



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

VZDUŠNÝ HOKEJ – STROJOVÉ VIDĚNÍ A HERNÍ STRATEGIE

AIR HOCKEY – MACHINE VISION AND GAME STRATEGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Sláma

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automatizace a informatiky
Student:	Bc. Ondřej Sláma
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Aplikovaná informatika a řízení
Vedoucí práce:	doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.1111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vzdušný hokej – strojové vidění a herní strategie

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vzdušný hokej nebo Air hockey je společenská hra, která se vyvinula ze stolního hokeje. Je určena pro dva hráče, cílem je dostat kotouč pomocí speciální „pálky“ do soupeřovy branky. Obsahem diplomové práce bude simulační realizace této hry s využitím vhodné heuristiky a návrh systému pro rozpoznání pozice puku.

Cíle diplomové práce:

- Rešerše hry Air Hockey v kontextu návrhu automatického hráče.
- Návrh metodiky a praktická realizace strojového vidění pro detekci puku.
- Vytvoření počítačové simulace pro návrh řízení.
- Vytvoření počítačové simulace pro návrh strategie hry s využitím vhodné heuristiky.
- Zhodnocení výsledků a tvorba prezentace.

Seznam doporučené literatury:

DENNIS, Andrew K. Raspberry Pi home automation with Arduino. Packt Publishing Ltd, 2013.

SPONG, Mark W. Impact controllability of an air hockey puck. Systems & Control Letters, 2001, 42.5: 333-345.

BISHOP, Bradley E.; SPONG, Mark W. Vision-based control of an air hockey playing robot. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 19.3: 23-32.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je ve spolupráci s prací Dominika Jaška [37] realizovat řešení robotického vzdušného hokeje. Konkrétně se práce zabývá implementací simulačního softwaru modelující chování reálného robotického vzdušného hokeje, návrhem strategie hry robota a detekcí polohy puku na herní ploše. Práce byla navíc rozšířena o integraci vytvořených softwarových modulů pod řídicí aplikaci a vytvoření uživatelského rozhraní pro ovládání a správu veškerých funkcionalit stolu skrze dotykový displej.

ABSTRACT

The aim of this diploma thesis is to implement a robotic air hockey table in cooperation with the work of Dominik Jašek [37]. Specifically, the work deals with the implementation of simulation software that models behavior of robotic air hockey table, designing a game strategy for the robot and detecting position of a puck situated on the playing field. In addition, the work was extended by integrating said software modules under one control application and creating a user interface for controlling and managing all the functionalities of the robotic table through a capacitive touch screen.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotický vzdušný hokej, matematický model, simulační software, detekce polohy objektu, strategie hry, Raspberry Pi, interaktivní uživatelské rozhraní

KEYWORDS

Robotic air hockey, mathematical model, simulation software, object position detection, game strategy, Raspberry Pi, interactive user interface

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLÁMA, Ondřej. Vzdušný hokej - strojové vidění a herní strategie. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125433>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Radomil Matoušek.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Radomilu Matouškovi Ph.D. za vedení a připomínky při vypracování závěrečné práce. Zároveň bych chtěl velice poděkovat za vzájemnou výpomoc, ochotu a morální podporu mému kamarádovi a kolegovi Dominiku Jaškovi v jehož spolupráci celá praktická realizace vznikala.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radomila Matouška Ph.D. a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou součástí bibliografických citací uvedených v seznamu literatury.

V Brně dne 25. 6. 2020

.....
Bc. Ondřej Sláma

Obsah

Úvod	13
1 Vzdušný hokej	14
1.1 Standardizace vzdušného hokeje	14
1.1.1 Pravidla hry	14
1.1.2 Rozměry	15
1.1.3 Ostatní parametry	15
1.2 Styl hry	16
1.2.1 Obrana	16
1.2.2 Útok	17
1.2.3 Analýza lidského chování	18
1.3 Matematický model hry	20
1.3.1 Matematický popis puku	20
1.3.2 Interakce puku s herní plochou	21
1.3.3 Odraz puku od mantinelů	21
1.3.4 Interakce puku s hokejkou	22
2 Detekce pozice objektů	23
2.1 Kamerové systémy	23
2.1.1 Algoritmy detekce	23
2.1.2 Příklady hardwaru	26
2.2 Ostatní přístupy	29
3 Konstrukce a hardware	30
3.1 Konstrukce RVH	30
3.2 Kamerový modul	31
3.3 Řídící jednotka a displej	32
4 Simulace hry	33
4.1 Struktura programu	34
4.2 Simulace fyziky	36
4.2.1 Kolize s hokejkou	36
4.2.2 Kolize s mantinelem	37
4.3 Simulace kamery	38
4.3.1 Náhodná odchylka	38
4.3.2 Diskretizace polohy	38
4.3.3 Zpoždění informace	38
5 Návrh strategie	39
5.1 Struktura modulu strategie	39
5.2 Základní třída <i>BaseStrategy</i>	40
5.2.1 Zpracování polohy puku	41

5.3	Navržené strategie	43
5.3.1	Strategie A	43
5.3.2	Strategie B	44
5.3.3	Strategie C	44
5.3.4	Strategie D	45
6	Detekce puku	46
6.1	Snímání a detekce puku	46
6.2	Automatické vyvážení bílé	48
6.3	Automatické rozpoznání barvy puku	49
7	Softwarová implementace	50
7.1	Konfigurace Raspberry Pi 4B	50
7.1.1	Instalace knihoven	50
7.1.2	Nastavení displeje	51
7.1.3	Přetaktování	51
7.2	Struktura programu	52
7.3	Uživatelské rozhraní	54
7.3.1	Struktura programu a základy <i>Kivy</i>	54
7.3.2	Rozvržení a design	56
7.3.3	Dodatečné funkce	58
7.4	Komunikace s řízením pohonů	60
8	Závěr	61
	Seznam obrázků	63
	Seznam tabulek	64
	Seznam algoritmů	64
	Použité zkratky	65
	Seznam použité literatury	66
	Příloha	70

Úvod

Oblíbená arkádová stolní hra vzdušný hokej vznikla jako variace stolního hokeje již v roce 1972. Hra je určena pro dva hráče, kteří se pomocí speciálních hokejek snaží trefit puk, pohybující se po herní desce do soupeřovy brány. Díky ventilátorům tlačící vzduch zpod děrované desky se pod herním pukem vytváří vzduchový polštář a puk se tak pohybuje téměř bez tření. Napodobuje tím chování reálného puku na ledě. Volný pohyb hokejky po polovině herní plochy a schopnost jakkoli odrazet puk od bočních mantinelů dává možnost vzniku mnoha rozdílných pohledů na strategii hry a docílit tak vstřelení gólu i pomocí nečekaných trajektorií.

Práce se zabývá simulační realizací hry spolu s návrhem strategie, detekcí puku na herní ploše a implementací řídicího softwaru stolu s uživatelským rozhraním na jednodeskovém počítači Raspberry Pi a dotykovém displeji od společnosti Waveshare. V úvodní části práce budou stručně popsána pravidla a styl hry vzdušného hokeje spolu s rozbohem chování lidského protivníka při zápasech. Následně budou popsány rozdílná řešení detekce pozice objektů využívané v praxi.

V praktické části bude z počátku nastíněna konstrukce realizovaného robotického vzdušného hokeje (dále jen RVH), která byla hlavní náplní práce Dominika Jaška [37], v jehož spolupráci celá realizace vznikala. V další kapitole bude stručně shrnuta implementace simulačního softwaru hry umožňující vývoj a testování herních strategií v počátečních fázích projektu bez sestaveného RVH. Následně budou navrženy čtyři herní strategie s rozdílným stylem hry, mezi kterými bude možné během hry pomocí uživatelského rozhraní přepínat. V předposlední kapitole bude přiblížena implementace detekce puku pomocí kamerového modulu z rodiny produktů Raspberry a knihovny `opencv`. Na závěr bude stručně popsána implementace jednotlivých softwarových částí na reálném RVH spolu s vytvořením grafického uživatelského rozhraní pro snadné a přehledné ovládání funkcionalit stolu. Popis jednotlivých procedur bude z důvodu velké obsáhlosti zestručněn. Pro plné pochopení implementace jednotlivých částí práce lze nahlédnout do přiloženého zdrojového kódu.

1 Vzdušný hokej

V postupu návrhu automatického hráče RVH je důležité zakládat na již zavedených a standardizovaných vlastnostech klasického AirHockey (česky vzdušný hokej) zobrazeného na obrázku 1. Zejména pak z pohledu stylu hry je důležité, aby robotický hráč neporušoval pravidla a byl i tak schopný herně konkurovat lidskému protihráči.



Obrázek 1: Profesionální vzdušný hokej využívaný na turnajích [1]

1.1 Standardizace vzdušného hokeje

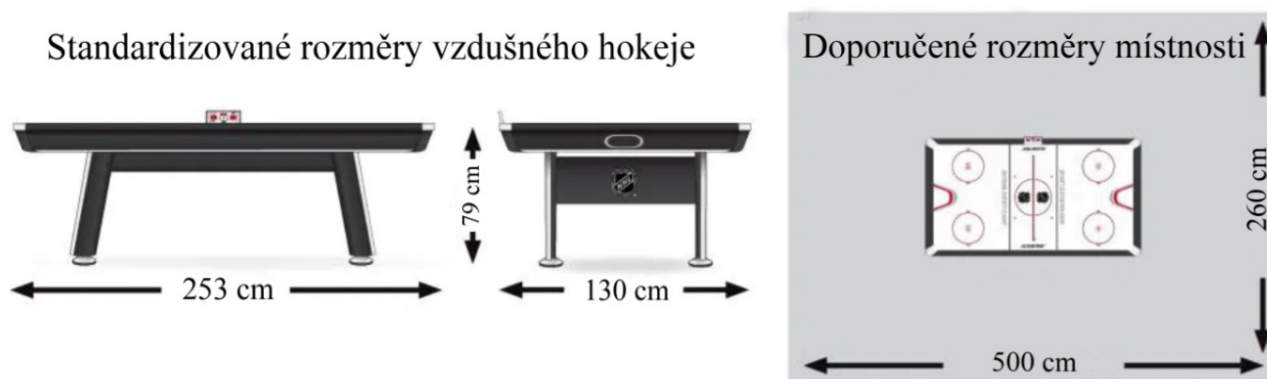
V dnešní době lze nejen koupit množství rozdílných formátů stolu vzdušného hokeje, ale může se lišit i umístění branek, popis pravidel nebo styl hry. Proto byly pro turnajové účely tyto parametry standardizovány.

1.1.1 Pravidla hry

Pokaždé hrají dva hráči proti sobě na hrací ploše s jedním pukem a dvěma hokejkami (viz obrázek 3). Tito hráči se mohou vyskytovat kdekoli kolem stolu na své polovině, ovšem je zakázáno překročit na stranu k soupeřovi [2]. Volný pohyb hokejky je podobně jako pohyb hráče omezen pouze na polovinu herní plochy, jakmile se ale puk dotýká středové čáry, může jej zasáhnout kterýkoliv hráč [2]. Je zakázáno ovlivnit trajektorii puku jiným způsobem, nežli interakcí hokejky. Hra začíná vhazováním, kdy je puk uvolněn rozhodčím ve středu hřiště, každé další rozehrání pak začíná na straně stolu, na kterém byla naposledy inkasována branka [2]. Puk se nesmí vyskytovat na jedné půlce hrací plochy déle než sedm sekund. Pokud hráč nestihne vystřelit, propadá puk protivníkovi. Hráč, který první vstřelí sedm gólů (bodů) ukončuje a vyhrává hru. V některých případech lze hrát i do devíti bodů [2].

1.1.2 Rozměry

Standardní rozměry turnajového stolu vzdušného hokeje odpovídají americkým jednotkám v palcích: délka - 99 1/2“ (252.73 cm), šířka - 51 1/4“ (130.17 cm) a výška - 31“ (78.74 cm) [3]. Pro rozměry místnosti, ve které se hokej nachází, je pak doporučeno počítat z každé strany stolu s alespoň metr širokým volným prostorem (viz obrázek 2) [3].



Obrázek 2: Standardizované rozměry vzdušného hokeje s doporučenými rozměry místnosti [39]

1.1.3 Ostatní parametry

Ostatní parametry jako je velikost a váha puku nebo hokejky (viz obrázek 3) pak nejsou definovány přesně a závisí na výrobci nebo na velikosti a výkonu stolu, ke kterému jsou pořizovány. Průměry puků se pohybují od 45 cm do 90 cm a mohou vážit až 42 gramů [4]. Pro turnajové a profesionální účely se většinou používají puky větší a těžší, zejména kvůli snížení rizika ztráty kontaktu puku s hrací plochou při silnějších úderech [3]. Váha hokejky není standardizována. Těžší hokejky ale umožňují prudší údery, proto jsou často na turnajích limitovány do 170 gramů [4].



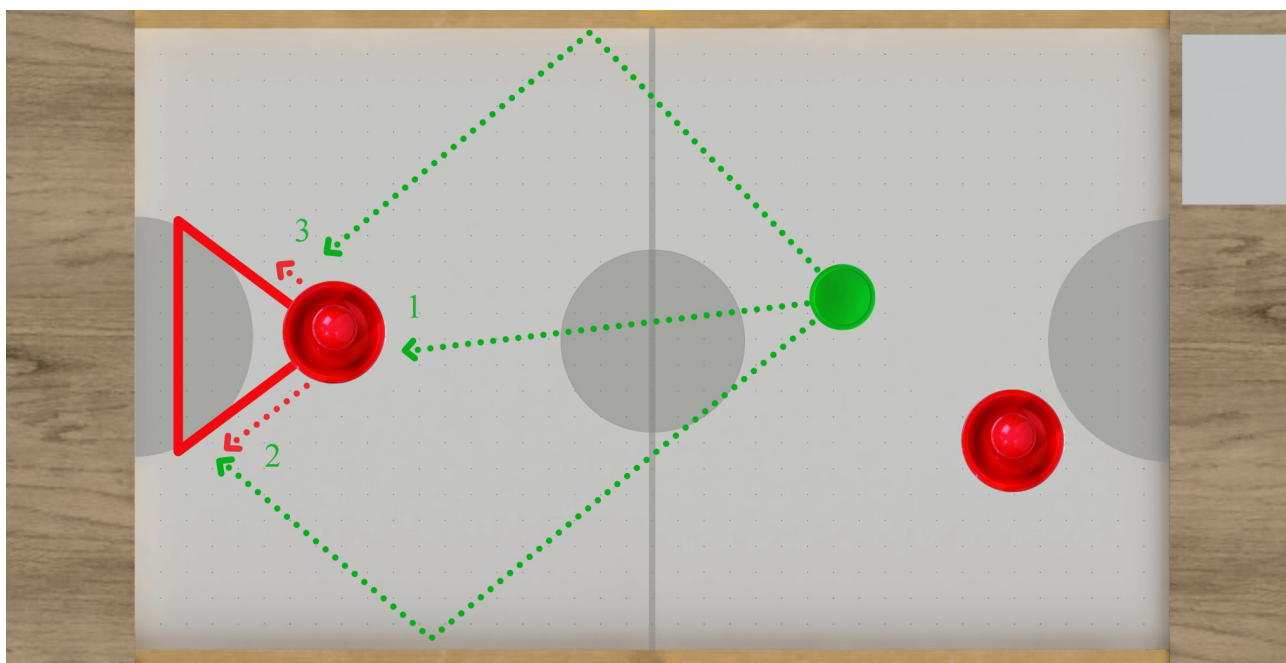
Obrázek 3: Standardní hokejky s pukem pro stolní hru vzdušný hokej [5, 6]

1.2 Styl hry

Při návrhu a vývoji počítačové heuristiky, vyhodnocující akční zásah pro daný stav systému, lze často s výhodou využít již zaběhlé a všeobecně známé postupy využívané manuálně lidskou obsluhou. Proto i pro návrh herní strategie RVH lze zakládat na osvědčených stylech hry profesionálních hráčů. Analýza nejčastějších obranných formací a útočných střel v zápasech turnajových úrovní potom může sloužit jako odrazový můstek pro vývoj rozhodovacího algoritmu. Zajímavý může být i pohled na mnohdy instinktivní chování lidského těla při rychlých změnách trajektorie puku a míra schopnosti rychle se pohybující puk sledovat. Pomocí těchto informací je pak možné najít slabá místa v obraně lidského protihráče nebo naopak úspěšně ubránit často nebezpečné údery.

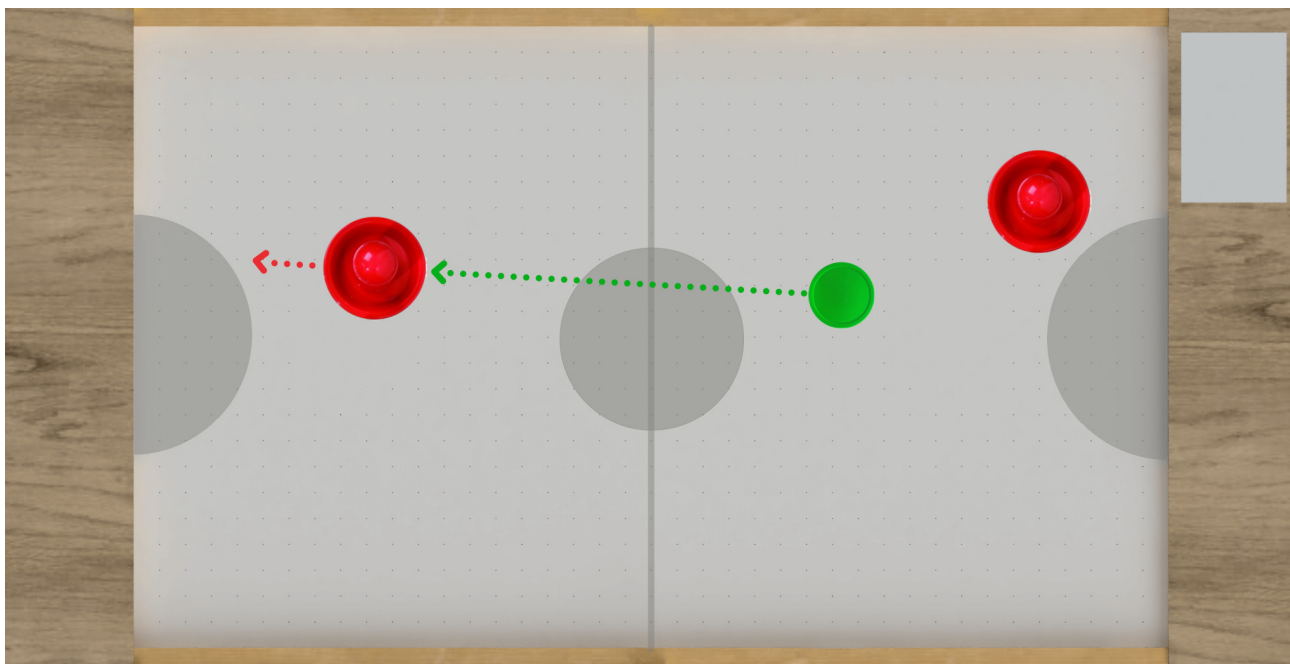
1.2.1 Obrana

Základním opěrným bodem v silné strategii je spolehlivá obrana. Ta vychází nejen z dobře kryté brankové oblasti, ale i schopnosti udržet puk po zákroku na obranné polovině hrací plochy. Profesionální hráči nejčastěji uplatňují tzv. „trojúhelníkovou obranu“ [7] znázorněnou na obrázku 4. Výchozí poloha hokejky je v této formaci vysunutá poměrně daleko před brankovou čárou a vykřívá tak střely mířené přímo na brankový otvor (1). Při úderech protivníka s odrazem o boční mantinel bránící hráč zasune hokejku ke kraji branky na straně odrazu (2). Vykrývá tak bližší brankovou tyč. V případě ostřejšího úhlu odrazu, a tedy útoku na vzdálenější tyč branky, se hokejka posouvá směrem k bližší tyči jen částečně (3). Hokejka by měla puk vyrazit směrem vodorovným s brankovou čárou a udržet tak puk v obranné polovině [7].



Obrázek 4: Znázornění trojúhelníkové obrany

Při pomalejších střelách může bránící hráč zastavit puk tím, že malý okamžik před střetem puku s hokejkou posune hokejku ve směru trajektorie střely s plynulým zpomalením pohybu až do úplného zastavení [7] (viz obrázek 5). Puk tak ztratí svoji kinetickou energii a bránící hráč může okamžitě zaútočit bez nutnosti dalšího zpracování.



Obrázek 5: Znázornění pohybu hokejky při zpracovávání pomalé střely

1.2.2 Útok

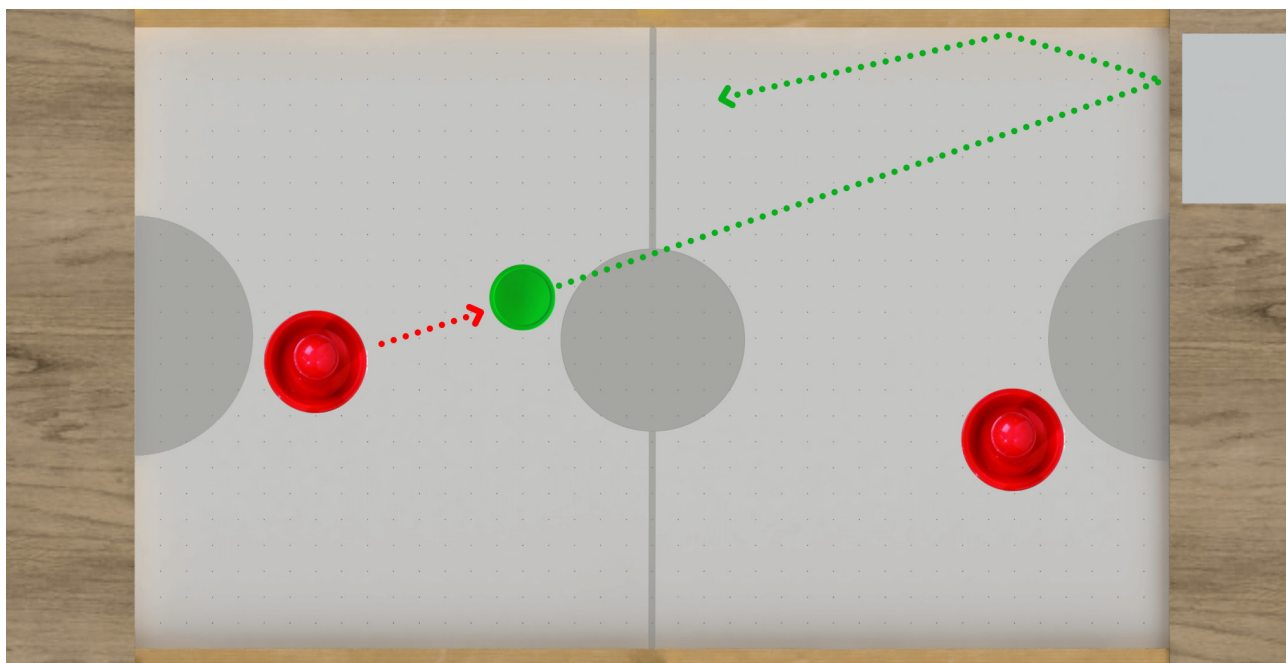
Způsob útoku na bránu soupeře lze rozdělit na základní typy střel:

- Přímá střela na bránu (1)
- Střela s odrazem od bočního mantinelu
 - Střela k bližší tyči (2)
 - Střela k vzdálenější tyči (3)

V případě nepřímé střely pak záleží, zda je puk mířen na bližší či vzdálenější tyč od místa odrazu. Typy střel (1-3) lze vidět na obrázku 4. V některých situacích se v profesionální hře využívá i několikanásobný odraz puku od obou mantinelů. Puk se tak stává hůře předvídatelný pro bránícího hráče. Takový typ střely má ale zásadní nevýhodu v podobě dlouhé doby doletu k brankové oblasti a dává tak obránci více času. Zároveň odrazy od mantinelů výrazně snižují rychlost puku a stěžují míření útočníka, proto je jejich využití výjimečné.

Vzhledem k pravidlu, které zakazuje držení puku na jedné polovině hrací plochy déle jak sedm sekund (viz kapitola 1.1.1), se kromě úderů s cílem skórovat využívají i takzvané falešné

střely [7] za účelem pouze zmást protivníka a odrazem od zadní stěny získat puk zpátky na svoji polovinu (viz obrázek 6). Odpočítávání maximální doby puku na útočnickově polovině se tímto restartuje. Celá útočná série se tak může skládat s několika falešných střel zakončená přesným útokem na bránu.



Obrázek 6: Znázornění falešné střely

1.2.3 Analýza lidského chování

Detailní analýzou lidského chování při různých sportovních aktivitách lze získat mnoho užitečných informací nejen o vlastnostech, ve kterých lidský mozek vyniká, ale i o situacích, kdy je omezená rychlost reakce zásadní nevýhodou. V jedné z nejrychlejších stolních her světa - vzdušného hokeje jsou tyto nedostatky násobeny.

V publikaci vydané v roce 2012 [9] byly shrnuty poznatky ze sledování pohybu očí lidských hráčů při předem definovaných herních situacích. Pro rozpoznání sledovaného bodu byl využit přístroj EMR8¹, připevněný na helmě sledovaného hráče a využívající infračervené záření spolu se snímací kamerou (viz obrázek 7). Získaná data byla poté pomocí transformační matice přepočítávána do souřadného systému herního stolu. Transformační matice byla neustále aktualizována a počítána z projektovaných obrazců na herní ploše pro co nejpřesnější výsledky.

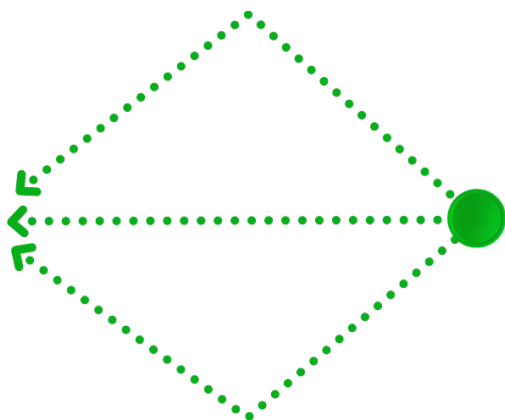
¹Přístroj pro obrazovou analýzu firmy NAC Image Technology Inc



Obrázek 7: Fotka experimentální sestavy pro sledování pohybu očí lidského hráče [9]

Sledování pohybu očí probíhalo na třech předem definovaných trajektoriích puku se dvěma hodnotami rychlosti. Dohromady bylo tedy opakovaně zkoumáno šest různých situací. Trajektorie puku se náhodně střídala mezi přímou střelou středem, odrazem od levého mantinelu a odrazem od pravého mantinelu [9] (viz obrázek 8). Střely byly prováděny testovací robotickou rukou se dvěma stupni volnosti, sestavenou pro tyto účely autory publikace. Tím byla zajištěna reprodukovatelnost jednotlivých střel.

Cílem bylo zjistit, u jakých typů střel a při jakých rychlostech bylo sledování puku nejproblematictější a naopak které situace nedělaly lidské schopnosti sledovat pohybující se objekt potíže.



Obrázek 8: Schéma testovacích trajektorií puku při sledování pohybu očí lidského hráče

Pro pomalejší verze trajektorií střely (2 m/s) vyplynuly z výsledku sledování následující poznatky [9]:

- Subjekt při snaze pozorování pohybuujícího puku sledoval oblast, kde se puk nacházel před 0,2 vteřinami.
- V častých případech subjekt změnil pohled na protivníkovu hokejku okamžitě po odražení puku na své polovině.

Při rychlých střelách ($3-5 \text{ m/s}$) potom [9]:

- Subjekt sledoval oblast, kde se puk nacházel před 0,27 vteřinami.
- V některých případech subjekt ztratil schopnost puk sledovat úplně.

Těsně před úderem robota subjekt v obou případech sledoval oblast hrací plochy před pukem ve směru k subjektu. U začátečnických hráčů se také jevilo problematické sledování trajektorie puku s místem odrazu poblíž hráče. V případě odrazu puku od mantinelu poblíž robotické ruky, bylo sledování puku obecně úspěšnější [9]. Z těchto dat lze poté vyvodit typ střely, u které je pro obránce nejobtížnější sledovat její trajektorii - střela s odrazem od mantinelu poblíž obráncovi brány.

1.3 Matematický model hry

Vzhledem k vlastnostem systému se matematický model vzdušného hokeje dá po zanedbání teoretických nelinearit jako je náklon stolu nebo nehomogenní proudění vzduchu děrovanou deskou omezit na popis puku a jeho interakci s herní plochou, mantinely a herními hokejkami.

1.3.1 Matematický popis puku

Herní puk vzdušného hokeje je možné zjednodušeně matematicky popsat jako tenký uniformní disk s hmotností m , poloměrem r a momentem hybnosti I k středové ose vyjádřeným vztahem (1)

$$I = \frac{mr^2}{2}. \quad (1)$$

Popis stavu puku q v čase t je potom vyjádřen vztahem (2):

$$q(t) = (x(t), y(t)), \quad (2)$$

kde $x(t)$ a $y(t)$ je poloha puku v souřadnicovém systému vzdušného hokeje.

1.3.2 Interakce puku s herní plochou

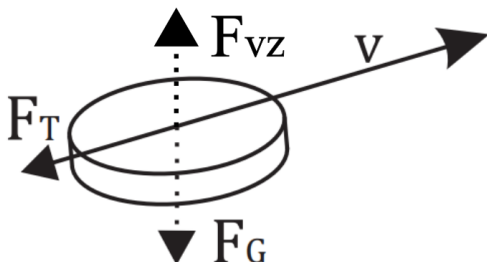
Vzduch, proudící zpod děrované desky a vytvářející vzduchový polštář pod klouzajícím pukem, výrazně snižuje tření a zajišťuje tak pohyb téměř bez ztráty rychlosti. Zvláště při pomalých pohybech ale tento úbytek kinetické energie zanedbatelný není. Při předpokladu, že je stůl vodorovný, lze sílu působící proti pohybu puku vyjádřit vztahem (3) [11]:

$$F_T = \mu \cdot F_N, \quad (3)$$

kde μ je koeficient tření a F_N je síla působící na podložku vyjádřená vztahem (4):

$$F_N = m \cdot g - F_{vz}, \quad (4)$$

kde m je hmotnost puku, g je gravitační zrychlení a F_{vz} je nadnášející síla vzniklá proudem vzduchu. Grafické znázornění působících sil lze vidět na obrázku 9 [11].



Obrázek 9: Znázornění sil působících na puk pohybující se po hrací desce [11]

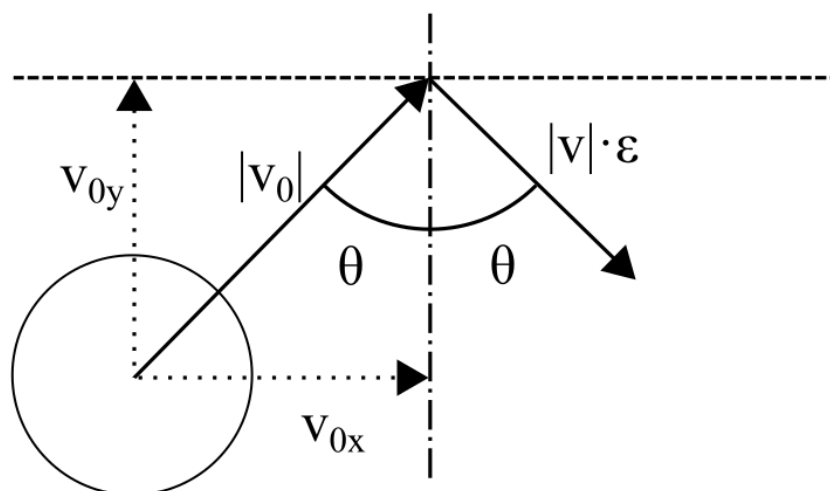
1.3.3 Odraz puku od mantinelů

Největší úbytek kinetické energie puku nastává při odrazech od krajních mantinelů [12]. Po zanedbání změny rotace vzhledem k malému tření mezi pukem a mantinelem v okamžiku interakce, můžeme výsledný vektor rychlosti po odrazu zjednodušeně vyjádřit zrcadlením vektoru rychlosti přes normálový vektor mantinelu a zmenšením jeho velikosti.

Výsledná tlumená velikost je potom vyjádřena vztahem (5):

$$|v| = |v_0| \cdot \epsilon, \quad (5)$$

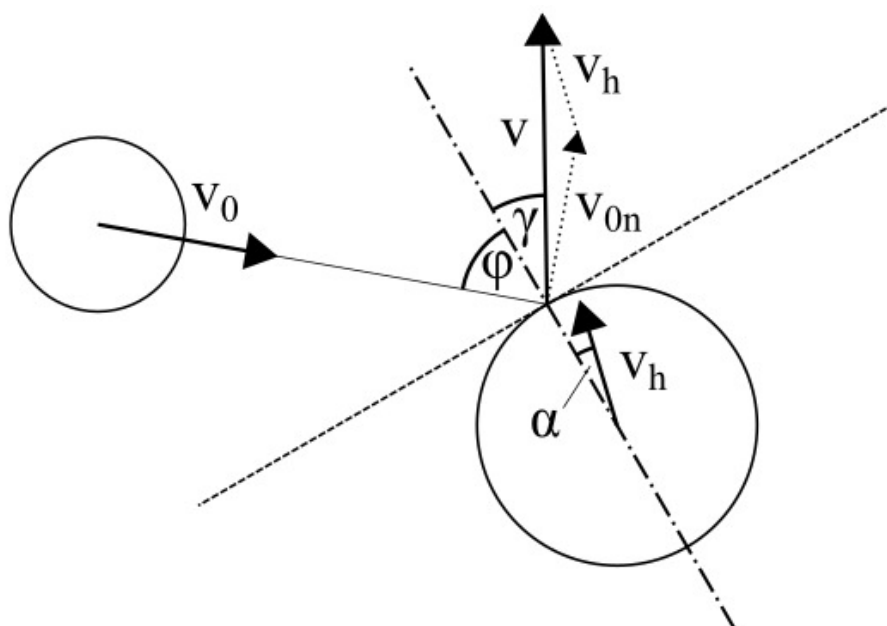
kde $|v|$ je velikost výsledné rychlosti, $|v_0|$ je původní velikost rychlosti před odrazem a ϵ je koeficient tlumení. Znázornění odrazu lze vidět na obrázku 10.



Obrázek 10: Znázornění odrazu puku od mantinelu

1.3.4 Interakce puku s hokejkou

Nejsložitější z interakcí je model kolize puku s hokejkou. Popis je podobný odrazu od mantinelu s rozdílem nenulové rychlosti herní hokejky. Při předpokladu elastické srážky a zanedbání změny pohybu hokejky při srážce lze vyjádřit výslednou rychlost puku po odrazu v jako součet vektorů zrcadlené rychlosti puku v_{0n} od normály kolizní roviny a vektoru rychlosti hokejky v_h [13, 14]. Znázornění odrazu puku od hokejky lze vidět na obrázku 11.



Obrázek 11: Znázornění odrazu puku od pohybující se hokejky

2 Detekce pozice objektů

Způsoby řešení sledování polohy pohybujícího se objektu lze rozdělit na dva hlavní přístupy:

- sledování objektu pomocí kamerových systémů
- využití jiných hardwarových prvků pro detekci polohy

V obou případech je hlavní důraz kladen na co nejpřesnější výstup informace reprezentující polohu sledovaného objektu s minimálním efektem šumu a maximální obnovovací frekvencí.

2.1 Kamerové systémy

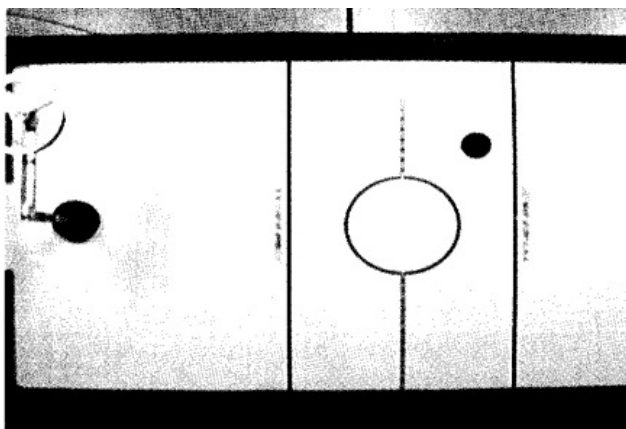
Výhodou sledování polohy objektu pomocí kamerových systémů je zejména obrovská flexibilita ve výběru patřičného hardwaru a relativní jednoduchost v implementaci sledovacích algoritmů. Často je ale zapotřebí poměrně velká vzdálenost kamery od roviny, kde se sledovaný objekt nachází a celý systém tak může zabírat velký prostor. Přesnost detekované polohy a hodnota obnovovací frekvence pak závisí na rozlišovací schopnosti kamery respektive výkonu výpočetní jednotky, která jednotlivé snímky z kamery zpracovává. Díky tomu se může kvalitní a rychlá detekce projevit vysokou pořizovací cenou hardwaru.

2.1.1 Algoritmy detekce

Detekování polohy objektu je prováděno na jednotlivých snímcích získávaných z kamery. Podle typu kamery a vlastnostech sledovaného objektu spolu s jeho okolím lze využít jeden z následujících přístupů (nebo jejich kombinaci) .

Hledání objektu podle úrovně světlosti pixelů.

Princip vyhledání objektu je v tomto případě založen na převedení jednotlivých snímků na binární obraz, tzv. masku snímku (viz obrázek 12).



Obrázek 12: Příklad masky snímku hrací plochy vzdušného hokeje [15]

Každému pixelu, který spadá svojí hodnotou odstínu šedi do daného vyhledávacího intervalu, je přiřazena pravdivostní hodnota 1. Naopak pokud je hodnota mimo rozsah, odpovídajícímu pixelu je přiřazena hodnota 0. Matice těchto hodnot je právě maska snímku, kde pixely s hodnotou 1 odpovídají nalezenému objektu. Pozici hledaného objektu poté odpovídá poloha těžiště pixelů masky s pravdivostní hodnotou 1 [15, 16]. Z obrázku 12 je zřejmé, že by poloha těžiště neodpovídala poloze hledaného objektu, proto by v tomto případě bylo zapotřebí změnit vyhledávací parametry nebo zavést další kritéria (minimální velikost shluku nalezených pixelů apod.)

Vzhledem k využití informace pouze o intenzitě jednotlivých pixelů lze tuto metodu s výhodou využít v kombinaci s černobílými kamerami. Zároveň jsou díky jednoduchosti algoritmu kladeny nižší nároky na výkonost výpočetní jednotky. Informace pouze o intenzitě pixelu může být ale i nevýhoda právě v případě, že se v záběru kamery objevují parazitní objekty s podobnou hodnotou odstínu šedi jako má hledaný objekt.

Hledání objektu podle barvy pixelů.

Metoda je podobná principu hledání objektu pouze pomocí intenzity pixelů, využívá ale dodatečnou informaci o barvě. Snímky se konvertují do formátu HSV² a hodnota H (Hue) jednotlivých pixelů se poté porovnává s vyhledávacím intervalem. Vyhledávání je tak z principu popis barevného modelu HSV invariantní ke změně intenzity osvětlení scény [17, 18, 19]. Podobně jako u předchozí metody tak vznikne maska snímku, ze kterého se dalším postupem získává poloha nalezeného objektu (viz obrázek 13).



Obrázek 13: Původní obrázek a maska obrázku při hledání objektu za pomoci barvy [20]

Metoda je stále poměrně nenáročná na výpočetní výkon a zároveň nezávislá na rozlišení kamery. Pro zvýšení obnovovací frekvence tak lze jednoduše snížit rozlišení snímků bez potřeby úpravy vyhledávacího algoritmu. Problém ale nastává se změnou barevného odstínu osvětlení, proto je v tomto případě doporučeno zajistit neměnný zdroj světla [19].

²HSV = Hue - odstín, Saturation - sytost barvy, Value - hodnota jasu

Hledání objektu podle detekovaných tvarů.

V případě, kdy není barva či hodnota stupně šedi hledaného objektu na snímku jedinečná, lze využít algoritmů pro vyhledávání specifických tvarů. Například při detekci hledaného objektu se specifickým kruhovým tvarem lze využít Houghovu transformaci pro detekci kružnic [21] (viz obrázek 14). Algoritmus tak není závislý na specifické barvě či světlosti objektu, což je častý předpoklad při potřebě detekování více předmětů na jednom snímku, jako je sledování dopravních prostředků nebo kontrola vadných kusů při výrobě [22].

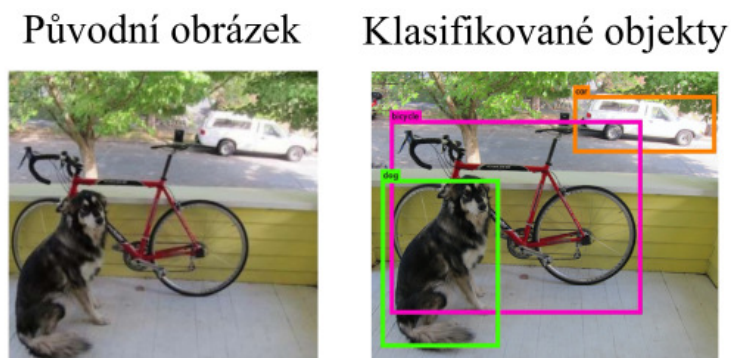


Obrázek 14: Nalezená kružnice na obrázku plechovky pomocí Houghovy transformace [21]

Zásadní nevýhodou je často velká výpočetní náročnost a v některých případech náchylnost na šum. Proto je metoda nalezení hran a specifických geometrických tvarů využívána spolu s filtračními algoritmy zejména v aplikacích nespolehající na vysokou obnovovací frekvenci detekce.

Hledání objektu pomocí umělé inteligence.

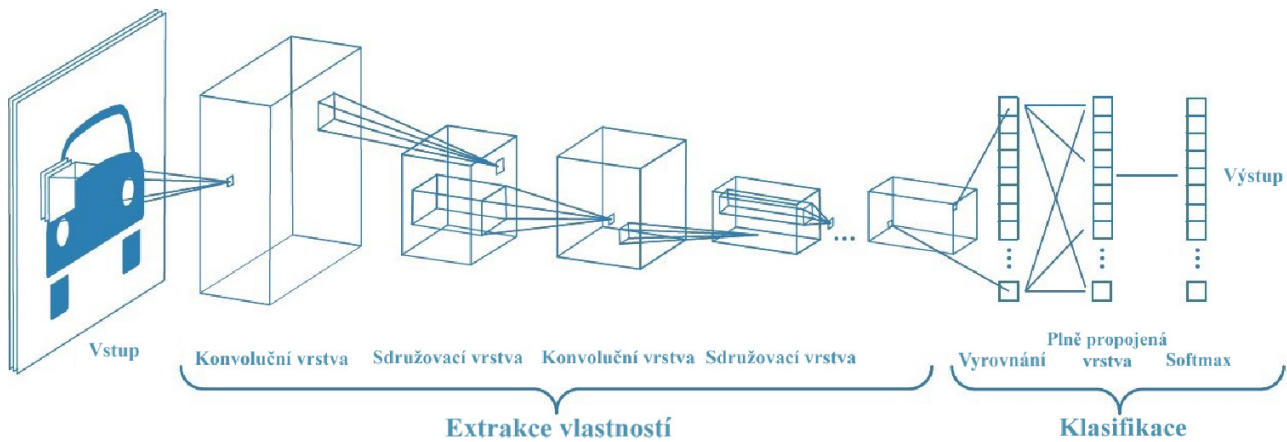
Asi nejobecnější způsob detekce při správné implementaci je právě využití umělé inteligence v podobě naučených neuronových sítí. Výstupem z neuronové sítě pak může být rovnou hledaná poloha bez nutnosti výpočtu těžiště masky apod. Samotná detekce je tak velmi rychlá, u některých algoritmů jako je například YOLO [23] stačí jeden průchod sítí pro kompletní detekci a klasifikaci i několika objektů (viz obrázek 15), což umožňuje využívat tyto typy sítí i u videí a streamů s vysokou obnovovací frekvencí.



Obrázek 15: Detekce a klasifikace objektů neuronovou sítí YOLO [24]

Nevýhoda neuronových sítí spočívá v jejich složité implementaci a nutnosti provádět časově velmi náročně učení před samotným využitím. Častým problémem je i fakt, že se kromě učení nedá ovlivnit, co neuronová síť vnímá jako hledaný objekt. Může se tak stát, že malá změna ve vlastnostech obrazu (šum, natočení kamery) zapříčiní nesprávnou detekci objektu [23].

Z podstaty neuronových sítí je také problematická změna velikosti vstupní matice - tedy rozlišení obrazu. Znamená to, že při této metodě rozpoznávání objektu není možné bez úpravy struktury a opětovného učení měnit rozlišení vstupních snímků [25]. Příklad neuronové sítě využívané pro klasifikaci objektu lze vidět na obrázku 16.



Obrázek 16: Postup strukturou konvoluční neuronové sítě pro klasifikaci objektu [26]

2.1.2 Příklady hardwaru

Rychlost a kvalitu detekce ovlivňuje kromě použitého algoritmu i na samotný hardware. Ten i z velké části určuje celkovou cenu systému. Ne vždy ale platí, že dražší kamera znamená kvalitnější výsledky nebo výkonnější výpočetní jednotka rychlejší detekci. Navíc v případě nekvalitní kamery výkonná jednotka ztrácí z velké části smysl a naopak. Níže budou uvedeny příklady možných kombinací kamery a výpočetního hardwaru.

Průmyslové kamery.

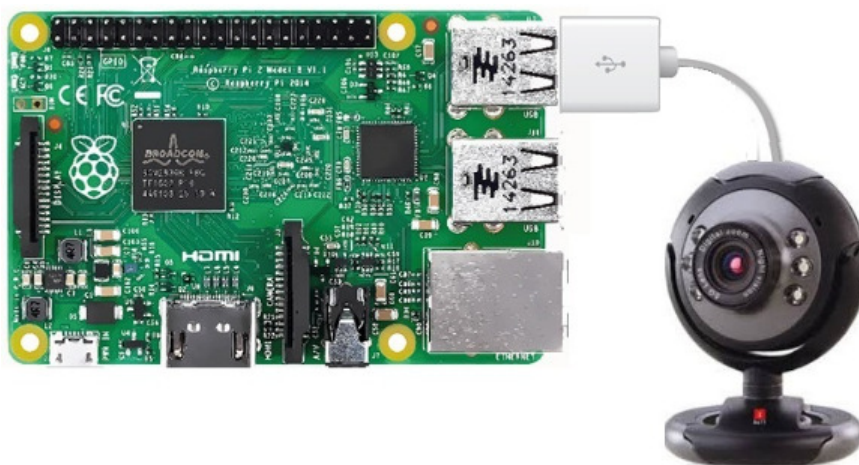
Průmyslové kamery integrují jak samotnou kameru, tak výpočetní jednotku instalovanou v jednom kompaktním zařízení. Přenos detekovaných dat je pak zajištěn například pomocí ethernetového kabelu. Na trhu existuje několik společností nabízející spoustu různých konfigurací pro specifické případy [27] (viz obrázek 17). Většinou je instalování velice rychlé a systémy obsahují již předprogramované algoritmy pro základní potřeby strojového vidění, takže se zkracuje i doba vývoje. Nevýhodou je ale vysoká cena a často omezené způsoby uživatelské konfigurace.



Obrázek 17: Průmyslové kamery série 7000 společnosti Cognex

Web kamery s externí výpočetní jednotkou.

Jedna z možností je i využití web kamery připojované standardním USB³ rozhraním. Celý obraz je tak přenášen do externí výpočetní jednotky, na které jsou snímky zpracovávány. Výhodou je velká flexibilita ve výběru hardwaru a možnost tak výrazně ušetřit náklady například využitím již vlastněných web kamer z jiných aplikací. V kombinaci s levnými mikropočítači jako je Raspberry Pi (viz obrázek 18) dokáže být tato možnost cenově velice výhodná [29]. Nutnost přenášet celý obraz skrze standardizované rozhraní může ale znatelně zpomalovat celkovou detekci. Časově náročnější je i samotná konfigurace a vývoj systému bez možnosti využití proprietárních předprogramovaných algoritmů.



Obrázek 18: Příklad web kamery zapojené do mikropočítače Raspberry Pi [29]

³Universal Serial Bus - univerzální sériová sběrnice umožňující připojení periférií k počítači

Raspberry Pi s modulem kamery.

Konkrétním příkladem kamer s externí výpočetní jednotkou je kombinace Raspberry Pi s modulem kamery dodávaným speciálně pro tento mikropočítač. Rozdíl od web kamery je ale v připojení komunikace. Kamera v tomto případě nemusí s Raspberry Pi komunikovat skrze USB rozhraní, ale data jsou posílána přímo na grafický čip počítače, kde se dále zpracovávají a nezatěžují proto hlavní výpočetní jednotku [30]. Přenos je tak výrazně urychlen a tím i navýšen počet přijatých snímků za vteřinu. Vzhledem k speciálnímu typu připojení (viz obrázek 19) ale odpadá výhoda flexibility ve výběru hardwaru jako v případě využití web kamer. Naopak je však jednodušší konfigurace a samotný vývoj algoritmů vzhledem k velké rozšířenosti mezi uživateli a dobré podpory ze strany výrobce. K dispozici jsou i knihovny, zajišťující jednoduché ovládání a získávání dat z kamery v několika programovacích jazycích.



Obrázek 19: Raspberry Pi s připojeným modulem kamery [31]

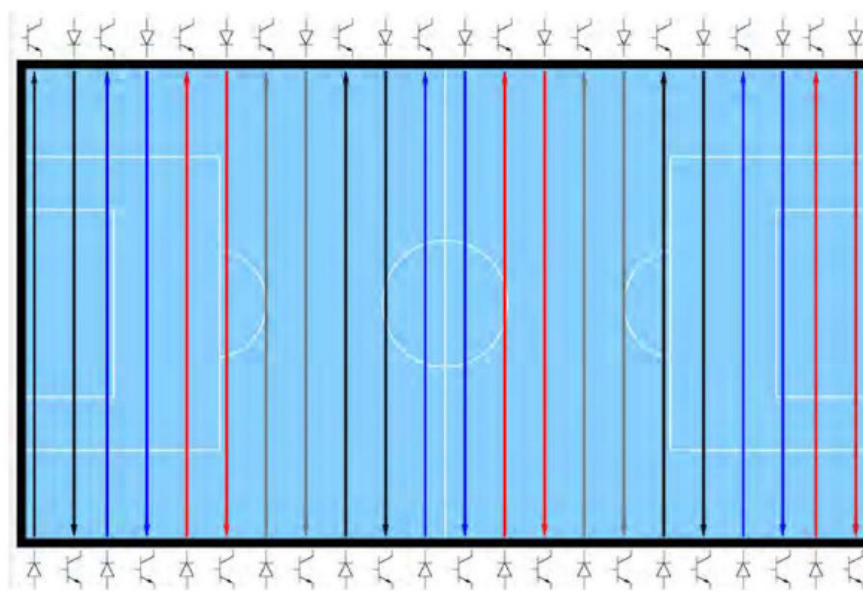
Aktuálně existují dvě verze těchto kamer dodávané přímo výrobcem samotného Raspberry Pi počítače. V nejnovější verzi kamera umožňuje snímání obrazu s rozlišením až 3280x2464 pixelů a nahrávání videa v rozlišení 1920x1080 s rychlostí 30 snímků za vteřinu nebo v rozlišení 640x480 s rychlostí 90 snímků za vteřinu. Pokrývá tak situace využití jak při potřebě kvalitních snímků, tak při nutnosti rychlého snímání s menším rozlišením (například při detekci polohy objektu).

2.2 Ostatní přístupy

Metody využívající kamerové systémy jsou v řadě případů jediná rozumná řešení při požadavku bezpečné detekce polohy objektu. Ve specifických situacích je ale naopak vhodnější využít jiný přístup. Řadí se mezi ně například detekce polohy pomocí dotyku s měřicí sondou, využití magnetických vlastností objektu nebo detekce pomocí senzorů vzdálenosti. Často je pak takové řešení rychlejší, levnější a někdy i spolehlivější než již zmíněné kamerové systémy.

Příkladem tomu může být přístup, se kterým přišli studenti z polytechnické univerzity z Ohia, kteří řešili problém detekce míčku na herní ploše stolního fotbalu. V tomto případě by byl pohled kamery umístěné nad fotbalem blokován samotnými hráči a detekce by tak mohla být problematická [32]. Studenti využili sérii infračervených LED diod a fototranzistorů umístěných naproti sobě ve vnitřním obvodu stolu. Detekce tak nebyla blokována herními osami a vynikala velmi vysokou rychlostí odezvy.

Problém ale vznikal rušením a vzájemným ovlivňováním sousedních dvojic (dioda – tranzistor). Toto bylo řešeno dvěma způsoby. První z nich byl zahlobení diod do boční stěny stolu. Tímto se omezila šířka emitovaného signálu a velikost ovlivněné plochy na protější straně. Druhým řešením bylo fázové posunutí intervalů sepnutí diod. Integrací obou zmíněných opatření byly pak nejbližší, ve stejný okamžik sepnuté diody od sebe vzdáleny asi 32 cm. Celkový počet takto fázově posunutých dvojic byl 16 [33]. Princip zapojení je naznačen na obrázku 20 (různé časové intervaly zapnutí jsou znázorněny barevným odlišením).



Obrázek 20: Princip zapojení a uspořádání infračervených LED diod a tranzistorů [33]

Takto zapojené dvojice byly orientovány v horizontálním (117 párů) a vertikálním (68 párů) směru. Z obrázku je také patrná hlavní nevýhoda tohoto řešení. A tedy, že přesnost detekované polohy silně závisí na počtu párů. Oproti tomu počet párů zase zesiluje rušení a zvyšuje cenu celé soustavy.

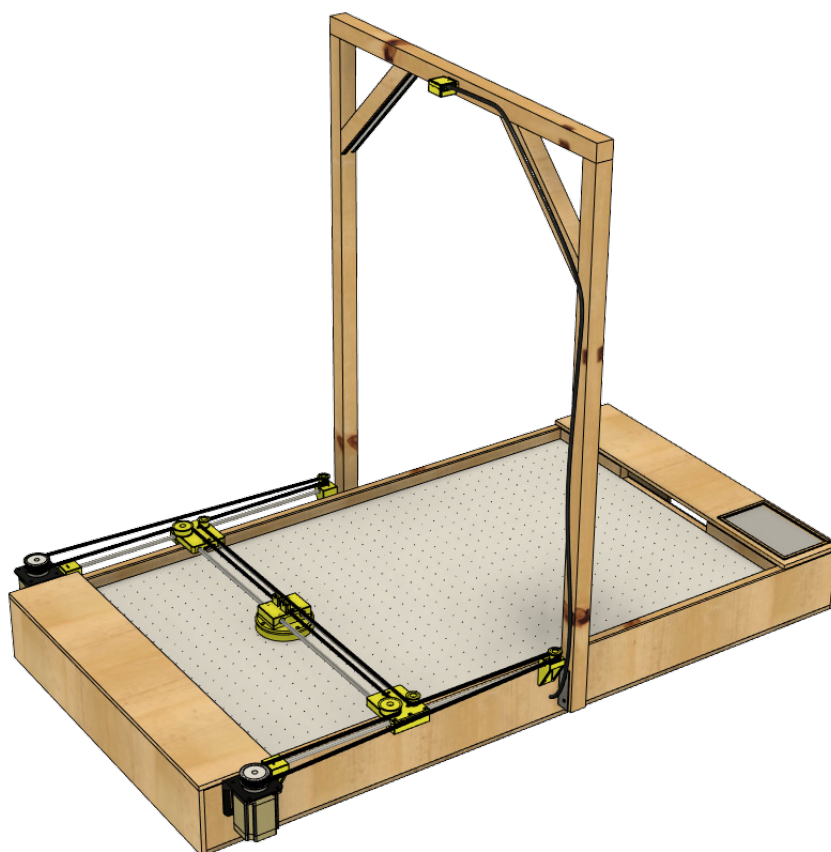
3 Konstrukce a hardware

Konstrukce stolu a výběr většiny hardwarových prvků spolu s řízením motorů byla hlavní náplň práce Dominika Jaška [37] v jehož spolupráci byl celý RVH vyvíjen. Tato práce se v této oblasti zabývala pouze výběrem vhodného hardwaru pro detekci puku na herní ploše a řídicí jednotky, na které celý řídicí software stolu spolu s detekcí obrazu a vyhodnocováním strategie hry běžel (viz kapitoly 5 Návrh strategie, 6 Detekce puku a 7 Softwarová implementace).

V následující kapitole bude nastíněna výsledná podoba konstrukce a umístění hardwarových prvků celého RVH spolu s popisem prvků souvisejících s detekcí a softwarovou implementací softwaru RVH. Pro podrobnější popis ostatních částí, konstrukce a elektrického zapojení celého řešení lze nahlédnout do práce [37].

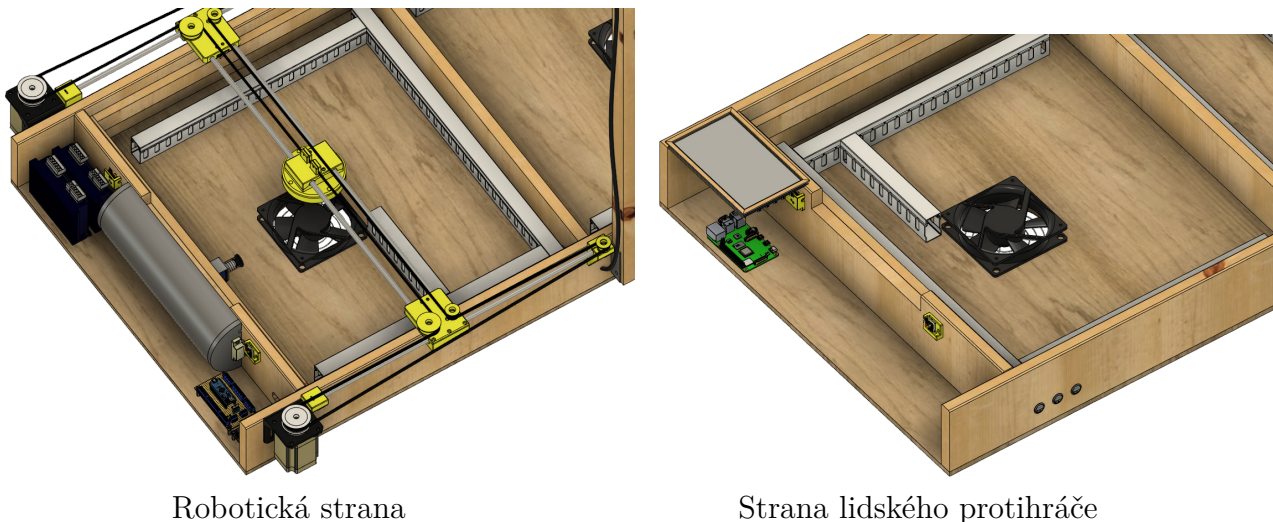
3.1 Konstrukce RVH

Návrh celé konstrukce prošel několika iteracemi jak při fázi modelování, tak při samotném testování reálných částí. Výsledná konstrukce stolu byla převážně vyrobena ze dřeva. Menší prvky byly potom tištěny na 3D tiskárně. Model výsledné verze vytvořený Dominikem Jaškem lze vidět na obrázku 21 a je dostupný k nahlédnutí online na odkazu [41].



Obrázek 21: Model konstrukce RVH.

Jednotlivé odkryté strany stolu zobrazující rozmístění hardwarových prvků bez elektrického zapojení lze vidět na obrázku 22.



Robotická strana

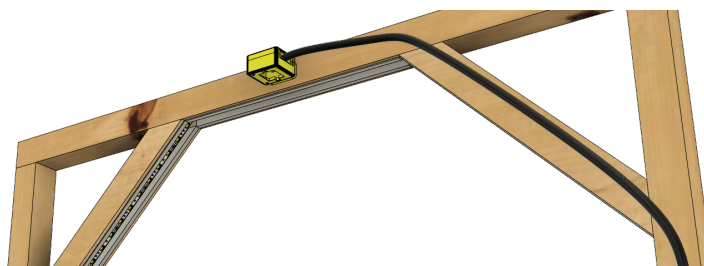
Strana lidského protihráče

Obrázek 22: Pohledy na odkryté strany stolu.

3.2 Kamerový modul

Po vypracování rešerše dostupných řešení detekce polohy objektů se jevílo jako nejvhodnější využít integrovaný kamerový modul přímo od Raspberry. Více informací o výhodách tohoto řešení a popisu dalších způsobů detekce lze nalézt v kapitole 2.

Kvůli podpoře hardwarového 4x4 binningu⁴ byl využit starší modul kamery V1. Novější V2 modul podporoval pouze 2x2 binning. To zapříčinilo ořezávání zorného pole při vyšších snímkovacích frekvencích. I přes to bylo zapotřebí rozšířit zorné pole kamery výměnou původní čočky za čočku s širším úhlem záběru. Vybraná čočka Arducam 1/2,7" s ohniskovou vzdáleností 2,8 mm zvýšila zorné pole horizontálního záběru z původních 53° na 75° a dovolila tak snímat celou herní plochu s kamerou umístěnou pouze 80 cm nad rovinou snímání. Umístění kamery na konstrukci lze vidět na obrázku 23.

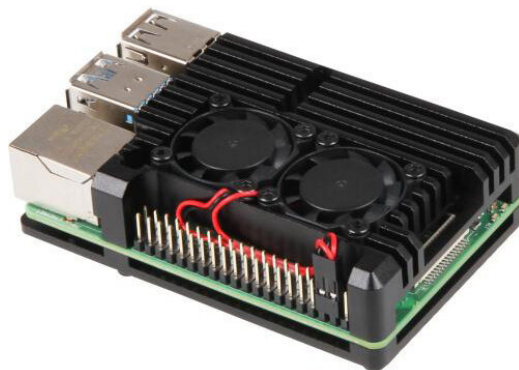


Obrázek 23: Konstrukce uchycení kamery s vestavěným led osvětlením.

⁴Binning - hardwarové sdružování sousedních pixelů senzoru.

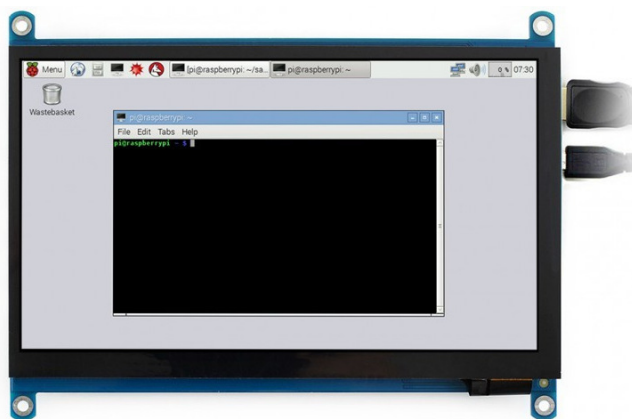
3.3 Řídicí jednotka a displej

Jako hlavní řídicí jednotka byl z praktických a ekonomických důvodů vybrán jednodeskový počítač Raspberry Pi 4B s dostatečným výkonem jak pro renderování grafického rozhraní, tak pro rychlé zpracování snímků a evaluaci strategie hry. Operační systém Raspbian, který je na ARM procesory nacházející se na počítačích rodiny Raspberry vysoce optimalizovaný, dovoval jednoduchou konfiguraci a téměř počítač nezatěžoval. K Raspberry byl navíc přimontován chladič kryt pro umožnění přetaktování procesoru a grafického čipu (viz kapitola 7.1.3).



Obrázek 24: Raspberry Pi 4B s aktivním chladičovým krytem.

K Raspberry byl připojen kapacitní dotykový 7“ displej od firmy Waveshare s technologií IPS⁵ a rozlišením 1024x600. Dostatečně velká úhlopříčka zajišťovala přehlednou navigaci v uživatelském rozhraní a dotyková plocha intuitivní způsob ovládní interaktivních prvků prostředí. Displej byl k počítači připojen přes speciální ohebný plochý HDMI kabel pro grafický výstup a přes USB kabel pro napájení a přenos informace o dotyku. Displej lze vidět na obrázku 25.



Obrázek 25: 7“ displej od firmy Waveshare [35].

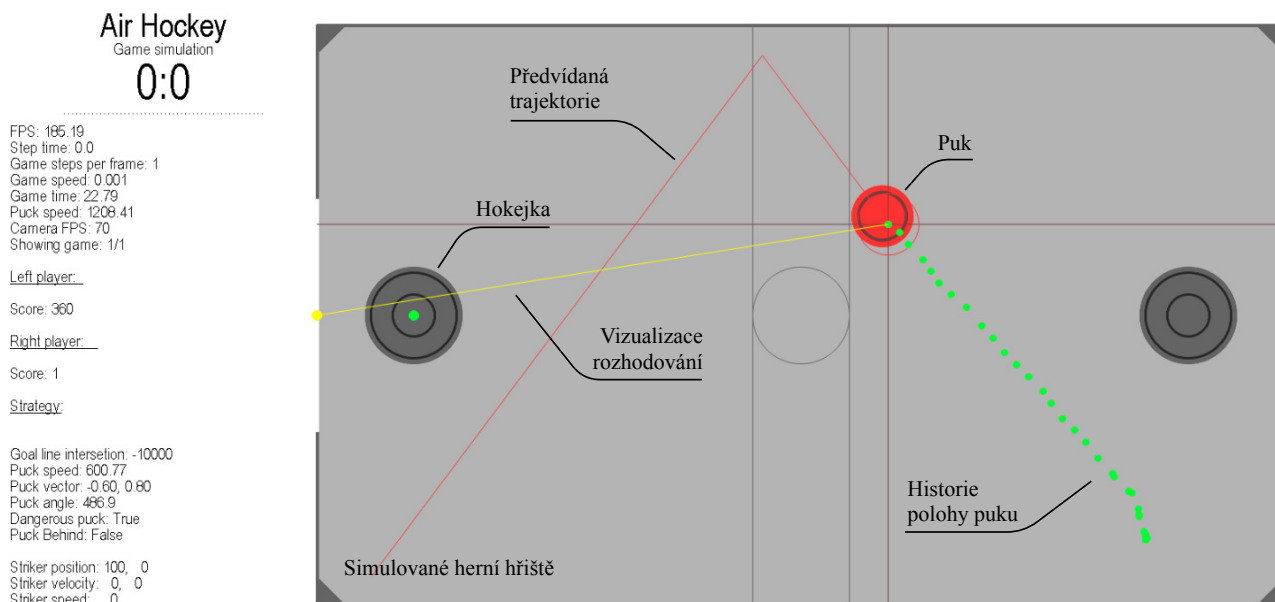
⁵IPS - technologie pro LCD displeje řešící nedostatky a omezení TN panelů jako je malý pozorovací úhel nebo nekvalitní reprodukce barev.

4 Simulace hry

Z důvodu potřeby vývoje, intenzivního testování strategie hry a vyladění rozhodovacích algoritmů při specifických situacích byla vytvořena počítačová simulace hry vzdušného hokeje. Simulace pak umožňovala jak zpomalení a zrychlení simulovaného času pro detailní analýzu stylu hry aktuálně aktivní strategie, tak i paralelní zpracovávání několika spuštěných her současně, umožňující zkoumat statistické údaje úspěšnosti naprogramovaných strategií hrajících proti sobě. Vývoj rozhodovacích algoritmů navíc nemusel záviset na kompletně sestaveném a dokončeném RVH.

Pro tyto účely bylo nutné zajistit co nejpřesnější reprezentaci reálného chování systému kompletně v simulovaném prostředí spolu i s náhodnými nepřesnostmi snímání puku na ploše hokeje a dynamickými vlastnostmi robotické hokejky. Součástí simulace jsou také algoritmy ohodnocující střelu vyslanou jedním z hráčů. Pomocí těchto metrik jsou poté přidělovány body každému z hráčů. Ty mohou sloužit jako ukazatel výkonnosti dané strategie i při nevstřelení žádného gólu.

V průběhu simulace je možné interagovat s pukem a jedním z hráčů pomocí myši a zajistit tak opakovatelnost specifických situací. V kombinaci s možností zpomalení simulovaného času se tak stává simulační software velice užitečným vývojovým nástrojem. V neposlední řadě bylo umožněno i nahrání uložených záznamů her přímo z RVH pro možnost dodatečného zkoumání situací i z reálného stolu. Výslednou podobu vytvořeného simulačního softwaru i s informačním panelem zobrazující aktuální stav hry lze vidět na obrázku 26.



Obrázek 26: Simulační program pro vývoj a analýzu strategie RVH

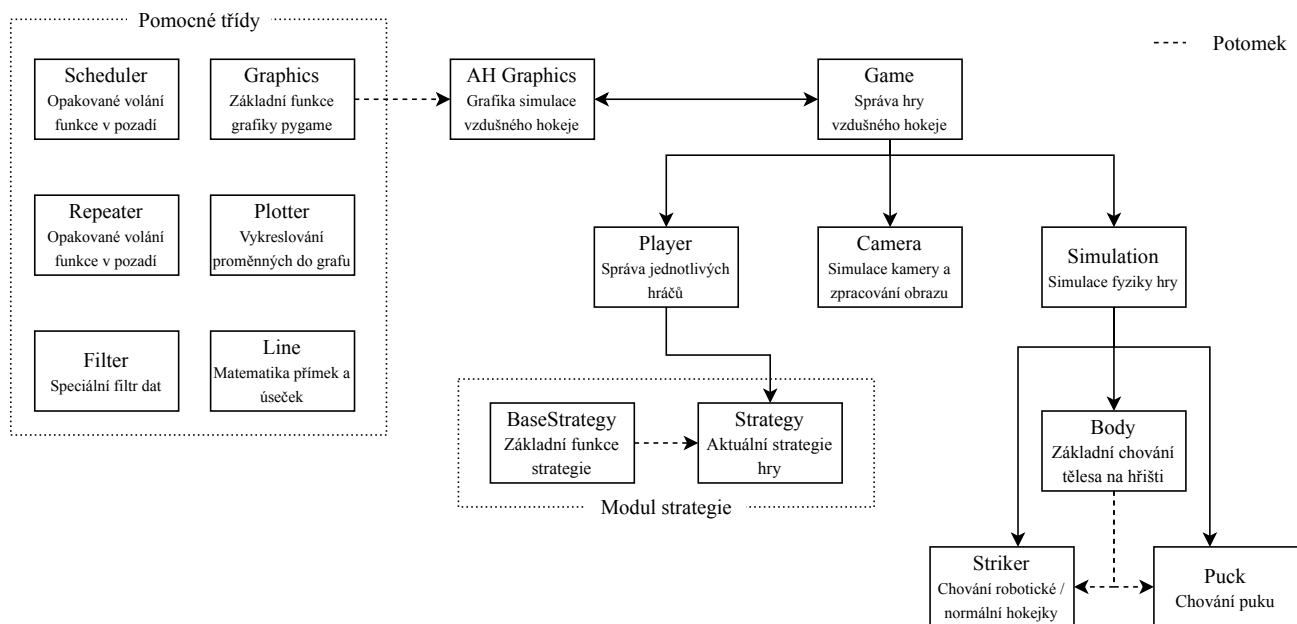
V následující kapitole budou popsány jednotlivé stěžejní části vývoje simulačního softwaru v jazyce Python spolu s vysvětlením celkového rozvržení struktury programu.

4.1 Struktura programu

Vzhledem k nutnosti simulace celého systému RVH se struktura simulačního softwaru v mnoha ohledech podobala výsledné struktuře softwaru aplikovaného přímo v řídicí jednotce stolu. Na rozdíl od výsledného softwaru pro RVH nebyl kladen příliš velký důraz na optimalizaci kódu, ale spíše na zkrácení doby vývoje pro co nejrychlejší možnost návrhu a testování strategií. Některé dodatečné funkce simulačního softwaru pak vznikaly přímo při návrhu strategií podle aktuální potřeby testování.

Logika programu je rozdělena na jednotlivé třídy spravující určitou oblast problému. Třídy mohou z podstaty problému spadat pod třídy jim nadřazené. Například třída *Player*, která řeší logiku spojenou s jednotlivými hráči (aktualizace skóre, interpretování dat ze strategie atd.) spadá pod třídu *Game*, zahrnující nejen správu obou hráčů, ale například i zpracování dat ze simulované kamery snímající polohu simulovaného puku apod. Tímto přístupem při vývoji softwaru lze i při rozsáhlejších programu zajistit přehlednost a jednoduchou navigaci ve zdrojovém kódu.

Kromě takto hierarchicky navržených tříd byly vytvořeny i třídy pomocné, které nespádaly pod žádnou nadřazenou třídu a byly využívány napříč celou strukturou a později i v softwaru reálného RVH. Zjednodušené znázornění celé struktury softwaru spolu s pomocnými třídami lze vidět na obrázku 27.



Obrázek 27: Znázornění struktury simulačního softwaru vzdušného hokeje

O některých třídách bude více pojednáno níže. Například strukturu modulu strategie, který je hlavním výstupem z následného návrhu strategie v tomto simulačním prostředí, popisuje kapitola 5.1. Většinu vzniklých pomocných tříd ale není možné z důvodu velké obsáhlosti a komplexnosti více přibližovat. Pro více informací lze nahlédnout do zdrojových souborů v příloze.

4.2 Simulace fyziky

Implementace simulace fyziky hry RVH byla založena na teoretickém rozboru z kapitoly 1.3. Hodnoty tření a míra tlumení rychlosti puku po odrazech byly z počátku odhadovány. V pozdější fázi vývoje, kdy byla k dispozici data z kamery reálného systému, byly tyto hodnoty upravovány pro co nejpřesnější matematickou reprezentaci vzdušného hokeje.

Stěžejní částí simulace bylo řešení kolizí puku s ostatními objekty na hrací ploše. Konkrétně se kolize daly rozlišit na dvě specifické situace:

- Kolize s hokejkou
- Kolize s mantinelem

Pro každou situaci bylo nutné řešit mírně odlišný problém.

4.2.1 Kolize s hokejkou

Neboli typ kolize kruh-kruh (circle-circle). V každém kroku simulace se kontroluje vzdálenost puku ke každé z hokejek $i \in \{1,2\}$. Pokud je vzdálenost polohy středu puku P od středu jedné z hokejek H_i menší než součet poloměrů puku r_p a hokejky r_{hi} (6).

$$|PH| < r_p + r_{hi}, \quad (6)$$

pak dochází k překrytí hokejky i pukem a tedy ke kolizi. Postup řešení kolize typu kruh-kruh je pak vidět na zjednodušeném pseudokódu:

```
relativní rychlost = rychlost puku - rychlost hokejky
normála = normalizuj(pozice puku - pozice hokejky)
rychlost ve směru normály = relativní rychlost x normála
pokud rychlost ve směru normály > 0
```

```
ukonči výpočet
```

```
jinak
```

```
j = -
(1 + restituce) * rychlost ve směru normály / (1/celková hmotnost)
impuls = normála * j
rychlost puku = impuls * 1/hmotnost puku
rychlost hokejky = impuls * 1/hmotnost hokejky
```

Algoritmus 1: Řešení kolize typu kruh-kruh

4.2.2 Kolize s mantinelem

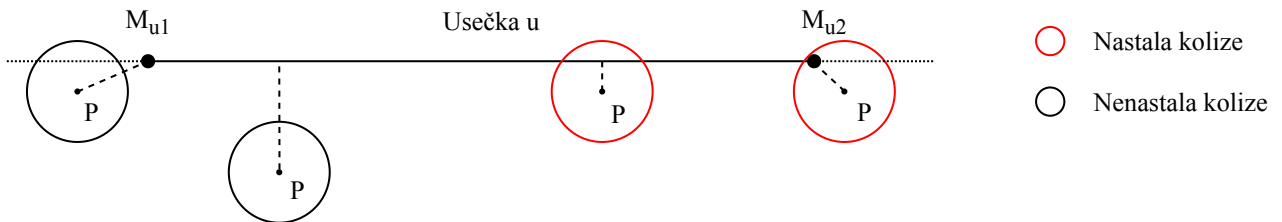
Neboli typ kolize kruh-úsečka (circle-line). V každém kroku simulace se kontroluje vzdálenost puku ke každé úsečce $u \in \{1, 2, \dots, N\}$ definující ohraničení herní plochy. V tomto případě se však musí kontrolovat nejen zda kolmá vzdálenost polohy středu puku $P[p_1, p_2]$ od přímky $m : ax + by + c = 0$ procházející danou úsečkou u je menší jak poloměr puku r_p (7)

$$\frac{|a \cdot p_1 + b \cdot p_2|}{\sqrt{a^2 + b^2}} < r_p, \quad (7)$$

ale zároveň i jestli poloha průsečíku přímky m a kolmice od přímky m procházející bodem P leží mezi koncovými body úsečky u : M_{u1} a M_{u2} . Pokud průsečík úsečky nenáleží, je nutné kontrolovat zda vzdálenost puku P od koncových bodů úsečky M_{u1} a M_{u2} není menší jak poloměr puku r_p (8)

$$|PM_{uj}| < r_p \quad (8)$$

Pokud jedna z těchto dvou podmínek platí, dochází ke kolizi mezi kruhem a úsečkou a je nutné ji řešit. Znázorněné situace, které mohou nastat lze vidět na obrázku 29.



Obrázek 29: Možné situace při kontrole kolize typu kruh-úsečka

Postup řešení kolize typu kruh-úsečka lze vidět na zjednodušeném pseudokódu:

```
přesah = poloměr puku - vzdálenost od úsečky
dokud přesah > 0
    vektor posunu = škáluj_vektor(rychlost puku, poloměr puku/10)
    poloha puku = poloha puku - vektor posunu
    přesah = poloměr puku - vzdálenost od úsečky
pokud průsečík náleží úsečce
    rychlost puku = zrcadli_vektor(rychlost puku, normála úsečky)
    rychlost puku = rychlost puku * tlumení
jinak
    řeš jako kolizi kruh-kruh pro puk a nejbližší koncový bod
```

Algoritmus 2: Řešení kolize typu kruh-úsečka

4.3 Simulace kamery

Při sledování herní plochy RVH kamerou a následném detekování polohy puku z jednotlivých snímků nelze nikdy obdržet dokonale přesnou a nezpožděnou informaci. V prostředí simulace by ale bez dodatečného simulovaného šumu strategie přesná a okamžitá data k dispozici měla. Proto by takto navržená strategie nemusela na reálném systému vykazovat uspokojivé výsledky. Z toho důvodu bylo nutné simulovat tři základní vlastnosti zapříčňující nepřesné snímání polohy.

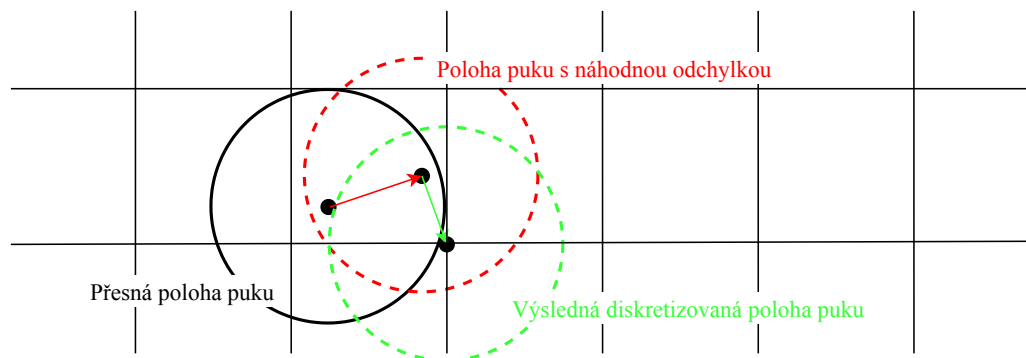
4.3.1 Náhodná odchylka

Nepřesnosti způsobené šumem snímaného obrazu byly zjednodušeně simulovány náhodnou odchylkou od přesné polohy puku. Odchylka byla modelována normálním rozdělením s nulovou střední hodnotou a směrodatnou odchylkou s hodnotou 2 mm.

4.3.2 Diskretizace polohy

Vzhledem k omezenému rozlišení reálné kamery není možné pro algoritmus detekující polohu puku rozlišit rozdíl mezi dvěma polohami s menší vzdáleností, než je odpovídající vzdálenost jednotlivých pixelů na snímku herní plochy. Při nastaveném rozlišení kamery 320x192 a předpokladu snímání celé herní plochy RVH o rozměrech 1000x600 mm vychází minimální detekovatelný rozdíl vzdálenosti dvou různých poloh na přibližně 3 mm.

Hrací plocha proto byla v simulaci rozdělena na mřížku poloh s rozestupem 3,5 mm, ve kterých lze puk detekovat. Detekovaná poloha pak odpovídala bodu na mřížce, který se nacházel nejbližže aktuální poloze puku s již započítanou náhodnou odchylkou. Znázornění simulace snímání a detekce puku lze vidět na obrázku 30.



Obrázek 30: Znázornění simulace snímání a detekce puku.

4.3.3 Zpoždění informace

Zpoždění informace o aktuální poloze vznikající na reálném systému zpracováváním snímku a komunikací s řídicí jednotkou bylo možné simulovat velice jednoduše ukládáním několika posledních poloh a využíváním pouze té nejstarší ve strategii. Součin doby kroku a počet ukládaných poloh pak definoval dobu zpoždění.

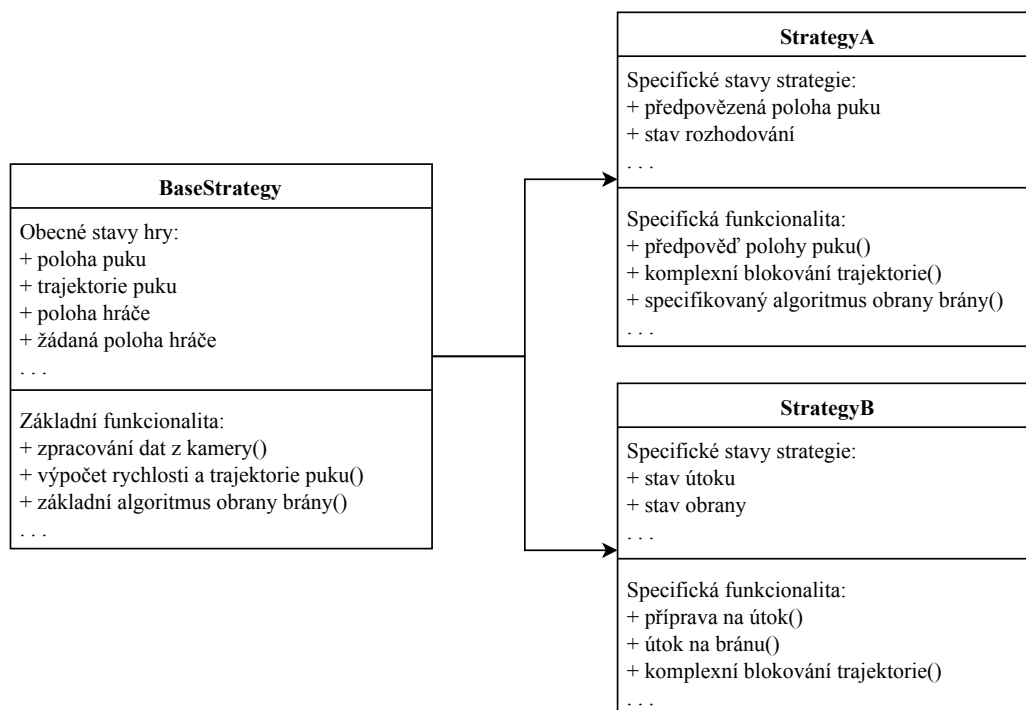
5 Návrh strategie

Strategií je v tomto kontextu rozuměna série rozhodovacích algoritmů, které určují okamžitou žádanou polohu hokejky robotického hráče na základě aktuálního stavu hry, jako je poloha a rychlost snímaného puku nebo robotické hokejky. Z pravidla platí, že čím jsou k dispozici přesnější a rychleji aktualizovaná data o aktuálním stavu hry, tím přesněji a rychleji dokáže strategie reagovat. Samotná účinnost reakce ale závisí na rozhodovacích algoritmech ve strategii, o kterých bude tato kapitola pojednávat.

Strategie byla vytvořena jako softwarový modul v programovacím jazyce Python, možný bez nutnosti úprav používat jak v simulaci, tak při samotné implementaci na cílovém hardwaru RVH. Modularita tohoto řešení zkracuje celkový čas vývoje a umožňuje pravidelně analyzovat herní situace v simulačním prostředí a upravovat strategii i po dokončení projektu RVH.

5.1 Struktura modulu strategie

Struktura softwarového modulu strategie je založena na objektových principech dědičnosti. Základním stavebním kamenem programu je abstraktní třída *BaseStrategy*, která zaštiťuje obecnou funkcionalitu jako je zpracování vstupních dat z kamery, výpočet trajektorie pohybu puku, základní strategické algoritmy apod. Z této třídy poté dědí jednotlivé podtřídy, specifikující výsledné chování robotického hráče. Tento přístup zajišťuje snadný vývoj nových typů strategií a bezproblémovou možnost změny strategie přímo za běhu programu. Zjednodušený diagram s příkladem dědění dvou tříd strategie lze vidět na obrázku 31.



Obrázek 31: Zjednodušený UML diagram dědičnosti tříd modulu strategie

Každá z jednotlivých strategií (*StrategyA* a *StrategyB*) tak může implementovat specifické rozhodovací algoritmy s diametrálně odlišnými výsledky a zároveň využívat základní funkcionalitu a přistupovat k aktuálním stavům hry bez redundance napsaného kódu. Pro příklad k obrázku 31: strategie *StrategyB* vyniká v útoku s komplexními algoritmy pro míření, ale pro obranu využívá základní algoritmus obrany z rodičovské třídy *BaseStrategy* bez nutnosti definice celé funkce znovu. Zdrojový kód této strategie je pak uložen do vlastního souboru. Oddělí se tak specifická logika dané strategie od obecných funkcí, což vede k přehledné a lehce rozšířitelné struktuře celého projektu.

5.2 Základní třída *BaseStrategy*

Třída *BaseStrategy* obsahuje tři speciální metody, pomocí kterých se řídí celý výpočet strategie nadřazeným programem využívající tento modul:

- metoda *cameraInput(poloha)*

Volána nadřazeným programem pokaždé, když jsou k dispozici nová data o pozici puku. Tyto data jsou zpracována a na jejich základě vyhodnocena aktuální trajektorie puku. Více o této metodě bude pojednáno níže.

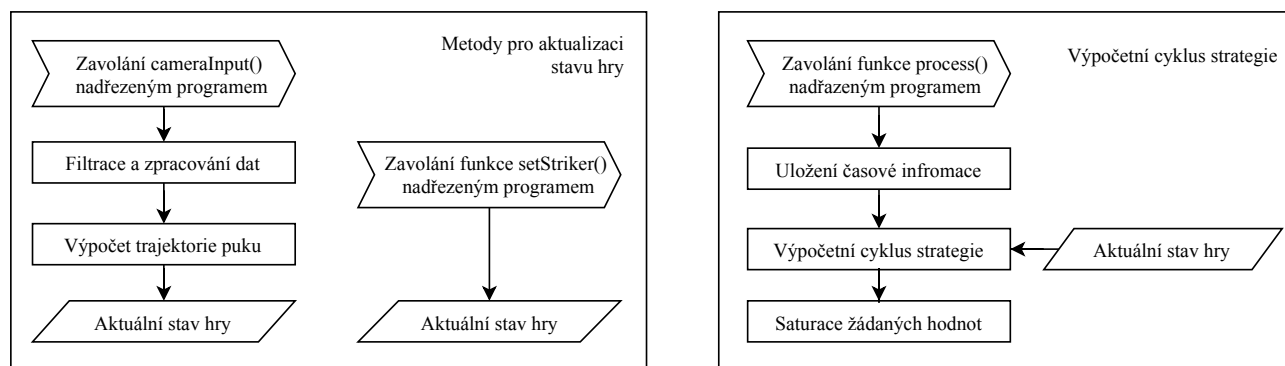
- metoda *setStriker(poloha, rychlost)*

Volána nadřazeným programem pokaždé, když jsou k dispozici nová data o pozici nebo rychlosti hokejky robotického hráče.

- metoda *process(doba kroku)*

Metoda, kterou každá dceřinná třída musí přepsat a ve které je definován průběh výpočetního cyklu strategie. Je volána nadřazeným programem v pravidelných intervalech a frekvence těchto volání reprezentuje výpočetní frekvenci strategie.

Je zřejmé, že výpočetní frekvence spolu s aktualizací stavů hry je v celé míře řízena nadřazeným programem, který modul strategie využívá. Modul strategie je tedy v podstatě „pouze“ zapouzdřená logika výpočtu rozhodnutí pro zadaný stav hry. Vývojový diagram znázorňující průběh řídicích metod strategie lze vidět na obrázku 32.



Obrázek 32: Vývojový diagram průběhu řídicích metod třídy *BaseStrategy*

5.2.1 Zpracování polohy puku

Při obdržení nových dat o poloze puku \vec{p}_0 je z pohledu strategie nutné rozhodnout, zda nové data odpovídají vypočítané trajektorii v minulém cyklu nebo zda nenastal odraz a tím i změna pohybu puku. Jevem, který značně komplikuje toho rozhodování je právě šum detekovaných poloh z kamery. Proto byl navrhnout algoritmus minimalizující chybné detekování odrazu puku založený na analýze historie doposud obdržných dat.

Každá příchozí informace o poloze puku \vec{p}_0 je umístěna do zásobníku historie a je jí přiřazena časová známka t_0 odpovídající času, kdy byly data obdrženy a speciální stavová proměnná *state*, která může nabývat následující stavy:

- ACCURATE

Reprezentuje záznam polohy puku, který lze použít pro výpočet aktuální trajektorie a rychlosti pohybu.

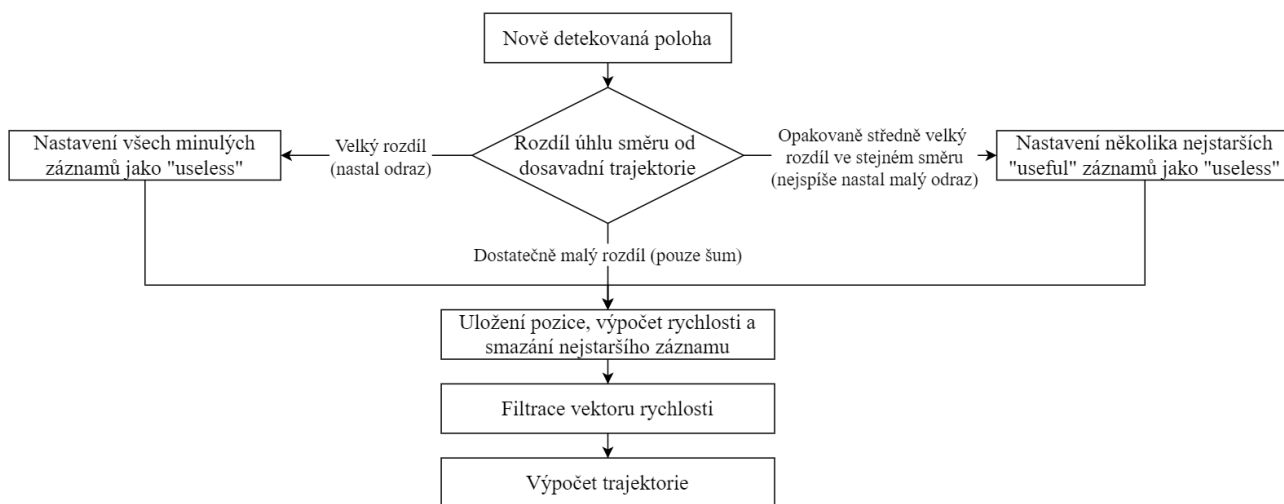
- INACCURATE

Reprezentuje záznam polohy puku, který lze použít pro výpočet aktuální trajektorie a rychlosti pohybu, ale výsledky nemusí být kvůli nesplněným podmínkám přesné (například při pomalu se pohybujícím puku má šum detekovaných poloh mnohonásobně vyšší vliv na vypočítanou trajektorii než při rychlostech vyšších).

- USELESS

Reprezentuje záznam polohy puku, který nelze použít pro výpočet trajektorie ani rychlosti puku. S velkou pravděpodobností tedy nastal odraz puku někdy v čase po tomto záznamu.

Na rozdíl od časové známky se tyto stavy mohou u záznamů v zásobníku změnit. Vývojový diagram algoritmu detekující odraz puku a spravující záznamník lze vidět na obrázku 33.



Obrázek 33: Vývojový diagram algoritmu detekce odrazu puku

Při vložení nové polohy \vec{p}_0 do zásobníku se indexy ostatních záznamů inkrementují $\vec{p}_i \rightarrow \vec{p}_{i+1}$ a záznam s indexem větším jak maximální velikost záznamníku n je zahozen. Ideální velikost n závisí na frekvenci nových příchozích poloh z kamery - tedy frekvenci detekce kamery. Experimentálně byla zjištěna dostatečná velikost zásobníku n taková, aby byla schopná udržet historii za poslední vteřinu pohybu. Pro kameru detekující polohu puku průměrně 80 krát za vteřinu tomu odpovídá velikost $n = 80$.

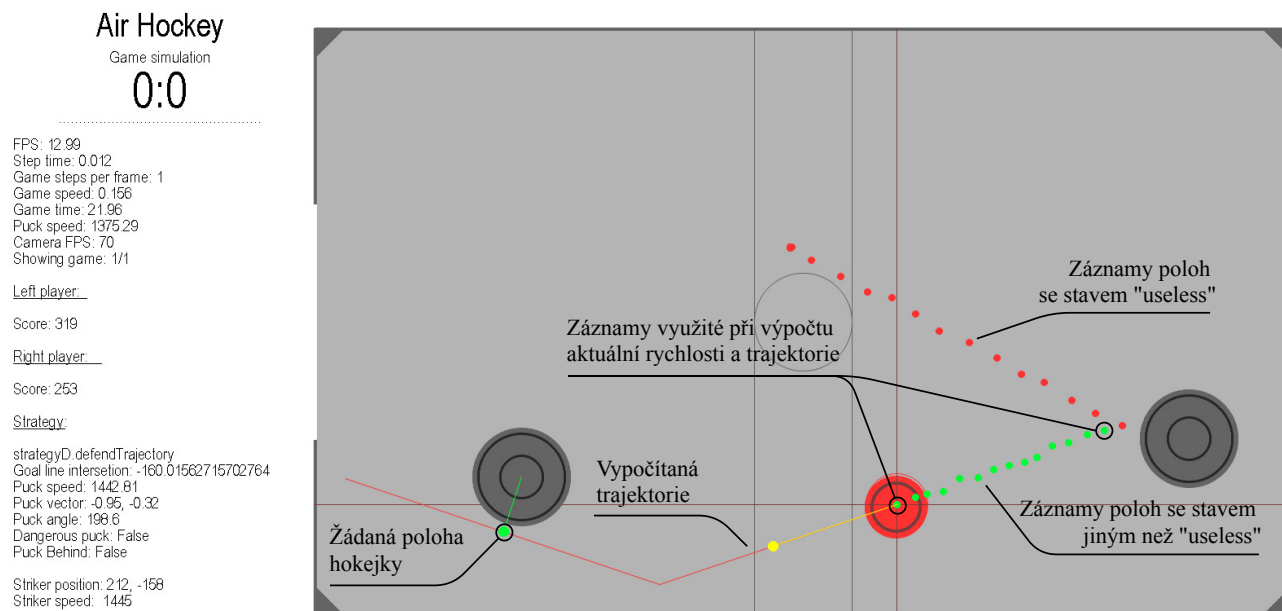
Při výpočtu trajektorie a rychlosti puku se pak prochází zásobník od nejstaršího záznamu \vec{p}_n po nejnovější \vec{p}_0 . První nalezený záznam se stavem jiným než *USELESS* \vec{p}_u je následně využito pro výpočet aktuální rychlosti \vec{v} a směru pohybu puku \vec{s} . Odečtením vektoru polohy \vec{p}_u od aktuálně nejnovější polohy \vec{p}_0 (9) je zjištěn takzvaný krokový vektor \vec{k}

$$\vec{k} = \vec{p}_0 - \vec{p}_u, \quad (9)$$

který reprezentuje aktuální směr pohybu puku. Podělením krokového vektoru \vec{k} rozdílem časových známek nejnovějšího záznamu $i = 0$ s nalezeným záznamem v záznamníku $i = u$ pak dostáváme aktuální rychlost puku definovanou vztahem (10)

$$\vec{v} = \frac{\vec{k}}{t_0 - t_u}, \quad (10)$$

kde t_0 je časová známka nejnovějšího záznamu a t_u je časová známka záznamu zvoleného pro výpočet. Znázornění detekce odrazu v simulaci lze vidět na obrázku 34.



Obrázek 34: Znázornění detekce odrazu pomocí analýzy historie poloh puku

Následný algoritmus výpočtu trajektorie z takto zpracovaných dat je pak založen na principech popsaných v podkapitole 1.3.3.

5.3 Navržené strategie

Celkově byly v rámci práce navrženy čtyři různé strategie s rozdílným stylem hry. Tímto bylo kromě možnosti testování jejich efektivity simulováním her proti sobě umožněno i nastavení požadované strategie při hře proti lidskému protihráči. Obtížnost hry proto nemusela být definována pouze omezením rychlosti pohybu robotické hokejky ale i samotným stylem hrané hry, navozující tak pocit, že se robotický hráč s nastavenou vyšší obtížností stává nejen rychlejší, ale i chytřejší. Stručný popis vlastností jednotlivých strategií lze vidět na obrázku 35. Vývoj strategií byl mimo jiné založen i na znalostech osvědčených herních stylů profesionálních hráčů přiblížených v kapitole 1.2.

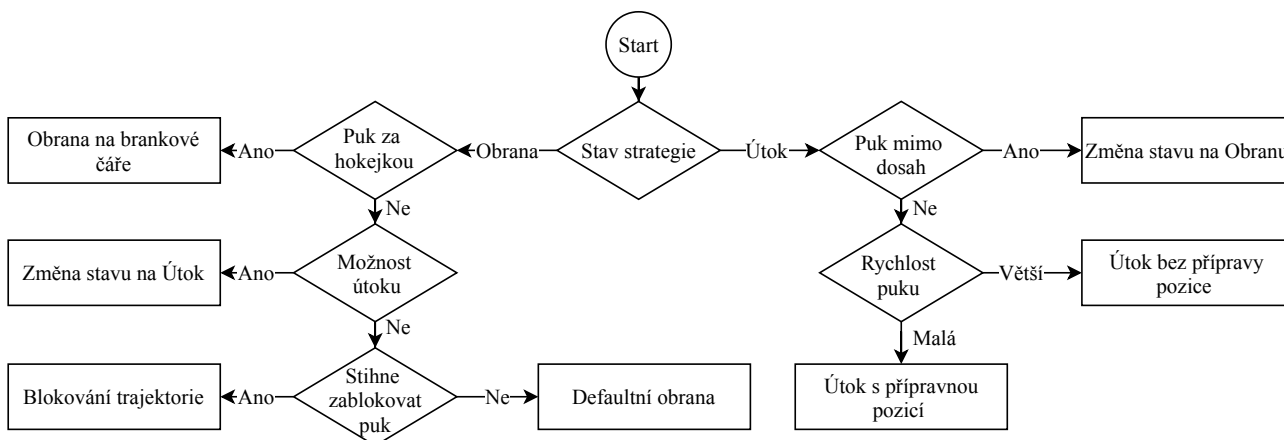
Strategie A	Strategie B	Strategie C	Strategie D
Základní obrana	Základní obrana	Mírně pokročilá obrana	Vysoce pokročilá obrana i útok
Mírně pokročilý útok	Základní útok	Pokročilý útok	Míření přes mantinely
Vnitřní stavy ("paměť strategie")	Odhad budoucího stavu hry	Vnitřní stavy ("paměť strategie")	Schopnost zpracování puku
		Odhad budoucího stavu hry	Prvky náhody při rozhodování
			Vnitřní stavy ("paměť strategie")
			Odhad budoucího stavu hry

Obrázek 35: Navržené typy strategií pro RVH

Vzhledem ke komplexnosti každé ze strategií a výpočtů k nim potřebným bude jejich popis velice zjednodušen. Úplný algoritmus lze najít v příložených zdrojových souborech.

5.3.1 Strategie A

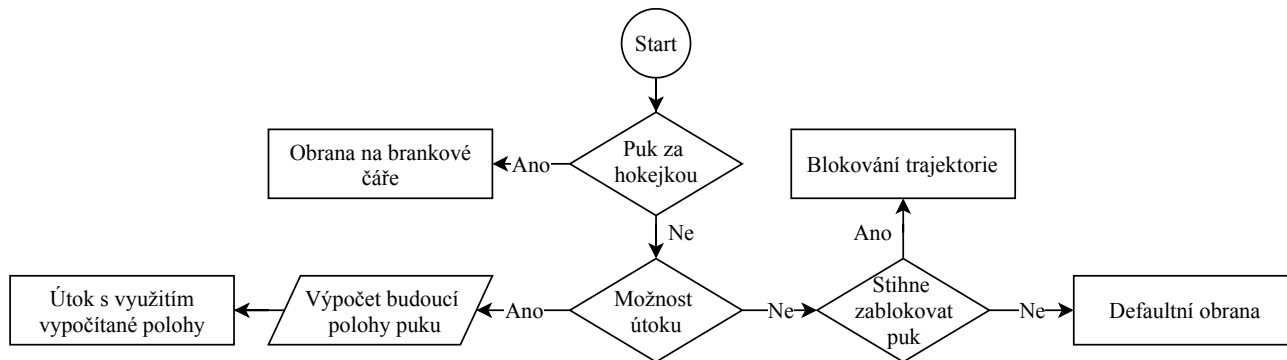
Cílem návrhu Strategie A bylo využití vnitřních stavů pro umožnění rozhodování nejen na základě aktuálního stavu hry, ale i na jeho historii. Využívá základní algoritmy obrany a útoku. Zjednodušený vývojový diagram rozhodování lze vidět na obrázku 36.



Obrázek 36: Vývojový diagram algoritmu rozhodování strategie A

5.3.2 Strategie B

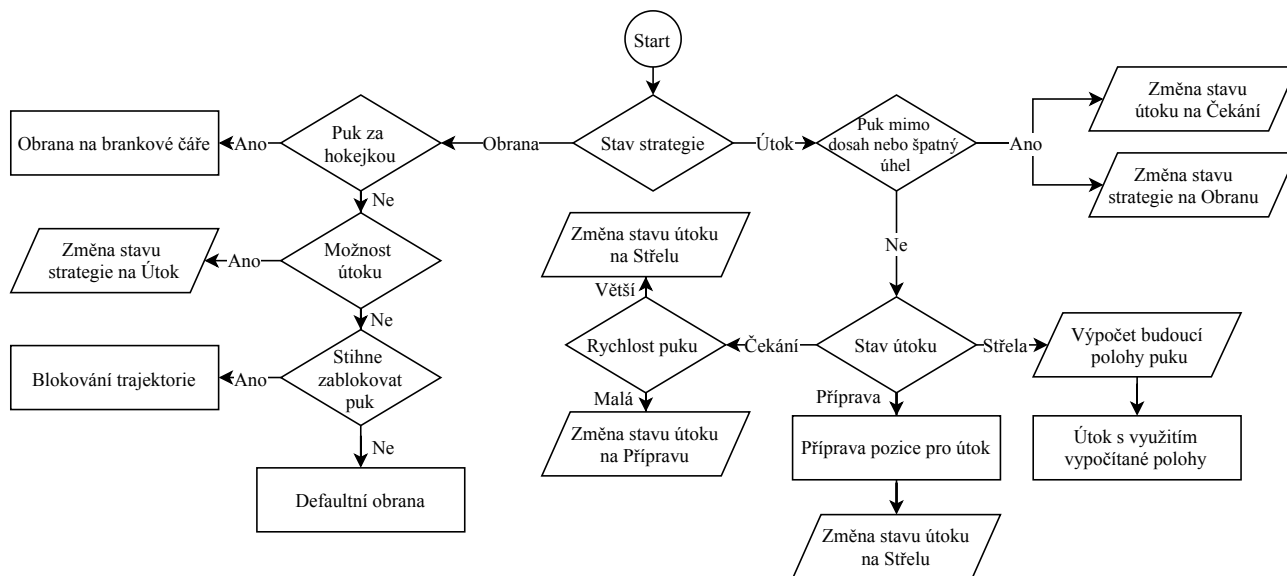
Strategie B oproti strategii A nevyužívá vnitřní stavy a rozhodování tak závisí pouze na aktuálním stavu hry. V každém cyklu ale přepočítává odhadovanou pozici puku v čase, kdy robotická hokejka dosáhne žádané polohy. Tímto je odhadován stav hry v budoucnu a zajištěna tak přesnější interakce s pohybujícím se pukem. Zjednodušený vývojový diagram algoritmu rozhodování lze vidět na obrázku 37.



Obrázek 37: Vývojový diagram algoritmu rozhodování strategie B

5.3.3 Strategie C

Strategie C vznikala jako kombinace strategie A a strategie B s dodatečným laděním obranných a útočných algoritmů v simulačním prostředí. Velký důraz byl kladen na využívání odhadované budoucí polohy puku při útočných střelách robotického hráče. Zjednodušený vývojový diagram algoritmu rozhodování lze vidět na obrázku 38.

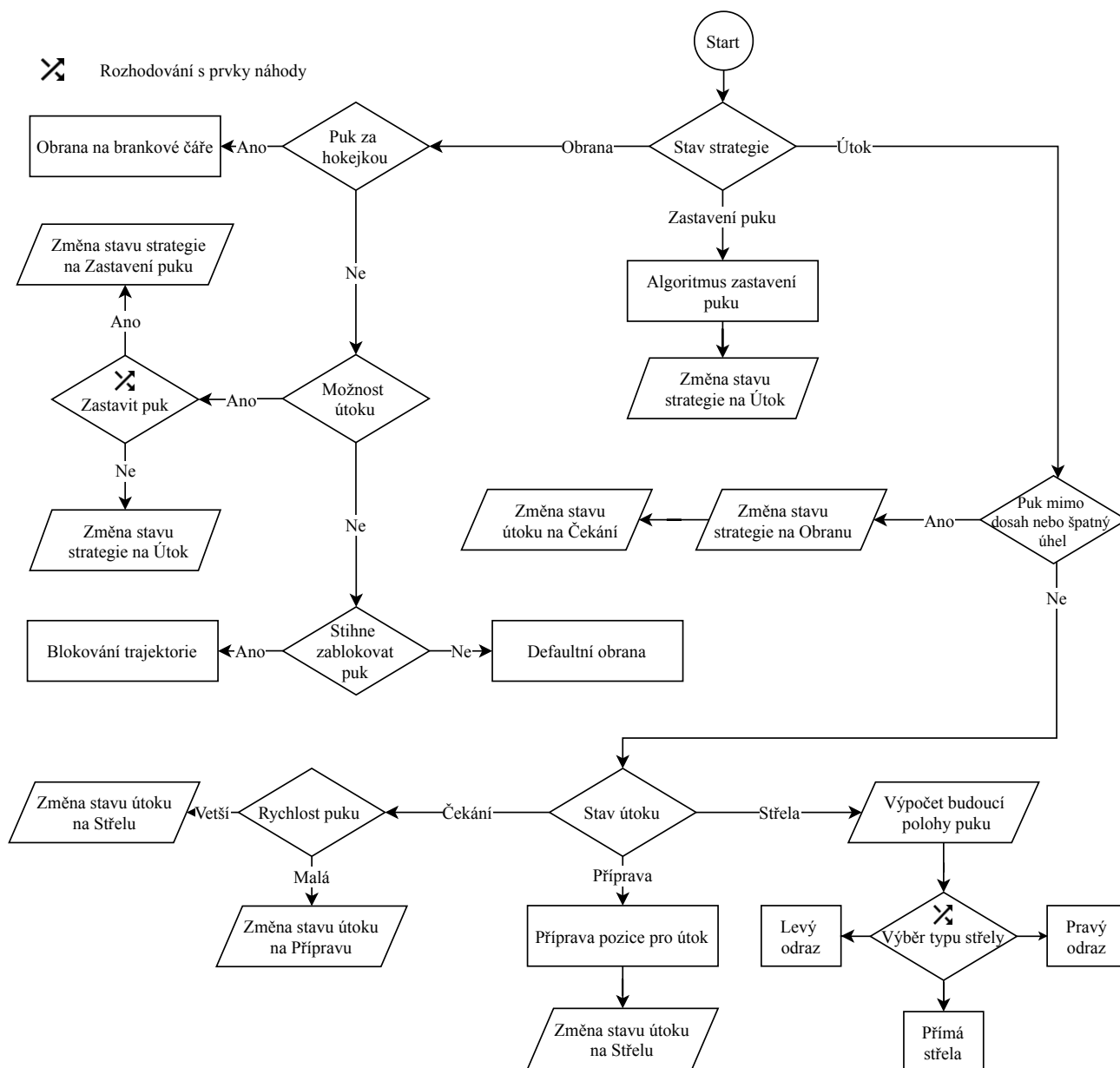


Obrázek 38: Vývojový diagram algoritmu rozhodování strategie C

5.3.4 Strategie D

Strategie D vykazuje ze všech strategií nechyťřejší chování. Oproti strategii C byl výrazně vylepšen algoritmus útoku s přesnějším mířením a možností plánovaného útoku odrazem přes mantinely. Náhodné prvky v rozhodování zajišťují nepředvídatelnost hry a schopnost zastavit pohybující puk pak snadnější přípravu útočné pozice (viz obrázek 5).

Vývoj rozhodovacího algoritmu byl výrazně ovlivněn analýzou stylů hry profesionálních hráčů zmíněných v podkapitole 1.2. Velice zjednodušený vývojový diagram algoritmu rozhodování lze vidět na obrázku 39.



Obrázek 39: Vývojový diagram algoritmu rozhodování strategie D

6 Detekce puku

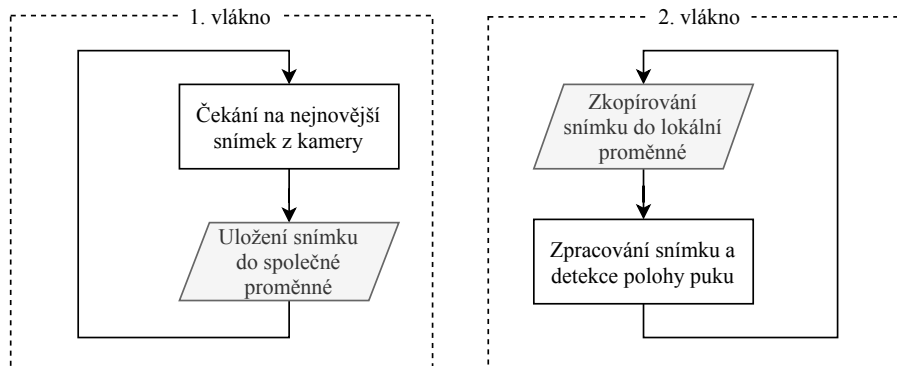
Základem pro dobře hrající strategii je co nejpřesnější a často aktualizovaná informace o aktuální poloze puku. Ta je detekována na herní ploše RVH pomocí kamery připojené k řídicí jednotce Raspberry Pi 4B, která jednotlivé snímky zpracovává. Kromě spolehlivé a co nejpřesnější detekce je zároveň nutné detekovat puk s co největší frekvencí. S vyšším rozlišením pořizovaných snímků roste díky více informacím přesnost detekce, ovšem nutnost zpracování více pixelů výrazně prodlužuje dobu pořízení a zpracování snímku. Iterativním postupem byla zjištěna ideální kombinace rozlišení a rychlosti snímání, která odpovídala hodnotám 320x192 pixelů na snímek respektive 70-80 zpracovaných snímků za vteřinu.

Kromě algoritmu pro detekování puku na snímku hrací plochy byly v rámci práce navrženy pomocné algoritmy pro automatické vyvážení bílé barvy kamery v aktuálních světelných podmínkách a automatické rozpoznání hledané barvy puku. Tyto pomocné algoritmy výrazně urychlují kalibraci při změně světelných podmínek, ve kterých se RVH nachází respektive při výměně stávajícího puku za puk s jinou barvou. Všechny tyto automaticky zjišťované parametry spolu s dalšími pak bylo navíc umožněno doladit manuálně skrze uživatelské rozhraní, které je více přiblíženo v kapitole 7.

6.1 Snímání a detekce puku

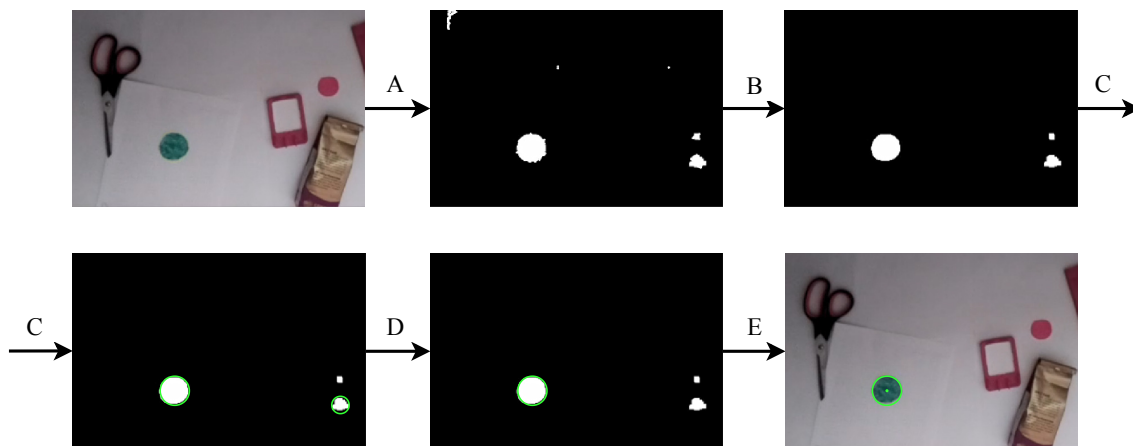
Pro jednoduchou integraci všech softwarových modulů bylo zpracování snímků z kamery (stejně jako ostatní funkcionalita RVH) implementováno v jazyce Python. Pro komunikaci s kamerovým modulem byla využita knihovna PiCamera a pro usnadnění rozpoznání puku na jednotlivých snímcích potom knihovna OpenCV.

Pro maximální využití dostupného výkonu byl proces získávání snímku z kamery a následné zpracování paralelizován. Byly vytvořeny dvě vlákna. První pro obsluhu kamery a ukládání nejaktuálnějšího snímku do paměti a druhé pro zpracování nejaktuálnější snímku uloženého v paměti a detekce polohy puku. Algoritmus detekce tak nemusel při každém cyklu čekat na nový snímek, ale průběžně zpracovával nejnovější snímky v paměti zatímco první vlákno nepřetržitě nejnovější snímek aktualizovalo. Znázorněný proces paralelního zpracování snímku lze vidět na obrázku 40.



Obrázek 40: Proces paralelního snímání a zpracování snímku

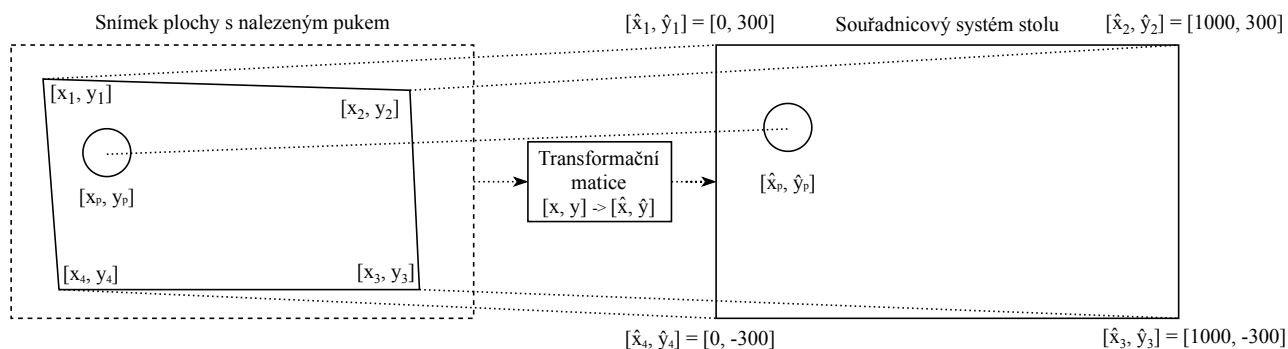
Samotná detekce je založena na algoritmu rozpoznávání objektů pomocí barvy pixelů popsaném v podkapitole 2.1.1. Pro stabilnější výsledky je po vytvoření masky snímku (A) provedena série erozí a dilatací shluků pixelů spadající svou barvou do hledaného intervalu. Tím se odstraní malé shluky, které mohly v masce vzniknout. Pro takto vyfiltrované shluky pak algoritmus nalezne jejich opisující kružnice (C). Kružnice s menšími poloměry než nastavitelná hodnota počtu pixelů jsou ignorovány. Střed největší nalezené kružnice je potom považován za souřadnice polohy nalezeného puku v pixelech (D). Celý postup detekce polohy puku z pořízeného snímku je vidět na obrázku 41.



Obrázek 41: Postup detekce polohy puku ze snímku.

Výsledné souřadnice polohy v pixelech jsou poté přepočítány do souřadnicového systému stolu pomocí transformační matice (viz obrázek 42). Ta je vytvářena při mapování polohy rohů hřiště na snímcích z kamery. Více o implementované kalibraci polohy hřiště bude zmíněno v kapitole 7.

Poloha je nakonec filtrována speciálním filtrem navrženým a využívaným již v bakalářské práci autora z roku 2018 [32]. Filtrování využívá dodatečnou informaci o maximální hodnotě šumu, díky které oproti klasické dolní propusti rychle reaguje na změny filtrované hodnoty, které se šumem nesouvisí.



Obrázek 42: Transformace souřadnic polohy puku v pixelech do souřadnicového systému RVH.

6.2 Automatické vyvážení bílé

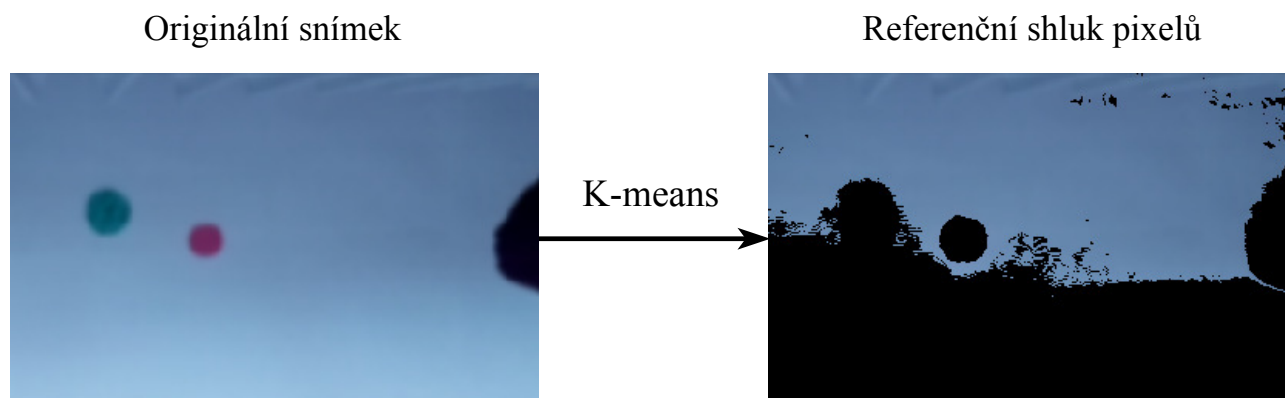
Použitý kamerový modul sám o sobě automatické vyvážení bílé využíval. Výsledky byly ale zejména v umělém osvětlení nedostatečné. Nejen, že bílá herní deska se na snímcích často zbarvovala do červena, ale zároveň se v průběhu snímání vyvážení neustále měnilo, což pro účely stabilního vyhledávání neměnicí se barvy nebylo vhodné.

Byl proto navržen alternativní způsob automatického vyvážení bílé barvy, které po dokončení až do dalšího manuálního spuštění funkce uzamklo nalezené hodnoty. Hodnoty násobících složek (hodnoty, kterými se násobí úroveň modré a červené barvy oproti barvě zelené zachycené senzorem kamery) se tak nastavily vždy při počáteční kalibraci stolu a po dobu snímání zůstávaly konstantní.

Základem algoritmu byl předpoklad, že kamera vždy sleduje plochu, kde většina pixelů odpovídá ideální bílé barvě. To v případě kamery umístěné nad bílou herní plochou RVH platí vždy. Kamera tak má vždy k dispozici přesnou referenci pro co nejpřesnější vyvážení.

Matrice RGB pixelů reprezentující aktuální snímek byla upravena tak, že od hodnot RGB každého pixelu byla odečtena jeho G složka. Například pixel s RGB vektorem $[100, 80, 70]$ by po této úpravě byl roven vektoru $[20, 0, -10]$. Takto upravená matice nerepresentovala barvy jednotlivých pixelů, ale rozdíl R a B složek od G složky. V takové matici vektor $[0, 0, 0]$ reprezentuje pixel s libovolným odstínem bílé barvy (bílá, šedá nebo černá), ale bez jakéhokoliv zbarvení. Pro nalezení referenčního pixelu byl pak využit K-means algoritmus, který všechny takto upravené pixely rozdělil na 8 shluků (hodnota s nejspolehlivějšími výsledky zjištěná experimentálně). Shluk s největším počtem pixelů byl potom označen jako *referenční shluk* a z něho náhodně vybraný pixel jako *referenční pixel*.

V několika iteracích byly pomocí referenčního pixelu upravovány hodnoty vyvážení bílé tak, že se k modré a červené složce přičítala malá část rozdílu R respektive B složky od G složky vektoru referenčního pixelu. V každé iteraci se potom celý postup opakoval až do dostatečného přiblížení hodnoty referenčního vektoru k hodnotě $[0, 0, 0]$. Tímto bylo zajištěno správné nalezení referenční bílé barvy i při špatných světelných podmínkách. Nalezení referenčního shluku po aplikaci algoritmu lze vidět na obrázku 43.

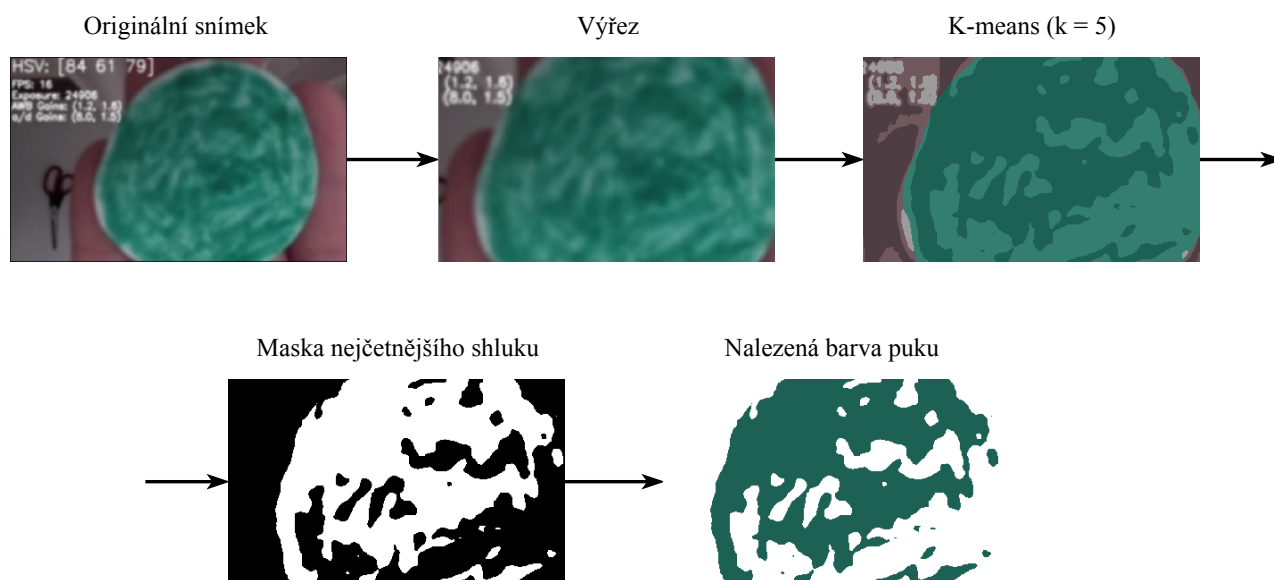


Obrázek 43: Nalezení referenčního shluku pomocí K-means pro automatické vyvážení bílé barvy.

6.3 Automatické rozpoznání barvy puku

Podobně jako algoritmus automatického vyvážení bílé barvy i algoritmus automatického rozpoznání barvy puku vznikl zejména pro výrazné urychlení počáteční kalibrační fáze RVH při změně okolních světelných podmínek. Algoritmus obdobně využívá K-means pro zjištění nejčtenějšího shluku pixelů s podobnou barvou (viz obrázek 44) ale s tím rozdílem, že neupravuje hodnoty RGB vektoru jednotlivých pixelů jako tomu bylo zapotřebí v 6.2. Pro správné rozpoznání hledané barvy je proto nutné puk dostatečně přiblížit kameře. Důležité je také dodržet posloupnost akcí, tedy před samotným rozpoznáním barvy puku automaticky nastavit vyvážení bílé barvy pomocí algoritmu 6.2.

Po spuštění algoritmu skrze uživatelské rozhraní (UI) program vyčká několik vteřin pro umožnění přiblížení puku ke kameře. Poté je na částečný výřez vyfoceného snímku aplikován postup popsany výše. Výsledná barva nejčtenějšího shluku je považována za hledanou barvu puku $[R_p, G_p, B_p]$. Ta je převedena na HSV reprezentaci barev $[H_p, S_p, V_p]$ a intervaly hledané barvy nastaveny na spodní hodnotu: $[H_p - 15, S_p - 75, V_p - 75]$ a horní hodnotu: $[H_p + 15, S_p + 75, V_p + 75]$. Tento interval hodnot je následně využíván při detekci hledané barvy.



Obrázek 44: Postup analýzy barvy puku.

7 Softwarová implementace

Implementace ovládacího softwaru spolu s vytvořením uživatelského rozhraní pro intuitivní ovládání prvků RVH skrze dotykový displej sice nebylo vymezeno v cílech práce, ale bylo neméně důležitou součástí projektu. Celý řídicí software běžel na mikropočítači Raspberry pi modelu 4B v jazyce Python, s připojeným obrazovým výstupem k dotykovému 7" displeji od firmy Wave-share. Po startu systému se řídicí program spolu s uživatelským rozhraním automaticky spustil na celou obrazovku displeje bez nutnosti manuálního zásahu. Pro maximální využití dostupného výkonu bylo co nejvíce úkonů napříč celou softwarovou implementací RVH paralelizováno do vlastních výpočetních vláken pomocí knihovny *Threading*. Po ošetření korektní výměny dat mezi vlákny tak všechny hlavní řídicí procesy běžely nezávisle na sobě a využívaly veškerý dostupný výkon procesoru.

V této kapitole bude stručně popsána konfigurace řídicí jednotky Raspberry Pi, nastíněna celková struktura řídicího softwaru spolu s vysvětlením pracovního cyklu programu, přiblíženo uživatelské rozhraní navržené od základu pro RVH a vysvětlena komunikace mezi řídicí jednotkou a Arduinem, zajišťující správu hardwarových prvků stolu, čímž se zabývala práce Dominika Jaška [32].

7.1 Konfigurace Raspberry Pi 4B

Pro optimální běh řídicího softwaru RVH na mikropočítači Raspberry Pi bylo nutné provést několik konfiguračních procedur v systému.

7.1.1 Instalace knihoven

Celý software využíval několik volně dostupných Python knihoven. Seznam nejdůležitějších spolu s popisem funkce lze vidět v tabulce 1.

Knihovna	Účel	Instalace
kivy	tvorba uživatelského rozhraní	pip + závislosti
opencv	zpracování snímků a detekce puku	pip + závislosti
pickle	ukládání a načítání dat ze souborů	standard
numpy	pokročilé matematické operace	pip
threading	paralelizace procesů	standard
pygame.math	matematika vektorů	pip
PIL	export snímků do souboru	pip
uuid	generování unikátních ID	standard
collections	pokročilé datové struktury	standard
shutil	vytváření archívů	standard
picamera	správa kamerového modulu	pip
random	generování náhodných čísel	standard
imutils	sběr snímků z kamery	pip

Tabulka 1: Seznam používaných knihoven v rámci řídicího softwaru RVH.

Instalace většiny nestandardních knihoven probíhala přes správce Python modulů PIP. Některé obsáhlejší knihovny ale vyžadovaly instalaci dalších propojených modulů. Postup instalace knihovny *opencv* zajišťující zpracování obrazu a detekci puku na jednotlivých snímcích je popsán v [38]. Instalace knihovny *kivy* potom v [39].

7.1.2 Nastavení displeje

Využití neoficiálního displeje od firmy Waveshare s nestandardním rozlišením 1024x600 zapříčinilo nekompatibilitu s řídicí jednotkou. Bylo nutné upravit několik souborů pro korektní zobrazení grafického výstupu a správnou interpretaci dotykového ovládání. Konstrukce stolu zároveň neumožňovala umístění displeje v původní orientaci, proto bylo nutné obraz otočit o 180°.

V souboru `/boot/config.txt` byly přidány následující řádky:

```
disable_overscan=1
hdmi_cvt=1024 600 3 0 0 0
hdmi_group=2
hdmi_mode=87
```

Algoritmus 3: Konfigurace nestandardního rozlišení grafického výstupu Raspberry Pi.

Pro zajištění správné interpretace dotyků při otočeném výstupu bylo nutné postupovat podle [40].

7.1.3 Přetaktování

Raspberry Pi model 4B obsahuje dostatečně silný hardware pro plynulou navigaci v uživatelském rozhraní a rychlou a spolehlivou detekci puku. I tak ale bylo pro co nejvyšší výkon odemčeno přetaktování procesoru a grafického čipu. Maximální frekvence procesoru se tak díky přetaktování zvýšila o 30 % a frekvence grafického čipu pak přibližně o 25 %.

Samotný postup přetaktování procesoru a grafického čipu Raspberry Pi byl velice jednoduchý. Po aktualizování firmwaru na nejnovější experimentální verzi pak stačilo na konec souboru `/boot/config.txt` dopsat následující řádky:

```
over_voltage=6
arm_freq=2000
gpu_freq=750
```

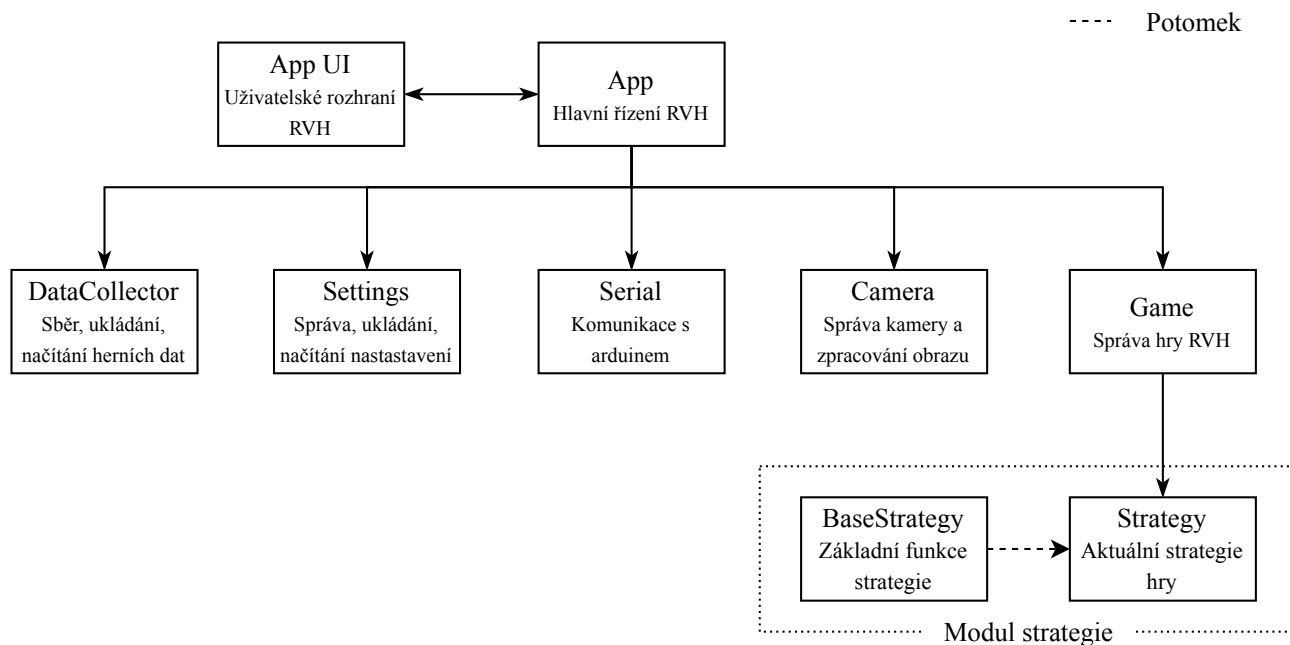
Algoritmus 4: Přetaktování procesoru a grafického čipu Raspberry pi.

Pro zajištění stabilního běhu systému bylo nutné navýšit napájecí napětí procesoru. Bez zajištění odvodu tepla ale hrozilo přehřívání čipu, proto byl nainstalován kovový chladič s aktivním odvodem tepla ve formě malých ventilátorů připojených na napájecí piny Raspberry Pie.

7.2 Struktura programu

Struktura řídicího softwaru RVH se v některých oblastech podobala struktuře simulačního softwaru, na rozdíl od simulace ale bylo nutné komunikovat s Arduinem, integrovat komplexní uživatelské rozhraní pro plnou kontrolu nad všemi důležitými aspekty stolu a spravovat modul kamery spolu se zpracováním přijímaných snímků.

Logika programu byla podobně jako u simulace rozdělena mezi jednotlivé třídy spravující určitou ucelenou část problematiky, jak je vidět na obrázku 45.

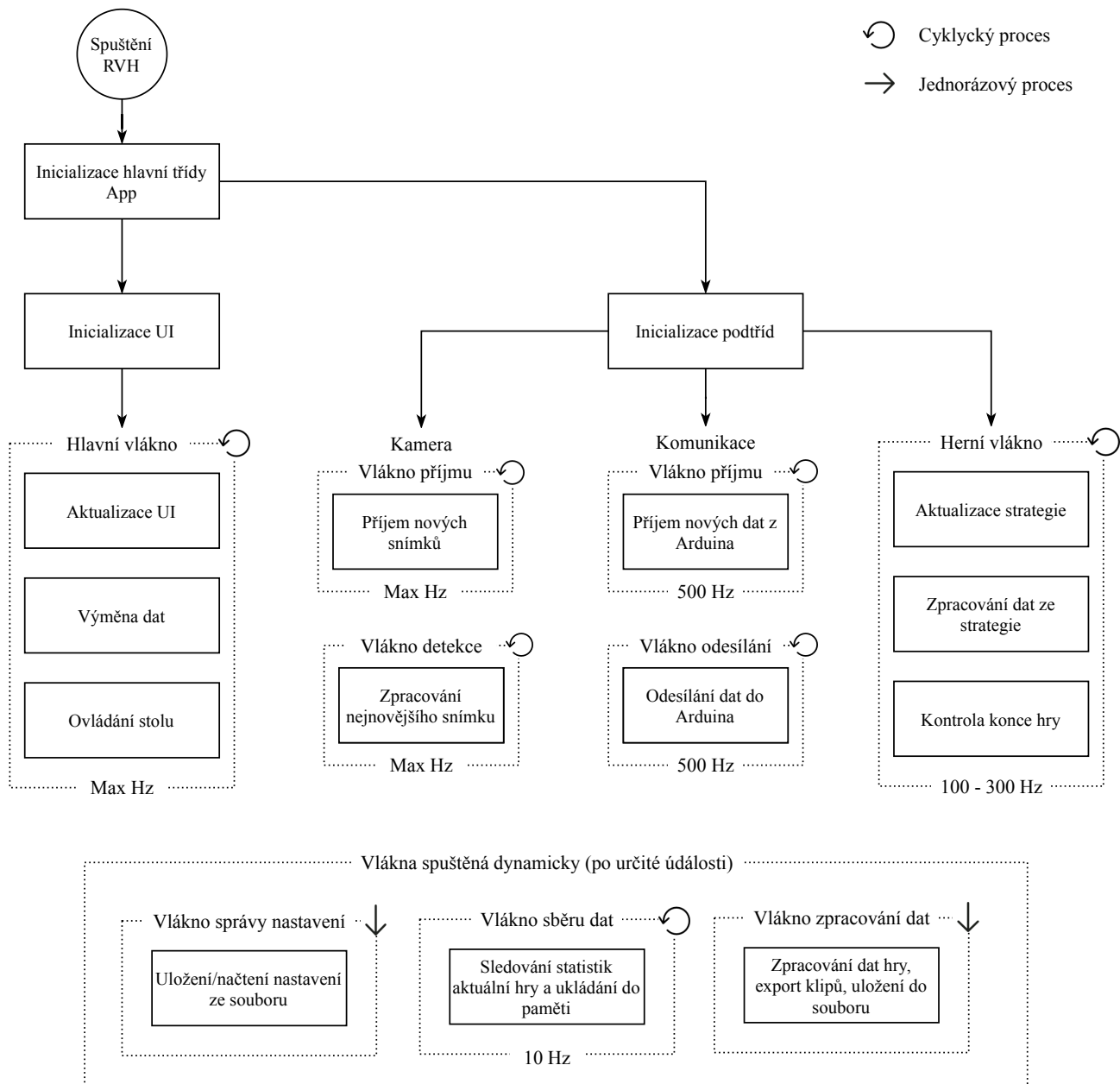


Obrázek 45: Znázornění struktury řídicího softwaru RVH.

Hlavní třída *App* je specifická tím, že integruje logiku hlavní smyčky programu spolu s ovládním uživatelského rozhraní. Více bude o implementaci uživatelského rozhraní pojednáno v podkapitole 7.3. Zároveň má hlavní třída přístup ke všem podtřídám RVH a zajišťuje tak komunikaci mezi nimi buď přeposíláním dat, nebo pomocí odkázání referencí. Například ke třídě *Settings*, obsahující veškeré nastavitelné parametry RVH, mají přístup všechny ostatní podtřídy skrz referenci na její instanci uloženou pod hlavní třídou *App*.

Logika každé podtřídy využívá jedno nebo více vlastních vláken pro paralelní zpracování jednotlivých úkonů. Třída *App* pak zajišťuje bezkonfliktní výměnu důležitých dat. Kromě efektivnějšího využití dostupného výkonu má takto paralelní výpočetní struktura obrovskou výhodu ve vzájemné nezávislosti časové náročnosti jednotlivých procedur. Například třída *Serial*, která zasílá a přijímá data z pomocné řídicí jednotky (Arduina) spravující hardwarové prvky stolu, nutně potřebuje kontrolovat sériovou komunikaci s vysokou frekvencí. Pokud ale Arduino začne posílat vyjimečně dlouhou zprávu, celý přenos zabere mnohonásobně delší dobu než byla původní doba cyklu kontroly komunikace. V případě, že by třída *Serial* neběžela pod vlastním

vlákem, celé řízení stolu by po dobu přenosu zprávy „zamrzlo“. Naopak při využití paralelního zpracování může jakákoliv třída „zamrznout“ na jakkoliv dlouhou dobu bez omezení výpočetní rychlosti ostatních tříd. Další výhodou je umožnění probíhání výpočetních cyklů každé třídy s různou frekvencí, takže například třída *Camera* může detekovat polohu puku na nových snímcích 70 krát za vteřinu, zatímco třída *Game* aktualizovat žádanou polohu robotické hokejky 170 krát za vteřinu. Velice zjednodušené znázornění výpočetního procesu vláken celého programu lze vidět na obrázku 46.



Obrázek 46: Znázornění výpočetního procesu vláken řídicího programu RVH

7.3 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní, nebo také UI, zajišťující grafický výstup stavů RVH a možnost interakce s ovládacími prvky vznikalo za pomoci python knihovny *Kivy*, která se zaměřuje na usnadnění tvorby UI s moderním designem a podporou dotykového ovládání. Nebyla však využita žádná šablona a veškeré prvky byly designovány od základu pro využití pouze na RVH. Díky tomu mohlo vzniknout intuitivní a na pohled příjemné prostředí pro rychlé ovládání aktuální hry, nastavení různých parametrů stolu, kontrolu stavů nebo i přehled statistik her a možnost procházení historie odehraných zápasů spolu s nahranými krátkými klipy důležitých okamžiků hry.

Kvůli rozsáhlé komplexnosti a obsáhlosti tématu a faktu, že vytvoření uživatelského rozhraní nebylo tématem cílů práce bude popis výsledného produktu velice zjednodušen. Pro pochopení všech okolností, které souviseli s návrhem a implementací UI pro RVH a přehled designu jednotlivých sekcí rozhraní lze nahlédnout do přiloženého zdrojového kódu respektive na fotky stránek v příloze B .

7.3.1 Struktura programu a základy *Kivy*

Knihovna *Kivy* je v základu velice jednoduchá. Kód potřebný pro vytvoření základní aplikace zobrazující text uprostřed okna vypadá následovně:

```
import kivy
from kivy.app import App
from kivy.uix.label import Label
class MyApp(App):
    def build(self):
        return Label(text='Hello world')
if __name__ == '__main__':
    MyApp().run()
```

Algoritmus 5: Základní aplikace vytvořená pomocí knihovny *Kivy*.

Za předpokladu správně nainstalované knihovny se po spuštění skriptu otevře okno s textem „Hello Word“ uprostřed. Metoda `build` svojí návratovou hodnotou definuje, co se v okně zobrazí. Widget `Label` tak lze nahradit libovolným jiným *Kivy* widgetem, který sám může obsahovat další widgety. Ve třídě `MyApp` pak mohou být umístěny i metody obsahující logiku aplikace. Kompletní popis postupu vytváření aplikací pomocí knihovny *Kivy* lze nalázt v online dokumentaci knihovny [36]. Z příkladu je patrná možnost kombinace kódu definující vzhled spolu s logikou aplikace. Zatímco pro jednoduché projekty může být taková struktura výhodou, pro komplexnější aplikace lze s výhodou část definující vzhled a rozvržení od logiky oddělit. *Kivy* pro tyto účely využívá speciální `.kv` soubor definující vzhled pomocí zjednodušené stromové struktury. Ten se pak interně zpracovává a překládá na syntaxi Pythonu. Pro více informací

lze opět nahlédnout do oficiální dokumentace *Kivy* knihovny [36]. Jednoduchý příklad definice widgetu s textem „Hello world“ a dvěma tlačítky bez přidělené funkce pomocí .kv souboru:

```
MyRootWidget:
    BoxLayout:
        Label:
            text: „Hello world“
        Button:
        Button:
```

Algoritmus 6: Příklad definice widgetu `MyRootWidget` se dvěma tlačítky pomocí .kv souboru

V tomto případě by pro správné spuštění aplikace bylo potřeba hlavní skript (algoritmus 5) mírně upravit:

```
import kivy
from kivy.app import App
from kivy.uix.boxlayout import BoxLayout
class MyRootWidget(BoxLayout):
    pass
class MyApp(App):
    def build(self):
        return MyRootWidget()
if __name__ == '__main__':
    MyApp().run()
```

Algoritmus 7: Hlavní skript aplikace se rozvržením widgetu `MyRootWidget` definovaným odděleně.

Knihovna interně načetla .kv soubor a přiřadila definici vzhledu k deklarované třídě *MyRootWidget*, jejíž instance je vrácena metodou *build* a tím zobrazena v okně aplikace.

Tímto způsobem bylo programováno celé uživatelské rozhraní RVH. Hlavní skript obsahoval logiku softwaru spolu s instancemi podtříd zmíněných v podkapitole 7.2 a .kv soubor strukturu, navázání interaktivních prvků a definici vzhledu UI.

7.3.2 Rozvržení a design

Hlavním cílem návrhu UI bylo snadno a rychle dostupné ovládání nejzákladnějších úkonů a okamžitý přehled o důležitých stavech stolu a aktuálně hraného zápasu. Zásadní byla i přehledná navigace a logicky rozvržené jak nastavovací, tak informační obrazovky. Celý design se navíc ladil do zakulaceného stylu připomínající kulatý puk a herní hokejky. Podle aktuálně snímané barvy puku se pak podkreslovali barevné prvky UI. Celé uživatelské prostředí proto vždy ladilo s barvou aktuálně využívaného puku ke hraní. Hlavní a zároveň úvodní obrazovka, využívaná pro spouštění/zastavování zápasu a rychlého přehledu spolu s popisem oblastí UI je vidět na obrázku 47.



Obrázek 47: Popis oblastí uživatelského rozhraní RVH.

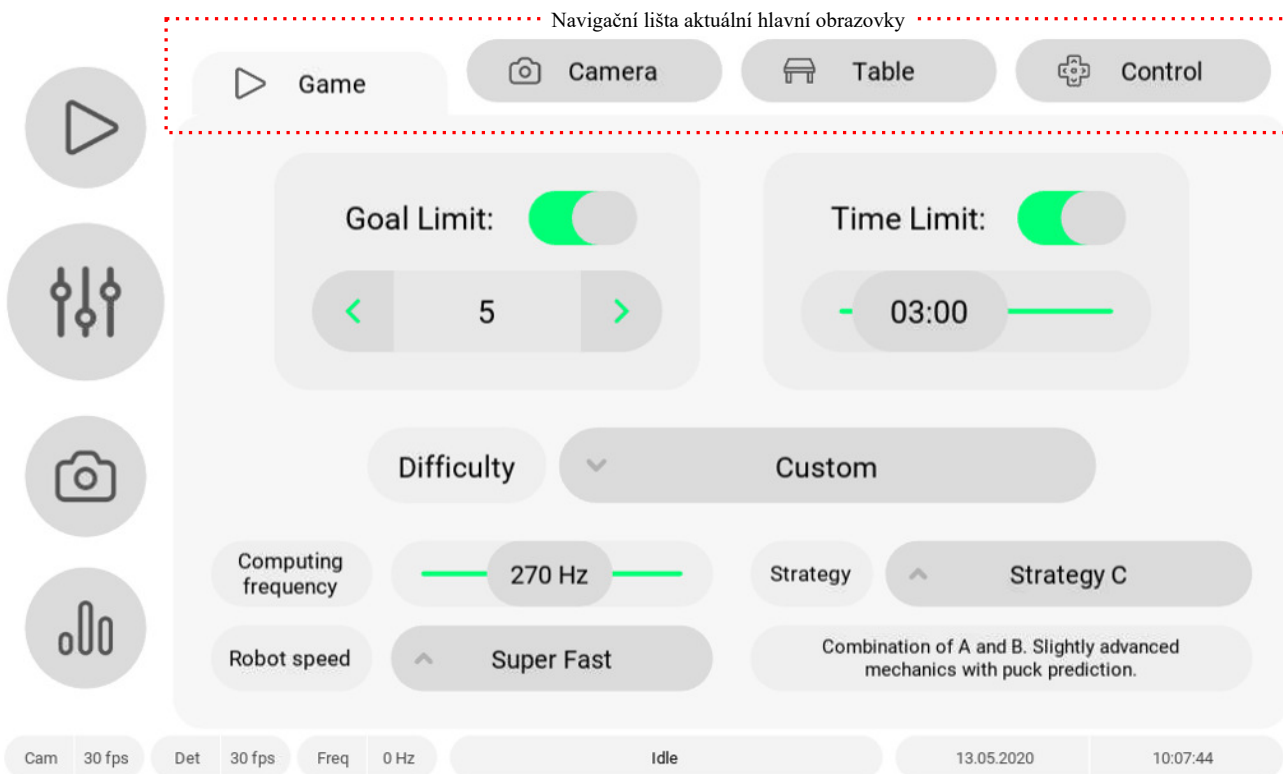
Prostředí bylo rozvrženo do 3 hlavních oblastí:

- **Navigační**

Slouží k navigování mezi jednotlivými obrazovkami formou tlačítek. Aktuálně zvolená obrazovka je zvýrazněná zvětšením příslušného tlačítka. Celkově byly navrženy čtyři hlavní obrazovky (Aktuální zápas, Nastavení, Kamera a Herní statistiky), kde každá hlavní může navíc obsahovat podobrazovky.

- **Obsahová**

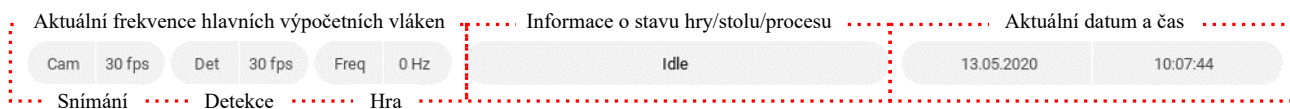
Oblast zabírající nejvíce využitelného prostoru určená k zobrazení obsahu aktuálně zvolené obrazovky. Obrazovky Nastavení a Herní statistiky navíc obsahují podobrazovky (viz obrázek 48), mezi kterými je na dané obrazovce možné přecházet.



Obrázek 48: Obrazovka nastavení uživatelského rozhraní RVH.

- **Informační**

Úzká oblast zobrazující aktuální údaje o výpočetních frekvencích důležitých paralelních vláken, stavu procesů a datu a času (viz obrázek 49).



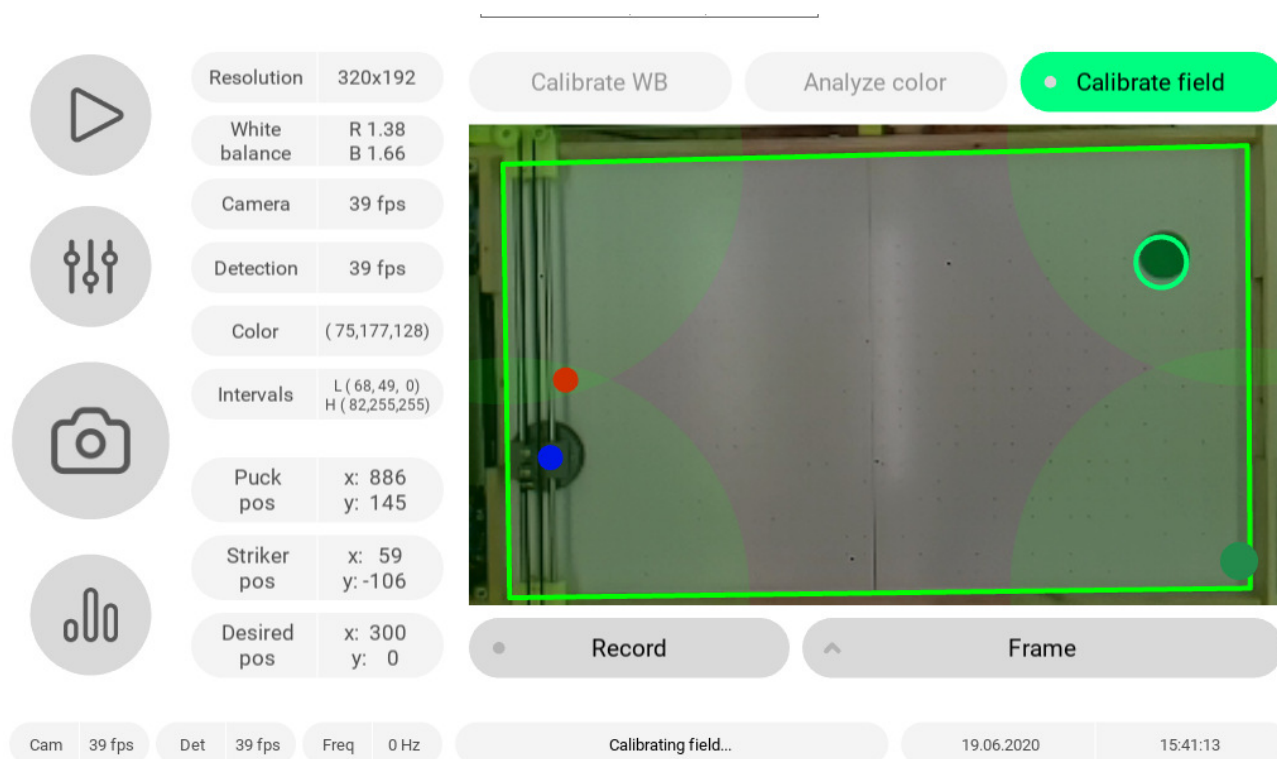
Obrázek 49: Informační panel uživatelského rozhraní.

7.3.3 Dodatečné funkce

V rámci uživatelského rozhraní bylo vytvořeno několik pomocných funkcionalit, které výrazně ulehčovali konfigurační a testovací procedury RVH.

Kalibrace rohů herní desky

Kalibrace rohů herní desky pro správnou transformaci souřadnic nalezeného puku byla prováděna pomocí intuitivního přetáhnutí rohů zeleného čtyřúhelníku na rohy hřiště zobrazené na streamu z kamery. Proces kalibrace rohů herní plochy lze vidět na obrázku 50.



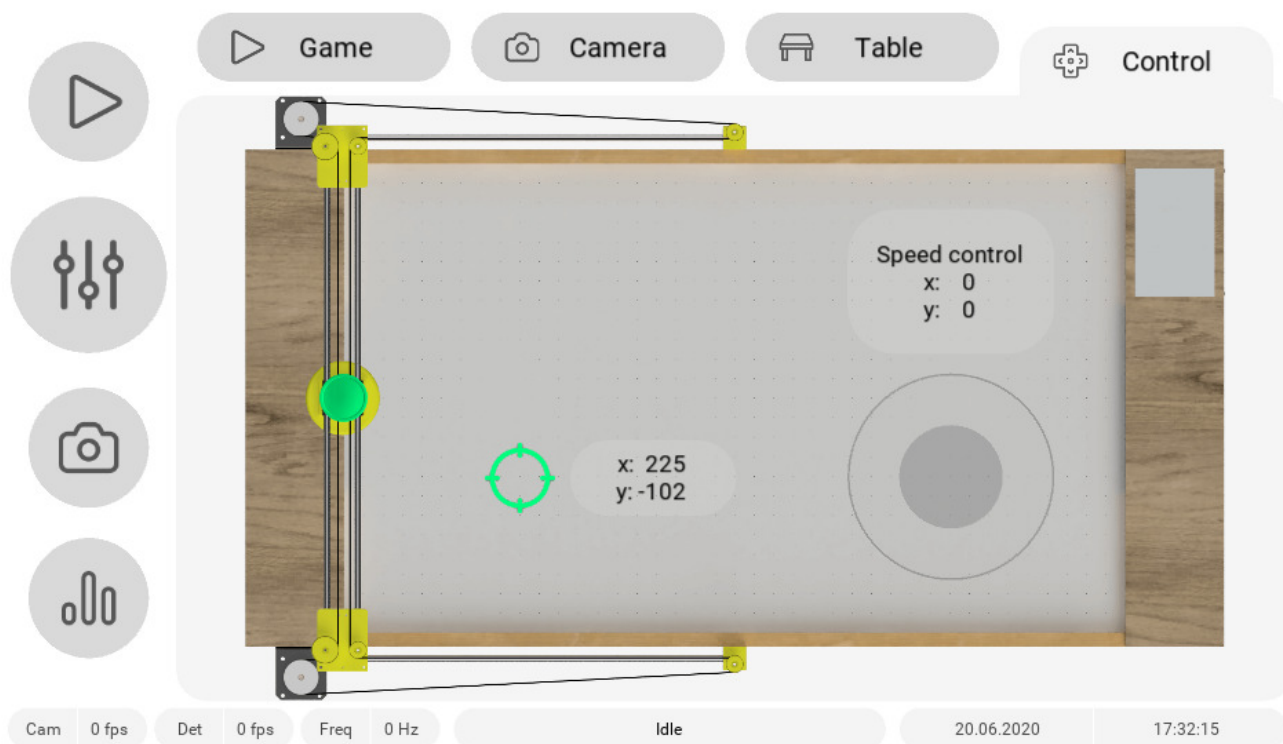
Obrázek 50: Proces kalibrace rohů herní plochy pomocí uživatelského rozhraní RVH..

Po dokončení kalibrace potvrzením tlačítka *Calibrate field* byla vygenerována transformační matice a uložena do podtřídy *Camera*, ve které byla využívána pro přepočítání souřadnic nalezeného puku v pixelech na milimetry v souřadnicovém systému RVH (viz kapitola 6). V případě změny pohledu kamery vlivem otřesů nebo výměny konstrukce tak byla zajištěna možnost téměř okamžitého znovu-zprovoznění hry díky zamezení nutnosti úprav samotného zdrojového kódu i u složitějších konfiguračních procesů. Pro pochopení způsobu implementace této funkcionality lze nahlédnout do příloženého zdrojového kódu.

Testování motorů

Pro možnost intenzivního testování dynamiky pohybu robotické hokejky vznikla obrazovka pro dotykové zadávání žádané polohy/rychlosti hokejky, která byla následně odesílána skrz sériovou linku Arduino. Ten zajišťoval nízkoúrovňové řízení obou motorů. Obrazovka umožňovala zadávání žádané polohy pomocí dotyku/přetahováním prstu po znázorněné herní ploše. Pro zadávání žádané rychlosti pak bylo možné využít virtuální joystick.

Vizualizace rovněž zobrazovala aktuální polohu hokejky a puku spolu s vypočítanou trajektorií pohybu. Obrazovku pro ovládání robotické hokejky lze vidět na obrázku 51.

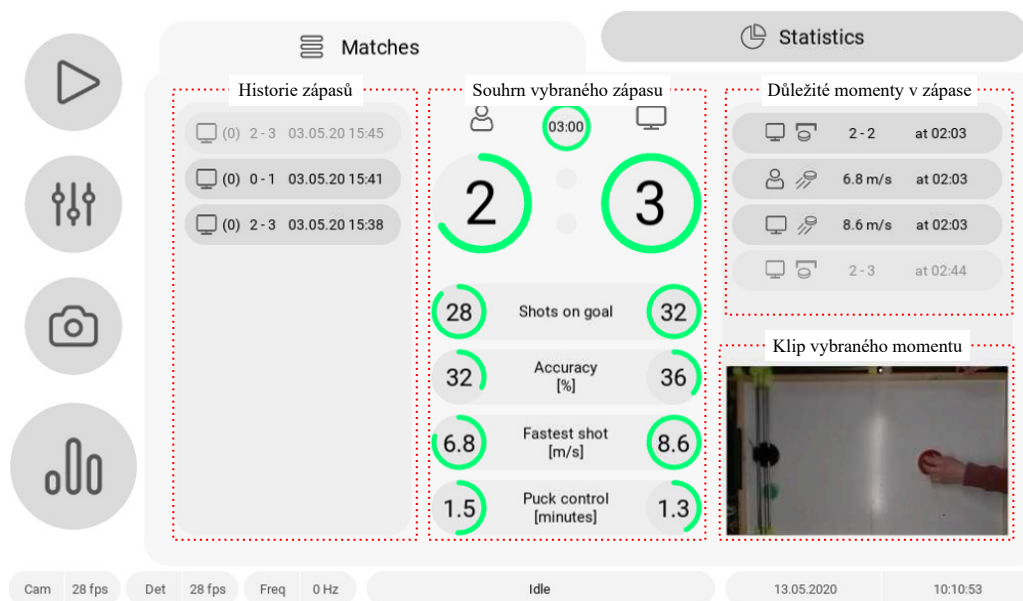


Obrázek 51: Obrazovka uživatelského rozhraní pro ovládání robotické hokejky RVH.

Záznam her

Řídicí software také průběžně nahrával každou odehrávanou hru. Kromě základních statistik jako počet gólů a výher byly vyhodnocovány i komplexnější parametry jako počet střel na bránu nebo přesnost míření. Každá důležitá událost v zápase pak byla navíc nahrávána a ukládána do paměti ve formě krátkých klipů. Celková historie zaznamenaných zápasů byla poté vizualizována na vlastní obrazovce (viz obrázek 52).

Další vlastnosti a funkcionalita uživatelského rozhraní nebude z důvodu obsáhlosti uvedena. Pro více informací lze nahlédnout do příloženého zdrojového kódu.



Obrázek 52: Obrazovka historie zápasu s nahranými klipy důležitých momentů.

7.4 Komunikace s řízením pohonů

Pro ovládání většiny hardwarových prvků stolu spravovaných pomocnou nízkoúrovňovou řídicí jednotkou (Arduino), bylo nutné zajistit obousměrnou komunikaci mezi Raspberry Pi a Arduinem. Ta byla implementována pomocí sériové linky a byly zavedeny následující konvence zpráv:

Směr	Zpráva	Význam
Raspberry->Arduino (R->A)	home	automatická reference robotické hokejky
	setaccel, [x]	nastavení akcelerace hokejky na [x]
	setdeccel, [x]	nastavení decelerace hokejky na [x]
	setmaxspeed, [x]	nastavení maximální rychlosti hokejky na [x]
	kpgain, [x]	nastavení parametru regulátoru Kp na [x]
	p,[x],[y]	nastavení aktuální žádané polohy hokejky na [x, y]
	v,[x],[y]	nastavení aktuální žádané rychlosti hokejky na [x, y]
	fans, [x]	zapnutí/vypnutí ventilátorů, [x] ∈ (0, 1)
	leds, [x]	nastavení jasu osvětlení hrací plochy [x] ∈ (0 – 255)
	solenoid	aktivuje solenoid pro vystřelení puku z branky
blink	zablikání led pásků v brance robotické strany	
A->R	[x], [y]; [vx], [vy]; [h]	poloha hokejky [x, y]; rychlost hokejky [vx, vy]; stav zhomování
	e1	chyba v důsledku aktivování koncového spínače
	e2	detekovaná chyba na driveru

Tabulka 2: Konvence komunikačních výrazů mezi Raspberry Pi a Arduinem.

8 Závěr

V rámci diplomové práce byl navržen a implementován simulační software, který byl následně využit pro návrh celkem čtyř typů strategií hry RVH. Zároveň byla řešena detekce polohy puku na hrací ploše a vyhodnocení jeho pohybu. Práce byla rozšířena o nepovinnou část zabývající se softwarovou implementací RVH spolu s vytvořením uživatelského rozhraní pro ovládání stolu přes dotykový displej. Celý projekt byl realizován ve spolupráci s Dominikem Jaškem, jehož práce [32] se zabývala konstrukčním řešením RVH a řízením pohonů pomocí mikroprocesoru Arduino Micro.

V teoretické části práce byla popsána hra vzdušný hokej spolu s rešerší stylů hry profesionálních hráčů a analýzou chování člověka při rychlých změnách puku. Tyto znalosti pak byly využity při návrhu strategie robotického hráče. Zároveň byly konzultovány různé řešení detekce polohy objektů v průmyslu. Jako nejvhodnější se v daných podmínkách jevila kombinace kamerového modulu z rodiny produktů Raspbery verze 1.3 pro snímání plochy a jednodeskového počítače Raspberry Pi pro zpracování snímků.

Úvodem praktické části bylo shrnutí výsledné konstrukce RVH navržené Dominikem Jaškem. Online model konstrukce vytvořené v modelovacím softwaru Fusion 360 lze prohlížet na odkazu [41]. Fotky výsledné konstrukce lze nalézt v příloze A .

Pro možnost paralelního vývoje strategie hry spolu s realizací RVH byl vytvořen simulační software v jazyce Python (stejně jako veškeré ostatní softwarové moduly), který modeloval chování reálného stolu. Kromě modelování fyziky pohybu puku po hřišti a snímání plochy simulovanou kamerou s dodanou nepřesností bylo také umožněno s probíhající simulací interagovat, čímž byla zajištěna možnost testování libovolných situací hry. Simulační software byl v průběhu vývoje RVH upravován aby co nejlépe modeloval výsledný systém a zajišťoval potřebné funkce pro efektivní testování.

S využitím simulačního softwaru byly navrženy celkově čtyři různé strategie s rozdílným stylem hry. Strategie A vykazovala pouze základní herní taktiky. Strategie B umožňovala předvídat polohu puku v určitém čase a pomocí této informace efektivně rozhodovat o žádané poloze hokejky. Strategie C vznikala jako rozšíření strategie B a vynikala v přesných a rychlých střelách na bránu. Strategie D pak vznikala jako poslední a kombinovala nejlepší vlastnosti ze všech ostatních. Kromě toho také vykazovala při rozhodování prvky náhody pro zmatení lidského protihráče. Zdrojový kód navržených strategií spolu se simulačním softwarem je k dispozici v příloženém souboru nebo na odkazu [42].

Snímání herní plochy bylo zajištěno Raspberry kamerovým modulem V1.3 se speciální čočkou Arducam 1/2,7" s ohniskovou vzdáleností 2,8 mm pro větší zorný úhel. Ta byla umístěna na kamerové konstrukci 80 cm nad rovinou hřiště. Zpracovávání a detekce polohy puku na snímcích potom probíhalo na Raspberry Pi s využitím knihoven *opencv* a *numpy*. Po optimalizaci algoritmů detekce zvládal Raspberry Pi snímat a zpracovat přibližně 70 snímků za vteřinu s rozlišením 320x192, což se pro účely strategie jevílo jako dostatečně přesné a rychlé.

V neposlední řadě byly všechny softwarové části integrovány pod řídicí aplikaci s vytvořeným uživatelským rozhraním (UI) sloužící k ovládání stolu a nastavování parametrů RVH. Ta byla implementována pomocí knihovny *kivy* zaměřující se na tvorbu intuitivních a moderně vypadajících aplikací v jazyce Python s podporou dotykového ovládání. Rozvržení a design UI vznikal

od základu speciálně pro RVH pro přehlednou navigaci a unikátní vzhled bez využívání předpřipravených šablon. Zároveň byla vyřešena komunikace mezi Raspberry Pi a Arduinem, které spravovalo většinu hardwarových prvků stolu. Zdrojový kód řídicího softwaru RVH je k dispozici v příloženém souboru nebo na odkazu [43].

Vzhledem k rozsáhlosti projektu a provázanosti témat s prací Dominika Jaška [32] byla nutná neustálá spolupráce a vzájemná výpomoc. Celý projekt prošel ve všech oblastech vývoje několika iteracemi, ale z důvodu obsáhlosti popisu byl stručně popsán pouze výsledný produkt. Pro podrobnější informace ohledně vytvořených softwarových modulů lze nahlédnout do příloženého zdrojového kódu. Pro náhled výsledné konstrukce lze potom konzultovat vytvořený model nebo nahlédnout do příloh práce.

Seznam obrázků

1	Profesionální vzdušný hokej využívaný na turnajích [1]	14
2	Standardizované rozměry vzdušného hokeje s doporučenými rozměry místnosti [39]	15
3	Standardní hokejky s pukem pro stolní hru vzdušný hokej [5, 6]	15
4	Znázornění trojúhelníkové obrany	16
5	Znázornění pohybu hokejky při zpracovávání pomalé střely	17
6	Znázornění falešné střely	18
7	Fotka experimentální sestavy pro sledování pohybu očí lidského hráče [9]	19
8	Schéma testovacích trajektorií puku při sledování pohybu očí lidského hráče	19
9	Znázornění sil působící na puk pohybující se po hrací desce [11]	21
10	Znázornění odrazu puku od mantinelu	22
11	Znázornění odrazu puku od pohybující se hokejky	22
12	Příklad masky snímku hrací plochy vzdušného hokeje [15]	23
13	Původní obrázek a maska obrázku při hledání objektu za pomoci barvy [20]	24
14	Nalezená kružnice na obrázku plechovky pomocí Hoghovi transformace [21]	25
15	Detekce a klasifikace objektů neuronovou sítí YOLO [24]	25
16	Postup strukturou konvoluční neuronové sítě pro klasifikaci objektu [26]	26
17	Průmyslové kamery série 7000 společnosti Cognex	27
18	Příklad web kamery zapojené do mikropočítače Raspberry Pi [29]	27
19	Raspberry Pi s připojeným modulem kamery [31]	28
20	Princip zapojení a uspořádání infračervených LED diod a tranzistorů [33]	29
21	Model konstrukce RVH.	30
22	Pohledy na odkryté strany stolu.	31
23	Konstrukce uchycení kamery s vestavěným led osvětlením.	31
24	Raspberry Pi 4B s aktivním chladičím krytem.	32
25	7“ displej od firmy Waveshare [35].	32
26	Simulační program pro vývoj a analýzu strategie RVH	33
27	Znázornění struktury simulačního softwaru vzdušného hokeje	34
28	Vývojový diagram simulačního softwaru vzdušného hokeje	35
29	Možné situace při kontrole kolize typu kruh-úsečka	37
30	Znázornění simulace snímání a detekce puku.	38
31	Zobecněný UML diagram dědičnosti tříd modulu strategie	39
32	Vývojový diagram průběhu řídicích metod třídy <i>BaseStrategy</i>	40
33	Vývojový diagram algoritmu detekce odrazu puku	41
34	Znázornění detekce odrazu pomocí analýzy historie poloh puku	42
35	Navržené typy strategií pro RVH	43
36	Vývojový diagram algoritmu rozhodování strategie A	43
37	Vývojový diagram algoritmu rozhodování strategie B	44
38	Vývojový diagram algoritmu rozhodování strategie C	44
39	Vývojový diagram algoritmu rozhodování strategie D	45
40	Proces paralelního snímání a zpracování snímku	46
41	Postup detekce polohy puku ze snímku.	47

42	Transformace souřadnic polohy puku v pixelech do souřadnicového systému RVH.	47
43	Nalezení referenčního shluku pomocí K-means pro automatické vyvážení bílé barvy.	48
44	Postup analýzy barvy puku.	49
45	Znázornění struktury řídicího softwaru RVH.	52
46	Znázornění výpočetního procesu vláken řídicího programu RVH	53
47	Popis oblastí uživatelského rozhraní RVH.	56
48	Obrazovka nastavení uživatelského rozhraní RVH.	57
49	Informační panel uživatelského rozhraní.	57
50	Proces kalibrace rohů herní plochy pomocí uživatelského rozhraní RVH..	58
51	Obrazovka uživatelského rozhraní pro ovládání robotické hokejky RVH.	59
52	Obrazovka historie zápasu s nahranými klipy důležitých momentů.	60
53	Pohled na celkovou konstrukci stolu.	70
54	Pohled na robotickou stranu stolu.	71
55	Pohled na stranu lidského protivníka.	71
56	Pohled na stranu lidského protivníka s odkrytým brankovým krytem.	72
57	Pohled na odkrytý rozvaděč s 5V, 24V a 36V zdrojem.	72
58	Pohled z vrchu na vnitřek stolu bez herní desky.	73
59	Pohled na odkrytou robotickou stranu stolu.	73
60	Hlavní herní obrazovka.	74
61	Obrazovky nastavení všech aspektů stolu.	74
62	Obrazovka správy kamery.	75
63	Obrazovky záznamu a měřených statistik her.	75

Seznam tabulek

1	Seznam používaných knihoven v rámci řídicího softwaru RVH.	50
2	Konvence komunikačních výrazů mezi Raspberry Pi a Arduinem.	60

Seznam algoritmů

1	Řešení kolize typu kruh-kruh	36
2	Řešení kolize typu kruh-úsečka	37
3	Konfigurace nestandardního rozlišení grafického výstupu Raspberry Pi.	51
4	Přetaktování procesoru a grafického čipu Raspberry pi.	51
5	Základní aplikace vytvořená pomocí knihovny Kivy.	54
6	Příklad definice widgetu MyRootWidget se dvěma tlačítky pomocí .kv souboru	55
7	Hlavní skript aplikace se rozvržením widgetu MyRootWidget definovaným odděleně.	55

Použité zkratky

RVH Robotický vzdušný hokej

UI User interface (uživatelské rozhraní)

Seznam použité literatury

- [1] Tournament Pro Air Hockey Table. In: Gold-standard-games [online]. 3020 N. Water Street Bay City [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://gold-standard-games.com/tournament-pro-air-hockey-table.shtml>.
- [2] FIALA, Dominik. Airhockey_pravidla. Airhockey [online]. 2011 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: http://www.airhockey.cz/wp-content/uploads/2011/03/Airhockey_pravidla.pdf
- [3] Regulation Air Hockey Table Dimensions. Game Table Planet [online]. Harrisburg [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <https://gametableplanet.com/regulation-air-hockey-table-dimensions/>
- [4] What is the Regulation Air Hockey Puck Size? Game Table Planet [online]. Harrisburg [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://gametableplanet.com/what-is-the-regulation-air-hockey-puck-size/>
- [5] Plastic Mallet Pusher Puck. In: Online Shopping UAE [online]. [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://bit.ly/2vJGUZ1>
- [6] Mini Air Hockey Pusher Mallet [online]. In: . [cit. 2020-03-23]. Dostupné z: <https://cz.pinterest.com/pin/734860864169276331/>
- [7] ROBBINS, Mark. How to Play Air Hockey. In: Youtube [online]. 2015 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=jAYcpvd8jGE>
- [8] Air Hockey Strategies. Bubble & Air Hockey [online]. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.bubbleairhockey.com/air-hockey-strategy.html>
- [9] OGAWA, M, K IKEUCHI, Y SATO, S KUDOH, T TOMIZAWA, T SUEHIRO a S SHIMIZU. Towards air hockey robot with tactics - Statistical analysis from measurement of eye movement. In: 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation [online]. IEEE, 2012, s. 34-39 [cit. 2020-04-02]. DOI: 10.1109/ICMA.2012.6282343. ISBN 9781467312752.
- [10] W. SPONG, Mark. Impact controllability of an air hockey puck. Systems & Control Letters [online]. Elsevier B.V, 2001, 42(5), 333-345 [cit. 2020-04-05]. DOI: 10.1016/S0167-6911(00)00105-5. ISSN 0167-6911.
- [11] KOPECKÝ, David. AUTOMATICKÝ VZDUCHOVÝ HOKEJ. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické. Vedoucí práce Zemánek Jiří.
- [12] LEONG, Eric. An Approach to Line-Circle Collision Detection and Response. 2009. William A. Shine Great Neck South High School.
- [13] JAMIESON, Darran. Simulating Circle-Circle Collisions. Evanto Tuts [online]. 27 Sep 2012 [cit. 2020-04-06]. Dostupné z: <https://gamedevelopment.tutsplus.com/tutorials/when-worlds-collide-simulating-circle-circle-collisions-gamedev-769>

- [14] BARA, Matthew, Sneha GOLLAMUDI a Samuel WILLIAMS. Developing an Air Hockey Game in LabVIEW. In: 2017 25th International Conference on Systems Engineering (ICSEng) [online]. IEEE, 2017, 2017-, s. 333-336 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.1109/ICSEng.2017.65.
- [15] BISHOP, B.E a M.W SPONG. Vision-based control of an air hockey playing robot. IEEE Control Systems [online]. IEEE, 1999, 19(3), 23-32 [cit. 2020-04-08]. DOI: 10.1109/37.768537. ISSN 1066-033X.
- [16] MARKUŠ, Nenad, Miroslav FRLJAK, Igor PANDŽIĆ, Jörgen AHLBERG a Robert FORCHHEIMER. Object Detection with Pixel Intensity Comparisons Organized in Decision Trees. ArXiv.org [online]. Ithaca: Cornell University Library, arXiv.org, 2014 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2084910553/>
- [17] ROSEBROCK, Adrian. OpenCV and Python Color Detection. PyImageSearch [online]. August 4, 2014 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.pyimagesearch.com/2014/08/04/opencv-python-color-detection/>
- [18] ROSEBROCK, Adrian. Ball Tracking with OpenCV. In: Learn OpenCV [online]. FEBRUARY 11, 2019 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.pyimagesearch.com/2015/09/14/ball-tracking-with-opencv/>
- [19] SADEKAR, Kaustubh. Color Detection and Segmentation with OpenCV. In: Learn OpenCV [online]. FEBRUARY 11, 2019 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.learnopencv.com/invisibility-cloak-using-color-detection-and-segmentation-with-opencv/>
- [20] Color Detection Using HSV Color Space. In: MathWorks [online]. 24 Jan 2008 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/mlc-downloads/downloads/submissions/18440/versions/1/screenshot.jpg>
- [21] ROSEBROCK, Adrian. Detecting Circles in Images using OpenCV and Hough Circles. In: PyImageSearch [online]. July 21, 2014 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.pyimagesearch.com/2014/07/21/detecting-circles-images-using-opencv-hough-circles/>
- [22] KAZÍK, Martin. Houghova transformace pro detekci kružnic. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009.
- [23] RIEKE, Johannes. Object detection with neural networks. In: Towards data science [online]. Jun 12, 2017 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/object-detection-with-neural-networks-a4e2c46b4491>
- [24] You only look once (YOLO) : unified real time object detection. In: SlideShare [online]. [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/AshishKumar207/you-only-look-once-yolo-unified-real-time-object-detection>

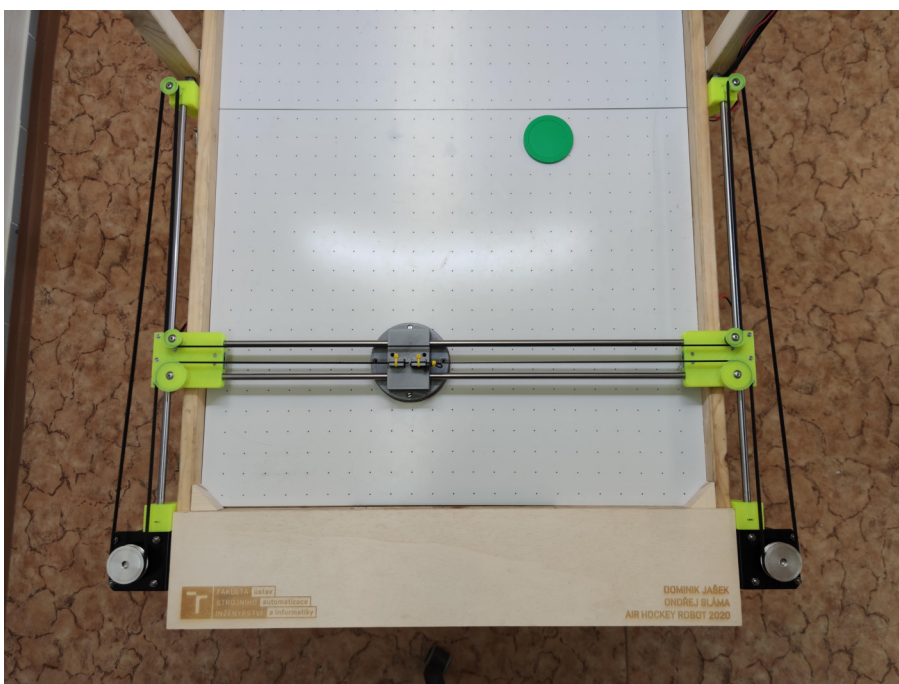
- [25] MENEZES, Richardson Santiago Teles, Helton MAIA a Rafael Marrocos MAGALHAES. Object Recognition Using Convolutional Neural Networks. IntechOpen [online]. May 6th 2019 [cit. 2020-04-09]. DOI: 10.5772/intechopen.89726. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/recent-trends-in-artificial-neural-networks-from-training-to-prediction/object-recognition-using-convolutional-neural-networks>
- [26] SAHA, Sumit. A Comprehensive Guide to Convolutional Neural Networks. In: Towards data science [online]. Dec 15, 2018 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/a-comprehensive-guide-to-convolutional-neural-networks-the-eli5-way-3bd2b1164a53>
- [27] SIJKOVÁ, Simona. Robotický stolní fotbal - optimalizace snímání hrací plochy. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2018.
- [28] In-Sight 7000 Series Vision System, ©2018. Cognex [online]. Cognex Corporation [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://www.cognex.com/downloads/in-sight-7000-series-vision-system-18659>
- [29] MAHESH. Real time Surveillance System using Raspberry Pi 2 and Webcam. Rhydolabz [online]. June 3, 2016 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://www.rhydolabz.com/wiki/?p=16181>
- [30] Raspberry Pi camera module. Penguin Tutor [online]. 29 May 2013 [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <http://www.penguintutor.com/news/raspberrypi/raspi-camera>
- [31] Adafruit Raspberry Pi Camera Board v2. In: Mouser [online]. [cit. 2020-04-12]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/new/adafruit/adafruit-raspberry-pi-camera-board-v2/>
- [32] SLÁMA, O. Robotický stolní fotbal – řízení herních os. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 71 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Roman Parák.
- [33] Alsalihi, A.; Najjar, K.; Van Scoy, B.; Zifer, J. Automated Foosball Table [PDF dokument]. The University of Akron, November 28, 2011 [cit. 2020-04-12]. Supervisor Dr. Hartley, Dr. Tran. Dostupný z: <<https://www.uakron.edu/dotAsset/1e2fb3d4-8c59-475e-9473-ed98b2504f17.pdf>>.
- [34] Camera Module Lens Modifcation [online]. In: . [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: http://wiki.raspberrytorte.com/index.php?title=Camera_Module_Lens_Modifcation
- [35] Waveshare 7" dotykový LCD (H) displej. In: Rpishop [online]. [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://rpishop.cz/displeje/1476-waveshare-7-dotykovy-lcd-h-displej-1024x600-ips-kapacitni-hdmi-bez-krabicky.html>
- [36] Programming Guide: Kivy Basics. Kivy [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://kivy.org/doc/stable/guide/basic.html>

- [37] JAŠEK, Dominik. Vzdušný hokej - realizace a návrh automatického hráče. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125432>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Radomil Matoušek.
- [38] ROSEBROCK, Adrian. Install OpenCV 4 on Raspberry Pi 4 and Raspbian Buster. In: PyImageSearch [online]. September 16, 2019 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.pyimagesearch.com/2019/09/16/install-opencv-4-on-raspberry-pi-4-and-raspbian-buster/>
- [39] Installation on Raspberry Pi. In: Kivy [online]. [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://kivy.org/doc/stable/installation/installation-rpi.html>
- [40] Touch Rotating for WS Capacitive LCD. In: YouTube [online]. 18. 1. 2018 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=6PSSpIiLfAI>
- [41] JAŠEK, Dominik. Online model robotického Air hockey. [online]. [cit. 2020-06-12]. Dostupné z: <https://a360.co/2I2ok0s>
- [42] SLÁMA, Ondřej. Simulace vzdušného hokeje. In: GitHub [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://github.com/OndraSlama/AirHockey>
- [43] SLÁMA, Ondřej. Řídící Software RVH. In: GitHub [online]. [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://github.com/OndraSlama/PiHockey>

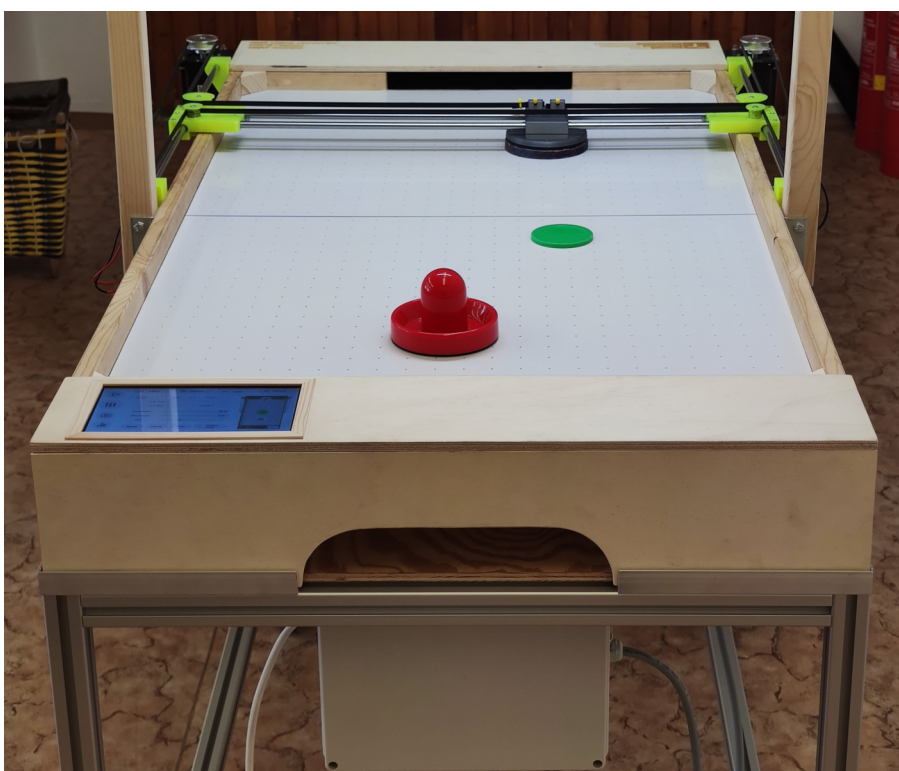
Příloha A. Výsledná konstrukce RVH



Obrázek 53: Pohled na celkovou konstrukci stolu.



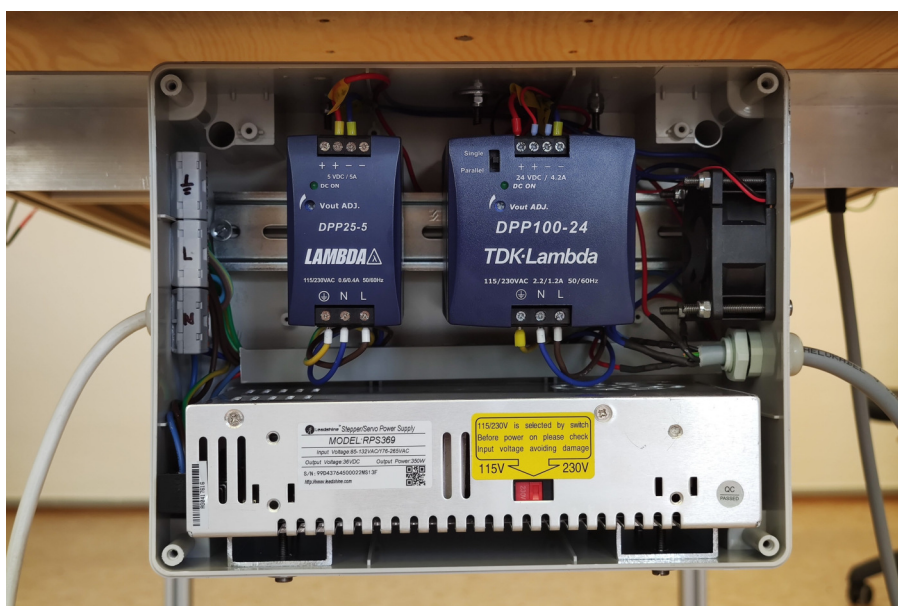
Obrázek 54: Pohled na robotickou stranu stolu.



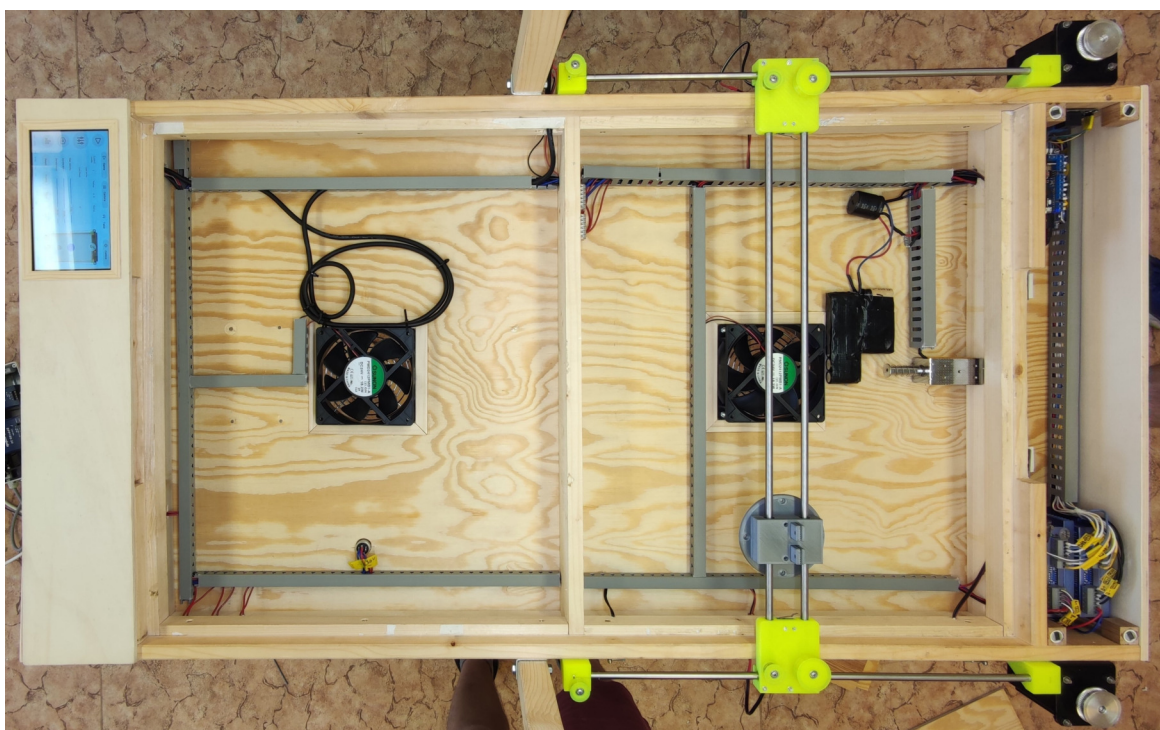
Obrázek 55: Pohled na stranu lidského protivníka.



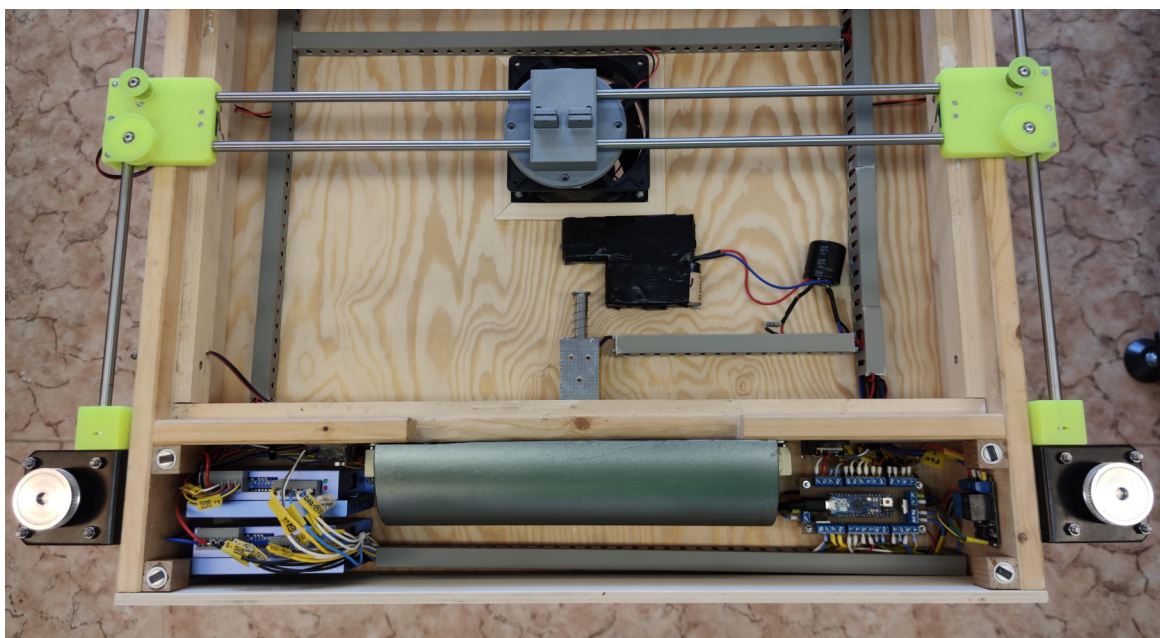
Obrázek 56: Pohled na stranu lidského protivníka s odkrytým brankovým krytem.



Obrázek 57: Pohled na odkrytý rozvaděč s 5V, 24V a 36V zdrojem.

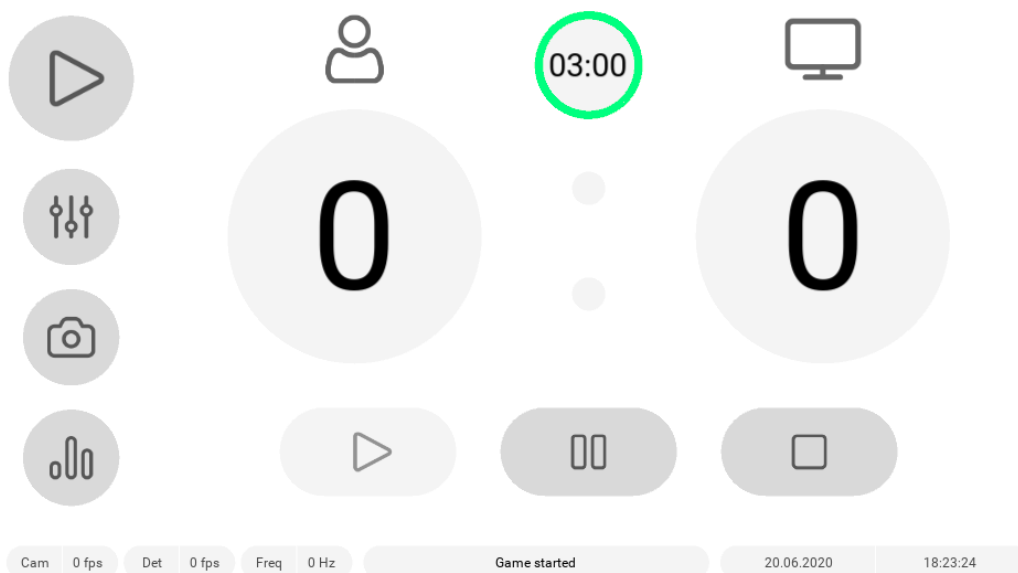


Obrázek 58: Pohled z vrchu na vnitřek stolu bez herní desky.

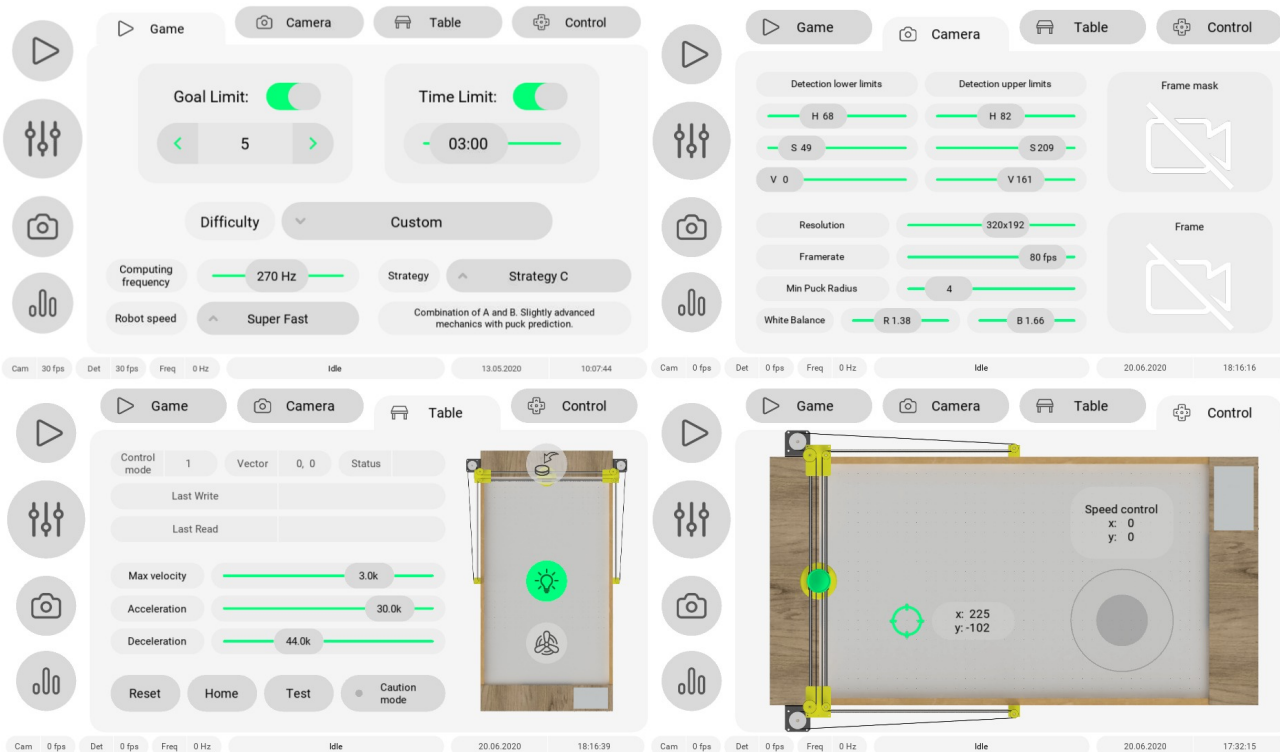


Obrázek 59: Pohled na odkrytou robotickou stranu stolu.

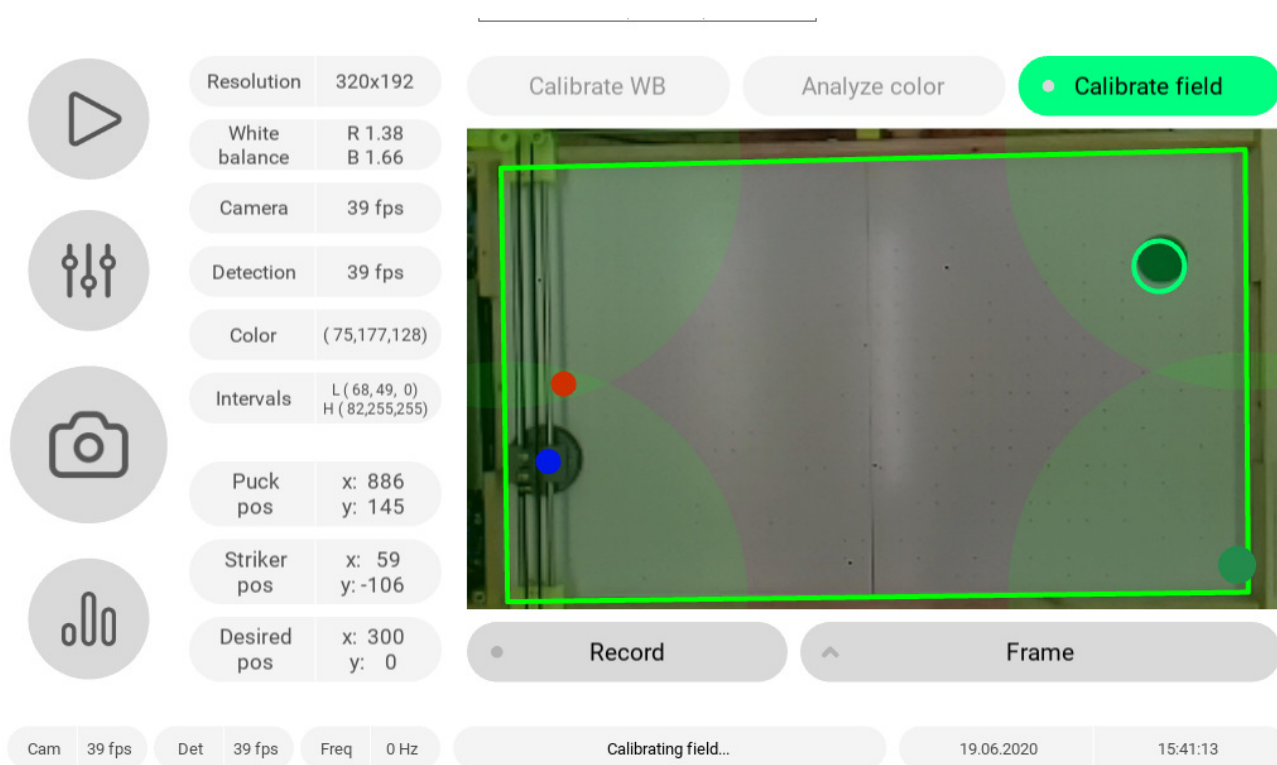
Příloha B. Uživatelské rozhraní RVH



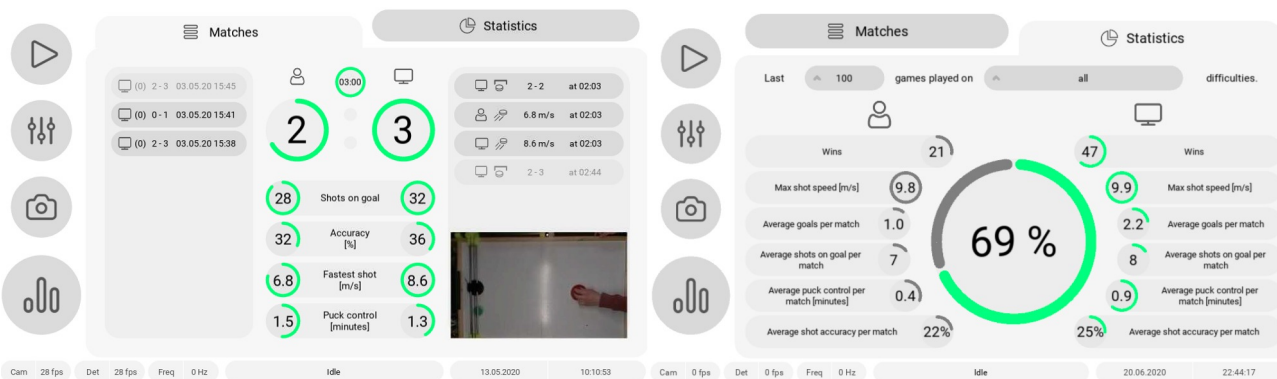
Obrázek 60: Hlavní herní obrazovka.



Obrázek 61: Obrazovky nastavení všech aspektů stolu.



Obrázek 62: Obrazovka správy kamery.



Obrázek 63: Obrazovky záznamu a měřených statistik her.