

Golfový simulátor založený na kamerovém systému

Zdeněk Heřman*, Petr Opletal**



Abstrakt

Tato práce se zabývá vývojem a realizací cenově dostupného golfového simulátoru. Na výsledné řešení jsou kladeny především následující požadavky: cenově dostupné řešení zaměřené na amatéry, možnost vnitřního i venkovního použití a v neposlední řadě líbivá grafická vizualizace. Navrhuje realizaci jednak z pohledu fyzické konstrukce, ale také i nezbytného programového vybavení sloužícího pro zpracování obrazu a následnou simulaci a vizualizaci. K detekci odpalu a získání potřebných parametrů odpalu je použito tří běžně dostupných webových kamer. Jádrem modulu pro snímání a zpracování obrazu je algoritmus pro detekci letu golfového míče. Dále tato práce popisuje klíčové aspekty simulace a vizualizace pro kterou byl použit herní engine Unity. Řešení v současném stavu nabízí přesnou simulaci patování, pokročilou vizualizaci, zvukový doprovod a výpočet rychlosti odpalu se směrodatnou odchylkou 6.45 % oproti skutečnosti.

Klíčová slova: golfový simulátor — Unity — detekce míče v obraze

Příložené materiály: [Demonstrační video](#)

*xherma24@stud.fit.vutbr.cz, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology

**xoplet07@stud.fit.vutbr.cz, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology

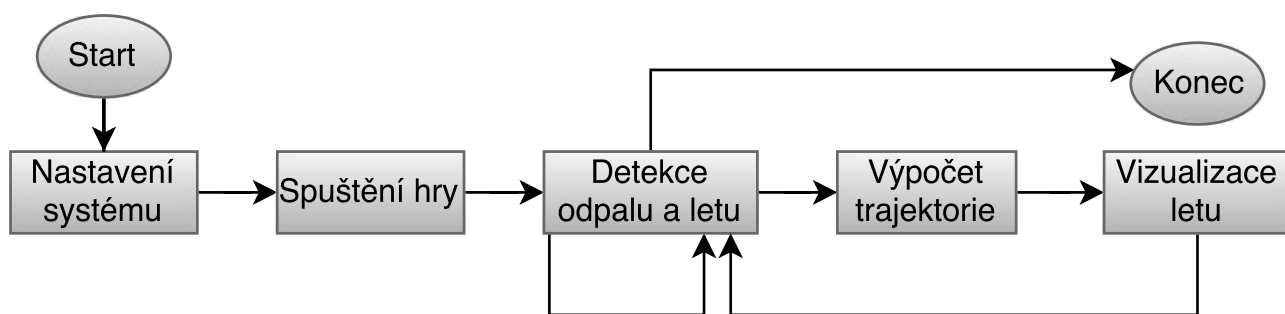
1. Úvod

Cílem této práce je vývoj a experimentální realizace levného golfového simulátoru s vizualizačním programem, jehož snímací technologie je založena na cenově dostupných kamerách. Při vývoji takového simulátoru je nutné se zabývat: nastavením snímacího zařízení (nastavení kamer, kalibrace kamer, kalibrace souřadnicového systému), detekcí odpalu a letu golfového míče s následnou simulací a vizualizací.

Jedním z cílů práce bylo ověřit možnosti realizace simulátoru z cenově dostupných komponent, což by ovlivnilo výslednou cenu simulátoru, protože cena existujících řešení je příliš vysoká, v řádu stovek tisíc. Simulátor je cílen spíše pro amatéry, a tak není důležitá detekce dlouhých ran či detekce rotace (dokáží ovlivnit

až profesionálové). Simulátor by však měl sloužit pro trénování patování, krátkých a středně dlouhých ran. Řešení se skládá ze dvou dílčích komponent: modul pro analýzu obrazu a vizualizační části, která řeší i fyzikální simulaci letu golfového míče. První modul se skládá z detekce odpalu a detekce letícího míče z dat pořízených webovými kamerami s nízkou snímkovací frekvencí. Grafický program sloužící pro vizualizaci scény a letu golfového míče využívá herní engine Unity zjednodušující jeho tvorbu.

I když se jedná o komplexní řešení golfového simulátoru, tak jednotlivé části nejsou na sobě závislé. Lze tak použít vizualizační software s jinou technologií či spojit snímací zařízení s jiným dostupným vizualizačním programem.



Obrázek 1. Zjednodušené schéma golfového simulátoru.

2. Golfový simulátor

Je zařízení, které slouží pro simulaci golfu. Nejčastěji se využívá pro trénování v období, kdy nelze hrát venku (v zimě, dešti, ...). Avšak jde využít i pro jiné účely. Například pro: hru s přáteli, golfové turnaje, výběr holí v golfovém obchodě, ...

Součástí golfových simulátorů není jen vizualizační software a technologie pro snímání letu golfového míče. Dalšími důležitými částmi golfového simulátoru jsou plátno pro zachycení rány a zobrazení scény, podložka imitující různé druhy trav vyskytující se na golfovém hřišti a v neposlední řadě projektor sloužící k promítání herního programu.

Jaké části golfové simulátory nejčastěji obsahují a jak na sebe navazují lze vidět na obrázku 1.

2.1 Existující řešení

V současnosti existuje na trhu velké množství golfových simulátorů. Další řešení jsou teprve ve vývoji a chystají se na své uvedení na spotřebitelský trh. Golfové simulátory se liší především použitou technologií snímání obrazu, vizualizačním programem a také pořizovací cenou, která stále brání jejich většímu rozšíření.

Současné golfové simulátory jsou založeny na třech hlavních principech sledování letu golfového míče:

1. Snímače s IR paprsky.
2. Specializované radary.
3. Kamery a stereokamery.

Z použité technologie pak plyne výsledná přesnost a s tím související schopnost detekce rotace míče. Simulátory postavené na posledních dvou principech dosahují vysoké přesnosti a umožňují i detekovat rotaci míče. Řešení založená na IR snímačích nejsou dostatečně přesná a nelze u nich detekovat rotaci míče. Například u simulátoru *Full swing* se vzdálenost každé golfové rány může lišit až o 10% oproti skutečnosti. Na druhou stranu je vhodné jejich použití pro detekci

rychlosti a ve spojení s vysokorychlostními kamerami tvoří dostatečně přesné a navíc i levné řešení.

V tabulce 1 je zobrazen přehled současných golfových simulátorů včetně jejich přibližné ceny a použité technologie [1].

Tabulka 1. Přehled golfových simulátorů

Název	Cena (USD)	Technologie
Optishot	399	32 IR senzorů
Pro Swing	999	65 IR senzorů
Full swing	1 000	688 senzorů
Pro Tee	2 995	96 IRS a kamera
Foresight Sports	8 750	2 stereo kamery
Trackman simulator	18 995	2 radary

Nedílnou součástí golfových simulátorů je simulace a vizualizace scény na projekční plátno, která bývá velice často řešena proprietárním softwarem dodávaným spolu s konkrétním typem simulátoru. Není to ovšem pravidlem a mnohdy lze s jedním konkrétním hardwarem využívat více typů golfových programů čistě podle preferencí uživatele.

V současnosti se používá několik simulačních a vizualizačních jader. Z nejrozšířenějších lze jmenovat: *E6Golf*, *Red Chain* a novinku v podobě počítačové hry umožňující propojení se simulátory - *The Golf Club*.

Největší podporu mezi programy má simulátor *Pro Tee*, který nemá vlastní software, ale je možné jej používat se všemi výše zmíněnými simulátory. Za zmínku jistě stojí, že v současnosti nejvíce prodávané simulátory (*Optishot* a *Full Swing*) nevyužívají software třetích stran a spoléhají na vývoj vlastního simulačního a vizualizačního jádra.

3. Návrh golfového simulátoru

Cílem této práce je navrhnout golfový simulátor splňující následující podmínky, které byly diskutovány a upraveny na základě konzultace s golfisty:

- Přenositelnost (použití jak pro venkovní tak i vnitřní hru).

- Co nejjednodušší instalace.
- Lepší simulace puttování¹ než u existujících řešení.
- Možnost hrát nejen z odpalovacího koberce, ale i z trávy.
- Cena by neměla být vyšší než nejlevnější existující golfový simulátor.
- Grafická vizualizace by měla být pokročilejší, než jaká je u dnešních golfových simulátorů.
- Zvukový doprovod hry na golfovém simulátoru (zvuk dopadu, potlesk diváků, ...).
- Přesnost stanovení trajektorie letu míče není prvořadá (není nezbytně nutné sledovat rotaci míče).

3.1 Hardware simulátoru

Základním stavebním kamenem je technologie sloužící pro detekci odpalu a letu golfového míče. V navrhovaném simulátoru je použit kamerový systém, který se sestává ze třech kamer připojených k počítači pomocí USB. Jsou využívány levné kamery od firmy Sony - **PlaystationEye 3** [2], jejichž cena se pohybuje okolo 200 Kč za kus.



Obrázek 2. Kamerový systém navrhovaného golfového simulátoru.

První kamera používána pro detekci odpalu je umístěná dole a natočená směrem na podložku tam, kde je očekáván odpal hráče. Pro detekci odpalu není potřeba nikterak výkonná kamera. Vybraný typ je dostačující. Nastavení kamery:

- Snímková frekvence: 30 Fps

¹Golfový úder, kdy je požadováno, aby míček neletěl ale kutálel se do jamky. Jde přirovnat ke hře minigolf

- Rozlišení: 640x480

Další dvě kamery slouží pro detekci letu míče. Jsou umístěny ve výšce cca 1 m, tak aby nepřekážely hráči a zároveň zabíraly co největší prostor, kam může míček letět. Kamery jsou od sebe vzdáleny cca 20 cm a sledují prostor pod úhlem 45 stupňů. Tyto kamery jsou časově synchronizovány pomocí synchronizačního vstupu a výstupu na plošném spoji.

Nastavení kamer:

- Snímková frekvence: 60 Fps
- Rozlišení: 640x480

Kalibrace a nastavení golfového simulátoru

Pro správnou funkčnost celého systému je nutné provést:

1. Nastavení parametrů kamer (kontrast, gain, ...).
2. Detekce odpalovacího prostoru a zjištění poloměru míčku - využívá se bílého obdélníku (vložen na místo očekávaného odpalu) a míčku (pro zjištění poloměru míčku v pixelech).
3. Stereokalibrace dvou kamer pro sledování letu golfového míče pomocí `Opencv` [3] - jako kalibrační vzor použita šachovnice, která je dávana před kamery v různých polohách - dále řeší funkce `stereoCalibrate`.
4. Zjištění transformační matice pro převedení souřadného systému pomocí knihovny `Arma` [4] - za pomoci specifického znaku se určí nový počátek souřadného systému.

Mezi další hardwarové prvky simulátoru patří: dostatečně výkonný počítač s minimálně 3 USB konektory, stativ pro umístění kamer v prostoru, odpalovací podložka a zařízení pro zobrazení hry (projektor s plátnem, monitor, ...).

3.2 Software simulátoru

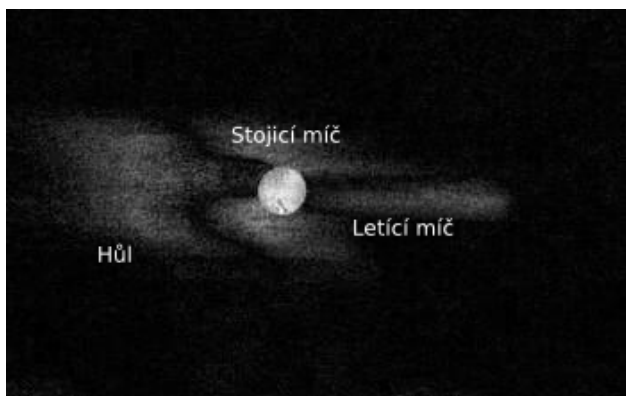
Simulátor se skládá ze dvou na sobě nezávislých aplikací. První pro zpracování dat z kamer a druhá pro vizualizaci hry. Aplikace mezi sebou komunikují pomocí protokolu UDP, kde první aplikace posílá data při každé provedené ráně a druhá tyto data přijímá a zpracovává.

4. Zpracování obrazu z kamer

Důležitou součástí simulátoru jsou podprogramy pro detekci odpalu a letu golfového míče.

4.1 Detekce odpalu

Zjistí pozici míče na začátku letu a spustí nahrávání dvou zkalibrovaných kamer pro sledování trajektorie letu míče. Pro správnou detekci odpalu musí být splněny následující podmínky: míček se nachází v detekované oblasti, v oblasti se nachází pouze jeden míček a je znám poloměr míčku.



Obrázek 3. Detekovaný odpal.

Odpal je detekován, když míček stojí na místě po určitý čas a následně se za ním objeví rozmazaný míček (viz 3). Pro eliminaci špatně detekovaných odpalů je použit konečný automat. Špatný odpal je například, když hráč položí míč na nakloněnou rovinu a ten v tu chvíli sjede.

Metody detekce stojícího míče

Bylo navrženo několik metod, které vyhledávají míček v obraze.

Mezi robustnější patří funkce **houghCircle** [5] (implementována v OpenCV), u které je však důležité nastavení parametrů. Tato metoda dokáže zjistit poloměr míčku a pracuje dostatečně rychle i ve snímcích s větším rozlišením.

Další metodou je jednoduchá, ale nejrychlejší metoda hledající míček na základě **detekce bílého čtverce v obraze**. Ne vždy najde hledaný míč, jelikož hledá nejjasnější místo v obraze (nejčastěji ale hledaný míček).

Poslední metodou je **detekce hledáním okraje míče**. Je velmi přesná pro hledání míčků o známém poloměru. Využívá faktu, že míč je světlý a pozadí kolem něj tmavé. Avšak je velmi pomalá.

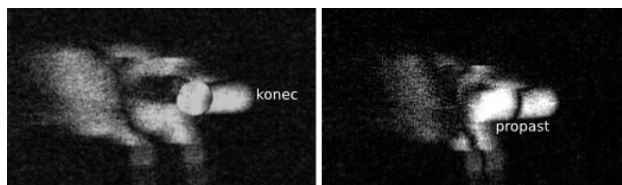
V konečném automatu pro detekci odpalu se používají postupně všechny zmíněné metody.

4.2 Detekce letu golfového míče

Provádí se z nahraných videozáznamů, které vznikly na základě detekce odpalu. Jelikož je znám čas odpalu, je jednoduché nálezt hledané šmouhy znázorňující trajektorii letu golfového míče.

Pak když byl detekován rozmazaný míček a je známa snímková frekvence kamery, tak lze vypočítat

počáteční rychlost míče. Dále je nutné zjistit úhel vzletu a úhel letu, které napoví, kam míček letěl. Pokud však je detekován počáteční a koncový bod rozmazaného míčku v obraze z první kamery a v obraze z druhé kamery, tak lze pomocí triangulace (např. funkce **triangulate** v OpenCV) získat 3D body, ze kterých jsou vypočítány výsledné úhly.



1. rozdílový snímek

2. rozdílový snímek

Obrázek 4. Detekce letu ze 2 rozdílových snímků.

Detekce rozmazaného míče

Tato metoda se využívá jak u detekce letu golfového míče, tak i v jednodušší verzi pro detekci odpalu. Při detekci letu je důležitá přesnost z důvodu následné 3D rekonstrukce bodů. Místo toho u detekce odpalu je důležitá rychlost výpočtu.

Postup detekce letu míče:

1. Provedou se rozdíly vždy po sobě jdoucích dvou snímků pomocí nichž je potlačen vliv pozadí (ve výsledném obraze jsou tak dva rozmazané míče za sebou, mezi kterými je mezera - konec rozmazaného míče z prvního snímku a počátek z druhého snímku).
2. Na základě těchto rozdílových snímků se pak zjišťuje úhel letu míče tak, že se hledají největší rozdíly (jasových hodnot) dvou úseček (bílé a černé) značící okraj rozmazaného míče. Tento krok se provádí několikrát s různým posunem z důvodu zpřesnění výsledku.
3. Pomocí počátečního bodu míče a zjištěného úhlu je sestrojena polopřímka znázorňující let míče.
4. Nyní se hledají konce a počátky rozmazaných míčů. O takový bod se jedná v případě, že jasové hodnoty v 1. rozdílovém snímku klesají (existuje tzv. konec) a zároveň v 2. snímku taktéž klesají ale v zápětí rostou (existuje tzv. propast). Tyto jednotlivé body jsou od sebe vzdáleny v závislosti na nastavení snímkové frekvence kamery.
5. Pokud jsou nalezeny minimálně dva body z jedné kamery a z druhé, tak lze vypočítat trajektorii letu golfového míče.

5. Simulace a vizualizace

Po zpracování obrazu z kamer je nutné na základě získaných parametrů odpalu provést simulaci a vizualizaci letu golfového míče.

5.1 Simulace

Na golfový míč během pohybu po jeho trajektorii (ve vzduchu) působí velké množství sil. Některé z těchto sil mají na výslednou trajektorii větší vliv a jiné lze při výpočtech zcela zanedbat. Hlavní síly formující trajektorii jsou následující [6]:

1. Gravitační síla.
2. Vliv odporu vzduchu a vítr.
3. Magnusova síla.

Pro sestavení výsledných rovnic pro síly působící ve všech třech dimenzích je nutné dodržet několik omezení. Prvním omezením jsou žádné změny vlastností vzduchu v závislosti na nadmořské výšce či vlhkosti. Druhým pak žádné změny atmosférického tlaku. Výsledné rovnice lze vyjádřit [7]:

$$\sum F_y = my'' = -mg - F_d(v_y) + F_M(\omega, v_x, v_z) \quad (1)$$

$$\sum F_x = mx'' = -F_d(v_x) + F_M(\omega, v_y, v_z) \quad (2)$$

$$\sum F_z = mz'' = -F_d(v_z) + F_M(\omega, v_x, v_y) \quad (3)$$

kde m je hmotnost míče, g je gravitační konstanta, F_d je odporová síla vzduchu, F_M je Magnusova síla, ω je úhlová rychlost a v je rychlost míče.

Nedílnou částí simulace je valivý pohyb míče po zemi. Zde je důležité se zaměřit především na pohyb v okolí *greenu* (nejbližší okolí kolem jamky). Při tomto pohybu působí na míč dvě hlavní síly: síla gravitační a síla valivého odporu. Sílu odporu vzduchu lze zanedbat, protože při rychlostech, kterých dosahuje míč v okolí jamky, má tato síla velice malou velikost. Sílu valivého odporu lze vyjádřit:

$$F_v = \xi \frac{F_n}{R} \quad (4)$$

kde ξ je koeficient valivého odporu, F_n kolmá tlaková síla mezi tělesy a R je poloměr průřezu tělesa (golfového míče).

V rámci celého hřiště je koeficient ξ dynamicky nastavován podle konkrétního typu trávy aktuálně se nacházejícího pod golfovým míčem (*rough*, *fringe*, *green*...).

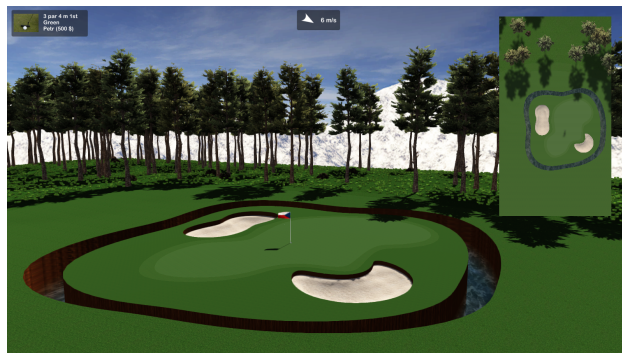
Pro vlastní implementaci výše uvedených rovnic je použito fyzikálního enginu *PhysX* od společnosti *Nvidia*.

5.2 Vizualizace

Na výslednou vizualizaci je kladeno několik nároků. Grafická stránka musí být na takové úrovni, aby byla dostatečně přitažlivá pro hráče. Musí podporovat zobrazování ve vysokých rozlišeních z důvodu využití projektoru a velkých projekčních pláten (*FullHD* či *4k*). V neposlední řadě je podpora moderních grafických technologií (*HDR*, *ToneMapping*, *Global Illumination*...).

Herní engine Unity

Pro vlastní vývoj vizualizačního programu bylo vybráno mezi dvěma v současnosti hojně používanými herními enginy: *Unreal engine* a *Unity engine*. Oproti různým nízkourovňovým API poskytují tyto nástroje velké množství algoritmů, které lze při vývoji použít a není je nutné implementovat. Nakonec byl zvolen herní engine *Unity* [8], především díky nižším nárokům na hardwarové prostředky.



Obrázek 5. Ukázka vizualizace scény

Tvorba golfového hřiště

Pro vlastní tvorbu golfových hřišť bylo použito dvou přístupů. Každý s těchto přístupů s sebou nese jisté výhody a omezení.

První možností je využít vestavěný editor terénů v rámci herního enginu *Unity*. Ten sice umožňuje interaktivní a rychlou editaci terénu, ale má nepříjemná omezení. Nejdůležitějším omezením je nemožnost tvorby „děr“ (jamka) a prohlubní (*bunker*) do terénu plynoucí z toho, že *Unity* terény používají 2D výškovou mapu o hrubém rozlišení ze které je generován spojitý terén. Dalším omezením je pak problematické texturování (ostré přechody mezi texturami), které jde do jisté míry vyřešit tvorbou vlastního *shaderu*.

Druhou možností je použití externího 3D modelovacího programu (*Blender*) a tvorba hřiště v něm. Tímto přístupem lze dosáhnout mnohem propracovanějších hřišť včetně hezčího texturování, ovšem za cenu větší časové náročnosti potřebné na jejich tvorbu.

Generátor vegetace

Pro snadnější a efektivnější tvorbu golfových hřišť byl vytvořen generátor vegetace. Ten je implementován formou skriptu, který rozšiřuje možnosti standardního prostředí editoru Unity.

Práci s tímto generátorem lze shrnout následovně:

1. Vybereme objekt (*mesh*) na kterém chceme generovat vegetaci.
2. Vybereme objekt, který chceme náhodně rozmístit (stromy, keře...).
3. Nastavíme parametry (počet, vzdálenost od okraje, minimální nadmořská výška atd.).
4. Stiskneme tlačítko generovat.

Tento generátor je možné zobecnit a použít např. i pro generování kamenů či jiných objektů.

6. Experimenty

Byly provedeny dva typy experimentů:

1. Porovnání reálné rychlosti odpalu se získanou rychlostí na základě výpočtů programu.
Na začátku každého pokusu byl na nakloněnou rovinu umístěn dřevěný kvádr, vždy do stejné výšky. Sklon této roviny a její umístění bylo nutné zvolit tak, aby se dřevěný kvádr mohl po této rovině pohybovat směrem dolů a na jejím konci udeřit do připraveného golfového míče a předat mu svoji pohybovou energii. Tímto způsobem byl simulován reálný golfový odpal. Míčku byla výše zmíněným principem udělována konstantní počáteční rychlost 1.5 m/s. Na základě 20 měření byly vypočteny následující statistické charakteristiky:

Tabulka 2. Statistické charakteristiky

statistická metoda	hodnota
aritmetický průměr	1.56 m/s
medián	1.60 m/s
směrodatná odchylka	6.45 %

2. Úspěšnost detekce odpalu.

V rámci druhého experimentu bylo provedeno 20 měření realizace odpalu golfového míče. Z těchto 20 měření byl úspěšně odpal detekován v 18 případech. Důvodem špatné detekce bylo například odebrání míčku ve směru odpalu rukou. Za míčkem se tak objevila rozmazaná ruka a míček opustil svojí pozici. Tato situace může být chybně detekována jako odpal. Dalším případem chybné detekce je zakrytí míčku pomocí golfové hole. Tudíž míček zmizel z obrazu kamery a

pokud se rozmazaná hůl objevila před míčkem, tak odpal mohl být detekován.

7. Závěr

Společnou prací obou autorů byl realizován prototyp golfového simulátoru založeného na třech levných webkamerách. Dále byly implementovány dva nezávislé programy. První slouží k nastavení kamerového systému, detekci odpalu a detekci letu golfového míče a druhý se stará o simulaci a vizualizaci jeho letu. Na závěr byly spojeny všechny části dohromady a provedli jsme experimenty s výsledným řešením. Nejdříve byla testována hra na greenu (patování) a následně krátké a středně dlouhé rány. Na základě výsledků byla stanovena směrodatná odchylka pro patování na 6.45 %.

Výsledkem je levný golfový simulátor, jehož cena snímací technologie se pohybuje okolo 2000 Kč (3 kamery, stativ). Mezi další výhody oproti existujícím řešením je simulace patování (přesná, pohodlná), vnitřní/venkovní použití a graficky pokročilá vizualizace se zvukovým doprovodem.

Další vývoj golfového simulátoru by směřoval ke zpřesnění detekce úhlů letu golfového míče, využití kvalitnějších kamer pro dosažení lepších výsledků, detekce rotace míčku pro zpřesnění výpočtu trajektorie a rozšíření počtu golfových hřišť u vizualizace.

Literatura

- [1] WWW stránky. Par2pro, [cit. 2016-10-04]. <http://www.par2pro.com/compare.php>.
- [2] WWW stránky. Playstation eye camera, [cit. 2016-10-04]. <http://us.playstation.com/ps3/>.
- [3] G. Bradski, A. Kaehler. *Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library*. O'Reilly Media, 2008.
- [4] G. Evangelidis. Arma library: Pattern tracking for augmented reality, 2011 [cit. 2016-10-04]. xanthippi.ceid.upatras.gr/people/evangelidis/arma/.
- [5] Jaroslav Vlach. Hledání úseček a kružnic s využitím houghovy transformace při zpracování obrazu v labview [online], [cit. 2016-10-04]. AUTOMA, č.2, r. 2011, s. 42-44.
- [6] Dave Tutelman. Flight of the golf ball, 2007-01-19 [cit. 2016-10-04]. <http://www.tutelman.com/golf/design/swing3.php>.
- [7] B. Burglund and R. Street. Golf ball flight dynamics. 2011-05-13. <http://>

[//home2.fvcc.edu/~dhicketh/
DiffEqns/Spring11projects/Brett_
Burglund_Ryan_Street/Diff%20Q/
pdfscreen/projectoutline.pdf](http://home2.fvcc.edu/~dhicketh/DiffEqns/Spring11projects/Brett_Burglund_Ryan_Street/Diff%20Q/pdfscreen/projectoutline.pdf).

- [8] WWW stránky. Unity 3d, [cit. 2016-10-04].
<https://unity3d.com/>.