

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

KALIBRÁCIA DOPRAVNÝCH KAMIER ZALOŽENÁ  
NA DETEKCIU ÚBEŽNÍKOV  
BAKALÁRSKA PRÁCA

2020  
TOMÁŠ MAŤKO



UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

KALIBRÁCIA DOPRAVNÝCH KAMIER ZALOŽENÁ  
NA DETEKCIU ÚBEŽNÍKOV  
BAKALÁRSKA PRÁCA

Študijný program: Aplikovaná informatika  
Študijný odbor: 2511 Aplikovaná informatika  
Školiace pracovisko: Katedra aplikovanej informatiky  
Školiteľ: Ing. Viktor Kocur

Bratislava, 2020  
Tomáš Maľko





Univerzita Komenského v Bratislave  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

---

## ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

- Meno a priezvisko študenta:** Tomáš Maťko  
**Študijný program:** aplikovaná informatika (Jednoodborové štúdium, bakalársky I. st., denná forma)  
**Študijný odbor:** informatika  
**Typ záverečnej práce:** bakalárska  
**Jazyk záverečnej práce:** slovenský  
**Sekundárny jazyk:** anglický
- Názov:** Kalibrácia dopravných kamier založená na detekcii úbežníkov  
*Traffic camera calibration based on detection of vanishing points*
- Anotácia:** Kalibrácia kamery je nevyhnutný krok k určeniu polôh objektov z obrazu v reálnom svete. Pre scenár sledovania dopravy je možné na tento účel využiť znalosť polohy úbežníkov. Takýto postup pritom umožňuje automatizáciu procesu kalibrácie. Kalibrácia kamery sa dá využiť v reálnych podmienkach na presné meranie rýchlosti vozidiel.
- Cieľ:** Spracovanie prehľadu z problematiky kalibrácie dopravných kamier. Implementácia a popis algoritmov na detekciu úbežníkov vo video snímkach z reálnej dopravy. Analýza presnosti výslednej kalibrácie na datasete BrnoCompSpeed.
- Vedúci:** Ing. Viktor Kocur  
**Katedra:** FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky  
**Vedúci katedry:** prof. Ing. Igor Farkaš, Dr.  
**Dátum zadania:** 07.10.2019
- Dátum schválenia:** 08.10.2019
- doc. RNDr. Damas Gruska, PhD.  
garant študijného programu

.....  
študent

.....  
vedúci práce





**Pod'akovanie:** Ďakujem svojmu školiteľovi Ing. Viktorovi Kocúrovi za poskytnutý čas, poskytnutý materiál, cenné rady a pomoc pri riešení tejto práce.



## Abstrakt

Cieľom tejto bakalárskej práce je kalibrácia dopravných kamier založená na princípe detekcie úbežníkov. V prvej kapitole sú popísané predchádzajúce podobné práce a teória kalibrácie kamery.

TO DO!!! PLACEHOLDER !!!! TO DO !!!!

**Kľúčové slová:** doprava,kamera,kalibrácia,ubežník

## Abstract

Cieľom tejto bakalárskej práce je kalibrácia dopravných kamier založená na princípe detekcie úbežníkov. V prvej kapitole sú popísané predchádzajúce podobné práce a teória kalibrácie kamery.

TO DO!!! PLACEHOLDER !!!! TO DO !!!!

**Keywords:** traffic, camera, calibration, vanishing point

# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Teoretická časť</b>	<b>3</b>
1.1 Detekcia hrán . . . . .	3
1.2 Detekcia kľúčových bodov . . . . .	4
1.3 Metóda Lucas-Kanade . . . . .	4
1.4 Houghova transformácia . . . . .	5
1.5 Diamantový priestor . . . . .	6
<b>2 Kalibrácia Kamery</b>	<b>9</b>
2.1 Teória kalibrácie kamier . . . . .	9
2.1.1 Model dierkovej kamery (Pinhole camera model) . . . . .	9
2.1.2 Perspektívna geometria a úbežníky . . . . .	11
2.1.3 Kalibrácia kamery - vnútorné a vonkajšie parametre kamery . . . . .	12
2.2 Dostupné riešenie kalibrácií kamier . . . . .	14
2.2.1 Kalibrácia kamery vzorom . . . . .	15
2.2.2 Poloautomatické kalibrácie dopravnej kamery . . . . .	15
2.2.3 Automatické kalibrácie kamery . . . . .	16
<b>3 Riešenie problematiky a implementácia</b>	<b>19</b>
3.1 Implementácia . . . . .	19
3.1.1 Použité nástroje . . . . .	19
3.1.2 Návrh implementácie . . . . .	19
3.1.3 Implementácia . . . . .	20
<b>4 Vyhodnotenie</b>	<b>23</b>
4.1 Dataset BrnoCompSpeed . . . . .	23



# Zoznam obrázkov

1.1	Definícia priamok v Houghovom priestore . . . . .	6
1.2	Houghova transformácia priamky . . . . .	7
1.3	Možnosti transformácie bodu na priamku . . . . .	7
1.4	Kvadranty Houghovej transformácie . . . . .	8
2.1	Model dierkovej kamery . . . . .	10
2.2	Ilustrácia Perspektívy . . . . .	12
2.3	Radiálne skreslenie . . . . .	13
2.4	Tangenciálne skreslenie . . . . .	14
2.5	Stopa áut . . . . .	17
3.1	Detegované čiary . . . . .	21
3.2	Detegované čiary . . . . .	21



# Zoznam tabuliek





# Úvod

V modernej civilizácii je našou najrozšírenejšou spôsob dopravy automobilová doprava. Keďže množstvo áut sa neustále zvyšuje, je v našom záujme riešiť problematiku bezpečnosti cestnej premávky. Medzi základné bezpečnostné prvky premávky bývajú napríklad rýchlostné limity. A práve tieto súvisia s mojou bakalárskou prácou. Aby sme zabezpečili bezpečnú premávku, v ktorej budú autá dodržiavať rýchlostné limity je potrebné ich kontrolovať. Drvivá väčšina momentálne dostupných a používaných prostriedkov na kontrolu rýchlosti potrebuje manuálnu kalibráciu, alebo obsluhu vo forme človeka ktorý ich obsluhuje v reálnom čase, pre správny a presný účinok. Moja práca sa bude zaoberať plne-automatickou kalibráciou kamery, ktorá môže byť umiestnená nad frekventovanou diaľnicou či viacprúdovou cestou a bude merať rýchlosti nasnímaných áut. Takéto riešenie poskytuje mnohonásobné uľahčenie a zjednodušenia procesu inštalácie dopravných kamier, keďže postačí kameru správne umiestniť, pričom na jej inštaláciu sa nevyžadujú zdĺhavé merania okolitých podmienok prostredia, s ktorými súvisí napríklad aj uzavretie cestnej komunikácie, čo môže mať nežiadúce následky, najmä ak ide o vysoko frekventovaný úsek.

V nasledujúcej kapitole nájdete ukážku členenia kapitoly na menšie časti a v kapitole ?? nájdete príkazy na prácu s tabuľkami, obrázkami a matematickými výrazmi. V kapitole ?? uvádzame klasický text Lorem Ipsum a na koniec sa budeme venovať záležitostiam záveru bakalárskej práce.



# Kapitola 1

## Teoretická časť

Táto kapitola bude pojednávať o teoretických konceptoch, ktoré budú neskôr používané v práci. Sú to teoretické poznatky, ktorých znalosť je nevyhnutná pre ďalšie pochopenie práce.

### 1.1 Detekcia hrán

Detekcia hrán je jedna zo základných metód počítačového videnia používaná v širokom spektre spracovania obrazu. Funguje na princípe detekcie bodov obrazu, na ktorých sa prudko mení jas pixelov a zároveň sú blízko seba. Taktiež to ale môžu byť oblasti kde sa jas nemení, iba je prerušený. Takéto body vieme usporiadať do zakrivených úsečiek ktoré nazývame hrany. Hrany obrazu nemusia byť fyzické hrany reálneho objektu, môžeme nájsť aj hrany detegované na rozhraní tieňu a svetla, taktiež sa často vyskytujú hrany objektov ktoré majú inú hĺbku ako ich pozadie, prípadne na rozhraní dvoch materiálov objektu. Tieto hrany potom môžu byť aj súčasťou kľúčových bodov, nakoľko ak sa spoja tri hrany vytvárajúce roh, je vysoký predpoklad že to bude dobre identifikovateľná oblasť objektu. Dôležitým aspektom detekcie hrán je prah detegovaných hrán. Každá nájdená hrana má priradenú určitú silu hrany ktorá sa mení vplyvom k tomu, aká veľká zmena jasu je v danom bode zachytená. Ak si zvolíme vyšší prah detekcie, je možné že nezachytíme všetky hrany ktoré sú jemnejšie, naopak pri nízkom prahu môžeme zachytiť priveľa hrán ktoré nemusia byť pre našu aplikáciu relevantné. Tento problém sa zvyčajne rieši detekciou najsilnejších hrán pre začatie detekcie hrany a od tohto bodu sa kontrolujú pixely do všetkých smerov na ustanovenie smeru pokračovania tejto hrany pomocou nižšieho prahu detekcie hrán. V práci bude použitý algoritmus Canny edge detection.

## 1.2 Detekcia klúčových bodov

Detegovanie klúčových bodov obrazu je prvý krok, ktorý je nutný pre pochopenie implementáciu kalibrácie našej kamery. Na obraze je potrebné určiť klúčové body, ktoré budú neskôr sledované pomocou trackeru popísaného v nasledovnej sekcii. V mojej práci budem používať detektor klúčových bodov detailne popísaný v publikácii Good Features To Track [zdroj]. Klúčové body sú význačné body, ktoré sa zväčša nachádzajú na hranách, alebo rohoch objektu. Takisto to ale môže byť aj určitý bod záujmu (napríklad špecifický spoj dvoch rôznych povrchov) ktorý ma nezameniteľné a dostatočne identifikovateľné črty. Detektor klúčových bodov teda skenuje obraz a získava body, ktoré sú natoľko unikátne že je predpoklad ich detegovať aj ak sa zmení ich poloha na obraze (v našom prípade v nasledujúcich snímkach videa). Keďže autá majú množstvo detekovateľných záhybov, vieme ich detegovať mnoho a následne si vybrať tie, ktoré majú najvyššiu kvalitu, teda sú detekovateľné aj ak sa zmenia napríklad vplyvom perspektívneho skreslenia (zmenia sa pomery hrán, ktoré tvoria tieto body). Na sledovanie detegovaných klúčových bodov použijeme metódu popísanú v ďalšej sekcii.

## 1.3 Metóda Lucas-Kanade

Klúčové body ktoré získame potrebujeme nasledovať na jednotlivých nasledujúcich snímkach. Na to vieme použiť metódu Lucas-Kanade ktorá slúži na nasledovanie klúčových bodov. Táto metóda funguje za predpokladu že rozdiel v polohe oblasti sledovaných pixelov (oblasť sledovaných pixelov je určená pozíciou klúčových bodov), je na dvoch za sebou nasledujúcich snímkach malý a relatívne konštantný. Takýto vektor optického toku definujúci posun na osi  $x$  ( $V_x$ ), respektíve ose  $y$  ( $V_y$ ) vieme definovať ako súbor rovníc:

$$\begin{aligned} I_x(q_1)V_x + I_y(q_1)V_y &= -I_t(q_1) \\ I_x(q_2)V_x + I_y(q_2)V_y &= -I_t(q_2) \\ &\vdots \\ I_x(q_n)V_x + I_y(q_n)V_y &= -I_t(q_n) \end{aligned}$$

Kde  $q_1, q_2, \dots, q_n$  sú pixely vnútri sledovanej oblasti a  $I_x(q_i)$   $I_y(q_i)$   $I_t(q_i)$  sú derivácie obrazu  $I$ , ktoré reprezentujú rýchlosť daného objektu s ohľadom na jeho súradnice a čas. Tieto rovnice vieme zapísať ako maticu rovníc  $A * v = b$  ako

$$A = \begin{bmatrix} I_x(q_1) & I_y(q_1) \\ I_x(q_2) & I_y(q_2) \\ \vdots & \vdots \\ I_x(q_n) & I_y(q_n) \end{bmatrix} \quad v = \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad b = \begin{bmatrix} -I_t(q_1) \\ -I_t(q_2) \\ \vdots \\ -I_t(q_n) \end{bmatrix}$$

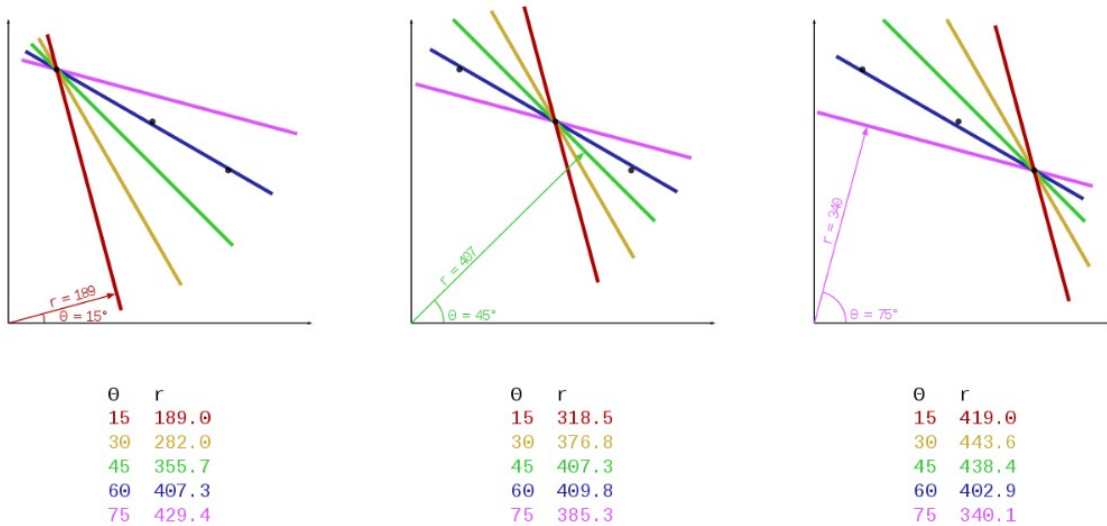
Táto metóda má veľa výpočtov a málo neznámych a preto je zvyčajne zjednodušená do nasledovnej formy :

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i I_x(q_i)^2 & \sum_i I_x(q_i)I_y(q_i) \\ \sum_i I_y(q_i)I_x(q_i) & \sum_i I_y(q_i)^2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\sum_i I_x(q_i)I_t(q_i) \\ -\sum_i I_y(q_i)I_t(q_i) \end{bmatrix}$$

## 1.4 Houghova transformácia

Táto metóda je taktiež často používaná v oblasti počítačového videnia alebo spracovania obrazu. Prvotne sa táto metóda používala na rozpoznanie priamok v obraze, neskôr však bola rozšírená o možnosti detekcie ľubovoľných tvarov. Pre detegovanie priamok na obraze vieme použiť detekciu hrán, tákato detekcia má ale mnoho nepresností pre ktoré nie je triviálne detegovať na obraze niektoré priamky. Houghova transformácia zoskupuje detegované hrany do súvislých objektov a taktiež vyrovnáva možné nerovnosti. V základe teória stojí na fakte, že v systéme súradníc vieme každú priamku zapísať ako pár  $(r, \theta)$  kde  $r$  určuje najkratšiu vzdialenosť danej priamky od stredu súradnicovej sústavy, a  $\theta$  určuje uhol tejto pomyselnéj kolmice na priamku s osou  $x$ . Takéto body definujúce priamky v obraze môžeme preniesť do nového súradnicového systému ktorý bude obsahovať len tieto body. Ak nájdeme priamku ktorá dva alebo viacero bodov v tomto priestore, vieme o nich povedať že tvoria jednu priamku. Tento vzťah je ilustrovaný na obrázku 1.1. Ak teda na určitom obraze detegujeme hrany obrazu, a na základe nich pre každý pixel zistíme  $(r, \theta)$  a zároveň nájdeme dva body ktoré spája určitá priamka, môžeme preniesť takto nájdené body do nového súradnicového priestoru v ktorom os  $x$  a  $y$  bude zodpovedať hodnotám  $(r, \theta)$  čím získame mapu bodov. Pri každej priamke vytvorenej pretnutím jedného pixelu so všetkými ostatnými v pôvodnom obraze vytvárame v konečnom obraze sínusoidovú krivku. Jednotlivé získané krivky sa budú v určitých bodoch pretínať veľa krát, budú teda tvoriť lokálne maximum. Takto

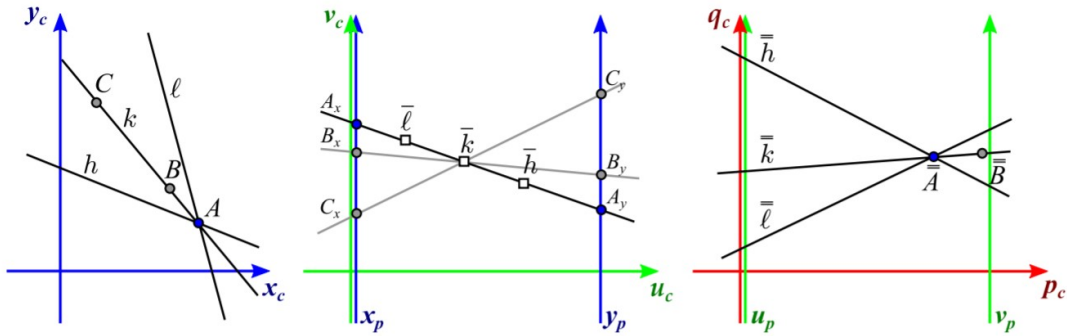
vzniknuté maximá (najpočetnejšie rovnaké kombinácie hodnôt  $(r, \theta)$ ) udávajú výsledné krivky procesu Houghovej Transformácie. 1.1



Obr. 1.1: Obrázok ilustruje tri body a priamky ktoré cez jednotlivé body prechádzajú, modrá priamka prechádza takmer všetkými troma bodmi, a preto body môžeme predpokladať že body tvoria rovnakú priamku[zdroj].

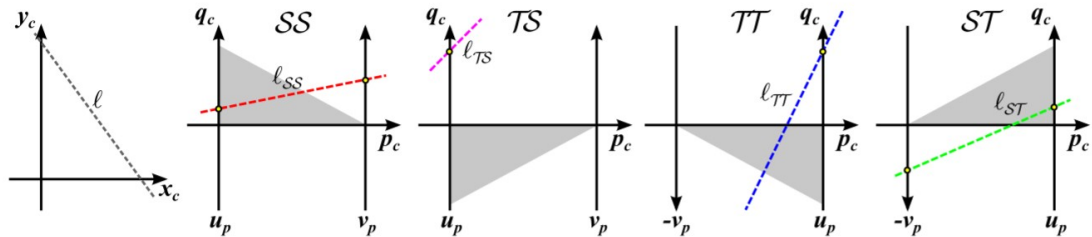
## 1.5 Diamantový priestor

V mojej práci budem používať Kaskádovú Houghovú transformáciu použitím akumuláčnej schémy diamantový priestor (diamond space). Táto metóda mapuje celú 2-D plochu obrazu do konečného priestoru, ktorý nazývame diamantový priestor. Toto mapovanie sa uskutočňuje pomocou mapovania priamok popísaného vyššie 1.4, ale výsledné hodnoty sa zobrazujú do pararelného súradnicového systému, teda takého kde sú osi na seba navzájom paralelné, nie kolmé ako pri tradičnom súradnicovom modeli. 2D bod, ktorý je zapísaný pomocou súradníc  $x$  a  $y$ , vieme spomínaným spôsobom reprezentovať ako priamku, pretínajúcu súradnicové osi práve v bodoch  $x$  a  $y$ . Každý bod prejde takouto transformáciou do priamky a neskôr opäť do bodu.



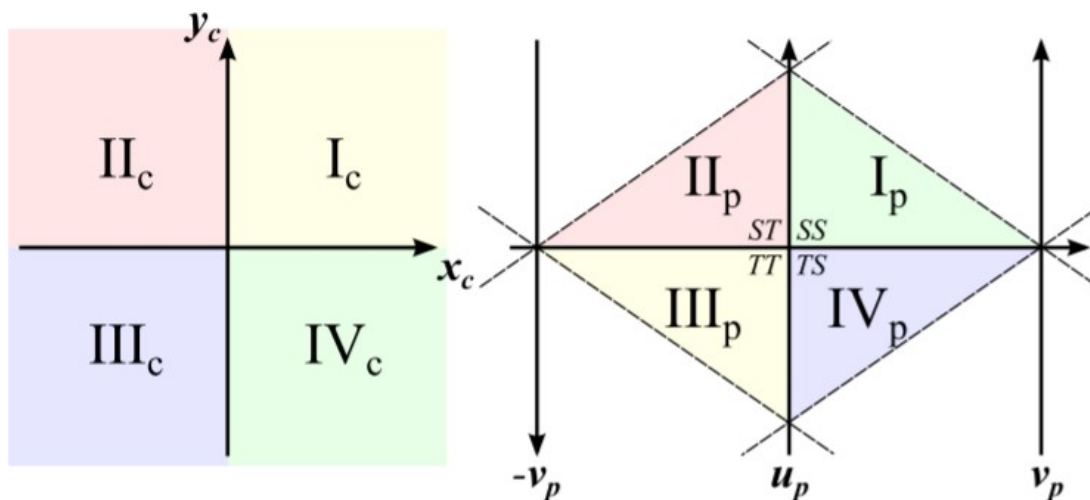
Obr. 1.2: Dve kaskádové transformácie bodov a priamok do paralelných súradníc. Naľavo je pôvodný obrazový priestor, v strede rovnaké objekty v paralelných súradniciach, napravo druhá transformácia do paralelných súradníc [9].

Transformácia do systému paralelných súradníc môže byť vykonaná dvomi rôznymi spôsobmi. Osi v systéme paralelných súradníc môžu byť orientované rovnakým, alebo navzájom náprotivným smerom. V prípade, ak sú osi orientované rovnakým smerom (1.2), ho môžeme označiť písmenom S (straight), a v prípade keď sú na seba osi náprotivne orientované ho označíme T (twisted). Výsledkom môžu teda byť štyri rôzne kombinácie mapovania: S x S, T x S, T x T a S x T. Tieto kombinácie lepšie ilustruje obrázok 1.3.



Obr. 1.3: Reprezentácia štyroch možných výsledkov transformácie bodu na priamku. Do výsledného priestoru preniesieme iba šedú trojuholníkovú časť obrázka. [9].

Každé z týchto mapovaní je transformácia nekonečného priestoru do iného nekonečného priestoru. Avšak zmapovanie každého kvadrantu pôvodnej projekčnej časti, vedie do konečného oboru transformácie. Každá zo štyroch možných tmavých trojuholníkových častí na obrázku 1.3 reprezentuje jeden kvadrant výsledného "diamantového priestoru". Ten môžeme ako celok vidieť na obrázku 1.4



Obr. 1.4: Kvadranty paralelných priestorov (vpravo) zodpovedajúce kvadrantom pôvodného nekonečného Karteziánskeho priestoru (vľavo). [9].

Priamka s jednotnými súradnicami  $(a, b, c)$  v 2D projekčnej rovine je v diamantovom priestore reprezentovaná krivkou. Počet segmentov tejto krivky je určený podľa počtu kvadrantov ktoré pôvodná priamka pretína. Ak priamka pretína iba dva kvadranty (zvislé alebo vodorovné priamky alebo priamky vedené cez stred súradnicového systému), jej zodpovedajúci segment sa zmení na bod. Takáto transformácia mapuje body v nekonečne aj bežné body na bežné body a je použitá ako parametrizácia v Houghovej transformačnej schéme; priamky z obrazu sú transformované do diamantového priestoru, kde je akumulovaná aj výsledná krivka. Každý pixel krivky je inkrementovaný, v diamantovom priestore je potom vyhľadávané globálne maximum ktoré zodpovedá úbežníku. Je to teda bod ktorým v diamantovom priestore prechádza majorita všetkých kriviek. Tento bod, s určenými súradnicami môžeme následne spätne premietnuť na pôvodnu 2D projekčnú rovinu.



# Kapitola 2

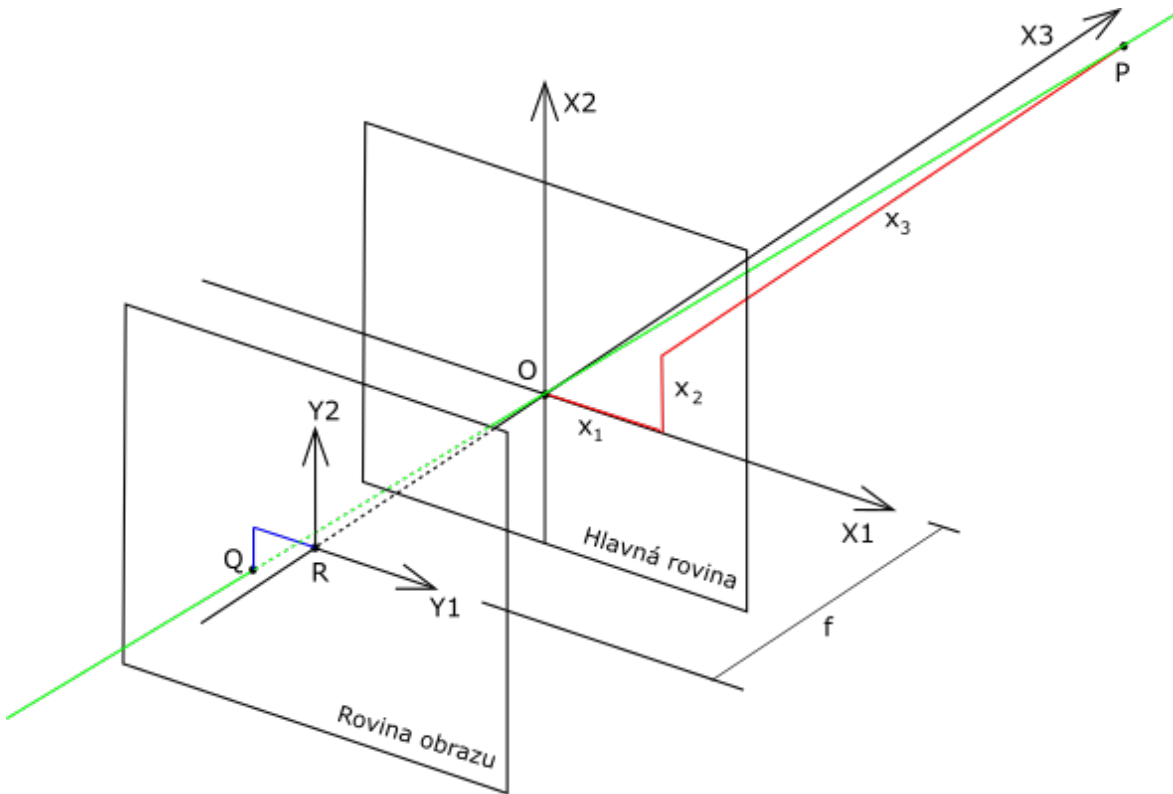
## Kalibrácia Kamery

### 2.1 Teória kalibrácie kamier

Kalibrácia kamery je nevyhnutný krok k určeniu polôh objektov z obrazu v reálnom svete. Kalibrácia dopravnej kamery v našom prípade znamená nájdenie vnútorných a vonkajších parametrov kamery. Táto sekcia bude pojednávať o teórii kalibrácie kamier a dostupných možnostiach kalibrácie kamier.

#### 2.1.1 Model dierkovej kamery (Pinhole camera model)

Model dierkovej kamery je základná teória, ktorá je uplatňovaná vo všetkých formách modernej techniky, ktorá sníma obraz pomocou kamery. Definuje základné pojmy a opisuje vzťah medzi 3D priestorom a jeho projekciou do 2D roviny, ktorý kamera interpretuje. Táto projekcia sa uskutočňuje projekciou každého snímaného bodu v 3D priestore cez jedinú "dierku" na zodpovedajúci bod v novovzniknutom 2D obraze. Ak vytvoríme priamku ktorá na obrázku pretína oba takéto body, hovoríme o nej ako o projekčnej priamke. Pre lepšie pochopenie tohto modelu si môžeme základné pojmy, o ktorých pojednáva, vysvetliť na nasledovnom obrázku:



Obr. 2.1: Model dierkovej kamery. Obrázok prevzatý z [25].

O ohnisku predpokladáme že to je nekonečne malá dierka, t.j. bod, ktorým prechádzajú všetky projekčné priamky. Ohnisko je označené na obrázku 2.1 písmenom O. Tento bod označujeme tiež ako otvor kamery. Cez tento bod sa musí premietnuť každý bod, ktorý sa zobrazí na rovinu obrazu. Pod rovinou obrazu myslíme 2D plochu na ktorý sa nám prenesú body viditeľné kamerou, a teda na nej vznikne zodpovedajúci obraz. Rovina obrazu je paralelná k hlavnej rovine a vzdialenosť, ktorá je medzi nimi ( $f$ ) je nazývaná ohnisková vzdialenosť. Ďalej si všimnime osi  $X_1, X_2, X_3$ . Tieto osi definujú 3D súradnicový priestor, podľa ktorého vieme zaznačiť ľubovoľný nasnímaný bod na obraze. Os  $X_1, X_2$  sú klasické osi používané v 2D súradnicovom systéme, ktoré značia polohu bodu v hlavnej rovine. Os  $X_3$  nazývaná optická os, smeruje smerom od ohniska na snímané objekty, udáva teda vzdialenosť objektu od ohniska. Bod R je potom bod, ktorý zodpovedá miestu, kde sa pretína optická os a rovina obrazu, tento bod nazývame stred obrazu alebo aj hlavný bod. Bod P je bod reálneho objektu snímaného kamerou. Tento bod P sa prenesie na rovinu obrazu do bodu Q, kde ho vieme určiť pomocou súradníc  $Y_1$  a  $Y_2$ , ktoré sú paralelné na  $X_1$  a  $X_2$ . Toto premietanie nám ilustruje projekčná priamka znázornená zelenou farbou.

Aby sme vedeli tieto znalosti využiť, potrebujeme taktiež vedieť, aký je vzťah medzi 3D súradnicami bodu P a 2D súradnicami bodu Q. Tento vzťah, platný pri modeli dierkovej kamery, je definovaný ako nasledovná rovnica:

$$\begin{pmatrix} Y1 \\ Y2 \end{pmatrix} = -\frac{f}{X3} \begin{pmatrix} X1 \\ X2 \end{pmatrix}$$

V reálnom uplatnení je ale nutné zahrnúť aj iné parametre súvisiace s kalibráciou kamery ktorá je vysvetlená v časti 2.1.3. Výsledný obraz bude obsahovať objekty ktoré boli na snímanej scéne napravo, naľavo a naopak, čiže výsledný obraz bude oproti realite otočený o 180°. Na vyriešenie tohto problému vieme otočiť obraz po jeho zhotovení o 180°, teda každý bod, ktorý zodpovedá určitým súradniciam na osiach Y1 a Y2 sa stane bodom na súradniciach - Y1 a - Y2.

### 2.1.2 Perspektívna geometria a úbežníky

Perspektíva je vlastne približná reprezentácia pohľadu na reálne objekty za rovnakých podmienok ako ich vidí oko do 2D priestoru. Pohľad na objekty je fixovaný z jedného miesta (je predpokladaný určitý odstup od scenérie) a teda pri takomto pohľade môžeme pozorovať nasledujúce javy charakterizujúce perspektívu:

- (a) objekty ktoré sú bližšie k pozorovateľovi sa zdajú byť väčšie a objekty v diaľke sa zdajú byť menšie ako ich skutočná veľkosť
- (b) rozmery objektov rovnobežné s uhlom pohľadu sa zdajú byť kratšie ako objekty, ktoré vidíme z profilu (teda sú kolmé na uhol pohľadu)
- (c) objekty vo veľkej diaľke približné v úrovni horizontu budú zmenšené na body

Vďaka týmto javom je obraz namaľovaný alebo digitálne zachytený na 2D podklade autentický s pôvodnou predlohou, keďže rozmery objektov sú prispôsobené podľa pravidiel perspektívy z pohľadu pozorovateľa. Avšak vplyvom týchto javov dochádza aj k deformácii objektov. Všetky obrazy dodržiujúce perspektívu a zároveň obsahujúce nejaké paralelné rovnobežky musia mať aj úbežník, ktorý môžeme definovať ako bod do ktorého sa tieto rovnobežky zbiehajú. Podľa scenérie môže mať takýto obraz jeden či viacero úbežníkov. Úbežník pritom zvyčajne leží na horizonte, ale nemusí to byť pravidlom. Prípad scenérie s jedným úbežníkom je napríklad tunel, chodba, železničná trať alebo rovná cesta kde uhol pohľadu je rovnaký so smerom vyobrazenej cesty a všetky ostatné objekty sú kolmé na tento smer (t.j medzi sebou pararelné). Ide teda o taký obraz kde hlavným bodom záujmu sú dve alebo viac paralelných rovnobežiek, stretávajúcich sa v diaľke v jednom bode. Tento jav vidíme napríklad na obrázku 2.2.



Obr. 2.2: Obrázok na ktorom je úbežník vytvorený zbiehajúcimi sa koľajnicami. Obrázok prevzatý z [26].

Pre ilustráciu scenérie s dvoma úbežníkmi, si predstavme že sa pozeráme na štvorcový rodinný dom z jedného z jeho rohov. Jedna stena bude smerovať ku jednému úbežníku a druhá stena k druhému. Presnejšie vrchná a spodná línia jednej zo stien sa stretnú v diaľke do jedného bodu. Takáto scenéria bude mať 2 detekovateľné úbežníky, jeden pre každú stenu viditeľnú z nášho uhla pohľadu. Ak by sme sa dokázali vzniesť nad roh tohto pomyselného rodinného domu, pribudne nám okrem dvoch spomínaných úbežníkov aj tretí, ktorý sa bude nachádzať hlboko v zemi a budú k nemu smerovať protistožace rohy domu. Aj v našej práci budeme pracovať s predpokladom troch úbežníkov.

### 2.1.3 Kalibrácia kamery - vnútorné a vonkajšie parametre kamery

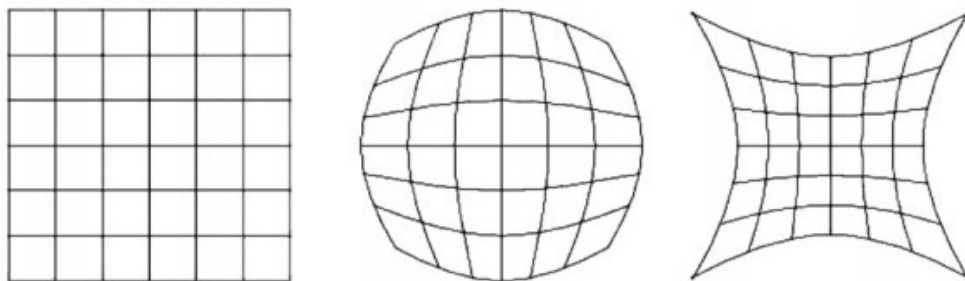
Podstata kalibrácie kamery spočíva v nájdení matice ktorá určuje vonkajšie a vnútorné parametrov kamery, pomocou ktorých vieme určiť vzťah medzi reálnymi súradnicami a súradnicami pixelov na výstupe obrazu kamery. Väčšina priemyselných kamier spadá do skupiny nemetrických kamier, čo znamená, že sa musia pred použitím kalibrovať. Prvý krok kalibrácie môžeme všeobecne označiť ako nájdenie vnútorných parametrov kamery.

Vnútorné parametre kamery popisujú vnútornú geometriu a optickú charakteristiku kamery. Prvým z nich je ohnisková vzdialenosť. Tento parameter určuje vzdialenosť me-

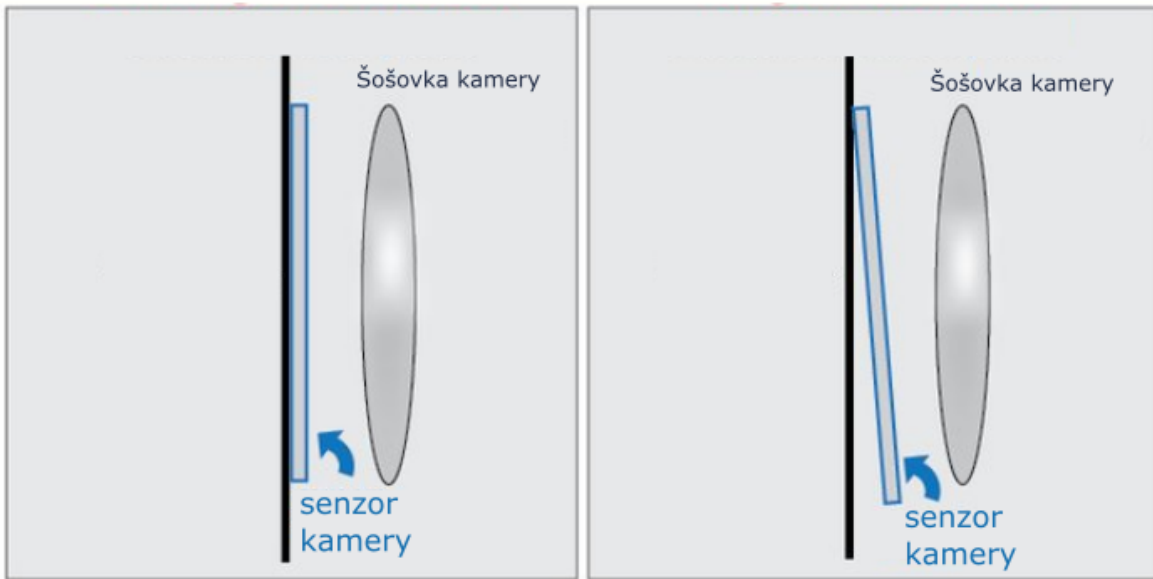
dzi rovinou obrazu a ohniskom a zvyčajne je udávaná v pixeloch, tento parameter je vidieť aj na obrázku 2.1. V dokonalej kamere postavenej na dierkovom modeli je ohnisková vzdialenosť rovnaká pre os  $x$  a  $y$ , ale v skutočnosti sa môže líšiť, a preto rozlišujeme medzi vzdialenosťou pre jednotlivé osi, tj.  $f_x$  a  $f_y$ . Ďalší parameter je odsadenie stredu obrazu. Ak optická os nepretína rovinu obrazu v presnom strede roviny obrazu, potrebujeme odsadiť stred obrazu o určitý počet pixelov, teda dostaneme dve veličiny ktoré sa zvyčajne označujú  $c_x$  a  $c_y$ . Tieto udávajú posun hlavného bodu o určitý počet pixelov na osi Y, respektíve X. Posledným vnútorným parametrom kamery, ktorý vieme zapísať do matice je koeficient skosenia, ktorý nám určuje koeficient skosenia medzi osami Y a X, označujeme ho  $s$ . Toto skosenie sa zvyčajne rovná nule. Matica vnútorných parametrov teda bude mať nasledovnú podobu:

$$K = \begin{pmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Posledným vnútorným, ale nelineárnym parametrom kamery je jej skreslenie. V dokonalej dierkovej kamere sa toto skreslenie rovná nule, v realite sa môže vďaka nedokonalosti šošovky kamery prejaviť ako tangenciálne alebo radiálne. Radiálne skreslenie je častejšie sa vyskytujúci typ skreslenia, ktorý spôsobuje že čiary, ktoré sú v reálnych podmienkach rovné, sa vyobrazia ako krivky. Tento vzťah spôsobuje okrúhly tvar šošovky, jeho prejavy môžeme vidieť na obrázku 2.3. Tangenciálne skreslenie nastáva ak šošovka kamery nie je rovnobežné s rovinou obrazu (teda senzorom ktorý obraz zachytáva). Tento efekt je ilustrovaný na obrázku 2.4.



Obr. 2.3: Obrázok ilustruje radiálne skreslenie. Naľavo vidíme neskreslený obraz, v strede je vyobrazené kladné radiálne skreslenie, nazývajúce sa súdkovitosť, napravo vidíme záporné radiálne skreslenie, nazývajúce sa poduškovitosť. Obrázok prevzatý z [20].



Obr. 2.4: Obrázok ilustruje tangenciálne skreslenie. Naľavo je ilustrovaná ideálna situácia, napravo vidíme ako vzniká tangenciálne skreslenie. Obrázok prevzatý z [20].

Ďalším krokom je nájdenie matice vonkajších parametrov kamery. Tie určujú pozíciu a smer natočenia kamery relatívne k reálnemu svetu. Skladá sa z dvoch častí: rotačnej matice označovanej  $R$  a translačného vektora  $t$ . Rotačná matica nám vznikne spojením troch základných rotácií súradnicového systému okolo osí  $X, Y, Z$ . Translačný vektor pozostáva z troch základných súradníc, popisujúcich transláciu svetového súradnicového systému v porovnaní ku súradnicovému systému kamery. Táto matica bude teda mať podobu:

$$(R|t) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix}.$$

## 2.2 Dostupné riešenie kalibrácií kamier

V tejto sekcii sa budeme zaoberať teóriou kalibrácie dopravnej kamery a opisom aktuálne dostupných riešení tejto problematiky. Aj tieto riešenia môžeme rozdeliť na manuálne, teda tie, ktoré si vyžadujú externé vstupy počas procesu kalibrácie a automatické, ktoré si nevyžadujú žiadne ďalšie merania ani vstupy od používateľa. Detailnejšie si ich popíšeme nižšie.

### 2.2.1 Kalibrácia kamery vzorom

Princípy kalibrácie kamery môžeme všeobecne rozdeliť do dvoch skupín na fotogrametrické (manuálne) a automatické. Fotogrametrické riešenia si vyžadujú pri inštalácii nasnímať určité útvary so známymi rozmermi. Pravdepodobne najrozšírenejšou manuálnou kalibráciou je kalibrácia podľa Zhanga [19]. Táto práca obsahuje detailný postup kalibrácie kamery a opisuje matematické operácie na ňu nevyhnutné, avšak pre takýto typ kalibrácie je potrebné na kamere nasnímať vopred pripravený vzor (práca ilustruje príklad na nasnímaní vzorov šachovnice). Pre tento dôvod je pre dopravnú kameru obdobná kalibrácia neaplikovateľná, ak chceme dosiahnuť plne automatickú kalibráciu kamery bez uzavretia dopravnej komunikácie. Napriek tomu poskytuje veľa užitočných vzťahov, ktoré sa dajú aplikovať aj pri iných formách kalibrácie kamery. Postup kalibrácie je nasledovný:

1. Vytlačíme vzor a pripevníme ho na rovnú plochu.
2. Zachytíme obrazy ktoré nasnímajú tento vzor v rôznych orientáciách zmenou pozícií kamery alebo vytvoreného vzoru.
3. Detegujeme kľúčové body na zhotovených obrazoch.
4. Odhadneme päť vnútorných parametrov kamery a všetky vonkajšie parametre pomocou analytického riešenia.
5. Odhadneme koeficienty tvoriace radiálne skreslenie pomocou lineárnej metódy najmenších štvorcov.
6. Doladíme získané parametre minimalizáciou (odhad maximálnej pravdepodobnosti).

Vďaka tomuto postupu je možné nakalibrovať kameru nasnímaním už dvoch obrázkov obsahujúcich vzory pripevnené na rovnej ploche, so známymi parametrami. Tieto obrázky musia byť rôzne orientované a čím viac ich použijeme tým vyššia bude presnosť odhadu parametrov kalibrácie. Na základe takejto kalibrácie dokážeme dopočítať všetky parametre ktoré sme si opísali v predchádzajúcej sekcii. Vďaka veľmi dobrým výsledkom a relatívne nízkej zložitosti tejto metódy je jednou z momentálne najpoužívanejších metód kalibrácie kamery.

### 2.2.2 Poloautomatické kalibrácie dopravnej kamery

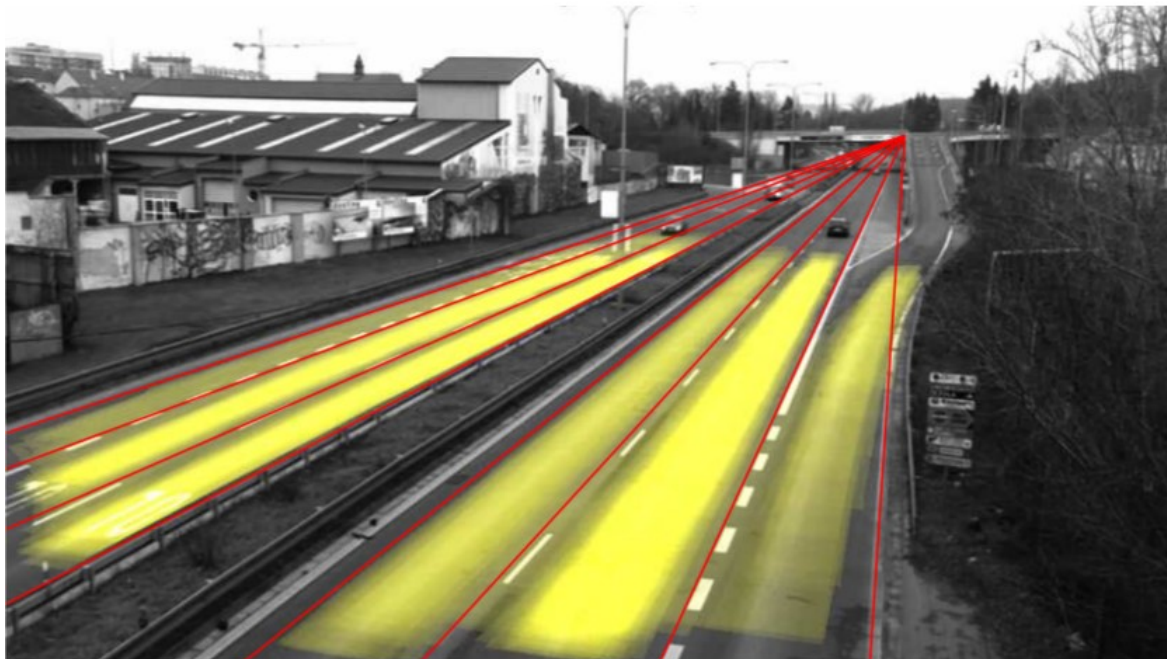
Ako poloautomatickú kalibráciu kamery môžeme nazvať takú kalibráciu, pri ktorej je nutné vykonať určité vstupy, avšak tieto už nemusia byť nasnímanie vzoru vo viacerých orientáciách ako to bolo pri predchádzajúcom riešení, je ale potrebné zadať dodatočne

namerané údaje o scenérii. Tieto vstupy môžu byť napríklad údaje ako výška v ktorej sa nachádza kamera, vzdialenosť medzi vodorovnými dopravnými značkami, šírka jazdného pruhu alebo vyznačenie vodiacich čiar. Takéto parametre potrebujú existujúce riešenia z roku 2007 od Wang a kol. [11], alebo riešenia od You a Zheng [2] z roku 2016. Ďalšie práce ktoré riešia kalibráciu dopravnej kamery sú od Dawsona a Birchfielda [7], alebo práce Songa a Taia [1] a pre správne fungovanie potrebujú šírku jazdného pruhu a dĺžku vodiacej čiary. Práca Daileyho a Schoepflina [3] obsahuje riešenie, ktoré potrebovalo na funkciu zadanú priemernú rýchlosť prechádzajúcich vozidiel. Riešenie od Doa a kol. [17] vyžaduje pre kalibráciu kamery vyznačenie rovnostranného trojuholníka (alebo iného geometrického útvaru) na snímanej cestnej komunikácii. Podobne je to aj v práci od Luvizona a kol. [5][4].

### 2.2.3 Automatické kalibrácie kamery

Ideálnym automatickým riešením by bol prípad, kedy dopravná kamera po nainštalovaní nepotrebuje vôbec žiadnu manipuláciu a dokáže sa nakalibrovať iba podľa zachytených snímok. V publikácii od Dailey a kol. [8] v roku 2000 funguje kalibrácia za predpokladu že poznáme priemernú dĺžku snímaných vozidiel, čo síce znamená že ide len o odhad rýchlosti snímaných vozidiel, ale zároveň je možné túto metódu použiť bez viacerých vstupov na rozličných miestach a preto ju môžeme definovať ako automatickú. V roku 2015 Dubska a kol. [9] publikovali prácu pojednávajúcu o riešení kalibrácii kamery, ktoré je plne automatické, funguje na rôznych typoch cestných premávkach, nepotrebuje žiadne znalosti o snímanej oblasti a pracuje s prakticky hocikým pozorovacím uhlom. Toto riešenie analyzuje trajektórie pohybu áut (viď. obrázok 2.5), a na základe Houghovej transformácie a diamantového priestoru, pomocou týchto dát odhadne polohu ubežníkov. Na základe týchto dát je ďalej možné kameru nakalibrovať. Jediným predpokladom na správny výpočet je že aspoň časť pohybu automobilu, a snímaný úsek komunikácie je rovný. Kalibráciu je jednoducho možnú vykonať v reálnom čase, a na stabilnú kalibráciu je dostačujúce aspoň 2-minútové video.





Obr. 2.5: Ilustračný obrázok procesu získavania prvého úbežníka. Obrázok prevzatý z [9].

Ďalšie riešenie je od Jakuba Sochora a kol. [12] ktorý svojím algoritmom dosiahol úctihodnú presnosť 1.10 km/h na nakalibrovanej kamere ktorá odhadovala rýchlosť áut a porovnávala odhadované rýchlosti s reálne nameranými rýchlosťami. Je postavené na rovnakom algoritme ako predchádzajúca práca, je ale odlišené najmä spôsobom, akým sa získava mierka. V riešení od Dubskej a kol. [9] je ohraničenie áut riešené pomocou boxov ktoré ohraničujú vozidlo (jednotlivé hrany boxu majú rovnaký vektor ako nájdené úbežníky), pri tomto riešení je však mierka získaná priamym porovnaním 3D modelu auta s reálnym autom zachyteným vo videu. Obe publikácie sú ale metodikou aspektmi je ale táto publikácia metodicky založená na práci [10] kde Dubská do podrobna rieši metodiku kalibrácie kamier založenej na detekcii úbežníkov.



# Kapitola 3

## Riešenie problematiky a implementácia

### 3.1 Implementácia

#### 3.1.1 Použité nástroje

Pre implementáciu mojej práce som si vybral dynamický typový programovací jazyk Python [zdroj] v kombinácii s open-source knižnicou Opencv [], ktorá je určená na prácu s obrazom, počítačové videnie a spracovanie obrazu v reálnom čase. Ďalej práca využíva aj open-source knižnicu Numpy [], ktorá poskytuje vysokú funkcionálnu v oblasti viacrozmerných polí a matematických operácií na takýchto objektoch. Túto kombináciu nástrojov som si vybral nakoľko jazyk Python má natívnu podporu oboch využívaných knižníc. Taktiež podporuje objektovo orientované, štruktúrované aj funkcionálne programovanie a na správu pamäte používa garbage collection, čo všetko by malo zjednodušiť samotnú implementáciu práce.

#### 3.1.2 Návrh implementácie

Zdrojový kód bude rozdelený na dva súbory, a to nasledovne:

1. Hlavný súbor obsahujúci metódy týkajúce sa práce s obrazom (calibration.py)
2. Súbor reprezentujúci akumuláciu zozbieraných dát do diamantového priestoru (accumulator.py)

Návrh nášho riešenia bude z veľkej časti vychádzať z popisu implementácie kalibrácie kamery v práci Fully Automatic Roadside Camera Calibration for Traffic Surveillance od Dubskej a kol. []. V tejto práci je prvýkrát opísaná metodika použitá pre prácu ktorá rieši kalibráciu dopravnej kamery založenej na detekcii ubežníkov. Táto práca opisuje akým spôsobom je možné robustne detekovať a mapovať priamky do diamantového

priestoru a taktiež aj aký je možný postup implementácie podobneho algoritmu. V závere práce je aj analýza výpočtovej rychlosti implemetácie ktorú práca opisuje. Spôsob implementácie ktorý opisuje bolo odskúšané na širokom spektre videí, zaznamenaných na najdostupnejších kamerách s nízkym rozlíšením, ako aj na profesionálnych a finančne náročných kamerách. V mojej práci bude hlavným ťažiskom `detection.py` ktorý je potrebné zavolať s argumentom videa na ktorom chceme spustiť automatickú kalibráciu. Po vyhodnotení pozície úbežníkov vráti tento súbor pozície úbežníkov vrámci daného videa. V práci sa bude používať diamantový priestor dva krát, na nájdenie prvého aj druhého úbežníka, a keďže ide o súbor komplexných operácii, rozhodol som sa ho vyčleniť do samostatného súboru.

### 3.1.3 Implementácia

V prvom súbore (`calibration.py`) začneme tým že po snímkoch prehrávame video a na videu zachytávame kľúčové body algoritmom `cv.goodFeaturesToTrack` ktorý je zahrnutý v knižnici `opencv`. Obraz na ktorom hľadáme kľúčové body vždy konvertujeme do odčíňov šedej keďže takto docielíme väčšiu presnosť detekcie. Pri hľadaní kľúčových bodov sme nastavili parameter kvality na 0,4 (hodnota najlepšieho rohu sa vynásobí touto hodnotou a akceptované budú len tie rohy ktoré majú lepšiu kvalitu ako tento prah. Ak by najlepší roh mal kvalitu 100, tak akceptované budú rohy s kvalitou nad 40) a hľadáme 10 kľúčových bodov na jednej snímke pre výber iba tých najkvalitnejších bodov. Po zachytení kľúčových bodov prejdeme o tri snímky ďalej. Na nový snímok znova aplikujeme šedý filter, a pomocou `cv.calcOpticalFlowPyrLK` ktorá je taktiež zahrnutá v `opencv` knižnici hľadáme posun zachytených kľúčových bodov. Každý takto detegovaný kľúčový bod nám umožní vytvoriť čiaru ktorá je definovaná dvoma bodmi. Tento jav možno vidieť na nasledujúcom obrázku:



Obr. 3.1: Zachytenie a nasledovanie 20 klúčových bodov na automobiloch.

Takýmto spôsobom akumulujeme všetky čiary do jednorozmerného poľa obsahujúceho zachytené čiary definované pomocou x a y súradníc oboch koncových bodov danej čiary. Čím viac sa rozhodneme týchto bodov naakumulovať tým zdĺhavejší bude proces kalibrácie, no do určitej miery sa stáva aj presnejší. Vplyv počtu akumulovaných čiar na presnosť kalibrácie rozobereme v poslednej kapitole. Toto pole môžeme predať druhému súboru ktorý rieši diamantový priestor. Diamantový priestor bude reprezentovaný dvojrozmerným polom konštantnej šírky a dĺžky, naplnený nulami. V našom prípade bude diamantový priestor veľký 1000x1000 bodov. Každá čiara je naškálovaná z pôvodného rozsahu obrazu na rozsah diamantového priestoru a prepísaná do notácie paralelných súradníc. Do diamantového priestoru je následne zakreslená pomocou krivky, ktorej koncové body sú definované nasledovne:

$$\alpha = \text{sgn}(ab) \quad \beta = \text{sgn}(bc) \quad \gamma = \text{sgn}(ac)$$

$$(a, b, c) \rightarrow \left[ \frac{\alpha a}{c + \gamma a}, \frac{-\alpha c}{c + \gamma a} \right], \left[ \frac{b}{c + \beta b}, 0 \right],$$

$$\left[ 0, \frac{b}{a + \alpha b} \right], \left[ \frac{-\alpha a}{c + \gamma a}, \frac{\alpha c}{c + \gamma a} \right]$$

Obr. 3.2: Formula na prepočet koncových bodov usečiek v jednotlivých kvadrantoch diamantového priestoru, tvoriacich krivku, ktorá reprezentujúcu pôvodnú čiaru(a,b,c).

Po získaní koncových bodov definujúcich úsečky tvoriace krivku v diamantovom priestore môžeme tieto úsečky zaznačiť do samotného diamantového priestoru. Robíme to pomocou inkrementovania každého bodu ktorým táto krivka prechádza. Inkrementujeme ich tak že si vytvoríme prázdny objekt (canvas), ktorý bude mať rovnakú rozmer ako pôvodný diamantový priestor a nakreslíme do neho čiaru pomocou metódy `opencv.line`. Takto vytvorený canvas pričítavame ku diamantovému priestoru kým ne-  
zakreslíme každú čiaru.

# Kapitola 4

## Vyhodnotenie

### 4.1 Dataset BrnoCompSpeed

Túto publikáciu uverejnil tím Jakub Sochor, Roman Juranek, Jakub Špaňhel, Lukáš Maršík, Adam Široký, Adam Herout, Pavel Zemčík v roku 2017. [13] Ide o prácu ktorá sa zaoberá rovnakou témou, teda automatickou kalibráciou dopravnej kamery. Rozdielom však je, že táto práca pojednáva o analýze presnosti publikovaných algoritmov (riešení) pre kalibráciu dopravných kamier. Z výsledkov tohto porovnania presnosti, vieme vyvodit ktoré z kalibrácii sú najpresnejšie, a inšpirovať sa nimi pri implementácii. V tejto analýze je zahrnutá aj väčšina prác ktoré sú spomínané vyššie v predchádzajúcej kapitole. Súčasťou práce je video-dataset BrnoCompSpeed ktorý je verejne prístupný, a bol súčasťou pôvodnej publikácie, na ktorom porovnávali rôzne spôsoby kalibrácie kamery. Tento dataset pozostáva z výrazne širšieho súboru videí, aký bol dovtedy použitý na testovanie algoritmov zaoberajúcich sa mierou presnosti kalibrácie dopravných kamier, a teda aj presnosťou samotného merania rýchlosti. Uskutočnili šesť nahrávaní, na rôznych lokalitách, kde nahrali 3 videozáznamy rôznymi kamerami. Všetky videá boli nahrané vo Full-HD rozlíšení pri 50 snímkach za sekundu. Taktiež obsahujú záznamy rýchlostí všetkých vozidiel ktoré boli detekované laserovými meračmi LIDAR a GPS modulom. Dokopy teda záznamy obsahujú 20 865 vozidiel , pri ktorých je zaznamenaná aj ich nameraná rýchlosť. Na tomto datasete plánujem testovať aj presnosť mojej kalibrácie ktorú do hĺbky rozoberiem v poslednej kapitole.





# Literatúra

- [1] Song, K. T.; Tai, J. C.: Dynamic Calibration of Pan-Tilt-Zoom Cameras for Traffic Monitoring. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, ročník 36, č. 5, Oct 2006: s. 1091–1103, ISSN 1083-4419.
- [2] You, X.; Zheng, Y.: An accurate and practical calibration method for roadside camera using two vanishing points. *Neurocomputing*, ročník 204, č. Supplement C, 2016: s. 222–230, ISSN 0925-2312.
- [3] Schoepflin, T. N.; Dailey, D. J.: Dynamic camera calibration of roadside traffic management cameras for vehicle speed estimation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, ročník 4, č. 2, June 2003: s. 90–98, ISSN 1524-9050.
- [4] Luvizon, D. C.; Nassu, B. T.; Minetto, R.: A Video-Based System for Vehicle Speed Measurement in Urban Roadways. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, ročník 18, č. 6, June 2017: s. 1393–1404, ISSN 1524-9050.
- [5] Luvizon, D. C.; Nassu, B. T.; Minetto, R.: Vehicle speed estimation by license plate detection and tracking. In *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, May 2014, ISSN 1520-6149, s. 6563–6567.
- [6] Grammatikopoulos, L.; Karras, G.; Petsa, E.: Automatic estimation of vehicle speed from uncalibrated video sequences. In *International Symposium on Modern 46 Technologies, Education and Professional Practice in Geodesy and Related Fields*, Nov 2005, s. 332–338.
- [7] Dawson, D. N.; Birchfield, S. T.: An Energy Minimization Approach to Automatic Traffic Camera Calibration. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, ročník 14, č. 3, Sept 2013: s. 1095–1108, ISSN 1524-9050.
- [8] Dailey, D. J.; Cathey, F. W.; Pumrin, S.: An algorithm to estimate mean traffic speed using uncalibrated cameras. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, ročník 1, č. 2, Jun 2000: s. 98–107, ISSN 1524-9050.

- [9] Dubská, M.; Herout, A.; Juranek, R.; aj.: Fully Automatic Roadside Camera Calibration for Traffic Surveillance. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, ročník 16, č. 3, June 2015: s. 1162–1171, ISSN 1524-9050.
- [10] Dubská, M.; Herout, A.: Real Projective Plane Mapping for Detection of Orthogonal Vanishing Points. In *Proceedings of BMVC 2013*, 2013, s. 90.1–90.10.
- [11] Wang, K.; Huang, H.; Li, Y.; aj.: Research on lane-marking line based camera calibration. *2007 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, Dec 2007: s. 1–6.
- [12] Sochor, J.; Juranek, R.; Herout, A.: Traffic surveillance camera calibration by 3D model bounding box alignment for accurate vehicle speed measurement. *Computer Vision and Image Understanding*, ročník 161, 2017: s. 87–98, ISSN 1077-3142.
- [13] Sochor, J.; Juránek, R.; Špaňhel, J.; aj.: BrnoCompSpeed: Review of Traffic Camera Calibration and Comprehensive Dataset for Monocular Speed Measurement. 2017.
- [14] Jianbo Shi and Tomasi, "Good features to track," 1994 Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle, WA, USA, 1994, pp. 593-600.
- [15] Bhardwaj, Romil, Tummala, Gopi, Ramalingam, Ganesan, Ramjee, Ramachandran, Sinha, Prasun. (2018). AutoCalib: Automatic Traffic Camera Calibration at Scale. *ACM Transactions on Sensor Networks*. 14. 1-27. 10.1145/3199667.
- [16] Burger, Wilhelm. (2016). Zhang's Camera Calibration Algorithm: In-Depth Tutorial and Implementation.
- [17] Do, V. H.; Nghiem, L. H.; Thi, N. P.; aj.: A simple camera calibration method for vehicle velocity estimation. In *2015 12th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, June 2015, s. 1–5.
- [18] JAKLOVSKÝ, Samuel. Měření rychlosti automobilů z dohledové kamery [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/84956>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta informačních technologií. Ústav počítačové grafiky a multimédií. Vedoucí práce Jakub Sochor.
- [19] Z. Zhang, A flexible new technique for camera calibration, in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, Nov. 2000.

- [20] BAÁŠ, Filip. Stanovení pozice objektu [online]. Brno, 2019 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/177744>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Miloslav Richter.
- [21] Python. [www.python.org/about/](http://www.python.org/about/), . [16.02.2020].
- [22] Python 3.7.2. [docs.python.org/3.7/](https://docs.python.org/3.7/), . [16.02.2020].
- [23] Opencv. [opencv.org/about.html](http://opencv.org/about.html), . [16.02.2020].
- [24] Opencv 4.0.1. [docs.opencv.org/4.0.1/](https://docs.opencv.org/4.0.1/), . [16.02.2020].
- [25] [https://en.wikipedia.org/wiki/Pinhole\\_camera\\_model](https://en.wikipedia.org/wiki/Pinhole_camera_model) , [19.04.2019].
- [26] <https://www.hippopx.com/sk/gleise-old-railroad-tracks-seemed-train-metal-stainless-rail-traffic-20397>, [19.04.2019].