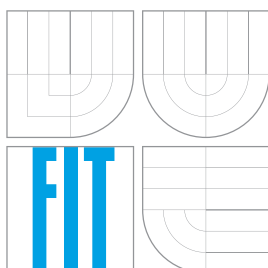


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

RYCHLÁ RE-KALIBRACE PTZ KAMERY PRO ANALÝZU DOPRAVY

FAST RE-CALIBRATION OF PTZ CAMERA FOR TRAFFIC ANALYSIS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. ALEŠ DŘEVO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JAKUB SOCHOR

BRNO 2016

Vysoké učení technické v Brně - Fakulta informačních technologií

Ústav počítačové grafiky a multimédií

Akademický rok 2015/2016

Zadání diplomové práce

Řešitel: **Dřevo Aleš, Bc.**

Obor: Bezpečnost informačních technologií

Téma: **Rychlá re-kalibrace PTZ kamery pro analýzu dopravy**
Fast Re-Calibration of PTZ Camera for Traffic Analysis

Kategorie: Zpracování obrazu

Pokyny:

1. Nastudujte algoritmy pro kalibraci dohledové kamery pro analýzu dopravy.
2. Nastudujte vlastnosti PTZ kamer.
3. Navrhněte algoritmus pro rychlou re-kalibraci zkalibrované PTZ kamery po změně pohledu.
4. Navržený systém implementujte.
5. Pořídte vhodnou datovou sadu pro vyhodnocení přesnosti systému a proveďte toto vyhodnocení. Diskutujte dosažené výsledky.
6. Vytvořte plakát a video pro prezentaci vaší práce.

Literatura:

- DUBSKÁ Markéta, HEROUT Adam, JURÁNEK Roman a SOCHOR Jakub. Fully Automatic Roadside Camera Calibration for Traffic Surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. 2014, roč. 2014, č. 1, s. 1-10. ISSN 1524-9050.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

- Body 1 a 2, značné rozpracování bodů 3 a 4.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování diplomové práce naleznete na adrese

<http://www.fit.vutbr.cz/info/szz/>

Technická zpráva diplomové práce musí obsahovat formulaci cíle, charakteristiku současného stavu, teoretická a odborná východiska řešených problémů a specifikaci etap, které byly vyřešeny v rámci dřívějších projektů (30 až 40% celkového rozsahu technické zprávy).

Student odevzdá v jednom výtisku technickou zprávu a v elektronické podobě zdrojový text technické zprávy, úplnou programovou dokumentaci a zdrojové texty programů. Informace v elektronické podobě budou uloženy na standardním nepřepisovatelném paměťovém médiu (CD-R, DVD-R, apod.), které bude vloženo do písemné zprávy tak, aby nemohlo dojít k jeho ztrátě při běžné manipulaci.

Vedoucí: **Sochor Jakub, Ing.,** UPGM FIT VUT

Datum zadání: 1. listopadu 2015

Datum odevzdání: 25. května 2016

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta informačních technologií
Ústav počítačové grafiky a multimédií
602 00 Brno, Božetěchova 2



doc. Dr. Ing. Jan Černocký
vedoucí ústavu

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou re-kalibrace PTZ kamery při jejím pohybu. Cílem práce je udržet kameru ve zkalibrovaném stavu z výchozího stavu, kdy jsou známe pozice úběžníků v obraze. Jejich pozice jsou při pohybu kamery udržovány, a to pomocí dvou implementovaných metod. První metoda je založena na principu homografie, druhá pak na principu dvojpoměru. Výsledky ukazují, že obě tyto metody fungují především pro udržení pozice prvních úběžníků. V případě druhých úběžníků vznikají různé problémy a výsledky jsou často poměrně nepřesné.

Abstract

This thesis deals with problematics of PTZ-camera re-calibration during movement. The objective of this work is to keep the camera in calibration mode from default status when the known positions of Vanishing Points are in the image. With their use during movement, which is changing with motion of the camera, their positions are kept with help of two implemented methods. The first method is based on the principle of homography, the second on the principle of cross ratio. The results show that both of these methods work especially for keeping the positions of First Vanishing Points. In the case of the Second Vanishing Points there appear various problems and the results are often quite inaccurate.

Klíčová slova

Kamera, kalibrace, PTZ kamera, rotace, náklon, přiblížení, úběžník, homografie, dvojpoměr, optický tok, ohnisková vzdálenost.

Keywords

Camera, calibration, PTZ camera, pan, tilt, zoom, Vanishing Point, homography, cross ratio, optical flow, focal length.

Citace

DŘEVO, Aleš. *Rychlá re-kalibrace PTZ kamery pro analýzu dopravy*. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Sochor Jakub.

Rychlá re-kalibrace PTZ kamery pro analýzu dopravy

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jakuba Sochora. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

.....

Aleš Dřevo
25. května 2016

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Jakubovi Sochorovi za odborné vedení, za pomoc a cenné rady při zpracování této práce.

© Aleš Dřevo, 2016.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1	Úvod	6
2	Kalibrace	8
2.1	Metody kalibrace	8
2.1.1	Fotogrammetrická kalibrace	9
2.1.2	Auto-kalibrace	9
2.1.3	Ostatní metody	9
2.2	Parametry kalibrace	10
2.2.1	Vnější parametry	10
2.2.2	Vnitřní parametry	10
2.3	Matematický model kamery	11
2.4	Distorze	13
2.4.1	Radiální distorze	13
2.4.2	Tangenciální distorze	14
2.5	Problematika kalibrace PTZ kamer	14
2.5.1	Model PTZ kamery	15
2.5.2	Problematika distorze	16
2.6	Známé metody kalibrace PTZ kamer	17
3	Použitá kalibrační metoda	19
3.1	Existující metody	19
3.2	Obecný princip metody	20
3.3	Stanovení předpokladů kamery	20
3.4	Diamantový prostor	21
3.5	Úběžníky	22
3.5.1	První úběžník	22
3.5.2	Druhý úběžník	23
3.5.3	Třetí úběžník	23
3.6	Vnitřní parametry	24
3.7	Radiální distorze	24
3.8	Kalibrace kamery pomocí úběžníků	25
4	Vlastnosti středového promítání	27
4.1	Optický tok	27
4.2	Dvojpoměr	28
4.2.1	Orientovaná úsečka	29
4.2.2	Dělicí poměr	29
4.2.3	Dvojpoměr	30

4.3	Homografie	31
4.3.1	Výpočet homografie ze dvou korespondujících bodů	32
5	Vlastní práce	35
5.1	Detektor pohybu	35
5.1.1	Detekce pohybu	36
5.1.2	Změna rotace a náklonu	38
5.1.3	Změna přiblížení	39
5.2	Detektor silnice	41
5.2.1	Odečítání pozadí	41
5.2.2	Určování silnice	42
5.2.3	Uchování silnice při pohybu kamery	43
5.3	Uchovávání úběžníků	44
5.3.1	Vytváření úběžníkových trojúhelníků	45
5.3.2	Výpočet dvojpoměru z úběžníkových trojúhelníků	46
5.3.3	Nalezení úběžníku z trojúhelníku	47
5.3.4	Výpočet bodu ze známého dvojpoměru	47
5.3.5	Výpočet bodu z dělicího poměru	48
5.4	Využití homografie	49
6	Popis implementace	50
6.1	OpenCV	50
6.2	Vlastní implementace	50
7	Vyhodnocení	52
7.1	Spolehlivost detektoru pohybu	52
7.2	Využití masky silnice	53
7.3	Sledování pomocí homografie	55
7.3.1	Porovnání vlivu významných bodů	55
7.3.2	Shrnutí přesnosti homografie	60
7.4	Sledování pomocí trojúhelníků	61
7.4.1	Změna rotace a náklonu	61
7.4.2	Trojúhelníky a zoom	63
7.4.3	Problém překlopení souřadnic	64
7.4.4	Vyhodnocení pomocí objektů v obraze	65
7.5	Porovnání výsledků	68
8	Závěr	70
	Literatura	72
	Přílohy	75
	Seznam příloh	76
A	Obsah CD	77
B	Testovací videa	78

Seznam obrázků

2.1	Účel vnitřních a vnějších parametrů kamery.	10
2.3	Model dírkové kamery.	12
2.4	Radiální distorze.	14
2.5	Tangenciální distorze	15
3.1	Transformace do rovnoběžného souřadnicového systému.	21
3.2	Tvorba diamantového prostoru.	22
3.3	Grafické znázornění úběžníků.	22
3.4	Kompensace radiální distorze.	25
4.1	Dvojpoměr.	29
4.2	Projektivní transformace.	32
4.3	Příklad transformace pomocí matice homografie.	33
5.1	Diagram detektoru pohybu.	36
5.2	Vektorové pole stabilního obrazu.	37
5.3	Vektorové pole při pohybu obrazu.	38
5.4	Porovnání vektorových polí při náklonu a rotaci.	39
5.5	Ideální divergentní a konvergentní pole.	40
5.6	Vektorové pole při přibližování a oddalování.	41
5.7	Schéma odečítání pozadí.	42
5.8	Nalezení vozidel pomocí masky popředí.	43
5.9	Transformace masky popředí při pohybu kamery.	44
5.10	Způsob vytvoření úběžníkových trojúhelníků.	46
5.11	Princip nalezení neznámého bodu ze známého dělicího poměru.	48
7.1	Chyba při rozpoznávání pohybu při velkém přiblížení kamery.	54
7.2	Ukázka ztráty pokrytí silnice pomocí masky, při pohybu kamery.	55
7.3	Rozložení bodů a stav masky silnice při velkém přiblížení.	59
7.4	Princip definice vlastních bodů v obraze.	66
B.1	Video V1 před pohybem.	78
B.2	Video V1 po pohybu.	78
B.3	Video V2 před pohybem.	79
B.4	Video V2 po pohybu.	79
B.5	Video V3 před pohybem.	80
B.6	Video V3 po pohybu.	80
B.7	Video V4 před pohybem.	81
B.8	Video V4 po pohybu.	81

B.9 Video V5 před pohybem.	82
B.10 Video V5 po pohybu.	82
B.11 Video V6 před pohybem.	83
B.12 Video V6 po pohybu.	83
B.13 Video V7 před pohybem.	84
B.14 Video V7 po pohybu.	84
B.15 Video V8 před pohybem.	85
B.16 Video V8 po pohybu.	85
B.17 Video V9 před přiblížením.	86
B.18 Video V9 po přiblížení.	86
B.19 Video V10 před přiblížením.	87
B.20 Video V10 po přiblížení.	87
B.21 Video V11 před oddálením.	88
B.22 Video V11 po oddálení.	88
B.23 Video V12 před pohybem.	89
B.24 Video V12 po pohybu.	89
B.25 Video V13 před pohybem.	90
B.26 Video V13 po pohybu.	90
B.27 Video V14 před pohybem.	91
B.28 Video V14 po pohybu.	91

Seznam tabulek

7.1	Vliv počtu bodů na výsledek při použití homografie.	56
7.2	Vliv vzdálenosti bodů na výsledek při použití homografie.	56
7.3	Vliv kvality bodů na výsledek při použití homografie.	57
7.4	Výsledky sledování prvních úběžníků při rotaci a náklonu s využitím homografie.	58
7.5	Výsledky sledování prvních úběžníků při změně přiblížení kamery s využitím homografie.	58
7.6	Výsledky sledování druhých úběžníků při rotaci a náklonu s využitím homografie.	59
7.7	Výsledky sledování druhých úběžníků při změně přiblížení kamery s využitím homografie.	60
7.8	Výsledky ohniskové vzdálenosti při použití homografie.	60
7.9	Výsledky sledování prvních úběžníků při rotaci a náklonu s využitím trojúhelníků.	62
7.10	Výsledky sledování druhých úběžníků při rotaci a náklonu s využitím trojúhelníků.	62
7.11	Výsledky ohniskové vzdálenosti při použití trojúhelníků.	63
7.12	Výsledky sledování úběžníků při změně přiblížení kamery s využitím trojúhelníků.	64
7.13	Problém překlopení souřadnic.	65
7.14	Testování trojúhelníků pomocí bodů definovaných v obraze.	66
7.15	Porovnání výsledků obou implementovaných metod.	68

Kapitola 1

Úvod

Cílem této diplomové práce bylo implementovat algoritmus, který bude schopen udržet již předem zkalibrovanou PTZ kameru monitorující dopravu ve správně zkalibrovaném stavu během a především ihned po jejím pohybu. K samotné původní kalibraci ve stavu, kdy je kamera stabilní, je použit algoritmus publikovaný v [7], který provádí plně automatickou kalibraci kamer na základě tří úběžníků.

V poslední době jsou kamery čím dál více dostupnější a způsob jejich využití stále roste. Nejčastěji se s nimi setkáváme při monitorování dopravy nebo při sledování různých objektů či míst. Získávání dat z kamery, rekonstrukce 3D obrazu nebo výpočet různých metrických informací, jako je například rychlost pohybujících se vozidel, je součástí oboru nazývaného počítačové vidění. K tomuto účelu je nutné, aby kamera, která snímá obraz reálného světa, byla zkalibrována. Kalibrace kamery je metoda sloužící k nalezení takzvaných vnitřních a vnějších parametrů kamery. K tomuto účelu bylo publikováno mnoho metod, které jsou založeny na velmi odlišných principech. Díky levnější a dostupnější technice a zvyšující se potřebě všudypřítomného monitorování rostou i požadavky na samotné kamery a jejich možnosti. Dalším krokem v monitorování jsou pak tedy PTZ kamery. Ty jsou schopny pokrýt pomocí jedné kamery mnohem větší území než standardní statické kamery, především díky tomu, že jsou pohyblivé. PTZ kamery umožňují rotaci vlevo, vpravo, nahoru a dolů a přiblížení či oddálení. Bohužel i tyto kamery mají své nevýhody, a to především právě v oblasti zpracování obrazu pomocí počítačového vidění. Při pohybu kamery se totiž mění její parametry a klasické metody určené pro statické kamery v tomto případě selhávají. Tato diplomová práce se zabývá právě tímto problémem, tedy udržováním kalibračních parametrů kamery při jejím pohybu (či změně přiblížení).

Text práce je rozdělen následovně. Kapitola 2 se zabývá kalibrací z teoretického pohledu. Řeší obecné principy kalibrace, vysvětluje význam jednotlivých parametrů kamery. Dále se zabývá matematickým modelem kalibrace kamery a problémy vyskytujícími se při kalibraci, tedy zkreslením. Závěr kapitoly se věnuje právě problematice PTZ kamer.

Kapitola 3 vysvětluje princip metody použité pro kalibraci kamery ve statickém stavu, která vypočte souřadnice úběžníků následně použitých právě pro rychlou re-kalibraci. Nejprve je nastíněn obecný princip, omezení a výhody této metody. Je popsán problém týkající problematiky detekce úběžníků a naznačen princip řešení problému radiálního zkreslení. Následně pak způsob stanovení kalibračních parametrů s využitím úběžníků.

Snímání okolní scény pomocí kamery je případ středové projekce. V tomto případě neplatí (nezachovávají se) základní vlastnosti, jako je například vzdálenost, a při výpočtu je nutné využívat pouze ty vlastnosti, které se středovou projekcí zachovávají. Touto problematikou se zabývá kapitola 4. Zde je vysvětlena problematika dvojpoměru, který se právě

středovou projekcí zachovává a také vysvětlena problematika týkající se homografie.

Kapitola 5 se pak zabývá samotným implementovaným systémem. Byly implementovány dva různé přístupy ke sledování pozic úběžníků, a to jak na základě matice homografie, tak na základě úběžníkových trojúhelníků. Dále je v této kapitole postupně nastíněna problematika jednotlivých částí celého systému a popsány principy, na kterých jsou jednotlivé části založeny, popsán způsob a důvod jejich využití v kontextu celého systému. Konkrétní struktura implementace celého systému je uvedena v kapitole 6.

Vyhodnocení obou implementovaných přístupů a ostatních menších částí systému je provedeno na sadě videí z reálného provozu při sledování dopravy. Především je pak provedena podrobná analýza výsledků získaných pomocí matice homografie a podrobná analýza výsledků získaných při používání úběžníkových trojúhelníků.

Tato diplomová práce navazuje na původní semestrální projekt, který se zabýval především teoretickou částí problematiky kalibrace kamer. Z původního semestrálního projektu byly převzaty kapitoly 2 a 3 a dále navržené základy samotné implementace celého systému.

Kapitola 2

Kalibrace

Kalibrace kamery je nezbytným krokem v 3D počítačovém vidění. Kalibrace je nutná především v případě, že ze snímaného obrazu chceme získat různé metrické informace. Jedná se například o měření rychlosti pohybujícího se objektu, vzdálenost objektu nebo jeho rozměry a tvar. Těchto informací se dnes využívá především při monitorování dopravy nebo v různých bezpečnostních systémech.

Hlavní myšlenkou samotné kalibrace je vytvořit projekční rovnici propojující známé souřadnice objektů ve 3D světových souřadnicích a jejich projekci a vyřešit parametry kamery. Jinými slovy, účelem kalibrace je ustanovit vztah mezi 3D světovými souřadnicemi a jim odpovídajícím 2D pixelovým souřadnicím na obrazové ploše, jak je vidí počítač. Tento vztah je definován parametry kalibrované kamery. Ty dělíme na vnitřní a vnější. Před dalším pokračováním v textu nejprve definuji některé základní pojmy týkající se souřadnicového systému používané v tomto textu.

- Světový souřadnicový systém: 3D souřadnicový systém okolního světa vůči kterému se snažíme kameru zkalibrovat
- Kamerový souřadnicový systém: 3D souřadnicový systém s počátkem v optickém středu kamery
- Pixelový souřadnicový systém: také souřadnicový systém snímku, jedná se o 2D souřadnicový systém udávající pozici na obrazu pořízeném kamerou.

2.1 Metody kalibrace

Problematikou kalibrace kamer se v průběhu desítek let zabývalo mnoho různých prací, které byly postupně založeny na různých principech. Účel kalibrace, výkon a možnosti kamer se během této doby různě měnily a vznikaly postupně techniky založené na různých principech. Zatímco v počátcích byly techniky kalibrace založené na principu zvaném fotogrammetrie ¹, dnes se díky čím dál tím levnější, výkonnější a dostupnější technice od těchto metod odstupuje a do popředí se dostávají takzvané auto-kalibrační metody nebo metody založené na kalibraci pomocí takzvaných úběžníků.

Různé zdroje uvádí různé dělení kalibračních metod do kategorií, nejčastěji do 4 (resp. 5) nebo do 2 (resp. 3) kategorií. V této práci využijeme toho obecnějšího, tedy dělení do 2

¹Fotogrammetrie se zabývá rekonstrukcí tvarů, měřením rozměrů a určováním polohy předmětů

(resp. 3) kategorií presentovaného v [27] a [28], a to na fotogrammetrickou kalibraci a auto-kalibraci. Za zmiňovanou třetí kategorii můžeme považovat všechny ostatní metody, které nelze zařadit ani do jedné z výše zmiňovaných.

2.1.1 Fotogrammetrická kalibrace

Jak je již z názvu zřejmé, do této kategorie spadají ty metody, které jsou založeny na principu fotogrammetrie. Ke kalibraci jsou tedy využívány různé objekty, které se na snímku nachází (musí nacházet), a nalezením a pozorováním těchto objektů je kamera kalibrována. Tato kategorie se dále dělí do dalších tří podkategorií vzhledem k dimenzi kalibračního objektu. Tedy 3D, 2D a 1D. Právě tyto tři podkategorie se v některých literaturách udávají jako samostatné kategorie.

Využitím 3D referenčního objektu

Kalibrace kamery je prováděna sledováním 3D kalibračního objektu, jehož poloha v prostoru je známá s velmi dobrou přesností. Kalibrační objekt se většinou skládá ze dvou nebo tří na sebe navzájem kolmých rovin. Tato metoda je velmi efektivní a přesná, ale vyžaduje drahé zařízení a komplikované nastavení. Proto je využívána minimálně.

Využitím 2D roviny

Techniky v této kategorii využívají jako kalibrační objekt rovinu, která je snímkována z různých pozic, a to tak, že se pohybuje buď s fotoaparátem nebo rovinou samotnou. Znalost těchto pohybů není však pro samotnou kalibraci nutná. Tento postup je velice jednoduchý a velmi efektivní. Jeho jednoduchost spočívá především v tom, že si každý může kalibrační desku vyrobit sám.

Využitím 1D linie bodů

Kalibrační objekty využívané v této kategorii jsou složeny ze sady kolineárních bodů. Kamera bývá zkalibrována pozorováním linie složené ze sady sledovaných bodů pohybujících se kolem fixního bodu, jako například řetězec kuliček visících ze stropu.

2.1.2 Auto-kalibrace

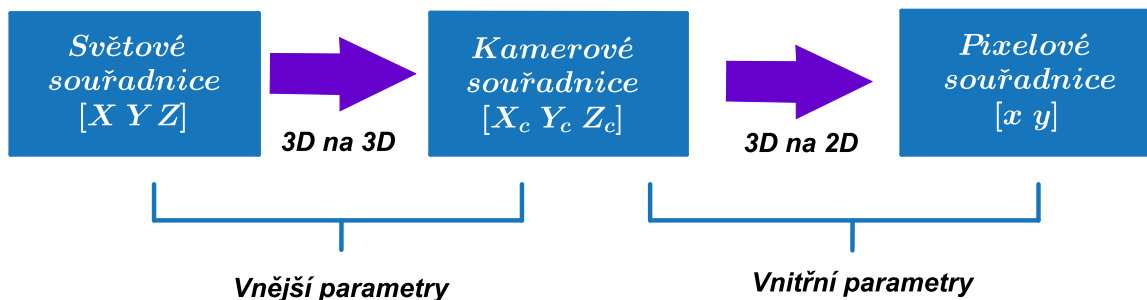
Tato technika, na rozdíl od předcházejících, nepoužívá žádné kalibrační objekty. Z tohoto důvodu je občas označována jako 0D kalibrační metoda. Metody v této kategorii jsou založeny na snímání statické scény, jako například pořízení a porovnání tří snímků při stejných neměnných vnitřních parametrech. Shody mezi těmito obrázky jsou dostačující pro určení vnitřních i vnějších parametrů. Přestože tyto metody nevyžadují žádný kalibrační objekt, je tato technika po matematické stránce mnohem náročnější.

2.1.3 Ostatní metody

Do této kategorie můžeme zařadit všechny ostatní techniky, které není možné zařadit ani do jedné z přecházejících. Mezi tyto metody patří například kalibrace pomocí čisté rotace nebo kalibrace využitím úběžníků, která je mimo jiné také využita v tomto projektu.

2.2 Parametry kalibrace

Cílem kalibrace kamery je získat hodnoty jejich parametrů. Ty se dělí na dvě kategorie, a to vnější a vnitřní. V následující části textu bude podrobněji popsán význam jednotlivých parametrů kamery. Obecný princip kalibrace a vliv jednotlivých parametrů je znázorněn na obrázku 2.1. Jak je možné na obrázku vidět, vnější parametry mají za úkol transformaci ze světového souřadnicového systému na kamerový souřadnicový systém. Dále, pomocí vnitřních parametrů, je zprostředkován převod získaných kamerových souřadnic na souřadnice v pixelovém souřadnicovém systému. Tím je uzavřen celý princip kalibrace, tedy převod bodu z 3D světových souřadnic na 2D souřadnice.



Obrázek 2.1: Znázornění účelu vnitřních a vnějších parametrů vzhledem k souřadnicovému systému².

2.2.1 Vnější parametry

První zmiňovanou kategorií jsou vnější parametry. Ty určují pozici a orientaci kalibrované kamery vůči světovým souřadnicím. Naznačení významu vnějších parametrů je znázorněno na obrázku 2.2. Vnější parametry jsou tedy složeny ze dvou matic, resp. jedné matice a jednoho vektoru, a to z 3×3 rotační matice R a 3×1 translačního vektoru t .

Rotační matice R vyjadřuje rotaci kolem jednotlivých os (X, Y, Z). Translační vektor t udává posuv počátku světového souřadnicového systému O vzhledem ke kamerovému souřadnicovému systému C .

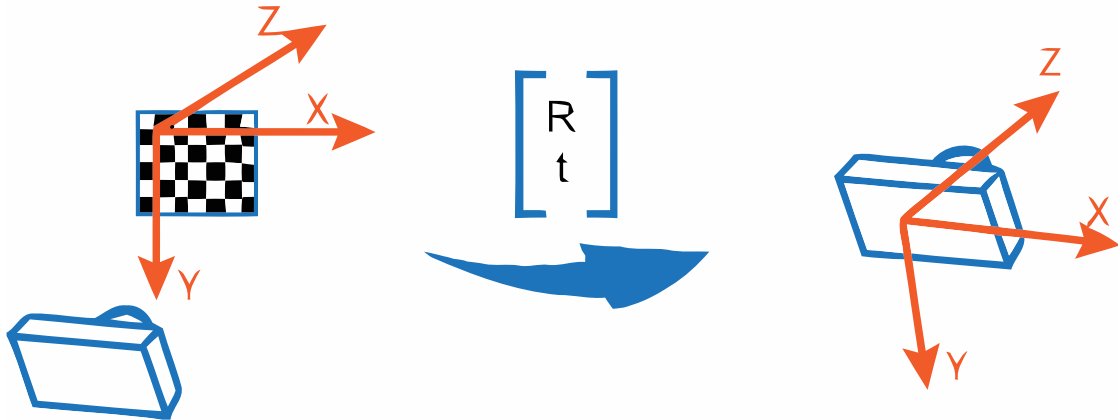
2.2.2 Vnitřní parametry

Druhou zmiňovanou kategorií jsou vnitřní parametry, někdy také označovány jako geometrické či optické vlastnosti kamery. Do této kategorie spadají následující parametry

- ohnisková vzdálenost f (*angl. focal lenght*)
- souřadnice hlavního bodu (c_x, c_y) (*angl. principal point*)
- koeficient zkosení s (*angl. skew*).

Kombinací všech těchto parametrů vzniká 3×3 horní trojúhelníková matice K , která bývá označována jako vnitřní kalibrační matice K . Tato matice je definována následovně:

²Modifikovaný obrázek převzatý z <http://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>



Obrázek 2.2: Vnější parametry kamery mají za účel zjistit rotaci a posuv kamery vzhledem k počátku světového souřadného systému³.

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Podrobnější popis významu jednotlivých parametrů bude vysvětlen v následující podkapitole.

2.3 Matematický model kamery

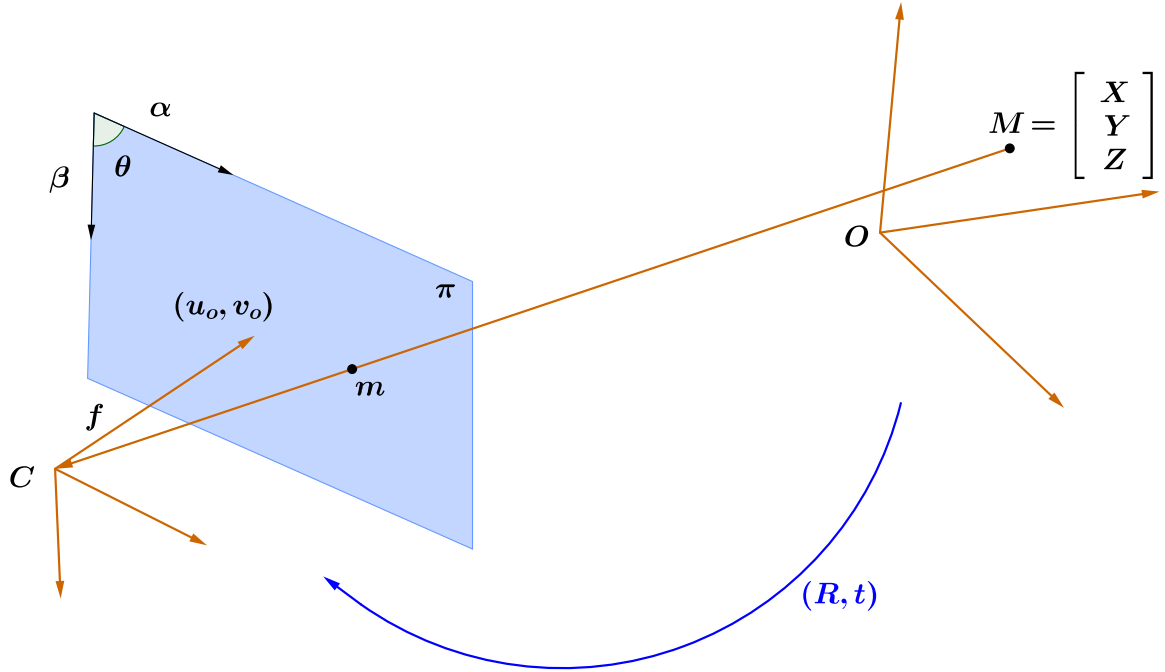
Model dírkové kamery (*angl. pinhole camera*) se používá jako vhodný model pro mnoho aplikací počítačového vidění. Na rozdíl od běžného fotoaparátu či kamery, kde prochází světlo přes čočku, která jej soustřeďuje na zaznamenávané médium, u dírkové kamery prochází světlo pouze dírkou. Nedochází tedy ke zkreslení způsobenému právě čočkou. Model dírkové kamery, který je zobrazen na obr. 2.3, vykonává středovou (někdy nazývanou také centrální) projekci. Na rovinu π je promítán obraz okolního světa. Optická osa prochází rovinou π v místě hlavního bodu (u, v) (*angl. principal point*) a dále optickým středem C .

Kamera vykonává lineární transformaci 3D prostoru P^3 do 2D prostoru P^2 . Projekce je přenášena optickým paprskem, který je odražený od bodu M nebo vznikl ze zdroje světla. Optický paprsek projde optickým středem C přes bod x . Nyní bude objasněn význam některých základních pojmů, týkající se středové projekce a modelu dírkové kamery, vyskytující se v této i v dalších kapitolách.

- M - bod vyjádřený ve 3D světových souřadnicích
- m - bod vyjádřený v pixelových souřadnicích
- C - optický střed kamery neboli počátek kamerového souřadného systému
- O - projekční centrum neboli počátek světového souřadného systému
- f - ohnisková vzdálenost

³Obrázek je plně převzat z <http://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>.

- (u_0, v_0) - souřadnice hlavního projekčního bodu (*principal point*)
- π - projekční rovina
- θ - zkosení pixelů



Obrázek 2.3: Schéma znázorňující model jednoduché dírkové kamery, která provádí centrální projekci⁴.

Centrální projekce (viz obr. 2.3) je v literatuře běžně popisována následujícím matematickým modelem [28].

Nechť $m = [u, v]^T$ je 2D bod v pixelovém souřadném systému a $M = [X, Y, Z]^T$ je 3D bod reprezentovaný ve světovém souřadném systému. V prvním kroku je nutné převést oba tyto body do homogenních souřadnic přidáním váhy bodu o velikosti 1. Dostáváme tedy body $\tilde{x} = [u, v, 1]^T$ a $\tilde{M} = [X, Y, Z, 1]^T$ v homogenních souřadnicích. Vztah mezi body m a M s využitím homogenních souřadnic je následující

$$\lambda \tilde{m} = P \tilde{M} \quad (2.2)$$

kde P je takzvaná projekční matice reprezentovaná následovně:

$$P = K[R \ t] \quad (2.3)$$

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

⁴Obrázek překreslený z [28].

Zde λ je libovolné měřítko. Dále, jak již bylo dříve zmíněno, (R, t) jsou vnější parametry kamery, kde R je 3×3 rotační matice a t je 3×1 translační vektor. Pomocí těchto matic je realizován převod světového souřadného systému na kamerový souřadný systém.

Matice K je nazývána vnitřní kalibrační matice. Tato matice reprezentuje vnitřní parametry kamery. Souřadnice (u_0, v_0) jsou souřadnice hlavního snímkového bodu (*angl. principal point*), α reprezentuje měřítko podél osy u a β měřítko podél osy v . α a β udávají tvar pixelu, pokud jsou rozdílné, pixel je obdélníkového tvaru, pokud shodné, pixel je čtvercového tvaru. γ je parametr zkosení os u a v . Kombinací vnější a vnitřních parametrů vzniká 3×4 projekční matice P . Na obrázku 2.3 je také zobrazen úhel svíraný mezi dvěma osami u a v , označený jako θ . Vztah mezi zkosením γ a θ je $\gamma = \alpha * \cos\theta$. Při čtvercovém tvaru pixelů je tedy $\theta = 90^\circ$ a $\gamma = 0$.

Obecně je hlavním cílem kalibrace stanovit parametry transformace mezi objektem ve 3D prostoru a jeho 2D obrazem získaným kamerou. Tato transformace zahrnuje

- Vnější parametry: orientaci (rotaci) a umístění (translaci) kamery - (R, t)
- Vnitřní parametry: optické a geometrické vlastnosti kamery - $\alpha, \beta, \gamma, u_0, v_0$

Rotační matice vyjadřuje rotaci kolem tří jednotlivých os X, Y a Z (3 stupně volnosti). Translační vektor t vyjadřuje tři parametry posuvu počátku světového souřadného systému vzhledem ke kamerovému souřadnému systému (3 stupně volnosti). Celkem je tedy k dispozici 6 vnějších a 5 vnitřních parametrů, tedy 11 stupňů volnosti.

2.4 Distorze

Distorze (zkreslení) je definována jako odchylka od lineární projekce. Tato odchylka je dána především kvalitou čoček a souhrnem jejich geometrických nepřesností. Tyto nepřesnosti vznikají již při výrobě samotných čoček. Vzniklé nepřesnosti mají za následek to, že úhel paprsku vstupujícího do čočky není úplně stejný jako úhel tohoto světelného paprsku při výstupu z čočky. Díky tomuto jevu se následně poloha zobrazovaného bodu mírně liší od jeho správné polohy. V celkovém měřítku má tento jev za následek to, že obraz získaný kamerou bývá opticky deformovaný (zakřivený) [12]. Obecně existují dva základní druhy distorze, a to radiální a tangenciální. Podrobněji budou popsány v dalších podkapitolách.

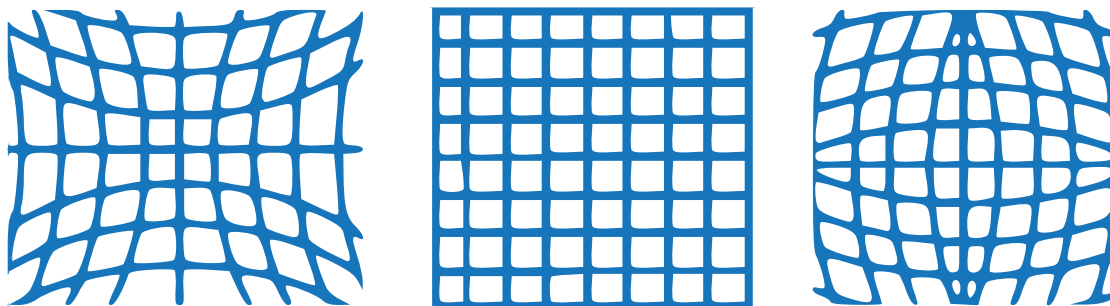
Při výpočtu parametrů kamery a určování kalibrační matice není toto zkreslení bráno v potaz. To je dáno tím, že model dírkové kamery je ideální matematický model, který neobsahuje čočku. K distorzi tedy nemůže dojít, protože světlo přes žádnou čočku neprochází. K vyhlazení tohoto zkreslení jsou používány speciální algoritmy, které předchází samotné kalibraci. Kalibrace poté probíhá nad již vyhlazeným obrazem.

2.4.1 Radiální distorze

Distorze může být různě nepravidelná, ale většina běžně vyskytujících se distorzí jsou přibližně radiálně symetrické. Tato symetričnost plyne ze symetrie čoček. Občas se stává, že nebývá naprosto přesně symetrická. Při její kompenzaci se však tyto miniaturní odchylky zanedbávají a bývá předpokládána úplná symetrie. Tento typ distorze se nazývá radiální distorzí. Formálně bývá popsána jako posun bodu o vzdálenosti r' na snímku o hodnotu $\Delta r'$. Radiální distorze se klasifikuje do dvou kategorií, soudková a jehelníčková [2].

- Soudková distorze (konkávní): někdy také označována jako pozitivní distorze. Při výskytu tohoto typu distorze dochází ke zvětšování zkreslení se vzdáleností od optické osy. Obraz potom vypadá, jako by byl vykreslen na kouli. Příkladem soudkové distorze je tzv. rybí oko, při kterém se polokoule promítá na rovinu.
- Jehelníčková distorze (konvexní): též označována jako negativní distorze. Vyskytuje se u starších fotoaparátů. Projevuje se zakřivením obrazu a čar směrem k jeho středu.

Jakým způsobem jednotlivé typy radiální distorze ovlivňují obraz a orientaci pixelů v něm, je zobrazeno na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Obrázek zobrazuje, jakým způsobem ovlivňuje radiální distorze zobrazovaný obraz. Vlevo je zobrazena negativní (jehelníčková) a vpravo pozitivní (soudková) distorze. Uprostřed je zobrazen snímek bez distorze⁵.

2.4.2 Tangenciální distorze

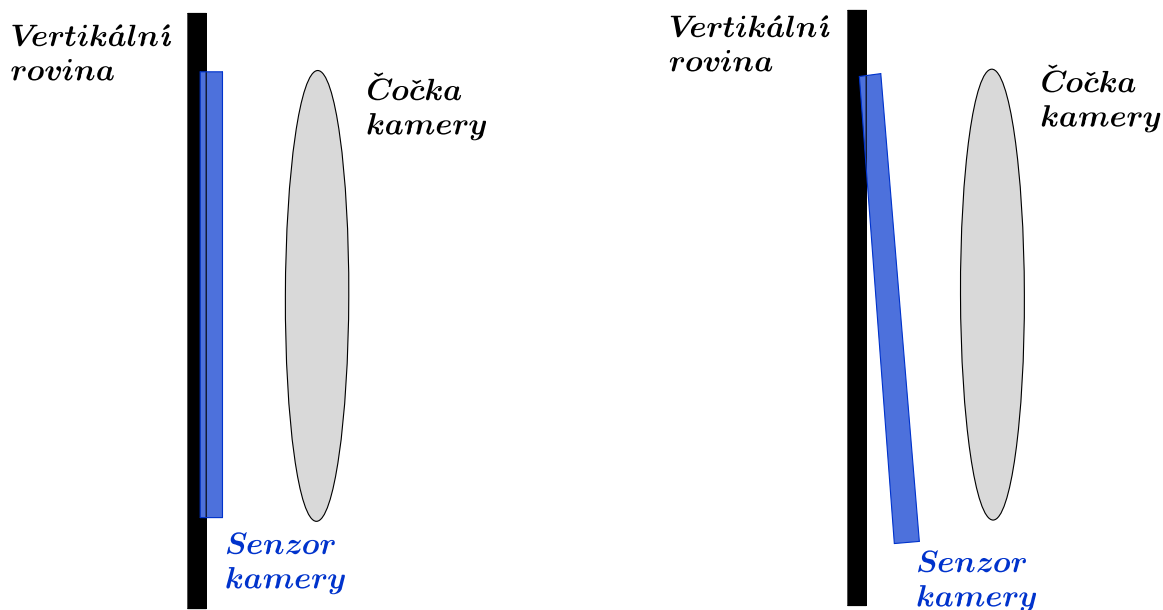
Druhým typem distorze objektivu je zkreslení tangenciální, které je vyvoláno nepřesnou centrací čoček. Působí kolmo na směr radiální a způsobuje nepravidelné, špatně definovatelné lokální posuny. Toto zkreslení prakticky nelze jednoduše kompenzovat a běžně se neuvažuje. U kvalitních moderních objektivů se navíc předpokládá, že vliv tangenciální distorze je zanedbatelný. Tangenciální zkreslení je zobrazeno na obrázku 2.5.

2.5 Problematika kalibrace PTZ kamer

Díky dostupnější technice v posledních letech čím dál více stoupá popularita monitorovacích systémů. K tomuto účelu jsou samozřejmě využívány kamery. Nejčastěji využívaným typem jsou dnes stále standardní kamery, které jsou fixně umístěné a dokážou snímat jen určitou vymezenou oblast. Často je však oblast, kterou je třeba monitorovat mnohem rozsáhlejší a klasické kamery nestačí. K tomuto účelu dnes existují takzvané PTZ kamery, které jsou schopny tento požadavek uspokojit.

Zkratka PTZ je složena ze tří anglických slov, a to P jako pan, T jako tilt a Z jako zoom. Význam jednotlivých slov je takový, že Pan znamená možnost pohybu (rotace) kamery doleva a doprava, Tilt znamená pohyb (náklon) nahoru a dolů, a Zoom umožňuje přiblížení

⁵Modifikovaný obrázek převzatý z <http://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>.



Obrázek 2.5: Snímek znázorňující důvody vzniku tangenciální distorze. Vlevo je kamera bez tangenciální distorze. Čočka a senzor kamery jsou rovnoběžné. Vpravo je pak schéma kamery podléhající tangenciální distorzi⁶.

nebo oddálení sledované oblasti. Tyto kamery jsou tedy díky pohybu ve zmiňovaných směrech schopny pokrýt mnohem větší oblast s využitím pouze jedné kamery. Tyto kamery umožňují rotaci o celých 360° . Při pohybu dolů jsou schopny dosáhnout pohledu i přímo pod sebe. K ovládání pohybu bývá využíváno různých metod, nejčastěji je to manuálně, formou joysticku nebo speciální klávesnice. Další možností je, že kamera provádí automaticky předem definovaný pohyb. Nejčastěji tento typ kamer nachází využití při monitorování dopravy nebo v různých bezpečnostních systémech k monitorování budov.

Bohužel, i přes značné výhody, které poskytují, mají PTZ kamery i své nevýhody, které limitují masivní nasazení do provozu a nahrazení standardních kamer. Pokud bychom pomínuli mírně vyšší cenu oproti standardním kamerám, která jistě může být považována za jeden z limitujících faktorů, je hlavním omezením problematika kalibrace. Stejně jako u klasických kamer, pokud chceme získat různé metrické informace, je nutné mít kameru ve zkalibrovaném stavu. Tedy znát vnitřní a vnější parametry kamery. Problém, který v tomto případě nastává, je samotný pohyb (či zoom), díky kterému dochází ke změně parametrů, ať vnitřních či vnějších, a kamera se tedy po pohybu dostává do stavu, ve kterém sice může zná hodnoty parametrů, ale ty však nemusí odpovídat. Klasické kalibrační metody zde tedy selhávají. Podrobnější rozbor problematiky kalibrace právě PTZ kamer je popsán v následujících podkapitolách.

2.5.1 Model PTZ kamery

Klasický model dírkové kamery, popsáný v sekci 2.3, není dostačující pro popis PTZ kamery především z toho důvodu, že nereflektuje změny při pohybu nebo změny přiblížení (zoomu)

⁶Modifikovaný obrázek převzatý z <http://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>.

kamery. Různé změny pohybu kamery ovlivňují různé parametry kamery. Nejprve se zaměříme na změny vzniklé při změně přiblížení (zoomu), které se projevují změnou vnitřních parametrů. Vnitřní parametry kamery jsou určovány pomocí kalibrační vnitřní kalibrační matice. Z tohoto důvodu musíme nejprve mírně upravit kalibrační matici K tak, aby byla schopna reflektovat změny (přiblížení a oddálení pohledu)

$$K(z) = \begin{bmatrix} f_x(z) & \gamma & u_0(f) \\ 0 & f_y(z) & u_0(f) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Kalibrační matice $K(z)$ ([22]) tedy určuje hodnoty jednotlivých vnitřních parametrů při určité hodnotě přiblížení z . V podstatě se jedná o funkci přiblížení. Při změně přiblížení však projevují změny jen některé z jejich parametrů, ostatní jsou stále i při změně parametru z . Jedním z parametrů, který je přímo závislý na přiblížení kamer, je ohnisková vzdálenost f . Čím více je kamera přiblížená, tím větší je tato vzdálenost. Dalším parametrem závislým na přiblížení jsou souřadnice hlavního bodu. Většina dosud publikovaných řešení však pracuje s předpokladem, který určuje, že je hodnota tohoto bodu stejná i při změně přiblížení nebo rovnou, že je tento bod fixní (například ve středu obrazové plochy), a proto se velmi často uvádí, že jediným parametrem závislým na velikosti přiblížení je ohnisková vzdálenost f .

Zbývající pohyby kamery jsou rotace (pan) a náklon (tilt). Většina publikovaných metod je založena na teorii čisté rotace kolem projekčního centra (*projective center* O), který je zvolen jako počátek světového souřadnicového systému. Tím pádem víme, že posun od počátku souřadnicového systému je nulový, a tedy můžeme určit 3×1 translační vektor t jako nulový vektor $t = [0, 0, 0]^T$. Pohyby pan a tilt mají tedy za následek změny pouze v rotační matici R .

2.5.2 Problematika distorze

Jak již bylo řečeno, většina kalibračních metod je založena na matematickém modelu dírkové kamery. Kromě toho, že tento model není schopen reflektovat změny při pohybu PTZ kamery, není schopen do svých kalibračních výpočtů zahrnout ani radiální distorzi. Oproti standardním kamerám dochází u PTZ kamer ke změně velikosti distorze se zmenšující se ohniskovou vzdáleností f , tedy čím více je pohled kamery oddálen, tím většímu zkreslení obraz podléhá. Radiální distorze je tedy, stejně jako ohnisková vzdálenost, závislá na hodnotě přiblížení z . K výpočtu radiální distorze se obecně nejčastěji používá polynomický model. U PTZ kamer se tento model využívá také, jen s mírnou úpravou (viz. [10]) tak, aby byl schopen reflektovat změny přiblížení z (viz rovnice 2.5)

$$\begin{aligned} [x_d \ y_d]^T &= \mathfrak{R}^Z([x \ y]^T; k_1, k_2) = L(r)[x \ y]^T \\ \text{kde} \quad L(r) &= (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4)[x \ y]^T \\ \text{a} \quad r &= \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Vzhledem k radiální distorzi je 3D bod X promítnutý do bodu $\bar{x} = [x_d \ y_d]^T$. Tento bod je díky radiální distorzi odchýlen z původního bodu $x = [x \ y]^T$ podle radiální distorzní funkce $\mathfrak{R}^Z : R^2 \rightarrow R^2$ (viz rovnice 2.5). r je radiální vzdálenost (vzdálenost od bodu x do centra zkreslení (x_c, y_c)), $L(r)$ je radiálně symetrický distorzní faktor a k_1 a k_2 jsou radiální

distorzní koeficienty. Jedná se o zjednodušený polynomičtý model, který využívá jen dvou koeficientů. Pro každou úroveň přiblížení z je $\mathfrak{R}^Z$ parametrizována pomocí (x, y, k_1, k_2) . Ve většině prezentovaných algoritmech je dále využíváno předpokladu, že hlavní bod (u_0, v_0) je stejný jako centrum zkreslení (x_c, y_c) . Tím pádem je funkce $\mathfrak{R}^Z$ parametrizována pouze pomocí koeficientů k_1^Z a k_2^Z .

2.6 Známé metody kalibrace PTZ kamer

První, automatické kalibrační metody, se zakládaly na principech se známými, ale konstantními, vnitřními parametry. První práce na toto téma byla publikována v [9]. Od té doby vzniklo mnoho dalších metod. Některé z nich se soustředily na speciální pohyby kamery. Mezi tyto přístupy patřily například metody založené na čisté translaci nebo na pouhé rotaci, jako v případě [11]. Novější metody se již soustředí na kalibraci za měnících se vnitřních parametrů [26].

Novější metody jsou často založeny na homografii. Tento princip spočívá v tom, že je pořízeno několik obrázků v různých orientacích kamery. Jednotlivé obrázky jsou poté analyzovány a následně vypočítány homografie mezi nimi. Homografie je matice, která se vztahuje k odpovídajícím si bodům mezi dvěma obrázky. V kontextu kalibrace PTZ kamer je homografie matice, která umožňuje, aby byl jeden obraz zarovnaný k jinému a vytvářet tak mozaiku. Následně mohou být analyzovány samotné homografie a díky tomu získány parametry kamery mezi každým párem snímků. Můžeme tedy pozorovat a získávat parametry kamery při určitém pohybu. Další možnosti využití a informace týkající se matice homografie budou popsány v kapitole 4.3. Metoda založená na tomto principu je například publikována v [21], zabývá se problematikou kalibrace PTZ kamery využitím dvou pohledů a vypočtením matice homografie. Metoda ukazuje, že jedna nekonečná homografie je dostačující pro výpočet vnitřních kalibračních parametrů za předpokladu, že je poměr stran pixelů stejný a hlavní snímkový bod se nachází ve středu obrazu. V této publikaci je dále porovnáno, jaký má na výslednou kalibraci vliv předpoklad, že se hlavní snímkový bod nachází právě ve středu snímku.

Podobně jako v předchozím případě, tak i v [15] je publikována metoda založená na výpočtu kalibrační rovnice s využitím nekonečné homografie. Tato práce navazuje a rozšiřuje její původní verzi publikovanou v [14] a je založena na rozložení nekonečné homografie na dvojici projektivně ekvivalentních trojúhelníkových matic pouze pomocí dvou pohledů. K tomu využívá sérii takzvaných dohodnutých rotací.

Pokud bychom chtěli zmínit kalibrační metody určené pro pohyblivé PTZ kamery, které jsou určeny pro monitorování dopravního provozu, můžeme zmínit například metodu publikovanou v [20]. V této práci využívají trajektorií a spodních hran projíždějících vozidel k získání dvou různých sad paralelních čar využitých ke kalibraci právě PTZ kamery. Nevýhodou této metody je značná citlivost použitých algoritmů na trajektorii vozidel. Kromě toho, k získání kvalitních drah projíždějících vozidel systém potřebuje více času k tomu, aby zpracoval více snímků pro získání rozpoznatelné dráhy. To je časově velmi náročné a často nevyužitelné pro účely dopravních monitorovacích systémů. Další metodou navrženou pro monitorování dopravy je práce publikovaná v [23]. Zde algoritmus odvozuje novou rovnici ohniskové vzdálenosti, která je schopna určit parametry kamery. Tato rovnice vyžaduje pouze jednu sadu paralelních značení jízdních pruhů, šířku pruhu a výšku kamery. Metoda je schopná automaticky detekovat hrany na značení jízdních pruhů. Využitím těchto hran a zmiňované rovnice je algoritmus schopný vypočítat ohniskovou vzdálenost, úhel náklonu a rotace kamery. Nevýhodou této metody je, že potřeba znát a manuálně zadat parametry

a metoda tak není zcela automatická.

Metoda publikovaná v [6] se zabývá plně automatickou kalibrací s využitím rohů nacházejících se v obraze na silnici. Metoda je složena ze tří hlavních kroků, kde v prvním je pomocí Hough transformace určena oblast silnice. Dalším krokem je nalezení rohů v takto vymezené části obrazu. Z takto získaných bodů jsou pak vytvořeny dvojice bodů, které jsou využity k výpočtu kalibračních parametrů. Tyto kalibrační parametry jsou uchovány do té doby, než dojde k pohybu kamery. Po stabilizaci pohybu kamery jsou stejným způsobem opět vypočteny nové parametry pro kalibraci kamery.

Většina metod vytvořených pro kalibraci PTZ kamer nasazených v dopravě nejčastěji vychází ze dvou základních myšlenek, a to kalibrace pomocí různých objektů (především pruhů) nacházejících se v obraze přímo na silnici nebo kalibrace s využitím informací získatelných z projíždějících vozidel.

Kapitola 3

Použitá kalibrační metoda

Cílem této diplomové práce je vytvořit algoritmus pro rychlou re-kalibraci PTZ kamery. Jinými slovy, vytvořit algoritmus, který má za cíl udržet kameru ve zkalibrovaném stavu i při jejím pohybu. Tedy vytvořit program, který zajistí kalibraci právě při pohybu kamery a v době, než dojde ke kalibraci pomocí kalibračního algoritmu publikovaného v [7]. Tento algoritmus je plně převzat a jeho techniky a principy jsou v práci využity. Metoda je založena na kalibraci s využitím tří úběžníků (*angl. Vanishing Points*). Podrobnější vysvětlení využití metody, rozbor výhod a nevýhod a princip výpočtu vnitřních i vnějších parametrů jsou podrobněji popsány v následujících kapitolách.

3.1 Existující metody

Jelikož algoritmus v této diplomové práci je určen pro monitorování dopravy, podíváme se nyní stručně na další metody, které byly pro dopravní účely vyvinuty již dříve. Základem mnoha algoritmů je detekce paralelních čar. Tento algoritmus byl nejprve prezentován v [25] a [8]. Tyto články publikovaly metodu, která je schopna odhadnout parametry kamery s využitím paralelních čar. Výsledky těchto prací ukázaly, že paralelní čáry mohou být dobře využity k přiměřenému odhadnutí parametrů kamery a inspirovaly další práce. Například Bas a Crisman [1] ke kalibraci použili známou výšku a náklon kamery společně s paralelními pruhy v dopravě. Tento algoritmus však není plně automatický, jelikož vyžaduje manuální určení výšky a náklonu.

Dalšími metodami vyžadující určitý manuální uživatelský vstup jsou například [24], které vyžadují známou šířku značení a pozici kamery. Další metody vyžadují znalost informací týkajících se samotného provozu na sledovaném úseku, jako například průměrnou velikost vozidel [4] nebo průměrnou rychlost vozidel [19]. Společným rysem těchto algoritmů je detekce úběžníků odpovídajících směru pohybu vozidel. Často využívanou metodou k získání úběžníků je využití silničních pruhů. Tato metoda však vyžaduje vyšší počet dopravních pruhů a stejné, dobře viditelné, značení jízdních pruhů. Z toho důvodu vznikají další přístupy, které nevyužívají značení na silnicích, ale místo něj využívají pohyb vozidel. Tyto metody sledují pohyb vozidel nebo jako například v [30] analyzují hrany nacházející se na vozidlech.

Co se týče metod založených na kalibraci s využitím úběžníků, tak pokud bychom se zaměřili na počet úběžníků, které metoda ke kalibraci vyžaduje, existují principy založené jak na detekci jediného úběžníku [5], tak dvou [16] i tří úběžníků [29].

3.2 Obecný princip metody

Použitá metoda se zabývá problematikou plně automatické kalibrace kamer využitých v běžných dopravních monitorovacích systémech. Cílem algoritmu je získat z videa informace, které jsou pro dopravní monitoring důležité, jako například rychlost pohybu automobilů. Hlavní výhodou oproti ostatním kalibračním algoritmům je to, že je tato metoda plně automatická. Plně automatická v tomto případě znamená to, že nevyžaduje žádnou předchozí manipulaci s kamerou či videem, tedy žádné ruční nastavování parametrů kamery. Metoda dále nevyžaduje žádnou předchozí znalost místa nasazení, což je její další velkou výhodou. Díky tomu není nutné znát informace, jako je například počet jízdních pruhů, předpokládána přítomnost některých specifických objektů nebo předpokládaný tvar značení silnic. Některé algoritmy navíc potřebují znát například průměrnou rychlost projíždějících vozidel, či předpokládá určitý tvar samotného automobilu. Tyto předpoklady jsou velmi omezující a pro správnou funkčnost algoritmu nejsou požadovány. Jediným předpokladem týkajícím se umístění kamery je přibližně rovný tvar silnice. Mírně zahnuté tvary silnic, vyskytující se například na dálnicích jsou stále v souladu s předpokladem algoritmu. Různé rohové tvary silnic vyskytující se například na křižovatkách, jsou však problémem.

Za předpokladu, že počítáme se splněním předchozího požadavku, tedy že tvar silnice je přibližně rovný, můžeme předpokládat, že pohyb vozidel probíhá ve vzájemně paralelních trajektoriích. Experimenty ukázaly, že tento přístup je tolerantní i k vysokému počtu extrémů, tedy pohybů, které nejsou v souladu s tímto předpokladem. Přístup použitý v této metodě je založený na sledování charakteristických bodů a analýze jejich pohybu využitím varianty Houghovy transformace. Ta je velmi tolerantní k náhodným extrémům, které poté ve výsledku neovlivňují nalezení globálního maxima. Díky tomu změny jízdních pruhů při pohybu vozidel, vyhýbání se různým předmětům nebo předjíždění nepoškozují algoritmus a tato metoda je jednoduše a spolehlivě možná nasadit ve většině případech monitorování dopravy (s přibližně rovnou silnicí). Kalibrace vnitřních a vnějších parametrů je dosaženo využitím tří ortogonálních úběžníků. Tyto úběžníky se nachází ve třech různých směrech. První z nich se nachází ve směru pohybu vozidel, druhý kolmo ke směru pohybu vozidel a třetí kolmo k silnici.

Dalším problémem, se kterým se většina kamer, a tedy i kalibračních metod, potýká, je radiální zkreslení. Toto zkreslení je často považováno za pokročilý parametr kamery a vyskytuje se v různém měřítku závislém především na kvalitě kamery. Tato problematika se však týká většiny běžně dostupných kamer a řešení této problematiky nemůže být vynecháno. Použitá metoda se s tímto problémem vypořádává pomocí již zmiňovaných úběžníků. Podrobněji bude tato problematika řešena později.

V následujících podkapitolách budou podrobněji popsány techničtější aspekty a funkcionality samotného algoritmu.

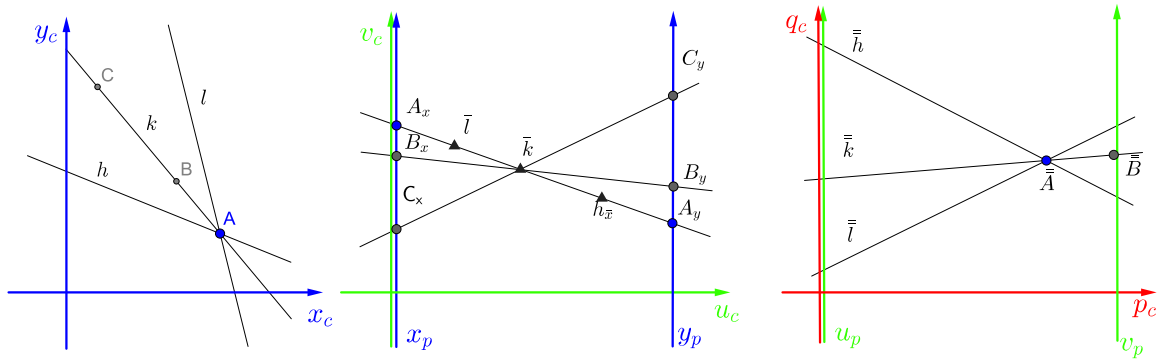
3.3 Stanovení předpokladů kamery

Většina dostupných a dříve publikovaných algoritmů týkajících se kalibrace kamery využívá různých technických předpokladů týkajících se parametrů kamery, které dokáží zjednodušit implementovaný algoritmus, a na druhou stranu nejsou příliš omezující. To, že uvedené požadavky nejsou omezující, znamená v tomto případě především to, že kamery splňující kladené požadavky, jsou běžně dostupné a využívány a není nutné shánět žádné specializované kamery, které by těmto požadavkům vyhověly. Ani prezentovaná metoda není v tomto ohledu výjimkou.

Mezi podmínky kladené na využitou kameru patří nulové zkosení (*angl. skew*) a shodné měřítko ve vertikálním a horizontálním směru. Jinými slovy, pixely se stejným poměrem stran a nulovým zkosením (čtvercové pixely). Tyto požadavky jsou často kladené i v ostatních metodách a splňuje je většina běžně nasazených dopravních kamer. Dalším kladeným požadavkem je umístění hlavního bodu ve středu obrazové plochy. Tento předpoklad však nebývá splněn s naprostou přesností, ale pouze přibližně. Avšak vzhledem k účelu, pro který je kalibrační metoda navržena, tedy měření vzdálenosti, rychlosti vozidel a získání 3D tvaru objektu, je chyba vzniklá při nedodržení tohoto požadavku přijatelná.

3.4 Diamantový prostor

Detekce úběžníků je prováděna pomocí akumulčního schématu, založeném na Houghově transformaci, v této práci nazývaného jako diamantový prostor. Tato metoda provádí mapování celé 2D projekční roviny do konečného prostoru nazývaného jako diamantový prostor pomocí po částech lineárního mapování využívajícího rovnoběžných souřadnic. Rovnoběžné souřadnice jsou souřadnicový systém, kde jsou osy vzájemně rovnoběžné. Mějme například bod $[x, y]^T$, ten je v rovnoběžných souřadnicích reprezentován jako čára protínající rovnoběžné osy v hodnotách x a y . Na obrázku 3.1 je zobrazena postupná transformace bodů a čar. Body jsou nejprve transformovány na čáry reprezentované v souřadném systému a poté zpět na body.

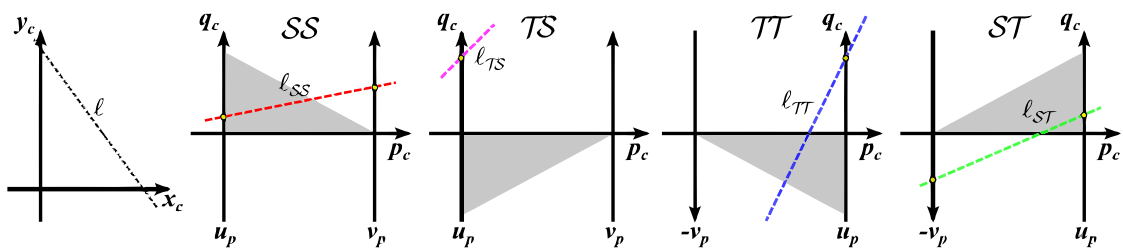


Obrázek 3.1: Transformace do rovnoběžného souřadného systému. Vlevo se nachází originální prostor. Uprostřed stejné objekty reprezentované v rovnoběžných souřadnicích a vpravo druhá transformace do rovnoběžných souřadnic¹.

Orientace rovnoběžných os může být v různých kombinacích. Pokud jsou obě osy orientované vůči stejnému směru, označujeme transformaci do rovnoběžných souřadnic symbolem S (*straight*). Pokud osy v rovnoběžném systému mají orientaci v odlišných směrech, označujeme tuto transformaci jako T (*twisted*). Kombinací těchto mapování dostáváme následující možnosti kombinací SS, ST, TS, TT .

Každé z dříve zmiňovaných mapování je transformací jednoho nekonečného prostoru do jiného. Avšak aplikace mapování každého na jeden kvadrant reálné promítací roviny vede ke konečné množině transformací. Tyto čtyři konečné trojúhelníkové podprostory mohou být spojeny dohromady, a tím vytvořit diamantový prostor. Na obrázku 3.2 je zobrazený převod linie do diamantového prostoru, který je tvořen šedými trojúhelníky.

¹Obrázek převzatý z [7].

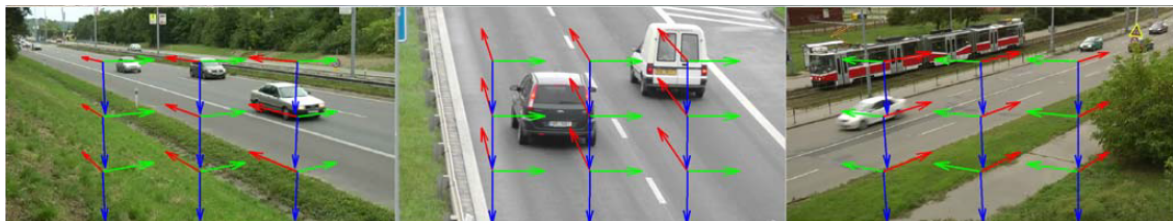


Obrázek 3.2: Reprezentace linie v různých transformacích. Šedé trojúhelníky tvoří diamantový prostor².

Linie s homogenními souřadnicemi (a, b, c) z 2D projekční roviny je reprezentována křivkou v diamantovém prostoru. Určené linie z projekční roviny jsou transformovány do diamantového prostoru a výsledné křivky jsou zde shromažďovány tak, že každý pixel křivky je inkrementován. Diamantový prostor je poté prohledán a nalezené globální maximum odpovídá prvnímu úběžníku. První úběžník je bod, kterým prochází největší množství linií.

3.5 Úběžníky

Úběžník je definován jako průsečík série paralelních linií v obraze. Tyto body jsou velmi užitečné pro kalibraci kamer. Existují metody založené na kalibraci pomocí jednoho dvou či tří úběžníků. Použitá metoda je založena na kalibraci s využitím právě tří různých úběžníků. K detekci těchto bodů se využívá pohybu vozidel a pozice vozovky. Pro lepší představu je na obrázku 3.3 vykreslen směr všech tří úběžníků na několika snímcích pořízených na různých místech, kde algoritmus automaticky rozpoznal parametry kamery.



Obrázek 3.3: Výsledné úběžníky detekované použitou metodou. První úběžník je znázorněn červenou barvou, druhý zelenou a třetí modrou. Na obrázku jsou zobrazena různá místa, na kterých algoritmus zcela automaticky rozpoznal parametry kamery³.

3.5.1 První úběžník

První úběžník se nachází ve směru pohybu vozidel. Pro jeho detekci je využita varianta Houghovy transformace, která je založená na paralelních souřadnicích.

²Obrázek překreslený z [7].

³Obrázek převzatý z [7].

V každém snímku videa jsou nejprve detekovány charakteristické rysy, které jsou v následujícím snímku sledovány a porovnány. Pokud některé sledované body vykazují významnější pohyb, jsou tyto body označeny a považovány jako část trajektorie vozidel. Body, které byly tímto způsobem označeny, jsou dále rozšířeny do nekonečných linií a je předpokládáno, že v některém bodě prochází prvním úběžníkem. Všechny takto určené linie jsou postupně voleny, tedy ukládány do zmiňovaného diamantového prostoru. Nejčastěji volený bod v diamantovém prostoru je pak určen jako první úběžník.

Využití diamantového prostoru je velmi efektivní a odolné vůči šumu. Jeho využití poskytuje dobrý odhad nejvíce výrazného úběžníku na snímku. Experimenty prokázaly, že ve většině případů k nalezení prvního úběžníku stačí pozorovat pohyb pouze dvou nebo tří vozidel. Vozidla, která porušují podmínku rovného pohybu nemají příliš vliv na výsledek algoritmu. Při menším počtu nalezených a pozorovaných bodů, resp. vozidel, je potřebná pouze delší perioda pozorování, aby bylo nashromážděno dostatečné množství stop, ale algoritmus samotný není poškozen.

3.5.2 Druhý úběžník

Druhý úběžník odpovídá směru rovnoběžnému k silnici a kolmému ke směru prvního úběžníku, tedy ke směru pohybu vozidel. I v tomto případě je k detekci druhého úběžníku využít zmiňovaný diamantový prostor. Mnoho hran na vozidlech se shoduje se směrem druhého úběžníku a tak jsou právě tyto hrany využity k jeho detekci a ukládány do diamantového prostoru.

Pro nalezení hran vozidel je využit speciální model pro detekci hran pozadí, který je schopen vyfiltrovat pohybujících se objekty a detekovat hrany pouze na těchto pohybujících se objektech. Model je obnovován každým snímekem, a díky tomu je schopen se vypořádat se stíny a pomalými změnami. Model ukládá skóre důvěry výskytu orientovaných hran. Pro každý pixel (i, j) v příchozím snímku I_t o velikosti $w \times h$ je získán jeho gradient m a orientace pomocí speciálního filtru. Každý pixel je poté podstoupen testům. Hrany, které prošly testy, jsou dále zpracovány a filtrovány. Hrany jsou nejprve prodlouženy do nekonečných linií (stejně jako v případě detekce prvního úběžníku). Z takto získaných linií jsou nejprve odstraněny ty, které prochází blízko prvnímu úběžníku, tedy hrany ve směru jízdy vozidla. Dále jsou odstraněny linie, které mají přibližně vertikální tvar. Veškeré hrany, které prošly všemi předchozími filtry, jsou následně ukládány do diamantového prostoru a jsou považovány za hrany směřující k druhému úběžníku.

3.5.3 Třetí úběžník

Třetí úběžník odpovídá kolmému směru vzhledem k silnici. Bohužel v běžných silničních pohledech se nachází minimální množství hran, které by podporovaly třetí úběžník. Některé algoritmy odvozují tento úběžník pomocí stojících chodců nacházejících se ve scéně. Tento způsob však není příliš vhodný, protože většina scén, pro které je tento algoritmus určen, obsahuje minimální množství chodců nebo neobsahuje chodce vůbec. Namísto hledání třetího úběžníku je jeho pozice vypočítána s využitím prvních dvou úběžníků, pomocí rovnice 3.1. Označme tyto úběžníky jako U a V , dále předpokládejme, že se hlavní bod P nachází ve středu obrazu a že hodnota ohniskové vzdálenosti je f . Pak platí následující:

$$\begin{aligned} U' &= (u_x, u_y, f) & V' &= (u_x, u_y, f) & P' &= (p_x, p_y, 0) \\ W' &= (U' - P') \times (V' - P') \end{aligned} \tag{3.1}$$

kde $U'V'W'aP'$ jsou souřadnice bodu ve světových souřadnicích.

Vzhledem k tomu, že může nastat situace, kdy se jeden ze dvou prvních úběžníků může nacházet v nekonečnu, nemusí být třetí úběžník spočítatelný. Nicméně pro některá měření, jako je například rychlost pohybu, je znalost pouze prvních dvou úběžníků dostačující.

3.6 Vnitřní parametry

Při výpočtu ohniskové vzdálenosti f se postupuje podobně jako při výpočtu třetího úběžníku. Stejně jako v předchozím případě je pro její výpočet nutné znát souřadnice prvních dvou úběžníků a souřadnice hlavního bodu. Ten se dle předpokladu nachází ve středu obrazu. Výpočet ohniskové vzdálenosti předchází výpočtu třetího úběžníku. Ten je následně vypočítán právě s využitím získané ohniskové vzdálenosti pomocí vzorce 3.2. Vzorec pro výpočet ohniskové vzdálenosti je uveden až po vzorci pro výpočet třetího úběžníku, především z důvodu lepšího uspořádání textu.

$$\begin{aligned} U &= (u_x, u_y) \quad V = (v_x, v_y) \quad P = (p_x, p_y) \\ f &= \sqrt{-(U - P) \cdot (V - P)} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.7 Radiální distorze

Pro kompenzaci radiální distorze je využito splnění předpokladu, že je tvar silnice přibližně rovný. Díky tomu mohou být sledované trajektorie využity k výpočtu kompenzace radiálního zkreslení. Velikost tohoto zkreslení je dána především kvalitou čoček v kameře a některé kvalitnější kamery ani téměř žádné zkreslení neobsahují. Kompenzovaná pozice bodu (x, y) je označována jako $(\bar{x}, \bar{y})$ a je získána pomocí polynommické radiální distorzní funkce definované jako

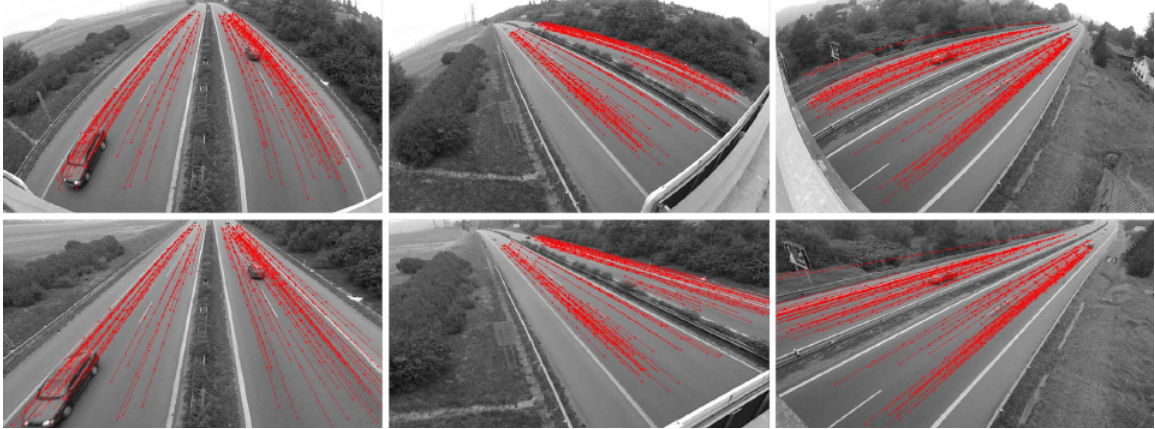
$$\begin{aligned} \bar{x} &= (x - x_c)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \\ \bar{y} &= (y - y_c)(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + \dots) \\ r &= \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \end{aligned} \quad (3.3)$$

kde (x_c, y_c) definuje pozici středu zkreslení (*angl. distortion center*) a koeficienty k_i jsou neznámé distorzní koeficienty. Střed zkreslení (x_c, y_c) je shodný s hlavním bodem (u_0, v_0) a podle předpokladu se tedy nachází ve středu obrazu.

Pro nalezení množiny distorzních koeficientů $K = \{k_1, k_2, \dots\}$ jsou využity získané trajektorie T . Každý bod je sledován, dokud není ztracen. Každá trajektorie reprezentovaná posloupností bodů $t = \{a_1, a_2, \dots\} \in T$ je následně promítnuta do její transformované verze $\bar{t}_K$. Optimální množina koeficientů K^* je poté nalezena jako minimální suma čtvercových vzdáleností všech bodů ve všech trajektoriích oproti jejich nejvíce vhodné linii $l_{\bar{t}_K}$ podle následujícího vzorce:

$$K^* = \arg \min \sum_{\bar{T} \in T} \sum_{\bar{a} \in \bar{T}} (l_{\bar{T}_K} \cdot \bar{a})^2 \quad (3.4)$$

V praxi probíhá výpočet kompenzace radiální distorze jako první před výpočtem ostatních parametrů či detekcí úběžníků. Poté jsou veškeré další výpočty prováděny na nezkrácených bodech, tedy nejprve jsou provedeny kompenzace bodů pomocí vzorce 3.3 a následně veškerá ostatní činnost algoritmu. Na obrázku 3.4 je vidět rozdíl mezi nezpracovaným obrazem, který je ovlivněn soudkovou radiální distorzí, a obrazem, kde byla provedena kompenzace radiálního zkreslení výše uvedeným postupem.



Obrázek 3.4: Příklad videa z reálného provozu převedeného do stupňů šedi. Na obrázcích je vidět rozdíl mezi originálním videem (vrchní snímky) a videem se zpracovanou kompenzací radiálního zkreslení⁴.

3.8 Kalibrace kamery pomocí úběžníků

V této části bude popsán průběh výpočtu parametrů kamery s využitím získaných úběžníků. K tomuto účelu je využit model dírkové kamery, který byl podrobněji popsán v kapitole 2.3. Mějme tedy vztah mezi 3D souřadnicemi a získaným obrazem reprezentovaný v homogenních souřadnicích pomocí projekční matice P následovně

$$\kappa_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} = K [R \ t] \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

kde $[X_i \ Y_i \ Z_i \ 1]^T$ jsou homogenní souřadnice 3D bodu a $[u_i \ v_i \ 1]^T$ homogenní souřadnice 2D bodu promítnutého na obrazovou plochu a κ je neznámý váhový parametr.

Jak víme, projekční matice P může být rozložena na 3×3 rotační matici R , 3×1 translační vektor t a vnitřní kalibrační matici K , která je definována následovně

$$K = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

⁴Obrázek převzatý z [7].

Zde α a β reprezentují ohniskovou vzdálenost, jinými slovy rozměry pixelu ve směru os u a v . γ udává parametr zkosení a $(u_0, v_0)^T$ udávají souřadnice hlavního bodu.

V případě použitého algoritmu předpokládáme nulové zkosení pixelů, tedy $\gamma = 0$ a čtvercový tvar pixelů, tedy $\alpha = \beta = f$. Dále předpokládáme umístění hlavního bodu ve středu obrazové plochy, tedy můžeme předpokládat, že souřadnice bodu (u_0, v_0) jsou známé a tedy známe i tyto parametry. Dostáváme pouze jeden volný parametr obsažený v kalibrační matici K , a to ohniskovou vzdálenost f .

Kapitola 4

Vlastnosti středového promítání

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, snímání obrazu kamerou považujeme za případ středové projekce. V jejím případě dochází k tomu, že některé vlastnosti, které platí v běžném euklidovském systému, jako například vzdálenost, neplatí. V případě snímání okolního světa pomocí kamery to má za následek například následující situaci.

Předpokládejme, že potřebujeme zjistit pozici bodu po pohybu kamery, jehož pozici před pohybem známe. Tento bod však není na snímku viditelný (nachází se mimo obraz, který je snímáný). Pokud bychom předpokládali, že pomocí vektorového pole optických toků dokážeme vypočítat vzdálenost posuvu tohoto pole, a tedy i vzdálenost posuvu jakéhokoliv bodu ve snímku (i mimo něj), dosáhli bychom nefunkčního řešení. Je to nejen z toho důvodu, že nemůžeme předpokládat, že se každý bod na snímku bude pohybovat o stejnou vzdálenost (vzdálenější body se budou pohybovat pomaleji), a díky tomu nejsme schopni přesně určit velikost pohybu, ale i z toho důvodu, že zatímco u běžného euklidovského systému je vzdálenost invariantní (zachovává se), u projektivního zobrazení tomu tak není a vzdálenost se ve středové projekci nezachovává. Další vlastností, která není vůči středové projekci invariantní, je například velikost úhlu. Z tohoto důvodu musíme hledat a využívat ty vlastnosti, které jsou vůči středové projekci invariantní (zachovávají se v ní).

Touto problematikou se zabývá projektivní geometrie a mezi takové vlastnosti, které jsou projektivně invariantní, patří například incidence (vzájemná poloha) nebo právě dvojpoměr (*angl. Cross Ratio*), který je v projektu využíván. Většina informací nacházejících se v této kapitole je čerpána z textu [3], který se zabývá právě vlastnostmi projektivní geometrie.

4.1 Optický tok

Optický tok (*angl. optical flow*) je vektorové pole, které pro každý bod v obraze určuje směr a velikost pohybu daného bodu mezi dvěma snímky v časech t a $t + 1$. Optický tok však udává směr a velikost pohybu pouze v obraze (snímku) nikoliv ve skutečné scéně, která je snímána [13]. Vztah mezi skutečným pohybem objektů ve snímané scéně a pohybem příslušných objektů na získaném obraze závisí na samotné snímané scéně a na způsobu jejího snímání. V případě nahrávání 3D scény pomocí běžných kamer mluvíme o středové projekci, což je případ snímání trojrozměrné scény do dvojrozměrného obrazu. V tomto případě pak dochází k tomu, že nejsou zachovány některé předpokládané vlastnosti. Dochází například ke ztrátě rovnoběžnosti, což má v důsledku za následek to, že při přibližování se objektu směrem k pozorovateli nedochází k předpokládanému chování. Místo toho, aby optický tok všech bodů přibližujícího se objektu měl stejný směr (k pozorovateli), dochází ke zvětšování

objektu a optické toky bodů nacházejících se na tomto objektu mají rozbíhající se směr.

Dalším problémem je to, že jediný způsob, jak můžeme z obrazu scény vypočítat optický tok bodu $X(x, y, t)$, je pomocí jeho intenzity $I(x, y, t)$ měnící se v čase. Jinými slovy by se dalo říct, že optický tok bodu $X(x, y)$ vyjadřuje posuv jeho intenzity I v čase t . K jejímu sledování však potřebujeme body, které nesou určitou významnou informaci, tedy body, jejichž gradient intenzity je nenulový. Pokud bychom například chtěli pozorovat pohyb dokonale čistého listu papíru bez skvrn a jakýchkoliv jiných nečistot umístěného těsně před kamerou tak, že po celou dobu pohybu bude papír zabírat celou plochu, která je snímána kamerou, nebyli bychom schopni tento pohyb rozpoznat, protože neexistuje žádný bod nesoucí významnou informaci (předpokládáme, že všechny body na papíře jsou stejně bílé). Až v případě, že bychom na papír udělali například tečku, byli bychom schopni tuto tečku detekovat jako významný bod a pozorovat pomocí ní pohyb papíru. Body nesoucí určitou významnou informaci budou v tomto textu dále nazývány jako významné body.

Pokud tedy získáme potřebné významné body a jejich souřadnice v čase t , můžeme určit směr a velikost pohybu optického toku těchto bodů a díky tomu i získat nové souřadnice těchto bodů. K účelu sledování optického toku existuje několik různých metod založených na různých principech. Všechny tyto metody však vycházejí z předpokladu zachování intenzity. Předpokládejme pixel (x, y, t) s intenzitou $I(x, y, t)$, kde x a y reprezentují souřadnice v prostoru a t časovou dimenzi, který se mezi dvěma jednotlivými snímky posunul o $\delta x, \delta y$ a δt . Předpoklad zachování intenzity pak zní následovně:

$$I(x, y, t) = I(x + \delta x, y + \delta y, t + \delta t) \quad (4.1)$$

Zpracování tohoto předpokladu může probíhat různými technikami, které jsou nejčastěji členěny do následujících skupin

- Diferenční přístupy
- Vyhledávání oblasti
- Metody založené na energii
- Metody založené na fázi

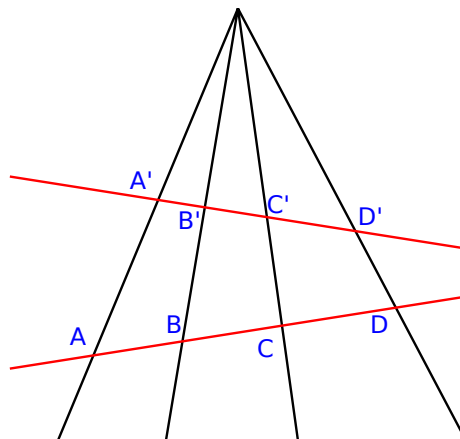
Existuje mnoho různých publikací, které se zabývají konkrétní problematikou těchto metod. Jejich hlubší pochopení však není v rámci rozsahu této diplomové práce a pro pochopení další problematiky postačí pouze informace zmíněné v této části.

4.2 Dvojpoměr

Jak již bylo zmíněno, dvojpoměr je jednou z vlastností, která se zachovává ve většině projekcí, tedy především i ve středové projekci.

Dříve než se začnu zabývat samotnou problematikou dvojpoměru je nutné definovat některé vlastnosti a termíny, které s dvojpoměrem úzce souvisí. Je to především orientovaná úsečka a dělicí poměr. Tyto pojmy budou blíže popsány v podkapitolách 4.2.1 a 4.2.2.

Na obrázku 4.1 je znázorněna základní myšlenka dvojpoměru. Necht A', B', C', D' jsou body ležící na přímce, které jsou získány projektivní transformací (projekcí) z původní čtveřice bodů A, B, C, D ležících na jiné přímce. Díky tomu, že je dvojpoměr invariantní vůči projekci, můžeme říct, že dvojpoměr bodů A, B, C, D a bodů A', B', C', D' je shodný.



Obrázek 4.1: A, B, C, D a A', B', C', D' jsou vzájemně spřízněné body vzniklé projektivní transformací. Dělicí poměr bodů A, B, C, D je stejný jako dělicí poměr bodů A', B', C', D' ¹.

4.2.1 Orientovaná úsečka

Nechť A a B jsou dva body ležící na přímce p . Symbolem $\overrightarrow{AB}$ pak značíme orientovanou úsečku AB ve směru od bodu A k bodu B . Vzdálenost těchto bodů v takto definovaném směru značíme $|\overrightarrow{AB}|$. Tuto vzdálenost nazýváme orientovanou vzdáleností bodů A, B nebo také orientovanou délkou úsečky s krajními body A, B . Právě na směru orientované (respektive na pořadí bodů) úsečky záleží při výpočtu dělicího poměru.

Pro každou orientovanou úsečku platí následující:

- Jestliže $A = B$, pak $|\overrightarrow{AB}| = 0$
- Zřejmě platí $|\overrightarrow{AB}| = -|\overrightarrow{BA}|$

4.2.2 Dělicí poměr

Nechť $A \neq B$ jsou dva vlastní body přímky p , nazývané také jako základní body. Dále nechť C je dalším bodem ležícím na téže přímce p . Pokud předpokládáme, že $C \neq B$, pak dělicí poměr λ_C bodu C (nazývaného také jako dělicí bod) přímky p vzhledem k základním bodům A, B (vzhledem k vlastnostem orientovaných úseček je nutné dodržet stanovené pořadí bodů) je podíl délek orientovaných úseček $\overrightarrow{AC}, \overrightarrow{BC}$. Tedy

$$\lambda_C = \frac{|\overrightarrow{AC}|}{|\overrightarrow{BC}|} \quad (4.2)$$

Dělicí poměr není závislý na volbě jednotek délky. Dělicí poměr λ_C vzhledem k základním bodům A, B často označujeme (ABC) . Toto značení je přehlednější a bude často používáno v dalším textu. Pro λ_C platí následující:

- Pro $C \equiv A$ platí: $\lambda_C = \frac{|\overrightarrow{AA}|}{|\overrightarrow{BA}|} = \frac{0}{|\overrightarrow{BA}|} = 0$ (čitatel je úsečka nulové délky)

¹Obrázek plně převzat z <http://hans.wyrdweb.eu/about-perspective/>

- Pro $C \equiv B$ platí: $\lambda_C = \frac{|\overrightarrow{AB}|}{|\overrightarrow{BB}|}$ a λ_C není definován (roste nade všechny meze)
- Pro C ležící ve středu úsečky vzhledem k jejím krajním bodům A, B platí: $\lambda_C = -1$
- $\forall(\lambda_C \in \mathbb{R}): \lambda_C \neq 1$ existuje jediný bod C na přímce p , jehož dělicí poměr λ vzhledem k základním bodům A, B je roven λ_C

Dělicí poměr je invariantní pouze vzhledem k rovnoběžnému promítání. Středovým promítáním se však dělicí poměr obecně nezachovává. K účelům zachování vlastností při středovém promítání slouží dvojpoměr, jehož základem je právě dělicí poměr λ .

4.2.3 Dvojpoměr

Definice dvojpoměru vychází z dělicího poměru. Necht A, B, C, D jsou čtyři navzájem různé kolineární body² ležící na přímce p . Dále necht λ_C je dělicím poměrem bodů A, B vzhledem k bodu C a λ_D dělicím poměrem bodu D vzhledem k bodům A, B . Pak μ_D definovaný jako

$$\mu_D = \lambda_C \div \lambda_D = \frac{|\overrightarrow{AC}|}{|\overrightarrow{BC}|} \div \frac{|\overrightarrow{AD}|}{|\overrightarrow{BD}|} \quad (4.3)$$

nazýváme dvojpoměrem μ_D dělicího bodu D vzhledem k dělicímu bodu C pro základní body A, B . Dvojpoměr μ_D obdobně jako u dělicího poměru pro zjednodušení označujeme $(ABCD)$. S využitím toho značení a obdobného značení definovaného pro dělicí poměr můžeme zapsat rovnici 4.3 pro výpočet dvojpoměru následovně:

$$(ABCD) = \frac{(ABC)}{(ABD)} \quad (4.4)$$

Pro dvojpoměr $(ABCD)$ platí následující:

- Je-li $D = B$, pak $(ABCD) = 0$
- Je-li $D = A$, pak $(ABCD) = \infty$
- Je-li $D = C$, pak $(ABCD) = 1$
- Je-li C_∞ , pak $(ABCD) = \frac{1}{(ABD)}$
- Je-li D_∞ , pak $(ABCD) = (ABC)$

Hodnota dvojpoměru μ závisí na pořadí jednotlivých bodů. Při záměně pořadí bodů se dvojpoměr μ mění. Existují však případy, kdy je i po záměně pořadí bodů dvojpoměr zachován, a to v případě, že platí následující věta: *Vyměníme-li vzájemně dva body z uvedené čtveřice A, B, C, D a současně dva body zbývající, pak hodnota dvojpoměru čtveřice se nemění.*[3] Necht body A, B, C, D jsou body jejichž dělicí poměr $(ABCD)$ je roven μ . Pak z předchozí věty vyplývá, že pro definovaný dvojpoměr $(ABCD)$ platí následující:

²Kolineárními body nazýváme body ležící na jedné přímce

$$(ABCD) = (BADC) = (DCBA) = (CDAB) = \mu \quad (4.5)$$

V případě záměny pouze jedné dvojice bodů dvojpoměru, definovaného předchozím způsobem, tedy v případě, že platí $(ABCD) = \mu$, pak můžeme definovat následující vztahy:

- $(ACDB) = \frac{1}{1 - \mu}$
- $(ADCB) = \frac{\mu}{1 - \mu}$
- $(ABDC) = \frac{1}{\mu}$
- $(ACDB) = 1 - \mu$
- $(ADBC) = \frac{\mu - 1}{\mu}$

Invariantnost dělicího poměru vzhledem k perspektivní projekci je podložena Pappovou větou, která se v různých publikacích nejčastěji objevuje ve dvou následujících zněních:

- Dvojpoměr čtveřice bodové nebo paprskové zůstává v rovinách snímku mapy i terénu zachován.
- Jestliže jsou A', B', C', D' rovnoběžné nebo středové průměty čtyř navzájem různých bodů A, B, C, D přímkou p na přímkou $p' \neq p$, potom $(A'B'C'D') = (ABCD)$.

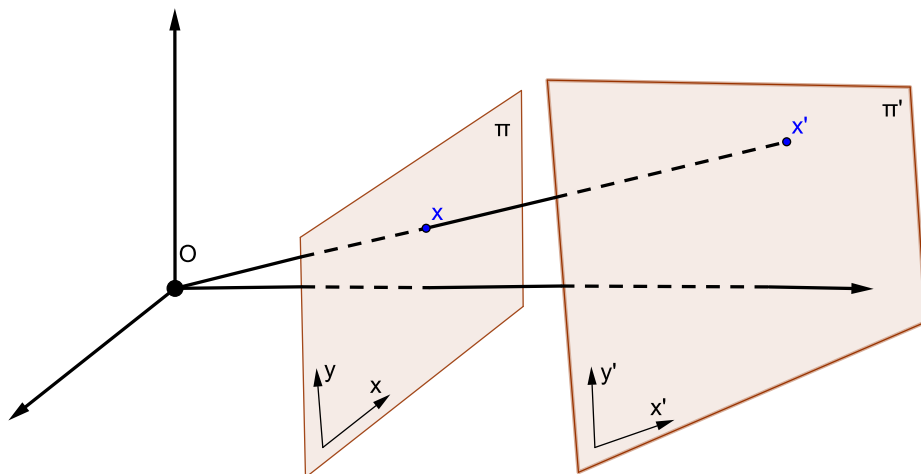
Důkaz Pappovi věty však přesahuje rámec této práce a jeho znalost není nutná pro další pochopení textu.

4.3 Homografie

Homografie, někdy označovaná jako projektivní transformace nebo také kolinearita, je invertibilní transformace $P^2 \rightarrow P^2$ mezi dvěma projektivními plochami, kde je zásadní vlastností mapování přímek opět na přímky. Někdy se také uvádí, že tento typ transformace zachovává přímky nebo také, že zachovává kolinearitu [18]. Na obrázku 4.2 je znázorněn případ středového promítání se středem O a dvojicí ploch π, π' , které mapuje body z jedné plochy na body ležící na druhé ploše ($x \leftrightarrow x'$). Z tohoto vztahu můžeme odvodit, že se i přímky jedné roviny budou mapovat opět na přímky.

Jinými slovy můžeme říct, že homografie definuje, jakým způsobem se mění pozorovaný předmět v případě, že se mění pozice či úhel pohledu pozorovatele. Často se používá pro takzvanou mezisnímkovou analýzu obrazu. Matice homografie je 3×3 transformační matice H definována následovně:

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$



Obrázek 4.2: Příklad projektivní transformace, nazývané též jako homografie. Bod x ležící na π se mapuje na bod x' ležící na π' ³.

4.3.1 Výpočet homografie ze dvou korespondujících bodů

Nechť x a x' jsou dva navzájem korespondující body na snímku v časech t a $t+1$. S využitím matice homografie pak můžeme říct, že mezi těmito body platí následující vztah

$$wx' = Hx \quad (4.7)$$

kde H je 3×3 matice homografie a w je takzvaná homogenní složka. Bod x' je tedy udán v homogenních souřadnicích. Převod bodu X o homogenních souřadnicích (x_w, y_w, w) z homogenních souřadnic do kartézských je prováděn dělením souřadnic tohoto bodu jejich homogenní složkou w . Tedy v případě bodu X platí

$$X = \left(\frac{x_w}{w}, \frac{y_w}{w} \right) \quad (4.8)$$

Nechť $x = (x, y, 1)$ a $x' = (x', y', 1)$ jsou dva vzájemně korespondující body v homogenních souřadnicích, s jejich využitím můžeme rovnici 4.7 upravit do podoby, která je uvedena ve vzorci 4.9.

$$\begin{pmatrix} wx' \\ wy' \\ w \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Roznásobením, vyjádřením homogenní složky w a následným rozepsáním dostáváme soustavu dvou rovnic, která po úpravě vypadá následovně:

$$\begin{aligned} h_{11}x + h_{12}y + h_{13} - h_{31}xx' - h_{32}yx' - h_{33}x' &= 0 \\ h_{21}x + h_{22}y + h_{23} - h_{31}xy' - h_{32}yy' - h_{33}y' &= 0 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Předpokládejme, že máme k dispozici sadu n vzájemně korespondujících dvojic bodů, kde

³Překreslený obrázek převzatý z <http://trilobit.fai.utb.cz/homografie-a-epipolarni-geometrie>

n je minimálně 4 (minimálně čtyři dvojice bodů). Z těchto n dvojic nyní vygenerujeme soustavu $2n$ lineárně nezávislých rovnic s 9 neznámými. Takovou soustavu můžeme zkráceně zapsat jako

$$Ah = 0 \quad (4.11)$$

kde A je $2n \times 9$ matice, do které jsou zapsány všechny soustavy rovnic v upraveném tvaru (viz 4.10) vytvořené z rovnice 4.9 pomocí již zmiňovaných n dvojic bodů. Dále h je 9×1 vektor, jehož složkami jsou složky výsledné hledané homografie H (viz 4.6). Pokud bychom zkrácený tvar rovnice 4.11 rozepsali, dostáváme následující soustavu rovnic

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1x'_1 & -y_1x'_1 & -x'_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1y'_1 & -y_1y'_1 & y'_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2x'_2 & -y_2x'_2 & -x'_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -x_2y'_2 & -y_2y'_2 & y'_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_nx'_n & -y_nx'_n & -x'_n \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -x_ny'_n & -y_ny'_n & y'_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ h_{13} \\ h_{21} \\ h_{22} \\ h_{23} \\ h_{31} \\ h_{32} \\ h_{33} \end{bmatrix} = 0 \quad (4.12)$$

Jejím výsledkem je tedy matice H , která vyjadřuje vztah mezi n korespondujícími body. S využitím takto získané matice homografie H lze vytvářet různé transformace týkající se především počítačového vidění. Častým případem je například kalibrace kamery, stabilizace kamery nebo různé transformace či zarovnání obrazu.



(a) Původní fotografie knihy (b) Fotografie posunutá knihy z jiného úhlu pohledu (c) Výsledek aplikace matice homografie

Obrázek 4.3: Příklad nalezení bodů pro výpočet matice homografie (obrázek vlevo a uprostřed) a výsledek aplikace vypočtené matice homografie na původní snímek (vpravo)⁴.

Pro představu, jakým způsobem samotná matice H funguje, si uvedme jeden konkrétní příklad zahrnující všechny kroky popsané v této podkapitole. Samotný příklad je zobrazen na sadě tří obrázků 4.3. Na prvním z těchto tří obrázků (obrázek 4.3a) je zobrazen snímek

⁴Sada obrázků převzatá z <http://www.learnopencv.com/homography-examples-using-opencv-python-c/>

knihy. Na obrázku 4.3b je zobrazena stejná kniha, která je však mírně posunuta a navíc vyfocena z jiného pozorovacího úhlu. Na těchto dvou obrázcích jsou vyznačeny čtyři dvojice vzájemně korespondujících bodů (stejnou barvou jsou označeny body patřící k sobě). Pomocí těchto bodů je vypočtena matice homografie, která je následně aplikována na obrázek 4.3a. Výsledek transformace po aplikaci matice homografie je znázorněn na obrázku 4.3c. Můžeme vidět, že celý obrázek je posunut stejným způsobem, jako je posunuta kniha na druhém obrázku oproti prvnímu.

Kapitola 5

Vlastní práce

Cílem této diplomové práce je vytvoření programu, který bude schopen udržet PTZ kameru při jejím pohybu a především bezprostředně po ukončení pohybu ve zkalibrovaném stavu. K samotné kalibraci je použita metoda na základě nalezení tří úběžníků. Účelem implementace bylo uchování pozice těchto úběžníků při pohybu. K tomuto účelu byla vymyšlena metoda, kterou jsem nazval jako metodu uchování pozice úběžníků na základě vytvoření úběžníkových trojúhelníků. Tato metoda je založena na využití vlastností dvojpoměru. Souběžně s touto metodou byla implementována druhá metoda založená na výpočtu nových souřadnic bodu pomocí matice homografie. Mimo to je v programu implementován modul pro detekci pohybu kamery, který je nezbytnou součástí celého programu. Dalším implementovaným modulem je detektor silnice, který byl implementován z experimentálních důvodů. V následujících sekcích bude podrobně popsána funkcionality všech těchto modulů nacházejících se v programu.

5.1 Detektor pohybu

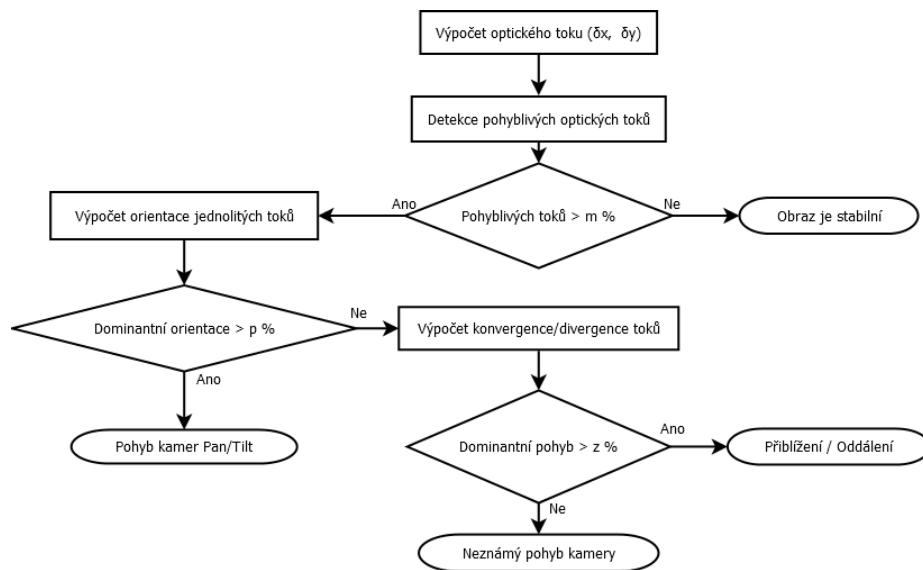
Detektor pohybu je významnou částí systému sloužící k rozpoznání okamžiku, kdy dochází k pohybu kamery a především i k rozeznání, zda se jedná přímo o pohyb kamery, tedy o pohyb vlevo, vpravo, nahoru, dolů (rotace nebo náklon), nebo o přiblížení či oddálení kamery. Rozpoznání těchto dvou základních pohybů je důležité, protože při každém z nich dochází k různému chování bodů v obraze a je nutné tomu přizpůsobit další chování systému. Například je dobré využívat pouze ty body, které se pohybují v souladu s pohybem kamery. Metoda rozpoznávání pohybu je založena na principu pozorování vektorového pole optických toků. Z informací, které optické toky dokáží poskytnout, jsme schopni rozpoznat nejen to, zda se kamera hýbe, ale i konkrétně to, jakým způsobem.

Prvním krokem pro rozpoznání pohybu je získání potřebného pole optických toků. Pro jeho výpočet jsou využity principy popsané v části 4.1. K samotné detekci významných bodů je využito *Shi-Tomasi* detektoru, jehož implementace je poskytnuta jako součást knihovny *OpenCV* pod funkcí nazývanou *goodFeaturesToTrack*. Tato funkce na svém vstupu přijímá obraz (ze sekvence snímků videozáznamu) převedený do stupňů šedi. Výstupem funkce je pak pole významných bodů. V případě *goodFeaturesToTrack* jsou hledány významnými body rohy nacházející se na snímku. Počet, kvalitu a minimální vzdálenost těchto bodů určuje trojice povinných parametrů zadávaných této funkci. Možným volitelným parametrem je maska, která formou obrázku určuje místa, kde se mají body vyhledávat. Jako maska v tomto projektu slouží maska silnice, zobrazená například na obrázku 5.9b, jejíž vliv na

výsledek byl jedním z faktorů při vyhodnocování.

Máme tedy pole vstupních bodů. Dalším krokem je nalezení nových pozic těchto bodů na následujícím snímku. Tedy výpočet vektorového pole optických toků. K tomuto účelu slouží další z funkcí *OpenCV*, která se nazývá *calcOpticalFlowPyrLK*. Ta je založena na algoritmu sledování optického toku s rozptýlenými body využívající iterační pyramidový algoritmus *Lucas-Kande*. Na vstupu přijímá dva obrázky ve stupních šedi, a to předchozí a současný. Dále pak pole významných bodů, jejichž optický tok bude v obraze vyhledáván. Na výstupu se pak nachází pole obsahující nové pozice významných bodů.

Jednoduché obecné schéma detektoru pohybu je zobrazeno na obrázku 5.1. Celý detektor je rozdělen do tří hlavních částí, a to na detekci pohybu, rozpoznání dominantní orientace a rozpoznání dominantního konvergentního nebo divergentního pohybu. Funkčnost jednotlivých částí bude popsána v následujících podkapitolách.



Obrázek 5.1: Diagram znázorňující funkcionalitu modulu pro detekci a rozpoznání konkrétního pohybu kamery¹.

5.1.1 Detekce pohybu

První významnou částí celého detektoru je detekce pohybu, resp. detekce pohyblivých optických toků. Vstupem této části je vektorové pole optických toků všech detekovaných významných bodů v obraze. Výstupem pak seznam pohybujících se a nepohybujících se bodů (resp. optických toků).

Pomocí vektorového pole optických toků jsme schopni rozlišit od sebe pohyblivé a stabilní objekty v obraze. V případě, že bychom předpokládali, že je obraz stabilní, mělo by teoreticky docházet i k tomu, že všechny objekty v obraze budou stabilní a jednotlivé optické toky vektorového pole by pak měly mít nulovou velikost. Za předpokladu, že by došlo k pohybu kamery, měly by mít všechny optické toky vektorového pole naopak nenulovou velikost. Toto je však pouze teoretický předpoklad chování obrazu. Mnohem běžnější je to, že i přes to, že je kamera stabilní, se v obraze nachází pohyblivé objekty (například lidé,

¹Vlastní zpracování.

projíždějící automobily atd.), které tento předpoklad porušují. Dalším nežádoucím vlivem při detekci stability kamery jsou odchylky vznikající při výpočtu optického toku, kdy i přes to, že je objekt stabilní, bývá jeho optický tok často nenulový, ale spíše blížící se k nule. Z těchto důvodů musíme předpoklad zmírnit a stanovit meze, kdy obraz považujeme za stabilní a kdy nikoliv.

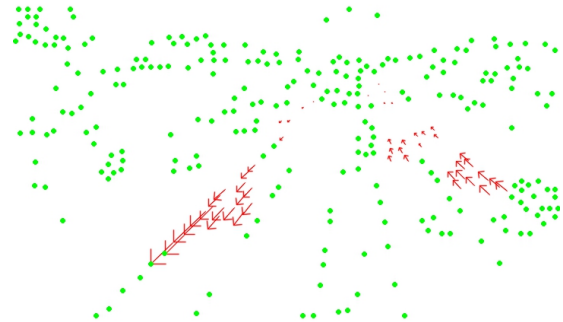
K vyřešení prvního zmiňovaného problému, tj. situace kdy se ve stabilním obraze nachází pohyblivé objekty, stanovíme hranici $m\%$, která určuje podíl pohyblivých optických toků ze všech toků v obraze v procentech. V případě, že je tato hodnota překročena, považujeme obraz za pohyblivý². V opačném případě je obraz považován za stabilní. Zůstává však otázka, související s druhým problémem, týkající se šumu vznikajícího při výpočtu, a to kdy můžeme optický tok považovat za stabilní a kdy za pohyblivý. K tomuto účelu stanovíme hodnotu ϵ , která určuje vzdálenost, od které považujeme optický tok za pohyblivý. K výpočtu vzdálenosti optického toku využijeme vzorec 5.1 pro výpočet Euklidovské vzdálenosti bodů $A(x_i, y_i)^t$ v čase t a $A(x_i, y_i)^{t+1}$ v čase $t + 1$:

$$\sqrt{(x_i^{t+1} - x_i^t)^2 + (y_i^{t+1} - y_i^t)^2} > \epsilon \quad (5.1)$$

V případě splnění podmínky, uvedené ve vzorci 5.1, považujeme bod za pohybující se. Tímto způsobem klasifikujeme všechny významné body (resp. jejich optické toky) detekované v obraze. Dalším krokem je vyjádření procentuálního poměru pohybujících se bodů ku všem nalezeným významným bodům. V případě, že je tento poměr větší než stanovených $m\%$, můžeme určit, že je obraz v pohybu.



(a) Originální snímek stabilního obrazu



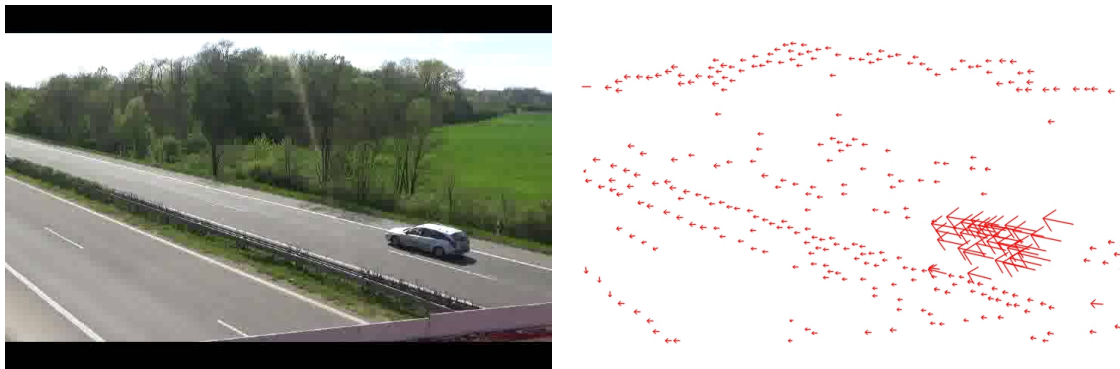
(b) Vektorové pole stabilního obrazu.

Obrázek 5.2: Na obrázku vlevo můžeme vidět originální stabilní snímek s projíždějícími vozidly. Na obrázku vpravo je znázorněno vektorové pole optických toků, a to, jakým způsobem narušuje projíždějící vozidlo stabilitu vektorového pole³.

Na sadách obrázků 5.3 a 5.2 jsou graficky znázorněna vektorová pole optických toků pomocí šipek (resp. teček u stabilních toků) a k nim odpovídající originální snímky. Zeleně jsou označeny stabilní toky a červeně pohyblivé. Na obrázku 5.2b můžeme vidět, jakým způsobem narušují pohyblivé objekty, v tomto případě projíždějící automobil, stabilitu obrazu. Díky stanovení hranice $m\%$ je však i přesto snímek stále považován za stabilní. Obrázek 5.3b zobrazuje stav vektorového pole při pohybu kamery. Kamera se hýbe směrem vpravo,

²Pohyblivý je v tomto případě myšleno nejen klasický pohyb kamery, ale i změna přiblížení kamery (*zoom-in, zoom-out*)

³Vlastní zpracování.



(a) Originální snímek obrazu při pohybu vpravo (b) Optický tok obrazu pohybujícího se vpravo

Obrázek 5.3: Ilustrace vektorového pole při pohybu (rotaci) kamery vpravo. Snímek vlevo ukazuje originální obrázek a snímek vpravo pak jeho vektorové pole optických toků⁴.

a díky tomu má většina optických toků orientaci vlevo. I na tomto obrázku je vidět, jakým způsobem se ve vektorovém poli projevuje projíždějící automobil.

5.1.2 Změna rotace a náklonu

Víme tedy, jakým způsobem lze rozlišit, jestli je kamera v pohybu či nikoliv. Zbývá rozlišení, zda se jedná o pohyb kamery jako takový nebo o změnu jejího přiblížení. K tomu využijeme analýzy chování vektorového pole, které vykazuje jiné chování při pohybu kamery (náklon a rotace) a při změně přiblížení kamery (přiblížení a oddálení). V této podkapitole se budu zabývat náklonem a rotací kamery a v následující pak přiblížením a oddálením. Vstupem obou těchto částí jsou stejná pole pohybujících se bodů získaných způsobem popsaným v předchozí podkapitole.

Detekce změny rotace a náklonu probíhá na základě výpočtu orientace jednotlivých optických toků a hledání dominantního směru pohybu (orientace). Orientace každého optického toku může spadat do celého rozsahu 360° . Princip nalezení dominantní orientace spočívá v tom, že je celý rozsah (360°) rozdělen na osm různých skupin po 45° .

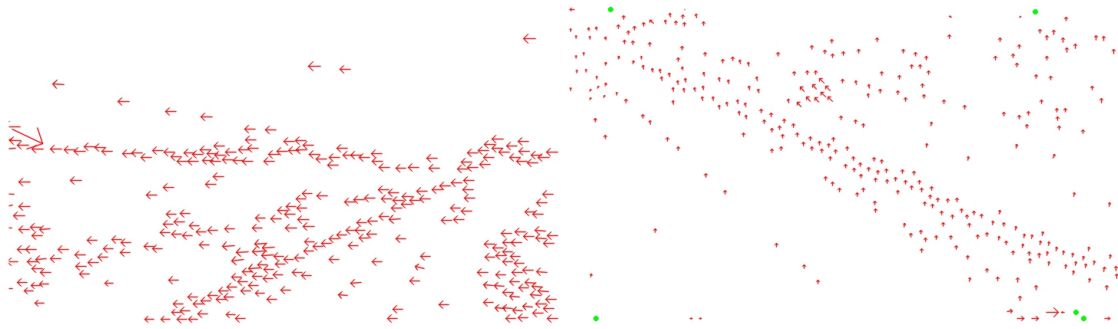
Pro každý bod na vstupu vypočteme orientaci jeho optického toku následujícím způsobem. Mějme bod $A(x_i, y_i)^t$ v čase t a k němu korespondující bod $A(x_i, y_i)^{t+1}$ v čase $t+1$. Výpočet orientace optického toku bodu A mezi snímky v čase t a $t+1$ probíhá podle vzorce 5.2.

$$\tan^{-1} \left(\frac{y_i^{t+1} - y_i^t}{x_i^{t+1} - x_i^t} \right) \quad (5.2)$$

Vzorec 5.2 se postupně aplikuje na každý bod ze vstupního pole pohybujících se bodů. Z výsledné hodnoty se určí, do které z osmi skupin optický tok spadá a je zaznamenán do příslušného pole v histogramu, ve kterém následně hledáme dominantní orientaci. Ta se v histogramu nachází v případě, že se v některé z osmi skupin nachází více než $p\%$ z celkové počtu záznamů v celém histogramu. V některých případech dochází k tomu, že se při pohybu kamery dominantní pohyb nachází někde na přelomu dvou skupin. Mějme následující příklad.

⁴Vlastní zpracování.

Rozsah směru orientace je rozdělen tak, že jedna ze skupin obsahuje hodnoty v rozsahu $(0^\circ - 45^\circ]$ a další ze skupin hodnoty v rozsahu $(45^\circ - 0^\circ]$. Skutečný pohyb kamery je ve směru 0° . Při výpočtu orientací podle vzorce 5.2 bude docházet k tomu, že se většina hodnot bude pohybovat kolem 0° , ale vzhledem k určitým nepřesnostem při detekci bodů a při výpočtu optických toků budou některé hodnoty mírně větší než 0° a jiné mírně menší než 0° . Většinová orientace tak bude rozdělena právě mezi dvě zmiňované skupiny orientací. Při výpočtu by pak nebyl nalezen žádný dominantní směr a pohyb by v tomto případě nebyl klasifikován. Z toho důvodu je při hledání dominantního směru zavedeno pravidlo, které se v případě, že na první pokus není nalezena dominantní orientace, pokusí vyhledat dva sousední bloky, které dohromady obsahují více než $p\%$ ze všech záznamů. Pokud v tomto případě vyhledávání uspěje, jsou obě sousedící skupiny označeny jako dominantní směr.



(a) Vektorové pole při rotaci.

(b) Vektorové pole při náklonu.

Obrázek 5.4: Obrázky porovnávají chování vektorového pole při rotaci (vlevo) a náklonu (vpravo) kamery⁵.

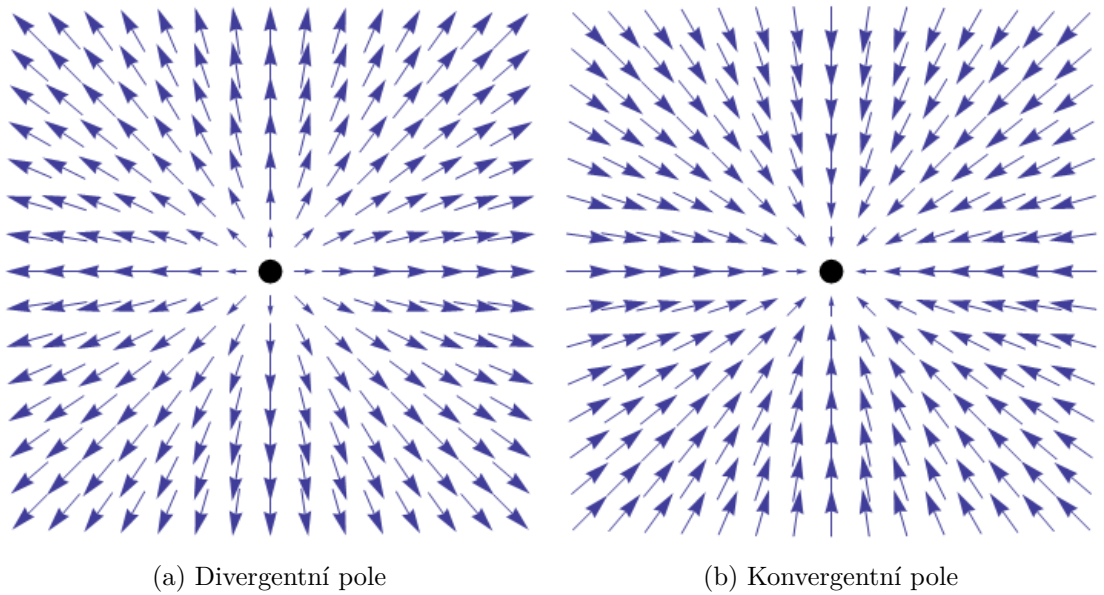
Příklady zachycené přímo z kamery monitorující dopravu jsou znázorněny na sadě obrázků 5.4. Na obrázcích můžeme pozorovat rozdíl v chování vektorového pole optických toků při pohybu kamery směrem dolů (obrázek 5.4b) a při pohybu vpravo (obrázek 5.4a).

5.1.3 Změna přiblížení

Zatímco při detekci rotace nebo náklonu kamery jsem počítal s tím, že většina optických toků měla stejný směr pohybu, u změny přiblížení kamery s tímto chováním počítat nemohu. V tomto případě dochází k tomu, že vektorové pole má charakter divergentního nebo konvergentního pole podle toho, zda se jedná o přiblížení či oddálení kamery. V případě přiblížení kamery mluvíme o divergentním pohybu vektorového pole, tedy významná část optických toků má orientaci směrem od středu snímku. Naopak v případě oddálení kamery mluvíme o konvergentním pohybu, tedy pohybu směrem ke středu snímku. Příklady ideálního divergentního (obr. 5.5a) a konvergentního (obr. 5.5b) pole jsou pro lepší představu zobrazeny na sadě obrázků 5.5, kde černá tečka představuje střed snímku.

K účelu rozlišení konvergentního resp. divergentního pohybu je nejdříve nutné definovat střed snímku. Označme si nejprve šířku a výšku snímku jako w a h . Dále nechť bod $C(x_c, y_c)$ definuje bod ve středu snímku následovně:

⁵Vlastní zpracování.



Obrázek 5.5: Ukázka ideálního divergentního a konvergentního vektorového pole⁶.

$$C = \left(\frac{w}{2}, \frac{h}{2} \right) \quad (5.3)$$

S využitím Euklidovské vzdálenosti a bodu definovaného z rovnice 5.3 můžeme určit, zda se bod pohybuje směrem ke středu či od středu. Necht' $A(x_i, y_i)^t$ a $A(x_i, y_i)^{t+1}$ jsou vzájemně korespondující body v časech t a $t + 1$. Pro každou dvojici korespondujících bodů vypočteme nejprve euklidovskou vzdálenost od středu C v čase t a následně vzdálenost od středu C v čase $t + 1$. Výsledné vzdálenosti porovnáme a určíme, zda se bod přiblížil ke středu nebo od něj oddálil. Celý výpočet je definován vzorcem 5.4.

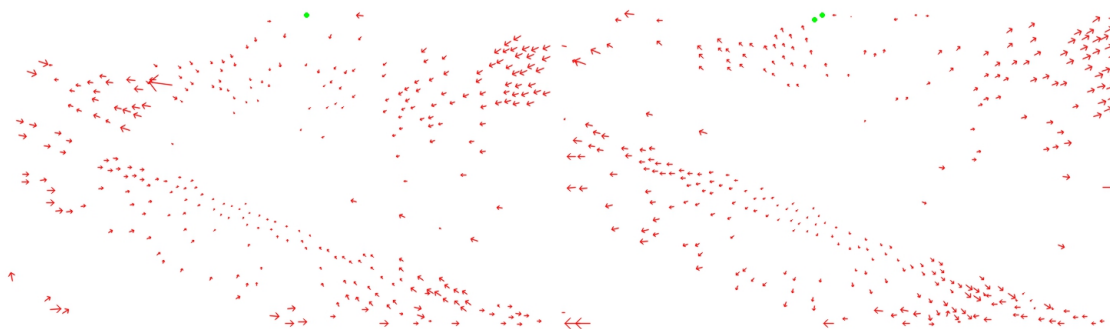
$$\sqrt{(x_i^{t+1} - x_c)^2 + (y_i^{t+1} - y_c)^2} < \sqrt{(x_i^t - x_c)^2 + (y_i^t - y_c)^2} \quad (5.4)$$

kde x_i^t a y_i^t jsou souřadnice bodu A_i v čase t a x_i^{t+1} a y_i^{t+1} souřadnice bodu A_i v čase $t + 1$. V případě, že je podmínka v rovnici 5.4 splněna, znamená to, že se bod přiblížil ke středu a bod A_i můžeme označit jako konvergentní, někdy také jako negativně divergentní. V opačném případě je vzdálenost bodu A_i od středu v čase $t + 1$ větší a mluvíme zde o divergentním směru optického pole, někdy též nazývané jako pozitivně divergentní. Vzhledem k tomu, že při výpočtu optických toků dochází k situacím, že některé toky vykazují různé neočekávané chování (ať už z důvodu projíždějícího vozidla nebo vzniku chyb při samotném výpočtu), je nutné stanovit hranici $z\%$, která určí, jestli došlo ke změně přiblížení kamery (přiblížení nebo oddálení). V případě, že více než $z\%$ z celkového počtu optických toků vykazuje divergentní resp. konvergentní směr pohybu, považujeme obraz za přibližující se resp. oddalující se.

Obrázek 5.6 znázorňuje konkrétní případ z kamery monitorující dopravu zobrazující stav vektorového pole při přibližování (obr. 5.6b) a oddalování (obr. 5.6a). Můžeme zde

⁶Obrázky převzaty z <https://sites.google.com/site/butwhymath/calculus/divergence>.

vidět rozdíl mezi divergentním a konvergentním polem, a to, že některé body, především na okrajích snímků, vykazují z důvodu chyb při rozpoznávání optického toku odlišný směr než většina ostatních. Na obrázku 5.6a můžeme mimoto zahlédnout (vlevo nahoře) malou skupinu optických toků, které vykazují opačný směr než většina ostatních. Tento jev je způsoben projíždějícím vozidlem.



(a) Vektorové pole optických toků při oddalování obrazu (b) Vektorové pole optických toků při přibližování obrazu

Obrázek 5.6: Přehled rozdílu divergentního a konvergentního vektorového pole při oddalování kamery (snímek vlevo) a přibližování kamery (snímek vpravo)⁷.

5.2 Detektor silnice

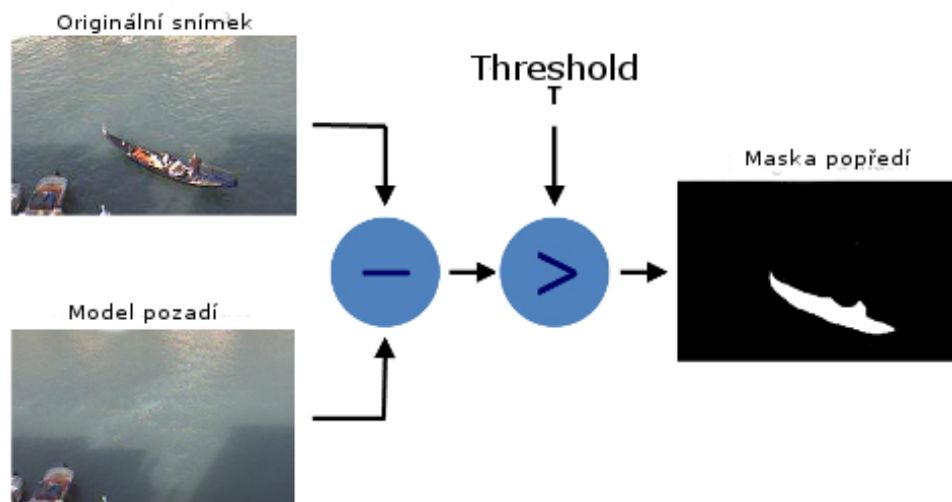
Jak již bylo řečeno, sledování pohybu objektů v obraze je založeno na sledování intenzity bodu. Aby k tomu mohlo dojít, musí nést určitou významnou informaci a musí být určitým způsobem rozlišitelný oproti svému okolí. S využitím funkce *goodFeaturesToTrack* jsou těmito body rohy nacházející se v obraze. Tomu se nabízí sledování bodů nacházejících se na silnici. Můžeme totiž předpokládat, že se na ní nachází přerušované pruhy, na kterých se právě rohy nacházejí a jsou oproti svému okolí (tmavé silnici) velmi dobře rozpoznatelné. Z tohoto důvodu je v systému implementován modul, který dokáže detekovat tvar a pozici silnice na základě projíždějících automobilů.

5.2.1 Odečítání pozadí

Základem celého detektoru silnice je odečítání pozadí. Přestože je odčítání pozadí základem detektoru, není jeho podrobnější znalost příliš důležitá, a proto se jejímu principu budu věnovat pouze stručně. Metody odečítání pozadí jsou v oblasti počítačového vidění široce používány především k určení masky rozlišující statické pozadí a pohyblivou scénu, což je přesně případ, na kterém je založen celý princip hledání silnice.

Obecným principem odečítání pozadí je nalezení masky popředí provedením odečtení aktuálního snímku od masky jeho pozadí, která obsahuje pouze statické části snímku. Jednoduchý model odečítání pozadí (resp. nalezení masky popředí) je uveden na obrázku 5.7. V projektu je použita metoda segmentace pozadí založená na směsi normálních rozdílů (angl. *GaussianMixture*), která je poskytnuta knihovnou *OpenCV* pod funkcí s názvem *BackgroundSubtractorMOG2*.

⁷Vlastní zpracování.



Obrázek 5.7: Zjednodušený princip odečítání pozadí⁸.

5.2.2 Určování silnice

S využitím masky popředí získané pomocí odečítání pozadí jsme schopni poměrně jednoduše získat přibližnou pozici silnice. Jelikož v programu není nutné, aby byla silnice detekována s vysokou přesností, je její detekce stavěna pouze na informaci získané odečítáním pozadí pomocí funkce zmiňované v předchozí podkapitole.

Předpokládejme tedy, že se na snímaném obraze nachází silnice, na které projíždějí různá vozidla. Pro každý zpracovávaný snímek nejprve pomocí odečítání pozadí vytvoříme masku popředí. Za předpokladu, že se někde v obraze nachází projíždějící vozidla, se tato vozidla promítnou i v masce popředí. V masce se tedy budou nacházet bílé obrysy vozidel. Můžeme navíc předpokládat, že většině případů budou mít tyto obrysy přibližně čtvercový nebo spíše obdélníkový tvar. Z důvodu jednoduššího a časově méně náročného výpočtu, a navíc z důvodu lepšího pokrytí silnice, vytvoříme v následujícím kroku kolem získaných obrysů vozidel obdélníkové boxy ohraničující jednotlivé tvary nacházející se v obraze. Takto upravená maska popředí je znázorněna na obrázku 5.8b. Pro lepší přehlednost jsou původní barvy invertované, a díky tomu jsou černě znázorněny pohybující se objekty získané maskou popředí. Modře jsou pak znázorněny vytvořené obdélníky ohraničující detekovaná vozidla.

Nyní nechť w a h jsou výška a šířka snímku. Vytvoříme matici o rozměrech $h \times w$ zaznamenávající projíždějící vozidla, inicializovanou nulami na všech pozicích. V upravené masce popředí se nachází n vykreslených obdélníků, které postupně procházíme. Každý z nalezených obdélníků musí splnit tu vlastnost, že je jeho obsah větší, než stanovené minimum a zároveň menší, než stanovené maximum. Je to z toho důvodu, že v případě, kdy se při odečítání pozadí vytvoří ve výsledné masce určité šumové body, můžeme předpokládat, že jejich rozměry budou mnohem menší, než rozměr projíždějících automobilů a díky stanovení spodní hranice dojde k filtraci těchto šumových objektů. Horní mez obsahu obdélníku je určena z důvodu, že pokud by například silnicí projížděl nákladní automobil a přiblížil se směrem ke kameře, docházelo by k situacím, kdy tento kamion v masce popředí vytvoří velký obrys, který by pokrýval mnohem více, než jen hranici silnice. Vzhledem k tomu, že na silnici projíždí mnoho jiných běžných vozidel, můžeme zaznamenávání takto vzniklých

⁸Obrázek převzat z http://docs.opencv.org/3.1.0/d1/dc5/tutorial_background_subtraction.html.



(a) Maska popření s vytvořenými boxy kolem vozidel.



(b) Originální snímek.

Obrázek 5.8: Hledání vozidel při určování tvaru vozovky. Obrázek vlevo ukazuje výsledek získaný pomocí odečítání pozadí aplikovaného na snímek vpravo⁹.

velkých objektů vypustit.

Mějme tedy sadu obdélníků, které splňují podmínky na rozměr a $h \times w$ matici čítačů M . Nechť je každý obdélník definován pomocí čtveřice bodů $A(x_A, y_A)$, $B(x_B, y_B)$, $C(x_C, y_C)$, $D(x_D, y_D)$. Nyní podle vzorce 5.5 pro každý bod $X(x, y)$ nacházející se uvnitř obdélníku $ABCD$ inkrementujeme v matici M hodnotu čítače na pozici (x, y) o jedna.

$$M_{xy} = M_{xy} + 1 \quad (5.5)$$

$$\forall X(x, y) : X = \{[x, y] \in \mathbb{Z}^2 : x > x_A \wedge x < x_B, y > y_C \wedge y < y_D\}$$

Při průjezdu vozidla předpokládáme, že se vozidlo pohybuje na silnici. Zachytíme tedy postupně pohyb vozidel a ukládáme do matice M pozice, na kterých se vozidlo nacházelo. Tyto pozice postupně tvarují obrys silnice. Výsledný tvar silnice je určen pomocí hodnot čítačů matice M . Nejprve je vytvořen černý obrázek o rozměrech $h \times w$, do kterého jsou pak postupně vykreslovány bílé tečky na místech, kde čítač matice M překročil určitou minimální hranici. Ta je stanovena z důvodu možného vzniku některých šumových hodnot v matici M . Výsledný tvar silnice je znázorněn například na obrázku 5.9b.

5.2.3 Uchování silnice při pohybu kamery

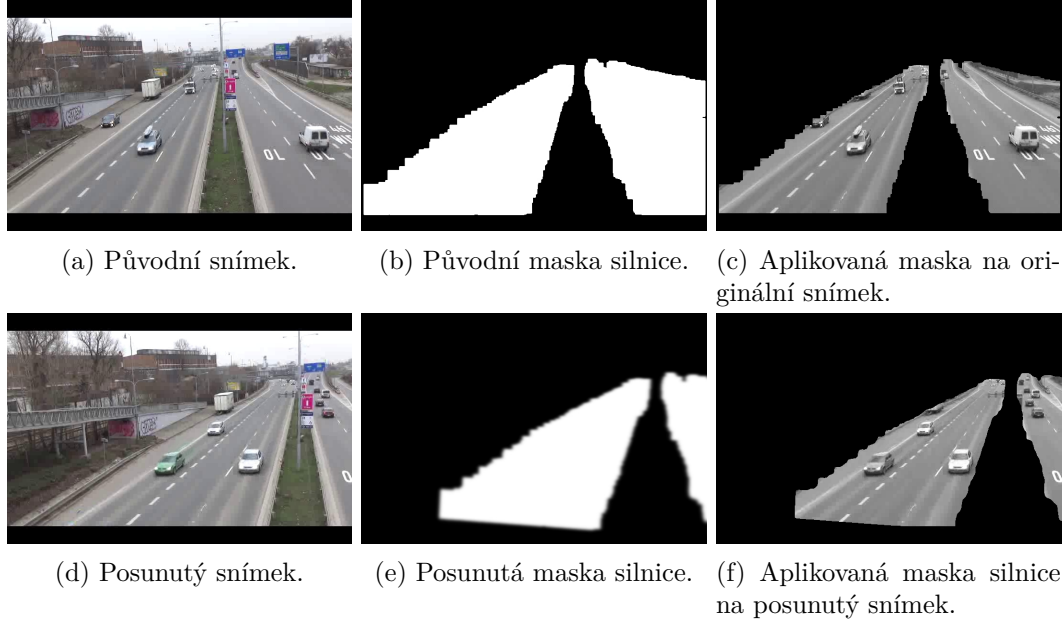
V případě, že již máme masku silnice nalezenou, nastává další problém a to při pohybu kamery. Je logické, že pokud se změní pozice kamery jakýmkoliv způsobem, změní se i tvar a pozice silnice v obraze. Vzhledem k vlastnostem středové projekce je těžké předpokládat, jakým způsobem se pozice silnice změnila. Můžeme však využít matici homografie, jejíž definice bylo popsána v kapitole 4.3.

Podobně jako na sadě obrázků 4.3, kde pomocí sady známých vzájemně korespondujících bodů můžeme vypočítat matici homografie a pomocí ní určit novou pozici původního obrázku, můžeme stejného principu využít při transformaci masky silnice.

Při pohybu kamery dokážeme identifikovat $2n$ vzájemně korespondujících bodů, ze kterých vytvoříme matici homografie, a tu poté aplikujeme na původní masku silnice. Tímto způsobem vznikne nová, posunutá maska po pohybu kamery korespondující s aktuálním stavem na snímané scéně.

⁹Vlastní zpracování.

Na sadě obrázků 5.9 je znázorněn posuv masky silnice. První trojice obrázků (obrázky 5.9a, 5.9b a 5.9c) znázorňuje stav silnice před pohybem a původní masku. Obrázek 5.9c ukazuje aplikaci masky na originální snímek, především pro lepší přehlednost při určování přesnosti nové masky. Spodní trojice obrázků (obrázky 5.9d, 5.9e a 5.9f) zobrazují novou pozici silnice ve snímané scéně a novou masku po pohybu kamery. Na obrázku 5.9f můžeme vidět aplikaci masky silnice na originální snímek. Je vidět, že je poměrně přesně určen nový tvar silnice.



Obrázek 5.9: Určování nové masky při pohybu vozidel. Vrchní trojice zobrazuje původní stav silnice a masky. Spodní trojice pak stav po pohybu kamery¹⁰.

5.3 Uchovávání úběžníků

Úkolem této práce bylo vytvoření algoritmu, který je schopen udržet kameru ve zkalibrovaném stavu při, a především ihned po, jejím pohybu s využitím již detekovaných úběžníků. Algoritmus tedy předpokládá známý první a druhý úběžník z předem stanoveného algoritmu. Při pohybu se jejich pozice mění a je potřeba najít způsob výpočtu nových souřadnic těchto bodů. Prvotním plánem, jak uchovat pozici úběžníku při pohybu kamery, bylo vytváření trojúhelníků kolem sledovaného bodu. Od tohoto principu jsem později upustil a vytvořil algoritmus založený pouze na dvou přímkách protínajících se v blízkosti úběžníku. I přes tento fakt budu dále v práci pro přehlednost tento postup nazývat jako metodu na základě vytváření trojúhelníků (resp. úběžníkových trojúhelníků) a zmiňované dvě různoběžné přímky budu nazývat trojúhelníky.

Před samotným vytvářením trojúhelníků předpokládáme, že je kamera v pohybu a nikoliv ve stabilním stavu. To je zajištěno detektorem pohybu, který je popsán v kapitole 5.1. V případě, že je kamera stabilní, není nutné žádné trojúhelníky vytvářet, jelikož se pozice úběžníků nemění. Vstupem pro vytváření trojúhelníků je sada korespondujících dvojic významných bodů. Tu jsme získali již dříve, a to jako výstup samotného detektoru pohybu,

¹⁰Vlastní zpracování.

a díky tomu není nutné tyto body v obraze znovu detekovat. Modifikací výstupu detektoru pohybu můžeme získat nejen sadu významných bodů, ale i například pouze pohybující se dvojice bodů nebo dokonce ty dvojice bodů, které se pohybují ve směru dominantního pohybu, a tedy i předpokládaného pohybu kamery.

Postup vytváření úběžníkových trojúhelníků, nalezení potřebných bodů a způsob uchování a zpětného nalezení pozice úběžníku při pohybu kamery je popsán v následujících podkapitolách.

5.3.1 Vytváření úběžníkových trojúhelníků

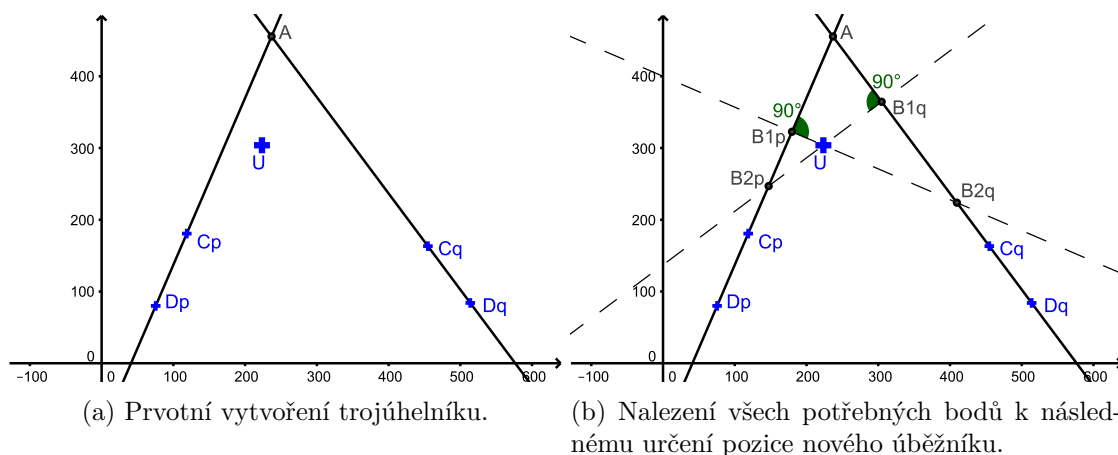
Prvním krokem pro vytvoření úběžníkových trojúhelníků je vytvoření jednoduchých přímek. Mějme sadu n navzájem různých bodů na vstupu. Pro každou dvojici z n bodů vytvoříme přímku a běžným způsobem spočteme směrnicový tvar této přímky. Tímto způsobem se vytvoří $\frac{n * (n - 1)}{2}$ různých přímek, což při vyšším počtu bodů vytváří zbytečně velké množství objektů. Důležitým krokem je tedy filtrovat pouze některé, pro nás zajímavé přímky.

Pro každou přímku vypočteme její vzdálenost od úběžníku, která je kritériem pro určení, zda je přímka vyhovující. Vzhledem k tomu, že cílem vytváření trojúhelníku je najít sadu trojúhelníků, které jsou co nejbližší k úběžníku, můžeme říct, že s mnohem větší pravděpodobností budou vybrány právě ty přímky, které mají menší vzdálenost od sledovaného úběžníku než ty s větší vzdáleností. Vybere tedy pouze n_p přímek, jejichž kolmý průmět s úběžníkem má nejmenší vzdálenost. Většinou jsem tímto způsobem filtroval asi 200 – 400 nejbližších přímek.

Stejným způsobem jako se ze dvojic bodů vytvářely přímky, jsou nyní kombinací všech dvojic přímek vytvářeny úběžníkové trojúhelníky. Tímto způsobem vznikne opět $\frac{(n_p * (n_p - 1))}{2}$ trojúhelníků. Vzhledem k tomu, že n_p je většinou v rozmezí 200 – 400, bývá takto vytvořeno 19900 – 79800 trojúhelníků, což je obrovské množství objektů, jejichž zpracování by ve výsledku trvalo příliš dlouho. Obdobným způsobem, jako byly filtrovány nejbližší přímky, jsou nyní filtrovány i nejbližší trojúhelníky. Kritériem je však vzdálenost průsečíku přímek, ze kterých se trojúhelníky skládají, a sledovaného úběžníku. Počet vybraných trojúhelníků byl otázkou testování a ukázalo se, že ideální počet je kolem 200 trojúhelníků. Toto množství je poměrně rychle zpracované a při vyšší hodnotě nebyly nalezeny nijak lepší výsledky.

Tímto máme vytvořenou sadu trojúhelníků, jejichž průsečíky jsou poměrně blízko sledovanému úběžníku. Často je tento úběžník mezi těmito přímkami přímo svíraný (viz obrázek 5.10a). Pomocí takto vytvořeného trojúhelníku však stále nejsme schopni uchovat pozici bodu při pohybu. Vzhledem k tomu, že při středové projekci se jedná o projektivní promítání, musíme využívat vlastností, které jsou projektivně invariantní. Mezi ty patří již zmiňovaný dvojpoměr, který je definován pomocí čtyř kolineárních bodů. V této fázi však známe pouze tři kolineární body, a je tím pádem nutné nalezení minimálně ještě jednoho bodu na obou přímkách.

Obrázek 5.10 naznačuje postup při vytváření trojúhelníků. Předchozí text popisuje vytváření trojúhelníků do stavu zobrazeného na obrázku 5.10a. Na obrázku 5.10b je pak znázorněn výsledný stav vytvořeného trojúhelníku po nalezení všech potřebných bodů. Postup nalezení těchto bodů je popsán v následujících podkapitolách.



Obrázek 5.10: Naznačení způsobu vytváření úběžníkových trojúhelníků. Nejprve je vytvořen běžný trojúhelník (situace vlevo), na kterém jsou pak nalezeny další body umožňující výpočet dvojpoměru (situace vpravo)¹¹.

5.3.2 Výpočet dvojpoměru z úběžníkových trojúhelníků

Nyní se vytvořené trojúhelníky nachází ve stavu, který je zobrazen na obrázku 5.10a, kdy pro každý trojúhelník známe přímky p a q , které jsou navzájem různoběžné, a na nich ležící body C a D respektive C_p, D_p, C_q, D_q . Dále známe průsečík A přímek p a q a pozici úběžníku U . K tomu, abychom mohli definovat pozici tohoto úběžníku i po pohybu, je nutné znát další dva body ležící na obou přímkách. Nazvěme je $B_p^1, B_p^2, B_q^1, B_q^2$. Průsečík přímek vytvořených z bodů B_p^1, B_q^1 a B_p^2, B_q^2 je námi hledaný bod U .

Nyní k samotnému způsobu hledání pozic bodů B^1 a B^2 . Nejprve nalezneme bod B^1 . Mějme přímku p a sledovaný úběžník U . Z přímky vyneseme kolmici procházející bodem U . V místě paty kolmice, tedy v místě průsečíku přímky p a vytvořené kolmice, se nachází bod B_p^1 . Obdobným způsobem vyneseme kolmici z přímky q a získáme bod B_q^1 ležící na přímce q .

Mohli bychom říct, že úběžník U je už nyní definovaný místem, kde se protínají kolmice na přímky p a q , ale vzhledem k tomu, že se v projektivní geometrii úhly nezachovávají, nebyli bychom nyní schopni po pohybu tento bod najít, protože vytvoření kolmic by nebylo možné vzhledem k tomu, že tato operace není projektivně invariantní. Z tohoto důvodu upevníme pozici průsečíku vnesením dalších dvou bodů, a to B_p^2 a B_q^2 . Jak můžeme vidět na obrázku 5.10b, vnesené kolmice protínají protější přímky a právě v těchto místech nalezneme poslední dvojici hledaných bodů. Bod B_p^2 se tedy nachází v místě, kde kolmice vnesená z přímky q protíná přímku p a naopak bod B_q^2 se nachází v místě, kde kolmice vnesená z přímky p protíná přímku q .

Nyní máme na každé přímce sadu pěti kolineárních bodů. Jejich pozici definujeme pomocí dvojpoměru a vypočteme pro každou přímku zvlášť dva různé dvojpoměry, konkrétně (AB^1CD) a (AB^2CD) , pomocí kterých poté dokážeme zpětně vypočítat souřadnice bodů B^1 a B^2 . Takto definovaný trojúhelník (viz obrázek 5.10b), včetně čtveřice dvojpoměrů, je invariantní vůči projekci a můžeme jej využít a znovu zkonstruovat po pohybu kamery.

¹¹Vlastní zpracování.

5.3.3 Nalezení úběžníku z trojúhelníku

Nyní jsme ve stavu, kdy máme kompletně definovaný úběžníkový trojúhelník, který definuje pozici úběžníku a známe potřebné dvojpoměry. Zbývá otázka, jak s použitím definovaného trojúhelníku vypočítat pozici nového úběžníku, který vznikne (posune se) po změně pozice kamery.

Nechť C_p^t, Dp^t, C_q^t, Dq^t jsou body nacházející se na snímku v čase t a tvořící přímky p^t a q^t . Pomocí postupů uvedených v předchozí podkapitole jsme schopni z takto definovaných bodů získat body B_p^1, B_p^2, B_q^1 a B_q^2 udávající pozici úběžníku U^t a bod A^t reprezentující průsečík přímek p^t a q^t .

Předpokládejme nyní, že došlo k pohybu kamery a definujeme novou sadu bodů $C_p^{t+1}, Dp^{t+1}, C_q^{t+1}, Dq^{t+1}$ v čase $t+1$ odpovídající původním bodům nalezeným na snímku v čase t . Z těchto bodů vytvoříme přímky p^{t+1} a q^{t+1} odpovídající posunutým přímkám vzhledem k posuvu kamery. Tyto přímky tvoří nový, posunutý bod A^{t+1} v místě jejich protnutí. Úkolem je nyní nalézt nové souřadnice bodů B_p^1, B_p^2, B_q^1 a B_q^2 , pomocí kterých získáme nové souřadnice bodu U^{t+1} . K tomu využijeme znalost dvojpoměrů (AB^1CD) a (AB^2CD) vypočítaných z původních trojúhelníků.

Předpokládejme, že jsme schopni vypočítat souřadnice jednoho bodu z dvojpoměru v případě, že známe hodnotu dvojpoměru a souřadnice zbývajících tří bodů. Postup tohoto výpočtu je popsán v podkapitole 5.3.4. Již víme, že v případě posunutí trojúhelníku jsme schopni nalézt nové souřadnice bodů C, D a A . Známe tedy hodnoty souřadnic tří požadovaných bodů a k nim známou hodnotu dvojpoměru, pomocí kterých jsme schopni vypočítat souřadnice bodů B^1 a B^2 z dvojpoměrů (AB^1CD) a (AB^2CD) . Předpokládejme tedy, že známe nové souřadnice bodů $B_p^{1^{t+1}}, B_p^{2^{t+1}}, B_q^{1^{t+1}}$ a $B_q^{2^{t+1}}$ v čase $t+1$. Dalším krokem je vytvoření přímek mezi dvojicemi bodů $B_p^{1^{t+1}}, B_q^{1^{t+1}}$ a $B_p^{2^{t+1}}, B_q^{2^{t+1}}$. Nalezením průsečíku těchto dvou různoběžných přímek dostáváme novou pozici úběžníku U v čase $t+1$.

5.3.4 Výpočet bodu ze známého dvojpoměru

Z definice dvojpoměru víme, že se při promítání nemění, a díky tomu můžeme říct, že $\mu_D^t = \mu_D^{t+1}$. Dále z definice dvojpoměru víme, že ke každé hodnotě μ_D a trojici známých bodů A, B, C existuje právě jeden bod D takový, že platí $\mu_d = (A, B, C, D)$. Leží před námi tedy problém nalezení pozice neznámého bodu ze známé hodnoty dvojpoměru a známých pozic tří bodů ležících na stejné přímce jako hledaný bod.

Nechť A, C, D jsou body, jejichž souřadnice známe, a μ je známá hodnota dvojpoměru. Cílem je získat pozici neznámého bodu B . Standardní vzorec pro výpočet dvojpoměru si můžeme upravit prohozením pořadí bodů C a D následovně:

$$(A, B, C, D) = \mu \equiv (ACBD) = 1 - \mu \quad (5.6)$$

Vzorec 5.6 můžeme rozepsat do tvaru

$$1 - \mu = \frac{(ACB)}{(ACD)} \quad (5.7)$$

Vzhledem k tomu, že známe nejen hodnotu μ , ale i souřadnice bodů A, C, D , můžeme říct, že hodnota (ACD) je známá a můžeme ji považovat za konstantu. Díky tomu můžeme upravit vzorec 5.6 do následující podoby

$$(1 - \mu) * (ACD) = (ACB) \quad (5.8)$$

Zbývá tedy otázka, jak vypočítat hodnotu (ACB) . Vzhledem k tomu, že souřadnice bodů A i C známe a výslednou hodnotu dělicího poměru (ACB) také, nastává podobná situace jako v případě výpočtu neznámého bodu z dvojpoměru. Tedy výpočet neznámého bodu ze známého dělicího poměru. V případě dělicího poměru platí stejné pravidlo jako u dvojpoměru a to, že ke každému číslu λ_C a dvou známým bodům A, B existuje právě jeden bod C takový, že $\lambda_C = (ACB)$. Postup výpočtu tohoto bodu je popsán v podkapitole 5.3.5.

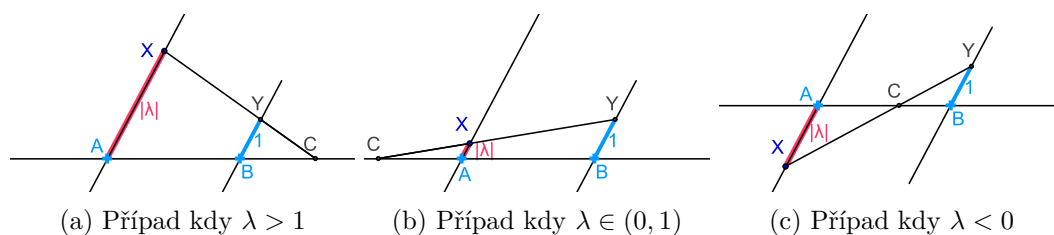
5.3.5 Výpočet bodu z dělicího poměru

V této podkapitole bude podrobně rozeptán způsob výpočtu souřadnice neznámého bodu C ležícího na přímce definované body A, B tak, aby platilo $(ACB) = \lambda$ pro $\lambda \neq 1$. Prvním krokem je vykreslení základní přímky ab procházející známými body A a B . Dalším krokem je vytvoření dvou navzájem různých, avšak rovnoběžných, přímek p a q , kde přímka p prochází bodem A a k ní rovnoběžná přímka q prochází bodem B .

Následujícím krokem je sestrojení bodů X a Y ležících na přímkách p a q . V případě, že se hledaný bod C nachází mezi body A, B , je hodnota dělicího poměru λ záporná. V tomto případě bod X vynášíme do opačné poloroviny vzhledem k přímce ab než bod Y . V případě, že se hledaný bod C nachází vně úsečky AB , dochází k vynesení bodu X do stejné poloroviny jako Y . Body Y se vždy nachází na přímce q přesně ve vzdálenosti 1 od bodu B , zatímco bod X leží na přímce p ve vzdálenosti $|\lambda|$ od bodu A .

Nyní z nově sestrojených bodů X a Y vytvoříme přímku xy , která protíná původní přímku ab v místě, kde se nachází námi hledaný bod C . Z podobnosti vytvořených trojúhelníků ACX a BCY vyplývá následující vztah

$$\frac{|AC|}{|BC|} = \frac{|AX|}{|BY|} = |\lambda| \quad (5.9)$$



Obrázek 5.11: Ilustrace způsobu výpočtu neznámého bodu C ze známé dvojice bodů A a B a známé hodnoty dělicího poměru. Na obrázcích jsou zobrazeny všechny tři situace, které při hledání pozice bodu mohou nastat¹².

Při hledání pozice bodu C tímto způsobem mohou nastat tři různé situace, které záleží na hodnotě λ , a to pro $\lambda > 1$, $\lambda \in (0, 1)$ a $\lambda < 0$. Pro lepší pochopení jsou tyto tři základní případy zobrazeny na sadě obrázků 5.11. Na prvním obrázku 5.11a je zobrazen případ, kdy je dělicí poměr $\lambda > 1$. Bod C se pak nachází napravo od bodů A, B . V případě, že by došlo k situaci kdy hodnota λ dosahuje hodnoty v intervalu $(0, 1)$, by se bod C nacházel vlevo (viz. 5.11b. Posledním možností je situace, kdy λ nabývá záporné hodnoty. V tomto případě

¹²Vlastní zpracování.

se bod X vynese na opačnou polovinu než bod Y a bod C se tak nachází v prostoru mezi body A, B . Tato situace je zobrazena na obrázku 5.11c.

Tímto způsobem můžeme poměrně jednoduše a efektivně získat souřadnice neznámého bodu z dělicího poměru, a díky tomu v případě použití dvojpoměru tak, jak je uvedeného v podkapitole 5.3.4, i souřadnice neznámého bodu ze známého dvojpoměru a tří ostatních bodů.

5.4 Využití homografie

Definice matice homografie a způsob, jakým je získána, byly popsány v kapitole 4.3. Víme, že k vytvoření potřebné matice je zapotřebí znát n dvojic vzájemně korespondujících bodů. Sadu těchto bodů máme již k dispozici, a to jako výstup detektoru pohybu, který byl popsán v kapitole 5.1. Zbývá tedy vypočítat z těchto bodů matici H . K tomu je v systému využita funkce poskytnuta z knihovny *OpenCV* `findHomography`, která ze vstupních parametrů `srcPoints` (pole původních bodů) a `dstPoints` (pole posunutých bodů) přímo vypočte a vrátí matici homografie H . Ta je pak opět využívána jako vstup pro další knihovní funkce *OpenCV*. Pro matici homografie se v systému nabízí dvě základní možnosti využití.

První možností využití je transformace celého snímku pomocí matice H na nový, posunutý. Tento postup se využívá při uchovávání silnice, resp. při výpočtu nového tvaru masky silnice, zmíněného v podkapitole 5.2.3. Aplikací matice homografie na původní snímek získáme nový tvar masky silnice. Pro aplikaci matice na celý snímek je použita funkce `warpPerspective`, která na vstupu přijme matici homografie H , původní snímek určený k transformaci, a vrací přímo nový transformovaný snímek. Výsledek použití této funkce je vidět například na sadě obrázků 5.9.

Druhým způsobem využití matice H je její použití přímo na pole bodů, které chceme pomocí homografie transformovat a získat nové souřadnice těchto bodů. Víme, že díky sadě detekovatelných významných bodů jsme schopni vytvořit matici homografie H a využít ji k transformaci. Necht U^t je bod nacházející se mimo snímáný obraz, jehož souřadnice v čase t známe. Při pohybu kamery vzniká bod U^{t+1} , jehož souřadnice neznáme. Aplikací matice H vypočítané z pole známých bodů nalezených v časech t a $t+1$ jsme však schopni novou souřadnici bodu U^{t+1} vypočítat. K tomuto účelu je v knihovně *OpenCV* implementována funkce s názvem `perspectiveTransform`, která na vstupu přijme pole bodů, které jsou následně transformovány aplikací matice H . Ta je vstupním parametrem této funkce. V případě transformace jednoho bodu se na vstupu nachází pole obsahující právě jeden prvek. Výstupem je pak pole obsahující body transformované maticí H .

Pomocí této funkce se pokusím detekovat souřadnice úběžníku po celou dobu pohybu kamery. Výsledné hodnoty pak porovnam s výsledky, kterých dosáhne metoda sledování úběžníků pomocí trojúhelníků.

Kapitola 6

Popis implementace

Celý program je implementován ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2015 za použití knihovny OpenCV psané v jazyce C/C++. Vzhledem k tomuto faktu je i celý program implementován v jazyce C++.

6.1 OpenCV

OpenCV je otevřená multiplatformní knihovna pro manipulaci s obrazem. Jedná se o knihovnu zaměřenou především na zpracování obrazu, a to v reálném čase. Knihovna je volně šiřitelná a je široce používána právě v odvětví počítačového vidění. V programu je použita nejnovější verze této knihovny a to OpenCV verze 3.1.0. Vzhledem k tomu, že některé funkce této verze nejsou zpětně kompatibilní se staršími verzemi knihovny, je nutné použít právě tuto verzi.

6.2 Vlastní implementace

Celý program je implementovaný objektově v jazyce C++. Program je složen z několika základních tříd se specifickou funkcí. Jedná se o následující třídy:

- ***VanishingPointLine***: Základní třída definující přímku pomocí dvou bodů. Třída implementuje základní metody pro práci s přímkami, které jsou nutné pro vytváření úběžníkových trojúhelníků jako například nalezení průsečíku dvou přímek, vytvoření kolmice z přímky procházející zadaným bodem, výpočet vzdálenost přímky a bodu atd.
- ***VanishingPointTriangle***: Třída definující úběžníkový trojúhelník složený ze dvou přímek definovaných pomocí *VanishingPointLine*. Uchovává jak pozici původního, tak i pozici posunutého trojúhelníku.
- ***VanishingPointCircle***: Definuje kružnici, která slouží především pro nalezení bodu na přímce ve vzdálenost od zadaného bodu.
- ***BGSubtractor***: Odečítání pozadí s využitím funkce *BackgroundSubtractorMOG2* poskytnuté knihovnou *OpenCV*.
- ***RoadDetector***: Třída implementující detektor silnice popsany v kapitole 5.2. K odečítání pozadí využívá již definovanou třídu *BGSubtractor*.

- ***MotionDetector***: Implementovaný detektor pohybu popsáný v kapitole 5.1. Třída implementuje jednu veřejnou metodu, které jsou zadány dvě sady vzájemně korepondujících bodů. Na jejím výstupu je pak pole bodů pohybujících se v dominantním směru a typ pohybu kamery (pokud je kamera stabilní vrací prázdný seznam a hodnotu značící stabilitu kamery).
- ***PointSaver***: Třída implementující nalezení nové pozice úběžníku. Třída zprostředkuje vytvoření přímek, trojúhelníků, nalezení potřebných bodů, posunutí trojúhelníků a nalezení nové pozice úběžníku.
- ***CrossRatio***: Třída zprostředkující výpočet dvojpoměru ze zadaných bodu a výpočet souřadnic neznámého bodu ze zadaného dvojpoměru a tří známých bodů.

Kapitola 7

Vyhodnocení

Vyhodnocování výsledků probíhalo v několika krocích. Nejprve jsem v kapitole 7.1 provedl stručné vyhodnocení detektoru pohybu a stanovil meze, při kterých je kamera považována za pohyblivou. V kapitole 7.2 jsem pak provedl vyhodnocení použití detekce silnice a uvedl především důvody, proč jsem se nakonec rozhodl tento způsob filtrování významných bodů v projektu nevyužít. Následující dvě podkapitoly (podkapitoly 7.3 a 7.4) se pak zabývají samotným vyhodnocováním výsledků získaných sledováním pozice úběžníků pomocí dvou různě implementovaných metod, a to nejprve v kapitole 7.3 pomocí matice homografie a následně pak v kapitole 7.4 pomocí vytváření úběžníkových trojúhelníků.

V obou případech bylo testování prováděno na různých videích z různých míst a při různých pohybech kamery. Videi označena jako $V1 - V5$, $V11$ a $V13$ zaznamenávají rotaci kamery. Videi $V6$, $V7$, $V8$ a $V14$ zachycují situaci při náklonu kamery. Videi $V9 - V11$ pak situace při změně přiblížení kamery. Záznamy jsou pořízeny ze čtyř různých míst. Veškeré vyhodnocování nacházející se v této kapitole probíhalo právě na sadě těchto videí. Scény, které jsou snímány před a po pohybu kamery v jednotlivých videích jsou zobrazeny v příloze B.

Každé video nejprve obsahuje několikaminutovou část, kdy je kamera stabilní a je možné vypočítat souřadnice úběžníků s použitím metody zmiňované v kapitole 3. Po určitém čase nastane pohyb kamery. Po stabilizaci kamery po pohybu následuje opět několikaminutová sekvence určená k výpočtu nových souřadnic úběžníků, opět pomocí metody z kapitoly 3. Tyto úběžníky jsou považovány za správné řešení a většina testů a vyhodnocování chybivosti se pak vztahuje k úběžníkům získaným tímto způsobem. Je tedy porovnáván úběžník získaný ze stabilizovaného obrazu po pohybu kamery se souřadnicemi úběžníku ihned po stabilizaci kamery získaných sledováním pozice úběžníku během pohybu.

7.1 Spolehlivost detektoru pohybu

Prvním krokem při vyhodnocování spolehlivosti detektoru pohybu je nalezení optimální hodnoty ϵ , která udává minimální velikost posuvu optického toku, který bude považován za pohyblivý. Tato hodnota byla experimentálním testováním stanovena na 0,7. Při této hodnotě můžeme i při pomalejších pohybech kamery s jistotou říct, že se nejedná o šum, ale o pohyb kamery.

Dalším krokem je stanovení hodnoty $m\%$, která určuje procentuální hranici, při které je kamera považována za pohyblivou. Tato hodnota byla nakonec ustanovena na 89 %. Při tomto nastavení jsem nenarazil na žádný případ, kdy by byl pohyb kamery vyhodnocen

špatně. Detekce samotného pohybu kamery tedy funguje velmi efektivně. Nyní se budu zabývat vyhodnocením rozpoznání konkrétního pohybu.

Pro rozpoznání typu pohybu kamery bylo nutné stanovit hodnoty parametrů p a z . Tyto hodnoty byly stejné jako v předchozím případě nastaveny po sadě experimentálních testů. Hodnoty obou těchto parametrů jsem zvolil na 70 %, což se ukázalo jako nepřijatelnější řešení. Při tomto nastavení parametrů dochází k minimu situací, kdy je pohyb rozpoznán špatně. Jediná situace, kdy občas docházelo k špatnému rozpoznání pohybu, bylo za stavu, kdy byla kamera přiblížená a snímala převážně jen silnici. V případě, že pak došlo k oddálení/přiblížení kamery v okamžik, kdy byla většina plochy silnice zaplněna projíždějícími vozidly, docházelo k značné deformaci vektorového pole a nebylo z něj možné určit, že se jedná o pohyb. Vektorové pole v tomto případě vykazuje spíše chování při rotaci nebo náklonu kamery. Tato situace je zobrazena na sadě obrázků 7.1. Na obrázku 7.1a je zachycen originální snímek a na obrázku 7.1b pak znázorněno vektorové pole v tomto okamžiku. Z obrázku je zřejmé, že tvar vektorového pole není možné považovat za divergentní ani konvergentní. Vektorové pole vykazuje spíše dominantní směr orientace vektorů směrem nahoru, což je vidět i z obrázku 7.1c, kde je zobrazen histogram orientací optických toků ve vektorovém poli zobrazeném na obrázku 7.1b. V histogramu je zřetelně vidět dominantní orientace a pohyb je pak klasifikován jako náklon.

Tato chyba se však vyskytuje poměrně ojediněle a nepřišel jsem na způsob jejího odstranění. Vzhledem k tomu, že se v tomto případě v obraze nenachází příliš objektů nesoucí významnou informaci, kromě bodů vyskytujících se právě na vozidlech, není pravděpodobně ani možné této situaci předejít. Tato situace má za následek problémy při sledování úběžníků, kvůli tomu, že je nalezena množina bodů ležících na vozidlech a pohybujících se tak ve směru jízdy vozidel, místo bodů směřujících ke středu obrazu.

7.2 Využití masky silnice

Původní myšlenkou při implementaci detektoru silnice a získání masky silnice bylo to, že budou pomocí ní detekovány kvalitnější významné body ležící na silnici, a to především různé pruhy, které se na ní nachází. To se ve výsledku ukázalo jako nereálné a nepoužitelné řešení z několika různých důvodů a od myšlenky použití masky silnice pro detekci bodů jsem nakonec ustoupil. Implementovaný detektor jsem však využil při vyhodnocování výsledků získaných při sledování bodů pomocí matice homografie.

První problém nastává v počtu bodů získaných s využitím masky silnice. Na silnici se celkově nenachází tolik významných bodů jako v celém obraze a z těch, které se na ní nachází, jsem většinou nebyl schopen vytvořit takové trojúhelníky, které by měly průsečíky dostatečně blízko ke sledovanému, především druhému, úběžníku. Navíc kdyby bylo video pořízeno za vysokého provozu, mohla by nastat situace, že by všechny pruhy a ostatní významné body ležící na silnici byly zakryty projíždějícími vozidly.

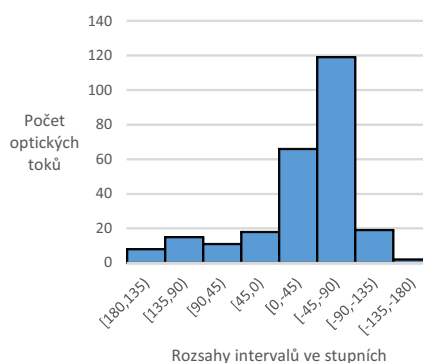
Dalším problémem, který nastává, je samotný pohyb kamery. Při pohybu kamery jsem sice implementoval algoritmus, který je schopen efektivně transformovat vypočtenou masku silnice v souladu s pohybem kamery, ale v případě, že se kamera pohne tak, že je snímána zcela nebo alespoň z většiny nová část silnice, dojde ke změně masky tak, že maska pokrývá jen malou část silnice nebo ji nepokryje vůbec. Díky využití homografie jsem totiž schopen udržovat jen tvar té části silnice, která je předem detekována. Tato situace je znázorněna na obrázku 7.2, kde je zobrazena situace po náklonu kamery směrem dolů. Při pohybu dolů je zaznamenávána nová část silnice, která ve výsledné masce není zobrazena (maska je zobrazena na obrázku 7.2a). Dále je vidět, že transformace původního tvaru silnice funguje



(a) Originální snímek silnice.



(b) Zobrazení vektorového pole optických toků.



(c) Histogram zachycující orientace optických toků. Můžeme pozorovat zřetelnou dominantní orientaci.

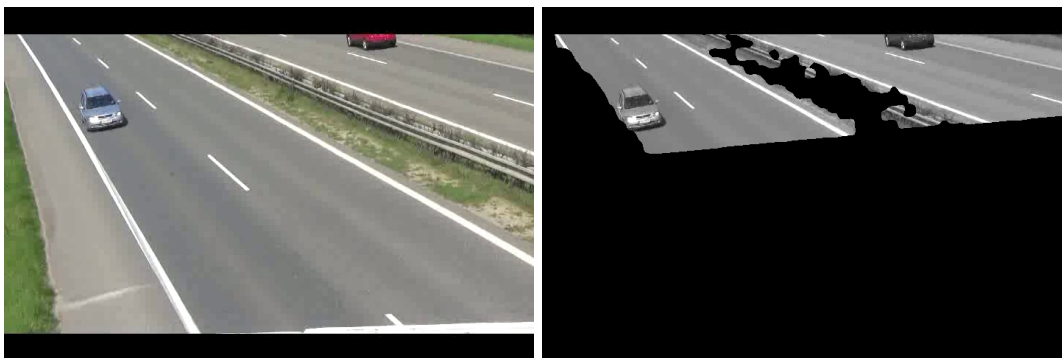
Obrázek 7.1: Příklad selhání detektoru pohybu. V tomto případě se jednalo o oddalování kamery. Optické toky však vykazují chování typické pro náklon kamery vlivem projíždějících vozidel¹.

dobře a je poměrně přesně zachován tvar původní silnice. Obrázek 7.2a ukazuje originální snímek silnice po pohybu. Je vidět, že více než polovina silnice v této situaci není pokryta maskou.

Dalším problémem je například i to, že pro ustanovení tvaru silnice je nutné, aby před tím, než dojde k pohybu, projelo silnicí několik aut v každém pruhu tak, aby definovaly její tvar. Pokud by však došlo v krátkém intervalu k více než jednomu pohybu kamery, kdy po silnici neprojde dostatečné množství vozidel, není zaručeno, že byl nalezen správný tvar masky silnice.

Především z těchto důvodů jsem se rozhodl pro hledání významných bodů detektor silnice nevyužívat. Masku silnice jsem však využil při vyhodnocování a testování metody pro sledování úběžníků s využitím homografie. Nová pozice úběžníků je v této metodě totiž vypočtena pomocí stejné matice homografie jako při transformaci masky silnice. Díky tomu jsem schopen porovnat to, jak dobře je silnice transformovaná, a tedy určit, zda je matice

¹Vlastní zpracování.



(a) Snímek silnice po pohybu.

(b) Stav masky po pohybu.

Obrázek 7.2: Situace kdy je po pohybu kamery směrem dolů pokryta maskou pouze původní část silnice. Novou část silnice není maskou možné pokrýt².

definovaná dobře a porovnat s výsledkem při hledání nové pozice bodů. Pokud budou nové souřadnice úběžníku nalezeny špatně, ale tvar silnice bude zachován dobře, není výsledná chyba vzniklá chybou při vytváření matice homografie.

7.3 Sledování pomocí homografie

Pro sledování úběžníku jsem implementoval dvě různé metody. První z nich je založena na výpočtu nového bodu pomocí matice homografie. Vyhodnocení výsledků získaných tímto způsobem se budu věnovat v této kapitole.

Při výpočtu matice homografie má velký vliv na výsledek především vstupní sada detekovaných významných bodů, protože samotná matice homografie vzniká právě využitím dvojic vzájemně korespondujících bodů. Kvalita vstupní sady bodů je dána pomocí tří parametrů, a to počet bodů, minimální vzdálenost mezi jednotlivými body a samotná kvalita detekovaného bodu. Jedná se v podstatě o parametry zadávané funkci *goodFeaturesToTrack*. Tyto parametry pak ovlivňují výstup této funkce, a tedy i získanou vstupní sadu bodů pro výpočet matice homografie. Při vytváření této matice se obecně doporučuje mít sadu bodů co nejvíce rovnoměrně rozložených v obraze.

Vyhodnocování tohoto přístupu bude rozděleno do dvou částí. V první části bude vyhodnocen právě vliv parametrů zadávaných funkci *goodFeaturesToTrack*, a tedy i vliv detekovaných bodů na výsledek. Budou porovnány jednotlivé výstupy při různě nastavených parametrech a vyhodnoceno nejlepší nastavení. V další části pak bude vyhodnocena přesnost získaných úběžníků po pohybu kamery v porovnání s úběžníky získanými metodou pro detekci úběžníků ve stabilním obraze po stabilizaci pohybu kamery.

7.3.1 Porovnání vlivu významných bodů

První tabulka (tabulka 7.1) ukazuje, jak výsledek detekce ovlivňuje počet vyhledávaných bodů. V této tabulce je vidět, že při vyšším počtu detekovaných významných bodů dochází k zmenšování chyby především u druhého úběžníku. Hodnota prvního úběžníku je poměrně stabilní a chyba se v podstatě nemění. Při hodnotách kolem 700-1100 bodů je však vliv na výsledek minimální. Je to z toho důvodu, že detektor od určitého počtu bodů není

²Vlastní zpracování.

schopen vyhledávat dostatečné množství požadovaných bodů v zadané kvalitě a vzdálenosti a detekováno je pak pouze tolik bodů, kolik jich splňuje požadované podmínky. Například při zadání 1100 bodů je často malá pravděpodobnost, že v obraze bude skutečně nalezeno 1100 bodů.

Podobné vyhodnocení jako v tabulce 7.1 je zobrazeno i v tabulce 7.2, kde je však zároveň porovnáván i vliv minimální vzdálenosti bodů. Z těchto dvou tabulek můžeme vidět, že ideální hodnota počtu bodů je kolem 700-900. Při nižších hodnotách jsou výsledky méně kvalitní. Při vyšších hodnotách není zaručené, že bude detekováno dostatečné množství bodů.

Počet	Kvalita	První úběžník	Chyba	Druhý úběžník	Chyba
300	0.01	(613.723, 120.993)	4.65	(-1855.18, 94.8242)	652.26
500	0.01	(613.346, 120.636)	4.22	(-2053.82, 96.5032)	457.621
700	0.01	(613.121, 119.647)	3.61	(-2178.36, 102)	333.144
900	0.01	(613.13, 119.704)	3.659	(-2176.12, 101.795)	335.38
1100	0.01	(612.997, 120.116)	4.085	(-2021.42, 98.994)	490.033

Tabulka 7.1: Vliv počtu bodů detekovaných v obraze na výsledek. Výsledné úběžníky by se co nejvíce měly blížit hodnotám (614.868, 116.484) a (-2511.44, 95.459). Chybovost se vztahuje právě k těmto bodům. Testováno na videu V1.

Tabulka 7.2 znázorňuje nejen vliv počtu bodů na výsledek, ale především má ilustrovat vliv minimální vzdálenosti hledaných bodů na výsledek. V tabulce je vidět, že při minimální vzdálenosti 5 je sice řešení mnohem blíže skutečnému řešení, ale na druhou stranu jsou výsledky velice nestabilní. Navíc při hodnotě 900 prvků je výsledek podobný výsledkům získaných při minimální vzdálenosti bodů 10. Obecně se ukázalo, že při minimální vzdálenosti 5 jsou výsledky často buď horší právě z důvodu nestability, nebo stejné (zobrazeno v tabulce 7.3) jako při nastavení této vzdálenosti na 10.

Počet	Vzdálenost	První úběžník	Chyba	Druhý úběžník	Chyba
500	5	(605.917, 43.9268)	12	(-1827.65, 43.9268)	195.637
700	5	(610.924, 44.61)	7.034	(-1955.08, 4.06927)	85.558
900	5	(610.367, 39.043)	8.98	(-2575.95, -46.6297)	562.534
500	10	(598.402, 40.9938)	19.74	(-2515.59, -33.294)	500.757
700	10	(612.412, 31.729)	13.34	(-2462.82, 20.155)	441.397
900	10	(612.436, 31.746)	13.324	(-2460.73, 20.1234)	439.316

Tabulka 7.2: Vliv počtu bodů a především minimální vzdálenosti bodů na výsledek. Stabilnější výsledek vykazují hodnoty se vzdáleností 10. Chybovost se vztahuje k úběžníkům o souřadnicích (617.93, 43.885) a (-2022.9, 56.23). Testováno na videu V6

V tabulce 7.3 je znázorněn vliv požadované kvality bodů na výsledek. Z tabulky je jasné zřejmé, že při menších nárocích na kvalitu vyhledávaných bodů³, jsou výsledky přesnější. Je to z toho důvodu, že při menších požadavcích na kvalitu je navraceno více bodů, které dokáží přesněji určit matici homografie. V tabulce je mimo jiné znázorněn i vliv vzdálenosti. Ten je však v tomto případě nulový.

³Menší hodnota znamená vyhledávání méně kvalitních bodů. Jedná se o procentuální vyjádření počtu bodů, které budou zahozeny. Například při kvalitě 0.01 bude zahozeno 1 % nejhorších bodů.

Počet	Kvalita	Vzdálenost	První úběžník	Chyba	Druhý úběžník	Chyba
900	0.05	5	(612.958, 120.766)	4.68	(-1963.5, 94.90)	547.94
900	0.05	10	(612.958, 120.766)	4.68	(-1963.5, 94.90)	547.94
900	0.01	5	(613.13, 119.704)	3.659	(-2176.12, 101.795)	335.38
900	0.01	10	(613.13, 119.704)	3.659	(-2176.12, 101.795)	335.38
900	0.008	5	(612.608, 119.89)	4.0876	(-2032.92, 100.994)	478.552

Tabulka 7.3: Vliv požadované kvality vyhledávaných bodů na výsledné hodnoty detekce úběžníků. Chybovost se vztahuje k hodnotám úběžníků o souřadnicích (614.868, 116.484) a (-2511.44, 95.459). Testováno na videu V1.

Z hodnot zobrazených v jednotlivých tabulkách je vidět, že nejlepší nastavení je při kvalitě 0.01. Při vyšší požadované kvalitě (např. 0.05) se může stát to, že je například vzhledem k nízké kvalitě videa nalezeno menší množství významných bodů a matice homografie je pak sestavena z méně bodů a je nepřesnější.

Minimální vzdálenost hraje roli především ve stabilitě a z důvodu stabilnějších výsledků jsem nakonec zvolil jako ideální vzdálenost 10. Při nižší hodnotě se může stát, že je výsledek přesnější, ale to je spíše vlivem náhody, a ve většině případů bylo nalezeno přesnější řešení při minimální vzdálenosti nastavené na 10.

Ideální počet vyhledaných bodů je někde v rozmezí 700-900. Z důvodu rychlejšího zpracování je pravděpodobně lepší hodnota 700. Rozdíly ve výsledných souřadnicích úběžníků při těchto hodnotách jsou často zanedbatelné a navíc vzhledem k celkové nepřesnosti a nestabilitě výsledků jsem jako ideální počet vyhledávaných bodů zvolil 700 vzhledem k menší časové náročnosti.

Vyhodnocení odchylky

V této části bude provedeno porovnávání výsledků vzhledem k úběžníkům detekovaných metodou pro kalibraci kamery ve stabilním stavu. Pro přehlednost jsou zvláště uvedeny hodnoty pro první a druhý úběžník. Při vyhodnocování byly brány v úvahu tři různá kritéria. Absolutní vzdálenost, tedy vzdálenost mezi úběžníkem detekovaným po pohybu kamery pomocí stabilní kalibrační metody a úběžníkem nalezeným pomocí homografie, a dále relativní vzdálenost. Ta je získána jako podíl absolutní vzdálenosti a vzdáleností stabilního úběžníku od středu obrazu. Tento způsob vyjádření chyby dokáže lépe reflektovat to, jak moc je vzdálenost úběžníků chybová. U vzdálenějších úběžníků je logické, že absolutní vzdálenosti mohou být větší oproti úběžníkům nalezeným přímo v obraze.

Poslední částí je testování ohniskové vzdálenosti vypočtené pomocí prvního a druhého úběžníku pomocí vzorce 3.2. Následně jsou pak porovnány ohniskové vzdálenosti úběžníků nalezených pomocí homografie a úběžníků detekovaných ve stabilizovaném obraze.

První dvě tabulky obsahují informace o prvních úběžnících. Tabulka 7.4 znázorňuje případy rotace a náklonu kamery. V první části tabulky (po oddělovači) jsou zobrazeny případy při rotaci a v druhé části pak případy při náklonu kamery. Tabulka obsahuje hodnoty úběžníků nalezených jak pomocí homografie, tak pomocí metody při stabilizovaném obraze. Z hodnot v tabulce 7.4 je vidět, že relativní chybovost prvních úběžníků při rotaci a náklonu je v poměrně přijatelných mezích.

Tabulka 7.5 ukazuje hodnoty naměřené při přibližování nebo oddalování kamery. V této tabulce můžeme vidět případ poměrně vysoké relativní chybovosti, a to v případě druhého řádku, kde chyba dosahuje hodnoty 34.82 %, což je oproti ostatním chybám poměrně vysoká

	Správný úběžník	Nalezený úběžník	Abs. chyba	Rel. chyba
V1	(614.868, 116.484)	(613.13, 119.704)	3.6591	1.3 %
V2	(-481.347, 117.075)	(-491.976, 103.81)	16.9981	2 %
V3	(-402.52, -1.29)	(-369.84, 0.92)	32.7546	4.09 %
V4	(-470.219, -12.1748)	(-400.515, 10.18)	73.201	8.43 %
V5	(308.438, 244.452)	(311.231, 243.115)	3.096	5.92 %
V6	(617.93, 43.885)	(612.436, 31.746)	13.324	4.11 %
V7	(-56.2907, -92.9854)	(-34.214, -64)	36.43534	6.83 %
V8	(-24.3952, 143.468)	(-16, 82.6)	61.44423	15.48 %

Tabulka 7.4: Vyhodnocení přesnosti při udržování pozice prvního úběžníku. V prvním sloupci je zobrazena hodnota úběžníků, která je považována za správnou. V druhém sloupci pak nalezená hodnota úběžníku. Relativní chybovost pak vzhledem k bodu o souřadnicích (360,240).

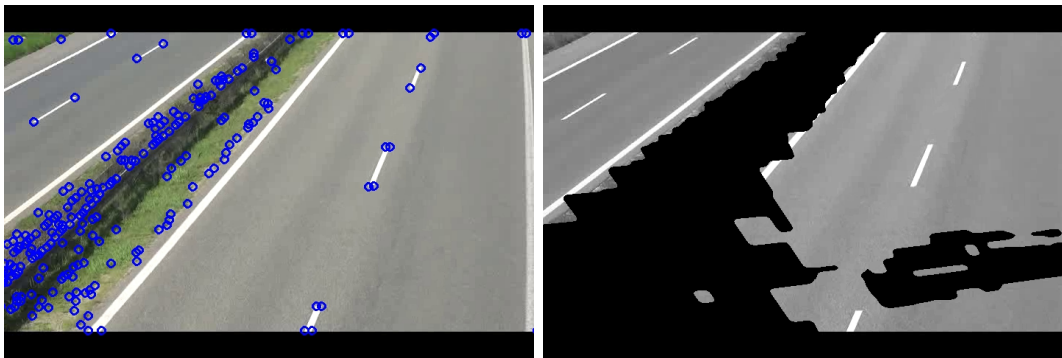
hodnota. Pokud bychom se podívali do tabulky 7.7, kde se vyskytují hodnoty naměřené pro druhé úběžníky u stejných videí jako v tabulce 7.5, můžeme vidět, že i chybovost druhého úběžníku je dost vysoká a dosahuje dokonce chyby 298.33 %. Tento jev je způsoben tím, že v případě tohoto záznamu se jednalo o poměrně velké přiblížení obrazu a díky tomu byla z větší části snímána pouze silnice (resp. její malá část). Na silnici jako takové je však poměrně problém zachytit významné body⁴ a matice homografie je pak složena z bodů pouze v určité části obrazu. V tomto případě je porušeno doporučení, že by při vytváření matice mělo být rozdělení bodů co nejvíce rovnoměrně rozloženo po celém obraze. Tato situace je znázorněna na obrázku 7.3a, kde můžeme vidět rozložení detekovaných významných bodů. V tomto případě matice homografie podstatně ztrácí přesnost a schopnost určovat souřadnice vzdálenějších bodů. Na druhou stranu je matice dost přesná na to, aby stále dokázala poměrně efektivně definovat nové pozice bodů přímo v obraze. Na obrázku 7.3b můžeme vidět, že i přes vysokou nepřesnost obou úběžníků je maska transformována stále dost přesně (skvrna se na silnici nacházela už před přiblížením) na to, aby udržela tvar silnice a potvrzuje, že je matice homografie vypočtena správně, pouze není schopna definovat souřadnice vzdálenějších bodů.

	Správný úběžník	Nalezený úběžník	Abs. chyba	Rel. chyba
V9	(836.349, -117.835)	(862.938, -95.91)	34.46274	5.78 %
V10	(807.94, -395.627)	(631.306, -190.355)	270.80651	34.82 %
V11	(581.752, 180.826)	(593.958, 179.867)	12.24362	5.34 %

Tabulka 7.5: Vyhodnocení získaných výsledků sledování prvního úběžníku při přibližování a oddalování kamery. Tabulka zobrazuje naměřené hodnoty a vyhodnocení chybovosti vzhledem k správným hodnotám nacházejících se v prvním sloupci.

Tabulky 7.6 a 7.7 zobrazují hodnoty druhých úběžníků detekovaných při stejných situacích jako v tabulkách 7.4 a 7.5. Podobně jako v předchozím případě tabulka 7.6 znázorňuje situace při rotaci a náklonu a tabulka 7.7 ukazuje hodnoty při přibližování nebo oddalování kamery. Při vyhodnocování druhých úběžníků můžeme pozorovat mnohonásobně větší relativní chybovost, než tomu bylo u prvních úběžníků.

⁴Pokud počítáme přiblíženou silnici je těžké na ní detekovat významné body. Z převážné části se na ní nachází pouze asfalt, který nevykazuje žádnou změnu intenzity a v některých případech pár bílých pruhů.



(a) Rozložení detekovaných bodů.

(b) Maska silnice po přiblížení.

Obrázek 7.3: Ukázka rozložení významných bodů při velkém přiblížení silnice (obr. 7.3a). V tomto případě dochází k méně přesnému výpočtu matice homografie, a z toho důvodu dochází k velmi nepřesné detekci úběžníků. Pro transformaci bodů v obraze je však kvalita dostačující (obr. 7.3b)⁵.

Dále je z těchto tabulek vidět vysoká nestabilita výsledků. Při změně přiblížení jsou chyby velmi vysoké, což je z důvodu, který jsem v textu již zmínil. Dalším problémem při přiblížení kamery jsou projíždějící vozidla. V případě, který byl zmíněn již dříve, a to v souvislosti s detektorem pohybu, kdy dochází k problémům při rozpoznání přibližování/oddalování kamery dochází i ke značným problémům při hledání nové pozice úběžníků (viz sada obrázku 7.1). Vzhledem k tomu, že dojde k detekci bodů na projíždějících vozidlech místo bodů nacházejících se v okolí (v tomto případě se v okolí v podstatě žádné body nenachází), dojde i ke špatnému výpočtu matice homografie takovým způsobem, že ve výsledku dojde i k úplné deformaci masky silnice a výsledky jsou pak nepoužitelné.

V tabulce 7.7 se nachází jedno pole vyplněné křížkem, je to z toho důvodu, že v tomto případě z neznámého důvodu detektor při hledání úběžníku ve stabilním obraze selhal a nebyl schopen najít stabilní souřadnice druhého úběžníku. První úběžník byl však detekován bez problémů a z toho důvodu jsem tento případ v tabulkách zachoval.

	Správný úběžník	Nalezený úběžník	Abs. chyba	Rel. chyba
V1	(-2511.44, 95.459)	(-2176.12, 101.795)	335.38	11.66 %
V2	(970.228, 123.684)	(1232.11, 92.2605)	263.761	42.48 %
V3	(1417.66, 44.029)	(2411.47, 90.9858)	994.919	92.5 %
V4	(1022.9, 30.3578)	(1585.11, 26.7792)	562.221	80.9 %
V5	×	(-3725.19, 302.114)	×	×
V6	(-2022.9, 56.23)	(-2460.73, 20.1234)	439.319	18.3 %
V7	(1726.97, -102.308)	(2421.37, -342)	734.604	52.143 %
V8	(2178.57, 163)	(1540.88, 308.158)	653.003	35.88 %

Tabulka 7.6: Vyhodnocení přesnosti při udržování pozice druhého úběžníku. V prvním sloupci je zobrazena hodnota úběžníků, která je považována za správnou. V druhém sloupci pak nalezená hodnota úběžníku. Relativní chybovost pak vzhledem k bodu o souřadnicích (360, 240).

⁵Vlastní zpracování.

	Správný úběžník	Nalezený úběžník	Abs. chyba	Rel. chyba
V9	(-1482.11, -31.71)	(-2195.36, -480.678)	842.792	45.24 %
V10	(-1509.35, -352.192)	(4069.17, -22.1867)	5588.27	298.33 %
V11	(-2792.99, 187.554)	(2821.02, 181.23)	4971.62	157.63 %

Tabulka 7.7: Vyhodnocení získaných výsledků sledování druhého úběžníku při přibližování a oddalování kamery. Tabulka zobrazuje naměřené hodnoty a vyhodnocení chybovosti vzhledem k správným hodnotám nacházejících se v prvním sloupci.

Poslední tabulka této části (tabulka 7.8) obsahuje hodnoty ohniskové vzdálenosti vypočtené pomocí obou dvou úběžníků získaných jak pomocí homografie, tak pomocí metody ze stabilizovaného obrazu. Je vidět, že i přes relativně malou chybovost prvních úběžníků je ohnisková vzdálenost poměrně dost ovlivňovaná vysokou chybovostí druhých úběžníků. Tabulka dále ukazuje to, že použití homografie pro uchování úběžníků je velmi nestabilní. Pro přehlednost a zachování pořadí byl v tabulce vyznačen (pomocí křížků) i případ, kdy detektor nebyl schopen najít stabilní řešení.

	Originální	Vypočtená	Relativní chyba
V1	844.122	789.982	6.42 %
V2	706.314	850.155	20.365 %
V3	871.28	1209.17	38.78 %
V4	705.103	939.533	33.248 %
V5	×	×	×
V6	759.821	815.331	7.306 %
V7	674.693	797.548	18.209 %
V8	832.013	674.608	18.92 %
V9	882.758	1020.56	15.611 %
V10	677.952	1057.12	55.929 %
V11	833.401	760.277	8.78 %

Tabulka 7.8: Výpočet ohniskové vzdáleností z úběžníků uvedených v předchozích tabulkách. První sloupec ukazuje správné hodnoty ohniskové vzdálenosti. Druhý pak hodnoty ohniskové vzdálenosti vypočtené pomocí úběžníků nalezených homografií. V posledním sloupci je pro lepší přehled vyznačena relativní chybovost.

7.3.2 Shrnutí přesnosti homografie

Z informací získaných během vyhodnocování spolehlivosti sledování úběžníků pomocí matice homografie je vidět, že výsledná ohnisková vzdálenost je poměrně dost ovlivňována špatnými výsledky při detekci druhého úběžníku. Je vidět, že v případě prvních úběžníků a celkově bodů, které se nachází v obraze nebo těsně mimo něj, je metoda poměrně stabilní a udává dobré výsledky. Výsledky při získávání druhých úběžníků jsou však podstatně horší a sledování druhých úběžníků pomocí homografie tímto způsobem není příliš použitelné.

Dalším velkým problémem je přibližování a oddalování kamery. V tomto případě je snímána často jen malá část vozovky a není pomocí ní možné vytvořit matici homografie tak, aby reflektovala chování vzdálenějších bodů. Dalším problémem při přiblížení kamery jsou projíždějící vozidla, která detekci znemožní úplně.

Celkově z naměřených výsledků vyplývá to, že pomocí relativně malého okna (šířka a výška obrazu videí byla 720×480) nejsme schopni vytvořit matici homografie tak, aby dokázala reflektovat změny souřadnic bodů ležících daleko za hranicí obrazu i přes to, že jsme pomocí ní schopni poměrně přesně určovat nové pozice bodů ležících přímo v obraze, což potvrzují i případy sledování masky silnice při pohybu kamery. Použití homografie tedy není příliš vhodné pro sledování úběžníků.

7.4 Sledování pomocí trojúhelníků

Na rozdíl od principu založeném na homografii u metody pomocí trojúhelníků nemá kvalita a množství detekovaných bodů tak významných vliv na výsledek. Při větším počtu sledovaných bodů by spíše mohlo docházet k tomu, že se body budou nahušťovat na jedno místo a při vyhledávání nejbližších trojúhelníků by docházelo ke zkreslování vzhledem k tomu, že většina trojúhelníků by byla vytvořena v podstatě z jednoho místa. Při nižším počtu bodů jejich nahušťování na jedno místo tolik nehrozí a trojúhelníky jsou pak vytvářeny z bodů více rozprostřených po celém obraze. Z toho důvodu jsem u metody založené na trojúhelnících zvolil parametry pro funkci *goodFeaturesToTrack* tak, že počet, kvalita a minimální vzdálenost zůstávají stejné jako u homografie, tedy 0.01 a 10. Počet detekovaných významných bodů jsem však stanovil pouze na 300.

Pro vyhodnocování jsem nejprve zvolil stejnou sadu videí jako v případě použití matice homografie. Díky tomu bude možné jednoduše porovnat výsledky mezi oběma metodami. Stejně jako v případě vyhodnocování výsledků matice homografie je u každého úběžníku vyhodnocována absolutní odchylka od pozice úběžníku detekovaného ve stabilním obraze a absolutní odchylka od středu snímku.

Oproti předchozí metodě bude však v této části navíc přidáno vyhodnocení na třech dalších videích a dále pak vyhodnocování pomocí bodů, přesně definovaných v obraze, pomocí významných bodů nacházejících se na objektech ležících v obraze před i po pohybu kamery.

7.4.1 Změna rotace a náklonu

V této části textu se budu zabývat výsledky získanými pomocí metody založené na trojúhelnících při změně náklonu a rotace kamery. Podobně jako v předchozí kapitole jsou z důvodu větší přehlednosti nejprve vyhodnoceny výsledky pro první a následně pak pro druhý úběžník.

Jako první jsou tedy v tabulce 7.9 zobrazeny výsledky získané při detekci prvního úběžníku. Z tabulky je zřejmé, že metoda v případě vyhledávání prvních úběžníků funguje velmi spolehlivě. Většina hodnot se pohybuje v rozmezí 1% – 5% relativní vzdálenosti. Navíc není zaručeno, že výsledky získané pomocí metody pro detekci úběžníků ve stabilním obraze jsou zcela přesné, a tak jsou některé odchylky v podstatě zanedbatelné.

Pokud bychom tyto výsledky porovnali s výsledky z tabulky 7.4, která zobrazuje výsledky pro stejné případy, ale získané využitím matice homografie, je vidět, že výsledky získané pomocí vytváření trojúhelníků jsou o něco přesnější a stabilnější. Mírně větší odchylku vykazuje pouze případ zobrazený na čtvrtém řádku, ale odchylka 9,99% je stále přijatelná.

Tabulka 7.10 znázorňuje výsledky získané pro druhé úběžníky. V případě použití homografie byly výsledky úběžníků velice nepřesné a nestabilní. U výsledků získaných využitím trojúhelníků můžeme ve výsledcích pozorovat značné zlepšení. Výsledky získané pomocí

	Správný úběžník	Nalezený úběžník	Abs. chyba	Rel. chyba
V1	(614.868, 116.484)	(614.134, 122.516)	6.076	2.14 %
V2	(-481.347, 117.075)	(-486.085, 111.15)	7.586	0.89 %
V3	(-402.52, -1.29)	(-381.62, -1.078)	20.9	2.61 %
V4	(-470.219, -12.1748)	(-392.15, 25.67)	86.7583	9.99 %
V5	(308.438, 244.452)	(308.735, 247.204)	2.768	5.3 %
V6	(617.93, 43.885)	(621.442, 41.85)	4.059	1.25 %
V7	(-56.2907, -92.9854)	(-51.19, -73.6681)	19.9794	3.74 %
V8	(-24.3952, 143.468)	(-17.008, 139.948)	8.18298	2.06 %

Tabulka 7.9: Vyhodnocení výsledků detekce prvních úběžníků získaných použitím úběžníkových trojúhelníků. Tabulka zobrazuje v prvním sloupci správnou hodnotu úběžníku. Ve druhém sloupci se nachází naměřená hodnota a v posledních dvou pak výsledná chybovost. Relativní chyba se vztahuje ke středu snímku o souřadnicích (360,240).

matice homografie byly překonány ve všech případech, ale i přes to jsou výsledky poměrně nestabilní a hodnoty kolem 20 % a výše jsou poměrně dost nepřesné.

V již zmiňovaném případě, kdy detektor nebyl schopen stanovit stabilní výsledek (5. případ při detekci druhého úběžníku), se detekované hodnoty pohybovaly kolem bodu o souřadnicích (11482.1, 164.405), což je oproti souřadnicím (-18491.3, 355.428), získaným pomocí trojúhelníků, obrovský rozdíl. Při sledování toho úběžníku pomocí homografie bylo dosaženo hodnoty (-3725.19, 302.114), což je stále značný rozdíl. Tuto chybu přičítám tomu, že během pohybu došlo k překlopení souřadnic druhého úběžníku, což mělo za následek změnu v x-ových souřadnicích druhého úběžníku ze záporných na kladné. S tímto problémem si ani jedna z implementovaných metod není schopna poradit a blíže se tomuto tématu budu v textu věnovat později.

	Správný úběžník	Nalezený úběžník	Abs. chyba	Rel. chyba
V1	(-2511.44, 95.459)	(-2494.45, 88.22)	18.4679	0.64 %
V2	(970.228, 123.684)	(1255.89, 78.954)	289.149	46.57 %
V3	(1417.66, 44.029)	(1719.13, 43.776)	301.47	28.03 %
V4	(1022.9, 30.3578)	(1010.23, 29.57)	12.6945	1.82 %
V5	×	(-18491.3, 355.428)	×	×
V6	(-2022.9, 56.23)	(-1963.2, 43.3784)	61.067	2.55 %
V7	(1726.97, -102.308)	(1620.74, -351.46)	270.853	19.22 %
V8	(2178.57, 163)	(2266.82, 226.348)	108.633	5.97 %

Tabulka 7.10: Vyhodnocení výsledků detekce druhých úběžníků získaných použitím úběžníkových trojúhelníků. Tabulka zobrazuje v prvním sloupci správnou hodnotu úběžníku. Ve druhém sloupci se nachází naměřená hodnota a v posledních dvou pak výsledná chybovost. Relativní chyba se vztahuje ke středu snímku o souřadnicích (360,240).

Vzhledem k tomu, že při změně přiblížení nastávají problémy, kterým se budu věnovat v samostatné části později, nebudou případy přibližování kamery v této části vyhodnoceny. Přejdu tedy rovnou k vyhodnocení ohniskové vzdálenosti.

Přehled výsledků ohniskových vzdáleností je zobrazen v tabulce 7.11. Oproti výsledkům získaným pomocí homografie je vidět zlepšení v chybovosti, ale je stále vidět, že hodnoty dost kolísají a jsou ovlivňovány opět především vysokou nestabilitou při sledování pozic

druhých úběžníků. Na rozdíl od případu použití homografie jsou i přes to výsledky mnohem přesnější.

	Originální	Vypočtená	Relativní chyba
V1	844.122	840.325	0.45 %
V2	706.314	858.561	21.55 %
V3	871.28	980.175	12.49 %
V4	705.103	666.112	5.53 %
V5	×	×	×
V6	759.821	753.112	0.89 %
V7	674.693	576.934	14.49 %
V8	832.013	847.483	1.859 %

Tabulka 7.11: Výpočet ohniskové vzdálenosti z úběžníků získaných pomocí úběžníkových trojúhelníků. První sloupec ukazuje správné hodnoty ohniskové vzdálenosti. Druhý pak hodnoty ohniskové vzdálenosti pomocí nalezených úběžníků. V posledním sloupci je pro lepší přehled vyznačena relativní chybovost.

7.4.2 Trojúhelníky a zoom

Při sledování pozice úběžníků při změně přiblížení kamery pomocí trojúhelníků nastává problém způsobený chováním bodů v obraze. Pro představu, implementovaná metoda funguje tak, že se vytvoří několik trojúhelníků, ty po posuvu obrazu definují nové kandidátní pozice úběžníků a z těch je pak pomocí mediánu vybrán výsledný úběžník. Chování bodů při rotaci a náklonu kamery je takové, že se většina bodů hýbe stejným směrem. Pokud jsou tedy vytvořeny úběžníkové trojúhelníky, které jsou následně posunuty (vlivem posuvu kamery), můžeme předpokládat, že vzhledem k tomu, že většina bodů v obraze se pohne stejně, tak i většina průsečíků přímk, ze kterých jsou trojúhelníky vytvořeny, se pohnou stejným směrem, a tedy i většina vypočtených kandidátních úběžníků se posune tímto směrem. A právě na tomto principu metoda selhává při přibližování a oddalování kamery.

V případě změny přiblížení se všechny body v obraze hýbou směrem od středu nebo ke středu snímku, ale jejich orientace jako taková je v podstatě náhodná. Pokud pak dojde k posuvu trojúhelníků, jsou nové kandidátní pozice úběžníků dány směrem pohybu bodů. Ty jsou však v podstatě náhodné, a tím pádem jsou pak náhodné i nové kandidátní pozice úběžníků. Pro přehled jsem zde vypsali několik kandidátních úběžníků detekovaných během přiblížení kamery.

-3637.906181921107, 121.4176800154653
-1008.304127643146, 99.74716202902965
-4904.627039723026, 144.7911745429592
-5758.646393228355, 153.7340211303749
-4988.06495159633, 154.5078643932566
-6647.990704688495, 159.3463930883518
-4979.898318386271, 142.5691085832077
-4996.683777445722, 142.7006688341498
-5868.629954184204, 149.6585648060391
-4745.165390917899, 140.635995449642
-10202.42500535402, 190.2392935685431

Je vidět, že hlavně jejich x-ové souřadnice jsou velmi rozdílné a není tedy v podstatě možné správně detekovat pozici úběžníků. To se zároveň stupňuje se vzdáleností bodů od středu.

Během implementace jsem zkoušel různé varianty, jako například vytváření trojúhelníků z přímek tak, že jedna přímka byla definována body z horní(nebo levé) části snímku a druhá přímka pak byla definována body ze spodní(nebo pravé) části snímku. Přímký by pak byly vytvářeny pouze z bodů pohybujících se téměř opačným směrem. Toto řešení bohužel také nevykazovalo funkční výsledky a po dalších různých pokusech jsem se nedostal k funkčnímu řešení.

Metoda založená na vytváření úběžníkových trojúhelníků je tedy nefunkční pro přibližování a oddalování kamery. Výsledky získané pomocí vytváření trojúhelníků ze stejných videí jako v případě použití homografie jsou znázorněny v tabulce 7.12.

	Správný úběžník	Nalezený úběžník	Abs. chyba	Rel. chyba
V9	(836.349, -117.835)	(776.746, -7.39339)	125.498	21.067 %
V10	(807.94, -395.627)	(708.191, -183.311)	234.58	30.16 %
V11	(581.752, 180.826)	(608.975, 170.621)	29.0729	12.68 %
V9	(-1482.11, -31.71)	(-5506.07, 13.4317)	4024.21	216.065 %
V10	(-1509.35, -352.192)	(-17418.6, 53.305)	15 941	812.7 %
V11	(-2792.99, 187.554)	(2017.8, 153.699)	4810.91	152.54 %

Tabulka 7.12: Tabulka zobrazující chybovost při sledování pozice úběžníků v případě, že se kamera přibližuje nebo oddaluje.

Z tabulky 7.12 je vidět, že chybovost oproti případům s náklonem a rotací kamery je vysoká. Hodnoty u druhých úběžníků jsou v podstatě nepoužitelné díky tomu, že na větší vzdálenost se chybovost projeví mnohem více. Problém však nastává i u prvních úběžníků, kde oproti velmi stabilním a přesným výsledkům při ostatních testech, řešení při změně přiblížení vykazuje poměrně vysokou chybovost.

7.4.3 Problém překlopení souřadnic

Vzhledem k výsledkům předchozích testů, které ukázaly, že je metoda založená na úběžnících v případě rotace a náklonu kamery efektivnější než použití homografie, zahrnul jsem do testování několik dalších případů, které ukázaly další problémy, které vznikají při detekci druhého úběžníku.

Tabulka 7.13 zahrnuje výsledky těchto testů jak pro první, tak i pro druhý úběžník zároveň. V první části tabulky se nachází výsledky při hledání pozice prvního úběžníku. Oproti předchozím výsledkům můžeme pozorovat mírně větší relativní chybovost, která je však způsobena tím, že úběžníky jsou velmi blízko středu. Absolutní odchylka ukazuje, že první dva výsledky jsou opět poměrně přesné. Případ detekce prvního úběžníku nacházející se ve třetím řádku tabulky vykazuje poměrně vysokou chybu prvního úběžníku, jejíž důvod se mi nepodařilo zjistit. Z testů v další části je pak vidět, že vyšší chyba vzniká i u jiných bodů v tomto videu.

Druhá část tabulky zobrazuje získané hodnoty při sledování druhých úběžníků. U prvních dvou případů můžeme pozorovat jev, kdy se znaménko x-ové souřadnice nově na-

lezeného úběžníku, detekovaného ve stabilizovaném obraze po pohybu kamery, překlopí. Nejedná se o chybu, ale o jev, kdy se po pohybu kamery změní úhel pohledu tak, že hrany na vozidlech začnou směřovat na druhou stranu silnice⁶. Tento jev však není možné zachytit pomocí homografie ani pomocí trojúhelníků. Po celou dobu pohybu tak probíhá sledování bodu na stejné straně silnice jako na počátku detekce, a tím velmi rychle roste chybovost druhého úběžníku.

V tabulce 7.13 na čtvrtém řádku je původní x-ová souřadnice úběžníku kladná a po pohybu se změní zápornou. Dále můžeme vidět, že implementovaná metoda však stále pokračuje v hledání pozice bodu nacházejícího se v kladné části souřadného systému. Opačný jev (změna ze záporného úběžníku na kladný) je pak znázorněn na pátém řádku tabulky. Opět můžeme vidět, že sledovaný úběžník pokračuje v záporných x-ových souřadnicích.

První dva případy (první, druhý, čtvrtý a pátý řádek tabulky) jsou zachyceny při rotaci kamery. Poslední záznam (třetí a šestý řádek) je zachycen při náklonu kamery snímající stejnou část silnice jako předchozí dva případy.

	Původní pozice	Pozice po pohybu	Nalezená pozice	Abs.	Rel.
V12	(-51.0663, 124.403)	(435.778, 157.131)	(436.63, 164.204)	7.124	6.34 %
V13	(581.004, 197.437)	(191.889, 222.149)	(183.863, 224.703)	8.4225	4.96 %
V14	(472.056, 7.50669)	(467.06, 142.043)	(456.887, 119.531)	24.7	17.02 %
V12	(2235.51, 210.476)	(-8286.9, 150.489)	(1605.99, 207.845)	×	×
V13	(-2783.38, 189.121)	(3547.64, 96.7408)	(x < - 40 000)	×	×
V14	(-5848.73, 74.161)	(-5854.11, 168.618)	(-4561.44, 229.201)	1294.09	20.82 %

Tabulka 7.13: Tabulka znázorňující souřadnice prvních a druhých úběžníků sledovaných pomocí úběžníkových trojúhelníků. Tabulka kombinuje hodnoty prvních (vrchní část) i druhých (spodní část) úběžníků. V tabulce můžeme pozorovat jev, kdy dochází k překlápění x-ové souřadnice druhého úběžníku. První sloupec tabulky zobrazuje původní souřadnice úběžníků. Druhý sloupec souřadnice úběžníků po pohybu kamer a třetí sloupec souřadnice detekované po pohybu kamery pomocí úběžníkových trojúhelníků.

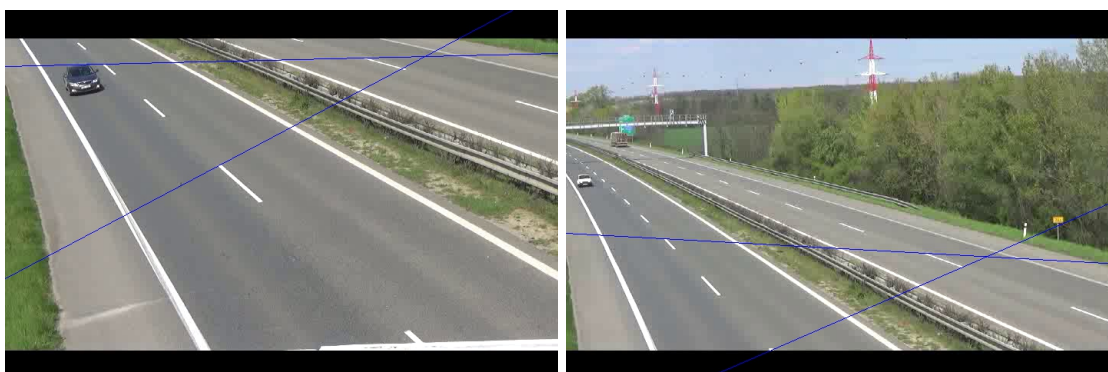
7.4.4 Vyhodnocení pomocí objektů v obraze

Dalším způsobem vyhodnocení výsledků je sledování konkrétních bodů definovaných pomocí objektů nacházejících se v obraze. Vzhledem k tomu, že při vyhodnocování výsledků vzhledem k úběžníkům získaných metodou pro stabilní kamery není zaručeno, že souřadnice získaných úběžníků jsou zcela správné, vytvořil jsem další sadu testů, kde jsem pomocí objektů nacházejících se v obraze vytvořil přímky a pomocí jejich průsečíků jsem tak získal souřadnice bodů, které jsou pevně stanoveny. Pokud se pak objekty nachází v obraze i po pohybu kamery, je možné stejným způsobem získat souřadnice stejného místa v posunutém obraze.

Způsob nalezení těchto bodů v obraze je znázorněn na dvojici obrázku 7.4. Nejprve jsou na snímcích nalezeny čtveřice vzájemně korespondujících významných bodů, které se na snímku nachází jak před pohybem, tak i po pohybu kamery. Z těchto bodů jsem pak vytvořil dvě dvojice přímek, kde první dvojice přímek byla vytvořena z bodů detekovaných před pohybem kamery a druhá dvojice z bodů po pohybu kamery. Průsečíky těchto přímek pak přesně definovaly souřadnice stejného na obou snímcích. Obrázek 7.4a znázorňuje

⁶Detekce druhého úběžníku probíhá právě pomocí hran nalezených na vozidlech.

definovanou dvojicí přímek před pohybem a obrázek 7.4b pak dvojicí přímek vytvořenou z bodů nacházejících se na stejných objektech po pohybu kamery. Z obrázků jde vidět, že průsečíky těchto přímek leží opravdu na stejných místech.



(a) Nalezení bodu před pohybem kamery.

(b) Nalezení bodu po pohybu kamery.

Obrázek 7.4: Způsob nalezení bodů v obraze pomocí objektů nacházejících se v něm. Obrázek vlevo ukazuje nalezení bodu před pohybem kamery. Obrázek vpravo pak stejné místo, nalezené pomocí stejných objektů, po pohybu kamery⁷.

Tímto způsobem jsem ve třech videích při různých pohybech vytvořil 11 dvojic bodů, různě vzdálených od středu snímku, a porovnal pozice bodů získaných pomocí úběžníkových trojúhelníků s pozicemi bodů definovaných pomocí objektů v obraze. Výsledky testů jsou zobrazeny v tabulce 7.14. Jednotlivé body jsou seřazeny podle vzdálenosti původních pozic bodů od středu obrazu, od nejkratší po nejdelší. Toto řazení jsem zvolil z toho důvodu, aby bylo vidět, jestli, a pokud ano, tak jaký vliv má vzdálenost bodů na výsledek.

	Původní pozice	Posunutá pozice	Vypočtená pozice	Abs.	Rel.
V1	(484.504, 319.223)	(649.54, 332.432)	(642.18, 336.412)	8.367	2.76 %
V13	(442.616, 365.349)	(42.5939, 402.403)	(38.5111, 402.084)	4.095	1.147 %
V8	(545.98, 60.194)	(547.066, 320.634)	(543.287, 322.462)	4.19	2.06 %
V13	(722.207, 308.031)	(328.623, 314.29)	(309.086, 316.376)	19.64	24.4 %
V1	(-397.068, 543.364)	(-189.136, 486.87)	(-187.595, 476.709)	10.272	1.7 %
V13	(1399.18, 154.456)	(778.337, 160.031)	(631.946, 211.843)	155.289	36.49 %
V8	(2389.27, -298.051)	(3997.62, -65.2719)	(3404, 131.794)	625.476	17.13 %
V8	(-2433.67, 130.098)	(-967.527, 237.216)	(-1490.17, 207.713)	523.475	39.41 %
V1	(8026.25, 525.25)	(-3481.55, -49.09)	(14322.8, 2309.38)	×	×
V13	(14084, -3832)	(1654.6, -261.364)	(797.828, -563.55)	908.501	65.45 %

Tabulka 7.14: Tabulka znázorňující sadu testů vytvořených definováním souřadnic bodů pomocí objektů nacházejících se v obraze. První sloupec znázorňuje původní souřadnice bodů. Druhý sloupec pak posunuté souřadnice těchto bodů nalezené pomocí stejných objektů nacházejících se v obraze. Třetí sloupec zobrazuje hodnoty naměřené pomocí úběžníkových trojúhelníků. Čtvrtý a pátý sloupec znázorňuje chybovost při sledování těchto bodů. Absolutní se vztahuje k bodům v druhém sloupci tabulky, relativní pak ke středu snímku o souřadnicích (360,240).

⁷Vlastní zpracování.

Z tabulky můžeme pozorovat podobně chování jako v předchozích případech. Nové souřadnice bodů, které se nachází blíže středu, resp. nachází se přímo v obraze nebo kousek mimo něj, jsou nalezeny s poměrně vysokou přesností. Při větší vzdálenosti bodů je však chybovost poměrně vysoká. V předposledním řádku tabulky opět můžeme pozorovat jev, kdy se souřadnice bodu po pohybu kamery překlopí. V tomto případě detekce nové pozice opět selhává.

Dále v tabulce můžeme pozorovat poměrně vysokou chybu, vzhledem k malé vzdálenosti původního bodu od středu, a to 24.4 %. V tomto případě se jedná o stejný záznam jako v tabulce 7.13 na třetím řádku. V obou případech je chybovost poměrně vysoká oproti jiným případům, což pravděpodobně poukazuje na to, že vyšší chybovost je pravděpodobně způsobena kvalitou detekovaných významných bodů ve videu.

Tuto sadu testů však také nemůžeme považovat za zcela přesnou a určité odchylky mohou vznikat tím, že není možné s úplnou přesností definovat pozici stejného místa před a po pohybu kamery. Mohou tak vznikat určité odchylky vlivem toho, že nejsme schopni zcela přesně určit pozici stejného místa. Díky tomu mohou být přímky mírně posunuty a souřadnice jejich průsečíků tak ovlivněny. I přes to můžeme vidět velmi podobné chování jako je většině předchozích testů, a to, že první úběžníky vykazují poměrně stabilní a vysokou přesnost, na rozdíl od druhých úběžníků

Zhodnocení trojúhelníků

Z výsledků získaných v průběhu celého vyhodnocování je možné shrnout následující poznatky. Prvním z nich je nefunkčnost metody při přibližování a oddalování kamery. V tomto případě jsem nebyl schopen najít takové řešení, které by si dokázalo poradit s v podstatě náhodnou orientací bodů. V tomto případě se každý bod v obraze chová jinak a díky tomu jsou i hodnoty souřadnic nových úběžníků velmi rozdílné. Problémy vznikající při tomto chování se mně nepodařilo odstranit. Buď jsem nebyl schopen najít trojúhelníky, jejichž průsečík by se nacházel dostatečně blízko hledanému úběžníku, nebo jiné kombinace neměly na výsledek téměř vliv. Podobně jako u homografie, dalším problém vzniká při velkém přiblížení kamery a za situace, kdy je silnice pokryta projíždějícími vozidly. V tomto případě je za dominantní směr označen směr pohybu vozidel, protože se v okolí nenachází dostatečný počet kvalitní bodů, které by bylo možné zachytit. Detekovány jsou tak body na vozidlech a tím by i v případě, že by za jiných okolností metoda fungovala, obdobně jako u homografie, docházelo k narušování chování. Výsledky při sledování obou úběžníků tak v případě změny přiblížení kamery nejsou použitelné.

Při sledování prvních úběžníků funguje metoda velmi spolehlivě. Chybovost naměřených hodnot je velmi nízká a stabilní. Pro vzdálenější body (většinou druhý úběžník) však roste chybovost metody a zároveň klesá její stabilita. To je způsobeno především chybovostí při sledování optického toku bodů. Metoda pro sledování optických toků implementovaná funkcí *calcOpticalFlowPyrLK* sice vykazuje poměrně přesné výsledky, ale vzhledem k tomu, že funkce pro detekci významných bodů *goodFeaturesToTrack* vrací na výstupu souřadnice bodů pouze v celých číslech, může při sledování nových souřadnic bodů docházet k menším odchylkám. Ty se při sledování blízkých bodů nijak neprojeví, a díky tomu je sledování prvních úběžníků přesné. Na vzdálenosti, ve kterých se nachází druhý úběžník, se však každá chyba může projevit mnohonásobně více než u prvních úběžníků a dochází tak ke zkreslování výsledků vlivem chyby při detekci dvojic korespondujících bodů. Tím, že pro vzdálenější body jsou vytvářeny trojúhelníky z přímk, které jsou blízko u sebe a svírají malý úhel, dochází k projevování chyby výraznějším způsobem.

Mějme situaci, kdy je trojúhelník vytvořen z dvou přímek q a p . Přímka p je vytvořena z bodů o souřadnicích (226, 335) a (308, 337). Přímka q z bodů o souřadnicích (247, 315) a (321, 317). V tomto případě je průsečík těchto přímek v bodě (8026,525). Pokud by při detekci bodů došlo k chybě, a to například u bodu (226, 335), kde by se nové souřadnice změnilo o pouhé dvě setiny bodu na (226, 335.02), což při hledání bodů běžně může nastat, byla by nová hodnota průsečíku přímek v bodě (7372, 507). Můžeme tedy pozorovat odchylku průsečíku přímek o 654 bodů pouze na základě odchylky 0.02 v případě jedné souřadnice jednoho bodu. To je právě důvod nestability a vznikajících nepřesností při sledování druhého úběžníku. Zároveň je to důvod, proč výsledky z tabulky 7.14 také nemůžeme považovat za zcela správné.

Dalším problémem, který při sledování druhého úběžníku nastává, je zmiňované překlápění souřadnice při pohybu kamery. Tedy situace, kdy se po pohybu změni znaménko, především u x-ové souřadnice, vlivem změny pozorovacího úhlu. Tato situace není předvídatelná a není možné ji zachytit při ani po pohybu kamery. Výsledky druhých úběžníků jsou pak velice chybové.

Metoda založená na úběžnících se nakonec ukázala jako dobře funkční především pro první úběžníky. I při sledování druhých úběžníků jsou často hodnoty v přijatelných mezích. Na druhou stranu jsou výsledky často také dost nepřesné a celkové řešení nevykazuje příliš stabilní výsledky. Vzhledem k dalším chybám vznikajícím za různých situací můžeme metodu považovat za dobře funkční jen v případě prvních úběžníků a pouze v případě rotace nebo náklonu kamery. V ostatních případech je řešení poměrně nestabilní.

7.5 Porovnání výsledků

V této kapitole jsem uvedl pro ucelení informací a lepší porovnání obou implementovaných metod tabulku, která porovnává míru chybovosti u jednotlivých videí při použití obou implementovaných způsobů.

	U1 Hom.	U1 Troj.	U2 Hom.	U2. Troj.	Focal Hom.	Focal Troj.
V1	1.3 %	2.14 %	11.66 %	0.64 %	6.2 %	0.45 %
V2	2 %	0.89 %	42.48 %	46.57 %	20.365 %	21.55 %
V3	4.09 %	2.61 %	92.5 %	28.03 %	38.78 %	12.49 %
V4	8.43 %	9.9 %	80.9 %	1.82 %	33.248 %	5.53 %
V5	5.92 %	5.3 %	×	×	×	×
V6	4.11 %	1.25 %	18.3 %	2.55 %	7.306 %	0.89 %
V7	6.83 %	3.74 %	52.143 %	19.22 %	18.209 %	14.49 %
V8	15.48 %	2.06 %	35.88 %	5.97 %	18.92 %	1.859 %
V9	5.78 %	21.067 %	45.24 %	216.065 %	15.611 %	74.96 %
V10	34.82 %	30.16 %	298.33 %	812.7 %	55.929 %	264.375 %
V11	5.34 %	12.68 %	157.63 %	152.54 %	8.78 %	22.43 %

Tabulka 7.15: Tabulka porovnávající výsledky obou implementovaných metod. Vedle sebe jsou vždy zobrazeny hodnoty chyby při měření stejných úběžníků respektive ohniskové vzdálenosti pomocí obou metod. Jednotlivá měření jsou oddělena dvojitou čarou. U1 značí první úběžník, U2 druhý úběžník a Focal ohniskovou vzdálenost. Hom. pak výpočet pomocí homografie a Troj. výpočet pomocí úběžníkových trojúhelníků.

Z tabulky 7.15 je zřejmé, že metoda založená na vytváření úběžníkových trojúhelníků

vykazuje přesnější výsledky. Její stabilita je však podobná stabilitě při použití homografie. Dále můžeme pozorovat to, že především metoda založená na trojúhelnících, selhává při změně přiblížení kamery (poslední tři řádky tabulky). Metoda založená na homografii však v tomto případě taky nevykazuje příliš přesné výsledky a obě tyto metody jsou v tomto případě dost nepřesné.

Pokud bychom tedy předpokládali pouze náklon a rotaci, je jistě lepší metoda založená na trojúhelnících v případě, že bychom museli počítat i s přibližováním kamery, selhávají v podstatě obě metody. Pravděpodobně nejvhodnější řešením by bylo vytvoření algoritmu pro výpočet parametrů kamery s využitím pouze prvního úběžníku, který se po pohybu kamery použil. Po stabilizaci obrazu by opět mohla být využita metoda založená na obou úběžnících.

Kapitola 8

Závěr

Tato diplomová práce se zabývá problematikou kalibrace dynamických PTZ kamer při jejich pohybu a způsobem udržení kalibračních parametrů kamery. Především se jedná o dodržení vnitřních parametrů kalibrační matice K , tedy ohniskové vzdálenosti f , která je za dodržení určitých předpokladů jediným volným parametrem kalibrační matice.

V první části této diplomové práce jsem se nejprve zabýval teoretickou problematikou týkající se kalibrace kamer. V další části je pak popsána funkcionalita použité kalibrační metody pro kameru ve stabilním stavu, pomocí které jsou získány souřadnice úběžníků, díky kterým je pak možné zachovat kameru zkalibrovanou i při jejím pohybu. Další část této práce se zabývá problematikou vznikající při středovém promítání. Této problematice se věnuje projektivní geometrie, z které byl popsán především princip dělicího poměru.

V poslední části diplomové práce jsem se zabýval způsobem implementace celého systému a vyhodnocování výsledků. Jako součást práce byly implementovány a vyhodnoceny dva přístupy k udržení kamery ve zkalibrovaném stavu, a to princip založený na homografii a princip založený na vytváření úběžníkových trojúhelníků s využitím dělicího poměru. Pomocí těchto principů jsme pak schopni sledovat pozice předem nalezených úběžníků během pohybu kamery. Samotnému uchovávání pozic nejprve předchází předzpracování obrazu.

Zpracovávány jsou vždy dva po sobě jdoucí snímky, které jsou převedeny do stupňů šedi. V těch je pak nalezena sada vzájemně korespondujících bodů, které jsou dále zpracovávány pomocí detektoru pohybu. Implementovaný detektor pohybu dokáže rozpoznat, kdy je kamera stabilní a kdy je kamera v pohybu. Navíc, díky vlastnostem vektorového pole optických toků, jsem pomocí tohoto detektoru schopen rozpoznat konkrétní pohyb a směr pohybu kamery. Díky tomu jsem schopen při předzpracování vybrat z obrazu pouze ty body, které se pohybují v souladu s pohybem kamery. Pomocí takto zpracovaných bodů pak probíhá samotné sledování úběžníků.

Prvním implementovaných přístupem byla metoda založená na homografii. Z předzpracované sady bodů je nejprve vytvořena matice homografie, pomocí které je pak možné vypočítat novou pozici bodu. Při vyhodnocování výsledků se ukázalo, že pomocí matice homografie jsme schopni poměrně jednoduše a přesně určit pozice bodů ležících v obraze nebo blízko za jeho hranicí. To je případ prvního úběžníku. U vzdálenějších bodů (druhých úběžníků) však matice homografie vykazuje značnou chybovost. Výsledky poukazují na to, že pomocí bodů nacházejících se pouze v obraze nejsme schopni přesně definovat chování bodů nacházejících se daleko za hranicí tohoto obrazu. To, že je matice homografie schopna dobře odhadnout pozice bodů ležících v obraze, potvrzuje i implementovaný detektor silnice, kde je pomocí stejné matice homografie transformována maska silnice, která byla ve většině případů transformována zcela správně. Použití homografie se tak ukazuje efektivní pouze

pro první úběžník.

Druhou použitou metodou byla metoda založená na vytváření trojúhelníků a využití vlastností dvojpoměru, který je při středové projekci zachováván. V této metodě jsou nejprve vytvořeny přímky, na kterých jsou pak s využitím znalosti souřadnic úběžníku vytvořeny body potřebné k tomu, aby jednotlivé přímky byly projektivně invariantní. S využitím takto definovaných přímek je pak možné po pohybu zpětně zrekonstruovat novou pozici sledovaného úběžníku. Při vyhodnocování výsledků se ukázalo, že, podobně jako v případě homografie, metoda funguje velmi efektivně pro první úběžníky. Navíc ještě stabilněji a přesněji než právě v případě použití homografie. V případě sledování souřadnic druhých úběžníků, nebo obecně bodů ležících daleko mimo hranici snímku, se podobně jako v případě homografie opět vyskytuje poměrně vysoká chybovost a především nestabilita výsledků. Některé druhé úběžníky byly detekovány s poměrně vysokou přesností, jiné však byly v podstatě nepoužitelné. Vliv na chybovost v tomto případě má především přesnost detekce dvojic korespondujících bodů. I sebemenší odchylky při hledání nové pozice významných bodů po pohybu kamery mohou mít za následek mnohonásobně větší chybu při výpočtu nové souřadnice úběžníku. To, že se tato chybovost projevuje s rostoucí vzdáleností potvrzuje i to, že první úběžníky jsou detekovány velice přesně, vzhledem k tomu, že na krátkou vzdálenost se chyba v podstatě neprojeví.

Dalším problémem vznikajícím při použití této metody je přibližování a oddalování kamery. V tomto případě se mi nepodařilo najít stabilní řešení tak, aby dokázalo reflektovat změny souřadnic úběžníků. Směr a velikost pohybu bodů při přibližování jsou v podstatě náhodné, a díky tomu jsou i souřadnice úběžníků velmi ovlivněny chybovostí.

Posledním problémem vznikajícím při použití obou metod je překlápění souřadnice druhého úběžníku při změně pozorovacího úhlu. V některých případech dochází k tomu, že se po pohybu změni znaménko u x-ové souřadnice druhého úběžníku a úběžník se tak nachází na druhé straně od silnice. Tuto změnu není možné dopředu odhadnout a ani jedna z implementovaných metod si s tímto případem nedokáže poradit.

Souhrnem by se dalo říct, že metoda s využitím trojúhelníků je v případě rotace a náklonu kamery mnohem stabilnější a vrací přesnější výsledky než v případě použití homografie. V případě změny přiblížení však zcela selhává, ale ani použití matice v těchto případech nevykazovalo použitelné výsledky. Obě metody se dají považovat za použitelné v případě sledování pozice prvního úběžníku. V případě druhého úběžníku je použití homografie nefunkční a použití trojúhelníků mírně nestabilní, avšak mnohem přesnější než homografie.

Pokračováním této práce by jistě bylo vylepšení metody založené na úběžníkových trojúhelnících. Především pak zlepšení stability výsledků při hledání druhého úběžníku. Dále nalezení způsobu vytváření trojúhelníků při změně přiblížení kamery tak, aby tyto trojúhelníky dokázali reflektovat chování právě při změně přiblížení kamery. V průběhu implementace jsem se pokoušel vytvořit několik verzí, ale toto chování se mně v žádné z nich nepodařilo podchytit. Další možností je přepracování kalibrační rovnice, která bude použita ihned po pohybu kamery tak, že bude schopna vypočítat parametry kamery jen s využitím jednoho úběžníku. Po stabilizaci obrazu a výpočtu přesných pozic úběžníků pomocí algoritmu pro stabilní kamery by bylo možné opět použít původní rovnici.

Literatura

- [1] Bas, E.; Crisman, J.: An easy to install camera calibration for traffic monitoring. In *Intelligent Transportation System, 1997. ITSC '97., IEEE Conference on*, Nov 1997, s. 362–366, doi:10.1109/ITSC.1997.660502.
- [2] Calibrator, C.; App, S.: What Is Camera Calibration? 2016.
URL <http://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>
- [3] Chodorová, M.: *Projektivní geometrie*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2013, ISBN 978-80-244-4000-2.
- [4] Dailey, D.; Cathey, F.; Pumrin, S.: An algorithm to estimate mean traffic speed using uncalibrated cameras. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, ročník 1, č. 2, Jun 2000: s. 98–107, ISSN 1524-9050, doi:10.1109/6979.880967.
- [5] Dawson, D.; Birchfield, S.: An Energy Minimization Approach to Automatic Traffic Camera Calibration. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, ročník 14, č. 3, Sept 2013: s. 1095–1108, ISSN 1524-9050, doi:10.1109/TITS.2013.2253553.
- [6] Dong, R.; Li, B.; m. Chen, Q.: An Automatic Calibration Method for PTZ Camera in Expressway Monitoring System. In *Computer Science and Information Engineering, 2009 WRI World Congress on*, ročník 6, March 2009, s. 636–640, doi:10.1109/CSIE.2009.763.
- [7] Dubská, M.; Herout, A.; Juránek, R.; aj.: Fully Automatic Roadside Camera Calibration for Traffic Surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, ročník 2014, č. 1, 2014: s. 1–10, ISSN 1524-9050.
URL http://www.fit.vutbr.cz/research/view_pub.php.cs?id=10645
- [8] Echigo, T.: A Camera Calibration Technique Using Three Sets of Parallel Lines. *Mach. Vision Appl.*, ročník 3, č. 3, Červenec 1990: s. 159–167, ISSN 0932-8092, doi:10.1007/BF01214428.
URL <http://dx.doi.org/10.1007/BF01214428>
- [9] Faugeras, O.; Luong, Q.-T.; Maybank, S.: Camera self-calibration: Theory and experiments. In *Computer Vision ECCV'92, Lecture Notes in Computer Science*, ročník 588, editace G. Sandini, Springer Berlin Heidelberg, 1992, ISBN 978-3-540-55426-4, s. 321–334, doi:10.1007/3-540-55426-2_37.
URL http://dx.doi.org/10.1007/3-540-55426-2_37
- [10] Galego, R.; Bernardino, A.; Gaspar: Auto-Calibration of Pan-Tilt Cameras Including Radial Distortion and Zoom. In *Advances in Visual Computing, Lecture Notes in*

- Computer Science*, ročník 7431, editace G. Bebis; R. Boyle; B. Parvin; D. Koracin; C. Fowlkes; S. Wang; M.-H. Choi; S. Mantler; D. Schulze; K. Mueller; M. Papka, Springer Berlin Heidelberg, 2012, ISBN 978-3-642-33178-7, s. 169–178, doi:10.1007/978-3-642-33179-4_17.
URL http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-33179-4_17
- [11] Hartley, R. I.: Self-calibration from Multiple Views with a Rotating Camera. In *Proceedings of the Third European Conference on Computer Vision (Vol. 1)*, ECCV '94, Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 1994, ISBN 3-540-57956-7, s. 471–478.
URL <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=189359.189583>
- [12] Hofmanová, A.: *Určení prvků vnitřní orientace digitálního fotoaparátu*. Dizertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2014.
- [13] HRNČÍŘ, Z.: *Optický tok v obrazových datech živých buněk [online]*. Diplomová práce, Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, Brno, 2006.
URL http://is.muni.cz/th/60514/fi_m/
- [14] Junejo, I. N.; Foroosh, H.: Practical PTZ camera calibration using Givens rotations. In *2008 15th IEEE International Conference on Image Processing*, Oct 2008, ISSN 1522-4880, s. 1936–1939, doi:10.1109/ICIP.2008.4712160.
- [15] Junejo, I. N.; Foroosh, H.: Optimizing PTZ Camera Calibration from Two Images. *Mach. Vision Appl.*, ročník 23, č. 2, Březen 2012: s. 375–389, ISSN 0932-8092, doi:10.1007/s00138-011-0326-z.
URL <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-011-0326-z>
- [16] Kanhere, N.; Birchfield, S.; Sarasua, W.: Automatic Camera Calibration Using Pattern Detection for Vision-Based Speed Sensing. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, ročník 2086, 2008: s. 30–39, doi:10.3141/2086-04.
- [17] Orság, F.: Algoritmus sledování objektů pro funkční vzor sledovacího systému. Technická zpráva, 2014.
URL http://www.fit.vutbr.cz/research/view_pub.php?id=11033
- [18] Schoepflin, T.; Dailey, D.: Dynamic camera calibration of roadside traffic management cameras for vehicle speed estimation. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, ročník 4, č. 2, June 2003: s. 90–98, ISSN 1524-9050, doi:10.1109/TITS.2003.821213.
- [19] Schoepflin, T. N.; Dailey, D. J.: Dynamic Camera Calibration of Roadside Traffic Management Cameras for Vehicle Speed Estimation. *Trans. Intell. Transport. Sys.*, ročník 4, č. 2, Červen 2003: s. 90–98, ISSN 1524-9050, doi:10.1109/TITS.2003.821213.
URL <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2003.821213>
- [20] Seo, Y.; Hong, K.: Theory and practice on the self-calibration of a rotating and zooming camera from two views. *Vision, Image and Signal Processing, IEE Proceedings -*, ročník 148, č. 3, Jun 2001: s. 166–172, ISSN 1350-245X, doi:10.1049/ip-vis:20010078.

- [21] Sinha, S.; ; Sinha, S. N.; aj.: Towards Calibrating a Pan-Tilt-Zoom Camera Network. In *In Workshop on Omnidirectional Vision and Camera Networks at ECCV*, 2004.
- [22] Song, K.-T.; Tai, J.-C.: Dynamic Calibration of Pan TiltZoom Cameras for Traffic Monitoring. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on*, ročník 36, č. 5, Oct 2006: s. 1091–1103, ISSN 1083-4419, doi:10.1109/TSMCB.2006.872271.
- [23] Wang, K.; Huang, H.; Li, Y.; aj.: Research on lane-marking line based camera calibration. In *Vehicular Electronics and Safety, 2007. ICVES. IEEE International Conference on*, Dec 2007, s. 1–6, doi:10.1109/ICVES.2007.4456361.
- [24] Wang, L.-L.; Tsai, W.-H.: Camera Calibration by Vanishing Lines for 3-D Computer Vision. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, ročník 13, č. 4, Duben 1991: s. 370–376, ISSN 0162-8828, doi:10.1109/34.88572.
URL <http://dx.doi.org/10.1109/34.88572>
- [25] Wu, Z.; Radke, R. J.: Keeping a Pan-Tilt-Zoom Camera Calibrated. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, ročník 35, č. 8, 2013: s. 1994–2007, ISSN 0162-8828, doi:<http://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/TPAMI.2012.250>.
- [26] Zhang, Z.: A Flexible New Technique for Camera Calibration. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, ročník 22, č. 11, Listopad 2000: s. 1330–1334, ISSN 0162-8828, doi:10.1109/34.888718.
URL <http://dx.doi.org/10.1109/34.888718>
- [27] Zhang, Z.: *Camera Calibration*. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2004, s. 4–43.
- [28] Zhang, Z.; Li, M.; Huang, K.; aj.: Practical camera auto-calibration based on object appearance and motion for traffic scene visual surveillance. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2008. CVPR 2008. IEEE Conference on*, June 2008, ISSN 1063-6919, s. 1–8, doi:10.1109/CVPR.2008.4587780.
- [29] Zhang, Z.; Tan, T.; Huang, K.; aj.: Practical Camera Calibration From Moving Objects for Traffic Scene Surveillance. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, ročník 23, č. 3, March 2013: s. 518–533, ISSN 1051-8215, doi:10.1109/TCSVT.2012.2210670.

Přílohy

Seznam příloh

A Obsah CD	77
B Testovací videa	78

Příloha A

Obsah CD

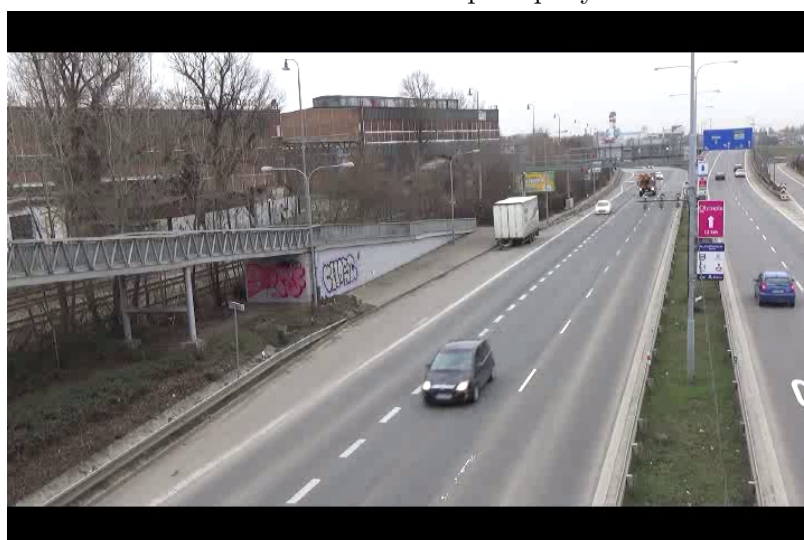
- Zdrojové kódy implementovaného systému
- Plakát
- Video
- Elektronická forma DP

Příloha B

Testovací videa



Obrázek B.1: Video V1 před pohybem.



Obrázek B.2: Video V1 po pohybu.



Obrázek B.3: Video V2 před pohybem.



Obrázek B.4: Video V2 po pohybu.



Obrázek B.5: Video V3 před pohybem.



Obrázek B.6: Video V3 po pohybu.



Obrázek B.7: Video V4 před pohybem.



Obrázek B.8: Video V4 po pohybu.



Obrázek B.9: Video V5 před pohybem.



Obrázek B.10: Video V5 po pohybu.



Obrázek B.11: Video V6 před pohybem.



Obrázek B.12: Video V6 po pohybu.



Obrázek B.13: Video V7 před pohybem.



Obrázek B.14: Video V7 po pohybu.



Obrázek B.15: Video V8 před pohybem.



Obrázek B.16: Video V8 po pohybu.



Obrázek B.17: Video V9 před přiblížením.



Obrázek B.18: Video V9 po přiblížení.



Obrázek B.19: Video V10 před přiblížením.



Obrázek B.20: Video V10 po přiblížení.



Obrázek B.21: Video V11 před oddálením.



Obrázek B.22: Video V11 po oddálení.



Obrázek B.23: Video V12 před pohybem.



Obrázek B.24: Video V12 po pohybu.



Obrázek B.25: Video V13 před pohybem.



Obrázek B.26: Video V13 po pohybu.



Obrázek B.27: Video V14 před pohybem.



Obrázek B.28: Video V14 po pohybu.