



## Zadání bakalářské práce

<b>Název:</b>	Měření letových vlastností šípu vysokorychlostní kamerou
<b>Student:</b>	Matěj Jech
<b>Vedoucí:</b>	Ing. Jakub Novák
<b>Studijní program:</b>	Informatika
<b>Obor / specializace:</b>	Znalostní inženýrství
<b>Katedra:</b>	Katedra aplikované matematiky
<b>Platnost zadání:</b>	do konce letního semestru 2022/2023

### Pokyny pro vypracování

Cílem práce je měřit letové vlastnosti šípu vystřeleného z luku za účelem měření schopností střelce.

Předpokladem je měřit pohyb šípu během jeho vystřelení, polohu končetin střelce a výsledný zásah terče. Práce se zaměřuje na metody detekce a měření s použitím metod zpracování obrazu. Práce předpokládá využití pokročilých senzorů (např. vysokorychlostní kamera, apod.)

Úkoly:

- 1) Provedte rešerši v oblasti metod snímání lukostřelby a vlivů střelby na výsledný zásah. Dále provedte rešerši měření pomocí vysokorychlostních kamer a zpracování obrazu.
- 2) Sestavte měřicí kamerový systém pro snímání střelce.
- 3) Vytvořte metodiku měření včetně specifikace měřených parametrů střelce a šípu.
- 4) Navrhněte algoritmy měření a hodnocení pomocí metod zpracování obrazu.
- 5) Otestujte výsledky navržených algoritmů a zhodnoťte úspěšnost.
- 6) Vizualizujte výsledky algoritmu na obrazových datech.





Bakalářská práce

# MĚŘENÍ LETOVÝCH VLASTNOSTÍ ŠÍPU VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROU

**Matěj Jech**

Fakulta informačních technologií ČVUT v Praze  
Katedra aplikované matematiky  
Vedoucí: Ing. Jakub Novák  
13. května 2021

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta informačních technologií

© 2021 Matěj Jech. Všechna práva vyhrazena.

*Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bez uplatněných zákonných licencí nad rámec oprávnění uvedených v Prohlášení, je nezbytný souhlas autora.*

Odkaz na tuto práci: Matěj Jech. *Měření letových vlastností šípů vysokorychlostní kamerou*. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2021.

## Obsah

Poděkování	vii
Prohlášení	viii
Abstrakt	ix
Seznam pojmů	x
Úvod	xi
<b>1 Zkoumání střelby z luku</b>	<b>1</b>
1.1 Využití elektromyografie	1
1.2 Vícesenzorová analýza	2
1.3 Specializované zařízení	2
1.4 Využití metod zpracování obrazu	2
<b>2 Sledování pohybu člověka pomocí vysokorychlostní kamery</b>	<b>3</b>
2.1 Využití v lukostřelbě	3
2.2 Využití v ostatních sportech	3
2.3 Další uplatnění	4
<b>3 Teoretické zázemí</b>	<b>5</b>
3.1 Zpracování obrazu	5
3.1.1 Barevná soustava HSV	5
3.1.2 Gamma korekce	5
3.1.3 Segmentace	6
3.1.4 Kontury	6
3.2 Shlukování	6
3.2.1 Algoritmus $k$ -means	8
3.2.2 Silhouette skóre	8
3.3 Bayer filtr	8
<b>4 Analýza</b>	<b>11</b>
4.1 Lukostřelecká technika	11
4.1.1 Kotvení	11
4.1.2 Vypuštění	11
4.1.3 Dokončení výstřelu	13
4.2 Měřené parametry	13
4.2.1 Vzdálenost mezi prsty	14
4.2.2 Horizontální pohyb zadní ruky	14
4.2.3 Rotace zadní ruky	14
4.3 Metodika měření	14
4.3.1 Kamerový systém	15
4.3.2 Střelba	15

4.3.3	Zaznamenání zásahů . . . . .	19
4.4	Analýza zásahů terče . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Praktická část</b>	<b>21</b>
5.1	Využitá technika . . . . .	21
5.2	Naměřená data . . . . .	23
5.3	Předzpracování obrazu . . . . .	23
5.4	Segmentace . . . . .	24
5.5	Analýza obrazových dat . . . . .	25
5.5.1	Vzájemná vzdálenost prstů . . . . .	26
5.5.2	Horizontální pohyb ruky . . . . .	26
5.5.3	Rotace zadní ruky . . . . .	26
5.5.4	Testování a kontrola dat . . . . .	28
5.6	Uspořádání záznamů zásahů . . . . .	28
5.7	Rozdělení zásahů do skupin . . . . .	30
5.7.1	Směr dopadu od soustřelu . . . . .	30
5.7.2	Shlukování . . . . .	30
5.8	Analýza souvislosti mezi výstřely a zásahy . . . . .	30
<b>6</b>	<b>Výsledky</b>	<b>33</b>
6.1	Vzájemná vzdálenost prstů . . . . .	33
6.2	Horizontální pohyb ruky . . . . .	34
6.3	Rotace zadní ruky . . . . .	34
<b>7</b>	<b>Diskuze</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>39</b>
	<b>Obsah přiloženého média</b>	<b>45</b>

## Seznam obrázků

3.1	Barevný prostor HSV . . . . .	6
3.2	Ukázka vlivu gamma korekce na snímek a jeho histogram . . . . .	7
3.3	Výstup hierarchického shlukování . . . . .	9
3.4	Rozložení pixelů bayer filtru na senzoru . . . . .	10
4.1	Pozice kotvení . . . . .	12
4.2	Správná poloha prstů při vypuštění . . . . .	12
4.3	Dokončení výstřelu . . . . .	13
4.4	Průběh výstřelu . . . . .	15
4.5	Budova pro střílení mimo sezonu . . . . .	16
4.6	Měřicí stanoviště . . . . .	16
4.7	Pohled na zadní ruku střelce . . . . .	17
4.8	Pohled na přední ruku střelce . . . . .	17
4.9	Snímací soustava . . . . .	18
4.10	Terč se zavedeným kartézským systémem souřadnic . . . . .	19
4.11	Vizualizace terče . . . . .	20
4.12	Rozdělení šípů pomocí shlukování . . . . .	20
5.1	Vývojový diagram . . . . .	22
5.2	Průběh výstřelu . . . . .	23
5.3	Oříznuté snímky rukou střelců . . . . .	23
5.4	Různé nastavení gamma korekce . . . . .	24
5.5	Vizualizace výstupu segmentace . . . . .	25
5.6	Vizualizace výpočtu horizontální vzdálenosti těžiště ruky . . . . .	27
5.7	Vizualizace výpočtu míry rotace ruky . . . . .	27
5.8	Diagram postupu testování předzpracování obrazu a segmentace . . . . .	29
5.9	Diagram postupu při porovnání charakteristiky pro dvě skupiny výstřelů . . . . .	31
5.10	Ukázka vizualizace horizontálního pohybu ruky . . . . .	31
6.1	Výsledek shlukování zásahů střelce . . . . .	33
6.2	Porovnání vývoje vzdáleností jednotlivých prstů . . . . .	34
6.3	Rozřazení jednotlivých zásahů ke skupinám . . . . .	35
6.4	Grafy znázorňující vývoj horizontální vzdálenosti prstů od kotvení . . . . .	36
6.5	Grafy popisující vývoj rotace zadní ruky . . . . .	36
6.6	Zprůměrovaný trend rotace zadní ruky . . . . .	36

**Seznam tabulek**

5.1	JAI Spark SP-5000C-CXP4 . . . . .	21
5.2	Model HSV v knihovně opev. . . . .	25
5.3	Výstup analýzy horizontálního pohybu těžiště zadní ruky. . . . .	26
5.4	Zapsané zásahy terče. . . . .	28

*Děkuji svému vedoucímu Jakubu Novákovi za ochotu a trpělivost, děkuji střelcům 1. Ligy mužů 1. LK Plzeň 1935 a také trenérovi Janu Šípkovi za odbornou pomoc v oblasti lukostřelecké techniky.*

## Prohlášení

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

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů, zejména skutečnost, že České vysoké učení technické v Praze má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 citovaného zákona.

V Praze dne 21. dubna 2021

.....



## Abstrakt

Práce se zabývá měřením vlivu lukostřelecké techniky na let šípu. Využívá vysokorychlostních kamer pro analýzu střelcovy techniky. Pohyby střelce přímo ovlivňují trajektorii šípu, která je naznačena jeho výslednou polohou v terči. Za pomoci vysokorychlostní kamery jsou nasnímány ruce v okamžiku vypouštění tětiny. Poté jsou využity metody zpracování obrazu k získání poloh prstů z těchto snímků. Ke každému nahranému výstřelu je zaznamenán korespondující zásah v terči pomocí kartézského souřadného systému s počátkem uprostřed terče. Je potvrzeno, že příčinou zásahů velmi vzdálených od středu terče je příliš malá vzdálenost ukazováčku a prostředníčku, že vyšší horizontální vzdálenost ruky od pozice kotvení vede k zásahům v levé části terče a nakonec, že nižší míra rotace vede k zásahům pod úrovní soustřelu a naopak.

**Klíčová slova** sport, zpracování obrazu, vysokorychlostní kamera, lukostřelba, vypuštění, biomechanika, shluková analýza

## Abstract

The thesis deals with measuring the influence of archery technique on the arrow flight. It makes use of a high-speed camera to analyze the sportsman's technique. The archer's movements directly influence the trajectory of the arrow, which is presented by its position in the target. A recording of the hands at the moment of string release is made using a high-speed camera. After that, methods of image processing are used to acquire the positions of fingers from these captured frames. Together with every analyzed shot a position of the arrow is noted using a Cartesian coordinate system with the origin at the center of the target. It is confirmed, that short distance between the index and middle finger is the cause of arrows falling very far from the center, that greater horizontal distance of the hand from the anchor position leads to hits in the left side of the target and finally that a lower rotation of the hand leads to hits below the center of the target and vice versa.

**Keywords** sport, image processing, high-speed camera, archery, release, biomechanics, cluster analysis

## Seznam pojmů

Button	Zařízení s pružinou, která zajistí, že se šíp nedostane do kontaktu s madlem.
Klapačka	Zařízení, které upozorňuje zvukovým signálem střelce, že luk plně natáhl.
Klapnutí	Zvuk, který vydává klapačka při plném napnutí luku. Následuje vypuštění.
Přední ruka	Ruka držící madlo luku.
Soustřel	Pomyslná nebo vypočtená průměrná pozice všech šípů v terči.
Vypuštění	Okamžik, kdy prsty zadní ruky opouští tětivu.
Zadní ruka	Ruka jejíž prsty natahují tětivu.

## Úvod

Lukostřelba je jedním z nejstarších sportů. Zpočátku byla využívána pro získání potravy či jako válečný prostředek. V moderních dějinách se začala pěstovat jako koníček i jako vrcholový sport. Cílem střelce je zasáhnout střed terče. Cestou k tomu je precizní technika střílby, která prošla během let velkým vývojem a dokonce v různých částech světa dospěla do odlišné podoby. Klíčem však není sledovat jakousi ideální trajektorii pohybů, ale spíše docílit naprosté konzistence. Předpoklad je, že pokud střelec vykoná výstřel pokaždé stejně, padne šíp do zhruba stejného místa v terči.

Charakteristika letu šípu je sledována nepřímo za pomoci pozorování střelce. Poloha rukou a prstů a jejich pohyby mají vliv na to, v jaké pozici šíp startuje a jestli mu je dodána nějaká nechtěná energie. Díky tomu pak může vyletět v nesprávném úhlu nebo se za letu prohýbat a dopadnout tak mimo zamýšlený střed. Práce zkoumá vazby mezi pohyby střelce a výslednou polohou šípu v terči.

Pozorovat lukostřeleckou techniku pouhým okem má význam pouze pro některé její aspekty. V okamžiku vypuštění se však pohyby vykonávají tak rychle, že trenér nemá šanci si všimnout celé řady drobných chyb. Přitom však právě okamžik vypuštění, kdy šíp opouští střelcovy prsty, je z celého procesu výstřelu nejkritičtější. V tu chvíli může být šípu dodán nechtěný impuls, který jej vyvede ze zamýšlené trajektorie.

Analýza pohybu pomocí vysokorychlostní kamery a metod zpracování obrazu dovoluje tyto okamžiky zkoumat podrobně a odhalit tak nepostřehnutelné nedostatky v technice. Práce si klade za cíl analyzovat ty nejrychleji probíhající pohyby a pomoci tak trenérům k pochopení dosud nepříliš probádaných aspektů lukostřelecké techniky. Výstupy z dat získaných ze záznamů střelců a jejich zásahů jsou využity k ověření jistých zažitých předpokladů a ukázání nových vztahů mezi pohyby sportovce a dopadem šípu do terče. To pomůže trenérům lépe chápat lukostřelbu a může posunout jejich schopnosti a posléze i schopnosti jejich svěřenců na novou úroveň.



# Zkoumání střelby z luku

Výstřel z luku je tvořen komplexní sérií pohybů, kde nelze zanedbat žádnou část. Je proto zásadní zkoumat každý jeho aspekt a k tomu byla v minulosti využita řada metod.

## 1.1 Využití elektromyografie

Elektromyografie (EMG) se využívá ke zkoumání míry zatnutí svalů pomocí elektrod snímajících elektrický potenciál, který vzniká při činnosti svalstva [1]. Metoda může odhalit poruchy nervosvalového aparátu, ale také umožňuje zaznamenat svalovou aktivitu během libovolné činnosti. Nalézá tím pádem široké uplatnění ve sportu, kde slouží k analýze pohybů sportovce. V lukostřelbě se jedná hlavně o svaly předloktí zadní ruky a zádové svaly. Na ruce lze sledovat míru aktivního zapojení flexoru do vypuštění šípu. Tato aktivita je pro svou nekonzistenci nežádoucí. Správné vypuštění proběhne pouze jako důsledek povolení extensoru ovládajícího uchopení tětiny. Dále lze sledovat zatnutí zádových svalů, které hrají hlavní roli při napínání luku.

Díky EMG bylo například ukázáno, že nejlepší postoj a uchopení tětiny pro začátečníky jsou ty nejméně namáhavé. Začínající střelci touto technikou docílí zpočátku vyššího počtu bodů [2]. Pro profesionální lukostřelbu je však zapotřebí docílit maximální reprodukovatelnosti výstřelu. Zejména metody uchopení tětiny uvedené v práci [2] jsou velice odlišné od těch využívaných na nejvyšší soutěžní úrovni. Technika závodních střelců je popsána například v knize Total Archery [3].

Další využití této metody se zabývalo rozdíly v technice mezi vrcholovými střelci, začátečníky a nestřelci [4]. Do skupin byli rozřazeni na základě jejich průměrného závodního skóre. Byly zkoumány svaly předloktí zadní ruky v časovém intervalu jedné vteřiny před a po klapnutí. Byla nalezena spojitost mezi charakteristikami střelby vytvořenými z grafu EMG a výkonností střelců. Elitní skupina měla během výstřelu méně napnuté svaly předloktí než začátečníci a nestřelci. To je charakteristické pro pokročilejší techniku lukostřelby, kde síla luku je z největší části překonávána zádovými a ramenními svaly, nikoliv svaly rukou.

Ve studii [5] byla porovnána tatáž křivka jedné vrcholové střelkyně a dalších kvalitních lukostřelců ve snaze poukázat na její odlišnou strategii vypuštění šípu. Bylo ukázáno, že sportovkyně ihned po vypuštění uvolňuje jak extensor napínající tětinu tak flexor, který způsobuje odtahnutí prstů směrem od dlaně. U skupiny ostatních byla pozorována aktivace flexoru po vypuštění. Závěrem práce bylo, že odlišná technika střelkyně jí poskytuje výhodu, neboť při aktivním zapojení flexoru může dojít k nechtěnému horizontálnímu pohybu tětiny.

## 1.2 Vícesenzorová analýza

Ke kvalitnímu výstřelu z luku přispívá celá řada rozdílných faktorů. Je to činnost, do které se zapojuje velká část těla a nepřesnost na kterémkoliv místě v libovolném okamžiku může mít vliv na výsledný zásah. Je proto přínosné tento proces sledovat za pomoci většího množství senzorů.

Jednou takovou analýzou je práce *A Three-Dimensional Analysis of Finger and Bow String Movements During the Release in Archery* [6], kde byla použita soustava osmi kamer k 3D reprodukci zadní ruky. Byl zkoumán jeden z vrcholových rakouských střelců té doby a rozsah pohybů kloubů jeho prstů a zápěstí. Překvapivým závěrem bylo, že navzdory populární představě se nepodařilo ukázat souvislost mezi vychýlením tětiny po horizontální ose a posunem šípu v terči do strany. Střelba během 3D analýzy byla totiž provedena na 18 m dle pravidel halových závodů a ne 70 m jako je tomu v terčové lukostřelbě. Delší vzdálenost znamená větší čas letu šípu a tím také znásobení jakýchkoliv chyb při výstřelu. Pro měření byl použit jen jeden střelec a je proto možné, že individuální aspekty jeho techniky v částech těla, které nebyly sledovány, kompenzovaly vychýlení tětiny. Vlivem těchto faktorů mohla být zastřena zkoumaná spojitost.

V Malajsií byla vyvinuta aplikace pro lukostřelce, která jim umožňuje zobrazit si data ze tří kamer a čtyř senzorů umístěných na jejich těle [7]. Slouží k pozorování sebe sama z různých úhlů. Zároveň zpřístupňuje informace o zapojení svalů obou rukou, vychýlení těla a luku z osy a měří srdeční tep. Pomocí těchto dat si pak střelec může dělat závěry o nedostatecích své techniky. Aplikace však neprovádí žádnou vlastní analýzu těchto dat a není zde spojení zaznamenaných dat se zásahem v terči.

## 1.3 Specializované zařízení

Pro měření kvality vypuštění šípu bylo vytvořeno drobné zařízení [8] určené k nošení na hřbetu pravé ruky. Díky akcelerometru je schopné rozpoznat dobré vypuštění podle pohybu zadní ruky korektně podél střelcovy čelisti pod ucho. Špatné je pak odtržení ruky od obličeje a tím způsobené vychýlení tětiny. Rovněž rozpozná pomalé vypuštění, při kterém se ruka střelce nepohne s dostatečnou razancí. V takovém případě pravděpodobně zůstaly prsty příliš dlouho ležet na tětině a tím byla snížena energie, která je předána šípu. Zařízení je však schopné dobře klasifikovat pouze větší nedostatky, které je možné sledovat i pouhým okem. Slouží proto spíše jako zpětná vazba pro začínající střelce bez trenéra.

## 1.4 Využití metod zpracování obrazu

Klasické metody zpracování obrazu nejsou příliš využívány při zkoumání techniky v lukostřelbě. Zajímavé však je využití segmentace pro automatizované bodování zásahů v terči [9]. Pro nalezení nového šípu v terči se použije obraz terče před jeho dopadem a porovná se se snímkem po zásahu. Tím se získá kontura šípu a jeho stínu a nalezne se poloha jeho hrotu. Bodované oblasti terče se rozeznají díky segmentaci obrazu dle barvy s využitím standardní rovnice elipsy pro popis perspektivou zkresleného kruhu. Využitím těchto rovnic a souřadnic pozice hrotu dojde k bodovému ohodnocení zásahu. Aplikace má uplatnění například pro slepé střelce, technice lukostřelby se však nevěnuje.

# Sledování pohybu člověka pomocí vysokorychlostní kamery

Vysokorychlostní kamery nabízejí možnost detailně zkoumat jakékoli rychlé jevy. Kapitola přibližuje případy, kdy byla kamera využita k zaznamenání lidských pohybů.

## 2.1 Využití v lukostřelbě

V roce 2011 proběhl v Londýně testovací závod na nadcházející olympijské hry. Proběhlo zde měření vybraných střelců pomocí vysokorychlostní kamery [10]. Byly srovnány teoretické matematické předpoklady pohybu šípu s reálnými nasnímanými daty. Na získaných snímcích je vidět pohyb šípu, který se po vypuštění prohýbá po horizontální ose. Technika střelců hraje velkou roli v těchto kroutivých pohybech a proto mohou vznikat nesrovnalosti mezi teorií a skutečnou trajektorií šípu. Sledovány byly různé časové okamžiky klasifikované podle polohy šípu a jeho prohnutí. Pomocí snímků bylo zjištěno, že sedm z celkových šestnácti střelců naklánělo při výstřelu luk. To může způsobit, že šíp dopadne stranově mimo střed terče. Pokud však tento náklon střelec zreprodukuje pokaždé stejně a jen v malé míře, je vliv na zásah zanedbatelný. Dále v několika případech zvýšená směrodatná odchylka u některých parametrů naznačila, že střelec nemá správně seřízené nářadí.

Na internetu je k nalezení také mnoho zpomalených záběrů lukostřelců natočených vysokorychlostní kamerou [11]. Slouží k poukázání na drobné detaily techniky nejlepších světových střelců a jsou využitelná pro výuku začínajících i pokročilých střelců. I amatérské zpomalené záběry z mobilního telefonu mohou být přínosné pro přípravu zkušených lukostřelců.

## 2.2 Využití v ostatních sportech

Většina sportů je spojena s rychlými pohyby člověka či náčiní, které používá. Proto je často vhodné využít vysokorychlostních kamer k lepšímu pochopení zákonitostí, které nelze sledovat okem či záznamem s nižší snímkovací frekvencí. Například ve skoku na lyžích [12] byly takové záznamy použity k vypočítání aerodynamických vlastností sportovce a dopomohly k lepšímu pochopení techniky skoku.

Širší využití má například práce věnující se okamžitému měření rychlosti chůze a běhu [13]. Studie využívá vysokorychlostních kamer k porovnávání krátce po sobě jdoucích snímků pohybujícího se člověka. Využívá metod zpracování obrazu pro oddělení kontury člověka od pozadí a hledá rozdíly mezi okolními snímky. Pomocí těchto dat je pak možné získat horizontální i ver-

tikální rychlost pohybu všech částí těla. Tyto informace jsou užitečné jak ve sportu a rehabilitačních cvičeních, tak při diagnostikování poruch.

### **2.3** Další uplatnění

Poněkud překvapivé uplatnění vysokorychlostních kamer je v metodách rozpoznávání řeči [14]. K tomuto účelu byly již v minulosti použity klasické kamery a ukázalo se, že zkombinováním audio a video záznamu lze v této oblasti docílit lepších výsledků. Představení vysokorychlostních kamer pak ukázalo další 3,1% zlepšení. Spolehlivější byly i v případech zvýšeného hluku z okolí.



# Teoretické zázemí

V kapitole je poskytnut teoretický základ k metodám zpracování obrazu a shlukování využitých v praktické části bakalářské práce.

### 3.1 Zpracování obrazu

Obrazová data z kamer a fotoaparátů je téměř vždy třeba předzpracovat. Vlivem nedokonalých podmínek při snímání obrazu může dojít například k nedostatečnému kontrastu mezi sledovanými objekty a pozadím. Tím je výrazně ztížena práce při segmentaci oblastí zájmu. K získání výstupů z obrazových dat lze využít celou řadu algoritmů. V následující sekci jsou popsány ty metody, které byly využity v praktické části práce.

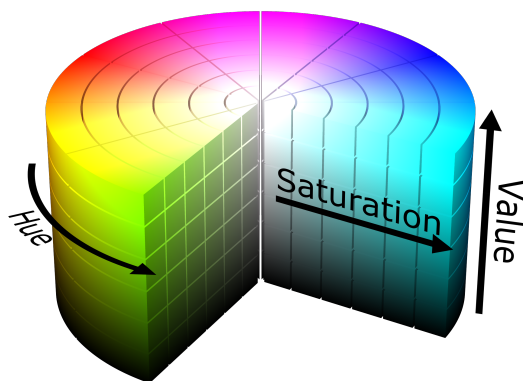
#### 3.1.1 Barevná soustava HSV

Klasická soustava RGB nebo její varianta BGR nemusí být pro potřeby zpracování obrazu vždy ideální. Její nedostatky leží převážně v obtížnější interpretaci pro člověka. Pokud je například cílem selektovat z obrazu pouze odstíny tmavě fialové barvy, bude v tomto barevném prostoru obtížné najít správný rozsah. Změna odstínu za pomoci přidání nebo odebrání některé z barevných složek je mnohdy těžko představitelná. Barvy se většinou v reálném životě neuvážují jako směsi zelené, modré a červené [15]. Dosáhnout požadované sytosti barvy či její světlosti je pak další komplikace.

Vhodnou alternativou je barevný prostor HSV — hue, saturation, value. Zde je barevný odstín separován pouze do první složky, následuje sytost barvy a poslední je světlost odstínu. Barevný prostor si lze představit jako válec nebo kužel, kde každý jeho bod představuje jinou barvu. Výška určuje světlost, vzdálenost od středu saturaci a úhel na kružnici podstavy vyjadřuje odstín. Barevné schéma je znázorněno na obrázku 3.1. Odstín se běžně udává ve stupních, saturace a sytost pak v procentech. V modelu je snazší vybrat barevný rozsah, v němž leží oblast zájmu v obrazových datech. Tím je usnadněn proces segmentace.

#### 3.1.2 Gamma korekce

Fotografie a jednotlivé snímky kamerového záznamu mohou mít nevyvážený histogram. Některé jasové hodnoty pak například nejsou v obraze vůbec přítomné, což má negativní vliv na celkový kontrast ve snímku. Záznamy z vysokorychlostních kamer mohou být při nedostatečném nasvětlení scény velmi tmavé. Tento jev je způsoben nuceným nižším expozičním časem, během kterého se do objektivu dostane méně světla.



■ **Obrázek 3.1** Barevný prostor HSV [16].

Jedním z možných řešení je využití gamma korekce. Jedná se o nelineární transformaci vstupního obrazu. Změna každého pixelu závisí na jeho hodnotě v původním snímku. Operaci lze vyjádřit následující rovnicí:

$$V_{\text{out}} = A \cdot V_{\text{in}}^{\gamma}$$

Vstupní a výstupní hodnoty jsou z intervalu 0—1, hodnota  $A$  je většinou rovna jedné. Pokud je hodnota gamma menší než jedna, bude výsledný obraz zesvětlen [17] a histogram roztažen doprava, při použití vyšší hodnoty docílíme opačného efektu. Na obrázku 3.2 vidíme vliv metody na snímek a jeho histogram.

### 3.1.3 Segmentace

Cílem segmentace obrazu je oddělit oblast zájmu od pozadí. Předpokladem je vhodně předzpracovaný snímek například pomocí metod popsanych v předchozích podsekcích.

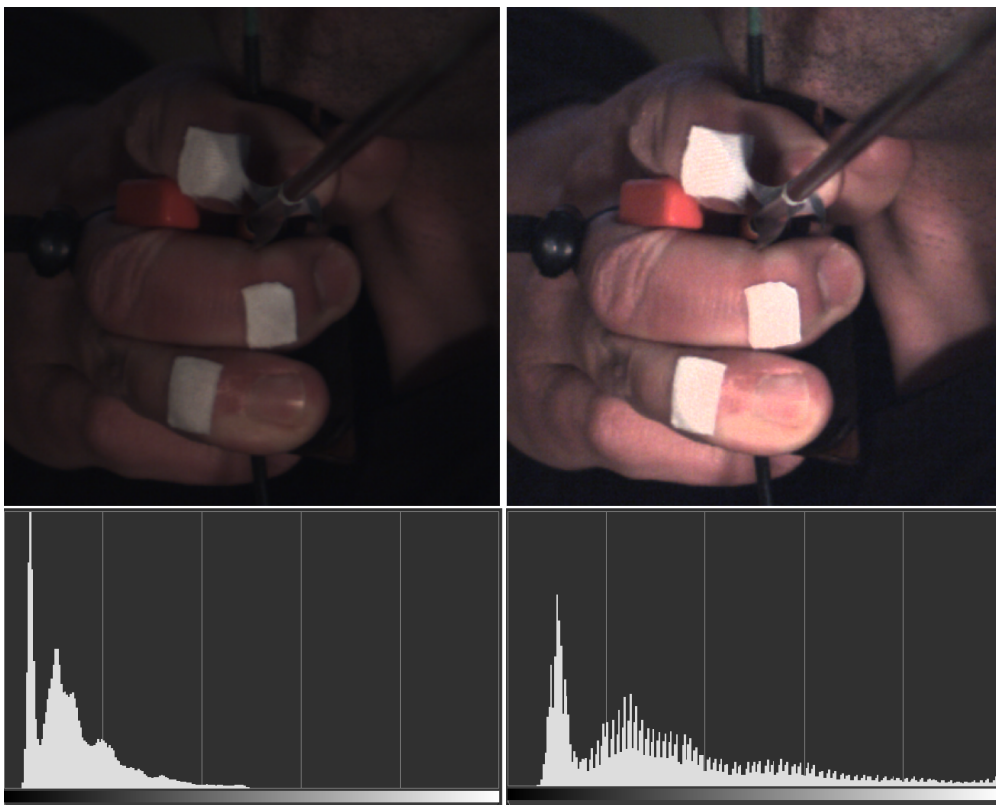
Existuje mnoho metod segmentace, mezi nejjednodušší a přesto často používané patří prahování. Pokud je využita jedna hodnota, porovná se zvolený práh s hodnotou pixelu a podle výsledku je buď pixel vybrán nebo zahozen. Pokud využijeme dolní i horní práh zároveň, hovoříme o dvouprahové segmentaci. Ta nachází využití například při barevné segmentaci ve snímku uloženém pomocí soustavy HSV. Tímto způsobem lze vybrat části zbarvené určitým odstínem.

### 3.1.4 Kontury

Výstupem segmentace je binární obraz, na kterém jsou viditelné jednotlivé kontury v bílé barvě. Lze je charakterizovat a vybírat například na základě velikosti, což může odstranit chybně klasifikovaný šum. Kontury lze rovněž analyzovat podle tvaru. Pomocí kontur lze vypočítat obsah oblasti zájmu a sloužit mohou také k měření délek objektů a vzdáleností mezi nimi. Pokud je důležitá například pozice objektu ve snímku, lze z kontury vypočítat souřadnice jeho těžiště.

## 3.2 Shlukování

Při práci s daty, která nejsou předem rozřazena do kategorií, je často nutné najít v nich skupiny podobných záznamů s cílem data klasifikovat. K tomu slouží metody nesupervizovaného učení, mezi které se řadí také shlukování. Výsledné rozřazení slouží k lepšímu pochopení struktury datasetu. Získané shluky lze následně využít k popisu rozdílů mezi jednotlivými kategoriemi nebo vybrat pouze určitou skupinu datových bodů.



■ **Obrázek 3.2** Ukázka vlivu gamma korekce s hodnotou 1,18 na snímek a jeho histogram.

Existuje několik metod shlukování, které se liší způsobem klasifikace a mohou mít na identických datasetech rozdílné výsledky. Výběr metody je ovlivněn charakteristikou vstupních dat a požadovaného výsledku. Například u hierarchického shlukování [18] je výsledkem celý strom. V listech jsou jednotlivé body, které se cestou ke kořeni spojují vždy s nejbližšími shluky z okolí. V každé hladině stromu se nachází celý dataset a počet uzlů (znázorňujících shluky) roste od kořenu k listům. Příklad výstupu algoritmu pro dataset „iris“ [19] je na obrázku 3.3. Dataset obsahuje rostliny tří různých druhů. Skutečné druhy jsou v grafu barevně vyznačeny.

### 3.2.1 Algoritmus $k$ -means

Shlukování  $k$ -means určí každému záznamu jednu skupinu na základě vzdálenosti vektoru parametrů datového bodu od středu shluku. Metoda rozděluje  $n$  vstupních dat do  $k$  shluků, kde  $n > k$ . Jedná se o optimalizační úlohu, jejíž cílem je pro dané  $k$  minimalizovat účelovou funkci vyjadřující pro každý shluk součet kvadrátů vzdáleností bodů náležících shluku od ostatních bodů. Funkci lze zjednodušit využitím kvadrátů vzdáleností od těžišť jednotlivých shluků. Problém nalezení globálního minima účelové funkce je NP-těžký. Algoritmus  $k$ -means konverguje k lokálnímu minimu funkce iterativním snižováním účelové funkce [20].

Ve fázi inicializace dojde k počátečnímu umístění středů shluků. Tento krok má zásadní vliv na rychlost konvergence a je proto vhodné využít specializované metody výběru. Knihovna scikit-learn<sup>1</sup> ve své implementaci používá algoritmus  $k$ -means++ [22], ve kterém jsou jako počáteční středy využity náhodně vybrané body datasetu. Pravděpodobnost jejich výběru se řídí druhou mocninou vzdálenosti bodu od nejbližšího existujícího středu.

Poté dojde k rozřazení bodů do nejbližších skupin a dle tohoto rozřazení jsou vypočteny nové geometrické středy shluků. Krok se opakuje tak dlouho, dokud je změna účelové funkce vyšší než předem stanovené minimum. Výstupem jsou souřadnice středů shluků a klasifikace všech bodů datasetu [20].

### 3.2.2 Silhouette skóre

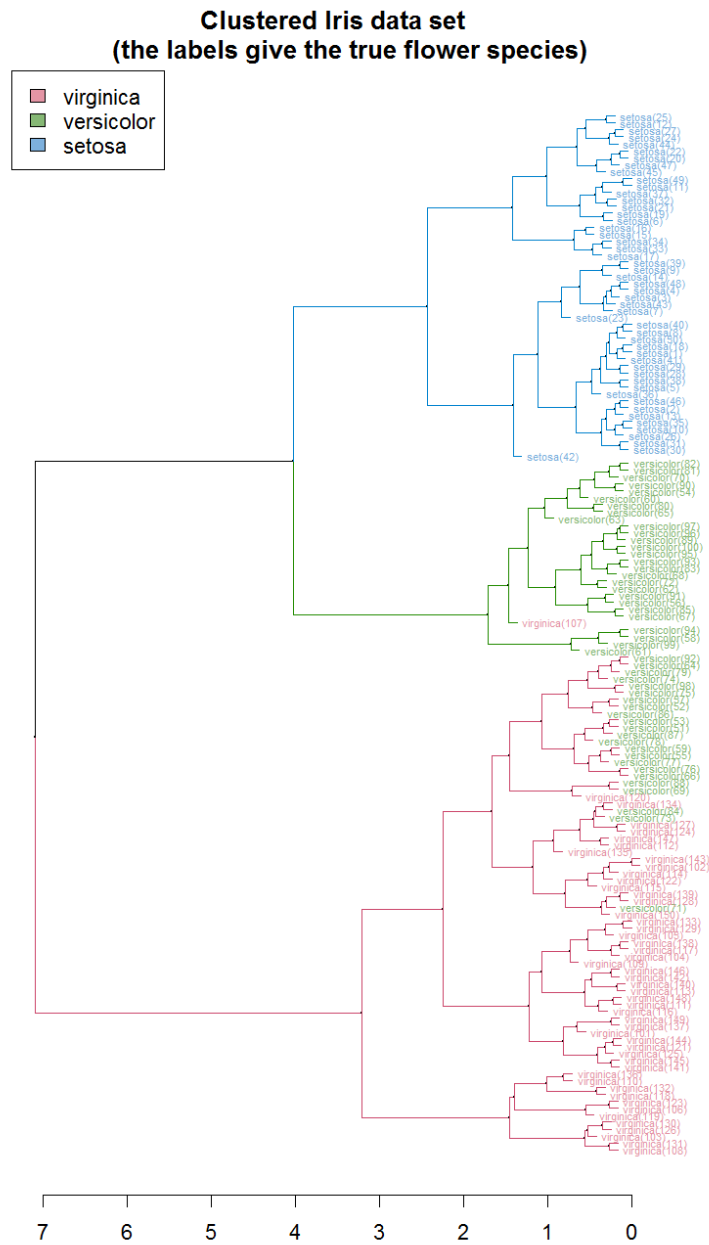
Důležitým parametrem metody  $k$ -means je číslo  $k$ , které určuje požadovaný počet výsledných shluků. Jeho ideální hodnotu lze vypočítat díky metodě silhouette. Hodnota silhouette určuje rozdíl podobnosti datového bodu k jeho shluku a ke všem ostatním. Její rozsah je mezi  $-1$  a  $1$ , kde vyšší hodnota značí správnou klasifikaci [23]. Díky metodě lze pro daný rozsah otestovat více různých  $k$  a vybrat parametr s nejvyšší hodnotou silhouette skóre. Výstup funkce však nezaručuje vždy ideální výsledek a pro popis určitých datasetů je vhodné využít jinou hodnotu  $k$  i přes její nižší skóre.

## 3.3 Bayer filtr

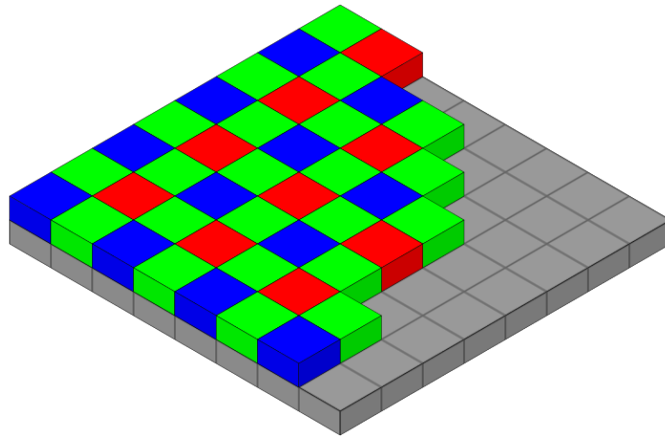
Aby byly kamerové senzory schopné snímat barvu obrazu, jsou využity barevné filtry, které způsobí, že každý pixel senzoru zaznamenává data pouze určité vlnové délky. Ta určuje barvu pixelu [24]. Procesem demozaikování se z takového obrazového záznamu získá barevný obraz. U vysokorychlostních kamer je standardní využít tohoto algoritmu až po chvíli přijmutí dat z framegrabberu vyhodnocovací jednotky. Demozaikování přímo v kameře ve chvíli před odesláním dat by zpomalovalo rychlost snímání jak z důvodu potřebného času pro výpočet, tak z důvodu většího objemu posílaných dat. Díky demozaikování ve vyhodnocovací jednotce lze zasílat snímky uložené do osmibitového formátu a docílí se zrychlení přenosu.

Jedním takovým filtrem je Bayer filtr pojmenovaný po svém vynálezci Brycovi Bayerovi. Je inspirován fungováním lidského oka, které je citlivější na zelenou barvu. Využívá proto vyššího počtu zelených pixelů v poměru k modrým a červeným  $2 : 1 : 1$  [24].

<sup>1</sup>Machine learning knihovna pro jazyk Python. [21]



■ **Obrázek 3.3** Výstup hierarchického shlukování, čísla na spodní straně grafu představují maximální vzdálenost shluků dané hladiny. [25]



■ **Obrázek 3.4** Rozložení pixelů bayer filtru na senzoru. [26]

## Kapitola 4

# Analýza

V kapitole jsou k nalezení základní pravidla trénování lukostřelby a jsou vysloveny hypotézy o vlivu techniky střelby na výsledný zásah. Dále je popsána metodika měření zvolených parametrů výstřelu. Na závěr je uveden způsob záznamu zásahů terče.

### 4.1 Lukostřelecká technika

Při výuce střelby z luku se celý proces rozkládá na mnoho částí. Většina z nich se dá hodnotit pomocí metod zpracování obrazu. Níže jsou vysvětleny části výstřelu, kterými se zabývá praktická část práce. Technika je popsána dle metodiky klubu 1. LK Plzeň 1935, která nese velkou podobnost s pravidly popsanými v knize Total Archery [3].

#### 4.1.1 Kotvení

Během nátahu střelec překonává sílu luku, aby se dostal do stabilizované pozice zvané kotvení. Při kotvení je tětíva pevně přitisknuta na nosu a bradě střelce, který míří na střed terče. Zadní ruka je umístěna pod čelistí a po zacílení na střed střelec tlačí ramena od sebe, aby přetáhl šíp přes klapačku. Zvuk, který vydá, je pro něj signálem pro začátek vypuštění.

Kotvení může být provedeno více způsoby, záleží na pozici tětivy na obličejí i na rozložení prstů okolo šípu. Špatné ukotvení má vliv na způsob, kterým je vypuštěna tětíva z prstů a tím nepřímo ovlivňuje výsledný zásah. Fáze kotvení je vidět na obrázku 4.1.

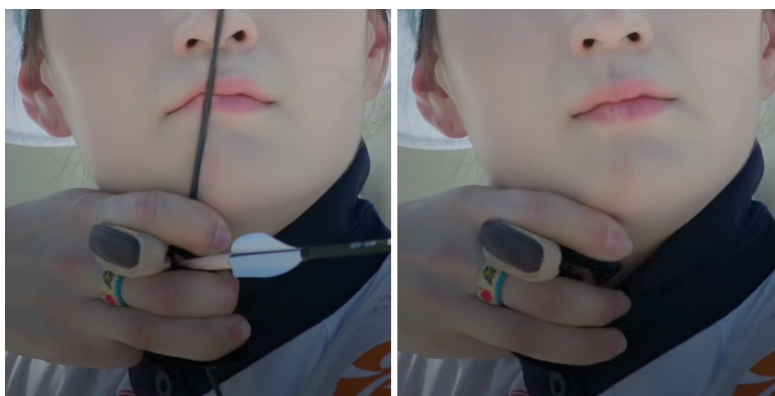
#### 4.1.2 Vypuštění

Část výstřelu, kdy prsty střelce opouštějí tětívu, je posledním okamžikem jeho kontaktu s lukem. Ve chvíli startování šípu se projeví veškeré nedostatky v poloze celého těla lukostřelce. Ty se přesunou do letových vlastností šípu a jedná se tedy o nejzásadnější moment výstřelu.

Správné vypuštění má proběhnout pouze důsledkem povolení prstů, ze kterých tětíva samovolně vystřelí šíp. Jedná se o podobný pohyb, jako když prsty svírají ucho těžké tašky a pouze povolení napětí zaháknutých článků způsobí pád předmětu k zemi. Polohou prstů lze sledovat, jestli nedochází k aktivnímu zapojení flexoru do rozevření prstů od dlaně. Pokud je sval do vypuštění zapojen, může dojít k vychýlení tětivy. Takový pohyb nelze spolehlivě reprodukovat a je proto pro lukostřeleckou techniku nevhodný. Po odchodu tětivy by se prsty měly vrátit do stejné pozice, v jaké byly když ji svíraly. Takové vypuštění je vidět na obrázku 4.2.



■ **Obrázek 4.1** Pozice kotvení, během které probíhá zacílení na střed terče.



■ **Obrázek 4.2** Správná poloha prstů při vypuštění. (Na snímcích je korejská lukostřelkyně Ki Bo Bae z [11].)





■ **Obrázek 4.3** Poloha těla střelce ve fázi dokončení výstřelu. Přední ruka zůstává ve stejné výšce, zadní loket leží v jejím prodloužení. Prsty zadní ruky v uvolněné poloze za uchem střelce.

### 4.1.3 Dokončení výstřelu

Po vystřelení šípu by se střelcovy ruce měly dostat do polohy, kde loket zadní ruky leží v jedné přímce s propnutou přední rukou. Prsty zadní ruky končí po korektně provedeném vypuštění v uvolněné poloze za uchem sportovce. Ve výsledné poloze těla se zobrazí jakékoliv případné nedostatky předchozích fází. Vedení ruky během výstřelu do její finální polohy minimalizuje pravděpodobnost odtržení tětiny od obličeje. Ruka je totiž vedena směrem za hlavu podél čelisti. Pozice dokončení výstřelu je na obrázku 4.3.

## 4.2 Měřené parametry

Práce se blíže zabývá okamžikem vypuštění. Během něj může být provedeno několik nežádoucích pohybů. Vše se odehrává ve velké rychlosti, ruka střelce se z pozice kotvení do dokončení výstřelu dostane za zhruba 0,25 sekundy. Následující charakteristiky byly v kapitole 5 zkoumány analýzou záznamů z vysokorychlostní kamery.

### 4.2.1 Vzdálenost mezi prsty

Důležitými parametry jsou vzdálenosti mezi jednotlivými prsty. V lukostřeleckém světě nejsou zažité žádné předpoklady týkající se vlivu těchto parametrů na výsledný zásah. Cílem práce proto je odhalit možné závislosti a dopomoci tak k jejich pochopení. Jako u všech aspektů lukostřelby je i zde důležitá konzistence. Pokud má střelec napříč výstřely rozdílně rozložené prsty na těživě, pak nemá tuto část techniky dobře nacvičenou.

Důležitá je vzdálenost ukazováčku a prostředníčku, mezi kterými spočívá šíp na těživě. Pokud by byla příliš nízká, mohou se dostat prsty střelce do přímého kontaktu s šípem. To vede jak ke zraněním, tak k ovlivnění výletu šípu. Z tohoto důvodu mají lukostřelci na chrániči prstů také meziprstník, který oddaluje první dva prsty od sebe. Meziprstníku si lze povšimnout mezi ukazováčkem a prostředníčkem na obrázcích 4.1 a 4.2.

Rozdíly v ostatních vzdálenostech mohou signalizovat změnu v rozložení síly nátahu na jednotlivých prstech. Může tak dojít k odlišnému prohnutí těživy, které má dopad na úhel pod kterým šíp startuje. Rovněž mohou tyto rozdíly předcházet další nedostatky, jako je aktivní zapojení svalů předloktí do vypuštění těživy.

### 4.2.2 Horizontální pohyb zadní ruky

Mezi nežádoucí pohyby patří odtržení ruky z pozice kotvení na bradě směrem od obličeje. Cílem práce je ověřit hypotézu, že pokud je vzdálenost v průběhu výstřelu vyšší než je střelcův průměr, dopadne výsledný šíp vlivem vychýlení těživy do levé části terče.

Během správně provedeného výstřelu by zadní ruka střelce měla zůstat v kontaktu s krkem až dokud se nedostane do pozice dokončení výstřelu. V pozici ruky za uchem střelce nemusí již docházet k dotyku a prsty by měly spočívát v uvolněné poloze nad ramenem (viz pozice „dokončení výstřelu“ na obrázku 4.3). Je pravidlem, že do této polohy za hlavou by se ruka měla dostat co nejpřímější cestou. Na spojnici poloh kotvení a dokončení leží však hlava lukostřelce, nejkratší dráha pohybu je tedy při dodržení kontaktu ruky s krkem.

Existují i střelci, kteří toto pravidlo nedodržují a součástí jejich osobité techniky je pohyb ruky ve směru od obličeje. Dráha pohybu ruky z pozice kotvení k dokončení výstřelu pak vytváří větší oblouk nebo se i pozice dokončení posune stejným směrem. Příkladem je bývalý držitel českého rekordu, jehož výstřel je zobrazen v 4.4.

### 4.2.3 Rotace zadní ruky

Dalším problémem při vypuštění je nechtěná rotace malíkové hrany zadní ruky okolo ukazováčku. Tento jev indikuje malé zapojení prsteníčku do kompenzace síly luku a může tím vést k odlišnému prohnutí těživy a naklonění šípu. Důsledkem toho startuje šíp pod odlišným úhlem a předpokládá se vliv na vertikální vzdálenost od středu terče.

Opět platí, že někteří lukostřelci mají pohyb rotace zadní ruky zafixovaný ve své technice. Jsou schopni tento pohyb opakovat, ale stále je tím vytvořena pomyslná slabina v jejich střelbě. Jedná se o nadbytečný pohyb, který musí sledovat a provádět jej pokaždé stejně. Rozdíly v míře rotace mají pak podobný dopad na výstřel jako je popsáno v předchozím odstavci.

## 4.3 Metodika měření

Měření probíhalo v areálu lukostřelnice klubu 1.LK Plzeň 1935. Pro účely venkovního střelení i za špatného počasí zde byla vystavěna malá vytápěná budova (viz obrázek 4.5), z jejíž oken střelci střílí na 70 m vzdálený terč. Na tomto místě proběhlo měření techniky střelby. Byly zde horší světelné podmínky, avšak luk nebyl ovlivněn poryvy větru.



■ **Obrázek 4.4** Průběh výstřelu od kotvení k dokončení s oddálením zadní ruky od obličeje. Časový rozdíl mezi jednotlivými snímky je 0,03 s.

Pro potřeby budoucí segmentace byla označena sledovaná místa na prstech rukou střelců pomocí bílého sportovního tejpů (viz bílé obdélníky na obrázku 4.7).

### 4.3.1 Kamerový systém

Na střelecké metě byly využity dvě vysokorychlostní kamery (viz sekce 5.1). První zabírala prsty zadní ruky z úhlu co nejvíce od terče tak, aby nepřekážela střelci. Výsledný snímek je vidět na obrázku 4.7. V tomto pohledu byly dobře viditelné pohyby prstů lukostřelce krátce před vypuštěním tětiny a po něm. Druhá sledovala vertikální a horizontální pohyb přední ruky sportovce ze šikmého úhlu zepředu. Na obrázku 4.8 je vidět finální záběr. Kamery byly umístěny na stativěch ve vzdálenosti 1,5 m od střelce a ve výšce jejich ramen. Kvůli nedostatečnému osvětlení bylo mezi kamery umístěno halogenové světlo. Schéma soustavy je na obrázku 4.9. Fotografie místa snímání je na obrázku 4.6. Obě kamery byly napojeny na vyhodnocovací jednotku (PC), ze které byla manuálně ovládána akvizice kamer. Nahrávání začalo vždy v okamžiku kotvení a končilo poté, co se střelec dostal do finální pozice dokončení výstřelu. Záznamy byly pro potřeby pozdějšího zpracování uloženy na pevný disk formou sekvence snímků.

### 4.3.2 Střelba

Snímání byli celkem tři sportovci s podobnou výkonností. Všichni střílí na úrovni 1. Ligy mužů — nejvyšší dlouhodobé soutěže v rámci republiky.

Střelci byli nejdříve vyzváni k vystřelení první testovací sady libovolného počtu šípů. Během ní si nastavili zaměřovač, aby posunuli soustřel do středu terče. Byly rovněž provedeny drobné úpravy snímací soustavy kvůli rozdílné výšce sportovců a odlišné pozici rukou. V této části nebyly zapisovány zásahy terče ani ukládány kamerové záznamy.

Následovala analyzovaná část střelby při níž byly vystřeleny dvě sady po devíti šípech. Po každé z nich byla pomocí metru určena a zaznamenána pozice šípu v terči a pořadí výstřelu.





■ **Obrázek 4.5** Budova pro střílení mimo letní sezonu. Na přední straně jsou uzavíratelné střílny, v pozadí 70 m vzdálené terče.



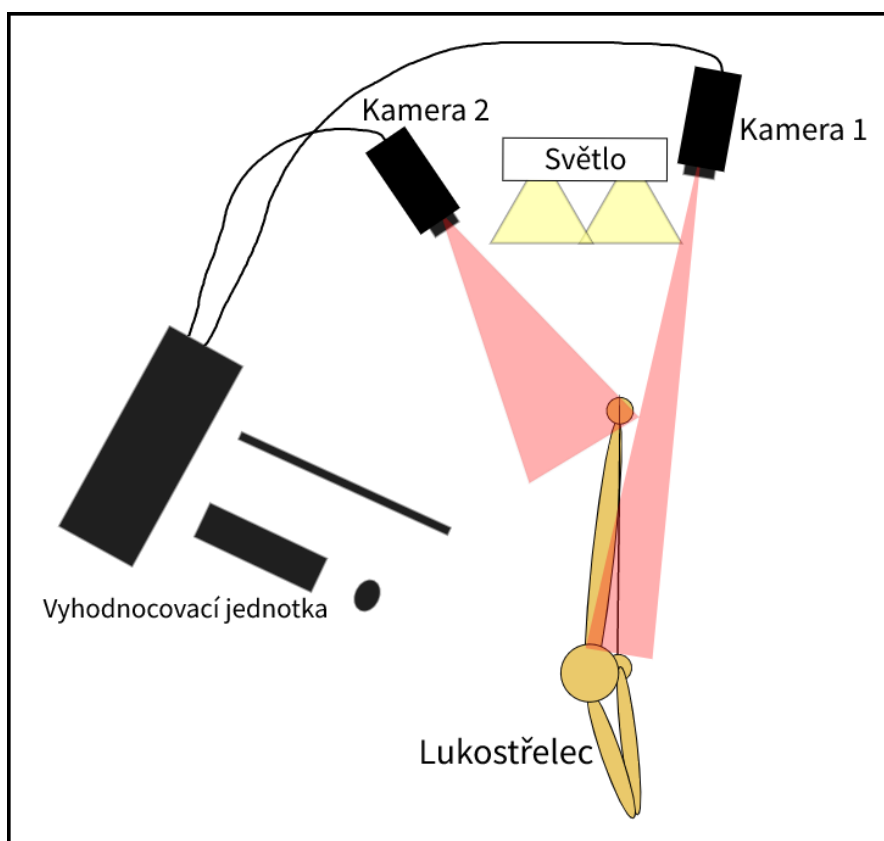
■ **Obrázek 4.6** Měřicí stanoviště uvnitř zateplené budovy. Střelci střílí skrz otevřenou střílnu.



■ Obrázek 4.7 Pohled na zadní ruku střelce.

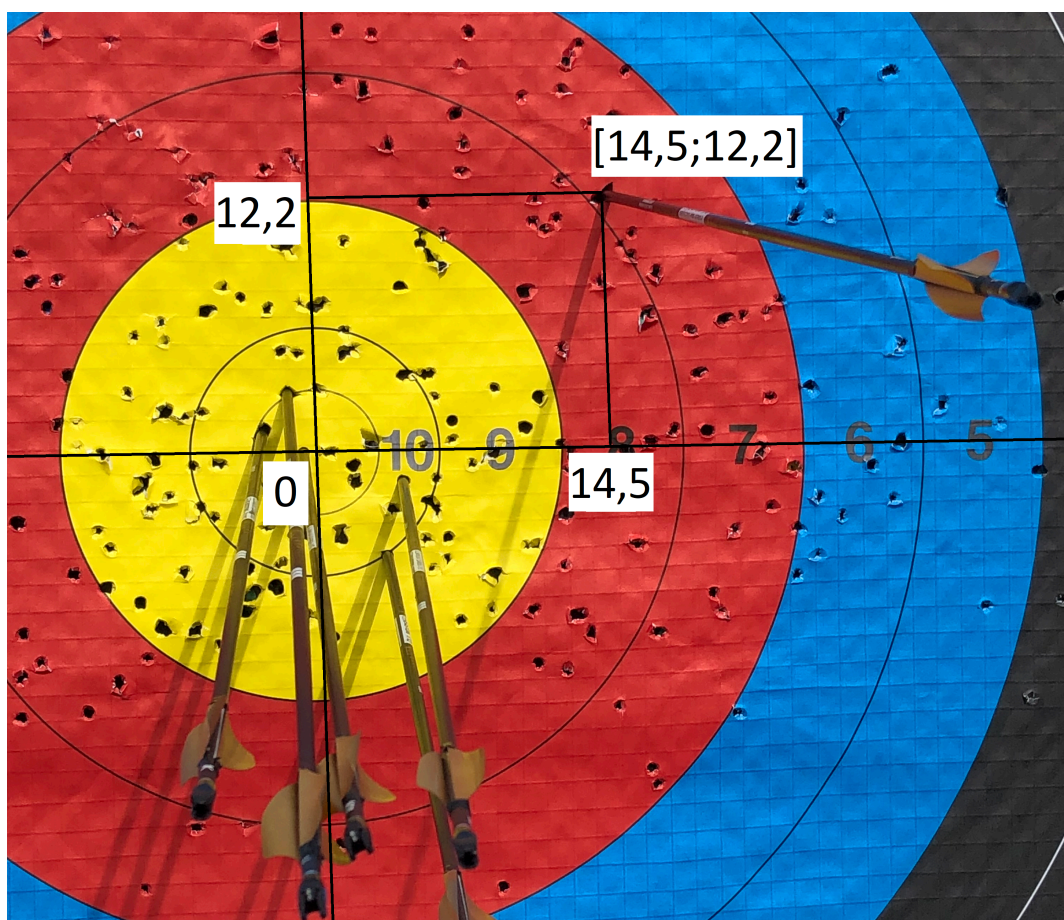


■ Obrázek 4.8 Pohled na přední ruku střelce.



■ Obrázek 4.9 Schéma použité snímací soustavy.





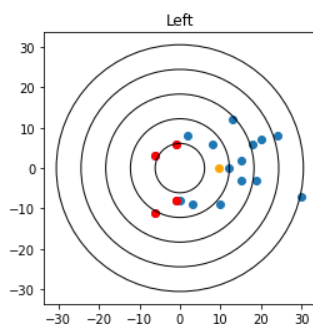
■ **Obrázek 4.10** Terč se zavedeným kartézským systémem souřadnic. Jednotlivé bodované zóny jsou velké 6,1 cm. Výjimkou je 10 bodová oblast ve středu rozdělená na polovinu, kde vnitřní kruh se označuje jako „X“. Na obrázku je dále vidět přiřazení souřadnic šípů dle pomyslně zavedeného kartézského systému.

### 4.3.3 Zaznamenání zásahů

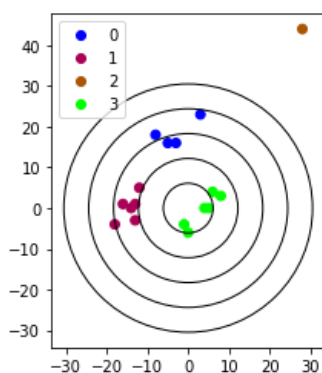
Střelci si před střelbou číselně označili šípů, aby bylo možné je správně identifikovat v terči a byla zachována vazba s obrazovými daty. Pro uložení polohy šípů byl použit pomyslný kartézský souřadnicový systém s počátkem ve středu terče a kladnými hodnotami směrem vpravo a nahoru. Pomocí metru byla měřena horizontální vzdálenost šípů od středu a byla zaznamenána jako první souřadnice  $x$  v centimetrech. Obdobným způsobem byla uložena i vertikální poloha. Způsob určení polohy šípů je názorně ukázán v obrázku 4.10.

## 4.4 Analýza zásahů terče

Uložené souřadnice šípů sloužily k vizualizaci zásahů v terči a hlavně k rozdělení výstřelů na základě jejich polohy. Důležitým bodem je soustředění šípů střelce. Jedná se o průměr z poloh všech jeho vystřelených šípů. Střelci využívají odhadu jeho polohy k nastavení zaměřovače, protože pokud leží ve středu terče, znamená to zpravidla největší bodový zisk. Z toho důvodu je k určení dobrých a špatných zásahů využita poloha soustředění a nikoli střed terče. Vypočtením průměru ze všech zaznamenaných šípů byly získány souřadnice bodu soustředění.



■ **Obrázek 4.11** Vizualizace terče se zvýrazněnými zásahy vlevo od soustřelu. Červeně vybrané zásahy, oranžově pozice soustřelu, modře ostatní zásahy terče.



■ **Obrázek 4.12** Rozdělení šípů pomocí shlukování.

Předpokládají se podobné charakteristiky výstřelů, jejichž zásahy dopadly stejným směrem a v podobné vzdálenosti od průměru všech šípů. Proto byly šípky klasifikovány na základě vzdálenosti a směru dopadu od soustřelu. Obrázek 4.11 ukazuje selekci výstřelů jejichž zásahy dopadly do levé části.

Výše popsaný způsob není pro některé případy vhodný. Pokud jsou šípky střelce rozděleny na podobně velké shluky v rozdílných částech terče, nelze říci, že nejlepšími výstřely jsou ty nejbližší soustřelu. V takovém případě byla každá skupina pravděpodobně vystřelena odlišným způsobem a výstřely je vhodné rozdělit na základě příslušnosti zásahů k jednotlivým shlukům. Následně lze porovnat jejich charakteristiky a určit, ve kterých ze zkoumaných částí techniky se lišily. Porovnáním této analýzy s popisem správné lukostřelecké techniky (nebo techniky konkrétního střelce) je možné určit, který ze shluků byl vystřelen nejlépe. Výstup metody je na obrázku 4.12.



## Praktická část

V kapitole jsou vysvětleny postupy využití k získání, zpracování a analýze dat. Veškerá implementace byla vytvořena v prostředí jupyter [27] v programovacím jazyce Python [28]. Postup práce je popsán diagramem na obrázku 5.1.

### 5.1 Využitá technika

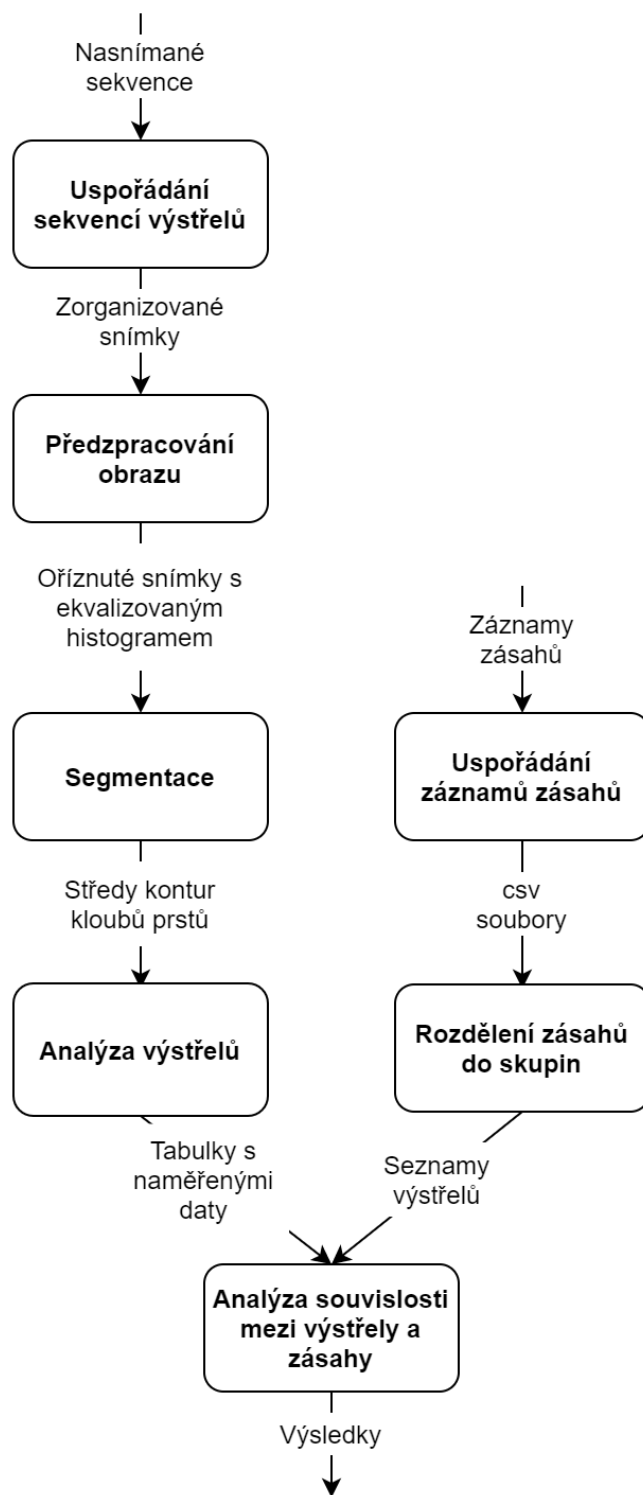
K záznamu pohybů zadní ruky byla využita vysokorychlostní kamera JAI Spark SP-5000C-CXP4, její parametry jsou v tabulce 5.1. Pro snímání celé oblasti zájmu (střelcova brada a krk) byl nejvhodnější objektiv s 50 mm ohniskovou vzdáleností. Při použití takto nastavené sestavy bylo možné snímat celou dráhu ruky podél krku v průběhu vypuštění.

Kamera byla napojena na PC pomocí coaxpress kabelu a frame grabberu marathon ACX-QP od společnosti Basler [29]. Využitím bayerova filtru na senzoru kamery bylo možné barevný obraz získat až ve vyhodnocovací jednotce procesem demosaikování obrazu. Tak bylo docíleno vysokého přenosu dat, který nelimitoval možnosti kamery.

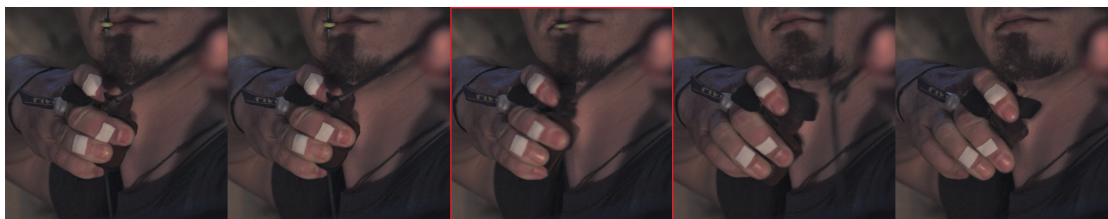
Pro práci s kamerou byl využit software StreamPix 8 [30]. Vzhledem k charakteru snímaného pohybu bylo cílem získat co nejvyšší počet snímků za sekundu. Možnosti nastavení tohoto parametru závisí na rozlišení obrazu. To bylo postupně snižováno, až bylo získáno minimální rozlišení ve kterém byla obsažena celá oblast zájmu, což byla hodnota  $832 \times 800$  px. Snižované rozlišení dovozovalo maximální nastavení 800 FPS, ale ani s využitím nejvyššího expozičního času nebyl na scéně dostatek světla. Snímkovací frekvence proto musela být nastavena na 600 FPS, což dovolilo vyšší expoziční čas a na senzor se dostával dostatek světla. Začátek a konec akvizice byly ovládány manuálně.

■ **Tabulka 5.1** Parametry kamery JAI Spark SP-5000C-CXP4 [31]

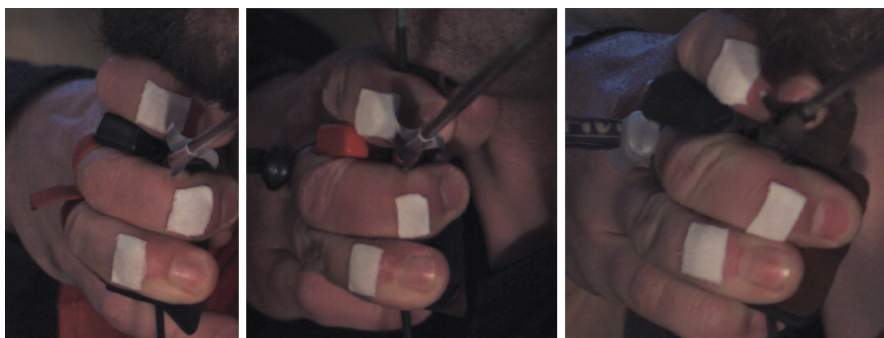
Parametr	Hodnota
Rozlišení	$2560 \times 2048$ px
Frame rate	253 fps
Rozhraní	CoaXPress 4-Cable CXP-6
Typ senzoru	CMOS
Rozměry senzoru	$12,8 \times 10,2$ mm



■ **Obrázek 5.1** Vývojový diagram popisující postup práce se získanými daty.



■ **Obrázek 5.2** Průběh výstřelu, zvýrazněný je snímek okamžiku vypuštění tětiny. Krok mezi jednotlivými snímky je 0,008 sekundy.



■ **Obrázek 5.3** Oříznuté snímky rukou střelců.

## 5.2 Naměřená data

Měřena byla technika tří střelců, každý vystřelil dvě sady po devíti šípech. Celkem bylo zaznamenáno 54 výstřelů, kde délka každého ze záznamů se různila podle doby míření. Proto bylo nutné nahrávky synchronizovat a sjednotit pro účely automatického zpracování. Dva výstřely byly později vyřazeny, jeden z důvodu chyby míření na straně střelce a druhý nebyl zaznamenán celý kvůli špatnému zvolení začátku snímání.

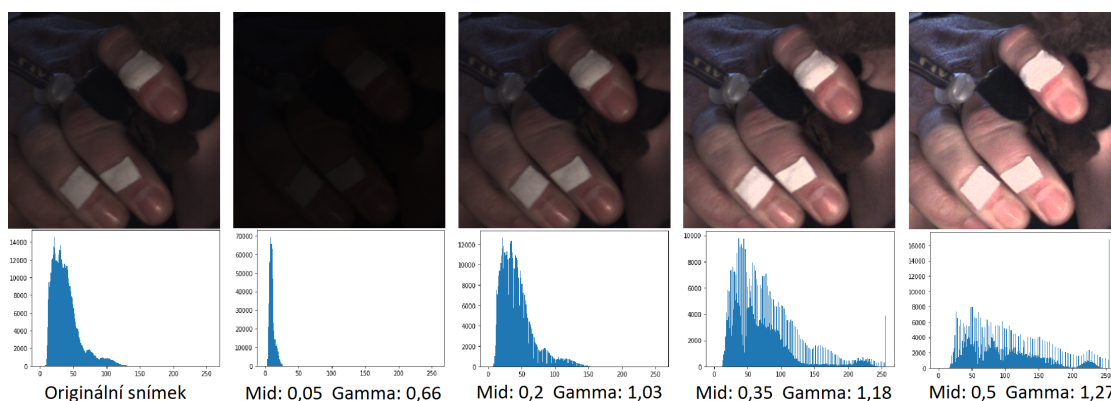
Data byla rozdělena nejprve podle střelců a následně po jednotlivých výstřelech. Každý vzniklý dataset byl sestříhán na 36 snímků, kde chvíle vypuštění šípu odpovídala snímku číslo 19. Pohyby střelce po 36. snímku jsou pouze následkem případných předešlých chyb. Jejich využití by tedy nepřineslo nové informace a pouze by zpomalilo proces zpracování dat. Průběh výstřelu s vyznačeným okamžikem vypuštění je na obrázku 5.2. Všechny soubory byly přejmenovány pro snadnou orientaci v souborovém systému. Ve složce každého střelce byly vytvořeny adresáře s číslem pořadí výstřelu a v nich soubory snímků pojmenované 0.png — 35.png.

## 5.3 Předzpracování obrazu

K práci s obrazovými daty byla využita knihovna `opencv` [32] a balíček funkcí `improutils` [33] vyvinutý v ImproLab na FIT ČVUT.

Všechny snímky byly oříznuty tak, aby obsahovaly pouze prsty lukostřelců. U každého z nich bylo nutné využít jiné hodnoty vzhledem k jejich odlišné výšce a postavení na střelecké metě. V rámci střelby se již jejich poloha neměnila, proto bylo možné použít jednotné oříznutí obrazu pro všechny snímky daného střelce. V grafickém editoru byla zjištěna pozice oblasti zájmu (prsty střelce) a snímek byl oříznut podle jejich rozměrů. Výsledné snímky jsou na obrázku 5.3.

Po oříznutí na sledovanou oblast bylo pomocí histogramu zjištěno, že je třeba zvýšit jas i kontrast snímků a tak normalizovat hodnoty pro následnou segmentaci. Jinak by byla segmentace bílých tejpů velmi náročná, neboť byly snímky tmavé a barva tejpů byla v některých místech



■ **Obrázek 5.4** Vliv parametru *mid* na hodnotu  $\gamma$  a efekt výsledné gamma korekce na histogram a obraz.

příliš podobná barvě prstů. K procesu byla využita gamma korekce (viz sekce 3.1.2).

Automatizování procesu bylo umožněno díky výpočtu parametru *gamma* zvlášť pro každý snímek. Histogramy snímků se lišily například v případě, kdy docházelo k odrazu světla z kovových částí chrániče prstů do objektivu. Každý snímek byl nejprve převeden do barevného modelu HSV a gamma korekce byla provedena na kanále „Value“ určujícímu světlost pixelu. Výsledná hodnota světlosti  $V_o$  pixelu byla vypočtena z původní  $V_i$  následujícím vzorcem:

$$V_o = V_i^\gamma \quad (5.1)$$

Kde hodnota  $\gamma$  je odvozena z průměrné světlosti celého snímku *mean* následujícím způsobem:

$$\gamma = \frac{\log(\text{mid} \cdot 255)}{\log(\text{mean})} [34] \quad (5.2)$$

Kde *mid* je parametr určující míru zesvětlení. Na obrázku 5.4 je vidět vliv různého parametru *mid* na hodnotu  $\gamma$  spolu s efektem výsledné gamma korekce na histogram a obraz. Na základě těchto pozorování byla vybrána jako optimální hodnota *mid* = 0,35 neboť histogram využívá celý rozsah 256 hodnot jasu. Vyšší hodnota parametru *mid* má již za následek příliš vysoké zesvětlení obrazu a dochází ke ztrátě kontrastu.

## 5.4 Segmentace

Z upravených snímků bylo možné procesem segmentace obrazu získat kontury bílých tejpů. Využita byla dvouprahová segmentace na barevném modelu HSV. Bílá barva je v modelu reprezentována pod libovolným odstínem (H), ovšem s nulovou saturací (S) a maximální hodnotou (V). Díky absenci saturace je barva daného odstínu naprosto odstraněna a jsou získány pouze odstíny šedé barvy. Poslední kanál (V) určuje její odstín, přičemž výsledná barva se zesvětluje směrem k vyšším hodnotám.

V knihovně *opencv* jsou rozsahy hodnot jednotlivých kanálů modelu HSV dle tabulky 5.2. Z tabulky a předchozího odstavce vyplývá, že hodnota bílé barvy je (0-179, 0, 255). Spodní práh kanálu H byl nastaven na 0 a horní na hodnotu 179. Pro kanál S byl spodní práh zvolen 0, horní hranice však musela být experimentálně zjištěna. Obdobně pro kanál V byla zvolena horní hranice na 255 a spodní bylo třeba testovat. Sekce 5.5.4 popisuje způsob, jakým byly parametry testovány. Hodnoty horního prahu S a spodního prahu V se mezi jednotlivými střelci drobně lišily, byly však aplikovatelné na všechny snímky každého výstřelu daného sportovce. Po segmentaci byly ve výsledném binárním obraze nalezeny kontury, které byly seřazeny podle velikosti a vybrány pouze největší tři. Těmi byly právě kontury bílého tejpů popisující pozici prstů, neboť na snímcích

■ **Tabulka 5.2** Model HSV v knihovně opencv.

Kanál	Minimum	Maximum
Hue	0	179
Saturation	0	255
Value	0	255



■ **Obrázek 5.5** Vizualizace bodů výstupu segmentace.

nebyly žádné větší části stejné barvy. U každé kontury bylo pro zjednodušení analýzy vypočítáno její těžiště. Body těžiště byly uloženy do seznamu, který byl seřazen podle hodnoty vertikální souřadnice. Tím se zachovala vazba bodů na jednotlivé prsty lukostřelce. Výstup segmentace je znázorněn na obrázku 5.5.

## 5.5 Analýza obrazových dat

V sekci je popsán algoritmus vedoucí k získání datasetu hodnot sledovaných charakteristik v průběhu každého výstřelu. Analýza byla prováděna zvláště pro každého střelce jednak kvůli rozdílným parametrům předzpracování obrazu, jednak kvůli rozdílům ve výstupech (vlivem odlišností v technice střelby).

---

**Algoritmus 1:** Algoritmus analýzy obrazových dat.

---

**Result:** Tabulka naměřených charakteristik pro všechny výstřely a jejich snímky.

uspořádání snímků do složek výstřelů;

**foreach** *výstřel* v *adresáři střelce* **do**

**if** *analýza horizontální pozice ruky* **then**

        předzpracování obrazu;

        segmentace;

        načtení počáteční pozice ruky pro daný výstřel;

**end**

**foreach** *snímek* ve složce *výstřelu* **do**

        předzpracování obrazu;

        segmentace;

        výpočet hodnoty vybrané charakteristiky a uložení do tabulky;

**end**

**end**

---

■ **Tabulka 5.3** Výstup analýzy horizontálního pohybu těžiště zadní ruky v podobě tabulky. Řádky odpovídají jednotlivým výstřelům, sloupce po sobě jdoucím snímkům. Záznamy udávají vzdálenost ruky od polohy kotvení. Tabulka má vždy celkem 18 řádků (v případě střelců s nezaznamenaným výstřelem pouze 17) a 36 sloupců.

	0	1	2	3	4	...
1	0.0	0.666667	1.374369	2.357023	3.073181	...
2	0.0	0.333333	1.201850	1.795055	2.748737	...
3	0.0	0.666667	1.374369	2.357023	3.162278	...
4	0.0	0.333333	1.000000	1.795055	2.108185	...
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

V cyklu byly procházeny snímky všech výstřelů zadaného střelce, předzpracovány a segmentovány podle postupů v předchozích sekcích a nakonec byl dle vybrané charakteristiky zvolen algoritmus zpracování dat. Algoritmus je popsán v pseudokódu 1. Jednotlivé specifické algoritmy jsou vysvětleny v podsekcích. Na závěr je ukázán postup testování parametrů segmentace analyzováním získaného datasetu. Část výstupní tabulky je ukázána v 5.3.

### 5.5.1 Vzájemná vzdálenost prstů

Pro analýzu změn vzdálenosti jednotlivých prstů byly za každý snímek výstřelu uloženy do datasetu tři hodnoty. První byla vzdálenost ukazováčku a prostředníčku, dále prostředníčku a prsteníčku a poslední hodnotou byla vzdálenost krajních prstů — ukazováčku a prsteníčku. Každá hodnota byla vypočtena ze vzorce pro eukleidovskou vzdálenost dvou bodů v rovině:

$$d(p, q) = \sqrt{(q_1 - p_1)^2 + (q_2 - p_2)^2} [35] \quad (5.3)$$

Kde  $p$  a  $q$  jsou hodnoty těžiště kontur získané v předchozí sekci. Na datech bylo možné sledovat změny v relativní poloze všech prstů v průběhu výstřelu. Postup byl opakován pro každý snímek všech výstřelů.

### 5.5.2 Horizontální pohyb ruky

Pro popis pohybu zadní ruky po horizontální ose bylo nutné v každém snímku zjistit polohu ruky a porovnat ji s polohou na počátečním snímku daného výstřelu.

Poloha ruky ve snímku byla získána jako aritmetický průměr z těžišť všech tří kontur. Za každý výstřel byla nejprve vypočtena hodnota pro první snímek, která byla uložena jako počáteční pozice ruky. U následujících snímků daného výstřelu byla vypočtena poloha ruky obdobným způsobem a porovnána s pozicí na prvním snímku výstřelu. Pro zjištění horizontální vzdálenosti byl vypočten rozdíl souřadnic  $x$  obou bodů a uložen do datasetu. Způsob výpočtu je vizualizován na obrázku 5.6. Algoritmus byl opakován pro každý výstřel vybraného střelce.

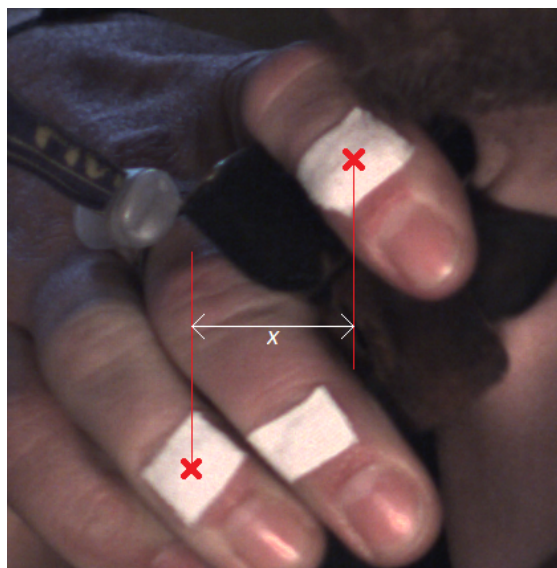
### 5.5.3 Rotace zadní ruky

Míru rotace zadní ruky lze na snímcích pozorovat pomocí polohy ukazováčku a prsteníčku střelce. Pokud dochází k rotaci okolo ukazováčku, musí bod těžiště kontury prsteníčku opisovat kružnici či elipsu se středem v bodě těžiště ukazováčku. Charakteristiku lze vyjádřit jako rozdíl v horizontální souřadnici ukazováčku a prsteníčku. Vypočtená hodnota byla uložena do výstupního datasetu. Pohyb opisující elipsu je vyjádřen změnou hodnoty v čase. Výpočet míry rotace ve snímku je vizualizován na obrázku 5.7.





■ **Obrázek 5.6** Vizualizace výpočtu horizontální vzdálenosti těžiště ruky od těžiště její počáteční polohy. Bod  $X_1$  vyznačuje počáteční pozici ruky,  $X_2$  pozici ruky na 19. snímku. Hodnota  $x$  představuje vzdálenost mezi body po vodorovné ose.



■ **Obrázek 5.7** Vizualizace výpočtu míry rotace ruky v daný okamžik výstřelu. Vzdálenost  $x$  určuje horizontální vzdálenost ukazováčku a prsteníčku střelce.

■ **Tabulka 5.4** Ukázka tabulky zásahů terče spolu s rozřazením do shluků. Tabulka má vždy celkem 18 řádků (v případě střelců s nezaznamenaným výstřelem pouze 17).

	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>group</b>
<b>1</b>	-1	-4	3
<b>2</b>	4	0	3
<b>3</b>	5	0	3
<b>4</b>	-13	1	1
⋮	⋮	⋮	⋮

### 5.5.4 Testování a kontrola dat

Dataset získaný ze snímků analyzováním jedné z výše popsaných charakteristik mohl obsahovat chybně vypočtená data. K tomu mohlo dojít z důvodu chybné segmentace, kdy nebyly nalezeny skutečné kontury tejpů. Bylo tedy nutné upravit parametry segmentace a metod předzpracování obrazu.

Chyby v datasetu byly nalezeny pomocí výpočtu standardní odchylky každého sloupce a hledání chybějících hodnot. Výpočet standardní odchylky je v následující rovnici:

$$s_N = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.4)$$

Kde  $N$  je celkový počet pozorování,  $\bar{x}$  je průměr hodnot analyzovaného vzorku a  $x_i$  jsou naměřené hodnoty.

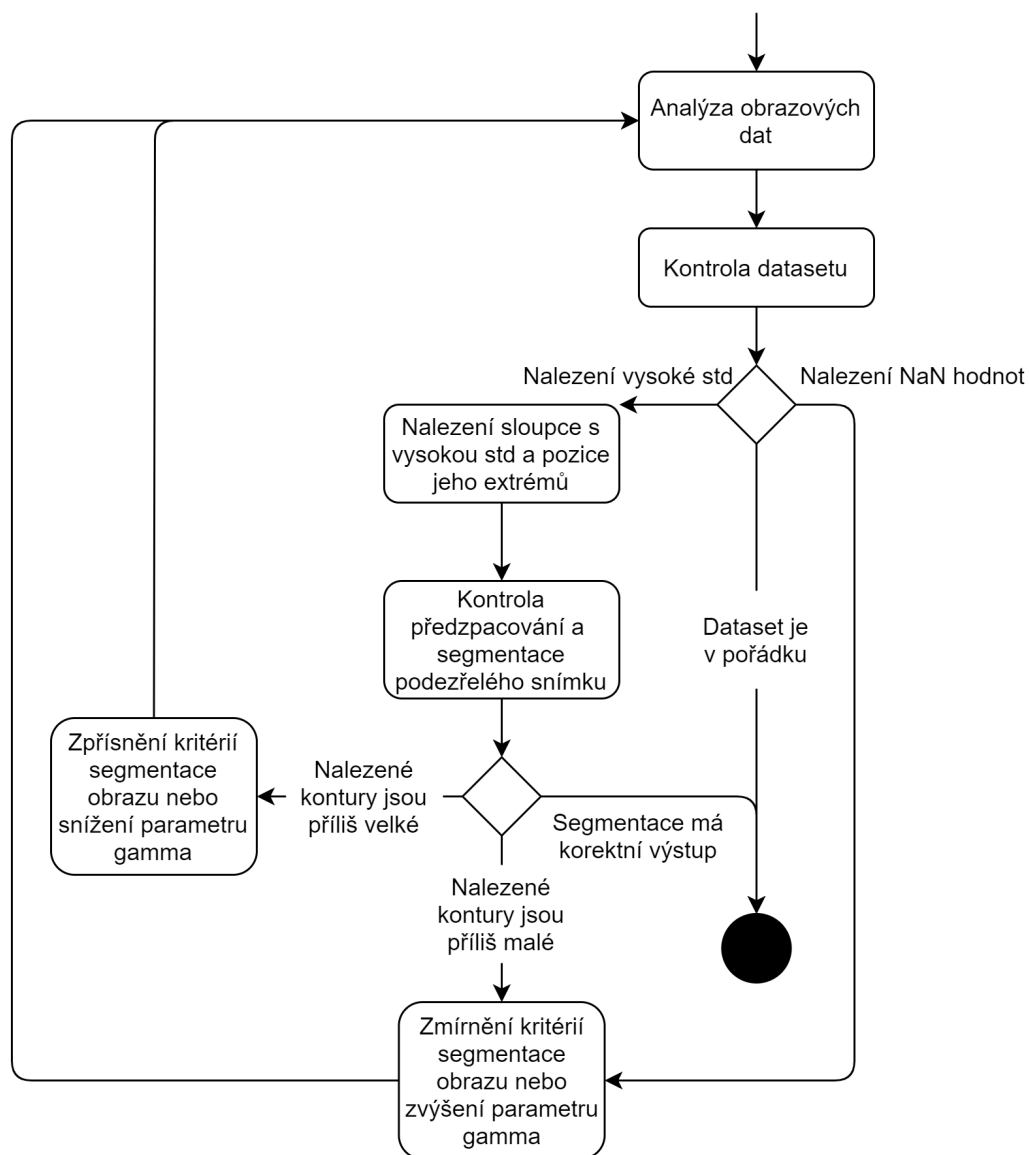
U sloupců s nejvyšší odchylkou byly nalezeny extrémní hodnoty, které způsobily vysokou odchylku a byly indikací chyby měření. Případně byla nalezena pozice chybějící hodnoty v datasetu.

Podle indexu řádku bylo možné najít výstřel, ve kterém k chybě došlo a číslem sloupce byl určen konkrétní špatně analyzovaný snímek. Na něm bylo následně provedeno předzpracování obrazu a byl zkoumán výstup metody segmentace. Pokud byly kontury tejpů nalezeny správně, byla vysoká odchylka způsobena velkou chybou v technice střelby sportovce a hodnota byla vyhodnocena jako správná. V opačném případě byly testovány jiné parametry předzpracování obrazu a segmentace popsané v sekcích 5.3 a 5.4. Pokud byly nalezené kontury tejpů větší než ve skutečnosti, bylo nutné zpřísnit kritéria segmentace zmenšením rozsahu pro dvouprahovou segmentaci. Pokud byly kontury menší nebo dokonce některá nebyla vůbec nalezena, byl proces úpravy parametrů opačný. Postup je vysvětlen v diagramu 5.8.

## 5.6 Uspořádání záznamů zásahů

Zásahy lukostřelců byly zaznamenány způsobem popsaným v sekci 4.3.3. Data byla uložena do csv souboru, kde číslo výstřelu bylo použito jako index. Soubor obsahoval dva sloupce pro horizontální a vertikální vzdálenost zásahu od středu uložených jako souřadnice  $x$  a  $y$ . Výsledná struktura je v tabulce 5.4. Soubor se souřadnicemi zásahů byl vytvořen pro každého střelce a využit v algoritmech popsaných v následujících sekcích.





■ **Obrázek 5.8** Diagram postupu testování předzpracování obrazu a segmentace.

## 5.7 Rozdělení zásahů do skupin

V sekci jsou popsány dva způsoby analýzy souboru zásahů střelce. Metody jsou využité k roztrídění zásahů a posléze i odpovídajících výstřelů do odlišných skupin.

### 5.7.1 Směr dopadu od soustřelu

V první metodě byl využit soustřel střelce pro určení skupin zásahů. Ty byly nalezeny na základě směru a vzdálenosti od soustřelu. Byly rozpoznávány čtyři směry kopírující osy souřadnicového systému (nahore = kladné  $y$ , vlevo = záporné  $x$ , ...) a vzdálenost vypočtena jako rozdíl souřadnic odpovídajících směru dopadu.

Soustřel byl rovněž využit ke klasifikaci dobrých zásahů pomocí vypočítání eukleidovské vzdálenosti (viz vzorec v sekci 5.5.1). Pokud byla hodnota nižší než stanovená hranice, byl zásah klasifikován jako dobrý. Hranice byla určena hodnotou 12 cm, protože při posunutí soustřelu do středu terče by takový zásah byl ohodnocen nejhůře devíti body z deseti.

### 5.7.2 Shlukování

Druhým způsobem klasifikace zásahů bylo využití shlukování, konkrétně metody  $k$ -means popsané v sekci 3.2.1. Parametr  $k$  byl zvolen automaticky pomocí výpočtu silhouette skóre (viz sekce 3.2.2). Testovány byly hodnoty  $k$  od jedné až do počtu zásahů v terči. Hodnota parametru s nejvyšším skóre byla určena jako optimální. V kapitole 6 byla v některých případech využita i druhá nebo třetí nejlepší hodnota na základě pozorování výsledných shluků a jejich vhodnosti pro porovnání charakteristik výstřelů.

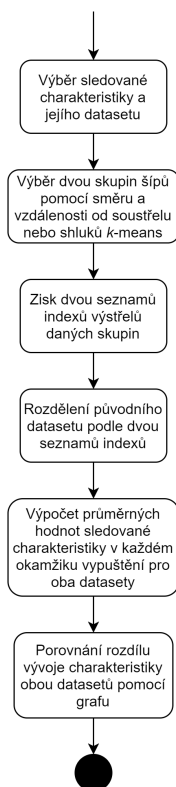
Příslušnost zásahu k shluku byla uložena přidáním nového sloupce „group“, do kterého byl uložen index shluku obsahující daný zásah (viz tabulka 5.4).

## 5.8 Analýza souvislosti mezi výstřely a zásahy

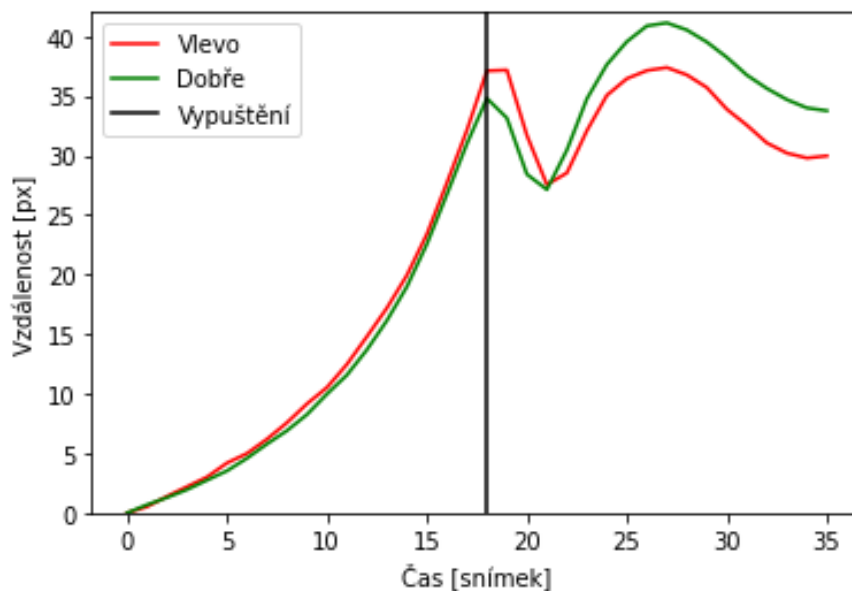
Metodami popsanými v předchozích sekcích byly pro každého střelce vytvořeny čtyři datasey. Každému střelci náležela jedna tabulka se zásahy rozřazenými do kategorií a za každou sledovanou charakteristiku tabulka s výsledky analýzy obrazu.

Aby mohl být sledován vliv střelecké techniky na zásah, bylo nutné vybrat jednu charakteristiku a dataset získaný její analýzou rozdělit na dvě části podle korespondujících zásahů. Z datasetu byly například vybrány záznamy měření všech výstřelů, jejichž zásahy dopadly do horní části terče s využitím rozřazení zásahů popsaného v sekci 5.6. Podobným způsobem byly vybrány výstřely se zásahy blízko soustřelu. U obou datasetů byla vypočtena průměrná hodnota naměřené charakteristiky v každém snímku. Výsledné číselné řady popisují vývoj průměru charakteristiky v čase dané skupiny výstřelů. Řady byly vizualizovány pomocí grafu, kde na souřadnicové ose  $y$  leží průměrná hodnota měřené charakteristiky a osa  $x$  popisuje její vývoj v čase (v počtu snímků od začátku měření). Pro lepší pochopení je do grafu zavedena svislá přímka označující okamžik kdy tětiva opustila prsty střelce. Postup je vysvětlen diagramem 5.9. Ukázka výsledného grafu je na obrázku 5.10. Postup byl proveden zvlášť pro každého střelce a na závěr byli zprůměrováni dohromady, aby bylo možné sledovat jednak techniku jednotlivých sportovců, tak i globální trend.

Rozbor rozdílů charakteristik u různých skupin výstřelů je společně s vysvětlením uveden v následující kapitole.



■ **Obrázek 5.9** Diagram postupu při porovnání charakteristiky pro dvě skupiny výstřelů.



■ **Obrázek 5.10** Ukázka vizualizace horizontálního pohybu ruky při výstřelu. Červeně znázorněna průměrná hodnota charakteristiky pro výstřely se zásahem vlevo, zeleně průměr z výstřelů, jejichž zásah dopadl blízko soustřelu (dobré výstřely). Na ose  $y$  je zanesena vzdálenost v pixelech, osa  $x$  reprezentuje čas ve snímcích od počátku měření.



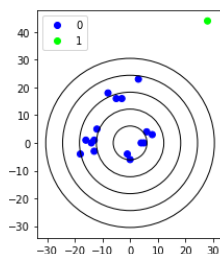
V kapitole jsou pomocí grafů ze získaných dat ověřeny počáteční hypotézy a popsány nově objevené vazby mezi lukostřeleckou technikou a pozicí šípu v terči. Rovněž je zde ukázán rozdíl v technice analyzovaných lukostřelců.

### 6.1 Vzájemná vzdálenost prstů

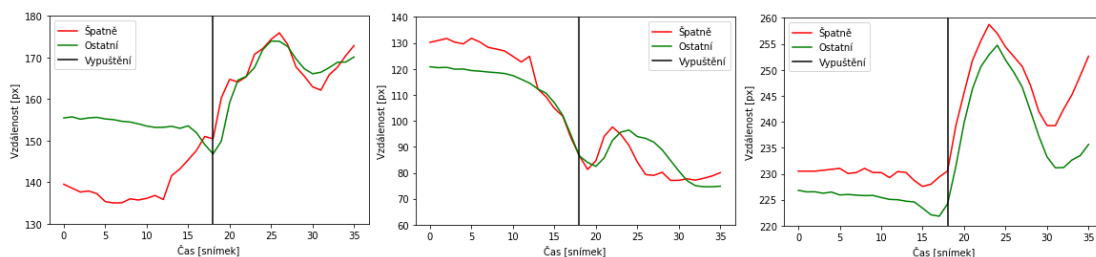
Vliv rozdílné vzdálenosti mezi prsty je patrný na šípech nejvzdálenějších od soustřelu. Zásahy třetího sledovaného střelce byly pro analýzu charakteristiky nejvhodnější díky jednomu šípu velmi vzdálenému od ostatních. Dle silhouette skóre bylo nejvhodnější rozdělit jeho zásahy na dvě skupiny, kde v druhé byl pouze nejvzdálenější šíp. Vizualizace terče spolu s výsledkem shlukování je znázorněna na obrázku 6.1.

U výstřelu odlehlého šípu byla na začátku procesu vypuštění naměřena menší vzdálenost mezi ukazováčkem a prostředníčkem střelce. V okamžiku, kdy tětiva opouští prsty střelce nedocházelo k přiblížení prstů, ale naopak k jejich oddalování. Naopak vzdálenost prostředníčku a prsteníčku byla na začátku výstřelu vyšší než obvykle. Ve stejný okamžik jako u předchozích prstů (snímek číslo 12) se rozdíl oproti zbytku výstřelů začal snižovat, střelec tedy zřejmě začal posouvat prostředníček směrem dolů. Odlišná je rovněž vzdálenost krajních prstů. Ukazováček a prsteníček byly po celou dobu výstřelu více vzdálené, než byl střelcův naměřený průměr. Jednotlivé charakteristiky jsou znázorněny na obrázku 6.2.

Pro sledovaného střelce je takto špatný zásah velmi neobvyklý. Z dat je patrné, že střelec špatně uchopil tětivu s prostředníčkem příliš blízko u šípu a prsteníčkem příliš nízko na tětivě. V průběhu vypuštění se prst dostal do správné pozice, to už však ovlivnilo letovou dráhu šípu.



**Obrázek 6.1** Výsledek shlukování zásahů třetího střelce s volbou ideálního  $k$  dle silhouette skóre. Zásah terče hodnocený dvěma body z deseti je oddělen od všech ostatních, ze kterých nejhorší leží v sedmibodové oblasti.



**■ Obrázek 6.2** Porovnání vývoje vzdáleností jednotlivých prstů při špatném výstřelu (červeně) a ostatních (zeleně). Na levém grafu je vzdálenost mezi ukazováčkem a prostředníčkem, na prostředním mezi prostředníčkem a prsteníčkem a na pravém mezi ukazováčkem a prsteníčkem.

Z analýzy vyplývá, že zásadní chyby v zásahu terče mohou být způsobeny uchopením tětiny s prsty příliš blízko šípu.

## 6.2 Horizontální pohyb ruky

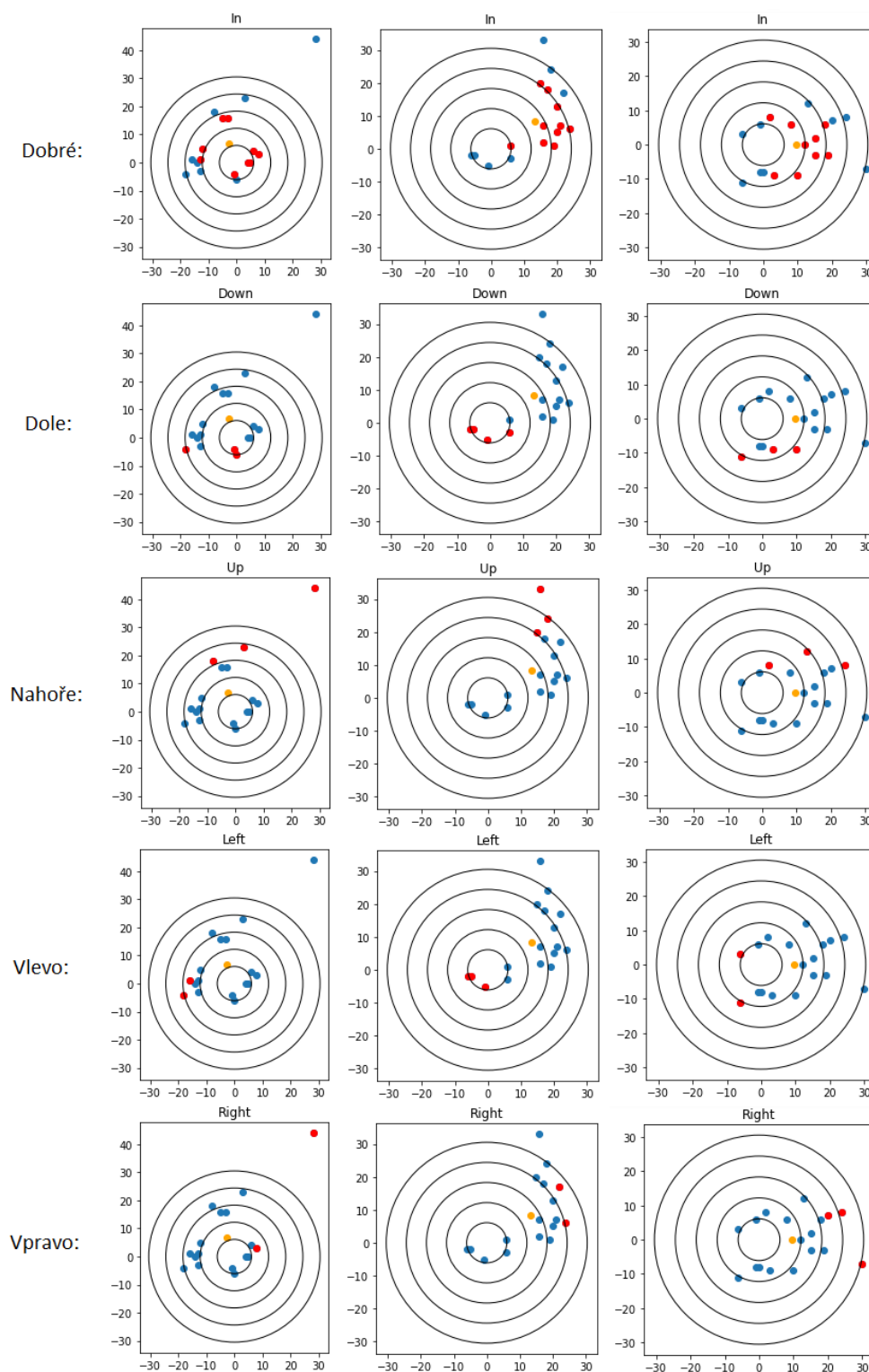
Vyšší horizontální vzdálenost prstů od pozice kotvení byla pozorována u zásahů do levé části terče. Naproti tomu šípy na pravé straně měly vzdálenost nižší, než výstřely jejichž zásahy dopadly k soustřelu. Klasifikace zásahů je na obrázku 6.3. Jev je ukázán na grafech v obrázku 6.4 včetně přímého porovnání levých a pravých zásahů.

Výstřely zásahů v pravé části terče vykazovaly nárůst vzdálenosti v době po vypuštění tětiny. Při dokončení výstřelů se zásahy vlevo měli střelci naopak tendenci prsty přibližovat k pozici kotvení více než u dobrých výstřelů. Pozorování potvrzuje hypotézu z části 4.2.2, navíc ukazuje korelaci mezi nižší vzdáleností vypuštění a výstřelem vedoucím k zásahu vpravo. Důvodem je vychýlení tětiny doleva díky tlaku prstů zadní ruky, podle kterých je měřena pozice ruky. Pokud šíp startuje z tětiny vychýlené na levou stranu, je jeho dráha letu směřována do pravé strany terče.

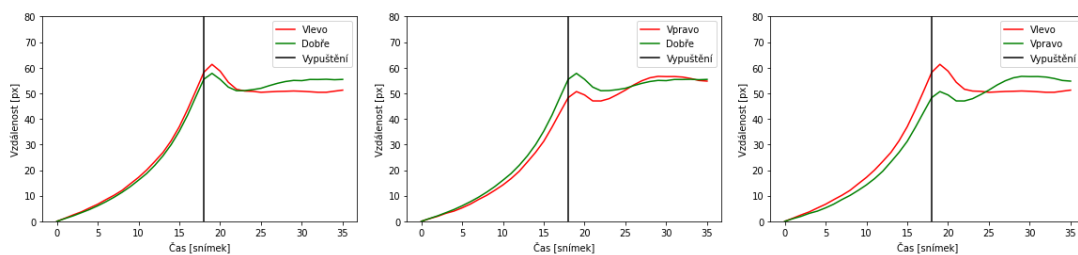
## 6.3 Rotace zadní ruky

Míra rotace zadní ruky okolo ukazováčku měla u lukostřelců odlišný průběh. U všech ale byla pozorována nižší míra rotace u výstřelů se zásahy dole, než nahoře. Na obrázku 6.5 je znázorněn průběh rotace u každého ze střelců.

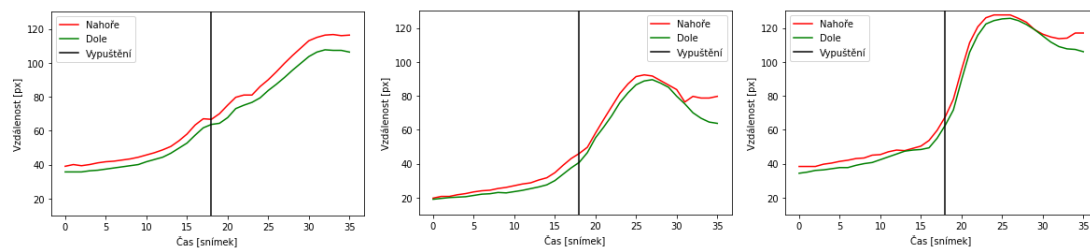
Zprůměrovaný trend všech střelců s porovnáním výstřelů se zásahy v horní a spodní části terče je na obrázku 6.6. Tím je potvrzena teorie z části 4.2.3 o vlivu rotace na vertikální pozici šípu v terči spolu s konkretizací vztahu, kde nižší míra rotace implikuje zásah ve spodní části terče a obráceně.



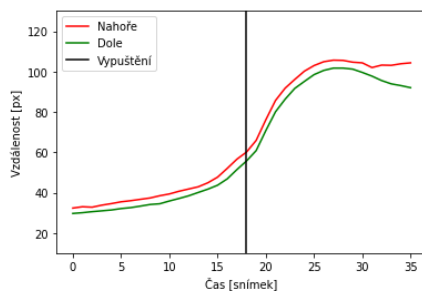
■ **Obrázek 6.3** Rozřazení jednotlivých zásahů ke skupinám podle jejich polohy vůči pozici soustřelu. Každý sloupec sleduje jiného střelce, v řádcích jsou jednotlivé skupiny.



■ **Obrázek 6.4** Grafy znázorňující vývoj horizontální vzdálenosti prstů od pozice kotvení střelce. Grafy jsou průměrovány z výstřelů všech tří střelců. Levý graf porovnává výstřely se zásahy v levé části terče s těmi se zásahy u soustřelu, prostřední ukazuje rozdíl výstřelů se zásahy vpravo s dobrými výstřely a pravý graf porovnává levou a pravou skupinu zásahů.



■ **Obrázek 6.5** Grafy popisující vývoj rotace zadní ruky během výstřelu. Každý porovnává výstřely jednoho střelce, jejichž zásahy dopadly dolů (zeleně) a nahoru (červeně). Je vidět odlišná technika prvního ze střelců.



■ **Obrázek 6.6** Zprůměrovaný trend rotace zadní ruky napříč všemi střelci. Zeleně znázorněné jsou výstřely se zásahy dole, červeně nahore.



## Kapitola 7

# Diskuze

Vysokorychlostní kamery a metody zpracování obrazu byly v práci ověřeny jako vhodné prostředky k analýze lukostřelecké techniky. Nastavení snímkovací frekvence 600 snímků za vteřinu se ukázalo být dostačující pro sledování pohybu prstů během vypuštění. Bylo ukázáno, že i přes odlišné způsoby techniky střelby sledovaných sportovců lze u vztahu mezi jejich výstřelem a zásahem v terči sledovat stejný trend.

Pro lepší porovnání vlivů techniky vypuštění na letové vlastnosti šípu by bylo vhodné využít většího množství střelců a analyzovat větší množství výstřelů. Tím by se docílilo vyššího počtu zásahů v terči a pravděpodobně také lepšího pokrytí všech směrů od soustřelu. V použitém datasetu se například stalo, že všechny zásahy druhého střelce v levé části terče byly zároveň také dole od soustřelu. Využitím většího množství dat by bylo docíleno větší objektivity sledovaných závěrů. Vhodné by bylo rovněž zahrnout do pozorování střelce odlišných klubů v rámci České republiky či z jiných zemí. Bylo by tak možné porovnat rozdílné přístupy k technice lukostřelby a sledovat jejich náchylnost k určitým druhům chyb.

Sledované parametry jsou pouze jednou z mnoha částí lukostřelecké techniky. Pro oblast sportovní lukostřelby by bylo přínosné prozkoumat vliv i ostatních částí lidského těla na dráhu letu šípu, která se projeví zásahem terče. Například pohyby přední ruky v okamžiku výstřelu mohou mít zásadní vliv na startovní pozici šípu. Důležitá je rovněž trajektorie pohybu zadního lokte sportovce nebo úhly, které svírají jeho ruce s osou šípu. Pro měření postoje střelce před výstřelem není nutné využití vysokorychlostní kamery, jde o statickou pozici, kterou lze zkoumat na základě jednoho snímku například metodami zpracování obrazu. Popsané parametry, které nejsou v práci sledovány, mohly mít nepozorovaný vliv na výsledný zásah. Analýza většího množství aspektů výstřelu by proto vedla k ucelenějším výsledkům. Rovněž spojení více metod sledování těla lukostřelce (popsaných v kapitole 1), společně s algoritmy využitými v práci, by mělo vést k lepšímu pochopení vlivu techniky lukostřelby na let šípu.

Poznatky z výsledků v kapitole 6 lze využít k výuce lukostřelby. Nabízejí návrhy pro trenéry na chyby v technice, kterých se jejich svěřenci mohou dopouštět. Trenér může využít popsané vztahy k odhadnutí problému v technice podle pozice šípu v terči. Stejně tak je práce přínosná pro střelce, kteří si mohou s její pomocí uvědomit, co způsobilo špatný zásah a na co si dát pozor.

Práce může být rovněž přínosná pro automatizaci trénování lukostřelby. Sportovec si často neuvědomuje, kde provedl chybu a nemusí to ani poznat z fotografie či videa. Systém by fungoval následujícím způsobem. Střelec by odstřílel několik sad a podobně jako v sekci 4.3.3 zaznamenal místa dopadů jednotlivých šípů. Případně by se dal i tento proces automatizovat využitím metod popsaných v sekci 1.4. Sportovec by byl během střelby zaznamenáván pomocí vysokorychlostní kamery metodami popsanými v sekci 4.3 a dalšími senzory zmíněnými v kapitole 1. V případě špatného výstřelu by pak systém informoval lukostřelce o parametrech, které se nejvíce lišily od jeho dobrých výstřelů. Tímto způsobem by se dala výrazně zvýšit efektivita tréninku.





## Kapitola 8

# Závěr

Práce si kladla za cíl prozkoumat některé charakteristiky vypuštění šípu a popsat jejich vliv na trajektorii šípu. Byl sestaven měřicí kamerový systém a nasnímana reálná data střelců. Byla vytvořena metodika měření a specifikovány sledované parametry výstřelu. Byly navrženy a vytvořeny algoritmy pro analýzu obrazových dat, díky kterým byly měřeny a hodnoceny charakteristiky lukostřelecké techniky.

Byla zkoumána vzdálenost jednotlivých prstů s cílem objevit jejich vliv na zásah. Bylo ukázáno, že příčinou zásahů velmi vzdálených od středu terče je příliš malá vzdálenost ukazováčku a prostředníčku. Dále byla otestována hypotéza, že vyšší horizontální vzdálenost ruky od pozice kotvení vede k zásahům v levé části terče. Hypotéza byla potvrzena a rovněž byl objeven opačný vztah, kdy zásahy v pravé části terče jsou způsobeny nižší vzdáleností od kotvení. Poslední ověřovaná teorie se týkala vlivu rotace zadní ruky na vertikální vzdálenost zásahu od soustřelu. I tato hypotéza byla potvrzena a bylo ukázáno, že nižší míra rotace vede k zásahům pod úrovní soustřelu a naopak.

Výstupy práce jsou přínosem lukostřelecké komunitě a mohou pomoci trenérům k lepšímu pochopení vlivu techniky střelby na letové vlastnosti šípu, které se projeví výsledným zásahem. Zároveň výsledky ukazují vědecký potenciál pro další rozvíjení tématu.



# Literatura

- [1] ŠRÁMEK Jaromír. Elektromyografie. In: *WikiSkripta* [online]. 1. lékařská fakulta a Univerzita Karlova. Datum poslední revize 1. 10. 2018. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/index.php?title=Elektromyografie&oldid=410741>
- [2] STONE, Richard T. The Biomechanical and Physiological link between Archery Techniques and Performance. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* [online]. 2007, 51(18), 1227-1231. [cit. 2021-04-23]. ISSN 2169-5067. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1177/154193120705101837>
- [3] LEE, Kisik a Tyler BENNER. *Total archery: v nitru lukostřelce*. Přeložil Petr DUBA. Praha: Mladá fronta, 2016. Edice Českého olympijského výboru. ISBN 978-80-204-4242-0.
- [4] ERTAN, Hayri, Abdullah Ruhi SOYLU a Feza KORKUSUZ. Quantification the relationship between FITA scores and EMG skill indexes in archery. In: *Journal of Electromyography and Kinesiology* [online]. 2005, 15(2), 222-227 [cit. 2021-04-23]. ISSN 10506411. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelekin.2004.08.004>
- [5] ERTAN, Hayri, Axel KNICKER, Ruhi SOYLU a Heiko STRÜDER. Individual Variation of Bowstring Release in High Level Archery: A Comparative Case Study. In: *Human Movement* [online]. 2011, 12(3) [cit. 2021-04-23]. ISSN 1899-1955. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.2478/v10038-011-0030-x>
- [6] HORSÁK, Brian a Mario HELLER. A Three-Dimensional Analysis of Finger and Bow String Movements During the Release in Archery. In: *Journal of Applied Biomechanics* [online]. 2011, 27(2), 151-160 [cit. 2021-04-23]. ISSN 1065-8483. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1123/jab.27.2.151>
- [7] TAHA, Zahari, Jessnor Arif MAT-JIZAT, Muhammad Amirul ABDULLAH, Rabiū Muzazu MUSA, Mohamad Razali ABDULLAH, Mohamad Fauzi IBRAHIM a Mohd Ali Hanafiah SHAHARUDIN. Integrated multi sensors and camera video sequence application for performance monitoring in archery. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* [online]. 2018, 319 [cit. 2021-04-23]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/319/1/012017>
- [8] ZHAO, Yiran, Shanu SALUNKE, Alexander LEAVITT, Kevin CURTIN, Nghia HUYNH a Clint ZEAGLER. E-archery. In: *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct* [online]. New York, NY, USA: ACM, 2016, 2016-09-12, s. 908-913 [cit. 2021-04-23]. ISBN 9781450344623. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1145/2968219.2968577>

- [9] ZIN, Thi Thi, Ikuo OKA, Takuya SASAYAMA, Shingo ATA, Hitoshi WATANABE a Hiroshi SASANO. Image Processing Approach to Automatic Scoring System for Archery Targets. In: *2013 Ninth International Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing* [online]. IEEE, 2013, 2013, s. 259-262 [cit. 2021-04-23]. ISBN 978-0-7695-5120-3. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1109/IIH-MSP.2013.73>
- [10] PARK, James L a Oliver LOGAN. High-speed video analysis of arrow behaviour during the power stroke of a recurve archery bow. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology* [online]. 2012, 227(2), 128-136 [cit. 2021-04-23]. ISSN 1754-3371. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1177/1754337112446406>
- [11] World Archery, *Archery in slow motion: The series* [online], YouTube seznam videí. 2018 [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLnGbQXzYstgH9kqWrGqblrwMS2DLftkyB>
- [12] MURAKAMI, Masahide, Masato IWASE, Kazuya SEO, Yuji OHGI a Reno KOYANAGI. High-speed video image analysis of ski jumping flight posture. In: *Sports Engineering* [online]. 2014, 17(4), 217-225 [cit. 2021-04-23]. ISSN 1369-7072. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/s12283-014-0157-z>
- [13] NAGANO, Akinori, Masahiro FUJIMOTO, Shoma KUDO a Ryosuke AKAGUMA. An image-processing based technique to obtain instantaneous horizontal walking and running speed. In: *Gait & Posture* [online]. 2017, 51, 7-9 [cit. 2021-04-23]. ISSN 09666362. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gaitpost.2016.09.015>
- [14] IVANKO, Denis, Alexey KARPOV, Dmitrii FEDOTOV, Irina KIPYATKOVA, Dmitry RYUMIN, Dmitriy IVANKO, Wolfgang MINKER a Milos ZELEZNY. Multimodal speech recognition: increasing accuracy using high speed video data. In: *Journal on Multimodal User Interfaces* [online]. 2018, 12(4), 319-328 [cit. 2021-04-23]. ISSN 1783-7677. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/s12193-018-0267-1>
- [15] MADSEN, Rune. Color models and color spaces. In: *Programming design systems.* [online]. 17. 7. 2020 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: <https://programmingdesignsystems.com/color/color-models-and-color-spaces/index.html>
- [16] File: HSV color solid cylinder. In: *Wikimedia Commons, the free media repository.* [online]. Wikimedia Commons. 2015 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HSV\\_color\\_solid\\_cylinder.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HSV_color_solid_cylinder.png)
- [17] WIKIPEDIA CONTRIBUTORS. Gamma correction. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001, 21. 3. 2021 [cit. 2021-4-27]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma\\_correction](https://en.wikipedia.org/wiki/Gamma_correction)
- [18] BOCK, Tim. What is Hierarchical Clustering? In: *Displayr Blog* [online]. Displayr, 2018. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.displayr.com/what-is-hierarchical-clustering/>
- [19] *Iris Species* [online]. Kaggle. 2016. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.kaggle.com/uciml/iris>
- [20] VALENTA, Daniel. *Hierarchické shlukování a algoritmus k-means* [online]. ČVUT, Fakulta informačních technologií. 2020. [cit. 2021-04-27].
- [21] PEDRAGOSA, F. a další. Scikit-learn: Machine Learning in Python. In: *Journal of Machine Learning Research* [online]. 2011, 12, 2825-2830. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://scikit-learn.org/stable/index.html>

- [22] PEDRAGOSA, F. a další. *K-means*. In: *Journal of Machine Learning Research* [online]. sklearn.cluster.KMeans. 2011, 12, 2825-2830. [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.KMeans.html>
- [23] BHARDWAJ, Ashutosh. Silhouette Coefficient. In: *Towards data science* [online]. 2020 [cit. 2021-04-27]. Dostupné z: <https://towardsdatascience.com/silhouette-coefficient-validating-clustering-techniques-e976bb81d10c>
- [24] Redakce webu Arrow.com. Introduction to Bayer Filters. In: *Arrow* [online]. Arrow Electronics, Inc. 2019. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/introduction-to-bayer-filters>
- [25] File:Iris dendrogram.png. In: *Wikimedia Commons, the free media repository*. [online]. Wikimedia Commons 2020. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Iris\\_dendrogram.png&oldid=463152354](https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Iris_dendrogram.png&oldid=463152354)
- [26] File:Bayer pattern on sensor.svg. In: *Wikimedia Commons, the free media repository*. [online]. Wikimedia Commons 2020. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bayer\\_pattern\\_on\\_sensor.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bayer_pattern_on_sensor.svg)
- [27] PROJECT JUPYTER. *jupyter notebook* [software]. 2014. [2018-02-20]. Dostupné z: <https://jupyter.org/install>
- [28] VAN ROSSUM, Guido, Drake VAN ROSSUM a L. FRED. *Python 3 Reference Manual* [online]. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN: 1441412697. [cit. 2021-04-29]
- [29] BASLER AG. Marathon ACX-QP In: *Basler Product Documentatio*[online]. Basler AG, 2021. [cit. 2021-04-28] Dostupné z: <https://docs.baslerweb.com/frame-grabbers/marathon-acx-qp>
- [30] NORPIX. *StreamPix 8* [software]. 2019. Dostupné z: <https://www.norpix.com/products/streampix/streampix.php>
- [31] *Spark Series SP-5000C-CXP4 5-megapixel industrial camera* [online]. JAI. 2014 [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://www.jai.com/products/sp-5000c-cxp4>
- [32] OPENCV. *Open Source Computer Vision Library* [software]. 2015. Dostupné z: <https://opencv.org/>
- [33] IMPROLAB. *improutils* [software]. 2021. Dostupné z: <https://pypi.org/project/improutils/>
- [34] *How to set the best value for gamma correction* [online]. Stack Overflow. 2020 [cit. 2021-4-29]. Dostupné z: <https://stackoverflow.com/a/61701330>
- [35] Euclidean distance. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001, 13. 4. 2021 [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Euclidean\\_distance](https://en.wikipedia.org/wiki/Euclidean_distance)





# Obsah přiloženého média

archer1...3	.....	záznamy jednotlivých střelců
├─ shots	.....	zaznamenané snímky roztříděné podle výstřelů
│ └─ 1...18	.....	složky s nasnímanými výstřely
│ │ └─ 0.png...35.png	.....	snímky kamerového záznamu
└─ archer.csv	.....	tabulka zapsaných souřadnic zásahů
lib.ipynb	.....	pomocné funkce
analysis.ipynb	.....	analýza výstřelů střelců