

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

KALIBRÁCIA DOPRAVNEJ KAMERY POMOCOU  
DETEKCIE ÚBEŽNÍKOV VOZIDIEL  
BAKALÁRSKA PRÁCA

2025  
LEA MICHALÍKOVÁ



UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE  
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

KALIBRÁCIA DOPRAVNEJ KAMERY POMOCOU  
DETEKCIE ÚBEŽNÍKOV VOZIDIEL  
BAKALÁRSKA PRÁCA

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

Bratislava, 2025  
Lea Michalíková





94005114

## ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

**Meno a priezvisko študenta:** Lea Michalíková

**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 dopravnej kamery pomocou detektie úbežníkov vozidiel  
*Traffic Camera Calibration Via Detection of Vanishing Points of Vehicles*

**Anotácia:** Kalibrácia kamery je proces pri ktorom sú určené jej vnútorné a vonkajšie parametre. Vďaka nim je možné následne uvažovať o geometrii zachytenej scény a zisťovať tak priestorové vzťahy objektov na rovine vozovky ako aj ich vzdialenosť.

**Ciel:** Spracovať prehľad automatických a semi-automatických metód kalibrácie dopravných kamier. Navrhnuť a experimentálne vyhodnotiť možnosti zlepšenia existujúceho riešenia.

**Literatúra:** Kocur V, Ftáčnik M. Traffic Camera Calibration via Vehicle Vanishing Point Detection. InInternational Conference on Artificial Neural Networks 2021 Sep 14 (pp. 628-639). Springer, Cham.

**Vedúci:** Ing. Viktor Kocur, PhD.

**Katedra:** FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky

**Vedúci katedry:** doc. RNDr. Tatiana Jajcayová, PhD.

**Dátum zadania:** 31.05.2022

**Dátum schválenia:** 26.09.2024

doc. RNDr. Damas Gruska, PhD.

garant študijného programu

.....  
študent

.....  
vedúci práce

**Pod'akovanie:** ...

# **Abstrakt**

...

**Kľúčové slová:** ...

# **Abstract**

...

**Keywords:**



# Obsah

<b>Úvod</b>	<b>1</b>
<b>1 Vysvetlenie pojmov</b>	<b>3</b>
1.1 Dierková komora . . . . .	3
1.1.1 Porovnanie s camera obscura . . . . .	3
1.1.2 Princíp fungovania . . . . .	3
1.1.3 Skreslenie obrazu . . . . .	4
1.2 Úbežníky . . . . .	6
1.2.1 Typy úbežníkov . . . . .	6
1.2.2 Podstata pri kalibrácii kamier . . . . .	6
1.3 Diamantový priestor . . . . .	7
1.3.1 Paralelný súradnicový systém . . . . .	7
1.3.2 Vznik diamantového priestoru . . . . .	8
1.3.3 Deketovanie pomocou dopravnej kamery . . . . .	8
1.4 Ohraničujúce boxy vozidiel . . . . .	9
1.4.1 Tvorba ohraničujúcich boxov . . . . .	10
<b>Záver</b>	<b>11</b>



# Zoznam obrázkov

1.1	Dierková komora . . . . .	4
1.2	Radiálne skreslenie . . . . .	5
1.3	Tangenciálne skreslenie . . . . .	5
1.4	Úbežníky . . . . .	6
1.5	Diamantový priestor . . . . .	7
1.6	Paralelné súradnice . . . . .	8
1.7	Ohraničujúce boxy vozidiel . . . . .	9
1.8	Tvorba ohraničujúcich boxov . . . . .	10



# Zoznam tabuliek



# Úvod

Kalibrácia kamery je proces pri ktorom sú určené jej vnútorné a vonkajšie parametre. Vďaka nim je možné následne uvažovať o geometrii zachytenej scény a zisťovať tak priestorové vzťahy objektov na rovine vozovky ako aj ich vzdialenosť.

Cieľom tejto práce je spracovať prehľad automatických a semi-automatických metód kalibrácie dopravných kamier. Navrhnuť a experimentálne vyhodnotiť možnosti zlepšenia existujúceho riešenia.



# Kapitola 1

## Vysvetlenie pojmov

V tejto práci vysvetlíme a popíšeme pojmy, ktoré sa budú ďalej používať v samotnej bakalárskej práci. Ide o kľúčové pojmy, ktorým je potrebné porozumieť pre správne pochopenie metód spomínaných v budúcej práci. Okrem vysvetlenia samotných pojmov stručne popíšeme aj ich fungovanie a podstatu toho, ako s nami zvolenou tématikou súvisia.

### 1.1 Dierková komora

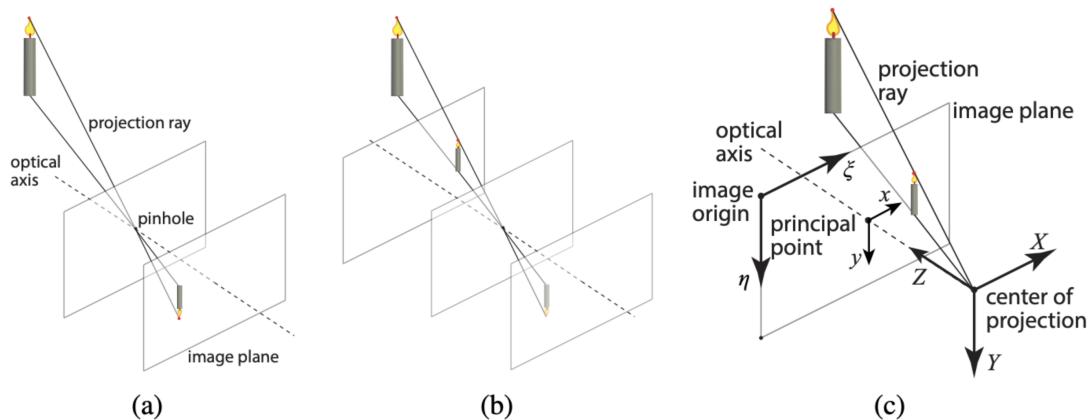
Dierková komora je zariadenie, slúžiace na zachytenie obrazu z vonkajšieho sveta. Najčastejšie má podobu kvádra, pričom jej typická veľkosť je taká ako veľkosť malej škatuľky.

#### 1.1.1 Porovnanie s camera obscura

Fungovanie dierkovej komory bol vyvinutý na základe fungovania zariadenia s názvom camera obscura. Hlavným rozdielom je však veľkosť dierky, ktorá je zároveň jediným miestom, kadiaľ sa do zariadenia dostáva svetlo. Zatiaľ čo v dierkovej komore sa veľkosť dierky počíta rádovo v desatinách milimetroch, v camera obscura sa dokonca častejšie používajú šošovky, ktoré sú logicky podstatne väčšie. Šošovky umožňujú použiť väčšiu clonu, vďaka ktorej sa zachováva ostrosť. No na druhej strane, vďaka malej veľkosti dierky sa tvorí veľká hĺbka ostrosti aj bez šošoviek, tým pádom sú v dierkovej komore nepotrebné [9].

#### 1.1.2 Princíp fungovania

Samotný princíp fungovania dierkovej komory je teda nasledovný. Svetelné lúče prenikajú z vonkajšieho prostredia cez malú dierku (v našom prípade ohnisku), a dopadajú



Obr. 1.1: Klasická dierková komora (a), dierková komora s imaginárnoch rovinou pred ohniskom (b), podrobnejší popis obrázku (c). [10]

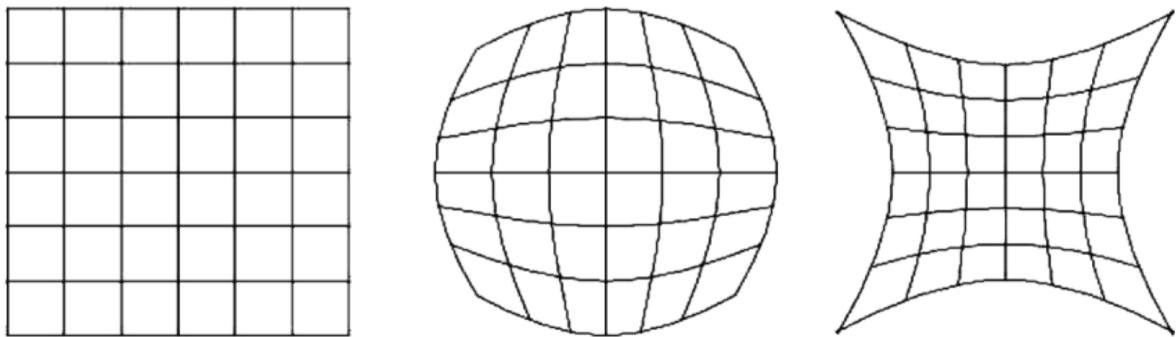
na rovinu obrazu, ktorá sa nachádza na protiľahlej strane od dierky a je paralelná s rovinou, na ktorej sa nachádza ohnisko. Vďaka malému priemeru dierky sa na každý bod v tejto rovine dostanú lúče len z určitého smeru, eliminujúc tak priveľké a nejednoznačné osvetlenie. Týmto spôsobom sa na rovine obrazu po dostatočne dlhej expozícii vytvorí 2D kópia obrazu zachyteného z vonkajšieho sveta. Avšak táto projekcia bude horizontálne otočená o  $180^\circ$ , ako je to znázornené v (a) časti obrázka 1.1.

Na predĺženie tohto javu by bolo ideálne zachytávať vytvorený obraz na inej rovine ešte skôr, než lúče prejdú cez rovinu, na ktorej sa nachádza ohnisko. V skutočnosti je to však nemožné, pretože táto rovina by nemohla byť transparentná, a tým pádom by blokovala lúče vchádzajúce do dierky [10]. Táto rovina je znázornená v (b) časti obrázka 1.1.

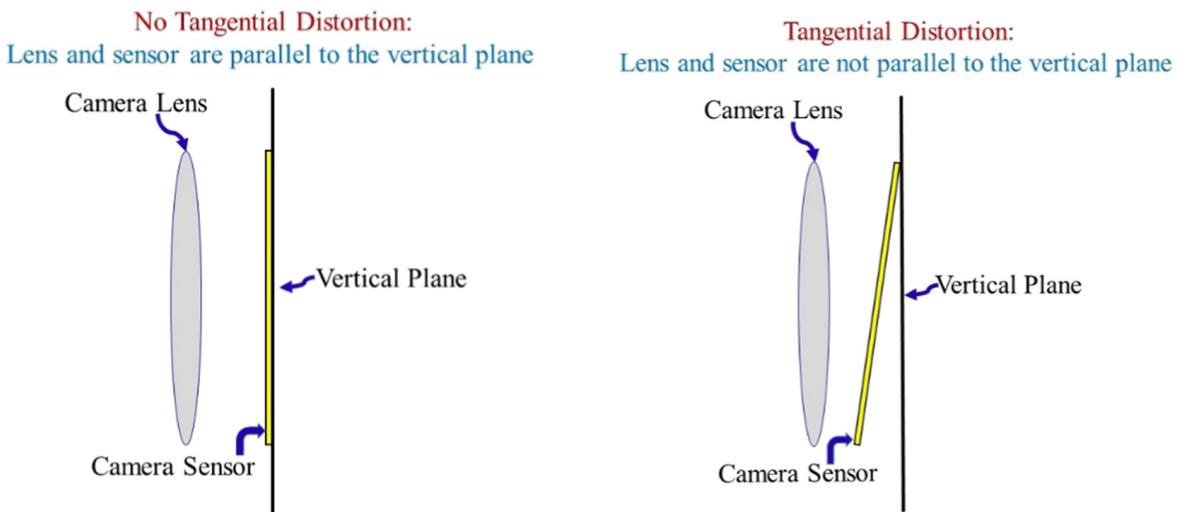
Všetky aspekty, ktoré sme doteraz popísali, majú aj svoj názov. Už sme spomenuli ohnisko, ktoré je zároveň stredom projekcie (center of projection) a rovinu obrazu (image plane). Existuje aj optická os (optical axis), ktorá pretína ohnisko a je kolmá na všetky roviny. Bod, kde optická os pretína novú rovinu obrazu sa nazýva hlavný bod (principal point). Nakoniec, vzdialenosť medzi touto rovinou obrazu a stredom projekcie sa nazýva ohnisková vzdialenosť (focal length). Tieto aspekty vieme pozorovať v (c) časti obrázka 1.1 [10].

### 1.1.3 Skreslenie obrazu

Použitie ideálnych modelov dierkových komôr v praxi však nie je realitou. V skutočnosti totiž musíme v kamerách používať aj šošovky, ktoré sa v ideálnej dierkových komorách nenachádzajú. Tieto šošovky však predstavujú ďalší problém, a to skreslenie obrazu. Existujú dva hlavné typy skreslenia, a to radiálne a tangenciálne. Oba typy sú pre kamerové systémy podstatné, no najmä to radiálne [3].



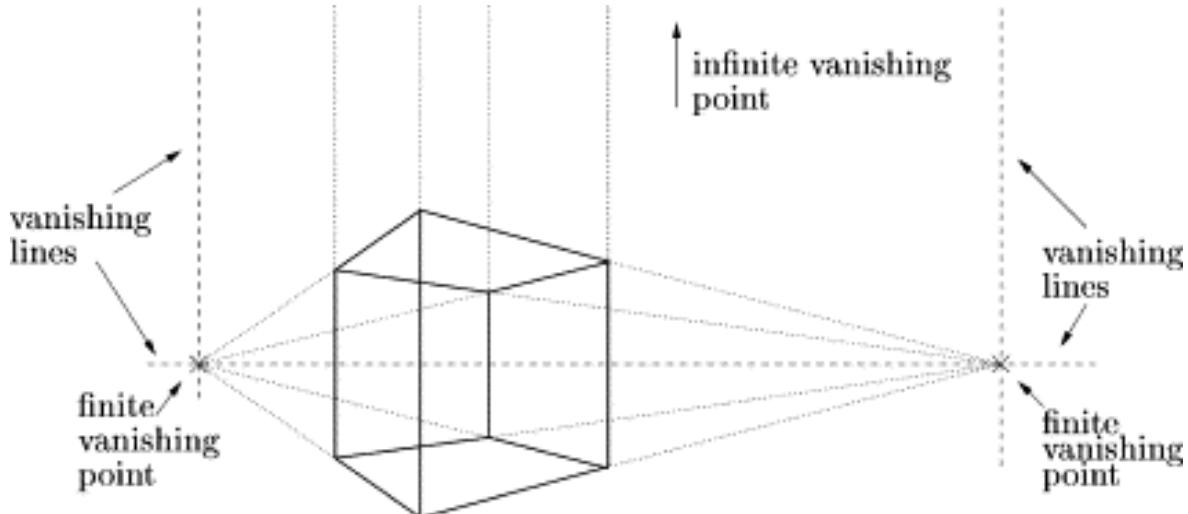
Obr. 1.2: Plocha bez skreslenia (vľavo), súdkovité radiálne skreslenie (v strede), poduškovité radiálne skreslenie (vpravo). [1]



Obr. 1.3: Šošovka (lens) a senzor kamery (sensor) v ideálnej paralelnej polohe (vľavo), tie isté komponenty ale bez vzájomnej paralelnosti. [2]

Radiálne skreslenie je spôsobené oblúkovitým tvarom šošovky. Je to najčastejšie sa vyskytujúce skreslenie u kamier, a veľmi úzko súvisí s ohniskovou vzdialenosťou, ktorú sme popísali vyššie. Existujú dva typy tohto skreslenia, a to súdkovité (barrel) a poduškovité (pincushion). Ak má kamerový systém malú ohniskovú vzdialenosť, dochádza k súdkovitému skresleniu. Na druhej strane, pri veľkej ohniskovej vzdialnosti dochádza k poduškovitému skresleniu [1] [3]. Spolu ich možno vidieť na obrázku 1.2.

Tangenciálne skreslenie vzniká, keď komponenty kamery (ako napríklad šošovka a senzor) nie sú vycentrované, alebo keď nie sú navzájom dokonale paralelné [3]. Existujú matematické výpočty, pomocou ktorých sa však dá aj takéto skreslenie odstrániť [1]. Neortogonálnosť komponentov je vyobrazená na obrázku 1.3.



Obr. 1.4: Tri úbežníky kocky. [6]

## 1.2 Úbežníky

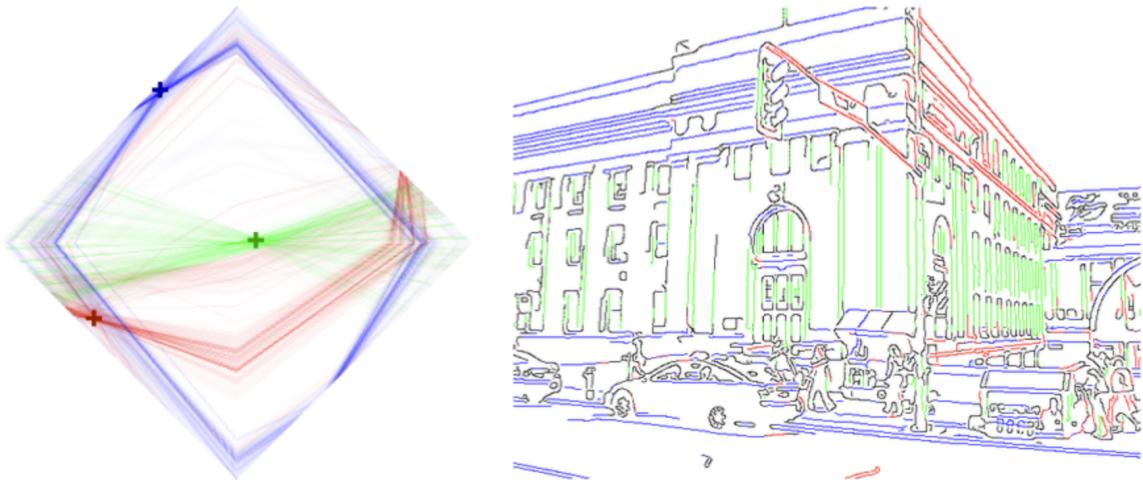
Úbežník je priesecník priamok, respektíve bod v rovine obrazu, do ktorého sa zbiehajú dve alebo viaceré paralelné priamky. Vzniká pri pretransformovaní 3D obrazu na 2D, kedy sa pod istým uhlovým pohľadom priamky paralelné v 3D svete stávajú neparalelnými v 2D svete [7]. Prirodzene, pretože priamky ktoré ho tvoria sú v 3D svete navzájom paralelné, zbiehať sa môžu iba opticky, no nie fyzicky.

### 1.2.1 Typy úbežníkov

Existujú dva typy úbežníkov, konečné a nekonečné [7]. V konečných úbežníkoch sa zbiehajú priamky, ktoré v 2D svete už paralelné nie sú, a v nekonečných zas priamky, ktoré aj po pretransformovaní do 2D sveta ostali paralelné. Aj nekonečné úbežníky však stále považujeme za validné úbežníky, pretože stačí iba zmeniť uhol pohľadu, pod ktorým sa na 3D objekt pozeraeme, a zrazu sa typ úbežníkov môže zmeniť z nekonečného na konečný, a naopak. Hovoríme tak, že konečné úbežníky sú definované pomocou bodu na rovine obrazu, a nekonečné zas podľa smeru otočenia roviny obrazu [6]. Názorná ukážka je zobrazená na obrázku 1.4.

### 1.2.2 Podstata pri kalibrácii kamier

Správne spracovanie obrazu, ktorý zachytávajú dopravné kamery, je jeden z najklúčovnejších problémov, ktorým kalibrácia týchto dopravných kamier čelí. Dá sa povedať, že vo všetkých záberoch z dopravných kamier sa nachádzajú priamky, ktoré sa zbiehajú do úbežníkov. Častokrát sa tieto úbežníky nachádzajú aj mimo záberu kamery. No bez ohľadu na to, či sa úbežníky nachádzajú v zábere alebo nie, je potrebné ich správne



Obr. 1.5: Diamantový priestor (vľavo) farebne znázorňujúci priamky, zachytené z 3D priestoru (vpravo). Priamky sú farebne rozlíšené podľa súradnicových osí v 3D priesotre. [4]

detegovať. V našej práci sa budeme zameriavať hlavne na detekciu úbežníkov vozidiel.

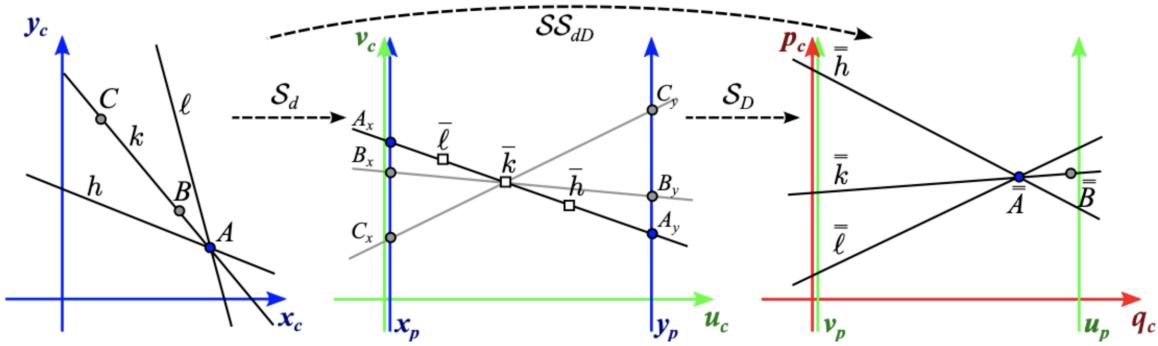
## 1.3 Diamantový priestor

V súčasnosti jeden z najlepších spôsobov spracovania obrazu z kamier používa princíp Houghovej transformácie, ktorý je založený na paralelných súradničiach. Tento princíp efektívne pretransformuje zachytený obraz do jedného konečného priestoru, zvaný diamantový priestor [5]. Svoj názov dostal podľa jeho charakteristického tvaru, pripomínajúci tvar diamantu. Diamantový priestor pôsobí na prvý pohľad pomerne jednoducho, v porovnaní s pôvodným zachyteným priestorom. Je to tak preto, lebo v diamantovom priestore sa vyskytujú už len podstatné časti obrazu, a to priamky, zbiehajúce sa do úbežníkov. Tieto priamky sú pretransformované tak, aby v diamantovom priestore ich prekryv jasne vyznačoval výskyt úbežníkov. Výsledný efekt je možné vidieť na obrázku 1.5.

### 1.3.1 Paralelný súradnicový systém

Ako sme už spomínali, Houghova transformácia používa takzvaný paralelný súradnicový systém. Na rozdiel od klasického súradnicového systému, v ktorom sú osi navzájom kolmé, sú v tomto systéme osi navzájom paralelné.

Pri súradnicovom systéme s dvomi osami existujú spolu štyri rôzne možnosti, ako usporiadať osi tak, aby boli navzájom paralelné. Buď sú obe osi orientované priamo, alebo sú obe otočené, alebo jedna os smeruje priamo a druhá otočené, alebo naopak.



Obr. 1.6: Transformácia bodu do paralelných súradníc. Obe znázornené osi sú v tomto paralelnom systéme orientované priamo. Bod  $A$  sa zmení na priamku definovanú bodmi  $A_x$  a  $A_y$ , a následne späť na bod  $A''$ . [4]

Dostávame tak štyri rôzne modely paralelného súradnicového systému.

### 1.3.2 Vznik diamantového priestoru

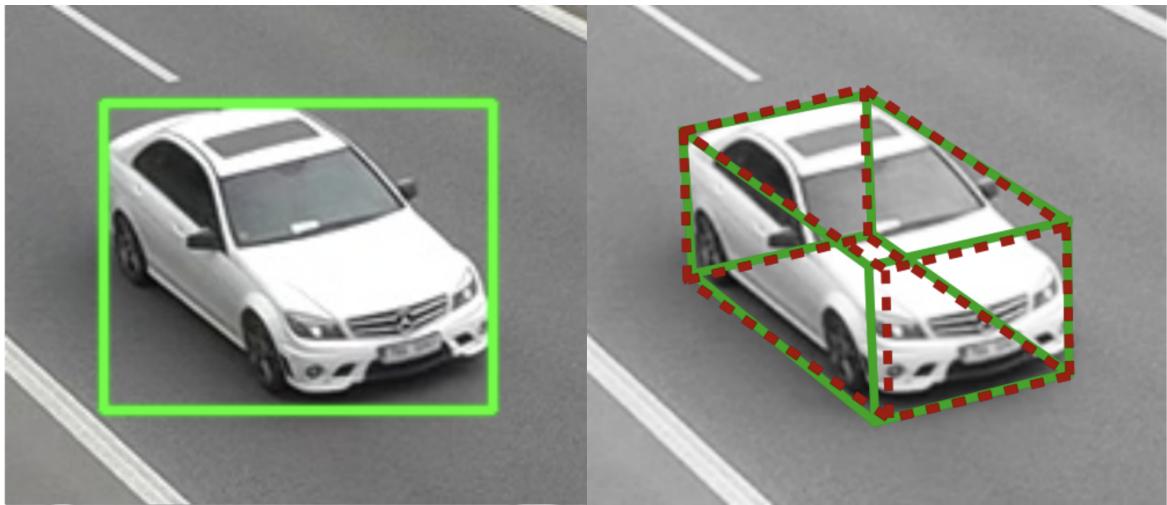
Všetky štyri modely paralelného súradnicového systému sa používajú na efektívne transformovanie bodu (v normálnom súradnicovom systéme) na priamku (v paralelnom súradnicovom systéme) a potom zas späť do bodu (opäť v paralelnom súradnicovom systéme). Podstatné je, že každý zo štyroch možných paralelných súradnicových systémov dáva pri použití iný výsledok. Jedna takáto transformácia je znázornená na obrázku 1.6.

Z jednej hotovej transformácie sa následne zoberie len istá časť roviny, no pre každý systém je to iná časť. Následne sa každá časť transformácie použije ako jeden konečný kvadrant, a práve vďaka kombinácii všetkých štyroch kvadrantov dostávame už spomínaný diamantový priestor. Vďaka týmto transformáciám tak môžeme efektívne mapovať všetky body z nekonečného priestoru (zachyteného kamerou) do konečného, čiže toho v podobe diamantového priestoru [4].

### 1.3.3 Deketovanie pomocou dopravnej kamery

Vyššie popísaný proces vytvárania diamantového priestoru je zovšeobecnený na zachytávanie celého obrazu, ktorý kamera zachytáva. Pri dopravných kamerách je však podstatné rozlísiť, ktoré úbežníky v diamantovom priestore sú paralelné s vozovkou, ktoré sú na ňu kolmé a podobne.

Z tohto dôvodu sa v práci od Dubská et al. [5] berú do úvahy aj body, ktoré reprezentujú pohybujúce sa autá. V jednom momente sa auto nachádza na jednom mieste, a v ďalšom už je avšak posunuté presne v smere úbežníka, do ktorého sa zbiehajú priamky paralelné s vozovkou. Existuje aj model, ktorého účel je vyfiltrovať



Obr. 1.7: Ohraničujúce boxy vozidiel - 2D box (vľavo) a 3D box (vpravo). [5]

hrany len tých objektov, ktoré sú v pohybe. Celkom určite pôjde o vozidlá na ceste. Každým snímkom kamery je tento model aktualizovaný, aby správne rozlíšil samotné vozidlá od ich tieňov, ako aj iných pohybujúcich sa objektov. Z týchto dát potom pomocou diamantového priestoru dostávame jeden z úbežníkov.

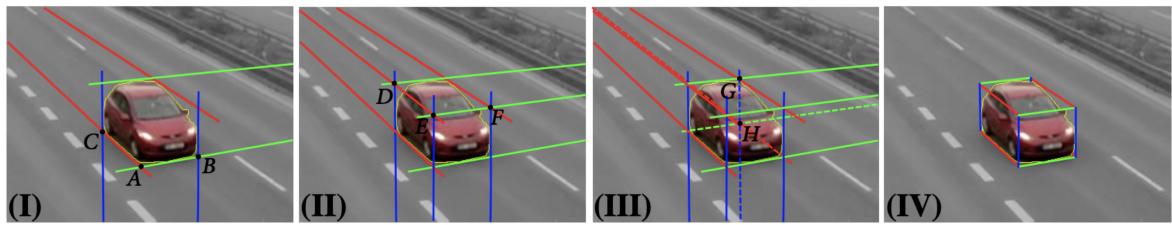
Ďalší úbežník sa dá deketovať aj vďaka poznatku, že jeho korešpondujúce priamky budú kolmé na vozovku. Nevýhodou tohto systému kalibrácie je však predpoklad, že všetky nerovnosti a mierne zatočenia vozovky neprekračujú istú hranicu tolerancie [5].

## 1.4 Ohraničujúce boxy vozidiel

Posledným pojmom, nad ktorým sa v tejto práci pozastavíme, sú ohraničujúce boxy vozidiel. Ide o imaginárny štvorec (2D box) alebo kváder (3D box), ktorý sa automaticky skonštruuje okolo vozidla zo záberoch zachytenými dopravnou kamerou [8]. Všetky hrany boxu obopína vozidlo čo najtesnejšie, pričom však nezasahujú do samotného vozidla. Ukážku ohraničujúcich boxov vieme vidieť na obrázku 1.7.

Metód, ako správne detegovať ohraničujúce boxy, je viacero. V našej práci sa pozrieme hlavne na tú od Dubská et al. [5]. Ich riešenie pracuje s určitými predpokladmi, a to nasledovnými:

- siluety vozidiel možno extrahovať modelovaním pozadia a detekciou popredia
- detekcia približného modelu vozidla v popredí sa dá vykonať spoľahlivo, vrátane odstránenia tieňov
- záujmové vozidlá sa pohybujú smerom k prvému úbežníku, ktorý sme popísali vyššie



Obr. 1.8: Tvorba ohraničujúcich boxov v štyroch krokoch. [5]

#### 1.4.1 Tvorba ohraničujúcich boxov

Vzhľadom na oblé povrhy auta a nepresné modely zachytených vozidiel je poradie, v ktorom sa aké hrany ohraničujúceho boxu tvoria, veľmi dôležité. Tvorba jedného boxu prebieha v štyroch hlavných krokoch.

Ako prvý sa skonštruuje bod  $A$ . Ako vidíme v kroku (I) na obrázku 1.8, je to prie- sečník dolnej červenej a zelenej dotyčnice. Následne je definovaný bod  $B$  ako priesecník dolnej zelenej dotyčnice s pravou modrou, a bod  $C$  ako priesecník dolnej červenej do- tyčnice s ľavou modrou. Spojením týchto bodov dostávame úsečky  $AB$  a  $AC$ , ktoré predstavujú kratšiu a dlhšiu stranu ohraničujúceho boxu vozidla.

Ďalej definujeme bod  $D$ , ktorý leží na priesecníku hornej zelenej dotyčnice a ľa- vej modrej dotyčnice. Nasleduje bod  $E$ , ktorý vieme definovať dvoma spôsobmi. Buď pomocou bodu  $D$ , priamky prechádzajúcou bodom  $A$  a tretím úbežníkom, alebo po- mocou bodu  $F$ . Aby sme si boli istí, že celé vozidlo bude uzavreté v ohraničujúcom boxe, zvolíme tú možnosť bodu  $E$ , ktorá dáva väčšiu vzdialenosť  $|AE|$ . Tieto body sú zachytené v kroku (II) na obrázku 1.8.

Vďaka tomu, že už poznáme bod  $F$ , vieme ďalej definovať bod  $G$ , ktorý je vy- obrazený v kroku (III) na obrázku 1.8. Je to teda bod, v ktorom sa pretína priamka prechádzajúca bodom  $D$  a druhým úbežníkom, s priamkou prechádzajúcou bodom  $F$  a prvým úbežníkom.

Posledným krokom je zlúčenie všetkých bodov a úsečiek, čím dostávame výsledný ohraničujúci box, ktorý aj vidíme v kroku (IV) na obrázku 1.8 [5].

# Záver

...



# Literatúra

- [1] F. BAÁŠ. *Stanovení pozice objektu*. PhD thesis, Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2019.
- [2] Surya SC Congress, Anand J Puppala, and Cody L Lundberg. Total system error analysis of uav-crp technology for monitoring transportation infrastructure assets. *Engineering Geology*, 247:104–116, 2018.
- [3] Pierre Drap and Julien Lefèvre. An exact formula for calculating inverse radial lens distortions. *Sensors*, 16(6):807, 2016.
- [4] Markéta Dubská and Adam Herout. Real projective plane mapping for detection of orthogonal vanishing points. In *BMVC*, 2013.
- [5] Markéta Dubská, Adam Herout, and Jakub Sochor. Automatic camera calibration for traffic understanding. In *BMVC*, 2014.
- [6] Carsten Rother. A new approach to vanishing point detection in architectural environments. *Image and Vision Computing*, 20(9-10):647–655, 2002.
- [7] Kyung-Seok Seo, Jung-Hwa Lee, and Heung-Moon Choi. An efficient detection of vanishing points using inverted coordinates image space. *Pattern Recognition Letters*, 27(2):102–108, 2006.
- [8] Jakub Sochor, Jakub Špaňhel, and Adam Herout. Boxcars: Improving fine-grained recognition of vehicles using 3-d bounding boxes in traffic surveillance. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 20(1):97–108, 2018.
- [9] H. C. Standage. *The Camera Obscura: Its Uses, Action, and Construction*, volume IV, pages 67–71. 1885.
- [10] Carlo Tomasi. A simple camera model. *Notes from computer science*, 527, 2015.