externí enkodér k detekci polohy. Na novou konstrukci byl vybrán motor 23Y102S-LW8 opět od firmy Anaheim Automation. Parametry tohoto motoru jsou dostatečné pro použití na novém stroji. Točivý moment je 1,24 Nm a krok $1,8^\circ$. Jako poslední pohonné prvek bylo potřeba vybrat pohon pro podavač míčků. Navržené konstrukci nejlépe vyhovuje upravené modelářské servo, kterému se odstraní zarážky, aby se mohlo točit dokola.

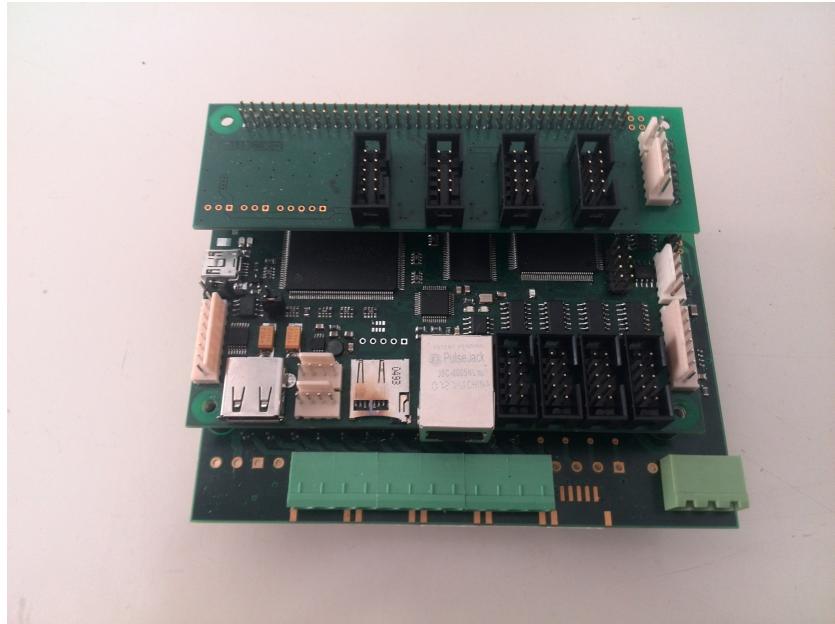
9.3 Návrh řídicího systému

Řídicí systém použitý v předchozím prototypu byl velmi flexibilní a umožňoval snadno experimentovat s různými parametry stroje, ale pro třetí prototyp se jeví jako nevhodný především kvůli své velikosti. Proto bylo potřeba zvolit nový systém řízení, což zahrnuje vybrat výpočetní jednotku, výkonovou část a navrhnut ovládací rozhraní.

9.3.1 Výkonová jednotka

Pro řízení motorů byla vybrána právě vyvíjená deska od společnosti PIKRON. Tato výkonová část vychází z desky MARS 8 od stejného výrobce. Jená se o právě vyvíjený prototyp, který se prozatím musí programovat pomocí konzole a funkce kterými disponuje se postupně rozšiřují při každé aktualizaci firmware. Zařízení také prozatím neumožňuje uložit nastavenou konfiguraci, proto se musí při každém spuštění programovat znova. Hlavní výhodou je to, že v zařízení je obsaženo velké množství algoritmů pro řízení různých motorů, což umožňuje připojit téměř jakýkoliv motor, včetně bezkartáčových stejnosměrných motorů a krokových motorů. Pro připojení je vyhrazeno 16 výstupních pinů, které jsou programovatelné a lze k nim připojit až 8 motorů. Tato výkonová část bude s řídicí částí komunikovat pomocí sběrnice UART, případně pomocí Ethernetu.

Zařízení se skládá z výkonové části, jejíž vývoj momentálně probíhá. Druhou částí je řídicí část, jejímž srdcem je procesor ARM Cortex-M3 a hradlové pole FPGA Spartan



Obrázek 9.1. Výkonová jednotka.

6. Komunikační možnosti této elektroniky jsou rovněž bohaté. Již zmíněný UART doplňuje převodník FTDI, který emuluje rozhraní USB. Dalšími možnostmi komunikace je ethernetové rozhraní, případně sběrnice CAN, I2C či SPI. Veškeré datové kanály jsou opticky odděleny.

Celé zařízení je vidět na obrázku 9.1. Jedná se o prototyp zapůjčený od společnosti PIKRON. Vzhledem k tomu, že i s třetím prototypem se bude experimentovat tak je vhodné použít tuto jednotku s tím, že firmware jednotky se bude upravovat průběžně a je možno přidat i některé funkce, které budou potřeba pro řízení badmintonového stroje. Zároveň dojde k otestování jednotky výrobcem a odladění jednotlivých funkcí.

Pro otestování jednotky byl použit jednoduchý program napsaný v programovacím jazyku Python. Jednotka se připojí k PC pomocí sběrnice UART přes převodník FTDI. Po připojení se zařízení hlásí jako sériový port, na kterém naslouchá. Zařízení se ovládá pomocí jednoduchých příkazů. Každý příkaz se skládá ze tří částí, které mohou být odděleny mezerami [12]:

- **Jméno** Je kombinace znaků. V případě že se příkaz vztahuje k motorům je na konci diplněn znak motoru.
- **Operační znak** Definuje typ příkazu. Pokud se jedná o dotaz použije se znak „?“. Pro příkaz je vyčleněn znak „:“. Pro potvrzování může být použit znak „.“.
- **Parametr** Jedná se o hodnotu vztahující se ke konkrétnímu příkazu například u příkazu PWMA:0 na motoru A nastaví střídu pwm na hodnotu 0.

Pro otestování funkce byly použity dva bezkartáčové motory. Příklad příkazů potřebných k roztočení jednoho z motorů je uveden níže.

```

RELEASEA:      //Odpojí regulátor motoru A
PURGEA:        //Zastaví regulace s chybou motoru A
RELEASEB:      //Odpojí regulátor motoru B
PURGEA:        //Zastaví regulace s chybou motoru B

```

```

REGOUTMAP:0,3,6//Namapuje výstupní piny (piny 0 až 3 na A, 3 až 6 na B)

REGPTIRCA:1000 //Nastavení parametrů regulátoru A
REGPTPERA:1    //Nastavení parametrů regulátoru A
REGPTMARKA:1180//Nastavení parametrů regulátoru A
REGMODEA:5      //Nastavení módu řízení na pwm pro motor A
PWMA:0          //Nastavení 0 střídy na motoru A

PWMA:1000       //Nastavení 1000 střídy na motoru A rozsah 0 až 32000.

```

Pro naše účely budeme potřebovat příkazy pro řízení rychlosti otáčení a příkazy pro najetí na polohu.

```

SPDA:1000      //Roztočí motor A rychlosť 1000~RPM
SPDA:-1000     //Roztočí motor A rychlosť 1000~RPM opačným směrem

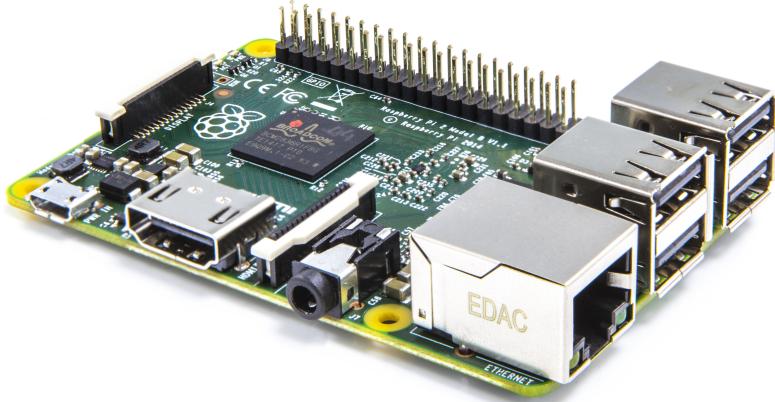
GA:100         //Najede motorem A na absolutní polohu 100
GRA:100        //Najede motorem A na relativní polohu 100

APA?          //Vráti polohu motoru A

```

■ 9.3.2 Výpočetní jednotka

Pro řízení všech funkcí stroje je naprosto využívající jednoduchový počítač Raspberry Pi 2 B (viz Obrázek 9.2). Jedná se o malý počítač přibližně velikosti platební karty. Tento počítač i přes svou malou velikost a pořizovací náklady obsahuje vše potřebné pro běh operačního systému Linux.



Obrázek 9.2. Raspberry Pi [5].

Tento konkrétní model je založen na čtyřjádrovém procesoru ARM Cortex-A7, který je taktován na frekvenci 900 MHz. Procesor je doplněn 1024 MB operační pamětí, která je sdílena s grafickým procesorem VideoCore IV. Místo pevného disku je použita micro SD karta, která slouží jak pro zavedení operačního systému, tak pro ukládání uživatelských souborů. Počítač je dále vybaven ethernetovým adaptérem s přenosovou rychlosťí 10/100 a čtyřmi USB porty.

Použitá verze Raspberry Pi dále obsahuje:

- 40 GPIO pinů

- HDMI (1080p)
- Zvukový výstup přes 3,5 mm konektor.
- CSI kamera port
- DSI display port
- Sběrnice UART, I2C a SPI

Na Raspberry je nainstalován systém Raspbian, který je odnoží Linuxové distribuce Debian. K počítači Raspberry existuje obrovská komunita, což má tu výhodu, že na internetu je k dispozici nepřeberné množství návodů a příkladů téměř na vše. Většina těchto příkladů je psána v jazyce Python.

■ 9.3.3 Ovládání a uživatelské rozhraní

Jak již bylo zmíněno ovládání by mělo být jednoduché, intuitivní a pokud možno nezávislé na jakémkoliv dalším zařízení. Jak je vidět u konkurence, tak všechny konkurenční stroje jsou ovládány malým bezdrátovým ovladačem, na kterém lze zároveň měnit parametry tréninkového programu. Podobné řešení by bylo dobré implementovat i u našeho stroje.

Další možností je do konstrukce stroje zabudovat tablet a veškeré ovládání implementovat do něj, případně k Raspberry Pi připojit dotykovou obrazovku a uživatelské rozhraní implementovat přímo zde.

Pomocí uživatelského rozhraní by měla být možnost vytvářet a upravovat tréninkové programy včetně úpravy křivky letu míčku a definování míst kam a v jakém pořadí mají dopadat míčky. Při běhu tréninkového programu by měla být možnost průběžně měnit obtížnost, případně plynule přejít na jiný program.

Úprava a vytváření tréninkových programů by mělo být možné i s pomocí aplikace pro PC a to buďto online, tudíž při přímém propojení PC a stroje, nebo offline. Při offline úpravě nebo vytváření tréninkového programu by pak PC nemuselo být propojeno se strojem a vytvořený program by se na stroj nahrál při pozdějším připojení, nebo se přenesl pomocí flash disku.

Kapitola 10

Závěr

Cílem této práce bylo rozšířit badmintonový stroj o možnost změny elevace a azimutu. Dále implementovat tréninkové plány a realizovat uživatelské rozhraní. Nakonec také navrhnut pohony a řídící jednotku pro novou konstrukci a spolupracovat na návrhu. Veškerá měření a experimenty byly prováděny se stávajícím prototypem, který byl již při začátku práce poměrně těžký. Z důvodu zpevnění a vyvážení konstrukce se váha ještě zvýšila, ale rozhodlo se, že na ověření parametrů tato konstrukce postačí.

V rámci práce jsem se seznámil s produkty firmy B&R a zprovoznil servozesilovače ACOPOS. Po zprovoznění servozesilovačů a odladění parametrů jsem zjistil nedostatečný výkon obou motorů, proto musela být osa elevace dodatečně vyvážena, čímž se problém této osy vyřešil. U osy azimutu by byl potřeba silnější motor, proto je nastaveno velmi malé zrychlení.

Dále jsem implementoval tréninkové plány, podle požadavků badmintonového trenéra Mgr. Michala Turoně. Dynamické parametry tohoto prototypu bohužel nejsou natolik dobré, aby stroj dokázal pokrýt veškeré požadavky, ale pro ověření principu je tato implementace dostatečná. Pro ovládání těchto tréninkových programů bylo navrženo uživatelské rozhraní, které běží na VNC serveru v řídícím PLC. K tomuto VNC serveru se díky připojenému AP dá připojit i z mobilního telefonu.

Stroj byl také otestován na badmintonovém kurtu se skutečnými hráči badmintonu a pod dohledem zkušeného trenéra, díky čemuž jsem mohl odladit křivky letu košíku a vyzkoušet využitelnost jednotlivých tréninkových programů. Při testování na kurtu bylo zároveň provedeno měření přesnosti úderů.

Na základě zkušeností s prototypem jsem provedl analýzu točivého momentu, díky čemuž jsem mohl navrhnut motory pro nový prototyp stroje. Pro pohon kotoučů jsem navrhl dva brushless motory. Tento typ motorů nejlépe splňoval požadavky, které na ně byly kladeny. Pro nastavení azimutu a elevace se jako nejlepší volba jeví použít krokové motory. Podavač bude v novém prototypu řešen jiným způsobem a bude použito několik modelářských servomotorů.

Nová konstrukce bude mít nižší hmotnost a bude používat levnější řídící systém. Mezi hlavní změny patří zmenšení kotoučů, čímž se sníží moment setrvačnosti. Dále pro změnu směru se již nebude otáčet celým strojem, ale pouze kotouči. Poslední velká změna se týká podavače, kde už nebude podávací rameno, ale mechanizmus, který bude miček mezi kotouče podávat ve vertikální poloze. K řízení tohoto stroje byl vybrán jednodeskový počítač Raspberry Pi, společně s výkonovou jednotkou, která vychází z jednotky MARS 8 od společnosti PIKRON.

Stroj je sice pořád ve fázi vývoje, ale přidáním možnosti řídit směr výstřelu se jeho využitelnost zvýšila a mohly být vytvořeny tréninkové plány, které odpovídají požadavkům na trénink středně zkušených hráčů.

Literatura

- [1] *Black Knight - Knight Trainer Badminton shuttlecock birdie launcher shooter machine, badminton training machine.*
http://knighttrainer.com/index_1.php.
- [2] *badminton training.*
<http://www.badmintonmachine.com/home>.
- [3] *Siboasi Shuttlecock Shooter Machine Series - Siboasi Sales - Tennis Ball Machines, Stringing Machine, Sport Machine.*
<http://www.siboasi-sales.com/8-shuttlecock-shooter>.
- [4] *B&R: X20CP3586.*
<http://www.br-automation.com/cs/produkty/control-systems/x20-system/x20-cpus/x20cp3586/>.
- [5] *Raspberry Pi - Teach, Learn, and Make with Raspberry Pi.*
<https://www.raspberrypi.org/>.
- [6] *Wiki-Badminton.*
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Badminton>.
- [7] *Bakalářská práce - Návrh a řízení stroje na badminton.*
http://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/7/7f/Bp_2014_maslikiewicz_ondrej.pdf.
- [8] Jenn Stroud Rossmann Chak Man Chan. *Badminton shuttlecock aerodynamics: synthesizing experiment and theory.* *Sports Eng(2012)* 15:61-71. DOI 10.1007/s1283-012-0086-7.
- [9] Baptiste Darbois Texier. Caroline Cohen, David Quéré, Christophe Claneta. *Shuttlecock dynamics.* *Procedia Engineering* 34 (2012) 176 – 181.
- [10] Caroline Cohen, Baptiste Darbois-Texier, Guillaume Dupeux, Eric Brunel, David Quéré a Christophe Clanet. *The aerodynamic wall.* 2013.
- [11] *Badminton - pravidla, aktuality, recenze, haly — Badmintonweb.cz.*
<http://www.badmintonweb.cz/>.
- [12] *Uživatelský manuál k jednotce MARS 8.*
http://cmp.felk.cvut.cz/~pisa/mars8/mars8_man_cz.html.

Příloha A

Seznam zkratek

PLC	Programmable Logic Controller
B&R	Bernecker + Rainer Industrie-Elektronik Ges.m.b.H.
RAM	Random access memory
AP	Access point
RPM	Revolutions per minute
MB	Mega byte
SD	Secure Digital
USB	Universal Serial Bus
GPIO	General-purpose input/output
HDMI	High-Definition Multi-media Interface
CSI	Camera Serial Interface
DSI	Display Serial Interface
UART	Universal Asynchronous Receiver and Transmitter
I2C	Inter-Integrated Circuit
SPI	Serial Peripheral Interface
FPGA	Field Programmable Gate Array
CAN	Controller Area Network
PC	Personal Computer
VNC	Virtual Network Computing

Příloha B

Obsah přiloženého CD

- /code Celý projekt v AutomationStudiu
- /text Tato práce ve formátu PDF