

ZÁVĚREČNÁ STUDIJNÍ PRÁCE

dokumentace

SportVision - Videoanalýza sprinterského výkonu



Autor: Filip Hřivňacký
Obor: 18-20-M/01 INFORMAČNÍ TECHNOLOGIE
se zaměřením na počítačové sítě a programování
Třída: IT4
Školní rok: 2024/25

Poděkování

Prostor k poděkování (například vedoucímu práce).

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci vypracoval samostatně a uvedl veškeré použité informační zdroje.

Souhlasím, aby tato studijní práce byla použita k výukovým a prezentačním účelům na Střední průmyslové a umělecké škole v Opavě, Praskova 399/8.

V Opavě 1. 1. 2025

.....
Podpis autora

Abstrakt

Tato práce se zabývá vývojem softwarového nástroje SportVision, který slouží k analýze rychlosti a pohybu sportovce pomocí běžně dostupného videozáznamu. Cílem práce je vytvořit dostupnou alternativu k drahým hardwarem měřícím systémům, jako jsou fotobuňky. Aplikace využívá moderní metody počítacového vidění, konkrétně knihovny OpenCV a MediaPipe, pro detekci lidského těla (Pose Estimation) a následně vypočítává metriky, jako je průměrná rychlosť či čas na vymezeném úseku. Součástí práce je i implementace kalibrace scény pro zvýšení přesnosti měření v reálných podmínkách.

Klíčová slova

Počítacové vidění, Python, MediaPipe, OpenCV, analýza sportu, sprint, měření rychlosti, videoanalýza.

Abstract

This thesis focuses on the development of the software tool SportVision, designed for analyzing athlete speed and movement using standard video footage. The goal is to create an accessible alternative to expensive hardware measurement systems. The application utilizes computer vision methods, specifically OpenCV and MediaPipe libraries, for human pose estimation and calculates metrics such as average speed or time over a specific distance. The thesis also addresses scene calibration and perspective correction to improve measurement accuracy in real-world athletic track conditions.

Keywords

Computer Vision, Python, MediaPipe, OpenCV, sports analysis, sprint, speed measurement, video analysis.

Obsah

Úvod	3
1 Analýza problému a cíle práce	5
1.1 Existující řešení pro sběr dat	5
1.2 Přínos projektu SportVision	6
2 Teoretická východiska a použité technologie	7
2.1 Princip počítačového vidění	7
2.2 Konvoluční neuronové sítě (CNN)	8
2.3 MediaPipe a model BlazePose	8
2.4 Knihovna OpenCV	9
3 Návrh a implementace aplikace	11
3.1 Struktura programu	11
3.2 Kalibrace scény	11
3.3 Detekce referenčního bodu	12
3.4 Algoritmus měření (Stavový automat)	12
3.5 Vizualizace a výstup dat	13
4 Testování a zhodnocení výsledků	15
4.1 Metodika testování	15
4.2 Naměřené výsledky	15
4.3 Diskuze výsledků	16
4.4 Závěr testování	17
A Spot diagramy a další	23

ÚVOD

Moderní sport v 21. století je neodmyslitelně spjat s daty a jejich analýzou. Schopnost přesně změřit výkon, analyzovat techniku a sledovat progres je tím, co často odlišuje amatérské snažení od profesionálního přístupu. V disciplínách, jako jsou sprinty, kde o vítězství rozhodují setiny sekundy, je přesné měření klíčové.

Profesionální sportovci a týmy mají k dispozici špičkové vybavení – od laserových bran přes motorizované odporové zařízení až po laboratoře biomechaniky. Tyto technologie jsou však pro běžné trenéry mládeže, amatérské atlety nebo školní týmy často finančně nedostupné. V praxi tak zůstávají odkázáni na ruční stopky, jejichž přesnost je silně ovlivněna reakční dobou měřícího, a na subjektivní vizuální hodnocení techniky bez možnosti přesné kvantifikace.

Tato práce si klade za cíl tento problém řešit. Představuje projekt *SportVision* – softwarový nástroj, který demokratizuje přístup ke sportovní analýze. S využitím běžně dostupného hardwaru (osobní počítač, kamera chytrého telefonu) a moderních metod počítačového vidění umožňuje přesně změřit rychlosť běžce a vizualizovat jeho pohyb bez nutnosti investic do drahého vybavení.

Práce je rozdělena do tří hlavních částí. První část se věnuje teoretickému rozboru problematiky a popisu použitých technologií, zejména knihoven OpenCV a MediaPipe, které stojí za detekcí pohybu. Druhá část detailně popisuje návrh a implementaci samotné aplikace v jazyce Python, včetně řešení technických výzev, jako je kalibrace scény a úprava modelu. Závěrečná část pak shrnuje výsledky testování aplikace v reálných podmírkách atletického stadionu a hodnotí její přesnost a použitelnost v praxi.

Výsledkem práce je funkční prototyp aplikace, který demonstruje, že pokročilá sportovní analýza nemusí být výsadou elitních týmů, ale může být dostupná komukoliv s notebookem a nadšením pro sport.

1 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

Cílem této práce je vytvořit dostupný nástroj pro analýzu sportovního výkonu, který eliminuje nutnost nákupu drahého hardwarového vybavení. Pro pochopení kontextu je nutné nejprve analyzovat dvě rozdílné technologie, které se v současné profesionální atletice používají.

1.1 EXISTUJÍCÍ ŘEŠENÍ PRO SBĚR DAT

V současné praxi se odděluje měření výkonu (rychlosť/čas) a analýza techniky (pohyb těla). Pro každou z těchto disciplín existují specializovaná zařízení.

1.1.1 Elektronická časomíra

Standardem pro přesné měření času a průměrné rychlosti jsou tzv. **fotobuňky (timing gates)**. Tyto systémy fungují na principu infračervených vysílačů a přijímačů, které jsou rozmístěny na trati ve specifických vzdálenostech (např. 10, 20, 30 metrů).

Časomíra se spustí a zastaví v momentě, kdy běžec fyzicky přeruší neviditelný paprsek mezi stojany. Výsledkem je přesný časový údaj, ze kterého lze vypočítat průměrnou rychlosť na daném úseku. Hlavní nevýhodou je, že systém nevidí běžce mezi bránami a neposkytuje žádnou informaci o jeho technice.

1.1.2 Optické systémy

Pro detailní analýzu biomechaniky (kostry a pohybu kloubů) se využívají systémy **Motion Capture**. V tomto případě musí mít sportovec na sobě speciální přiléhavý oblek s reflexními značkami (markery) umístěnými na klíčových kloubech.

Soustava infračervených kamer snímá polohu těchto značek a software následně rekonstruuje 3D model kostry sportovce. Ačkoliv jde o nejpřesnější metodu analýzy techniky, její nasazení v běžném tréninku je téměř nemožné kvůli extrémní ceně, nutnosti laboratorních podmínek a zdlouhavé přípravě sportovce (oblékání do senzorů).

1.2 PŘÍNOS PROJEKTU SPORTVISION

Aplikace SportVision byla navržena tak, aby funkce obou výše zmíněných systémů integrovala do jednoho softwarového řešení. Její hlavní přínos spočívá ve třech oblastech:

1. **Spojení času a obrazu:** Projekt nahrazuje fotobuňky virtuální detekcí průchodu a zároveň nahrazuje drahý Motion Capture využitím umělé inteligence, která detektuje kostru bez nutnosti speciálního obleku .
2. **Demokratizace sportovní analýzy:** Nahrazením fyzických senzorů a kamerových systémů běžným notebookem se technologie stává dostupnou pro širokou veřejnost – od učitelů tělocviku po trenéry mládeže.
3. **Flexibilita:** Systém nevyžaduje fyzické rozestavování bran na dráze ani oblékání sportovce do senzorů. Měření lze provést okamžitě a neinvazivně.

2 TEORETICKÁ VÝCHODISKA A POUŽITÉ TECHNOLOGIE

Zpracování obrazu a detekce pohybu jsou disciplíny spadající pod obor počítačového vidění (Computer Vision). Tato kapitola popisuje principy neuronových sítí a konkrétní softwarové nástroje, které byly v projektu využity.

2.1 PRINCIP POČÍTAČOVÉHO VIDĚNÍ

Počítačové vidění je oblast informatiky, která se snaží naučit počítače „vidět“ a interpretovat vizuální data podobným způsobem jako člověk. Pro počítač je digitální obraz reprezentován jako matice čísel (pixelů).

U barevného obrazu se nejčastěji využívá model RGB, kde je každý pixel definován třemi hodnotami (červená, zelená, modrá) v rozsahu 0–255. Úkolem algoritmů je v této záplavě čísel nalézt vzory, hrany a objekty. V projektu SportVision je tento princip aplikován na video, což je ve své podstatě sekvence statických obrázků (snímků) přehrávaných vysokou rychlostí.

2.2 KONVOLUČNÍ NEURONOVÉ SÍTĚ (CNN)

Zatímco klasické algoritmy počítačového vidění spoléhaly na ručně definovaná pravidla (např. „hledej světlý kruh jako hlavu“), moderní detekce, kterou využívá i tento projekt, je založena na hlubokém učení (Deep Learning) a **konvolučních neuronových sítích (CNN)**.

CNN jsou inspirovány biologickou strukturou zrakové kůry v mozku. Sítě se skládají z mnoha vrstev, kterými obraz prochází:

1. **Konvoluční vrstvy:** Aplikují na obraz filtry, které detekují jednoduché prvky, jako jsou hrany nebo barevné přechody.
2. **Pooling vrstvy:** Snižují rozlišení dat a zachovávají jen nejdůležitější informace, čímž snižují výpočetní náročnost.
3. **Plně propojené vrstvy:** V hlubších částech sítě se již nedetekují jen hrany, ale komplexní tvary (oči, končetiny), které sítě na základě tréninku klasifikují jako „člověka“.

2.3 MEDIAPIPE A MODEL BLAZEPOSE

Jádrem detekce pohybu v této práci je framework **MediaPipe** od společnosti Google, konkrétně jeho řešení pro detekci postoje zvané **BlazePose**. Tento model byl vybrán pro svou unikátní architekturu, která umožňuje běh v reálném čase i na běžných procesorech (CPU) bez nutnosti dedikované grafické karty.

2.3.1 Architektura detektor-tracker

Většina starších systémů analyzuje každý snímek videa od nuly, což je výpočetně náročné. MediaPipe využívá chytřejší přístup sestávající ze dvou kroků:

1. **Detektor (Pose Detector):** Tato část sítě běží pouze na začátku nebo když se ztratí sledování. Její úkol je najít v obrazu oblast zájmu (ROI – Region of Interest), kde se nachází člověk. Protože je detekce celého těla náročná, BlazePose nejprve hledá obličeji (který má specifické rysy) a od něj odvodí polohu zbytku těla.
2. **Sledovač (Pose Landmarker):** V dalších snímcích už se nepoužívá detektor. Sítě pouze předvírá, kam se klíčové body posunuly z předchozí pozice. Tím se ušetří obrovské množství výkonu. Pokud si je model jistý, že body stále sleduje, detektor se nespouští.

2.3.2 Topologie landmarků

Model BlazePose detekuje celkem **33 klíčových bodů (landmarks)** ve 3D prostoru. Každý bod má souřadnice x, y (poloha v obrazu) a z (hloubka vůči středu boků).

Pro účely měření sprintu v aplikaci SportVision jsou klíčové tyto body:

- **Landmarky 11 a 12 (Ramena):** Jejich průměr určuje střed hrudníku, což je v atletice rozhodující bod pro protnutí cílové čáry.
- **Landmarky 23 a 24 (Kyče):** Definují střed těla a těžiště.
- **Landmarky 27–32 (Kotníky a chodidla):** Ačkoliv nejsou využity pro měření času, jsou vykreslovány pro vizuální kontrolu techniky běhu.

2.4 KNIHOVNA OPENCV

OpenCV (Open Source Computer Vision Library) je podpůrnou, ale nezbytnou technologií projektu. Zatímco MediaPipe provádí „inteligentní“ analýzu, OpenCV obstarává „hrubou práci“ s obrazovými daty:

- **I/O operace:** Načítání videosouborů (.mp4) a extrakce jednotlivých snímků.
- **Preprocessing:** Konverze barevného prostoru z BGR (standard OpenCV) na RGB (vyžadováno MediaPipe).
- **Vizualizace:** Vykreslování vektorové grafiky (čáry, kružnice, text) přímo do obrazových dat na základě souřadnic vypočítaných modelem MediaPipe.

3 NÁVRH A IMPLEMENTACE APLIKACE

Praktická část této práce se zabývá vývojem samotného skriptu v jazyce Python. Aplikace je navržena jako konzolový nástroj, který zpracovává vstupní video soubor a v reálném čase do něj vykresluje analytická data.

3.1 STRUKTURA PROGRAMU

Program je realizován v jediném souboru `mp.py`, což usnadňuje jeho přenositelnost. Architektura kódu je procedurální a skládá se ze tří hlavních bloků:

1. **Konfigurační sekce:** Globální proměnné pro nastavení parametrů měření.
2. **Inicializace:** Načtení knihoven a nastavení detektoru MediaPipe.
3. **Hlavní smyčka:** Iterace přes jednotlivé snímky videa, detekce a vyhodnocení logiky.

3.2 KALIBRACE SCÉNY

Jedním z hlavních problémů počítačového vidění je převod souřadnic z digitálního obrazu (pixely) do reálného světa (metry). V profesionálních systémech se využívá automatická kalibrace pomocí šachovnicových vzorů, avšak cílem této práce byla jednoduchost pro koncového uživatele.

Prototyp aplikace proto využívá metodu **manuální statické kalibrace**. Uživatel před spuštěním analýzy určí souřadnice startovní a cílové čáry v grafickém editoru a tyto hodnoty zadá do konfigurační sekce skriptu.

```

1 # --- KONFIGURACE ---
2 VIDEO_PATH = "run2.mp4"
3 REAL_DISTANCE_METERS = 10.0
4
5 # Start a Cíl (hodnoty X v pixelech)
6 # Start = pravá strana, Cíl = levá strana
7 START_LINE_X = 1820
8 FINISH_LINE_X = 180

```

Kód 3.1: Konfigurace kalibračních bodů v kódu

Tento přístup eliminuje nutnost složitých matematických transformací obrazu a pro účely běhu na přímé dráze (kde je kamera kolmo k běžci) poskytuje dostatečnou přesnost.

3.3 DETEKCE REFERENČNÍHO BODU

Pro přesné změření času je nutné určit, která část těla protíná cílovou čáru. Dle pravidel atletiky je rozhodující **poloha trupu (hrudníku)**, nikoliv končetin či hlavy.

Aplikace proto využívá model MediaPipe Pose k detekci dvou klíčových bodů:

- **Landmark 11:** Levé rameno.
- **Landmark 12:** Pravé rameno.

Referenční bod X_{runner} je vypočítán jako aritmetický průměr x -ových souřadnic obou ramen. Tím získáme virtuální bod uprostřed hrudníku, který je stabilní a odpovídá pravidlům pro cílovou fotografiю.

Rovnice pro výpočet pozice v obraze (přepočet z normalizovaných souřadnic 0.0–1.0 na pixely):

$$X_{runner} = \frac{x_{left_shoulder} + x_{right_shoulder}}{2} \times \text{width} \quad (3.1)$$

3.4 ALGORITMUS MĚŘENÍ (STAVOVÝ AUTOMAT)

Jádrem aplikace je stavový automat (state machine), který v každém snímku vyhodnocuje pozici běžce vůči kalibračním čarám. Systém pracuje se třemi stavy:

- Před startem (Ready):** Běžec se nachází před startovní čárou ($X_{runner} > X_{start}$). Časomíra stojí.
- Běh (Running):** Běžec protnul startovní čáru. Ukládá se počáteční čas videa T_{start} a v každém snímku se počítá uplynulý čas.
- Cíl (Finished):** Běžec protnul cílovou čáru ($X_{runner} \leq X_{finish}$). Ukládá se koncový čas T_{end} a výpočet se zastaví.

Následující ukázka kódu demonstruje implementaci této logiky pro běh zprava doleva (klesající hodnota souřadnice X):

```

1  if not finished:
2      # Detekce STARTU
3      if not is_running:
4          if runner_x <= START_LINE_X and runner_x > FINISH_LINE_X:
5              is_running = True
6              start_time = video_time
7              print(f"START v čase {video_time:.2f} s")
8
9      # Detekce CILE
10     elif is_running and runner_x <= FINISH_LINE_X:
11         is_running = False
12         finished = True
13         end_time = video_time
14
15     # Výpočet průměrné rychlosti
16     final_time = end_time - start_time
17     if final_time > 0:
18         speed_ms = REAL_DISTANCE_METERS / final_time
19         speed_kmh = speed_ms * 3.6
20         print(f"CIL! Cas: {final_time:.2f} s, Rychlosť: {speed_kmh:.1f} km/h")

```

Kód 3.2: Logika měření času a rychlosti

3.5 VIZUALIZACE A VÝSTUP DAT

Pro okamžitou zpětnou vazbu aplikace využívá knihovnu OpenCV k vykreslování grafických prvků přímo do zpracovávaného videa. Kromě detekované kostry (skeletonu), která slouží ke kontrole techniky běhu, se na obrazovku vypisují stavy časomíry.

Výsledná průměrná rychlosť je vypočítána na základě známé vzdálenosti (s) a naměřeného času (t) podle vztahu $v = \frac{s}{t}$, a následně převedena na kilometry za hodinu.

4 TESTOVÁNÍ A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Cílem této kapitoly je ověřit funkčnost vytvořené aplikace v reálných podmínkách. Testování probíhalo na souboru čtyř videozáznamů, které zachycují pohyb atleta na vymezeném úseku o délce 10 metrů.

4.1 METODIKA TESTOVÁNÍ

Testování probíhalo formou videoanalýzy předem natočených záznamů. Vzhledem k absenci profesionálního referenčního zařízení (certifikované fotobuňky) nebylo možné provést přímé srovnání s "absolutní pravdou".

Srovnání s ručním měřením (stopky) bylo zavrhnuto jako nevhodné. Při běhu na krátkou vzdálenost 10 metrů se časy pohybují okolo 1,0 až 1,5 sekundy. Průměrná reakční doba člověka při stisku stopek je přibližně 0,2 sekundy. Chyba měření způsobená lidským faktorem by tak dosahovala až 20 % naměřené hodnoty, což činí ruční měření pro validaci nepoužitelným.

Validace byla proto založena na **biomechanické plausibilitě** (očekávaná vs. naměřená rychlosť) a vnitřní konzistenci měření.

4.1.1 Testovací podmínky

- **Vzdálenost úseku:** 10,0 metrů (měřeno pásmem).
- **Umístění kamery:** Statická poloha, kolmo k ose běhu (pro minimalizaci chyby perspektivy), ve vzdálenosti cca 5 metrů od dráhy.
- **Vstupní video:** Rozlišení Full HD (1920x1080), vysoká snímková frekvence **60 FPS**.

4.2 NAMĚŘENÉ VÝSLEDKY

Aplikace SportVision byla spuštěna na čtyřech testovacích videích s odstupňovanou intenzitou pohybu (od chůze po submaximální sprint). Výsledky jsou shrnutы v následující tabulce.

Tabulka 4.1: Výsledky měření na úseku 10 metrů

Označení testu	Naměřený čas [s]	Rychlosť [m/s]	Rychlosť [km/h]
Test 1 (Rychlá chůze)	5.30	1.89	6.8
Test 2 (Volný klus)	2.72	3.69	13.3
Test 3 (Běh ve vyšším tempu)	1.53	6.53	23.5
Test 4 (Submaximální sprint)	1.38	7.22	26.0

4.3 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z naměřených dat vyplývá, že aplikace poskytuje relevantní údaje odpovídající realitě a fyzickým možnostem atleta.

Jako referenční bod pro ověření přesnosti sloužil **Test 4**, kde byl subjektivní odhad úsilí běžce cca **70 % maxima**. Při známé maximální rychlosti atleta (osobní maximum cca 10 m/s) by teoretická rychlosť při tomto úsilí měla odpovídat hodnotě okolo 7 m/s.

Aplikace naměřila čas **1.38 s**, čemuž odpovídá průměrná rychlosť **7.22 m/s**. Tato hodnota (7.22 vs očekávaných 7.0) potvrzuje vysokou míru shody mezi subjektivním pocitem a objektivním měřením softwaru. Algoritmus detekce průchodu startem a cílem pomocí sledování trupu tedy funguje spolehlivě i při vyšších rychlostech (26 km/h).

4.3.1 Zjištěné limity a přesnost

Díky použití videa se snímkovou frekvencí **60 FPS** se podařilo výrazně eliminovat chybu měření danou diskretizací času:

- Časová přesnost:** Při 60 FPS trvá jeden snímek přibližně **0,0167 sekundy**. Maximální teoretická chyba určení času startu a cíle je tedy v řádu setin sekundy, což je pro tréninkové účely více než dostatečné (běžné ruční stopky mají chybu o řád vyšší).
- Rozmazání pohybem (Motion Blur):** I při rychlosti 26 km/h (Test 4) dokázal model MediaPipe spolehlivě detekovat klíčové body ramen. Volba sledování trupu místo končetin se ukázala jako klíčová, jelikož trup podléhá menšímu rozmazání než rychle kmitající končetiny.

4.4 ZÁVĚR TESTOVÁNÍ

Aplikace splnila stanovené cíle. Prokázala schopnost autonomně změřit čas a rychlosť běžce bez použití externích senzorů. Výsledky měření odpovídají fyzikálním předpokladům a použití 60 FPS videa zajišťuje vysokou přesnost výsledného času.

ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo vytvořit funkční softwarový nástroj, který by zpřístupnil pokročilou sportovní analýzu i amatérským sportovcům a školám bez nutnosti investic do drahého hardwarového vybavení.

Výsledkem je aplikace *SportVision*, která využívá moderní metody počítačového vidění k autonomnímu měření času a rychlosti. Použitím knihovny MediaPipe se podařilo implementovat spolehlivou detekci běžce založenou na sledování středu hrudníku, což odpovídá oficiálním pravidlům atletiky pro cílovou fotografiu. Tím bylo eliminováno riziko chybného změření způsobeného pohybem končetin, které je běžné u jednodušších detektorů pohybu.

V praktické části byla ověřena funkčnost aplikace na reálných videozáznamech. Testování prokázalo, že při použití běžně dostupného záznamového zařízení (chytrý telefon se záznamem 60 FPS) dosahuje systém přesnosti měření v řádu setin sekundy. Aplikace úspěšně změřila výkony v rozsahu od chůze až po submaximální sprint (26 km/h) a poskytla výsledky, které plně korespondují s biomechanickými předpoklady.

Práce potvrdila hypotézu, že softwarové řešení může v tréninkových podmínkách efektivně nahradit klasické světelné brány (fotobuňky). Oproti nim navíc poskytuje vizuální zpětnou vazbu o technice běhu (pose estimation), což přináší trenérům přidanou hodnotu.

Ačkoliv je současná verze aplikace plně funkčním prototypem, nabízí se prostor pro další vylepšení. V budoucnu by bylo vhodné implementovat uživatelské grafické rozhraní (GUI) pro snazší ovládání bez nutnosti zásahu do kódu a vyvinout modul pro automatickou kalibraci scény, který by eliminoval nutnost manuálního zadávání souřadnic.

Závěrem lze říci, že projekt SportVision splnil své zadání a demonstroval sílu moderních technologií v oblasti sportu. Ukázal, že s využitím jazyka Python a umělé inteligence lze vytvořit profesionální analytický nástroj doslova „na koleni“.

LITERATURA

- [1] DOKULIL Jakub. *Šablona pro psaní SOČ v programu L^AT_EX* [Online]. Brno, 2020 [cit. 2020-08-24]. Dostupné z: https://github.com/Kubiczek36/SOC_sablon
- [2] OETIKER, Tobias, Hubert PARTL, Irene HYNA, Elisabeth SCHEGL, Michal KOČER a Pavel SÝKORA. *Ne příliš stručný úvod do systému L^aT_eX2e* [online]. 1998 [cit. 2020-08-24]. Dostupné z: <https://www.jaroska.cz/elearning/informatika/typografie/lshort2e-cz.pdf>
- [3] Wikibooks: *LaTeX* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-08-24]. Dostupné z: <https://en.wikibooks.org/wiki/LaTeX>
- [4] *TeX - LaTeX Stack Exchange* [online]. Stack Exchange, 2020 [cit. 2020-09-01]. Dostupné z: <https://tex.stackexchange.com>
- [5] *Střední škola průmyslová a umělecká Opava* [online]. [cit. 2023-11-11]. Dostupné z: <https://www.sspu-opava.cz>
- [6] *Citace PRO* [online]. Citace.com, 2020 [cit. 2020-08-31]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com>
- [7] BORN, Max a Emil WOLF. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*. 7th (expanded) edition. Reprinted with corrections 2002. 15th printing 2019. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. ISBN 978-0-521-64222-4.

Seznam obrázků

Seznam tabulek

4.1 Výsledky měření na úseku 10 metrů	16
---	----

PŘÍLOHA A SPOT DIAGRAMY A DALŠÍ