

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

GEOMATIKA



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Možnosti fotografického sledování trajektorie pohybujícího se předmětu**

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Katedra geomatiky

Květen 2018

Martin Joska



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bc. Joska Jméno: Martin Osobní číslo: 426282  
Zadávající katedra: katedra geomatiky  
Studijní program: geodézie a kartografie  
Studijní obor: geomatika

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Možnosti fotografického sledování trajektorie pohybujícího se předmětu  
Název diplomové práce anglicky: Possibilities of photographic trajectory tracking of the moving object

Pokyny pro vypracování:

Vypracujte rešerši ohledně možností fotografického sledování rychle se pohybujících objektů. Pokuste se z minimálně dvou kamer definovat ze snímků prostorovou dráhu pohybujícího se objektu. Zhodnoťte užité postupy a výsledek z hlediska praktické využití, přesnosti i přínosu uživatelům. Uveďte doporučení pro budoucí práci.

Seznam doporučené literatury:

Pavelka, K. Fotogrammetrie 10. 2 ed. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2002. ISBN 80-01-02649-3. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging (de Gruyter) Edition, T.Luhmann. ISBN-10: 3110302691

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Dr. Ing.Karel Pavelka

Datum zadání diplomové práce: 19.2.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 20.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

28.2.2018  
Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma *Možnosti fotografického sledování trajektorie pohybujícího se předmětu* jsem vypracoval samostatně, pod vedením prof. Dr. Ing. Karla Pavelky a za využití zdrojů, které uvádím v seznamu literatury.

V Praze dne .....

Podpis .....

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat prof. Dr. Ing Karlu Pavelkovi, vedoucímu mé diplomové práce, za cenné rady, zájem o téma, a čas, který mi věnoval při zpracovávání diplomové práce. Dále děkuji Mgr. Jiřímu Brabcovi, za pomoc s přípravou experimentu v praktické části práce.

## **Abstrakt**

Tato diplomová práce se zabývá problematikou fotografického sledování pohybujících se objektů. Část práce je věnována stručnému úvodu do počítačového vidění a popisu základních algoritmů pro detekci a sledování objektů. Hlavní částí práce popisuje provedení experimentu zaměřeného na rekonstrukci trajektorie míčku při softbalovém nadhozu s využitím akčních kamer GoPro.

## **Klíčová slova**

Počítačové vidění, GoPro, Kalibrace kamer, Detekce objektu, Sledování objektu, Softball, Vícesnímková fotogrammetrie

## **Abstract**

This diploma thesis deals with photographic tracking of moving objects. Part of the thesis is devoted to a brief introduction to computer vision and description of basic algorithms for object detection and tracking. The main part of the thesis describes an experiment focused on softball ball pitch trajectory reconstruction using GoPro action cameras.

## **Keywords**

Computer vision, GoPro, Camera calibration, Object detection, Object tracking, Softball, multi-view photogrammetry

# Obsah

1. Úvod .....	7
2. Možnosti fotografického sledování pohybu .....	9
2.1. Počítačové vidění .....	9
2.2. Detekce objektu .....	10
2.3. Sledování trajektorie .....	11
2.4. Jestřábí oko .....	12
3. Popis experimentu .....	14
3.1. Stručné představení softballu .....	14
3.2. Inspirace pro experiment .....	15
3.4. Určení parametrů experimentu a nároků na vybavení .....	16
3.4.1. Teoretický rozbor trajektorie nadhozu .....	16
3.4.2. Určení nároků na kamery .....	17
3.4.3. Návrh metody sběru dat a zpracování .....	18
4. Volba kamer .....	19
5. Kalibrace kamer .....	21
5.1. Zorné pole a závislé parametry .....	22
5.2. Proces kalibrace .....	24
5.2.1. Zpracování kalibrace .....	25
5.3. Výsledky kalibrace .....	26
6. Sběr dat .....	29
7. Zpracování .....	30
7.1. Výběr snímků pro zpracování .....	30
7.2. Synchronizace pomocí zvukové stopy .....	31
7.3. Detekce míče na snímku .....	32
7.3.1. Houghova transformace .....	33
7.3.2. Algoritmy pro úpravu snímků .....	34
7.4. Výpočet prvků vnější orientace .....	38
7.5. Převod snímkových souřadnic videa .....	39
7.6. Výpočet prostorových souřadnic .....	40
8. Prezentace výsledků .....	43
9. Závěr .....	48
10. Seznam referencí .....	51
11. Seznam obrázků .....	54
12. Seznam grafů .....	55
13. Seznam tabulek .....	56
14. Seznam příloh .....	57

## 1. Úvod

Rekonstrukce a studium trajektorie těles je předmětem zájmu mnoha oborů: bezpečnostní systémy [1], vývoj autonomních dopravních prostředků [2], ochrana životního prostředí [3], biomechanika [4], sportovní věda [5] apod. Měření lze provádět různými způsoby, zpravidla se ale jedná o opakované určování polohy tělesa v určitých časových rozestupech. Délka časových rozestupů určuje časovou rozlišovací schopnost zvolené měření.

Ve fotogrammetrii se za účelem měření posunů, přetvoření a deformací pořizují snímkové sekvence. Na každém snímku je určena poloha objektu zájmu, a z rozdílu poloh mezi snímky je určována trajektorie. Pokud chceme rekonstruovat trajektorii ve 3D prostoru, objekt musí být snímán z více stanovisek. V závislosti na předpokládané rychlosti sledovaného pohybu je nutno uvážit metodu a rychlost snímkování. Ve většině aplikací pozemní fotogrammetrie se pro svou vysokou rozlišovací schopnost a dobrou kvalitu snímků používají DSLR kamery (Digital Single Lense Reflex). Pokud jde o snímací frekvenci, dosahují hodnot v počtu jednotek snímků za sekundu (frame per second - fps). Některé kamery mají takzvaný „burst“ mód, při kterém snímkovácí frekvence stoupne až na desítky fps, ale jen na krátký okamžik. Pro další navýšení frekvence je nutno přepnout kameru do video módu, který umožňuje záznam i několika set fps. Rychlost je ale vykoupena podstatně nižším rozlišením snímků. Pokud je nutno zachovat vysoké rozlišení, nebo ještě navýšit frekvenci snímkování, je třeba využít profesionální kamery (např.: Phantom VEO 4KPL [6]) nebo průmyslové kamery (např.: Mega Speed MS90K [7]), v jejichž možnostech jsou frekvence snímání i několika tisíc snímků za sekundu, při zachování vysokého rozlišení.

Tato diplomová práce si klade za cíl navrhnout, provést a popsat experiment, během něhož bude zrekonstruována trajektorie míče během softbalového nadhozu. Nadhozené míče dosahují vysokých rychlostí i přes 120 km/h a je tedy nutno použít techniku s vysokou snímací frekvencí. Z praktických důvodů byly pro experiment zvoleny akční kamery, které jsou malé a lehké, protože mohou být snadno instalovány téměř kdekoli v okolí hřiště.

Optická soustava akčních kamer sice nebývá tak kvalitní jako u dobrých DSLR kamer, navíc mají často širokoúhlé objektivy, což způsobuje vysoké zkreslení snímků. I přes to se ale ve fotogrametrii používají. Pro své kompaktní rozměry a malou hmotnost bývají osazovány na UAV (*unmanned aerial vehicles*) při aplikacích, kde je důležitá mobilita, výdrž nebo finanční náklady. Jejich využití v rámci této diplomové práce tak není úplným krokem do neznáma.



## 2. Možnosti fotografického sledování pohybu

Ať už se objekt pohybuje rychle či pomalu, možnosti jeho sledování jsou ovlivněny spíše jinými faktory. Zatímco rychlost objektu může být snadno kompenzována volbou vhodné snímací frekvence, eliminace ostatních faktorů tak triviální není. Velkou výzvou jsou měnící se světelné podmínky, změna měřítka, deformace, překrytí a různé úhly pohledu, se kterými se setkáme v každé dynamické scéně.

### 2.1. Počítačové vidění

Problematika detekce pohybu a rekonstrukce trajektorie z digitálních snímků spadá do oboru počítačového vidění, což je interdisciplinární obor zabývající se vývojem autonomních systémů schopných porozumění scéně, zobrazené na digitálních snímcích nebo videu. V tomto kontextu je „porozumění“ myšleno jako schopnost převést digitální obrazová data na informace, které umožní adekvátní reakci (např.: zastavit auto v případě, že svítí červená).

Počítačové vidění je ze své podstaty výrazně závislé na výkonu výpočetní techniky, a na svůj příchod čekalo až do doby, kdy vůbec bylo možné zpracovat množství dat, které je zapotřebí pro uložení digitálního snímku. První zmínky o výzkumu se datují do šedesátých let minulého století. Pokusy probíhali na americké univerzitě MIT (Massachusetts Institute of Technology), kde roku 1966 zadal prof. Seymour Papert skupině studentů projekt s cílem propojení kamery s počítačem a rozpoznání objektu v zorném poli [8]. Tento okamžik bývá označován za počátek oboru. Během 70. a 80. let byly objeveny a popsány mnohé metody a postupy, které se používají dodnes: detekce rohů, segmentace, optický tok, a další. Na scéně se krátce objevili i umělé neuronové sítě. Tehdejší úroveň výpočetní techniky ale neumožňovala naplno využít jejich potenciálu. Vzhledem k širokému záběru aplikací do sebe obor během vývoje asimiloval metody mnoha jiných oborů, mezi kterými zaujímají zvláštní místo: digitální zpracování obrazu (úprava snímků před zpracováním), fotogrammetrie (kalibrace kamer a metody rekonstrukce 3D objektů) a počítačová grafika (3D modelování).

Dnes ještě nemáme systémy, které by dokázali plně nahradit možnosti lidského pozorování a rozhodování, ale jedná se o rychle se rozvíjející obor, který nachází

uplatnění v nepřeberném množství aplikací, z nichž namátkou mohou být jmenovány:

- detekce obličeje a biometrických údajů,
- zpracovávání medicínských snímků (RTG, CT, MR),
- vývoj autonomních vozidel,
- simulace šíření světla,
- rozpoznání objektů,
- detekce a rekonstrukce pohybu [9].

## 2.2. Detekce objektu

Sledovaný pohybující se objekt musí být nejprve rozpoznán a detekován. Prvním krokem tedy je detekovat pohyblivé objekty. K tomu využíváme diferenční snímky, optický tok, odstranění pozadí, významné body nebo segmentaci. Zdrojem informace o pohybu je změna polohy.

*Diferenční snímek* je nejjednodušší metodou detekce pohybujícího se předmětu na snímku. Dva po sobě následující snímky se od sebe odečtou, čímž vznikne diferenční snímek. Pohyb objektu způsobí velkou změnu v hodnotě jasové funkce ( $I$ ) která se projeví vyšší hodnotou v diferenčním snímku. Na diferenčním snímku se projeví i malé pohyby na pozadí a změna osvětlení scény. Výsledky lze vylepšit prahováním.

*Optický tok* je definovaný dvousložkovým vektorem, který udává směr a rychlost pohybu každého pixelu snímku. Vektor rychlosti je počítán jako změna jasové funkce v prostoru  $(x, y, t)$  který je definován snímkovými souřadnicemi a časem. Diferenciální rovnice pro výpočet má tvar:

$$0 = \frac{\partial I}{\partial x} r_x + \frac{\partial I}{\partial y} r_y + \frac{\partial I}{\partial t} \quad (2.1)$$

kde:  $r_x$  a  $r_y$  jsou souřadnice vektoru rychlosti,

$I$  je jasová funkce obrazu,

parciální derivace jasové funkce jsou změny jasu ve směrech  $x, y, t$ .

Funkce nemá jednoznačné řešení, protože obsahuje 2 neznámé a pro vyřešení je nutno přidat doplňující podmínku.

*Odstranění pozadí* v nejjednodušší formě používá metodu diferenčního snímku. Snímek s pozadím se odečítá od následujících snímků sekvence a hledá se odchylka, která značí pohyb. Lepší metodou je vytvoření modelu pozadí použitím mediánového, nebo

Kalmanova filtru z  $n$  snímků sekvence. Takový model je robustnější vůči změně osvětlení, nebo pohybu na pozadí.

*Segmentace* rozděluje snímek na segmenty s podobnými vlastnostmi, kterými mohou být tvar, barva (hodnota pixelu), velikost, poloha atd. Problematika segmentace je velice rozsáhlá a využívá mnoho metod: prahování, shlukování (cluster detection), detekci hran, regionální metody atd. Posledně jmenovaná třída metod je ve spojení s umělými neuronovými sítěmi předmětem intenzivního výzkumu. Roku 2014 byl představen model R-CNN (*region-based convolutional neural network*), který byl rychlým tempem vylepšován. 2015 Fast R-CNN, 2016 Faster R-CNN a 2017 Mask R-CNN. Výsledky těchto algoritmů jsou ohromující. Nejen, že se vysokým tempem zlepšují, ale například v testu *ImageNet Challenge*, který hodnotí algoritmy pro detekci a klasifikaci objektů, již překonali výsledky lidí [10, 11].

*Významné body* jsou body nacházející se v místech významné změny jasové funkce, tedy v místech s vysokým gradientem. Detekují se pomocí hranových detektorů (Moravec, Sobel, Canny atd.). Na každém objektu bývá obvykle nalezeno více takových bodů. Metoda je vhodná pro objekty se zřetelnou strukturou. Naopak pro objekty s monotónním povrchem vhodná není kvůli nízkému gradientu jasové funkce.

### 2.3. Sledování trajektorie

Porovnáváním polohy detekovaných objektů v po sobě následujících snímcích je možné určit trajektorii pohybu. Zpravidla se jedná o sledování pohybu několika objektů najednou, proto je nezbytné zajistit porovnávání polohy pouze mezi korespondujícími objekty. Obdobně jako při detekci, i zde existuje více metod.

*Sledování bodů.* Objekty detekované v předchozím kroku mohou být reprezentovány bodem umístěným například do těžiště, nebo více body rozmístěnými po obvodu objektu, nebo uvnitř. K bodu na prvním ze snímků se hledá korespondující bod na druhém snímku. Postupně se zkouší všechny body z kandidátní množiny a shoda se hodnotí korelací okolí obou bodů a dvojice s nejvyšší korelací je propojena. Bez předzpracování je kandidátní množina tvořena všemi body z druhého snímku. Lze ji však výrazně omezit odhadnutím přibližné polohy korespondujícího bodu, na základě informace o poloze objektu z přechozích snímků. Tato metoda postrádá robustnost vůči

změně měřítka objektu, nebo jeho rotaci. To lze napravit použitím algoritmu SURF (*Speeded up robust features*). Body jsou určeny souřadnicemi  $(x, y, s)$  ve *scale-space* (pyramida tvořená snímkem v různých měřítcích, získanými aplikací Gaussova filtru s různým rozptylem), kde  $s$ , značí měřítko. Invariance vůči rotaci je zajištěna výpočtem deskriptoru okolí bodu pomocí teorie vlnek. Korespondující body jsou hledány porovnáváním deskriptorů [12].

*Sledování jádra.* Tvar objektu je reprezentován jednoduchým geometrickým tvarem (jádre), většinou obdélníkem, nebo elipsou. K určení trajektorie jsou hledány shodná jádra. Největším limitem takové reprezentace objektů je, že ohraničená oblast často obsahuje i část pozadí nebo jiného objektu, nebo je naopak část objektu mimo. Jádro je tedy vhodné používat zejména pro objekty jednoduchého tvaru.

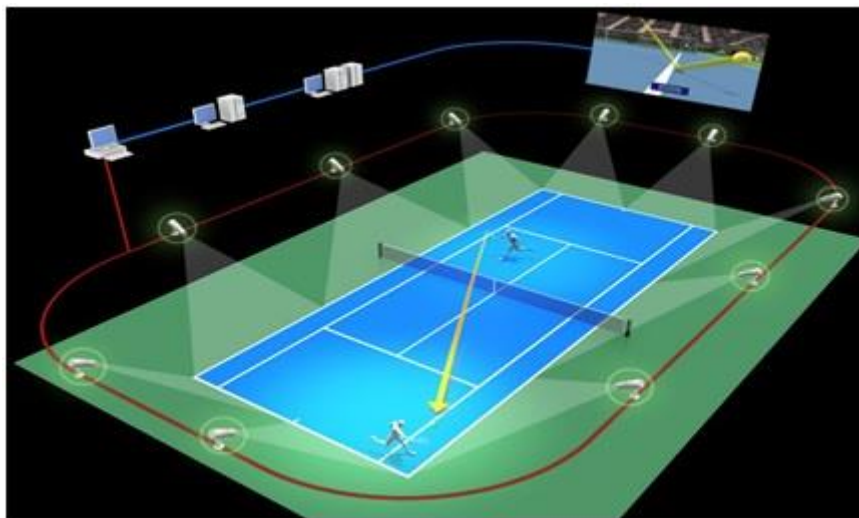
*Sledování siluety.* Tato metoda dovoluje použít přesnou reprezentaci tvaru objektu. K modelu vytvořenému podle tvaru objektu v prvním snímku je hledána korespondující oblast ve snímcích následujících. Model může být tvořen siluetou objektu (spojitá křivka), hranovými pixely (vysoký gradient jasové funkce) nebo barevným histogramem [13].

#### 2.4. Jestřábí oko

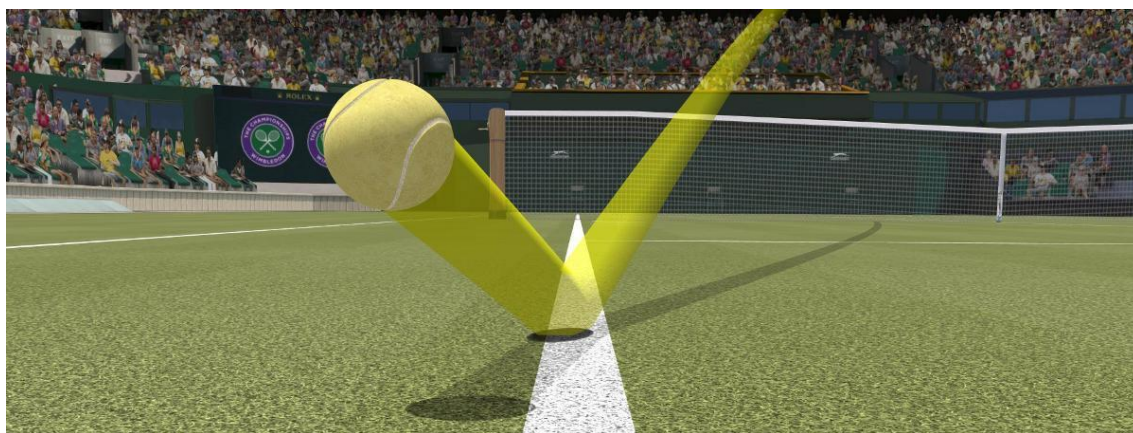
Jestřábí oko je příkladem využití systému sledování trajektorie v praxi. Jedná se o systém video rekonstrukce trajektorie míče. Byl vyvinut v roce 2001 pro kriketové zápasy a pojmenován je po svém vynálezci, Paulu Hawkinsovi. Z kriketu se rozšířil do mnoha sportů (tenis, snooker, baseball, rugby atd.). Nyní je nejčastěji spojován s tenisem. Cílem systému je sledovat trajektorii míče, určit přesnou polohu při kontaktu s hrací plochou a vytvořit video rekonstrukci dopadu, která je přehrána rozhodčímu, hráčům, nebo divákům.

Během tenisového utkání je kolem hřiště rozmístěno 10 vysokorychlostních kamer, se snímací frekvencí přes 2000 fps. Kamery jsou umístěny vysoko nad kurtem, například na konstrukci tribuny, tak aby byl míč vždy viditelný alespoň z dvou kamer (Obr. 1). Trajektorie míče je zrekonstruována z přeuračeného systému měření a je porovnána s modelem kurtu, který je uložen v databázi. Pokud je hráčem vyžádáno použití jestřábího oka, systém s odezvou do deseti sekund vymodeluje videosekvenci,

ukazující polohu dopadu míče na kurt s přesností 3,6 mm (Obr. 2). Vyhodnocovány jsou ale všechny dopady míče, a slouží pro tvorbu statistik z utkání [14, 15].



Obr. 1: Schéma umístění kamer systému Hawk-eye při tenisovém zápase [16].



Obr. 2: Ukázka záznamu dopadu míče, ze systému Hawk-eye [17].

### 3. Popis experimentu

Jak již bylo zmíněno v úvodu, praktická část této práce se zabývá trajektorií softballového nadhozu. Přestože je Česká Republika nejúspěšnější zemí v historii evropských šampionátů a pravidelně se účastní mistrovství světa, není u nás povědomí o této hře příliš velké. Proto je potřeba trochu nastínit alespoň základní principy hry, aby byl smysl a cíl experimentu co nejjasnější.

#### 3.1. Stručné představení softballu

Softball patří společně s baseballem a kriketem do rodiny pálkovacích sportů. Dalšími příslušníky jsou i méně známé pesäpallo (Finsko), brännball (Švédsko) a pelota (Španělsko). Někdy bývají mezi pálkovací sporty řazeny také golf a pólo. Základy softballu sahají do konce 19. století, kdy se začal vyvíjet jako jedna z modifikací baseballu. Samotný název vznikl roku až 1926, kdy byly také vytvořeny první sjednocená pravidla [18]. Mezi lety 1996 a 2008 byl softball (pouze ženy) součástí letních olympijských her, na které se vrátí v Tokiu v roce 2020.

Pravidla softballu jsou velice komplexní s množstvím výjimek závislých na konkrétní herní situaci [19]. Základní koncept je však v celku jednoduchý. Dva týmy o devíti hráčích hrají proti sobě a pravidelně se střídají v útoku a v obraně. Cílem útočících hráčů je pomocí pálky odpálit míč hozený nadhazovačem (hráč v obraně) tak, aby obsadili metu a nebyli vyoutováni. Pálkař je out, pokud je jím odpálený míč chycen rovnou ze vzduchu, pokud je míč dopraven hráči v obraně na metu dříve, než se na ni pálkař dostane, nebo pokud dosáhne počtu třech striků. Za strike je považován nadhoz, který proletí strike-zónou, což je pomyslný pětiboký hranol v prostoru nad domácí metou mezi pálkařovými koleny a středem hrudníku (Obr. 3). Špatný nadhoz se nazývá ball. Zde míč prošel stike-zónou či nikoli posuzuje rozhodčí, který při nadhozu zaujímá pozici za chytačem. Tato pozice je na posouzení nejlepší, protože se nachází v ose nadhozu. I přesto je správné posouzení, zvláště hraničních případů, velmi obtížné. Chybné výroky, v tomto směru mohou zásadně ovlivnit výsledek zápasu a jsou v praxi největším zdrojem rozkolů mezi hráči a rozhodčím.



Obr. 3: Pětiboký hranol, nad domácí metou, definující strike-zónu. A standardní pozice pálkaře, chytače a rozhodčího během zápasu [20].

### 3.2. Inspirace pro experiment

Jako nejjednodušší řešení pro zjištění průletu míčku strike-zónou se jeví umístění kamery ve směru nadhozu, na prodloužené spojnici nadhazovače a chytače. Výhled z této pozice ale může být zakrytý rozhodčím nebo chytačem, což by znemožnilo vyhodnocení nadhozu. Hlavní důvod, proč neumístit kameru na tuto pozici jsou ale pravidla. Ta zakazují umísťování kamer do osy nadhozu, protože video by mohlo být použito ke studiu nadhazovače, k rozklíčování jeho pohybu a odhalení jemných nuancí v závislosti na konkrétním typu nadhozu. Tým, který má nastudovaného nadhazovače protihráčů proti němu získává značnou výhodu. Důvodem zákazu kamer je tedy jakási forma fair-play.

Pro experiment bylo navrženo rozmístění několika kamer v okolí hřiště, které budou snímat nadhoz z různých úhlů. Poté bude zrekonstruována trajektorie nadhozu ve 3D prostoru a určeno, zda nadhoz protnul strike-zónu, tedy byl-li nadhoz dobrý či nikoli. Experiment je inspirován systémem Jestřábí oko (kap. 2.4.), který se využívá v mnoha sportech pro určování polohy dopadů míče. A také systém Intel 360 replay [21], který se využívá v Americké MLB (Major League Baseball) k tvorbě dynamického 3D modelu celé hrací plochy včetně hráčů a míče.

### 3.4. Určení parametrů experimentu a nároků na vybavení

Předpokladem pro zdárné sledování míče je vybrat vhodné vybavení a metodu pro sběr dat, a použít vhodné metody pro zpracování. Je proto potřeba připravit si teoretický model experimentu a zjistit jaké nároky budou kladeny na hardware i software.

#### 3.4.1. Teoretický rozbor trajektorie nadhozu

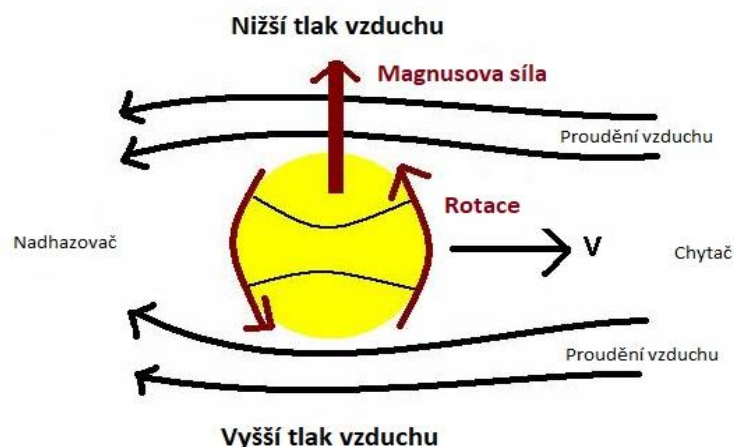
Nadhoz začíná odrazem nadhazovače z nadhazovací mety, která je umístěna v ose hřiště 14,02 m (46 stop) od zadního rohu domácí mety. Skok je dlouhý přibližně 1,5 m – 2 m a nadhazovač při něm opíše rukou s míčem kruhový pohyb v přibližně svislém směru. Po dopadu na zem nadhazovač vypouští míč směrem k chytači, který sedí přibližně 1 m - 1,5 m za domácí metou. Průměrná rychlost nadhozu v České extralize mužů se pohybuje mezi 110 km/h a 115 km/h. Nejrychlejší nadhazovači dosahují i rychlostí vysoko nad 120 km/h. To znamená že míč uletí vzduchem přibližně 13 m za dobu  $0,4 \pm 0,03$  s

Během letu vzduchem je míč ovlivněn mnoha faktory [22]:

- Počáteční směr vypuštění,
- Magnusův jev (Obr. 4),
- gravitační síla,
- povětrnostní podmínky,
- odpor vzduchu.

Cílem této práce není určování velikosti vlivu těchto jevů na nadhoz, ale jsou důležité pro kontext. Trajektorie nadhozu zpravidla není přímá, míč může stoupat, padat i zatáčet. Pro kvalitní popis trajektorie nestačí změřit polohu pouze koncových bodů, ale je potřeba učinit vysoký počet měření v celé délce.





Obr. 4: Vliv Magnusova jevu na trajektorii softballového nadhozu se stoupavou rotací [23].

### 3.4.2. Určení nároků na kamery

Během 0,4 s je potřeba pořídit dostatečné množství snímků, tak aby zrekonstruovaná trajektorie, pokud možno, věrně popisovala skutečný pohyb nadhozeného míče. Vzorec 3.1 určuje potřebnou frekvenci snímání.

$$fps = \frac{s}{t}, \quad (3.1)$$

kde:  $s$  je délka trajektorie po které se míč pohybuje,

$t$  je doba letu míčku,

$d$  je požadovaná vzdálenost mezi polohou míče v časech  $t_1$  a  $t_2$ ,

$fps$  je počet snímků za sekundu.

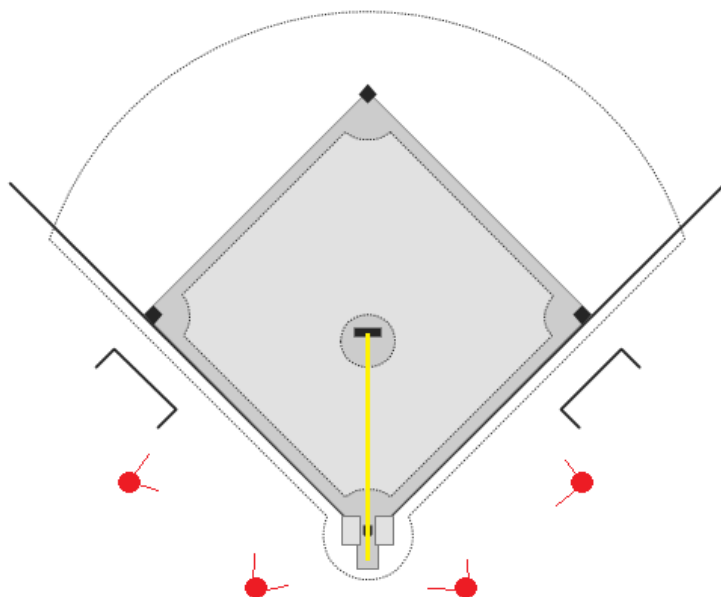
Za hodnotu  $d$  byla dosazena empiricky určená hodnota 0,3 m. Taková hustota bodů je více než dostatečná a poskytuje rezervu pro případ ojedinělého chybného vyhodnocení polohy. Ostatní proměnné byly diskutovány v předešlé kapitole. Výsledná požadovaná snímací frekvence činí  $114 \pm 3$  fps. Nejbližší hodnotou, se kterou je možno se u skutečných kamer setkat je 120 fps, což je hodnota, která bude vyžadována od kamer pro natáčení nadhozu.

Kromě vysoké snímací frekvence je nutné, aby bylo možno kamery spustit společně v jednom časovém okamžiku. Dobrá synchronizace snímkových sekvencí je nezbytně nutná pro správné vyhodnocení. Preferováno je řešení pomocí dálkového

ovladače, nebo ovládání přes počítač či mobilní telefon, před fyzickým zásahem do konstrukce kamer a jakoukoli úpravou, či montáží přídatných zařízení.

### 3.4.3. Návrh metody sběru dat a zpracování

Pro snímkování budou použity 2 až 4 kamery vyhovující požadavkům z předchozí kapitoly. Rozmístěny budou po krajích hřiště (Obr. 5). Kamery budou ovládány dálkově a bude umožněno jejich synchronní spuštění. V případě že, by synchronizace snímků nebyla dostatečná, zpřesní se analýzou zvukové stopy (kap. 7.2.).



Obr. 5: Možné rozmístění kamer okolo hřiště.  
Červená kolečka - kamery; žlutá čára - trajektorie nadhozu [24].

Při zpracování bude nutno určit polohu míče na každém použitém snímku, což pro uvažovanou snímkovací frekvenci 120 fps a době letu 0,4 s činí 96 až 192 snímků, v závislosti na počtu kamer. Manuální postup při vyhledávání polohy v jednotlivých snímcích se nejeví jako vhodný. Bude navržen poloautomatický algoritmus, který po zadání vstupních podmínek dokáže sledovat polohu míče na snímcích sám.

## 4. Volba kamer

V kapitole (kap. 3.4.2.) jsou popsány nároky, které musí splňovat kamery použité pro experiment. Na trhu se nachází celá řada modelů akčních kamer od různých výrobců. Pro natáčení byly vybrány kamery značky GoPro. V potaz byla brána především dobrá kvalita kamer a pověst značky, která je, co se akčních kamer týče, technologickým průkopníkem.

Vybrány byly konkrétně modely GoPro HERO 3+ Black Edition (dále jen HERO 3+) (Obr. 6) a 2 kusy GoPro HERO 5 Black Edition (dále jen HERO 5) (Obr. 7). Jedná se o kompaktní kamery s širokoúhlým objektivem, 12 MP snímacím senzorem o velikosti 6,17 mm x 4,55 mm a možností natáčet video rychlostí až 240 fsp. Dostupné jsou tři režimy zorného pole (FOV - Field Of View): *wide*, *medium* a *narrow*. U modelu HERO 5 je navíc mód *linear*, který před uložením snímky opravuje o vliv distorze.



Obr. 6: GoPro HERO 3+ Black Edition.



Obr. 7: GoPro HERO 5 Black Edition.

Tyto kamery jsou určeny hlavně pro natáčení a focení během sportovních aktivit. Proto jsou vybaveny širokoúhlou optickou soustavou, díky čemuž pokryjí velké zorné pole. Aby bylo zamezeno vlivu optických vad (astigmatismus, koma), je součástí objektivu asférická čočka (Obr. 8). Optické vady se dají korigovat i soustavou běžných sférických čoček. Ovšem za cenu vyšší hmotnosti i větších rozměrů. Kamery nemají funkci zoom a jsou napevno zaostřeny na nekonečno. Ohnisková vzdálenost je proto konstantní. Pro zajištění dostatečné hloubky ostrosti snímků má objektiv malé clonové číslo ( $f/2,8$ ). V metadatech snímků lze najít přibližnou hodnotu ohniskové vzdálenosti 3 mm. Výrobce žádnou přesnější hodnotu neudává, a na jeho webu lze najít pouze ekvivalenty ohniskových vzdáleností pro kinofilm (Tab. 1) [25, 26]. Při znalosti

rozměrů kinofilmu (36 mm x 24 mm) a velikosti senzoru odpovídající konkrétnímu FOV (kap. 5.) lze pomocí trojčlenky určit ohniskovou vzdálenost:

$$f = \frac{d_{GoPro}}{d_{kino}} * f_e , \quad (4.1)$$

kde:  $f$  je ohnisková vzdálenost,

$d_{GoPro}$  a  $d_{kino}$  jsou úhlopříčky senzorů,

$f_e$  je ekvivalent ohniskové vzdálenosti z tabulky (Tab. 1).

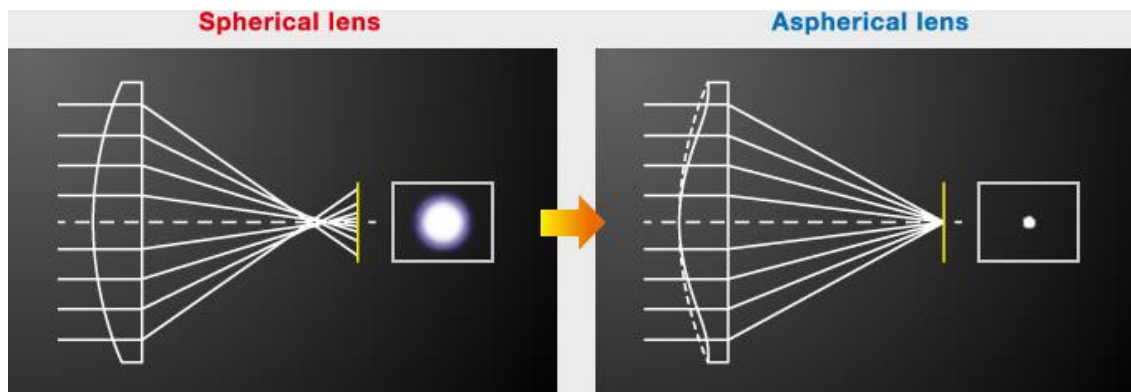
Pro oba modely kamer jsou získány následující hodnoty:

HERO 3+:  $f = \frac{7,67}{43,27} 17,2 \approx 3,05\text{mm},$

HERO 5:  $f = \frac{7,67}{43,27} 14 \approx 2,48\text{mm}.$

Tab. 1: Ekvivalentní ohnisková vzdálenost pro kinofilm.

	HERO 3+	HERO 5
FOV	ekvivalent $f$ pro kinofilm	ekvivalent $f$ pro kinofilm
wide	17,2 mm	14 mm
medium	21,9 mm	21 mm
narrow	34,4 mm	28 mm



Obr. 8: Porovnání sbíhavosti paprsků v ohnisku pro sférickou čočku (vlevo) a asférickou čočku (vpravo) [27].

## 5. Kalibrace kamer

Při kalibraci jde o určení parametrů, které popisují vnitřní geometrii kamery. Ta je zpravidla nedokonalá a vytváří zkreslený obraz, který je potřeba opravit. Pro popis se používá: ohnisková vzdálenost -  $f$ , obraz středu promítání -  $[x_0; y_0]$ , koeficienty distorze podle Brown–Conrady modelu ( $K_i, P_i$ ). K určení velikosti distorze existují i jiné, méně používané modely, například Basu and Licardie model pro fish-eye čočky [28]. Rozlišujeme 3 základní metody kalibrací: laboratorní, s využitím kalibračního pole a simultánní.

Laboratorní metoda používá kolimátor produkující proud rovnoběžných světelných paprsků, čímž simuluje zdroj světla v nekonečnu (Slunce). Kamera je umístěna na podložce, která umožňuje její naklánění a zároveň měření náklonů (vnější orientace). Z parametrů vnější orientace je možno odvodit úhel mezi paprskem z kolimátoru a optickou osou kamery. Dále se v obrazové rovině porovná skutečná poloha obrazu paprsku s teoretickou. Takto je potřeba podrobně proměřit celý sensor kamery. Metoda vyžaduje pořízení velkého množství snímků a je časově velmi náročná. Je však velmi přesná a provádí se u měřičských kamer [29].

Nejběžněji využívanou metodou v pozemní fotogrammetrii je kalibrace pomocí testovacího pole. Pole může být rovinné, nebo prostorové. Obsahuje set jasně identifikovatelných bodů, které jsou zpravidla rozmístěny do pravidelné sítě. Kalibrační pole se snímá z několika stanovišť (alespoň 8 snímků) a kamerou se rotuje o  $90^\circ$ . Důležité je, aby pole zabíralo co největší plochu snímku a aby snímky byly konvergentní, respektive aby jejich osy záběru směřovali do stejného místa. Metodou svazkového vyrovnání se spočtou parametry vnější orientace snímků, modelové souřadnice bodů pole a vnitřní orientace kamery.

Obdobným způsobem se postupuje i u simultánní kalibrace, která se využívá hlavně v letecké fotogrammetrii. Jako body kalibračního pole zde slouží body signalizované v terénu, u nichž je známa geodetický poloha (vlícovací body). Celý projekt se pak řeší opět svazkovým vyrovnáním.

## 5.1. Zorné pole a závislé parametry

Jak již bylo naznačeno (kap. 4), v závislosti na aktivním zorném poli se mění některé parametry kamer. Konkrétně se jedná o velikost pixelu a aktivní rozměr sensoru. Proto je ještě před kalibrací nutno určit v jakém módu budou kamery snímat a kalibraci provést pro daný mód. U kamery HERO 3+ byl určen FOV mód *wide*, protože jako jediný umožňuje natáčení videa rychlostí 120 fps. Kamery HERO 5 umožňují natáčení stejnou rychlostí, ve všech módech. Vybrán byl mód *narrow*, aby bylo zkrácení snímků co nejmenší. Následující analýza popisuje vliv FOV na parametry kamery a dále podporuje rozhodnutí použít mód *narrow*.

Při konstantní ohniskové vzdálenosti je možné zaznamenat větší zorné pole pouze s využitím většího sensoru (Obr. 9). Je nereálné si představovat, že se velikost sensoru v kameře skutečně mění podle nastaveného režimu. Co se ale měnit může je aktivní část sensoru. Čili se zvětšujícím se zorným polem se zvětšuje aktivní plocha sensoru a lze ji určit ze znalosti ekvivalentních ohniskových vzdáleností pro kinofilm (Tab. 1). Obdobně jako přibližnou ohniskovou vzdálenost. Pokud předpokládáme, že celá plocha sensoru je využita pro největší zorné pole, pak:

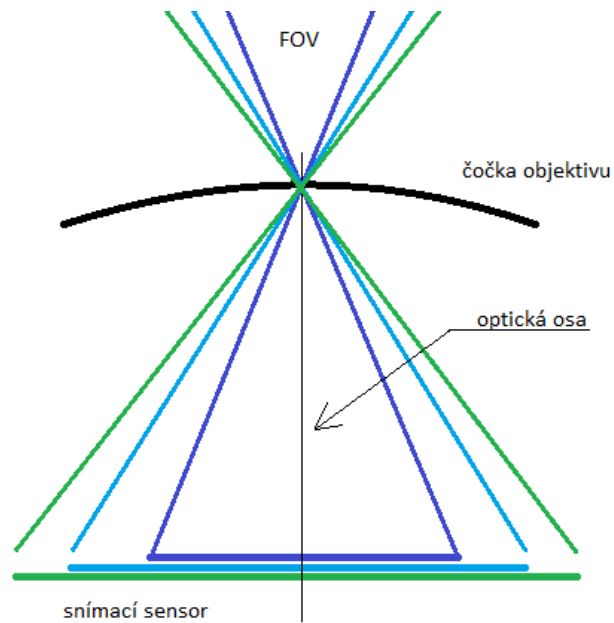
$$\begin{bmatrix} w_i \\ h_i \end{bmatrix} = \frac{f_i}{f_w} \cdot \begin{bmatrix} w_w \\ h_w \end{bmatrix}, \quad (5.1)$$

kde:  $w_i, h_i$  jsou neznámé rozměry aktivní části pro zvolené zorné pole  $i$ ,  
 $w_w, h_w$  jsou rozměry sensoru při nejširším zorném poli,  
 $f_w$  je ekvivalent ohniskové vzdálenosti při nejširším zorném poli,  
 $f_i$  je ekvivalent ohniskové vzdálenosti při zvoleném zorném poli  $i$ .

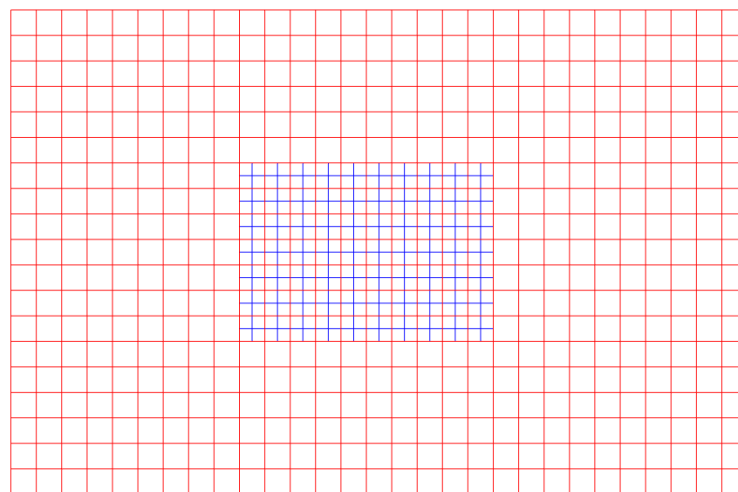
Zajímavostí je, že při všech režimech mají snímky stejné rozlišení (12 MP). To naznačuje, že velikost pixelu se musí rovněž měnit se změnou zorného pole. Jedním z důsledků je, že při užším zorném poli mají snímky lepší prostorové rozlišení než při širším. Aktivní rozměry sensoru a velikost pixelu pro různá zorná pole jsou uvedeny v (Tab. 2). S ohledem na velikost pixelů v jednotlivých režimech lze o konstrukci sensoru předpokládat, že ve středové části jsou skutečně osazeny menší pixely, než na zbytku sensoru (Obr. 10). Při širokoúhlém snímku se menší pixely ve středu sensoru shluknou do čtveřic, které pak tvoří jeden pixel ve snímku.

Tab. 2: Velikost aktivní části sensoru a velikost pixelu pro různá pole

GoPro HERO 3+ / 5 Black			
FOV	šířka [mm]	výška [mm]	pixel [ $\mu\text{m}$ ]
wide	6,17	4,55	1,54
medium	4,11	3,03	1,16
narrow	3,09	2,28	0,77



Obr. 9: Závyslost velikosti snímacího sensoru na FOV. Modra - narrow; tyrkysová - medium; zelená - wide.



Obr. 10: Možné uspořádání pixelů různé velikosti na sensoru. Modrá - 077  $\mu\text{m}$ , červená - 1,54  $\mu\text{m}$ .

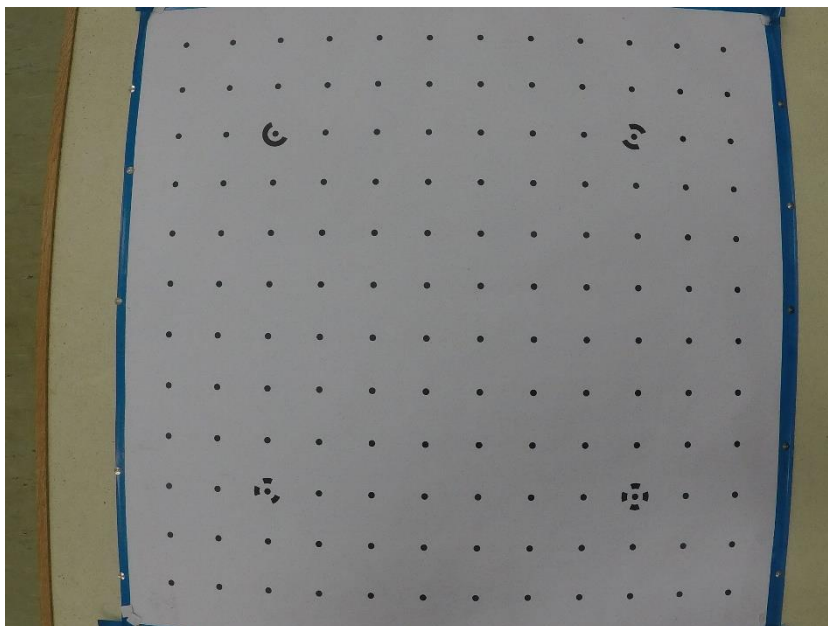
Mód *medium* nebyl vybrán pro snímání, a proto je zde upozaděn fakt, že do výše vyřčené hypotézy nezapadá, neboť z pixelů o velikosti 0,77  $\mu\text{m}$  nelze složit pixel s rozměry 1,16  $\mu\text{m}$ . Je možné, že skutečná velikost pixelů na sensoru je ještě menší a pixely ve snímcích jsou vždy tvořeny skupinou několika těchto pixelů. Bez podrobnějších informací ze strany výrobce kamer je velmi těžké nalézt perfektní řešení.

## 5.2. Proces kalibrace

Nabízí se otázka, zdali jsou vybrané kamery dostatečně stabilní, aby si podržely parametry vnitřní orientace, alespoň po několik dní mezi kalibrací a měřením. K takové degradaci dochází například u kompaktních kamer s vysunovacím objektivem. Vysouvání při každém zapnutí způsobuje drobnou změnu ohniskové vzdálenosti i při zachování stejného nastavení zoom a zaostření jako při kalibraci. Protože v rámci experimentu jsou používány jen kamery s konstantní ohniskovou vzdáleností, a nemají žádné pohyblivé části. Kamery byly zkalibrovány s využitím kalibračního pole. Jedná se rychlou a snadnou metodu, která se dá rychle a snadno zopakovat, pokud by bylo podezření, že se vnitřní geometrie kamer změnila.

Na poli je celkem 144 bodů uspořádaných do pravidelné čtvercové sítě (Obr. 11). 4 z bodů jsou 8-bitové kódové značky, jež zde slouží k přibližné orientaci snímků. Z osmi stanovišť rozmístěných pravidelně okolo kalibračního pole a z jednoho stanoviška nad polem bylo každou kamerou pořízeno celkem 18 snímků (Příloha 1). Na každém stanovišti dva snímky vzájemně otočené o 90°, tak aby vždy pole zabíralo co největší část snímku. To je důležité proto, aby bylo zkreslení objektivu kvalitně popsáno pro celou plochu sensoru.





Obr. 11: Kalibrační pole použité pro kalibraci kamer.

#### 5.2.1. Zpracování kalibrace

Výpočet kalibračních parametrů byl proveden v programu PhotoModeler v.6, který umožňuje plně automatizovaný výpočet. Po načtení snímků jsou na nich detekovány body a proběhne referencování. Správné natočení snímků je zajištěno kódovanými značkami. Výpočet probíhá ve dvou krocích. Nejprve se zjistí přibližné parametry kamery z metadat snímků, proběhne první krok, který určí jen vybrané parametry komory a druhý krok již vyřeší všechny parametry vnitřní orientace a vygeneruje protokol.

Široký úhel záběru způsobuje, že některé body jsou výrazně zkresleny a nepřesně detekovány. Pro zvýšení přesnosti kalibrace byly z řešení odstraněny ty body, u nichž přesáhla chyba v referencování 1 pixel (HERO 5), respektive 2 pixely (HERO 3+). Samozřejmostí je i vymazání bodů detekovaných mimo kalibrační pole, k čemuž zpravidla dochází na rámu pole. Po tomto kosmetickém zásahu byl výpočet kalibrace opakován.

### 5.3. Výsledky kalibrace

Výsledky ukazují, že hodnoty zkreslení jsou opravdu vysoké, zejména u kamery HERO 3+, která byla kalibrována v režimu nejširšího zorného pole. Hodnoty parametrů ukazuje (Tab. 3). Podrobnější informace o kalibraci jsou k nalezení v protokolech (Příloha 2). Důvěryhodnost výsledkům dodává, že výsledky pro obě kamery HERO 5 jsou téměř stejné. Tabulka (Tab. 3) nabízí také porovnání výsledků kalibrace v různých verzích programu PhotoModeler. Výsledky z obou verzí programu se liší jen minimálně. Nejpatrnější rozdíly jsou u kamery HERO 3+. V dalších výpočtech jsou uvažovány výsledky z novější verze.

Tab. 3: Přehled parametrů vnitřní orientace kamer, porovnání výsledků ve dvou verzích programu PhotoModeler.

kamera	PM ver	f [mm]	xp [mm]	yp [mm]	K1	K2	K3	P1	P2
GoPro HERO 3+	v. 6	2,92990	3,28344	2,50752	0,03032	0,001697	0	0,000189	-0,000124
	v. 2018	2,93211	3,28277	2,50755	0,03060	0,001659	0	0,000191	-0,000136
GoPro HERO 5_1	v. 6	2,70976	1,53997	1,13918	0,03907	0,001629	0	-0,0001100	0,0000743
	v. 2018	2,71000	1,53989	1,13919	0,03916	0,001585	0	-0,0001148	-0,0000745
GoPro HERO 5_2	v. 6	2,70725	1,52924	1,13122	0,03841	0,001792	0	-0,0000705	-0,0000288
	v. 2018	2,70725	1,52923	1,13122	0,03841	0,001792	0	-0,0000702	-0,0000290

Průběh radiální distorze se určí podle vzorce (5.2). Koeficient  $K_3$  nebyl při kalibraci vyřešen, kvůli vysoké korelaci (přes 97%) s koeficientem  $K_2$ . Dosadí se za něj 0. Výsledné průběhy je možné sledovat v grafech (Graf 1, 2). Pro obě kamery HERO 5 je vykreslen jeden společný graf, protože jejich průběh distorze se liší maximálně o 1 pixel. Kamera HERO 3+ dosahuje téměř desetinásobných hodnot zkreslení než HERO 5. To je ale dáno větší velikostí senzoru. Při pohledu na zkreslení v odpovídající vzdálenosti od středu snímku jsou hodnoty zkreslení obou typů kamer podobné.

$$\begin{pmatrix} \Delta x_r \\ \Delta y_r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x' - x'_0 \\ y' - y'_0 \end{pmatrix} \cdot (K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6), \quad (5.2)$$

kde:  $x'$  a  $y'$  jsou měřené snímkové souřadnice,

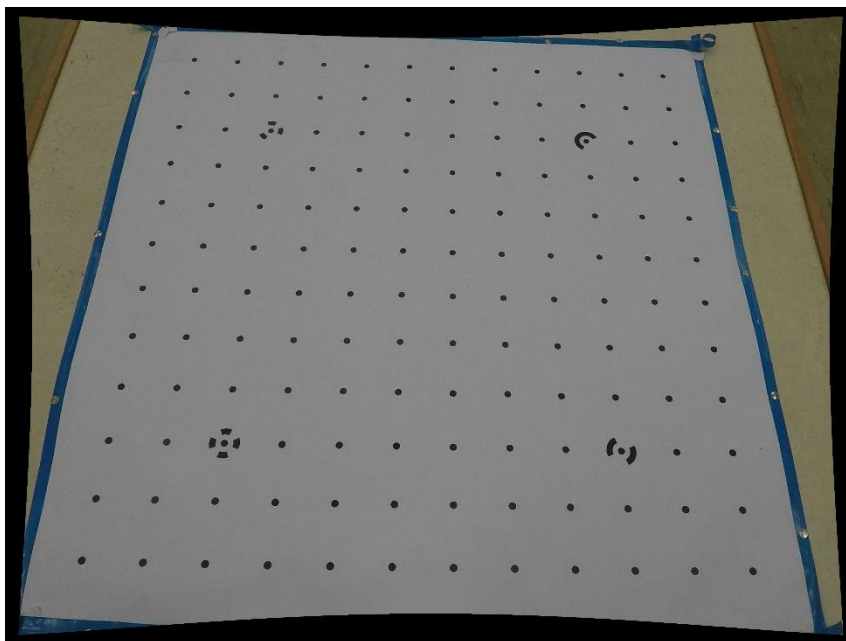
$x'_0$  a  $y'_0$  jsou souřadnice hlavního snímkového bodu,

$r = \sqrt{(x' - x'_0)^2 + (y' - y'_0)^2}$  je vzdálenost bodu od středu snímku.

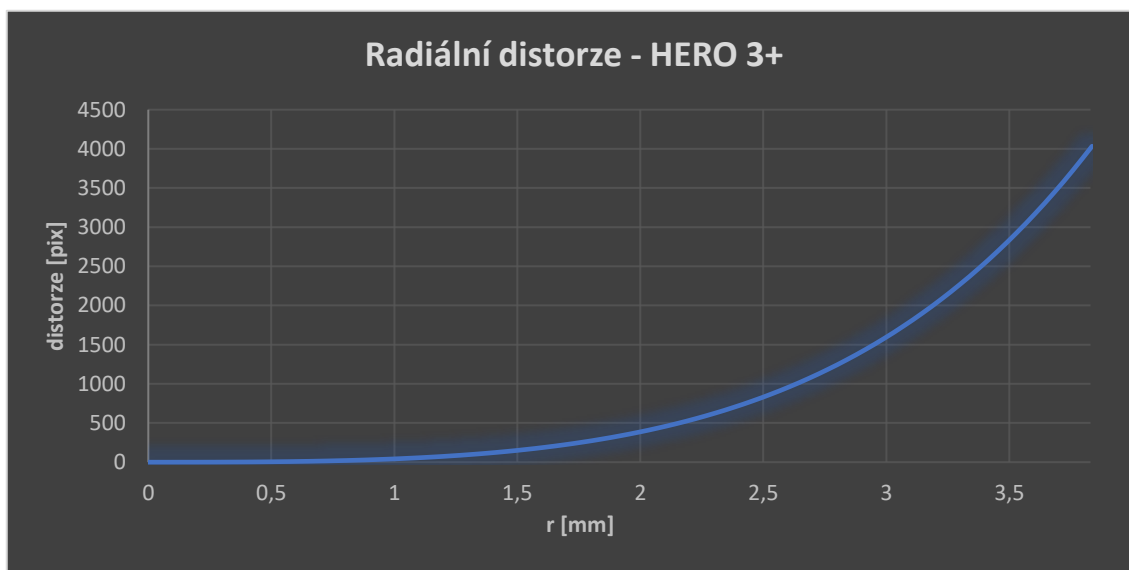
Tangenciální distorze se vypočte ze vztahu (5.3) a její průběh pro všechny kamery lze sledovat v (Graf 3).

$$\begin{bmatrix} \Delta x_t \\ \Delta y_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(r^2 + 2x'^2) + 2P_2x'y' \\ P_2(r^2 + 2y'^2) + 2P_1x'y' \end{bmatrix}. \quad (5.3)$$

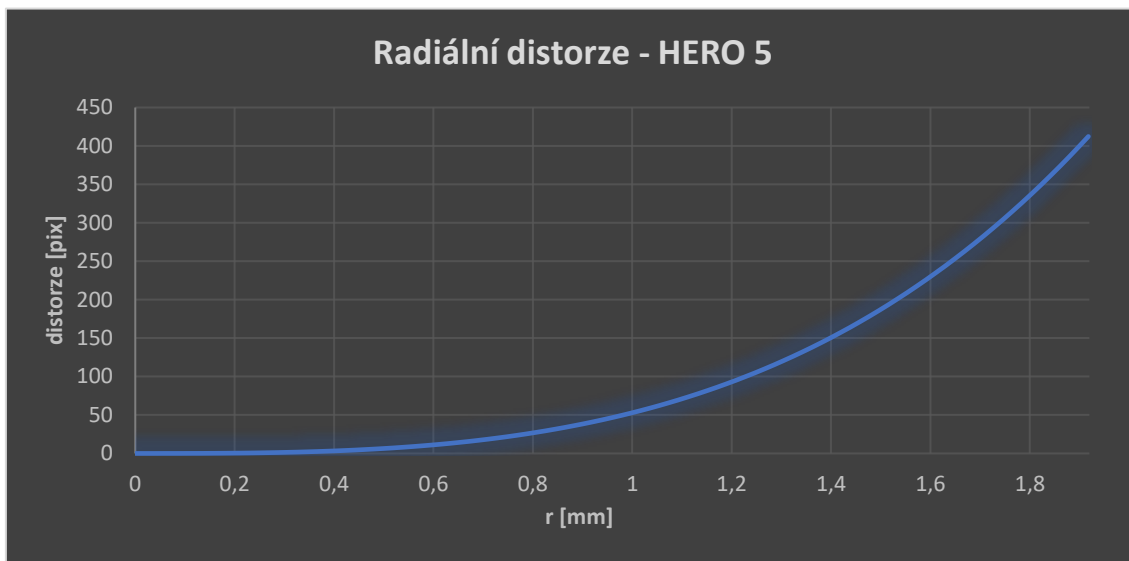
Snímek zbavený vlivu distorze (Obr. 12) se dá určit výpočtem inverzní distorze. K tomu jsou potřeba inverzní koeficienty. Postup k jejich výpočtu je uveden například v publikaci [30].



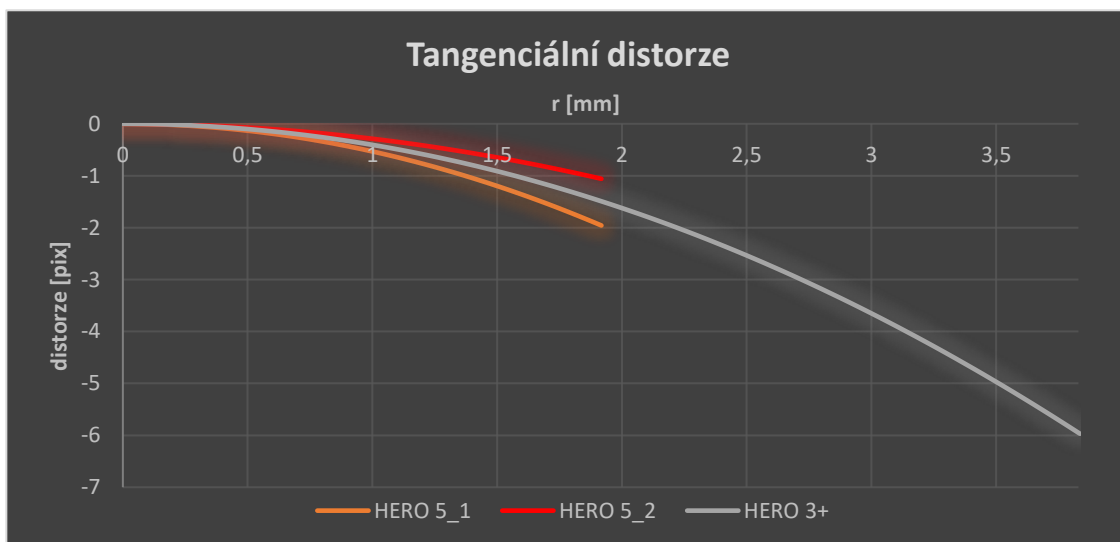
Obr. 12: Snímek kalibračního pole, s odstraněnou radiální distorzí.



Graf 1: Radiální distorze kamery GoPro HERO 3+.



Graf 2: Radiální distorze obou kamer HERO 5.



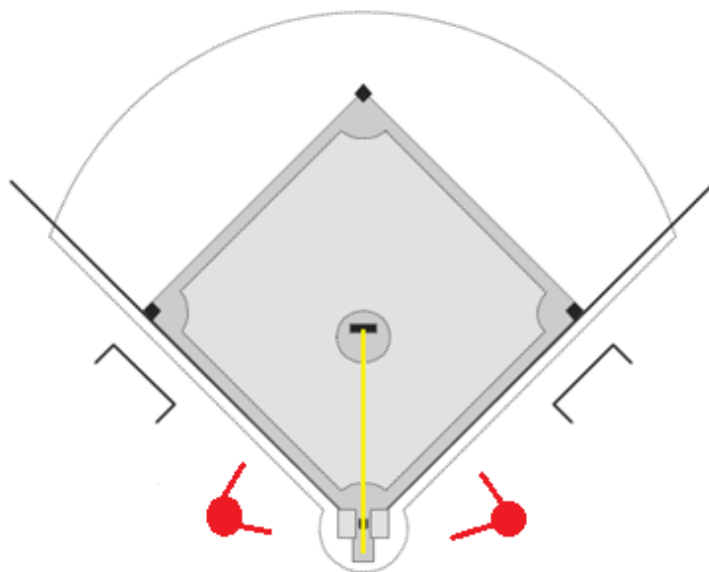
Graf 3: Průběh tangenciální distorze pro všechny kalibrované kamery.

## 6. Sběr dat

Natáčení nadhozů bylo uskutečněno během softballového zápasu. Při tom platí několik pravidel omezujících možnosti umístění kamer. V kapitole (kap. 3.2.) byl již diskutován případ umístění kamery do nadhazovací osy. Dále z bezpečnostních důvodů platí, že v hrací ploše a v její blízkosti se nesmějí vyskytovat žádné cizí předměty nesouvisející s hrou. Umístění do větší vzdálenosti a mimo hrací plochu sice způsobí horší prostorové rozlišení v oblasti trajektorie nadhozu, je však nezbytné.

Použity byly pouze 2 kamery z celkové trojice kalibrovaných, protože u HERO 3+ se vyskytl problém s přijímačem wi-fi signálu a kameru nešlo propojit s dálkovým ovladačem. Musela by být zapnuta ručně, což by způsobilo jednak pohyb kamery a dále špatnou synchronizaci s ostatními. Funkční kamery byly připevněny na masivní ocelovou konstrukci tribuny, symetricky vůči nadhazovací ose (Obr. 13) s osami záběru protínajícími se přibližně v polovině trajektorie.

Před začátkem utkání byla pořízena dvojice snímků v plném rozlišení 12 MP. Tyto snímky byly později během zpracování použity pro výpočet vzájemné vnější orientace kamer. Snímky z videí nejsou pro řešení orientace vhodné, protože jejich rozlišení 2,07 MP (full HD rozlišení 1920 x 1080) není dostatečné pro přesnou detekci spojovacích bodů. Video byla natáčena v FOV módu *narrow* snímací rychlostí 120 fps (přesná hodnota je 119,88 fps).



Obr. 13: umístění kamer při natáčení během softballového zápasu.

## 7. Zpracování

Základem zpracování naměřených dat bylo vyřešit vnější orientaci kamer, detekovat ve snímcích trajektorii míče, převést ji do prostorových souřadnic a její následné vyhodnocení. Jako zpracovatelský software byl použit PhotoModeler v. 2018 ve kterém byla řešena vnější orientace. Pro výpočty spojené s detekcí míče a vizualizaci výsledků byl použit MATLAB R2017a (skripty a funkce - Příloha 3). Převod snímkových souřadnic na 3D trajektorii byl proveden v obou softwarech.

### 7.1. Výběr snímků pro zpracování

Celkem bylo natočeno přes 25 GB videa. Většina stopáže ale padá na úseky mezi jednotlivými nadhozy a tím pádem není potřebná. Navíc zpracovávat celé video by bylo časově i výpočetně velice náročné. Bylo potřeba extrahovat z videí pouze sekvence snímků na kterých probíhá nadhoz, tedy od okamžiku, kdy nadhazovač vypustí míč, do okamžiku, kdy jej chytí chytač. Celkem byly ke zpracování vybrány 3 nadhozy.

Takto získané sekvence snímků jsou hrubě synchronizovány s přesností, která odpovídá obrácené hodnotě snímací rychlosti při pořizování videa, tedy 1/120 s. Za tuto dobu, při rychlosti 100 km/h, míč uletí přibližně 23 cm. Na (Obr. 14) je srovnání dvou snímků, které oba zachycují první dotek míče a rukavice chytače. Na první pohled je zřejmé, že na levém snímku je míč hlouběji v rukavici, je tedy napřed oproti míči na pravém snímku. Proto je vhodné synchronizaci vylepšit a polohu míče určit interpolací.

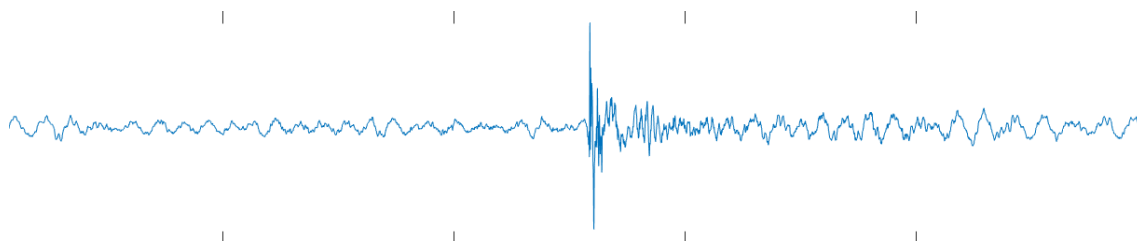


Obr. 14: Porovnání odpovídajících si snímků z hrubě synchronizovaných sekvencí (zdrojem jsou videa pořízená mimo experiment).

## 7.2. Synchronizace pomocí zvukové stopy

Každé video natočené při experimentu má 2 zvukové stopy s vzorkovací frekvencí 48 kHz. Každá sekunda audio stopy se skládá ze 48000 diskretních bodů (vzorků) které reprezentují spojitou funkci zvuku. Na každý snímek připadá 400 vzorků. Teoreticky by tedy šlo porovnáním zvukových stop, odpovídajících dvěma nahrubo synchronizovaným snímkům, synchronizaci zpřesnit až čtyřsetkrát, pokud by se podařilo najít odpovídající si body.

Realita je však jiná. Nejenže je stopa ovlivněna šumem zvuků vzdáleného okolí, ale v závislosti na poloze zdroje zvuku vůči kamerám je zvuk zaznamenán pokaždé s různou hlasitostí (amplitudou). Vzdálenost kamer byla zhruba 17 m. Některé události ale vyvolají dostatečně silný zvuk, aby se jednoznačně projevíly ve zvukové stopě obou kamer (Obr. 15). Zdrojem výrazného útvaru na obrázku je okamžik, kdy chytač chytá míč. Podobně se projeví například odpal míče. Pokud je takový obraz identifikován ve zvukové stopě ze dvou kamer, může být zjištěn jejich vzájemný posun.

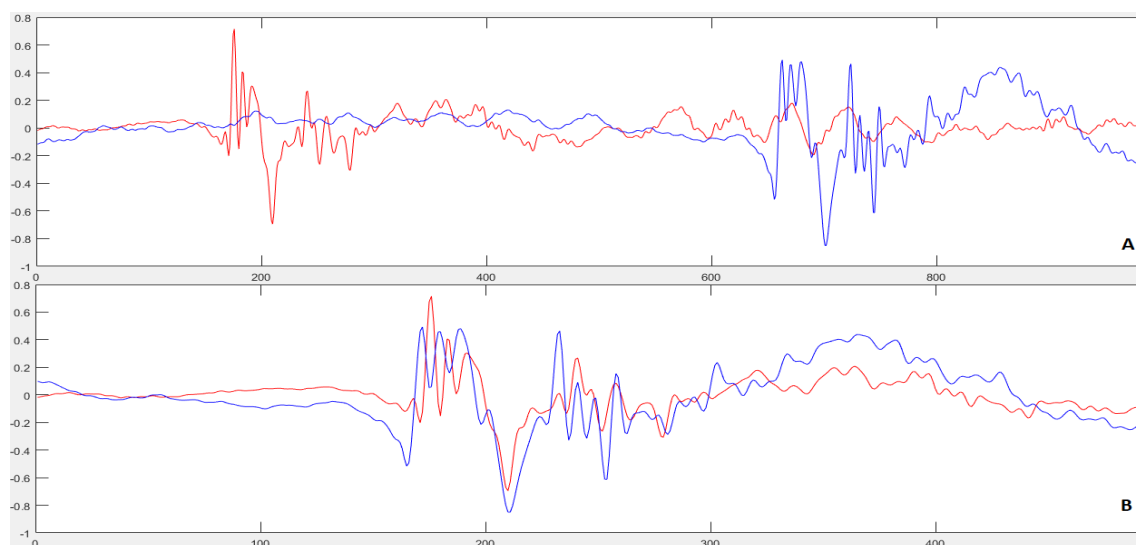


Obr. 15: Zřetelný útvar na zvukové stopě, vniklý v okamžiku, kdy chytač chytil nadhoz.

Jedna zvuková stopa je určena jako referenční. Podle šířky obrazce se určí vyhledávací okno, které se přeneso i na druhou stopu (Obr. 16a). Data ve výpočetním okně byla nejprve vyhlazena klouzavým průměrem s parametrem 10 a poté byl spočten korelační koeficient. Okno na druhé stopě se postupně posouvá. Jako příslušný posun obou zvukových stop byl určen ten s nejvyšším korelačním koeficientem. V testovaném případě mělo výpočetní okno šířku 77 vzorků a vypočtený posun pro přesnou synchronizaci byl určen na 490 bodů (Obr. 16b).

Zde však nastává rozkol s hrubou synchronizací z přechodního kroku. Při ní k sobě byly přiřazeny snímky podle určité změny stavu (například chytač chytá míč). Hodnota 490 vzorků ale odpovídá posunu o 1,2 snímku. Kdyby byly sekvence o tuto hodnotu

posunuty, vznikla by situace, kdy na snímku z jedné sekvence již došlo k sledovanému jevu (chytač - míč), ale ve druhé sekvenci k němu dojde o snímek později. Z této skutečnosti byl vyvozen závěr, že u použitých kamer není zvuková stopa s video stopou synchronní, a tedy nelze zvukové stopy použít pro zpřesnění synchronizace snímků. Důsledkem je, že synchronizace snímků bude založena pouze na vizuální kontrole, čímž však nebude zdaleka dosaženo přesnosti, jakou slibovala metoda synchronizace zvuku.



Obr. 16: A - zvukové stopy v původních pozicích, B - synchronizované zvukové stopy.

### 7.3. Detekce míče na snímku

Poloha míče byla zjišťována kroužkovým detektorem *imfincircles* v MATLABU. Souřadnice středu detekovaného kroužku byly považovány za střed míče. Pro zrychlení výpočtu byl každý snímek předem oříznut na velikost 81x61 pixelů okolo přibližné polohy míče. Poloha na prvních dvou snímcích každé sekvence byla určena ručně. Pro následující snímky byla přibližná poloha určena extrapolací z lineární regrese. Z počátku byla regresní přímka proložena pouze dvěma body. S přibývajícím počtem měření byl počet bodů pro regresi navyšován až na 5. Bylo-li na výřezu detekováno více kroužků, převzala se poloha nejbližšího odhadované poloze. Pokud nebyl detekován žádný kroužek, uložila se hodnota *nan* (not a number). Predikcí přibližné polohy je zajištěno, že algoritmus dokáže sledovat míč, i když jej na několika snímcích ztratí.

Detektoru byly předkládány upravené snímky, aby se eliminoval počet chybných detekcí. Popis a zhodnocení zvažovaných postupů úpravy snímku bude pro lepší kontext



následovat po popisu Houghovy transformace, která je základem funkce *imfindcircles* v MATLABU, použité pro detekci míče.

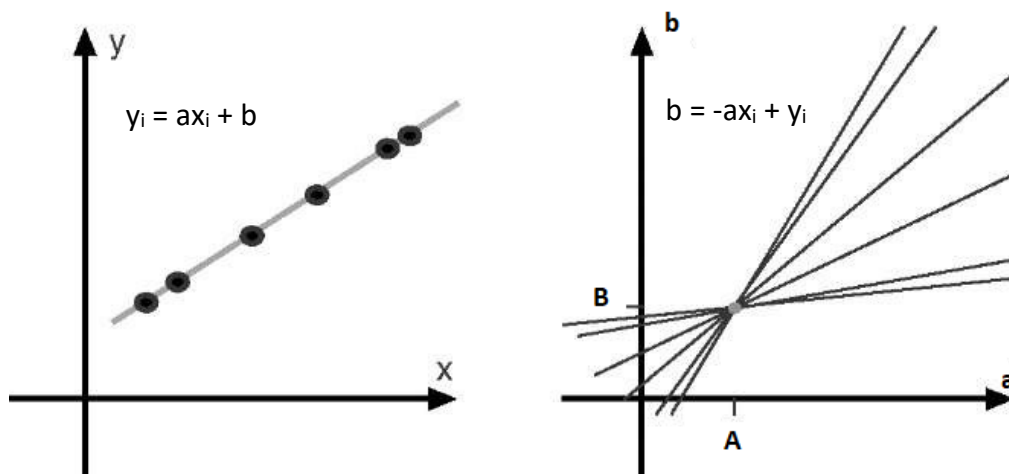
### 7.3.1. Houghova transformace

V počítačovém vidění a ve zpracování digitálních obrazů je Houghova transformace metoda pro nalezení parametrického popisu geometrických objektů v obrazu. Metoda se používá pro hledání jednoduchých objektů, jako je přímka, kružnice nebo elipsa. Vstupními hodnotami jsou souřadnice (pixely) bodů tvořících hledaný objekt. Nejjednodušší implementací metody je detekce přímky.

Přímka je v rovině  $(x, y)$  definována parametrickým vztahem  $y = ax + b$ . Libovolný bod  $(x_i, y_i)$  ležící na přímce lze transformovat na přímku v rovině  $(a, b)$  s parametrickým tvarem:

$$b = -x_i a + y_i. \quad (7.1)$$

Pokud se do rovnice (7.1) dosadí 2 body ležící na přímce, vzniknou v rovině  $(a, b)$  2 přímky, které se protínají ve společném průsečíku (uzlu) o souřadnicích  $(A, B)$ , které odpovídají parametrům přímky, na které dosazené body leží (Obr. 18). Každá přímka v rovině  $(a, b)$  odpovídá jednomu bodu v rovině  $(x, y)$ . Při transformaci více přímek vznikne pro každou přímku jeden uzel.



Obr. 17: Transformace přímky z roviny  $(x, y)$  do roviny  $(a, b)$ .

Při hledání parametrů kružnice, je řešení obdobné, ale problém se posouvá do trojrozměrného prostoru, protože parametrická rovnice kružnice má tři parametry:

souřadnice středu  $(x, y)$  a poloměr  $r$ . Pokud je poloměr hledaných kružnic znám, problém degraduje do dvourozměrného prostoru.

Při reálné implementaci je jako soubor vstupních hodnot transformace použit výstup z hranového detektoru, který byl na obraz aplikován. Tyto body netvoří přesné přímky, kružnice, nebo jiné hledané objekty. Proto výsledkem transformace nejsou přesné uzly, ale spíše shluky několika pixelů. Přesné souřadnice uzlu se sub-pixelovou přesností se najdou hledáním lokálního maxima funkce intenzity pixelu, která je dána počtem křivek, které se v něm kříží.

### 7.3.2. Algoritmy pro úpravu snímků

Hranové detektory mapují snímek a pro zvolené okolí počítají gradient intenzity. Z velikosti a směru gradientu se vypočítají hranové pixely. Gradient je tím vyšší, čím je větší kontrast mezi pixely. Proto byly na snímky vybrané k detekci míče aplikovány různé metody pro odstranění šumu a zvýšení kontrastu mezi míčem a okolím. Vyzkoušeny byly metody diferenčního snímku, odstranění pozadí, aplikace Gaussova filtru a top-hat filtru.

#### Diferenční snímek:

Postup funguje poměrně dobře, ale jen dokud je změna polohy míče na snímcích větší než jeho poloměr. Pak dojde k tomu, že obrazy míče na snímcích  $s_i$  a  $s_{i-1}$  se překryjí a na diferenčním snímku se objeví jen nepřekrytá část, která nestačí ke spolehlivé detekci středu míče (Obr. 19).

#### Odstranění pozadí:

Model pozadí byl vytvořen ze všech snímků vybraných v rámci každého nadhozu. Hodnoty pixelů modelu byly určeny jako průměr hodnot odpovídajících pixelů na snímcích. Obrázek (Obr. 20) ukazuje příklad použití.

#### Gaussův filtr:

Gaussův filtr rozmazává obraz a odstraňuje šum. Rozmazáním obrazu se celkově sníží úroveň kontrastu. Nové hodnoty pixelů se počítají konvolucí jádra filtru s obrazem. Hodnoty v jádře se určí podle distribuční funkce normálního rozdělení v prostoru:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x^2+y^2)}{2\sigma^2}}, \quad (7.2)$$

kde:  $\sigma$  je rozptyl rozdělení,

$x$  a  $y$  jsou souřadnice pixelů v jádře (souřadnice středu jsou [0; 0]).

Pro zpracování snímků byly zvolen parametr rozptylu 2 a velikost jádra 9x9. Takový filtr způsobuje již velké rozmazání. Míč je ale i tak na snímku jasně patrný, zatímco detaily na pozadí jsou velmi potlačeny (Obr. 21). Filtr byl vyzkoušen na RGB snímcích i na snímcích převedených na odstíny šedi. Na barevných snímcích se nevyskytly s detekcí problémy, na šedých občas míč splýval s pozadím.

#### Top-hat filtr:

Základem filtru jsou morfologické operace dilatace a eroze obrazu. Operace používají, stejně jako Gaussův filtr, jádro, kterému se říká strukturní element. Ten nemusí být pouze čtvercový, ale může nabývat jakýkoli tvar. Element projíždí obrazem a počítá nové hodnoty pixelů (0-255):

$$I_d = \begin{cases} \max(SE + I) & \text{když } \max(SE + I) \leq 255 \\ 255 & \text{když } \max(SE + I) > 255 \end{cases} \quad (7.3)$$

$$I_e = \begin{cases} \min(I - SE) & \text{když } \min(I - SE) \geq 0 \\ 0 & \text{když } \min(I - SE) < 0 \end{cases} \quad (7.4)$$

kde:  $SE$  je strukturní element,

$I$  je část obrazu překrytá strukturním elementem,

$I_d$  je nová hodnota pixelu při dilataci,

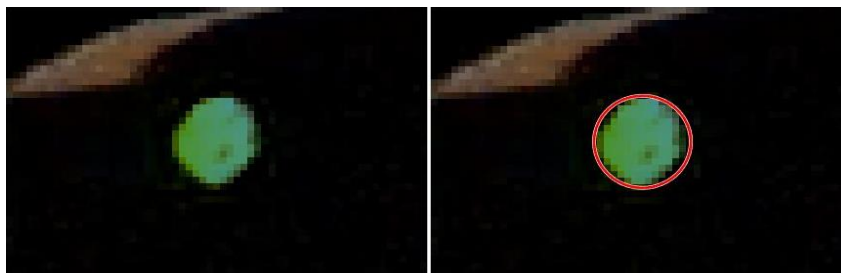
$I_e$  je nová hodnota pixelu při erozi.

Dilatovaný obraz je celkově zesvětlený a hranice objektů na pozadí jsou rozšířeny a ty které byly blízko sebe jsou spojeny. Erodivaný obraz je celkově ztmavený. Objekty v popředí se zmenší, a ty dříve spojené tenkými liniemi se rozpojí. Kombinací eroze a dilatace vznikne otevřený obraz. Ten zachovává objekty podobného tvaru jako je strukturní element a potlačuje objekty menší. Kombinací v obráceném pořadí vzniká uzavřený obraz, který zachovává objekty na pozadí podobné strukturnímu elementu. Výsledky otevření a uzavření obrazu jsou podobné výsledkům eroze a dilatace, ale jsou méně destruktivní.

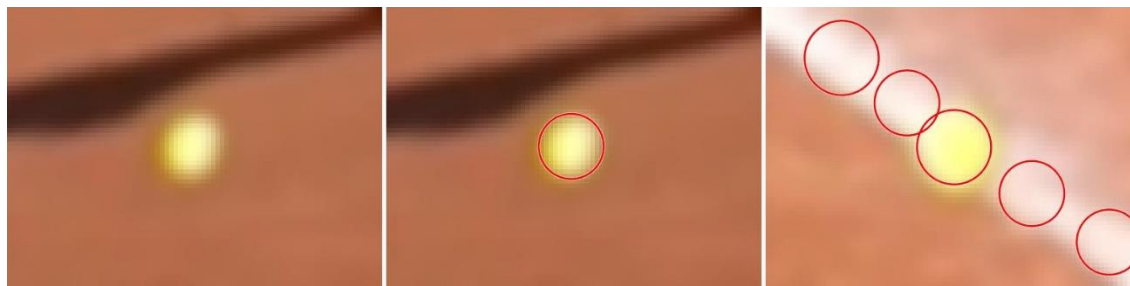
Top-hat filtr je definovaný odečtením otevřeného obrazu od původního, a zachovává objekty menší, než je strukturální element a světlejší než jejich okolí. Na snímky byl aplikován se strukturálním elementem kruhového tvaru o poloměru 20 pixelů. Výsledky jsou poměrně dobré (Obr. 22), jen tvar míče je někdy trochu deformovaný.



Obr. 18: Diferenční snímky. Zleva: diferenční snímek; detekovaný kroužek; příklad špatné detekce.



Obr. 19: Ukázka detekce míče na snímku s odstraněným pozadím.



Obr. 20: Snímky upravené Gaussovým filtrem. Zleva: filtrovaný snímek; detekovaný kroužek; příklad neideální detekce.



Obr. 21: Snímky upravené top-hat filtrem. Zleva: filtrovaný snímek; detekovaný kroužek; příklad dobré detekce v neideálních podmínkách.

Dobré výsledky podávali všechny metody s výjimkou diferenčního snímku. Jako nejspolehlivější se s minimem špatných detekcí ukázala metoda odstranění pozadí protože na rozdíl od Gaussova filtru a top-hat filtru není citlivá na situace kdy míč přechází přes světlejší oblast (např.: bílé čáry na hřišti). Nakonec byla použita kombinace odstranění pozadí a následné aplikace Gaussova filtru pro potlačení šumu.

### 7.3.3. Vyhlazení detekované trajektorie

Detekce středu míče není na všech snímcích dokonalá a vnikají drobné chyby i v řádu jednotek pixelů. Může ale dojít i k naprosto chybné detekci, nebo k selhání detektoru. V takovém případě je nutné chybné měření odstranit. To se děje proložením měřených hodnot křivkou.

Odstranění odlehlých měření a vyhlazení trajektorie probíhalo iteračním výpočtem. Vektor měření polohy míče byl rozdělen na dvě složky, polohu v ose  $x$  a polohu v ose  $y$ . Měření pro každou osu zvlášť bylo, metodou nejmenších čtverců, proloženo kubickou parabolou a pokud odchylka nejdlehlějšího měření přesáhla toleranci, bylo měření odstraněno. Výpočet byl opakován, dokud nebyla odstraněna všechna měření přesahující toleranci. Pro vyhlazení pohybu v ose  $x$  byla tolerance 5 pixelů, v ose  $y$  3 pixely. Hodnota pro osu  $x$  je větší, protože i pohyb v této ose byl výraznější. Tolerance byly stanoveny empiricky, tak aby odfiltrovali jen hrubé chyby. Souřadnice středů míče pro jednotlivé snímky byly určeny dosazením čísla snímku do předpisu regresní křivky:

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d \\ a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d \end{pmatrix}, \quad (7.5)$$

kde:  $a, b, c, d$  jsou koeficienty proložené kubické paraboly,  
 $t$  je pořadí snímku v sekvenci.

K výpočtu souřadnic ve 3D prostoru je dále nutné určit prvky vnější orientace kamer a zjistit rozměry senzoru a velikost pixelu u snímků z videa.

#### 7.4. Výpočet prvků vnější orientace

K výpočtu souřadnic ve 3D prostoru je nutné určit prvky vnější orientace kamer a zjistit rozměry senzoru a velikost pixelu u snímků z videa. Orientace byla řešena ze dvou snímků pořízených před natáčením videí (Příloha 4). Oblast překrytu zabírá zhruba 40% - 50% snímků, ale vhodných kandidátů na spojovací body je málo, protože většinu snímku tvoří monotónní povrch hřiště. Celkem bylo použito 9 bodů (Obr. 23) a orientace byla vyřešena s přesností 0,85 pixelu a maximální chybou v referencování 0,88 pixelu. Protokol výpočtu je přiložen v přílohách (Příloha 5) a prvky vnější orientace ukazuje tabulka (Tab. 4). Souřadnice kamer  $[X, Y, Z]$  jsou bezrozměrné. Model bude absolutně orientován až při určení souřadnic trajektorie.

Tab. 4: Prvky vnější orientace snímků.

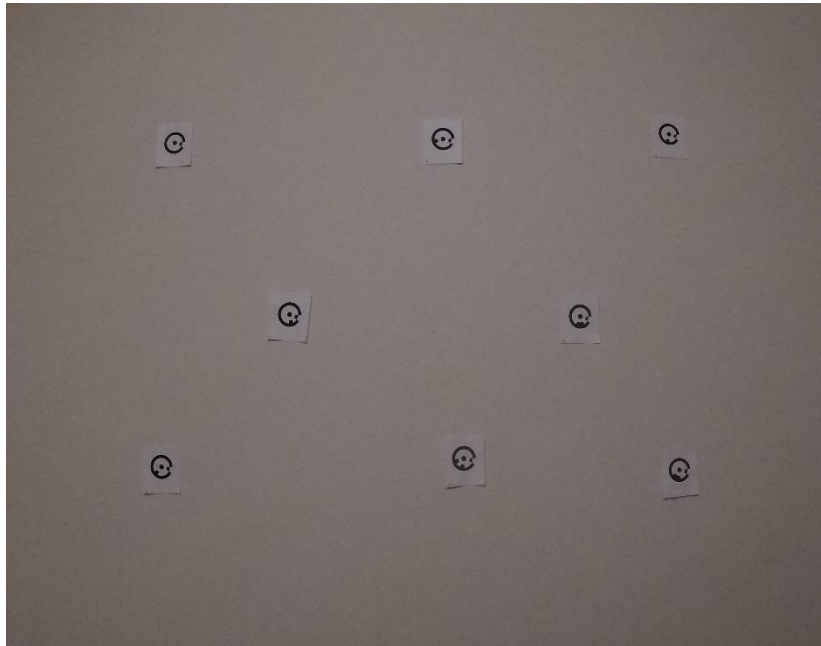
kamera		X	Y	Z	$\omega$ [°]	$\varphi$ [°]	$\kappa$ [°]
Levá	hodnota	-0,0002	-0,00037	0,0002	0,0273	-0,0081	0,0139
	odchylka	0,002	0,0004	0,001	0,055	0,111	0,061
Pravá	hodnota	0,7094	0,2565	-1,0022	-129,6033	65,7791	151,9398
	odchylka	0,001	0,002	0,003	0,169	0,148	0,135



Obr. 22: Schématické rozložení bodů použitých pro výpočet prvků vnější orientace.

## 7.5. Převod snímkových souřadnic videa

Vliv FOV na velikost pixelu a snímacího senzoru při zachování stejného rozlišení byl již diskutován (kap. 5.1.). Pokud zůstane FOV stejné, ale změní se rozlišení snímků, parametry se také změní. Velikost pixelu snímků z videa byla zjištěna pomocí malého kalibračního pole (Obr. 24), které bylo vyfoceno jak v 12 MP rozlišení, tak v rozlišení 1920 x 1080 pixelů odpovídajícím snímkům videa. Kamera byla umístěna na stativ a ovládána dálkově aby měli oba snímky totožnou vnější orientaci.



Obr. 23: Kalibrační pole pro určení velikosti pixelu snímků videa.

Na kalibračním poli je 8 kódových cílů, jejichž souřadnice byly na obou snímcích přesně určeny v PhotoModeleru. Dále byly spočítány vzdálenosti mezi všemi body a velikost pixelu byla vypočítána dosazením vzdáleností do vzorce:

$$p_v = \frac{p_s n}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{ds_i}{dv_i} \right)}, \quad (7.6)$$

kde:  $p_s$  je velikost pixelu u 12 MP snímku (0,77  $\mu\text{m}$ ),  
 $n$  je celkový počet měřených vzdáleností,  
 $ds$  a  $dv$  jsou korespondující vzdálenosti.

Výsledkem je velikost pixelu 1,547  $\mu\text{m}$ , což odpovídá hodnotě 1,54  $\mu\text{m}$  která je již známá (kap. 5.1.). Malá odchylka je pravděpodobně způsobena chybami v detekci

bodů. Vliv zde naopak nehraje distorze, protože body jsou na obou snímcích zobrazeny ve stejné vzdálenosti od středu snímku.

Převod souřadnic videa na souřadnice velkého snímku (12 MP) je následující:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix}, \quad (7.7)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} = \frac{\begin{pmatrix} 4000 \\ 3000 \end{pmatrix} - 2 \begin{pmatrix} 1920 \\ 1080 \end{pmatrix}}{2}. \quad (7.8)$$

Souřadnice videa jsou násobeny dvakrát, kvůli dvojnásobné velikosti pixelu. Opravy  $\Delta x$  a  $\Delta y$  jsou souřadnicemi počátku soustavy souřadnic videa, vyjádřenými v souřadnicích velkého snímku.

## 7.6. Výpočet prostorových souřadnic

Souřadnice trajektorie byly podle rovnic (7.7 a 7.8) převedeny na souřadnicový systém kompatibilní s prvky vnější orientace a poté byla spočtena trajektorie nadhozu v prostoru. Výpočet byl proveden dvojím způsobem. V PhotoModeleru a v MATLABu.

### PhotoModeler:

Program PhotoModeler neumožňuje import bodů o daných snímkových souřadnicích. Pro polohu míče v každé epoše bylo vygenerováno žluté kolečko o poloměru 13 pixelů. Všechna kolečka, simulující polohu míče byla vložena do dvou snímků (Obr. 24), které byly naimportovány do PhotoModeleru. Poloměr koleček byl zvolen co největší, ale aby se kolečka nepřekrývala. Čím větší je totiž poloměr, tím přesněji lze reprezentovat střed kolečka se sub-pixelovou přesností. Středů byly detekovány detektorem kruhových cílů. Při převodu souřadnic byla rovnice (7.7) upravena na tvar:

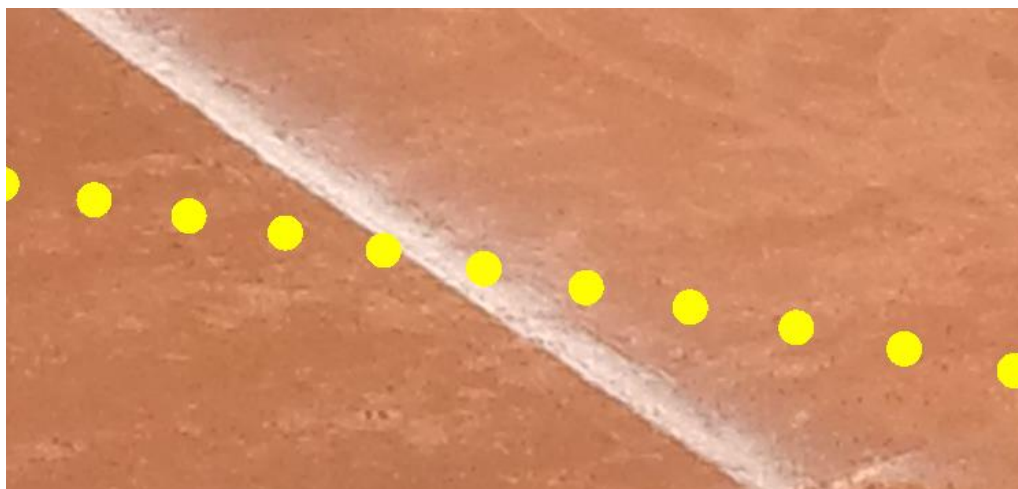
$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} x_v \\ y_v \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{pmatrix} - 0,5, \quad (7.9)$$

protože MATLAB značí pixely od středu, zatímco PhotoModeler od levého horního rohu. Souřadnice [1; 1] tak odpovídají souřadnicím [0,5; 0,5], takže je nutné je o polovinu pixelu opravit. Po porovnání nově detekovaných souřadnic středů s původními souřadnicemi byla zjištěna téměř konstantní chyba 1,4 pixelu (Příloha 6), což převedeno



na pixely videa činí pouze 0,7 pixelu. Nejpravděpodobnější příčinou chyby je příliš malý poloměr koleček, které ale nemohou být zvětšeny kvůli překrytu.

Výpočet prostorových souřadnic byl následován určením absolutní orientace modelu. Měřítko bylo určeno ze známé vzdálenosti 14,02 m mezi domácí a nadhazovací metou. Orientace v prostoru byla zajištěna vložení os  $X$  a  $Y$  do čar, které obě vycházejí z domácí mety, svírají úhel  $90^\circ$  a ohraničují hřiště. Nakonec byl počátek soustavy souřadnic vložen do zadního rohu domácí mety.



Obr. 24: Detail snímku se žlutými kolečky reprezentujícími míč.

#### MATLAB:

Vztah pro převod snímkových souřadnic na prostorové udávají rovnice kolineární transformace (7.10) a (7.11). Každý snímek produkuje dvě rovnice, čímž vzniká přeúčtený systém s jedním nadbytečným měřením.

$$X = X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}x + r_{12}y - r_{13}f}{r_{31}x + r_{32}y - r_{33}f}, \quad (7.10)$$

$$Y = Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}x + r_{22}y - r_{23}f}{r_{31}x + r_{32}y - r_{33}f}, \quad (7.11)$$

kde:  $[X; Y; Z]$  jsou prostorové souřadnice,

$[x; y; f]$  jsou souřadnice míče v souřadnicovém systému kamery.

Pokud od sebe obě rovnice (7.10) pro oba snímky odečteme, dostaneme vztah pro výpočet výšky bodu ( $Z$ ):

$$Z = \frac{X_{02} - X_{01} - Z_{02}k_2 + Z_{01}k_1}{k_1 - k_2}, \quad (7.12)$$

kde:  $k_1, k_2$  jsou vyčíslené hodnoty zlomku v rovnici (7.10).

Dosazením výšky do rovnic (7.10) a (7.11) jsou vypočteny zbylé souřadnice. Pro osu  $Y$  vyjdou dvě různé souřadnice, které se zprůměrují. Pro osu  $X$  vyjde dvě stejné hodnoty. Postup je možno změnit a hodnotu v ose  $Z$  spočítat odečtením rovnic (7.11). V takovém případě vyjdou dvě různé hodnoty  $X$  a dvě stejné hodnoty  $Y$ . Prvky vnější orientace nutné k výpočtu byly převzaty z výsledků v PhotoModeleru.

Model byl absolutně orientován opět podle čtyř bodů, totožných s postupem v PhotoModeleru. Jejich souřadnice v obou soustavách byly převzaty a sedmi-prvkovou Helmertovou transformací byl vypočten transformační klíč (Tab. 5). Po aplikaci transformace na identické body byly zjištěny malé odchylky souřadnic vůči PhotoModeleru (Tab. 6), který pravděpodobně používá jiný druh transformace, nebo jiný postup.

Tab. 5: Hodnoty transformačního klíče Helmertovy transformace pro absolutní orientaci modelu.

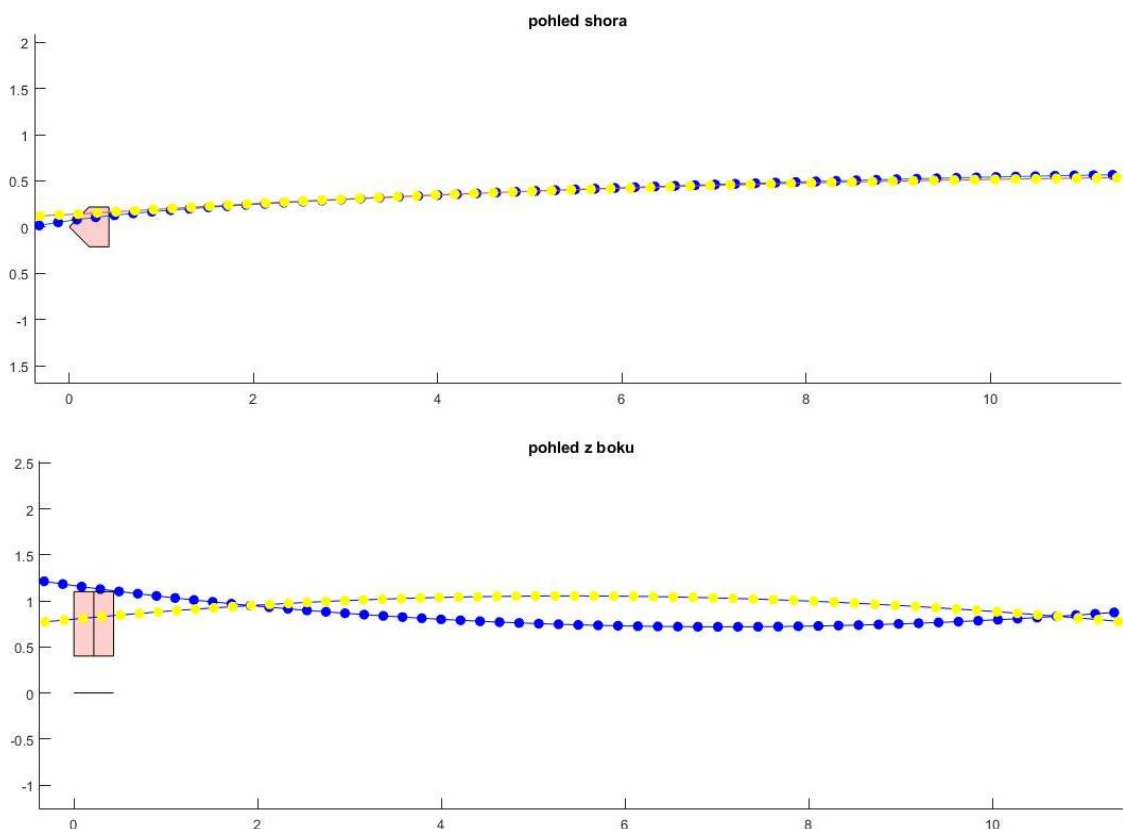
Transformační klíč		
	hodnota	odchylka
tX [m]	-7,4803	0,0035
tY [m]	4,0224	0,0035
tZ [m]	3,2793	0,0046
Omega [°]	224,85295	0,00038
Fi [°]	25,08412	0,00034
Kapa [°]	171,37940	0,00025
měřítko [m]	13,1124	0,0032

Tab. 6: Porovnání polohy identických bodů v programech PhotoModeler a MATLAB.

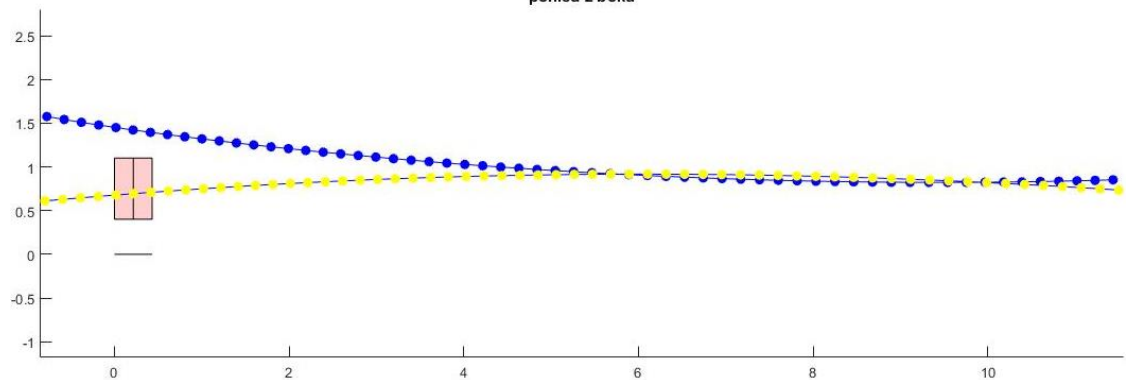
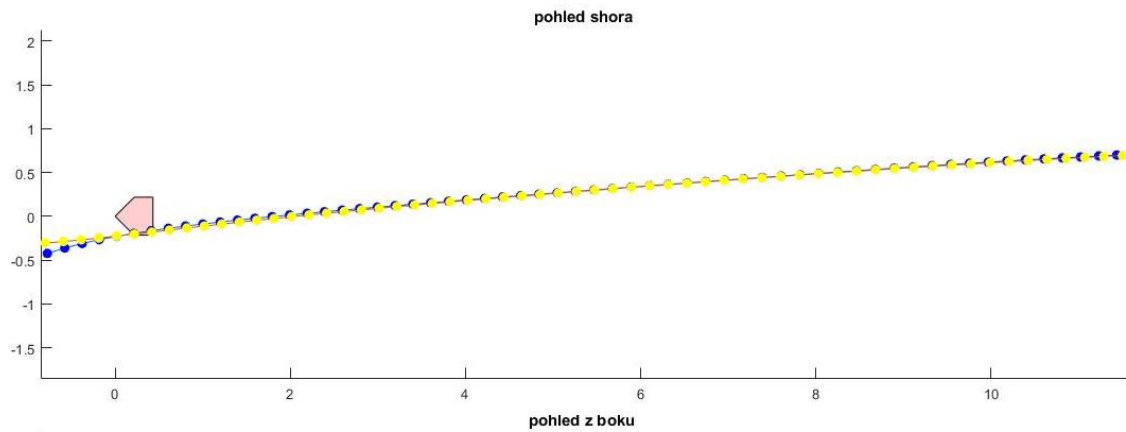
	ID1		ID2		ID3		ID4	
	PM	MATLAB	PM	MATLAB	PM	MATLAB	PM	MATLAB
X [m]	0,000	0,001	9,725	9,726	-0,111	-0,113	7,898	7,898
Y [m]	0,000	0,003	10,098	10,099	7,661	7,659	0,000	-0,001
Z [m]	0,000	0,003	0,065	0,067	0,000	-0,002	0,000	-0,002

## 8. Prezentace výsledků

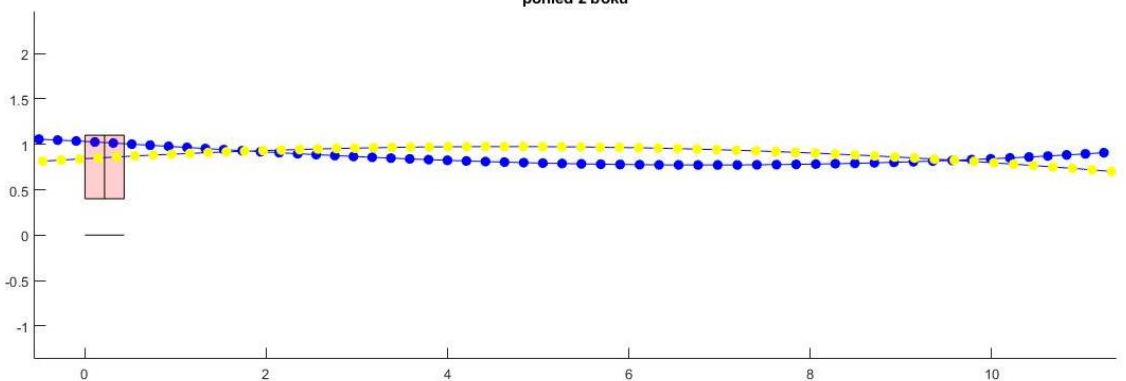
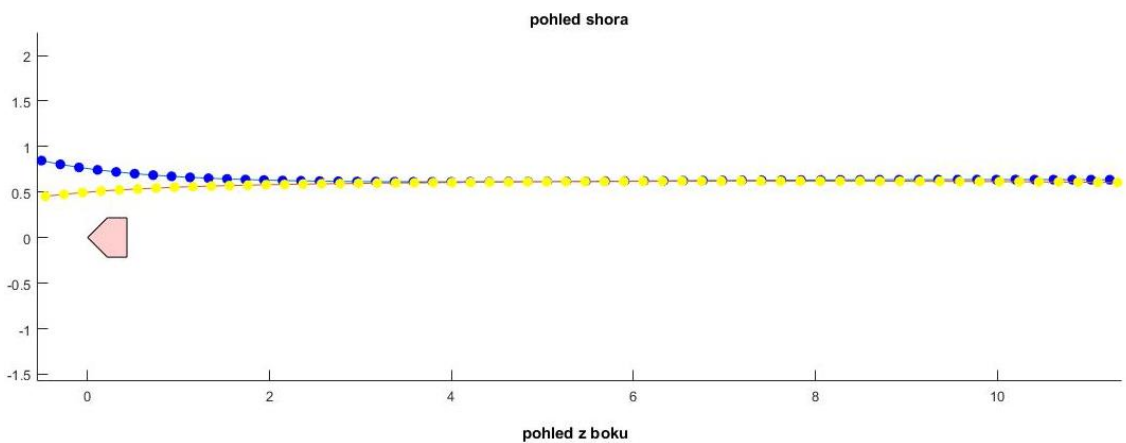
V MATLABu a PhotoModeleru byly zpracovány celkem tři nadhozy. Rozdíl výsledků získaných oběma postupy je velmi výrazný. Trajektorie z PhotoModeleru ukazuje, že nadhoz, díky počátečnímu impulzu od nadhazovače, lehce vystoupal a poté začal klesat. Zároveň se stáčil z levě strany strike-zóny doprava, což odpovídá skutečnosti, že nadhazovačem byl pravák. Výsledky z MATLABu naopak ukazují až nereálně stoupavou trajektorii nadhozu. Pro každý nadhoz byly vytvořeny výstupy znázorňující trajektorii nadhozu při pohledu z boku a shora (Obr. 25, 26, 27). Pro lepší přehlednost situace byly vytvořeny i prostorové modely (Obr. 28) a (Příloha 7). Co se týče polohy v osách  $X$  a  $Y$ , jsou obě trajektorie podobné. Hlavní rozdíl je v ose  $Z$  (Graf 4) a (Příloha 8). Realitě blíže jsou výsledky z PhotoModeleru.



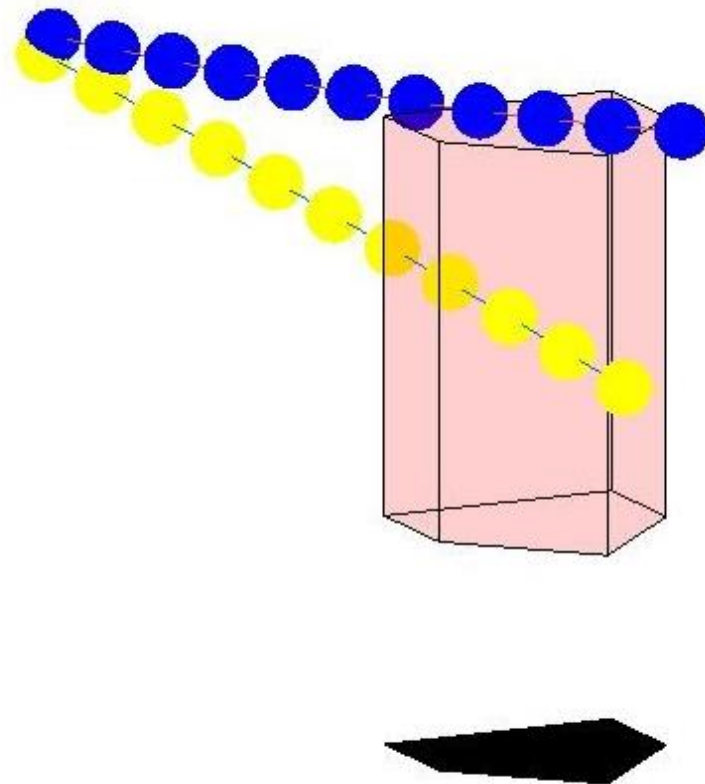
Obr. 25: Nadhoz 1 - trajektorie. Žlutá - PhotoModeler, modrá - MATLAB.



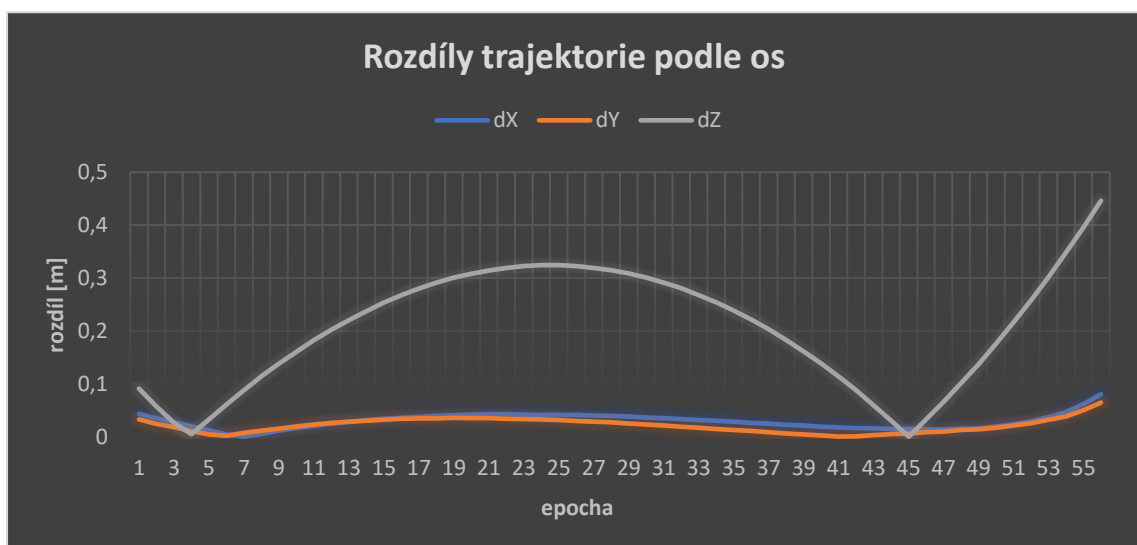
Obr. 26: Nadhoz 2 - trajektorie. Žlutá - PhotoModeler, modrá - MATLAB.



Obr. 27: Nadhoz 3 - trajektorie. Žlutá - PhotoModeler, modrá - MATLAB.

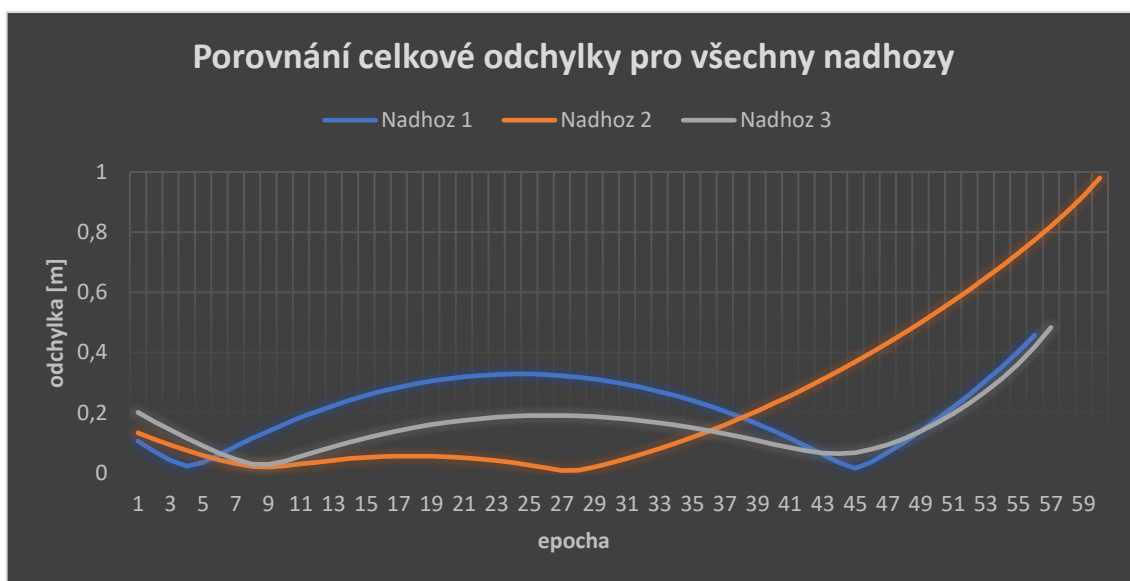


Obr. 28: Nadhoz 1 - Detail na průlet míče strike-zónou. Žlutá - PhotoModeler, modrá - MATLAB.



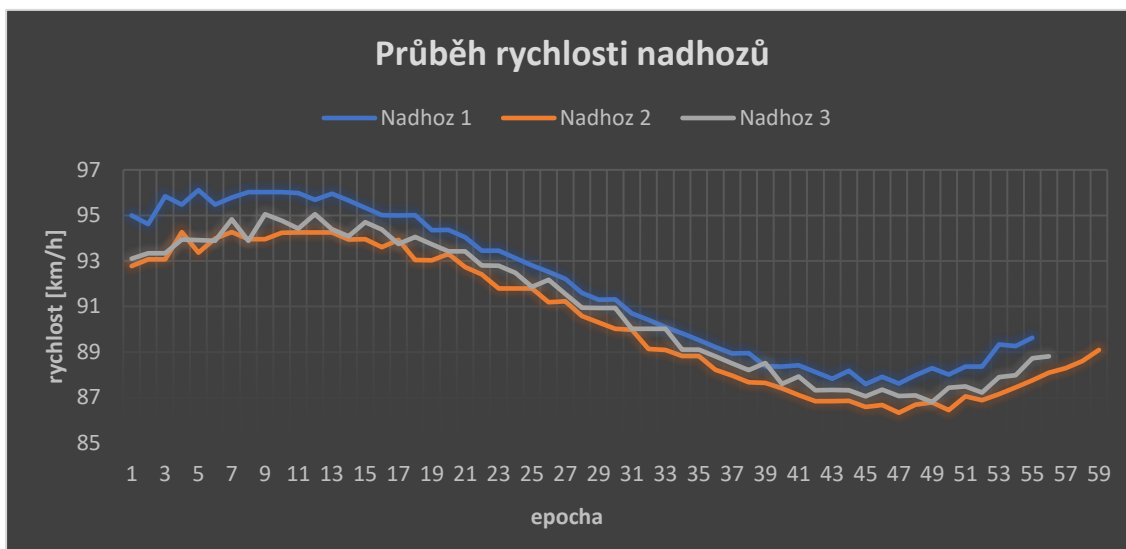
Graf 4: Porovnání trajektorie nadhozu 1 z obou softwarů podle jednotlivých os.

Zajímavé je, že rozdíl ve všech osách má podobný trend. Nejprve se zmenšuje, brzo však začne opět růst. Přibližně v polovině vzdálenosti se trend opět změní a několik epoch před koncem dojde opět k rychlému nárůstu odchyly. Podobné chování bylo sledováno u všech vyhodnocených nadhozů. Pro úplnost je uvedeno i porovnání celkové odchyly pro všechny nadhozy (Graf 5).



Graf 5: Porovnání celkových odchylek trajektorií vypočtených v PhotoModeleru a v MATLABu.

Sledována byla též rychlost nadhozů a její průběh (Graf 6). I zde je patrná jistá nesrovnalost. Rychlost nadhozu po vypuštění míče nadhazovačem začne stoupat, krátce nato klesat a několik epoch před koncem trajektorie opět stoupat. Klesání rychlosti v průběhu nadhozu je v pořádku a odpovídá realitě, naopak zrychlení ať už těsně po vypuštění, nebo kdekoli jinde v celé délce trajektorie je nesmysl. Vzhledem k průběhu rychlosti, nelze určit, jak moc se míč v letu zpomaluje. Alespoň průměrnou rychlost ale určit lze. Celkové vyhodnocení nadhozů je uvedeno v tabulce (Tab. 7).



Graf 6: Porovnání rychlosti nadhozů (PhotoModeler).

Tab. 7: Zhodnocení nadhozů.

	Zpracováno v:	Strike / Ball	Rychlost [km/h]	Počet epoch
Nadhoz 1	PM	Strike	91,89	56
	MATLAB	Strike	91,52	
Nadhoz 2	PM	Strike	90,35	60
	MATLAB	Ball	90,12	
Nadhoz 3	PM	Ball	90,94	57
	MATLAB	Ball	90,62	

Za předpokladu, že výsledky získané výpočtem ve PhotoModeleru jsou přesnější, byly dva nadhozy dobré (*strike*) a jeden špatný (*ball*). Výsledky z MATLABu se liší, ale jen kvůli špatně určené poloze v ose Z. Pokud by byla uvažována jen rovina XY, byly by výsledné počty dobrých a špatných nadhozů stejné. Důvody rozdílnosti výsledků jsou diskutovány v následující kapitole.

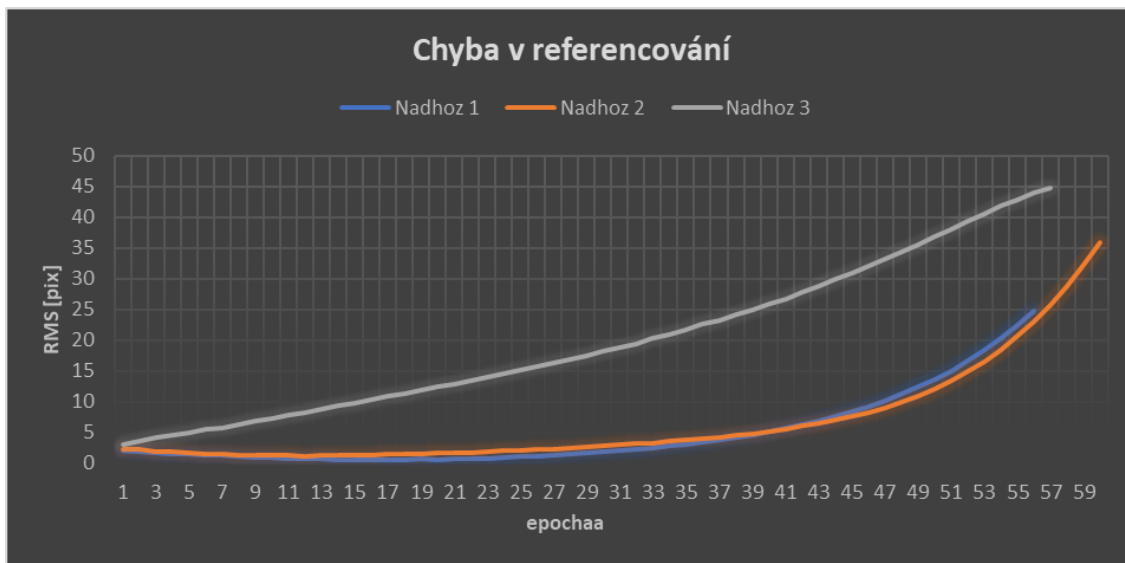
## 9. Závěr

Byl proveden experiment zahrnující natočení části softballového zápasu a následné zpracování tří vybraných nadhozů z pořízených videozáznamů. K natočení byly použity dvě kamery GoPro HERO 5 Black Edition. Ohledně vhodnosti kamer pro experiment panovali jisté obavy týkající se hlavně kvality obrazu a viditelnosti míče na snímcích. Obavy se však ukázali jako liché a míč byl na snímcích dobře identifikovatelný. Použití metody odstranění pozadí a Gaussova filtru pro úpravu snímku pro detekci míče se ukázalo jako vhodné, s minimem nesprávných detekcí. Prostorové souřadnice trajektorie nadhozů byly vypočteny zvlášť v MATLABu i v PhotoModeleru.

Mezi oběma použitými postupy se objevily výrazné rozdíly v trajektorii nadhozu, zejména pak v ose Z. Pravděpodobným viníkem těchto neshod je chyba v referencování bodů, která na počátku trajektorie dosahovala hodnot několika jednotek pixelů, ale postupně narůstala až na několik desítek pixelů (Graf 7). Takový nárůst chyby naznačuje, že by se mohlo jednat o narůstající chybu v synchronizaci. Synchronizace kamer ale byla kontrolována a na osmi minutovém videu s rychlostí snímání 120 fps byl zaznamenán vzájemný posun pouze o jeden snímek. V rámci jednoho nadhozu, který je počítán z přibližně 58 snímků se tato chyba neprojeví. Další možností je narůstající chyba v detekci míče na snímcích. Postup detekce byl ale vyladěn tak, aby maximální chyby byly maximálně několik pixelů. Nejpravděpodobnější příčinou je deformace modelu při určování relativní orientace v důsledku nevhodného rozmístění spojovacích bodů. Z průběhu odchylek (Graf 4,5) a průběhu rychlosti (Graf 6) lze rozpoznat dva uzly, ve kterých většina sledovaných odchylek i rychlost nadhozu mění svůj trend. Tyto uzly se nacházejí v oblastech bez spojovacích bodů, což napovídá, že relativní orientace není vyřešena úplně přesně a model je deformovaný.

PhotoModeler nejspíše dokáže s chybou v referencování pracovat, zařadit ji do výpočtu a opravit podle ní vypočtenou polohu bodu v prostoru. Při výpočtu polohy v MATLABu byly využity jen základní vztahy (7.10 - 7.12). I když základní postup bude v obou případech stejný, PhotoModeler aplikuje opravy souřadnic, které vedou k lepším výsledkům než v případě výpočtu v MATLABu.





Graf 7: Průběh chyby v referencování.

Posouzení přesnosti trajektorií je náročné. Protože byly použity jen dvě kamery, postrádají výsledky informaci o přesnosti polohy. Hodnotil lze trajektorie alespoň vizuálně na základě zkušeností a z takového hodnocení plyne závěr, že výsledky z PhotoModeleru jsou přesnější a reálné trajektorii nadhozu bližší než výsledky z MATLABu.

System by se dal v praxi teoreticky využít při zápasech k rozhodnutí o průletu míče strike-zónou, nebo při tréninku nadhazovačů, kteří by zpětně viděli, kam a jakou rychlostí nadhoz umístili. Zásadní překážkou je však rychlost vyhodnocování. Použité postupy jsou jednotlivě vzato dobré, ale kvůli nutnosti přeskokovat při zpracování mezi více softwary, netvoří kompaktní systém. Část výpočtu, zahrnující detekci míče, probíhající v MATLABu je poloautomatická a rychlostí zpracování dostatečná. Výpočet prostorových souřadnic je nutné provést v PhotoModeleru, což je proces manuální a časově náročný. K překlenutí tohoto problému je nutné převést všechny úkony do MATLABu a zajistit spolehlivý výpočet trajektorie. Za tím účelem by bylo vhodné jednak použít více spojovacích bodů v celé ploše překrytu snímků a také nasazení vyššího počtu kamer. Lépe řešená relativní orientace a více nadbytečných měření by měli zajistit, že chyba v referencování bodů bude menší a poloha vypočtená v MATLABu spolehlivější a přesnější. Dalšího vylepšení přesnosti by šlo dosáhnout zajištěním přesnější synchronizace videí. Během experimentu se ukázalo, že synchronizace při použití

běžného dálkového ovladače nemusí být dostatečná. Vhodné by bylo doplnit kamery o přídavné zařízení (časovač), který by zapnul nahrávání na všech kamerách současně.

V případě budoucí práce na tomto, či podobném systému, by bylo kromě vyššího počtu kamer použít i kamery s lepším rozlišením, aby bylo možné je umístit do větší vzdálenosti a pokrýt větší území (celé hřiště). Systém by se tak dal použít nejen pro sledování trajektorie nadhozu, ale rozšířit sledování na celé hřiště a měřit například i dopad a rychlost odpalů atd. Vhodné by také bylo zavedení plně automatické detekce míče v okamžiku, kdy se objeví na scéně. Nynější nutnost označení jeho polohy na prvních snímcích sekvence je opět faktorem limitujícím rychlost zpracování. V případě plně funkčního systému se schopností sledování míče kdekoli na hřišti by bylo možné jej aplikovat, v kombinaci s vyhodnocovacím systémem, například ke generování zápisu o utkání, nebo jako UI (umělá inteligence) rozhodčího.

## 10. Seznam referencí

- [1] Dehghan, A.; Idrees, H.; Roshan, A.R.; Shah, M. Automatic Detection and Tracking of Pedestrians in Videos with Various Crowd Densities. In *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*; Weidmann, U., Kirsch, U., Schreckenberg, M., Eds.; 2012; pp 3–19. ([https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-02447-9\\_1#citeas](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-02447-9_1#citeas))
- [2] Kayacan, E.; Herman, R.; Wouter, S. Robust Trajectory Tracking Error Model-Based Predictive Control for Unmanned Ground Vehicles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* **2016**, *21* (2), 806–814. (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7302059/>)
- [3] Lindner, G.; Schraml, K.; Mansberger, R.; Hübl, J. UAV monitoring and documentation of a large landslide. *Applied Geomatics* **2016**, *8* (1), 1–11. (<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs12518-015-0165-0#citeas>)
- [4] Corazza, S.; Gambaretto, E.; Mündermann, L.; Andriacchi, T.P. Automatic Generation of a Subject-Specific Model for Accurate Markerless Motion Capture and Biomechanical Applications. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* **2010**, *57* (4), 806–812. (<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4682716/>)
- [5] Shan, G.; Westerhoff, P. Full-body kinematic characteristics of the maximal instep Soccer kick by male soccer players and parameters related to kick quality. *Sports Biomechanics* **2005**, *4* (1), 59–72. (<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/14763140508522852>)
- [6] Phantom VEO 4K PL for film and media. Adept Turnkey web. [http://www.adept.net.au/cameras/visionresearch/PhantomVEO4K\\_film.shtml](http://www.adept.net.au/cameras/visionresearch/PhantomVEO4K_film.shtml) (accessed April 23, 2018).
- [7] HIGH SPEED CAMERA SELECTION GUIDE. Megaspeed web. [http://www.avicon.pl/sites/default/files/industrial\\_low\\_res\\_email\\_ver\\_4.5.pdf](http://www.avicon.pl/sites/default/files/industrial_low_res_email_ver_4.5.pdf) (accessed April 23, 2018). (<http://megaspeedusa.com>)
- [8] Papert, S. The Summer Vision Project. Summer project, Massachusetts Institute of Technology, 1966-07-01.
- [9] Meer, P. Introduction to computer vision. Rutgers. <http://soe.rutgers.edu/~meer/UGRAD/cv1intro.pdf> (accessed May 14, 2018).
- [10] Pešek, O. Mask R-CNN in GRASS GIS. Diplomová práce, ČVUT, 20.5.2018.
- [11] Parthasarathy, D. A Brief History of CNNs in Image Segmentation: From R-CNN to Mask R-CNN, 2017. Athelas. <https://blog.athelas.com/a-brief-history-of-cnns-in-image-segmentation-from-r-cnn-to-mask-r-cnn-34ea83205de4> (accessed May 15, 2018).
- [12] Shuo, H.; Na, W.; Huajun, S. Object Tracking Method Based on SURF. AASRI Procedia [Online] 2012, *3*, 351-356. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212671612002144> (accessed May 17, 2018).
- [13] Joshan Athanesious, J.; Suresh, P. Implementation and Comparison of Kernel and Silhouette Based Object Tracking. IJARCET [Online] 2013, *2*, 1298-1303. <http://ijarcet.org/?p=338> (accessed Feb 17, 2018).

- [14] Gage, S. Hawk-Eye at Wimbledon: it's not as infallible as you think, 2013. The Guardian. <https://www.theguardian.com/science/sifting-the-evidence/2013/jul/08/hawk-eye-wimbledon> (accessed May 17, 2018).
- [15] Baodong, Y. Hawkeye technology using tennis match. Computer modeling and new technologies [Online] 2014, 18, 400-40. [http://www.cmnt.lv/upload-files/ns\\_23crt\\_067.pdf](http://www.cmnt.lv/upload-files/ns_23crt_067.pdf) (accessed May 17, 2018).
- [16] McDermott, J. The impact of the Hawk-eye system in tennis, 2011. Training with James. <https://trainingwithjames.wordpress.com/research-papers/the-impact-of-the-hawk-eye-system-in-tennis/> (accessed May 17, 2018).
- [17] Hawk-eye in tennis. Hawk-eye web. <https://www.hawkeyeinnovations.com/sports/tennis> (accessed May 17, 2018).
- [18] History of Softball. WBSC. <http://www.wbsc.org/softball/history-of-softball/> (accessed May 18, 2018).
- [19] (Velázquez, T. 2018-2021 Official rules of softball, 2017. WBSC. <http://www.wbsc.org/wp-content/uploads/ENGLISH-2018-2021-WBSC-Fast-Pitch-Playing-Rules-A4.pdf> (accessed April 26, 2018).
- [20] Wikipedia - Strike zone. [https://en.wikipedia.org/wiki/Strike\\_zone](https://en.wikipedia.org/wiki/Strike_zone) (accessed May 18, 2018).
- [21] Baodong, Y. Hawkeye technology using tennis match. Computer modeling and new technologies [Online] 2014, 18, 400-40. [http://www.cmnt.lv/upload-files/ns\\_23crt\\_067.pdf](http://www.cmnt.lv/upload-files/ns_23crt_067.pdf) (accessed May 17, 2018).
- [22] Harriw, W. How the Physics of Baseball Works, 2012. howstuffworks. <https://entertainment.howstuffworks.com/physics-of-baseball10.htm> (accessed April 27, 2018).
- [23] pitchsoftball. <http://www.pitchsoftball.com/Page11.html> (accessed May 16, 2018).
- [24] Baseball Field Sample. Concept Draw. <http://www.conceptdraw.com/How-To-Guide/baseball-field-sample> (accessed May 17, 2018).
- [25] HERO5 Black Field of View (FOV) Information. GoPro. [https://gopro.com/help/articles/Question\\_Answer/HERO5-Black-Field-of-View-FOV-Information](https://gopro.com/help/articles/Question_Answer/HERO5-Black-Field-of-View-FOV-Information) (accessed May 10, 2018).
- [26] HERO3+ Black Edition Field of View (FOV) Information. GoPro. [https://gopro.com/help/articles/question\\_answer/HERO3-Black-Edition-Field-of-View-FOV-Information](https://gopro.com/help/articles/question_answer/HERO3-Black-Edition-Field-of-View-FOV-Information) (accessed May 10, 2018).
- [27] Lens Technology. Fujifilm. [http://www.fujifilm.com/products/digital\\_cameras/xf\\_lens/about/aspherical\\_lens/](http://www.fujifilm.com/products/digital_cameras/xf_lens/about/aspherical_lens/) (accessed May 17, 2018).

[28] Ricolfe-Viala, C.; Sánchez-Salmerón, A. Lens Distortion Models Evaluation. *Appl. Opt.* 2010, 49 (30), 5914–5928.

[29] Hieronymus, J. COMPARISON OF METHODS FOR GEOMETRIC CAMERA CALIBRATION. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXII ISPRS Congress; , Ed.; 2012; pp 595–599.

[30] Drap, P.; Lefèvre, J. An Exact Formula for Calculating Inverse Radial Lens Distortions. *Sensors* [Online] 2016, 16, 807. <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/6> (accessed May 11, 2018).

## 11. Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma umístění kamer systému Hawk-eye při tenisovém zápase [16].....	13
Obr. 2: Ukázka záznamu dopadu míče, ze systému Hawk-eye [17].....	13
Obr. 3: Pětiboký hranol, nad domácí metou, definující strike-zónu. A standartní pozice pálkaře, chytače a rozhodčího během zápasu [20].....	15
Obr. 4: Vliv Magnusova jevu na trajektorii softballového nadhozu se stoupavou rotací [23]. ..	17
Obr. 5: Možné rozmístění kamer okolo hřiště. Červená kolečka - kamery; žlutá čára - trajektorie nadhozu [24]. ..	18
Obr. 6: GoPro HERO 3+ Black Edition.....	19
Obr. 7: GoPro HERO 5 Black Edition.....	19
Obr. 8: Porovnání sbíhavosti paprsků v ohnisku pro sférickou čočku (vlevo) a asférickou čočku (vpravo) [27].....	20
Obr. 9: Závislost velikosti snímacího senzoru na FOV. Modrá - narrow; tyrkysová - medium; zelená - wide. ....	23
Obr. 10: Možné uspořádání pixelů různé velikosti na sensoru. Modrá - 077 $\mu\text{m}$ , červená - 1,54 $\mu\text{m}$ . ....	23
Obr. 11: Kalibrační pole použité pro kalibraci kamer.....	25
Obr. 12: Snímek kalibračního pole, s odstraněnou radiální distorzí. ....	27
Obr. 13: umístění kamer při natáčení během softballového zápasu.....	29
Obr. 14: Porovnání odpovídajících si snímků z hrubě synchronizovaných sekvencí (zdrojem jsou videa pořízení mimo experiment). ....	30
Obr. 15: Zřetelný útvar na zvukové stopě, vniklý v okamžiku, kdy chytač chytil nadhoz. ....	31
Obr. 16: A - zvukové stopy v původních pozicích, B - synchronizované zvukové stopy.....	32
Obr. 17: Transformace přímky z roviny (x, y) do roviny (a, b).....	33
Obr. 18: Diferenční snímky. Zleva: diferenční snímek; detekovaný kroužek; příklad špatné detekce.....	36
Obr. 19: Ukázka detekce míče na snímku s odstraněným pozadím. ....	36
Obr. 20: Snímky upravené Gaussovým filtrem. Zleva: filtrovaný snímek; detekovaný kroužek; příklad neideální detekce.....	36
Obr. 21: Snímky upravené top-hat filtrem. Zleva: filtrovaný snímek; detekovaný kroužek; příklad dobré detekce v neideálních podmínkách. ....	36
Obr. 22: Schématické rozložení bodů použitých pro výpočet prvků vnější orientace. ....	38
Obr. 23: Kalibrační pole pro určení velikosti pixelu snímků videa. ....	39
Obr. 24: Detail snímku se žlutými kolečky reprezentujícími míč. ....	41
Obr. 25: Nadhoz 1 - trajektorie. Žlutá - PhotoModeler, modrá - MATLAB. ....	43
Obr. 26: Nadhoz 2 - trajektorie. Žlutá - PhotoModeler, modrá - MATLAB. ....	44
Obr. 27: Nadhoz 3 - trajektorie. Žlutá - PhotoModeler, modrá - MATLAB. ....	44
Obr. 28: Nadhoz 1 - Detail na průlet míče strike-zónou. Žlutá - PhotoModeler, modrá - MATLAB.....	45

## 12. Seznam grafů

Graf 1: Radiální distorze kamery GoPro HERO 3+ .....	27
Graf 2: Radiální distorze obou kamer HERO 5. ....	28
Graf 3: Průběh tangenciální distorze pro všechny kalibrované kamery. ....	28
Graf 4: Porovnání trajektorie nadhozu 1 z obou softwarů podle jednotlivých os. ....	45
Graf 5: Porovnání celkových odchylek trajektorií vypočtených v PhotoModeleru a v MATLABu. .....	46
Graf 6: Porovnání rychlosti nadhozů (PhotoModeler).....	47
Graf 7: Průběh chyby v referencování. ....	49

## 13. Seznam tabulek

Tab. 1: Ekvivalentní ohnisková vzdálenost pro kinofilm. ....	20
Tab. 2: Velikost aktivní části sensoru a velikost pixelu pro různá pole .....	23
Tab. 3: Přehled parametrů vnitřní orientace kamer, porovnání výsledků ve dvou verzích programu PhotoModeler. ....	26
Tab. 4: Prvky vnější orientace snímků.....	38
Tab. 5: Hodnoty transformačního klíče Helmertovy transformace pro absolutní orientaci modelu. ....	42
Tab. 6: Porovnání polohy identických bodů v programech PhotoModeler a MATLAB. ....	42
Tab. 7: Zhodnocení nadhozů.....	47



## 14. Seznam příloh

Příloha 1: Snímky pro kalibraci kamer.....	elektronicky (Kalibrační_snímky.zip)
Příloha 2: Protokoly ke kalibraci kamer .....	elektronicky (Kalibrační_protokoly.zip)
Příloha 3: Vlastní skripty a funkce v MATLABu .....	elektronicky (MATLAB_funkce.zip)
Příloha 4: Snímky pro učení prvků vnější orientace.....	elektronicky (EOP_snímky.zip)
Příloha 5: Protokol o výpočtu prvků vnější orientace .....	elektronicky (EOP_protokol.txt)
Příloha 6: Detekce míče PhotoModeler .....	elektronicky (Porovnání_zpětné_detekce.xlsx)
Příloha 7: Modely zobrazující detail trajektorií.....	elektronicky (Detail_trajektorie.zip)
Příloha 8: Rozdíl trajektorií (MATLAB / PhotoModeler).....	58

## Příloha 8: Rozdíl trajektorií (MATLAB / PhotoModeler)

