

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

katedra řídicí techniky

Diplomová práce
Robotický stolní fotbal

Bc. Vojtěch Myslivec

Vedoucí práce:

Ing. Pavel Burget, Ph.D.

Květen 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra řídicí techniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Vojtěch Myslivec**

Studijní program: Kybernetika a robotika
Obor: Systémy a řízení

Název tématu: **Robotický stolní fotbal**

Pokyny pro vypracování:

Navrhnete řízení stolního fotbalu pomocí víceosého systému řízení polohy. K řízení bude použit systém Siemens Simotion s komunikací Profinet IRT.

1. Seznamte se s podobnými řešeními robotického stolního fotbalu i s konfiguračním prostředím Simotion Scout.

2. Navrhnete řízení jedné fotbalové osy. Translační a rotační pohyb na fotbalové ose řešte synchronním pohybem motorových os.

3. Analyzujte pohybové parametry výsledného systému vzhledem k parametrům hry. Posudte vlastnosti mechanického řešení a navrhnete případné úpravy pro další fotbalové osy.

4. K systému připojte kameru. Analyzujte možnosti detekce pohybu míčku a jednotlivých fotbalistů. Implementujte alespoň dva rozpoznávací algoritmy a porovnejte jejich vlastnosti.

Seznam odborné literatury:

[1] Sinamics S120. Function manual. 01/2011.


[2] Sinamics S120. List manual. 01/2011.

Vedoucí: Ing. Pavel Burget, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016


prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 20. 2. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně (pokud není uvedeno jinak) pouze pod odborným vedením vedoucího práce, 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 11. 5. 2015


.....
Vojtěch Myslivec

Poděkování

Děkuji především vedoucímu diplomové práce, Ing. Pavlu Burgetovi, Ph.D., za čas strávený nad mou prací při řešení problémů v jejím průběhu, kterého nebylo málo, i za cenné připomínky k výsledné podobě práce. Dále děkuji své rodině za zázemí a klid nejen při zpracování této práce ale především během celého studia. V neposlední řadě děkuji také Bc. Martinovi Gurtnerovi, který během zimního semestru významně přispěl k současné podobě řídicího systému.

Děkuji Bohu.

Obsah

1	Úvod do problematiky	9
2	Podobná řešení	10
2.1	Ecole polytechnique fédérale de Lausanne	10
2.2	Technical University of Denmark	11
2.3	University of Freiburg	11
2.4	Shrnutí	12
3	Struktura práce	13
4	Hardware	13
4.1	Stolní fotbal s robotizovanou osou	13
4.2	Řídicí systém	15
4.3	Bezpečnostní systém	16
5	Řízení jedné osy fotbalu	17
5.1	Analýza možností osy	17
5.2	Struktura programu	19
5.3	Konfigurace regulátorů	20
5.4	Synchronizace horizontálního a rotačního pohybu	21
5.5	Inicializace os	23
5.6	Módy řídicího systému	25
5.6.1	Mód zachycení míče	26
5.6.2	Útočný mód	29
6	Detekce pohybu míče a hráčů	33
6.1	Možné přístupy	33
6.2	Barvy a světelné podmínky	35
6.3	Inteligentní kamera Cognex In-Sight 7402	37
6.3.1	Maximalizace rychlosti kamery	38
6.3.2	Dynamická oblast vyhledávání	38
6.4	Inteligentní kamera Cognex In-Sight 500	40
7	Zhodnocení výsledků	42
8	Návrhy na zlepšení	42
9	Závěr	44

Seznam obrázků

1	Fotbálek na Katedře řídicí techniky ČVUT FEL	9
2	Robotický stolní fotbal vyvíjený na švýcarské EPFL ^[2]	10
3	Robotický stolní fotbal vyvíjený na Dánské technické univerzitě ^[4]	11
4	Komerční robotický stolní fotbal vyvíjený ve Freiburgu ^[6]	12
5	Principiální schéma uspořádání servomotorů	14
6	Detaily hardware motorů	14
7	Principiální schéma řídicího systému	15
8	Průběh přejezdu osy	18
9	Struktura programu	19
10	Vývojový diagram inicializace osy	24
11	Sektory hřiště vzhledem k ose	25
12	Vývojový diagram volby módu osy	26
13	Situace v případě zachycení míče směřujícího přímo k ose	27
14	Situace v případě zachycení míče směřujícího k ose odrazem	28
15	Úhel dopadu a odrazu ve dvoudimenzionální vektorové reprezentaci	29
16	Vliv tvaru hráče na směr výkopu míče	30
17	Závislost úhlu výkopu na pozici míče vzhledem k hráči	30
18	Vliv tvaru hráče na směr výkopu míče	31
19	Situace při nahrávce bokem hráči na stejné ose	31
20	Vývojový diagram průběhu výkopu s nahrávkou	32
21	Proces zpracování obrazu	33
22	Proces zpracování obrazu při použití externího počítače	34
23	Proces zpracování obrazu při použití inteligentní průmyslové kamery	34
24	Uspořádání a barvy hrací plochy	35
25	Korkový míč nabarvený na černo	36
26	Inteligentní kamera Cognex In-Sight 7402	37
27	Oblast vyhledávání	39
28	Dynamická oblast vyhledávání	39
29	Inteligentní kamera Cognex In-Sight 500	40
30	Schématičký návrh úpravy osy	43

Seznam tabulek

1	Vybrané parametry stolu	13
2	Vybrané parametry motorů	14
3	Vybrané parametry hlavních komponent řídicího systému	16
4	Vybrané parametry kamery Cognex In-Sight 7402	37
5	Vybrané parametry kamery Cognex In-Sight 500	41

Přílohy

1. Detailní konfigurace systému Siemens Simotion s Profinet IRT
2. Detailní konfigurace inteligentní kamery Cognex In-Sight
3. Popis implementovaných funkcí a jejich rozhraní
4. Detailní schéma zapojení řídicího systému (na přiloženém CD)
5. Kompletní zdrojové soubory programů (na přiloženém CD)
6. Komentovaný zdrojový kód (na přiloženém CD)
7. Manuál údržby (na přiloženém CD)

Anotace

Cílem této práce je navrhnout řízení jedné osy stolního fotbalu na základě snímání polohy míče vhodnou kamerou a toto navržené řešení implementovat a ověřit. Pohyb osy umožňují dva motory, jeden osou rotuje a druhý pohybuje v horizontálním směru, jejich pohyby na sobě ale nejsou nezávislé, proto je nutné implementovat vzájemnou synchronizaci mezi nimi. Systém je řízen pomocí průmyslového řešení od firmy Siemens, přenos dat mezi řídicím systémem, kamerou a motory zajišťuje v reálném čase síť Profinet. Výstupem je funkční řízení jedné osy, inicializace relativních senzorů polohy po zapnutí, funkční monitorování situace na hřišti vhodnou kamerou, a dále také návrh hardwarových úprav osy, analýza možností celého systému a případný návrh dalších modifikací pro zlepšení parametrů celého systému.

Klíčová slova

Robotický stolní fotbal, Simotion, Cognex, Profinet, řízení servomotoru, synchronizace pohybu, sledování pohybu míče kamerou, inteligentní průmyslová kamera.

Annotation

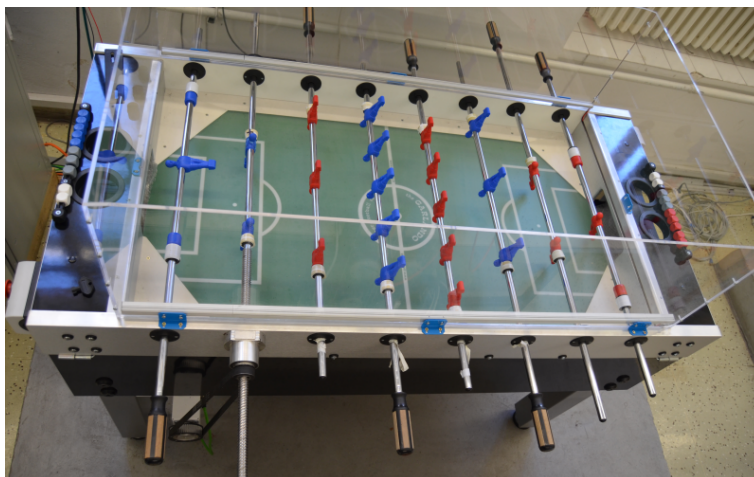
The aim of this work is to propose a single axis control of table football with measuring the position of the ball with suitable camera and validate this proposed solution. Axis is moved by two motors, one rotates with the axis and the other moves with axis in a horizontal direction, but their movements are not independent, therefore it is necessary to implement synchronization between them. The system is controlled by an industrial solution from Siemens, data transfer between the controller, camera and the engines is provided by a real-time Profinet network. The output of this work is the functional control of one axis, initialization of relative position sensors after turning on, the functional monitoring of the situation on the playing surface with suitable camera, and also the draft of hardware modifications of axis, analysis of the system possibilities and eventually design of further modifications to improve performance of the whole system.

Keywords

Robotic table football, Simotion, Cognex, Profinet, control of servomotor, synchronization of movements, tracking ball with the camera, intelligent industrial camera.

1 Úvod do problematiky

Cílem úlohy je automatizovat jednu stranu stolního fotbalu, tedy zkonstruovat robotického soupeře, který by byl schopen konkurovat lidskému hráči. Obecně lze říci, že cílem hry je umístit do soupeřovy branky více míčů, než se podaří protihráči. Hra probíhá na ohraničeném hřišti nejčastěji o rozměrech 120 x 70 cm^[1], které je osazeno nejčastěji osmi tyčemi, na kterých jsou umístěni hráči v různém počtu, od jednoho v případě tyče u brány, až po pět v případě tyčí u středu hřiště. Nejprve je tedy třeba stůl vybavit technologií, která je schopná těmito osami pohybovat s dostatečnou rychlostí a razancí. Rychlost míčku může u profesionálních hráčů dosahovat až hodnoty 15,5 m.s⁻¹ [1], tedy je třeba podobnou rychlost míči nejen umět udělit, ale také dokázat přesunout hráče na ose do požadované polohy dostatečně rychle. Následně je třeba vhodným způsobem detekovat především pohyb samotného míčku po hrací ploše, ale také pohyby protihráčů. Na základě těchto informací je následně možné pomocí vhodného algoritmu navrhnout a provést akční zásahy tak, aby byl v ideálním případě míček umístěn do soupeřovy branky.



Obrázek 1: Fotbálek na Katedře řídicí techniky ČVUT FEL

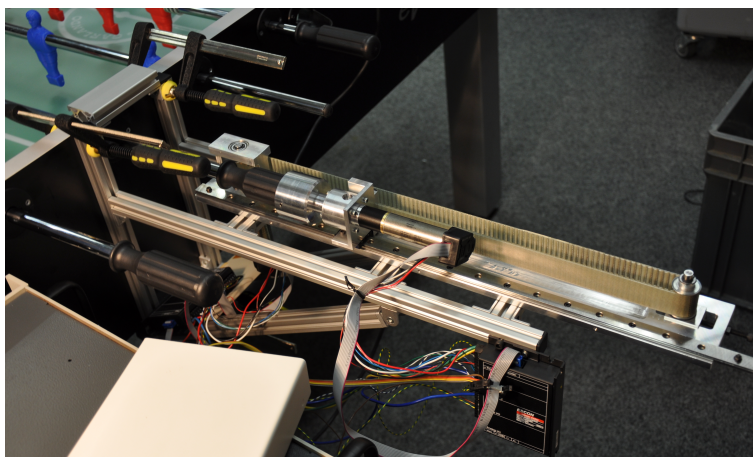
Tato práce se zabývá inicializací osy a jejím řízením, které může v budoucnu sloužit při implementaci složitějších herních algoritmů. Dále se práce zabývá sledováním polohy míčku a situace na hřišti vhodnou kamerou. Stůl, na kterém vývoj probíhal a dále bude probíhat je na obr. 1.

2 Podobná řešení

Snahy o zkonstruování počítačem řízeného stolního fotbalu lze pozorovat teprve několik let, tedy jde o poměrně novou záležitost. Nicméně jak je patrné z následujícího přehledu dohledaných podobných řešení, existuje několik úspěšných realizací, jedna dokonce v komerční verzi.

2.1 Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Robotický stolní fotbal vyvíjený na švýcarské univerzitě *Ecole polytechnique fédérale de Lausanne* má dle dostupných informací robotizovanou zatím jen jednu osu, osazenou dvěma stejnosměrnými elektromotory o výkonech 120 W pro rotační pohyb (výkop) a 200 W pro translační (přemístění hráčů). Motor pro rotační pohyb je pevně spojen s osou, přičemž celá tato sestava je připevněna k pohyblivému pásu, přes který druhý motor zajišťuje translační pohyb hrací osy. Údaje o konkrétních dosažených rychlostech nejsou dostupné, nicméně z uveřejněných videonahrávek se zdá, že rotační pohyb má dostatečnou razanci, translační pohyb je ve srovnání s jinými realizacemi i pohyby osy v ruce lidského hráče zatím o něco pomalejší.



Obrázek 2: Robotický stolní fotbal vyvíjený na švýcarské EPFL^[2]

Pohyb míčku po hrací ploše je sledován pomocí kamery, umístěné pod hracím stolem, přičemž deska je z blíže nespecifikovaného průhledného materiálu. Oproti kameře umístěné nad hrací plochou je míček viditelný vždy a nemůže se dostat do zákrytu osy. Kamera pracuje s rozlišením 1280 px x 1024 px a snímky pořizuje rychlostí 90 FPS. Vyhodnocovací algoritmy jsou schopné najít míč na hrací ploše v čase okolo 20 ms, přičemž díky tomu, že se míček nemůže dostat do zákrytu, perioda sledování po nalezení míče dosahuje řádů jednotek milisekund^[3].

Oproti řešení, kterým se zabývá tato práce, jsou zde užity mnohem slabší motory, i z videí je patrná nižší razance výkopu míče. Co se týče umístění kamery, v tomto případě (kamera zesponu stolu) umožňuje jednoznačně lepší výhled na samotný míč, naopak horší výhled na pozici hráčů soupeře.

2.2 Technical University of Denmark

Vývoj robotického stolního fotbalu na Dánské technické univerzitě skončil v roce 2007. Stůl má robotizované všechny čtyři osy na jedné straně. Stejně jako v předchozím případě i zde jsou oba motory umístěny z jedné strany a je kladen důraz na snadnou montáž a demontáž celého systému. Také technické řešení motorů a jejich interakce s osou jsou velmi podobné.

Zásadní rozdíl je v umístění kamery, která je v tomto případě nad hrací plochou, viz obr. 4. Při podobném rozlišení jako v předchozím případě snímá rychlostí 25 snímků za sekundu, včetně zpracování získaného snímku. Vyhodnocení dat z kamery a samotné řízení os zajišťuje počítač s blíže nespecifikovanou real-time distribucí Linuxu. Přestože doba vyhodnocení pozice míčku je delší než v předchozím případě a umístění kamery nezaručuje viditelnost míčku ve všech situacích, dle dostupných videozáznamů se řešení jeví jako plně funkční a schopné minimálně konkurovat lidskému protivníkovi.



Obrázek 3: Robotický stolní fotbal vyvíjený na Dánské technické univerzitě^[4]

2.3 University of Freiburg

Nejúspěšnější práce ze všech uvedených, podle dostupných materiálů, kterých ale není mnoho, je robotizace jedné strany stolu plně funkční. Existují dvě verze, jedna pro výzkumné účely a jedna komerční, která je i patentována. Konstrukce je opět podobná jako v předchozích

případech. Snímky z kamery, která je u výzkumné verze umístěna nad hrací plochou a u komerční verze již pod ní, jsou vyhodnocovány opět s periodou zhruba 20 ms.



Obrázek 4: Komerční robotický stolní fotbal vyvíjený ve Freiburgu^[6]

2.4 Shrnutí

Oproti výše uvedeným robotizovaným stolním fotbalům je řešení prezentované v této práci dle dostupných informací první, které využívá průmyslové systémy. To samo o sobě přináší mnoho výhod (robustnost systému, odolnost použitých komponent, vyšší bezpečnost), ale také některé nevýhody, například cenu některých komponent. Vzhledem k tomu, že v některých případech jsou informace o konkurenčních řešeních strohé, je obtížné přinést objektivní srovnání, nicméně dle doposud dosažených výsledků lze říci, že v budoucnu (po robotizaci zbylých os atd.) se může navržený robotický stolní fotbal současné konkurenci minimálně vyrovnat.

3 Struktura práce

Práce na robotickém stolním fotbalu probíhala v akademickém roce 2014/2015. Během zimního semestru byl v rámci předmětů Individuální projekt a Řídicí systémy navržen, instalován a konfigurován řídicí systém. Během letního semestru byly v rámci předmětu Diplomová práce navrženy a implementovány řídicí algoritmy. Dále byla instalována inteligentní kamera pro sledování situace na hřišti a byla zprovozněna komunikace mezi ní a řídicím systémem po síti PROFINET.

4 Hardware

Celý systém je tvořen samotným stolem, který je navíc osazen motory s mechanikou, osvětlením a bezpečnostními prvky, a dále řídicím systémem umístěným v k tomu určené skříni. Následující odstavce popisují hardwarovou konfiguraci tohoto řešení.

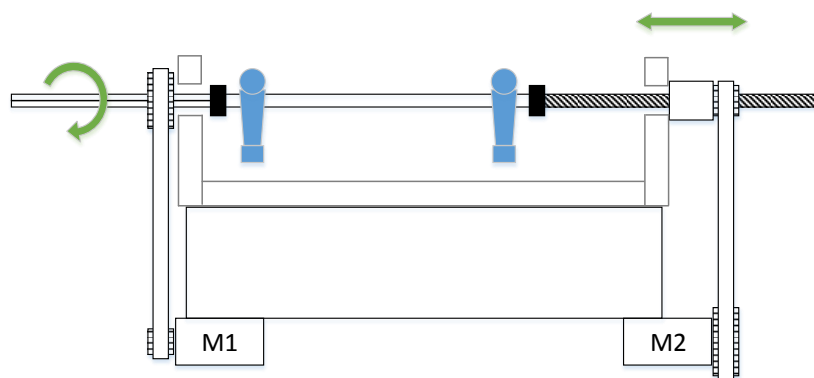
4.1 Stolní fotbal s robotizovanou osou

Stolní fotbal World Champion značky Garlando patří mezi běžné typy stolů, je osazen čtyřmi osami z každé strany, směrem od brány osou s jedním brankářem, osou se dvěma obránci, osou s pěti záložníky a osou se třemi útočníky. Již od výrobce je vybaven i LED osvětlením a příslušným napájecím zdrojem 230/5V 60W, toto osvětlení se ale ukazuje jako nedostatečné pro potřeby snímání kamerou, viz příslušná kapitola dále. Již před začátkem této práce byla jedna osa obránce se dvěma hráči osazena servomotory. Vybrané parametry stolu jsou uvedeny v tabulce 1 a jeho fotografie na obr. 1.

Typ	ITSF World Champion
Výrobce	Garlando
Rozměry	156 x 76,5 x 96 cm
Hmotnost	~100 kg
Rozměry hrací plochy	120 x 70,5 cm
Barva	černá a stříbrná

Tabulka 1: Vybrané parametry stolu

Principiální náčrtek uspořádání servomotorů a jejich připojení k ose je na obr. 5, několik detailů pak na obr. 6. Z jedné strany je na osu připevněno ozubené kolo, jehož pohyb podél osy je veden drážkou v hřídeli a které je přes řemen spojeno s hřídelí servomotoru. Tento motor slouží pro ovládání rotačního pohybu (výkop míče). Druhý servomotor je opět řemenem spojen s ozubeným kolem, které přes šroubovici na ose pohybuje hráči v horizontálním směru (přesun hráčů). Je tedy patrné, že oba pohyby na sobě nejsou nezávislé (viz dále).



Obrázek 5: Principiální schéma uspořádání servomotorů



Obrázek 6: Detaily hardware motorů

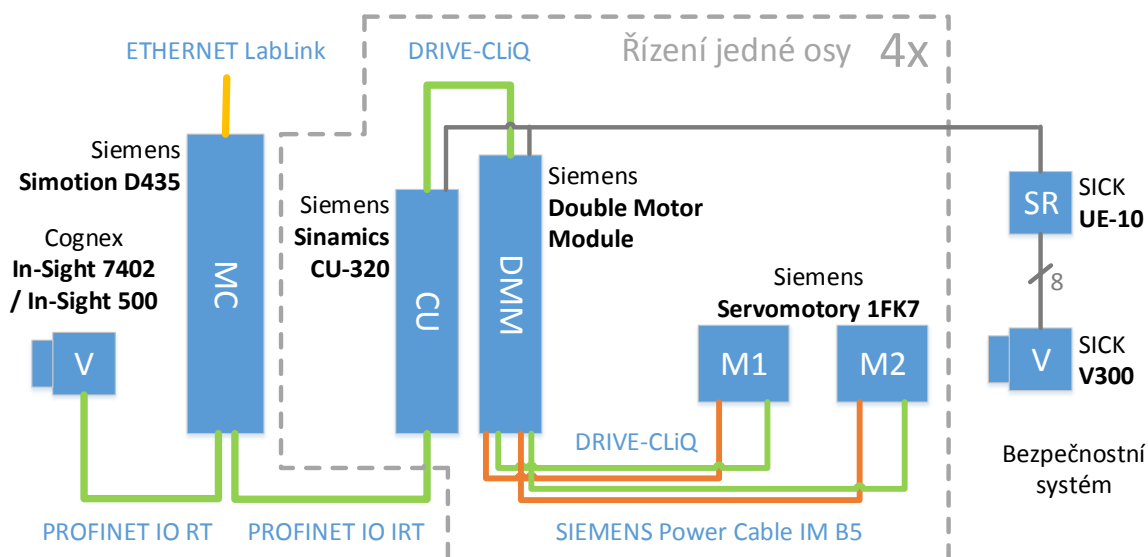
Oba motory jsou shodně typu 1FK7 SIMOTICS S od firmy Siemens, jejich vybrané parametry jsou v tabulce 2. Jsou připevněny na spodní straně stolu.

Řada	SIMOTICS S
Typ	1FK7 COMPACT
Provedení	synchronní servomotor
Příkon	0,38 KW
Maximální otáčky	6 000 RPM
Brzda	ano
Konektivita	přípojka Siemens IM B5
Snímač polohy	relativní s Drive-CliQ

Tabulka 2: Vybrané parametry motorů

4.2 Řídicí systém

Řídicí systém je postaven na komponentách od firmy Siemens, konkrétně na průmyslovém automatu Simotion D435 (Motion Controller), doplněném komponenty z řady Sinamics S120, jako jsou řídicí jednotky nebo napájecí moduly pro motory. Součástí řídicího systému je také inteligentní kamera InSight 7402 (případně In-Sight 500) od firmy Cognex. Principiální schéma je na obr. 7



Obrázek 7: Principiální schéma řídicího systému

Celý systém je řízen průmyslovým automatem Simotion D435, který je připojen pomocí běžné sítě Ethernet do školní podsítě LabLink, celý systém proto může být konfigurován a programován z libovolného počítače v této síti s příslušnou softwarovou výbavou (Siemens Step7 a Scout). Pomocí průmyslové sítě PROFINET IO automat izochronně komunikuje s řídicími jednotkami Sinamics CU320, z nichž každá přes Double Motor Modul a komunikační rozhraní DRIVE-CLiQ řídí pohyb dvou motorů, tedy jedné osy. Zpětnou vazbu z motorů zajišťují integrované relativní snímače polohy, opět připojené přes rozhraní DRIVE-CLiQ. Vybrané parametry použitých komponent jsou v tabulce 3. Detailní schéma celého řídicího systému je v příloze.

Simotion D435

Max. počet připojených motorů	32
Operační paměť	48 MB
Min. doba komunikačního cyklu	500 μ s (1 ms pro PROFINET IO IRT)
Komunikační rozhraní	Ethernet, PROFIBUS, PROFINET IO (s kartou CBE30) digitální IO (celkem 24)
Napájení	24 V

Sinamics CU320-2 DP

Min. doba komunikačního cyklu	500 μ s (1 ms pro PROFINET IO IRT)
Komunikační rozhraní	DRIVE-CLiQ (4x), PROFIBUS, PROFINET IO (s kartou CBE30) digitální IO (celkem 20)
Napájení	24 V

Double Motor Module

Výkon	1,6 kW
Komunikační rozhraní	DRIVE-CLiQ (4x) přípojka pro motor Siemens IM B5 (2x)
Napájení	24 V

Tabulka 3: Vybrané parametry hlavních komponent řídicího systému

4.3 Bezpečnostní systém

Stůl je vybaven bezpečnostním systémem, který se skládá z bezpečnostního plexiskla čtvercové postavy připevněného shora stolu, inteligentní bezpečností kamery SICK V300 a bezpečnostního relé SICK UE-10 (viz obr. 7). Plexisklo zabraňuje svévolnému přiblížení k pohybující se ose ze stran. Na horním okraji plexiskla je umístěna bezpečností kamera, která monitoruje jeho vrchní otvor. V případě průchodu tělesa o průměru větším jak 30 mm (lidská ruka toto splňuje) tímto otvorem kamera generuje příslušný signál, který je přes bezpečnostní relé přiveden až na příslušné vstupy řídicích jednotek a Double Motor Modulů, které zastaví vykonávaný pohyb.

Vzdálenost bezpečnostní kamerou monitorovaného prostoru od nejbližší pohyblivé části je určena jako

$$d = kT + 8(d-14) + h^{[22]} = 298\text{mm} \sim 300\text{mm}, \quad (1)$$

kde k je maximální rychlost pohybu lidské ruky dle norem (2000 mm/s), d je rozlišení kamery (tomto případě 30 mm), h je maximální přesah hráče přes okraj stolu (40 mm) a T je doba, za kterou je systém schopen zastavit pohyb. Tato doba se skládá z detekční doby kamery (25 ms), doby sepnutí bezpečnostního relé (20 ms), reakční doby řídicího systému (25 ms) a doby zastavení motoru. Vzhledem k tomu, že setrvačná síla osy (moment setrvačnosti, tření) je zanedbatelná, rotující osa bez hnací síly motorů již není nebezpečná, a je možné uvažovat dobu zastavení motoru 0 ms. Bezpečností kamera tedy musí být umístěna ve výšce alespoň 30 cm nad hranou stolu.

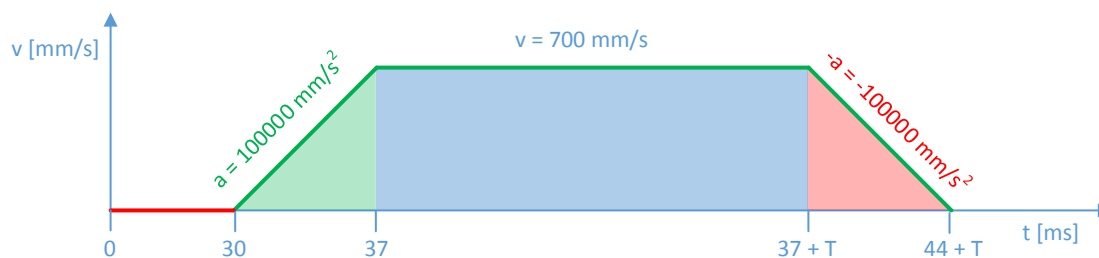
5 Řízení jedné osy fotbalu

Elementárním článkem celého systému je jedna osa, která musí dokázat letící míč zachytit a odehrát požadovaným směrem a rychlostí.

5.1 Analýza možností osy

Klíčovými vlastnostmi osy je rychlost, s jakou dokáže přemístit hráče na požadované místo, a rychlost otáčení, respektive schopnost udělit míči co možná nejvyšší rychlost. Co se týče rychlosti míče při výkopu, vzhledem k tomu, že motor pro rotační pohyb se může otáčet až rychlostí 100 otáček za sekundu, což je po uvažování převodu (faktor 3,05) přes 32 otáček fotbalové osy za sekundu, je rychlost výkopu více než dostatečná. Za optimální otáčky (vzhledem k hlučnosti při nárazu míče) byla po několika experimentech zvolena zhruba třetinová rychlost 30 otáček motoru za sekundu, respektive necelých 10 otáček osy po převodu. Rychlost míčku je v tomto případě necelých 10 m.s⁻¹. V případě potřeby ale nic nebrání až trojnásobnému zvýšení rychlosti otáčení.

Složitější je situace v případě translačního pohybu. Jak bylo uvedeno, zde je klíčová rychlost přesunu. Projevuje se zde několik faktorů. Motory jsou v době nečinnosti zabrzdené, aby nemohlo dojít ke ztrátě informace o jejich poloze nechtěným pootočením, a jejich uvolnění trvá určitou dobu, konkrétně $T_b = 30 \text{ ms}$. Následuje rozjezd se zrychlením $a = 100000 \text{ mm/s}^2$, se stejným zrychlením probíhá i dojezd, pouze se záporným znaménkem. Po rozběhu se osa pohybuje rychlostí $v = 700 \text{ mm/s}$. Celou situaci shrnuje graf na obr. 8.



Obrázek 8: Průběh přejezdu osy

Doba přejezdu τ je určena na základě celkové vzdálenosti l , kterou musí osa urazit. Ta se skládá ze dvou částí. Tou první je vzdálenost, kterou osa urazí během zrychlování a zpomalování,

$$l_a = 2 \cdot \int_0^{0,007} a \cdot t \, dt = 4,9 \text{ mm}. \quad (2)$$

Snadno lze nahlédnout, že doba, za kterou proběhne zrychlení z nulové rychlosti na rychlost v , je $T_a = 7 \text{ ms}$, stejně jako doba, za kterou proběhne zastavení. Dráha, kterou za tuto dobu osa urazí, je rovna integrálu z průběhu rychlosti, kterým v tomto případě popisuje vztah $a \cdot t$. Hodnotu integrálu je třeba uvažovat dvakrát, právě kvůli přítomnosti rozběhu i doběhu osy a tomu, že oba trojúhelníkové útvary jsou obsahově totožné. Druhou složkou celkové dráhy je dráha, kterou osa urazí během přesunu konstantní rychlostí,

$$l_b = v \cdot T = 700 \cdot T. \quad (3)$$

Nejhorší situace může nastat ve chvíli, kdy je osa jedním hráčem u jednoho kraje hřiště, zatímco míč se pohybuje podél druhého. Pro osu se dvěma hráči platí, že vzdálenost, kterou je třeba v tomto případě urazit, je 300 mm. Tedy lze psát, že

$$l = 300 = l_a + l_b = 4,9 + 700 \cdot T \Rightarrow T = \frac{300 - 4,9}{700} \approx 422 \text{ ms} \quad (4)$$

je doba potřebná k přesunu konstantní rychlostí v nejhorším možném případě, který může pro osu nastat. Nakonec je třeba přičíst rozběhový a doběhový čas, a dobu potřebnou pro odbrzdění motoru. Dostáváme celkovou maximální dobu přesunu

$$T_{max} = T + T_a + T_b \approx 466 \text{ ms}. \quad (5)$$

Za dobu maximálně 466 ms může tedy být osa na kterékoli pozici, což je dostatečně krátká doba vzhledem k možnostem kamery (viz kapitola 6). Tuto dobu lze ještě zkrátit zvýšením otáček motoru, ale vyšší rychlosti zatím nebyly testovány.

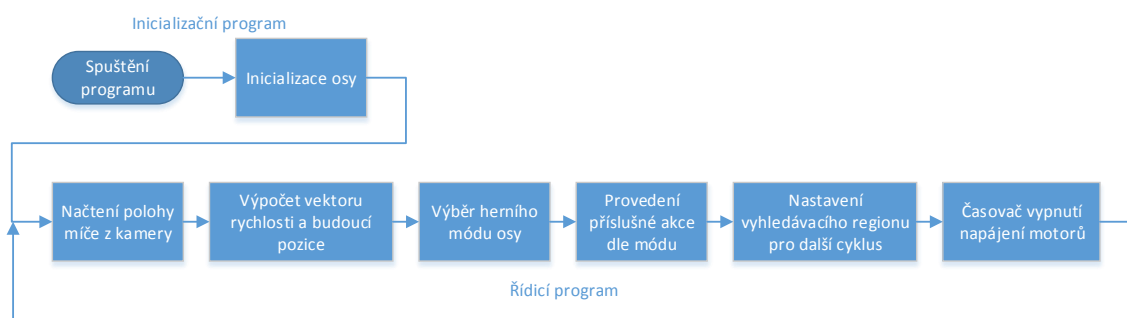
Alternativou k brzdění motorů pomocí mechanických brzd po každém pohybu je brzdění momentem, respektive udržováním konstantní pozice pomocí regulátoru. Toto řešení navíc šetří mechanické brzdy a prodlužuje tak životnost motorů.

5.2 Struktura programu

Programy v řídicím systému se dělí do jednotlivých kategorií podle periody spouštění. Nejdůležitějšími kategoriemi jsou

1. `StartupTask` - programy spouštěné při startu systému.
2. `ShutdownTask` - programy spouštěné při vypínání systému.
3. `MotionTask` - sekvenční programy obsahující řízení motorů, mohou být spuštěny po startu systému, nebo být volány z jiných programů.
4. `BackgroundTask` - programy běžící periodicky na pozadí, nezávisle na komunikačních cyklech.
5. `ServoSynchronousTask` - programy běžící periodicky synchronně s komunikačním cyklem, který zajišťuje řízení servomotorů.
6. `SystemInterruptTasks` - programy volané při chybách v programu či selhání technologie.

Struktura celého programu je na obr. 9. Kategorie *MotionTask* je ideální pro běh programu pro inicializaci (kapitola 5.5) a kategorie *ServoSynchronousTask* je ideální pro běh řídicího programu.



Obrázek 9: Struktura programu

Po spuštění řídicího programu je provedena inicializace osy (funkce *axesInitialization*), která zajistí zjištění aktuální polohy osy (vzhledem k použití relativních snímačů polohy na servomotorech není jejich poloha po spuštění známá). Po inicializaci následuje samotná řídicí smyčka. Nejprve jsou načtena data o poloze míče z kamery, včetně přepočtu na souřadnice v mm (funkce *coordinateSystemTransfer*). Ze získaných dat je následně vypočten vektor rychlosti pohybu míče a odhadnuta jeho budoucí pozice (funkce *countVectorAndEstimateNextPosition*). Na základě těchto údajů je následně zvolen vhodný herní

mód osy (funkce *selectMode*) a provedena příslušná akce (funkce *returnAction*, *defenseAction* a *selectAndDoAttack*). Nakonec je na základě odhadnuté budoucí pozice určena nová oblast, ve které má kamera hledat míč v příštím cyklu (funkce *setSearchRegion*) a otestován časovač nečinnosti motorů, v případě jeho přetečení je vypnuto napájení. Tento časovač je resetován při každém pohybu osy (viz obr. 12). Uvedené funkce jsou detailněji popsány v příslušné příloze.

Celková doba běhu programu není konstantní ale liší se podle aktuální situace, protože program prochází různě výpočetně náročnými sekvencemi. Dobu běhu programu tedy lze vyjádřit několika hodnotami. Minimální doba běhu programu je $\sim 0,5$ ms (v případě obranné akce, která vyžaduje méně výpočtů), maximální je ~ 2 ms (v případě výkopu s nahrávkou, která je výpočetně náročná). Průměrná doba běhu programu je $\sim 1,2$ ms.

5.3 Konfigurace regulátorů

Do řídicího systému jsou již továrně implementováno řízení servomotorů, a to jak řízení polohy, tak řízení rychlosti otáčení. Během konfigurace řídicího systému postačí spustit automatickou identifikaci parametrů, která změří všechny potřebné hodnoty a nastaví přes dvacet parametrů regulátoru pro optimální chod servomotorů. Smyslem této práce není detailně popsat implementované řídicí algoritmy, nicméně kvůli komplexnosti práce je vhodné připomenout přítomnost této funkcionality v systému.

Nastavené parametry regulátorů jsou univerzální pro všechny situace, které mohou nastat (inicializace, pomalé a rychlé přesuny osy atd.), zmiňovanou identifikaci tedy postačí provést pouze jednou a během hry není třeba nastavené parametry měnit.

5.4 Synchronizace horizontálního a rotačního pohybu

Jak již bylo zmíněno, pohyby osou v horizontální i rotační ose nejsou vzájemně nezávislé. Motory jsou vybaveny brzdami, které jsou v případě, že se motor nemá pohybovat, sepnuté, tedy osou nelze samovolně pohybovat v žádném směru a navíc nehrozí nežádoucí změny polohy v důsledku setrvačnosti a podobně. Z obr. 5 je patrné, že během hry mohou nastat následující situace:

1. posun osy v horizontálním směru bez nutnosti rotace \Rightarrow nezávislý pohyb pouze v horizontálním směru
2. rotace osy bez posunu \Rightarrow závislý pohyb, druhý pohon musí kompenzovat vzniklou rotaci, jinak zároveň dochází k posunu v horizontálním směru
3. posun osy a rotace zároveň \Rightarrow závislý pohyb, rotace osy ovlivňuje posun v horizontálním směru

Obecně tedy lze říci, že v případech 2 a 3 je nutné pohybovat oběma motory zároveň. Protože oba motory nemají stejný převod (ozubená kola a řemeny), je nutné použít převodní poměr mezi otáčkami motoru pro translační pohyb ω_t a otáčkami motoru pro rotační pohyb ω_r , platí vztah

$$\omega_r = G\omega_t, \quad (6)$$

kde G je převodní poměr, jehož změřená hodnota je ~ 0.0185 . Toto číslo v sobě zahrnuje jednak převodní poměr mezi oběma motory a ozubenými koly přes řemen (kola nemají stejné počty zubů) a jednak převodní poměr mezi rotací osy a stoupáním závitu.

Použitý řídicí systém má funkcionalitu této synchronizace mezi motory již implementovanou od výrobce, tzv. **gearing**, který tedy postačí jen správně nakonfigurovat. V programu pak mohou být nakonfigurovány dva druhy os, tzv. **Leading axis** (hlavní osa), jejíž pohyb je řízen programem, a dále tzv. **Following axis** (sledující osa), jejíž pohyb je podle zadaného klíče odvozen od pohybu hlavní osy. Tímto klíčem je v tomto případě převodní poměr G . Tedy v případě 2 je rotační osa nastavena jako hlavní, zatímco translační osa pouze kompenzuje vzniklý posun a bude tedy nastavena jako sledující, s opačným směrem pohybu. Následuje úsek kódu demonstrující tuto situaci (kompletní komentovaný zdrojový kód je na příloženém CD).

Nejprve je nastavena rotační osa jako hlavní (Leading axis, master) pro translační osu, respektive pro objekt této osy reprezentující všechny synchronní operace s touto osou.

```
|| retDINT := _setMaster(  
||     followingObject := _to.Axis_1_Translation_SYNCHRONOUS_OPERATION,  
||     master := _to.Axis_1_Rotation);
```

Následně je zapnuta synchronizace rychlosti translační osy (podle nastavené hlavní osy předchozím příkazem) v opačném směru (negative) tak, aby byl kompenzován translační posun vzniklý rotačním pohybem. Synchronizace probíhá podle zadaného převodního poměru (gearRatio) (viz rovnice (6)).

```

retDINT := _enableVelocityGearing(
    followingObject:=_to.Axis_1_Translation_SYNCHRONOUS_OPERATION ,
    direction:=NEGATIVE ,
    gearingRatioType:=DIRECT ,
    gearingRatio:=gearRatio ,
    positiveAccelType:=DIRECT ,
    positiveAccel:=100000 ,
    negativeAccelType:=DIRECT ,
    negativeAccel:=100000 ,
    nextCommand:=WHEN_AXIS_SYNCHRONIZED);

```

Dále je již možné provést potřebný pohyb rotační osou, například o 200 stupňů (otáček motoru) vpřed (positive) rychlostí 5000 otáček motoru za minutu, přičemž synchronizace již probíhá zcela automaticky. Pokud je zvolena při nastavení synchronizace i při samotném otočení stejná akcelerace, budou oba pohyby synchronizovány již od začátku pohybu.

```

retDINT := _pos(
    axis:=_to.Axis_1_Rotation ,
    direction:=POSITIVE ,
    positioningMode:=RELATIVE ,
    position:=200 ,
    velocityType:=DIRECT ,
    velocity:=5000 ,
    positiveAccelType:=DIRECT ,
    positiveAccel:=100000 ,
    negativeAccelType:=DIRECT ,
    negativeAccel:=100000 ,
    nextCommand:=WHEN_MOTION_DONE);

```

Po dokončení pohybu je možné v případě potřeby vypnout synchronizaci mezi osami následujícím příkazem.

```

retDINT := _disableVelocityGearing(
    followingObject:=_to.Axis_1_Translation_SYNCHRONOUS_OPERATION ,
    nextCommand:=WHEN_MOTION_DONE);

```

Systém navíc umožňuje, aby kterákoli osa byla nakonfigurována jako sledující a zároveň mohla být ještě řízena jiným programem. V tomto případě se oba pohyby superponují do jednoho výsledného. To umožňuje splnit požadavky 3. případu, kdy bude translační osa jednak nastavena pro sledování pohybu rotační osy a jednak s ní bude programem samostatně pohybováno. Výsledkem bude konstantní rychlost jejího pohybu nezávisle na pohybu rotační osy. Konkrétní kód pro tento účel je téměř identický s předchozím

uvedeným pro případ 2, pouze pokud je potřeba pohybovat více motory zároveň, je nutné u všech příkazů pro pohyb kromě posledního nastavit

```
||         nextCommand := AT_MOTION_START .
```

Tento parametr zajistí, že po zapnutí pohybu bude program pokračovat na následující příkaz, díky čemuž je možné spustit více pohybů téměř současně (se zpožděním rovnajícím se době zpracování instrukce).

5.5 Inicializace os

Vzhledem k tomu, že použité senzory aktuální polohy motorů jsou relativní, po zapnutí řídicího systému, nebo po jeho zotavení z chyby není v programu informace o aktuální poloze osy. Proto je nutné provést inicializaci osy, a to jak pro horizontální, tak i pro rotační pohyb.

Inicializace probíhá ve dvou krocích, nejprve je osa inicializována horizontálně. Je nastaven pomalý posun směrem k okraji stolu (40 mm/s). Detekce dosažení tohoto okraje je realizována sledováním momentu motoru. Při jeho zvýšení je pohyb zastaven a aktuální pozice je nastavena jako nulový bod osy pro horizontální pohyb. Tento proces demonstruje následující úsek kódu (kompletní komentovaný zdrojový kód je na příloženém CD).

Nejprve je tedy iniciován posun osy k pravému okraji stolu (při pohledu od vlastní brány, positive) rychlostí 40 mm/s. Program pokračuje dále v okamžiku zpracování příkazu (viz kapitola 5.4).

```
|| retDINT := _move(  
||     axis := _to.Axis_1_Translation,  
||     direction := POSITIVE,  
||     velocityType := DIRECT,  
||     velocity := 40,  
||     nextCommand := AT_MOTION_START);
```

Následuje zapnutí sledování momentu motoru pro translační pohyb s limitní hodnotou momentu 30 Nm. Program bude pokračovat až ve chvíli, kdy bude dosaženo této limitní hodnoty, tedy až osa narazí na okraj stolu.

```
|| retDINT := _enableTorqueLimiting(  
||     axis := _to.Axis_1_Translation,  
||     torqueLimit := 30,  
||     torqueLimitType := USER_DEFAULT,  
||     torqueLimitUnit := TORQUE,  
||     nextCommand := WHEN_TORQUELIMIT_REACHED);
```

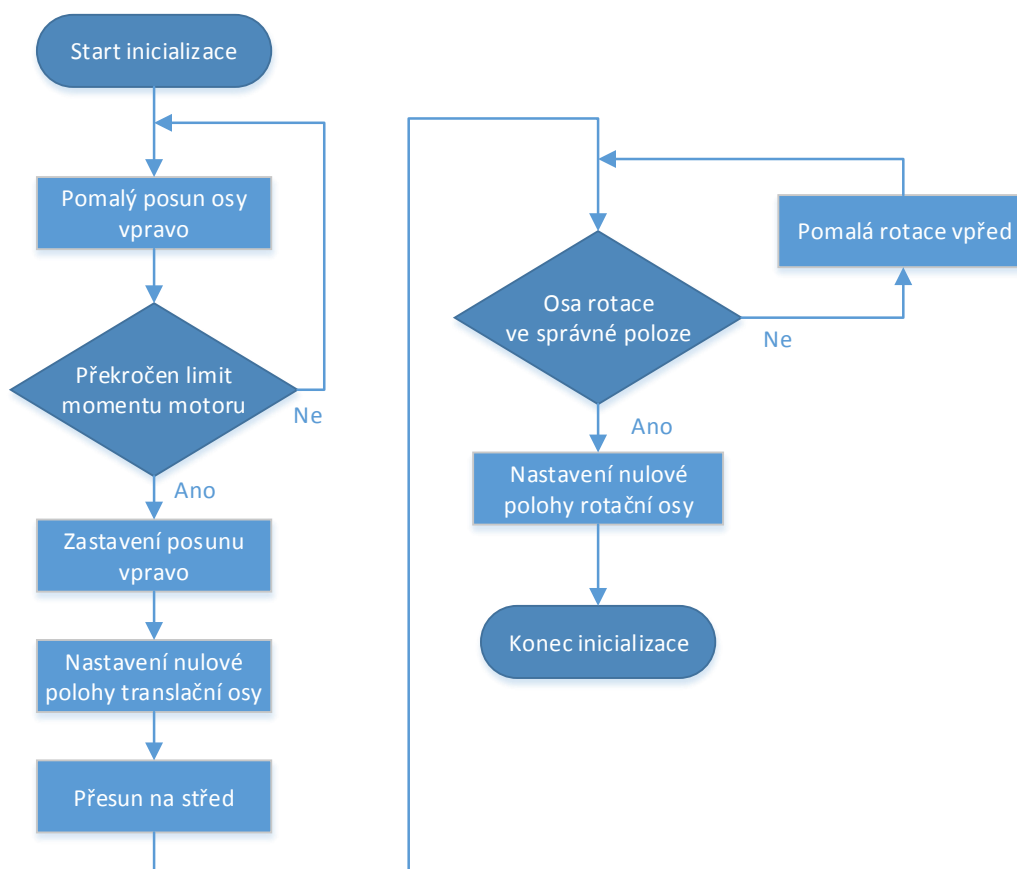
Po dosažení limitu momentu je zastaven pohyb osy bez generování chyby (stopMode). Program bude pokračovat po úspěšném zápisu informace o zastavení do zásobníku diagnostických zpráv.

```
retDINT := _stop(
    axis:=_to.Axis_1_Translation,
    stopMode:=STOP_WITHOUT_ABORT,
    nextCommand:=WHEN_BUFFER_READY);
```

Následuje nastavení nulového bodu translačního pohybu osy na aktuální pozici (homePosition). Program pokračuje po úspěšném provedení příkazu.

```
retDINT := _homing(
    axis:=_to.Axis_1_Translation,
    homingMode:=DIRECT_HOMING,
    homePositionType:=DIRECT,
    homePosition:=0,
    nextCommand:=WHEN_AXIS_HOMED);
```

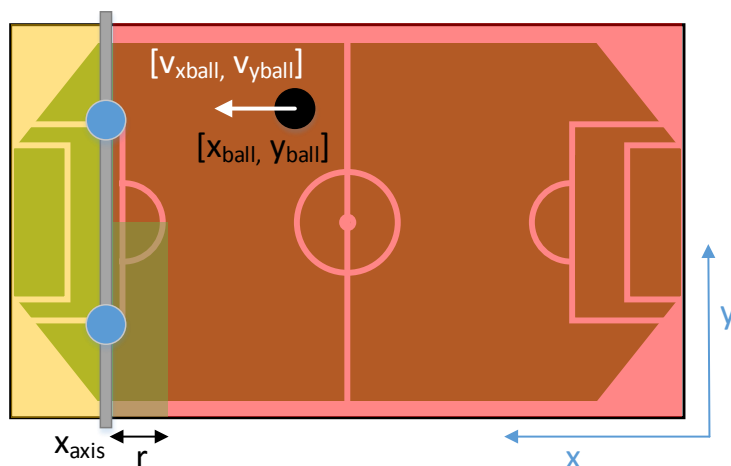
Následuje přesun hráčů doprostřed hrací plochy, tedy o zhruba 185 mm. V této pozici je hráči pomalu rotováno ($\sim 10^\circ/s$) a pomocí kamery probíhá vyhledávání vhodné pozice. Pro tento účel je v kameře implementována speciální úloha, která je mimo proces inicializace vypnutá (více v příslušné příloze). Po detekci vhodné pozice (hráči jsou téměř svisle dolů, ale mírně vychýleni směrem k vlastní bráně) je rotační pohyb zastaven. Tím je dokončen proces inicializace obou motorů. Celý výše popsaný proces shrnuje vývojový diagram na obr. 10.



Obrázek 10: Vývojový diagram inicializace osy

5.6 Módy řídicího systému

Během hry dochází k různým situacím, které je třeba správně vyhodnotit a na jejich základě zvolit optimální strategii (mód osy). Stav, které mohou nastat, mapuje náčrtek na obr. 11.



Obrázek 11: Sektory hřiště vzhledem k ose

Pokud je míč detekován v *oranžovém* sektoru, tedy za osou směrem k vlastní bráně tak, že platí

$$x_{ball} > x_{axis}, \quad (7)$$

není potřeba provádět žádnou akci, pouze pokud je osa mimo svou výchozí polohu, je do ní přesunuta. Je tedy zvolen mód **[1] návrat do výchozí pozice**. To zajistí jednak vždy stejné podmínky pro případnou střelbu z jiné osy zpoza této, a jednak je výchozí pozice optimální vzhledem k možným dalším zásahům proti akcím soupeře.

Pokud je míč detekován v *červeném* sektoru, neboli

$$x_{ball} \leq x_{axis}, \quad (8)$$

závisí dále výsledný zvolený mód na rychlosti, jakou se míč pohybuje. Pokud je jeho pohyb ve směru k ose, tedy ohrožuje bránu, a má dostatečnou rychlost (je nutné vyloučit chyby vzniklé otřesy kamery a malými výchylkami na výstupu algoritmu hledajícího míč), tedy

$$v_{xball} > v_d, \quad (9)$$

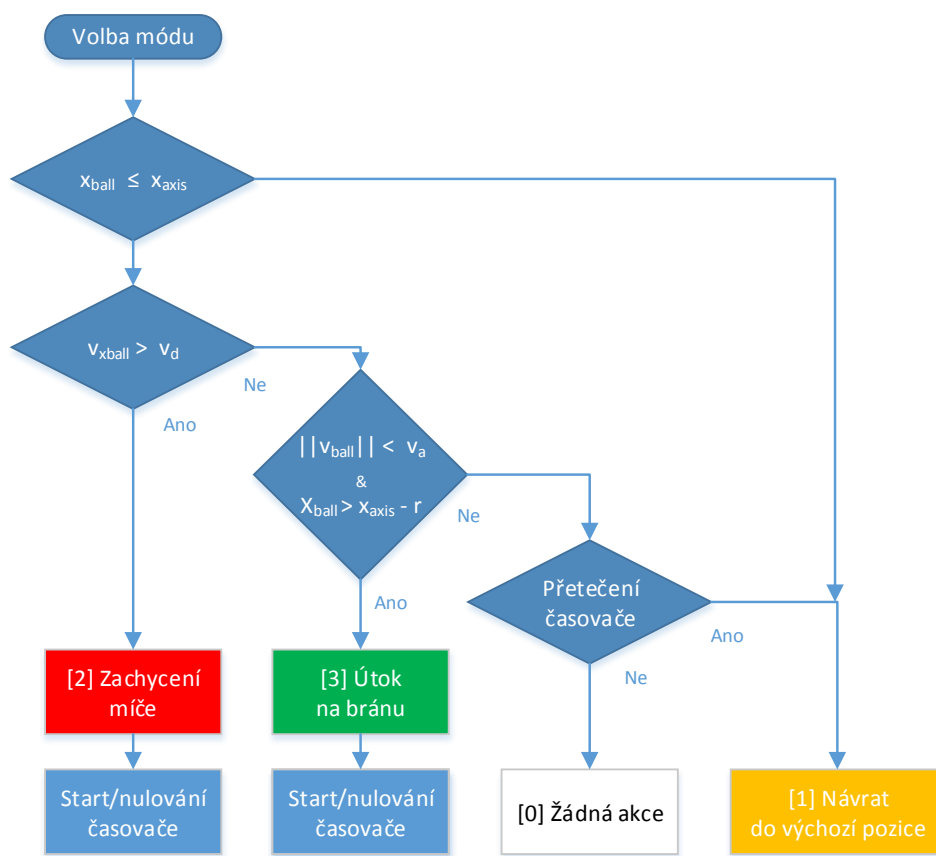
kde $v_d > 0$ je práh rychlosti v ose x , je zvolen mód **[2] zachycení míče**, jehož cílem je zastavit pohyb míče ve směru ohrožujícím bránu.

Naopak, pokud je pohyb ve směru od osy, míč se nehýbe, nebo se směrem k ose pohybuje jen pomalu, a zároveň je v dosahu hráčů na ose (*zelený* sektor), tedy

$$\|v_{xball}\| < v_a \wedge x_{ball} > x_{axis} - r, \quad (10)$$

je zvolen mód [3] **útok na bránu**, jehož cílem je umístit míč do brány soupeře.

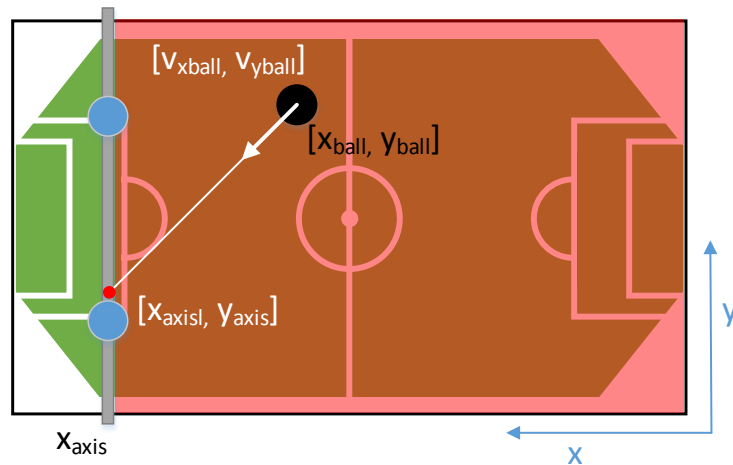
V případě, že není po delší dobu (několik sekund) provedena žádná akce, je osa vrácena také do výchozí pozice, například v případě, že míč stojí, nebo po umístění míče do brány a čekání na nový míč. Vývojový diagram, shrnující výše uvedený algoritmus, je na obr. 12.



Obrázek 12: Vývojový diagram volby módu osy

5.6.1 Mód zachycení míče

Jak bylo popsáno výše, v tomto módu je cílem zamezit pohybu míče směrem k vlastní bráně, tedy nastavit osu do polohy, ve které bude jeden z hráčů této osy na trajektorii pohybujícího se míče. Situaci popisuje obr. 13.



Obrázek 13: Situace v případě zachycení míče směřujícího přímo k ose

Na základě dvou po sobě následujících údajů o poloze míče je určen směr jeho pohybu, reprezentovaný vektorem

$$\mathbf{v}_{ball} = [v_{xball}, v_{yball}] = [x_{ball}(k) - x_{ball}(k-1), y_{ball}(k) - y_{ball}(k-1)], \quad (11)$$

kde k je diskrétní časový krok odpovídající aktualizaci údajů o poloze míče. Dále je potřeba získat průsečík přímky reprezentující budoucí trajektorii míče a přímky reprezentující osu. Obecná rovnice přímky má tvar

$$ax + by + c = 0, \quad (12)$$

přičemž konstanty a a b jsou určeny normálovým vektorem, který lze ve dvoudimenzionálním prostoru snadno získat z vektoru \mathbf{v}_{ball} vypočteného pomocí (11) prohozením souřadnic a změny znaménka u jedné z nich, tedy například

$$a = -v_{yball}, \quad b = v_{xball}. \quad (13)$$

Zbývá dopočítat konstantu c dosazením bodu, kterým přímka prochází, lze tedy použít například poslední známou pozici míče, dostáváme

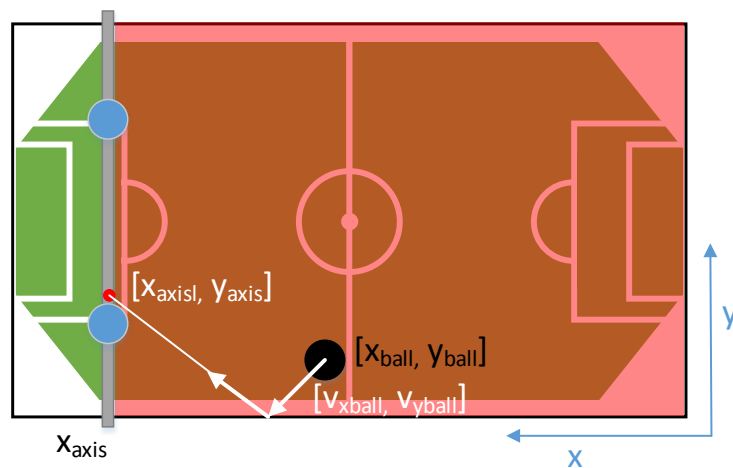
$$c = -ax_{ball}(k) - by_{ball}(k). \quad (14)$$

Množina bodů, vyhovujících obecné rovnici přímky (12), je množinou všech bodů, kterou tato přímka prochází. Vzhledem k tomu, že osa s hráči je rovnoběžná s osou y systému souřadnic, její průsečík s vypočtenou přímkou ve tvaru (12), a tedy bod, do kterého je potřeba nastavit hráče aby došlo k zamezení pohybu, získáme prostým dosazením souřadnice $x = x_{axis}$ do rovnice přímky, tedy

$$y_{axis} = \frac{ax_{axis} + c}{b} = -\frac{v_{xball}y_{ball} + v_{yball}(x_{axis} - x_{ball})}{v_{xball}}. \quad (15)$$

Pomocí vztahu (17) lze tedy snadno získat referenční bod na přímce reprezentující osu, do kterého je třeba umístit hráče tak, aby byl zastaven pohyb míčku v nežádoucím směru. Výsledkem může být také bod, do kterého osu nelze nastavit, především v případě pohybu ve směru osy y takový bod vůbec neexistuje, nebo při pohybu téměř rovnoběžném s osou y , kdy je takový bod mimo hřiště, to jsou ale situace, které nejsou útokem na bránu, tedy postačí pouze ošetřit výpočetní algoritmy tak, aby nedocházelo k chybě a neprovádět žádnou akci.

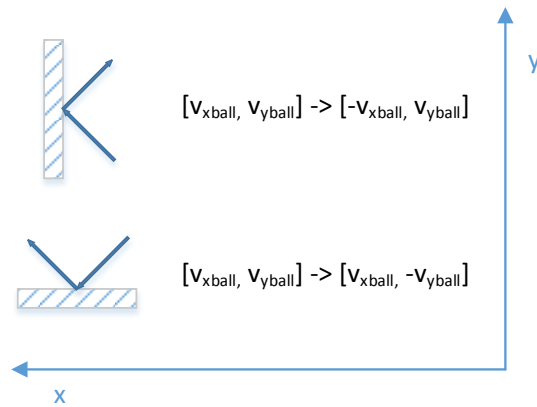
Ke komplikaci může dojít v případě, že se soupeř pokusí překonat obranu pomocí odrazu od stěny hřiště. Tuto situaci popisuje obr. 14.



Obrázek 14: Situace v případě zachycení míče směřujícího k ose odrazem

Takovou situaci je třeba detekovat, vypočtený vektor \mathbf{v}_{ball} je otestován, zda nesměruje k některému z okrajů hřiště, pokud tomu tak je, je třeba aplikovat zákon o úhlu dopadu a odrazu, v tomto případě postačí změnit znaménko souřadnice podle toho, zda se jedná o odraz od stěny rovnoběžné s x nebo y osou souřadného systému, viz obr. 15 a umístit tento nový vektor do místa dopadu určeného podobným způsobem jako v případě výpočtu průsečíku s osou s hráči ve vztahu (17), kde je místo $x = x_{axis}$ dosazena příslušná přímka reprezentující okraj hřiště.

Na tomto místě je vhodné zmínit fakt, že okraje hřiště nejsou vodorovné, ale jsou osazeny nakloněnými plochami (náklon v jednotkách stupňů), které mají za úkol vrátit míč do hry v případě, že se dostane ke stěně. Tyto plochy jsou schématicky znázorněny



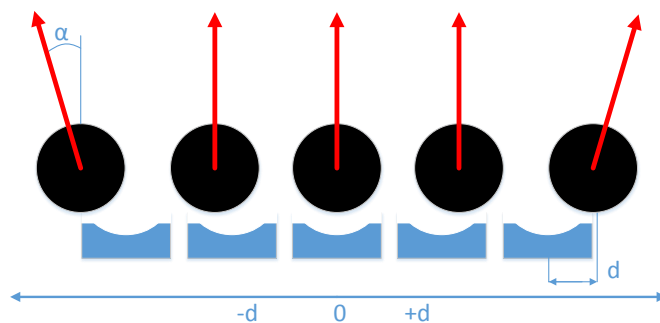
Obrázek 15: Úhel dopadu a odrazu ve dvoudimenzionální vektorové reprezentaci

na obr. 11. Náklon roviny ovšem vnáší jistou nepřesnost do výpočtu úhlu odrazu dle obr. 15. Experimentálně ale bylo ověřeno, že v případě vysokých rychlostí míčku je chyba způsobená těmito nakloněnými plochami srovnatelná s chybou vyhodnocení pozice míčku, a v případě nízkých rychlostí je dostatek času pro následnou korekci vypočtené trajektorie. Tedy vzhledem k nutnosti co možná nejrychlejšího algoritmu vyhodnocení situace a výpočtu odpovídajícího zásahu je tento fakt zanedbán.

5.6.2 Útočný mód

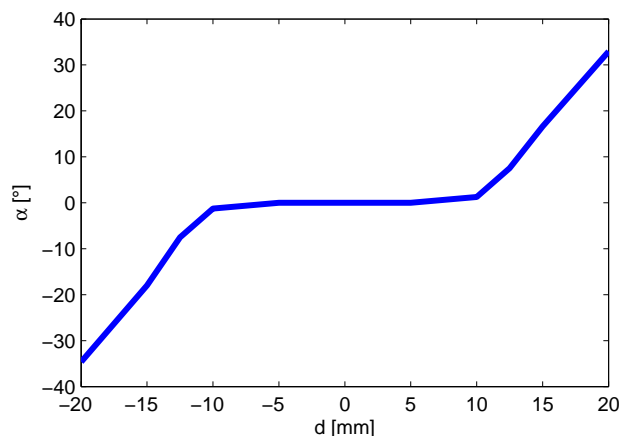
Útočný mód je zvolen, pokud je míč detekován v dosahu hráčů osy a pokud se pohybuje dostatečně pomalu na to, aby mohl být efektivně odehrán (zhruba do 20 mm.s^{-1} , tento údaj závisí především na rychlosti kamery). Cílem je tedy odehrát míč směrem k soupeřově bráně. Navíc je výhodné, aby systém dokázal míč odehrát nejen pouze dopředu, ale v požadovaném směru nebo do požadovaného místa. To může být dále využito především po analýze rozestavení soupeřových hráčů a nalezení vhodné trajektorie pro umístění míče do brány, kde již nestačí míč pouze odehrát dopředu ale je třeba s míčem pracovat lépe. Nejprve je tedy třeba analyzovat dostupné možnosti.

Existují dvě možnosti, jak míč hráčem odehrát jiným směrem, než přímo kupředu. První možností je trefit míč jinak než prostředkem hráče. Plocha na hráči, která při výkopu přichází do kontaktu s míčem, není rovná, ale je prohnutá směrem dovnitř. Situaci popisuje obr. 16.



Obrázek 16: Vliv tvaru hráče na směr výkopu míče

Prohnutý tvar „nohy“ hráče usnadňuje lidskému hráči výkop, protože i přesto, že se mu nepodaří míč trefit přesně, tedy vznikne posun d mezi osou hráče a osou míče, míč letí dopředu. Z důvodu potřeby podrobnější analýzy bylo provedeno měření, jehož výsledek je na obr. 17, graf popisuje změřenou závislost úhlu α odehraného míče posunu d .

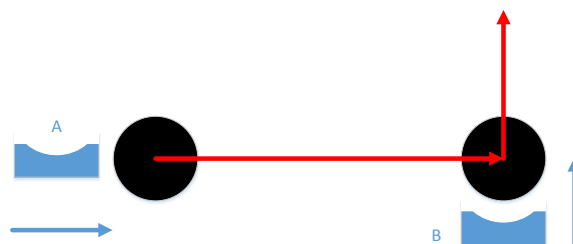


Obrázek 17: Závislost úhlu výkopu na pozici míče vzhledem k hráči

Jak je vidět, v rozsahu zhruba ± 1 cm posunu je směr výkopu stále přímo vpřed, tedy s nulovým úhlem. Po překročení této hranice se charakteristika začíná ostře lámat a končí zhruba na ± 2 cm, za touto hranicí se již míč s hráčem mívá.

Změřená charakteristika tedy není lineární. Hráči jsou navíc plastoví, během hry se opotřebovávají, charakteristika se proto liší i pro jednotlivé hráče. Z toho důvodu není metoda vhodná pro přesné odehrání míče. Při experimentech se podařilo spolehlivě umístit míč na vzdálenost poloviny hřiště (60 cm) do prostoru o šířce 10 cm, vyšší přesnosti se nepodařilo dosáhnout.

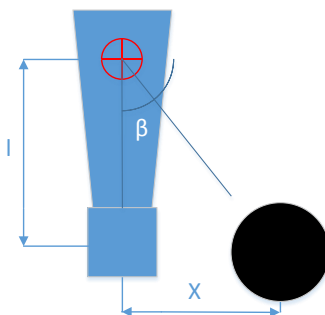
Druhou možností, jak odehrát míč požadovaným směrem, je nahrávka jinému hráči na stejné ose a teprve poté výkop. Jde o profesionálními hráči často používanou techniku. Graficky je tato technika znázorněna na obr. 18.



Obrázek 18: Vliv tvaru hráče na směr výkopu míče

V případě osy s více hráči (všechny kromě osy brankáře) postačí jedním hráčem míč postrčit směrem ke druhému, který na požadované pozici (podle místa, do kterého má být míč umístěn) provede výkop míče. V případě osy brankáře, nebo nutnosti odehrát míč na místě, na které nelze nahrát jinému hráči na stejné ose, je nutné provést nahrávku i samotný výkop stejným hráčem, což je možné, ale pomalejší. Detekce správné pozice pro odpal je zajištěna průběžným vyhodnocováním polohy míče. Průběh tohoto způsobu odehrání míče pro osy se dvěma hráči je vyjádřen pomocí vývojového diagramu na obr. 20. Odehrání míče touto metodou je mnohem přesnější než v případě odehrání za pomoci změny úhlu výkopu, dosahuje přesnosti několika cm.

Přesnost nahrávky podél osy je v tomto případě pro správný výkop klíčová. Vzhledem k tomu, že „noha“ hráče je z boku velmi úzká, směr boční přihrávky silně závisí na vzájemné poloze míče a hráče. Z toho důvodu je nutné určit úhel natočení hráče β v závislosti na vzdálenosti míče od osy. Situaci popisuje náčrtek na obr. 19.



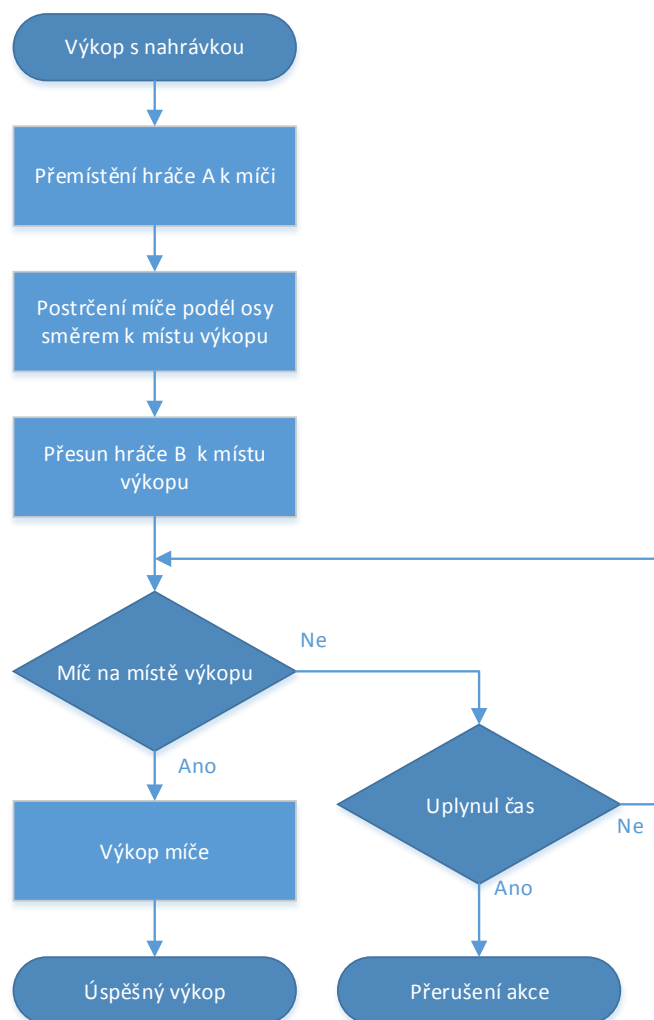
Obrázek 19: Situace při nahrávce bokem hráči na stejné ose

Výsledný úhel natočení je určen jako

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{x}{l} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{x_{axis} - x_{ball}}{l} \right), \quad (16)$$

kde l je délka hráče od středu osy ke středu jeho „nohy“ a x je vzdálenost míče od osy s hráči, viz obr. 19.

Výše představené metody odpalu je vhodné kombinovat. Pro útok na bránu je vhodnější druhá metoda pomocí nahrávky vlastnímu hráči, protože je přesnější. Proti této metodě je ale pro soupeře snazší provést odpovídající protiakci (jednoduchým sledováním pozice y míče vlastním hráčem), proto je vhodné pro překonání soupeřových obránců použít první metodu založenou na změně úhlu výkopu, kdy je pro protihráče těžší odehraný míč zachytit.



Obrázek 20: Vývojový diagram průběhu výkopu s nahrávkou

6 Detekce pohybu míče a hráčů

Až doposud se práce zabývala tím, jak interagovat s pohybujícím se míčem, jak ho zastavit a odehrát co možné nejlépe. To ovšem vyžaduje znalost jeho polohy. Proto se problematikou detekce polohy míče na hrací ploše zabývají následující kapitoly.

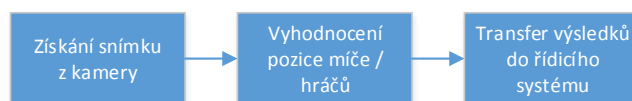
6.1 Možné přístupy

Existuje mnoho možností, jak snímat polohu kulatého objektu na omezené hrací ploše, následuje krátký výčet některých metod.

1. Detekce pomocí optické sítě dostatečně nízko nad povrchem tak, aby hráči na osách nepředstavovaly pro paprsky překážku.
2. Vyhodnocení pozice pomocí rezistivního panelu na hrací ploše, podobného jako u starších mobilních telefonů.
3. Detekce pomocí sítě indukčních prvků umístěných těsně pod hrací plochou, vyžaduje speciální míček s jádrem z feromagnetického materiálu.
4. Vyhodnocení za použití kamery a následné detekce míče v získaném obraze pomocí vhodných algoritmů.

První tři uvedené možnosti vyžadují jednak velký zásah do konstrukce stolu (instalace čidel) a jednak neumožňují zároveň detekovat pozici hráčů na hřišti. Naopak jejich výhodou je jednoduchost zpracování informací, které poskytují (především 1 a 2) a díky tomu rychlost. Naopak vyhodnocení pomocí kamery je instalačně méně náročné (obvykle instalujeme pouze samotnou kameru a osvětlení), ale vyhodnocovací algoritmy jsou výpočetně náročnější, tedy pro dosažení nízké odezvy je nutné disponovat výkonným procesorem a rychlým, optimalizovaným algoritmem.

Vzhledem k potřebě sledovat pozici hráčů, například během hry nebo při inicializaci, je pro nalezení míčku na hrací ploše použita právě kamera. Celý proces od získání snímku až po přenos změřené pozice do řídicího systému je znázorněn na obr. 21.

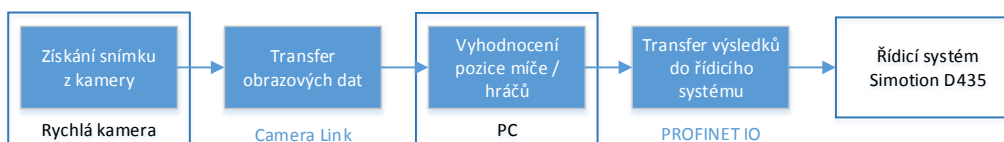


Obrázek 21: Proces zpracování obrazu

Nejdůležitějšími požadavky na systém vyhodnocení pozice míče je spolehlivost a rychlost. Pokud míč na hrací ploše je, musí také být detekován a musí být správně určena

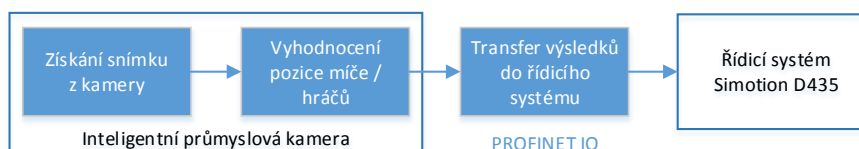
jeho pozice, navíc nesmí docházet k tomu, aby vyhodnocovací algoritmus mylně považoval za míč například hlavu některého z hráčů na ose nebo kresbu na hrací ploše. To vše musí probíhat velmi rychle, řádově v několika málo desítkách milisekund. Vzhledem k tomu, že použitý řídicí systém nedisponuje dostatečným výpočetním výkonem pro zpracování obrazu a použité komunikační kanály nedisponují dostatečnou kapacitou pro rychlý přenos, je nutné použít vyhodnocení v nějakém externím zařízení a do řídicího systému přenášet pouze výsledky. Nabízí se dvě řešení.

1. Použití rychlé kamery a externího počítače s komunikačními kartami pro získání dat z kamery (například pomocí protokolu Camera Link) a komunikaci po síti PROFINET. Schématické znázornění takového řešení je na obr. 22.



Obrázek 22: Proces zpracování obrazu při použití externího počítače

2. Použití vhodné průmyslové inteligentní kamery, tedy kamery, která disponuje možností zpracovat obraz, s komunikačním rozhraním PROFINET. Schématické znázornění tohoto řešení je na obr. 23.



Obrázek 23: Proces zpracování obrazu při použití inteligentní průmyslové kamery

Řešení za použití rychlé kamery nesporně přináší flexibilitu řešení, kterou průmyslové inteligentní kamery obvykle nenabízejí, protože jejich algoritmy a jim přizpůsobený výpočetní výkon jsou omezeny na několik standardních průmyslových aplikací. Naopak co se týče rychlosti přenosu dat, má průmyslová kamera nespornou výhodu. Vzhledem k tomu, že celé řešení je integrováno v jediném obvodu uvnitř kamery, je přenos výsledků do řídicího systému možné realizovat ve velmi krátkém čase, řádově v jednotkách milisekund. Zde je hlavní problém prvního řešení. Přenést data z kamery do počítače a následně z počítače na síť PROFINET a do řídicího systému za tak krátký časový interval je úloha přesahující

zejména časový rámec této práce. Proto bylo po této analýze přistoupeno k použití inteligentní průmyslové kamery.

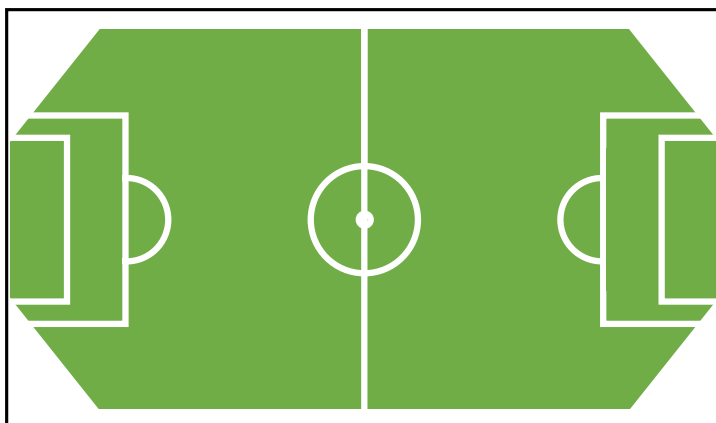
6.2 Barvy a světelné podmínky

Bez ohledu na zvolenou metodu zpracování obrazu musí spolehlivý a použitelný algoritmus splňovat dvě podmínky,

1. spolehlivé rozpoznání hledaného objektu
2. dostatečně rychlou odezvu na dané platformě.

Prvním krokem ke splnění těchto podmínek je úprava snímané scenerie. Pokud se podaří zajistit, že se na hrací ploše bude vyskytovat vždy pouze jeden míč (to je dáno pravidly hry) a že se na této snímané hrací ploše nebudou vyskytovat objekty tvarem nebo barvou jemu podobné, je možné snížit výpočetní náročnost použitých algoritmů, respektive použít jiné, méně složité.

Nabízí se několik možností, jak zvýšit unikátnost sledovaného objektu. Konkrétně v našem případě sledujeme míček určité barvy (dále) na zelené hrací ploše, která obsahuje bílé okraje a bílé dělicí čáry, viz obr. 24.

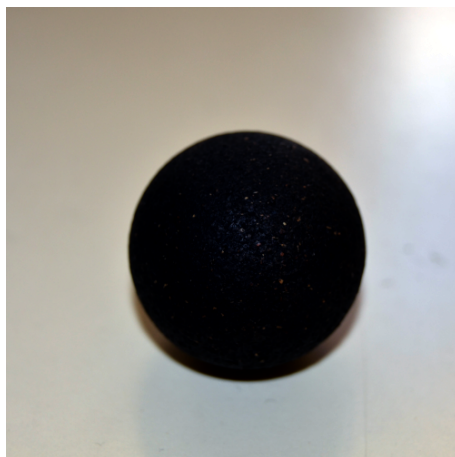


Obrázek 24: Uspořádání a barvy hrací plochy

Z toho důvodu byla postupně přijata následující opatření:

1. Osvícení hrací plochy pomocí celkem pěti LED pásků o celkovém výkonu necelých 60W, čtyři po stranách hřiště (z nichž dva na kratších stranách byly instalovány od výrobce) a jeden nad hřiště. Tímto kokem byla zajištěna stálost expozice nezávisle na okolním osvětlení nebo denní době.

2. Změna barvy míčku z bílé na černou, protože rozpoznání bílého míče by vyžadovalo tmavé pozadí, které ale nelze garantovat a nelze zajistit jeho stabilitu, naopak bílé pozadí lze stabilizovat pomocí osvětlení. Vzhledem k tomu, že černé míče pro stolní fotbal na trhu nejsou dostupné, je nutné je vyrobit za použití korkového míče barveného černým matným sprejem. Kombinací korku a matného spreje dojde k eliminaci nežádoucích odlesků, díky čemuž se na výsledném snímku míč jeví tmavší (obr. 25).



Obrázek 25: Korkový míč nabarvený na černo

3. Změna barvy gumových zarážek na osách z černé na bílou, díky tomu může být vyhodnocovací algoritmus méně robustní. Před touto úpravou docházelo k falešné klasifikaci těchto zarážek jako míče, protože byly tvarově i rozměrově podobné.
4. Úprava expozice kamery tak, aby došlo k tzv. „přepalu“, tedy stavu, kdy je co možná největší plocha ve snímaném obraze s hodnotou maximální bílé, pouze černý míček vyniká. To opět snižuje nároky na vyhodnocovací algoritmus a zvyšuje rychlost zpracování.

6.3 Inteligentní kamera Cognex In-Sight 7402

První testovanou kamerou je kamera od firmy **Cognex**, která se zabývá průmyslovým strojovým viděním. Kamera **In-Sight 7402** na obr. 26 je rychlá inteligentní kamera s širokou škálou integrovaných nástrojů, od čtení čárových kódů, přes vyhledávání objektů ve snímaném obraze, až po měřicí funkce, například měření vzdáleností nebo úhlů natočení, včetně integrovaných transformací zabraňujících chybným výsledkům měření v důsledku deformace snímaného prostoru. Disponuje také rozhraním pro připojení do sítě PROFINET, což je v tomto případě klíčové.



Obrázek 26: Inteligentní kamera Cognex In-Sight 7402

Kameru je tedy možné pomocí softwarového balíčku s názvem *In-Sight Explorer* nakonfigurovat pro hledání míče na hrací ploše, případně pro měření polohy jednotlivých os a hráčů, ať už během procesu inicializace vlastních os, nebo během hry pro vyhodnocování pohybů soupeře. Přehled vybraných parametrů této kamery je v tabulce 4.

Rozlišení a typ čipu	1280 x 1024 px CMOS
Snímkovací frekvence (bez algoritmů)	60 FPS
Rozměry	75 x 55 x 47 mm
Optika	C-mount Tamron 8mm
Konektivita	PROFINET IO (konektor M12)
Třída ochrany	IP 67
Napájení	24 V

Tabulka 4: Vybrané parametry kamery Cognex In-Sight 7402

Spolu s kamerou je použit objektiv *Tamron 8mm* s manuálním ostřením a nastavitelnou clonou v rozsahu 1,4 - 16.

6.3.1 Maximalizace rychlosti kamery

Vzhledem k tomu, že kamera je primárně určena pro sledování pomalejších procesů, než je pohyb míče, který se může pohybovat až rychlostí $15,5 \text{ m.s}^{-1}$, je nutné využít všech dostupných možností pro snížení výpočetní náročnosti použitých algoritmů tak, aby bylo možné vyhodnocovat pozici míče na hrací ploše v co možná nejkratších časových intervalech. Celková doba zpracování snímku je výsledkem doby získání snímku, která je dle výrobce rovna necelým 17 ms (60 FPS) a nelze ji ovlivnit, a dobou běhu vyhodnocovacího algoritmu. Právě dobu běhu algoritmu lze výrazně ovlivnit, jednak konfigurací kamery a jednak již zmiňovanými úpravami snímané scény. Pro snížení výpočetní náročnosti je nutné provést následující kroky:

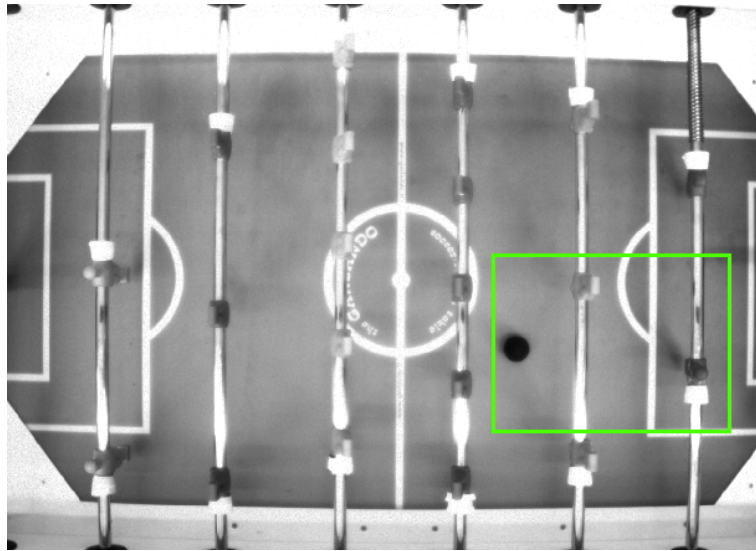
1. Úprava snímané scenerie, viz kapitola 6.2. Díky těmto krokům může být použitý algoritmus vyhledávání méně robustní, postačí testovat méně podezřelých objektů atd.
2. Použití dynamické oblasti vyhledávání. Na základně vlastností hry lze omezit oblast, na kterou je možné omezit vyhledávání míče bez újmy na kvalitě řízení. Touto problematikou se zabývá samostatná kapitola 6.3.2.

Po těchto úpravách je celková doba vyhodnocení 24,5 ms, tedy samotný algoritmus potřebuje ke svému běhu necelých 8 ms. Celková doba včetně přenosu po síti do řídicí jednotky je 25,5 ms (1 ms trvá cyklus sítě).

Detailním postupem konfigurace kamery se zabývá zvláštní příloha této práce, viz seznam příloh.

6.3.2 Dynamická oblast vyhledávání

Během hry je údaj o pozici míče použit ve dvou případech. Poprvé, když soupeř útočí a míč se pohybuje směrem k ose vysokou rychlostí, a podruhé během výkopu, kdy je potřeba znát pozici míče pro správný výkop. Sledování míče po výkopu není prioritní. Z této úvahy lze vyvodit závěr, že míč je třeba sledovat především pokud stojí (pohybuje se pomalu) nebo se pohybuje směrem od soupeře. Na základě tohoto závěru je navržena oblast sledování na obr. 27.

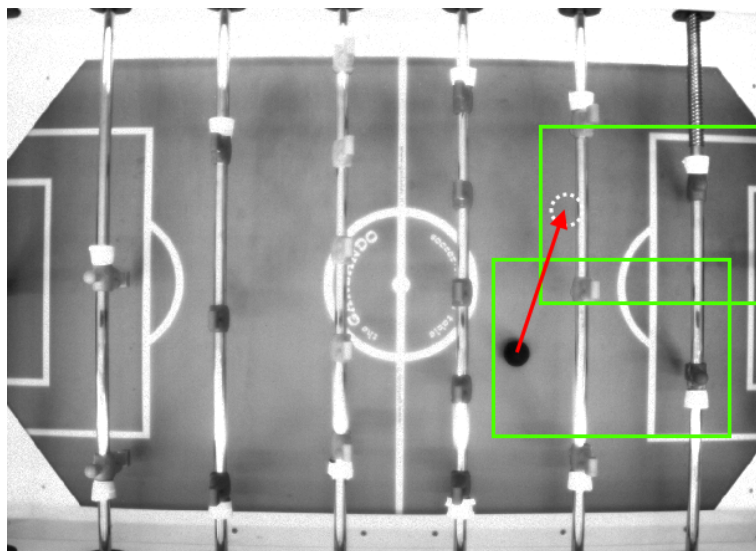


Obrázek 27: Oblast vyhledávání

Tato oblast je po každé nově vyhodnocené pozici míče dynamicky změněna (viz obr. 9), na základě znalosti aktuální pozice míče $\mathbf{b} = [x_{ball}, y_{ball}]$ a vektoru jeho rychlosti \mathbf{v}_{ball} je odhadnuta budoucí pozice míče jako

$$\mathbf{b}_{new} = \mathbf{b} + \mathbf{v}_{ball}, \quad (17)$$

a okolo ní je umístěna nová oblast vyhledávání, viz obr. 28. V případě, že není míč v dané oblasti nalezen (nebo po spuštění programu), je oblast rozšířena na celé hřiště.



Obrázek 28: Dynamická oblast vyhledávání

Z nutnosti změny vyhledávací oblasti je třeba vyměňovat data mezi kamerou oběma směry, nejen přenášet změřenou pozici míče z kamery do řídicího systému. Detailní nastavení této výměny dat je opět popsáno v příslušné příloze.

Z výše uvedeného vyplývá, že doba vyhodnocení polohy míče se může výrazně měnit. Po vhození míče do hřiště nebo po jeho vynoření se ze zákrytu osy je změřená doba jeho nalezení a přenesení údajů o jeho poloze do řídicího systému zhruba 42 ms. Naopak, pokud je již míč nalezen a probíhá pouze jeho sledování, je tato doba mnohem nižší a činí uvedených 25,5 ms. To má vliv především během obranných akcí, kdy je reakční doba rozhodující. Při umístění kamery shora se může stát, že při výkopu míče soupeřem se bude míč nacházet v zákrytu osy a reakční doba osy se tak prodlužuje na téměř dvojnásobek.

Při uvedených dobách zpracování a rozlišení snímaného obrazu je přesnost určení pozice míče 2 mm v obou osách. Tato hodnota vychází pouze z provedených experimentů, výrobce kamery samozřejmě neumožňuje přístup ke zdrojovým kódům algoritmu v kameře, určení přesnosti měření pomocí experimentu je tedy prakticky jedinou možností.

Pomocí kamery je také možné vyhodnocovat pozici soupeřových hráčů, k tomu lze snadno nakonfigurovat příslušné úlohy přímo v kameře (podobně jako úlohu pro inicializaci osy, viz příslušná příloha). Kvůli úspoře výpočetního času ale musejí být tyto úlohy zapínány a vypínány řídicím systémem tak, aby během obranných akcí, kdy je rychlost vyhodnocení polohy míče klíčová, zbytečně neprodužovaly doby potřebnou k jeho nalezení. Měření polohy soupeřových hráčů je potřebné pouze v případě útoku, kde je na reakci mnohem více času než v případě obrany. V takovém případě se doba zpracování snímku prodlužuje zhruba na 60 ms.

6.4 Inteligentní kamera Cognex In-Sight 500

Podobně jako kamera In-Sight 7402, i In-Sight 500 (obr. 29) je vybavena rozhraním PRO-FINET a jedná se opět o inteligentní kameru vybavenou mnoha nástroji pro rozpoznání a sledování objektů. Její vybrané parametry jsou v tabulce 5.



Obrázek 29: Inteligentní kamera Cognex In-Sight 500

U žádné z použitých kamer výrobce neuvádí konkrétní výpočetní sílu použitých komponent, výkon kamery lze tedy pouze odhadnout z jiných uvedených parametrů, především z uvedeného počtu snímků za sekundu. Tato kamera by tedy měla poskytnout významně vyšší výkon i v plném rozlišení, navíc je možné experimentovat s rozlišením kamery a tento výkon dále zvyšovat, ovšem za cenu nižší přesnosti.

Rozlišení a typ čipu	1024 x 768 px CMOS ¹
Snímkovací frekvence (bez algoritmů)	98 FPS
Rozměry	80 x 80 x 60 mm
Optika	C-mount Tamron 8mm
Konektivita	PROFINET IO (konektor M12)
Třída ochrany	IP 65
Napájení	24 V PoE class 3 ²

Tabulka 5: Vybrané parametry kamery Cognex In-Sight 500

Po nastavení kamera vykazuje dobu zpracování jednoho snímku 17 ms (oproti 24,5 ms v předchozím případě) při plném rozlišení, tedy vykazuje o zhruba 46% vyšší rychlost. V případě třetinového rozlišení (320 x 240 px) klesá potřebná doba na 13 ms. Co se týče přesnosti změřené pozice, v případě plného rozlišení je experimentálně určená přesnost podobná jako u první kamery (2 mm v ose x a 3 mm v ose y), v případě zmiňovaného třetinového rozlišení přesnost klesá na 3 mm v ose x a 4 mm v ose y . Rozdíl v přesnostech není příliš velký, což je zapříčiněno tvarem sledovaného objektu, kruhový objekt lze snadno a přesně detekovat i při nižších rozlišeních. Přesnost se pro tuto kameru liší podle osy, protože rozdíl mezi rozlišeními v jednotlivých osách je větší než u předchozí kamery.

U této kamery je ovšem problém se souborem GSDML - General station description XML, který popisuje parametry zařízení a komunikace s ním po síti PROFINET. Tato kamera je dle výrobce jakýmsi vývojovým mezičlánkem a do termínu dokončení této práce se nepodařilo potřebný soubor získat, navzdory intenzivní e-mailové komunikaci přímo s výrobcem. Kamera tedy byla nakonfigurována a otestována, ale nebylo možné propojit ji s řídicím systémem. Po získání potřebného souboru lze očekávat bezproblémové zprovoznění komunikace se stejnými parametry jako v případě první kamery.

¹Kamera disponuje možností snížit rozlišení kamery až na 320 x 240 px, při kterém dosahuje rychlosti 430 FPS (opět bez algoritmů).

²Technologie Power over Ethernet umožňuje napájet zařízení přes kabel sítě Ethernet, v tomto případě vyžaduje třídu 3, tedy napájecí proud max. 20 mA.

7 Zhodnocení výsledků

Podařilo se konfigurovat řídicí systém i jednotlivé motory pro plynulý chod systému, razance výkopu je více než uspokojivá, při třetinových otáčkách motoru dosahuje míč rychlosti zhruba 10 m/s a otáčky lze dále zvyšovat. V aktuální konfiguraci je možné hráče na ose přesunout do libovolné pozice za dobu kratší než 500 ms, rychlost lze dále zvyšovat, ovšem za cenu vyšších vibrací a hlučnosti systému, tedy v tomto případě není zvyšování rychlosti bez komplikací. Vyskytly se problémy, které se nepodařilo odstranit softwarově, jejich odstranění je navrženo v následující kapitole 8.

K systému byla připojena inteligentní kamera komunikující pomocí sítě PROFINET, kamera byla nakonfigurována pro spolehlivé a co možná nejrychlejší nalezení míče na hřišti. Dále byly testovány možnosti analýzy pozice hráčů na hřišti, v tomto případě se kamera ukazuje být také efektivním nástrojem. Z experimentů vyplynula doba změření polohy míče 25,5 ms včetně přenosu dat do systému s přesností 2 mm. K dispozici byla také výkonnější kamera, se kterou se dobu měření podařilo snížit na 14 ms s přesností 4 mm, tuto kameru se ale kvůli chybějícím ovladačům nepodařilo připojit k řídicímu systému, komunikace s výrobcem ale stále probíhá.

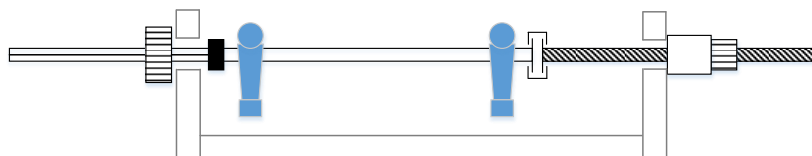
8 Návrhy na zlepšení

Během realizace se vyskytly problémy, které nebylo možné řešit softwarově. Následuje seznam návrhů na úpravy, které povedou k zlepšení výsledků, a to především rychlosti reakce na pohyb míče iniciovaný soupeřem.

1. Převod rotačního pohybu na posuvný pomocí závitů a šnekového ložiska nabízí prostor pro vylepšení. Uložení ložiska není upevněno kolmo k ose, ale vykazuje drobnou odchylku, v jejímž důsledku je odpor osy vůči posunu při každé otáčce v jednom místě o málo větší. To způsobuje vznik nežádoucích vibrací při přesunu osy o různých frekvencích podle rychlosti přesunu. Aktuálně problém částečně řeší podložení, které se ale nezdá být časově stálé, do budoucna by bylo vhodné minimálně způsob podložení vylepšit. Pokud se podaří snížit generované vibrace a hluk, bude možné do budoucna dále zvyšovat rychlost přesunu osy.
2. Během hry se míč často dostává do zákrytu osy, reakce řídicího systému na takový míč je pak značně omezená nebo dokonce nemožná. Problém lze odstranit dvěma způsoby. Je možné systém doplnit o další kameru snímající hrací plochu z jiného úhlu, což zajistí stálý výhled na míč vždy alespoň jedné kamery. Toto řešení je ale

cenově náročné. Druhou možností je umístění kamery pod stůl a nahrazení současné hrací plochy průhlednou (nebo poloprůhlednou) hrací plochou. To umožní stálý výhled na míč. Toto řešení ovšem vyžaduje radikální zásah do konstrukce stolu, bude nutné přepracovat svody míčů z branek a odstranit dno stolu. Jak ukazují podobná řešení popsaná v kapitole 2 i řešení popsané v této práci, systém může fungovat i s jednou kamerou umístěnou nad stolem, ale umístěním kamery pod stůl lze dosáhnout významně lepších výsledků, především co se týče obranných zákroků, které vyžadují co nejrychlejší reakci.

3. Spojení motoru pro rotaci se samotnou osou vykazuje vůli v řádech jednotek stupňů. To nepředstavuje problém pro samotný rotační pohyb, ale pro přesun osy. Při rozběhu a doběhu přesunu se tato vůle projevuje nezanedbatelnými pohyby osy v rotaci. To má za následek samovolné odkopnutí míče místo pouhého zastavení, následně pak není možné provést účinný výkop, protože se míč ztratí z dosahu osy. Tento problém se nepodařilo vyřešit softwarově, především kvůli chybějícím licencím na programové vačky, proto nezbyvá než pokusit se problém odstranit hardwarově. Nabízí se možnost zmenšit mezeru mezi čepem a drážkou na ose, který tuto vůli způsobuje. Problém by také mohlo vyřešit přidání otočného spojení osy s hráči se závitem, namísto současného pevného. Schématicky je tato úprava znázorněna na obr. 30.



Obrázek 30: Schématický návrh úpravy osy

4. Posledním problémem je zasekávání míče během hry. Při pokusu o výkop se může stát, že se míč vzpříčí mezi hráčem a hrací deskou. Tato situace je ošetřena pomocí sledování momentu síly motoru a zastavení pohybu v případě překročení nastavené meze, po němž následuje opětovný pokus o výkop. To ovšem situaci řeší jen částečně, protože se ukazuje, že systém není schopen reagovat tak rychle, aby nedocházelo ke zbytečnému namáhání mechaniky. Řešením tohoto problému může být například instalace pružného spojení osy a jednotlivých hráčů, použití hráčů z pružnějšího materiálu nebo výměna tuhých řemenů za pružnější. Tato pružná složka pak poskytne systému potřebný čas na reakci.

9 Závěr

Byla úspěšně navržena a realizována inicializace relativních snímačů polohy po zapnutí systému. Dále byly navrženy a otestovány algoritmy pro vyhodnocení situace na hřišti a následného zvolení adekvátní reakce osy, algoritmus pro zastavení útoku soupeře a dva algoritmy pro výkop míče, jeden přímo nejbližším hráčem na ose a druhý s využitím nahrávky jinému hráči na ose.

Dále byly k systému připojeny dvě inteligentní kamery pro monitorování situace na hřišti, především pohybu míče. Doba od zachycení snímku až po doručení informace o poloze míče do řídicího systému je v případě první kamery Cognex In-Sight 7402 25,5 ms a v případě druhé kamery Cognex In-Sight 500 až 14 ms. Druhou kameru se ovšem nepodařilo spojit s řídicím systémem po síti PROFINET kvůli chybějícím ovladačům (souboru GSDML - General station description XML). V současné stále probíhá komunikace s výrobcem kamery a snaha získat tento soubor od něj, v případě neúspěchu je možné tento soubor vytvořit podle příslušných manuálů. Celková reakční doba systému od získání snímku až do začátku odpovídající akce je max. 28,5 ms, připojením druhé kamery může být tato doba snížena až na 18 ms. Na samotné akci osy je časově nejnáročnější její přesun, který je v aktuální konfiguraci možný maximálně za dobu 500 ms, nicméně tato doba se výrazně mění se vzdáleností, kterou je nutné urazit.

Bylo navrženo několik hardwarových úprav robotizované osy pro zvýšení reakční schopnosti řídicího systému, neboť během vývoje řídicích algoritmů se vyskytlo několik problémů, které nebylo možné vyřešit softwarově, nebo by byly řešitelné jen s obtížemi.

Reference

- [1] Wikipedia.org, *Table football*, http://en.wikipedia.org/wiki/Table_football. 03/2015.
- [2] Guena E., Picard C., Serigado R., Ulrich B., *Automatic Foosball*. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. 10/2012.
- [3] Savary M., *Vision system for babyfoot*. ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE. 06/2013.
- [4] Myrup A. Ch., Ørding-Thomsen M., *Software til automatiseret bordfodbold*. Technical University of Denmark. 02/2007.
- [5] Weigel T., Nebel B., *KiRo – An autonomous table soccer player*. University of Freiburg. 05/2005.
- [6] KiRo - The Table Soccer Robot, <http://www2.informatik.uni-freiburg.de/~kiro/english/index.html>
- [7] Siemens, *Sinamics S120. Function manual*. 01/2011.
- [8] Siemens, *Sinamics S120. List manual*. 01/2011.
- [9] Cognex, *In-Sight® 7000 Series Vision System. Installation Manual*. P/N INS-597-0138-01 Rev. E 08/2014.
- [10] Cognex, *In-Sight 500 Vision System Reference Manual*.
- [11] Siemens, *Simotion Scout. Configuration manual*. 04/2014.
- [12] Siemens, *Simotion Scout. Getting Started*. 04/2014.
- [13] Siemens, *Simotion. Motion Control, Technology Objects Synchronous Operation, Cam. Function manual*. 02/2012.
- [14] Siemens, *Simotion D4x5. Manual*. 02/2012.
- [15] Siemens, *Simotion Scout Communication. System Manual*. 11/2010.
- [16] Siemens, *Sinamics S120. Control Units and additional system components. Manual*. 04/2014.
- [17] Siemens, *Sinamics S120. Servo Control Drive System*. 04/2014.
- [18] Siemens, *Simatic. Connection of the SINAMICS S120 to the Technology CPU*. 09/2011.
- [19] Siemens, *Simatic. Configuring Hardware and Communication Connections with STEP 7*. 03/2006.

- [20] Siemens, *Distributed synchronous operation and isochronous mode via PROFINET IRT*. 01/2013.
- [21] Brabec V., *Detailní konfigurace Simotion, příloha diplomové práce Integrace a modelování systému distribuovaného řízení polohy a průmyslového robota*, 2012.
- [22] Sick., *V300 Safety camera system, Operatin instructions*, 12/2009.