



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
FACULTY OF INFORMATION TECHNOLOGY

ÚSTAV POČÍTAČOVÉ GRAFIKY A MULTIMÉDIÍ
DEPARTMENT OF COMPUTER GRAPHICS AND MULTIMEDIA

**ZOBRAZENÍ LIDAROVÝCH, KAMEROVÝCH
A VEKTOROVÝCH DAT Z ŽELEZNIČNÍHO
MOBILNÍHO MAPOVACÍHO SYSTÉMU**

VISUALIZATION OF LIDAR, CAMERA, AND VECTOR DATA FROM A RAILWAY
MOBILE MAPPING SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ZUZANA MIŠKAŇOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ KLÍMA, Ph.D.

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce



Ústav: Ústav počítačové grafiky a multimédií (UPGM) 164356
Studentka: **Miškaňová Zuzana**
Program: Informační technologie
Název: **Zobrazení lidarových, kamerových a vektorových dat z železničního mobilního mapovacího systému**
Kategorie: Uživatelská rozhraní
Akademický rok: 2024/25

Zadání:

1. Seznamte se možnostmi vizualizace obrazových a geometrických dat z mobilních mapovacích systémů.
2. Navrhněte uživatelský systém pro vizualizaci agregovaných dat ze senzorů umístěných na čele vlaku včetně vektorových mapových dat.
3. Navržený systém implementujte v podobě uživatelské aplikace v prostředí Python s využitím existujících nástrojů a knihoven.
4. Proveďte experimenty s dodanými daty a vyhodnoťte vlastnosti a uživatelskou přívětivost aplikace.
5. Prezentujte dosažené výsledky.

Literatura:

Dle doporučení vedoucího.

Při obhajobě semestrální části projektu je požadováno:

Body 1, 2 a částečně 3.

Podrobné závazné pokyny pro vypracování práce viz <https://www.fit.vut.cz/study/theses/>

Vedoucí práce: **Klíma Ondřej, Ing., Ph.D.**

Vedoucí ústavu: Černocký Jan, prof. Dr. Ing.

Datum zadání: 1.11.2024

Termín pro odevzdání: 14.5.2025

Datum schválení: 12.11.2024

Abstrakt

Cieľom tejto práce je vytvoriť praktický, prehľadný a prispôsobiteľný systém pre vizualizáciu dát z železničného mobilného mapovacieho systému. Tento systém bol implementovaný ako webová aplikácia s využitím programovacieho jazyka Python a aplikačného rámca Dash. Pre optimalizáciu výkonu prebieha vykreslovanie mračna bodov a vektorových dát na strane klienta a riadi ho skript napísaný v jazyku JavaScript, ktorý využíva aplikačný rámec Deck.gl. Vyvinutá aplikácia poskytuje požadovanú funkcionality a pri testovaní použiteľnosti dosiahla nadpriemerný výsledok. Stále by však boli možné ďalšie zlepšenia, najmä čo sa týka prispôsobiteľnosti. Táto nová webová aplikácia má potenciál byť využitá v oblasti vizualizácie dát z mobilných mapovacích systémov. Znalosti získané počas tvorby práce by tiež mohli byť užitočné pre ďalších vývojárov, ktorí vytvárajú systémy pre vizualizáciu dát.

Abstract

The aim of this thesis is to create a practical, clear, and customizable system for visualizing data from a railway mobile mapping system. The system was implemented as a web application using the Python programming language and the Dash framework. For performance optimization, the rendering of the point cloud and vector data is done on the client side and is managed by a script written in the JavaScript programming language, which uses the Deck.gl framework. The resulting application offers sufficient functionality and achieved an above-average result in usability testing. However, there is still room for further improvement, mainly in terms of customizability. This new web application has the potential to be exploited within the field of mobile mapping system data visualizations. The knowledge acquired throughout the work could also be useful to other developers creating visualization systems.

Kľúčové slová

vizualizácia dát, mobilný mapovací systém, lidar, mračno bodov, deck.gl, webová aplikácia, Dash, dierkový model kamery, skreslenie, vykresľovací reťazec

Keywords

data visualization, mobile mapping system, lidar, point cloud, deck.gl, web application, Dash, pinhole camera model, distortion, rendering pipeline

Citácia

MIŠKAŇOVÁ, Zuzana. *Zobrazení lidarových, kamerových a vektorových dat z železničného mobilného mapovacieho systému*. Brno, 2025. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií. Vedoucí práce Ing. Ondřej Klíma, Ph.D.

Zobrazení lidarových, kamerových a vektorových dat z železničního mobilního mapovacího systému

Prehlásenie

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracovala samostatne pod vedením pána Ing. Ondřeja Klímu, Ph.D. Uviedla som všetky literárne pramene, publikácie a ďalšie zdroje, z ktorých som čerpala.

.....
Zuzana Miškaňová
12. mája 2025

Poděkování

Ďakujem môjmu vedúcemu Ing. Ondřejovi Klímovi, Ph.D. za poskytnutú pomoc a cenné rady, ktoré mi v priebehu tvorby práce výrazne pomohli. Taktiež ďakujem všetkým dobrovoľným účastníkom testovania použiteľnosti vyvinutej aplikácie.

Obsah

1	Úvod	3
2	Vizualizácia dát z mobilných mapovacích systémov	4
2.1	Dierkový model kamery	4
2.2	Skreslenie kamery	7
2.3	Vykresľovací reťazec	9
2.4	Framework Deck.gl a jeho nadstavba Pydeck	13
2.5	Nastavenie polohy kamery vo frameworku Deck.gl	14
2.6	Frameworkky pre tvorbu webových aplikácií	17
2.7	Existujúce riešenia	19
3	Návrh aplikácie	21
3.1	Návrh používateľského rozhrania	22
3.2	Problém nahrávania dát do aplikácie	22
4	Implementácia navrhnutej aplikácie	25
4.1	Popis modulov	26
4.2	Rozdelenie dát do vrstiev	29
4.3	Implementácia animácie pohybu po trati	31
4.4	Implementácia skreslenia	32
5	Testovanie a evaluácia	35
5.1	Optimalizácia vykreslovania mračna bodov	35
5.2	Meranie výkonnosti	39
5.3	Vyhodnotenie používateľskej prívetivosti	40
6	Záver	43
	Literatúra	44
A	Projektový súbor	46

Zoznam obrázkov

2.1	Základný princíp dierkového modelu kamery.	5
2.2	Náčrt odvodenia súradníc zobrazovaného bodu u dierkového modelu kamery.	5
2.3	Súradnicový systém so stredom v bode $(-p_x, -p_y, f)^T$ obrazovej roviny.	6
2.4	Radiálne skreslenie kamery ilustrované na mriežke.	8
2.5	Transformácie medzi rôznymi súradnicovými systémami, ktoré sú súčasťou vykreslovacieho retazca.	10
2.6	Frustum u perspektívnej projekcie.	11
2.7	Schéma vzťahov medzi technológiami Pydeck, Dash Deck a Deck.gl.	14
2.8	Kombinácia viacerých transformácií kamery.	16
2.9	Ukážka z webovej stránky platformy Orbit.	19
2.10	Ukážka z webovej stránky platformy Foxglove.	20
3.1	Návrh používateľského rozhrania aplikácie.	24
4.1	Schéma finálnej implementácie.	26
4.2	Snímka obrazovky finálnej implementácie.	27
4.3	Schéma rozdelenia dát do vrstiev.	29
4.4	Nastaviteľná farebná škála pre mračno bodov.	30
4.5	Schéma cyklického prepisovania vrstiev obsahujúcich mračno bodov typu real-time.	32
4.6	Graf závislostí modulov vo finálnej implementácii.	34
5.1	Funkcionalita posuvníkov pre prispôsobenie polohy virtuálnej kamery.	36
5.2	Profilovanie animácie pohybu po trati pri použití rôznych spôsobov vykreslovania mračna bodov.	38

Kapitola 1

Úvod

Pre technológie dnešnej doby je typické, že produkujú veľké množstvo dát. Pri analýze a spracúvaní týchto dát hrajú veľmi dôležitú úlohu systémy pre ich zobrazenie. Rôzne typy dát si pritom vyžadujú špecializované zobrazovacie systémy. U týchto systémov je dôležitá prehľadnosť, presnosť a intuitívnosť, aby mohli byť efektívne využité.

Táto práca sa zaoberá tvorbou webovej aplikácie, ktorá zobrazuje dátá z železničného mobilného mapovacieho systému, teda zo senzorov umiestnených na čele vlaku, z pohľadu strojvedúceho. Dátá zachytávajú železničnú trať a jej okolie a skladajú sa z kamerového záznamu a mračna bodov nasnímaného lidarom, čo je systém pre diaľkové meranie vzdialnosti podobný radaru. Aplikácia má okrem toho schopnosť zobrazovať aj ľubovoľné vektorové dátá, ktoré môžu byť odvodené z máp alebo byť výsledkom spracovania mračna bodov.

Toto zadanie som si vybrala preto, že zahŕňa tvorbu jedinečného systému, ktorý má potenciál byť využitý v praxi v oblasti analýzy a spracovávania dát z mobilných mapovacích systémov, ktorá je pre mňa zaujímavá.

Sadu dát pre vývoj a testovanie aplikácie poskytla spoločnosť AŽD Praha s.r.o. a pochádza z autonómneho vlaku, ktorý premáva na súkromnej experimentálnej železničnej trati Kopidlno – Dolní Bousov.

Kapitola 2 sa zaoberá popisom teoretických základov snímania obrazu kamerou a vykreslovania trojrozmerných dát v počítačovej grafike, ktorých znalosť bola pri tvorbe práce nutná. Je v nej opísaný dierkový model kamery, modely skreslenia reálnych kamier a vykresľovací reťazec. Ďalej sa v nej nachádza analýza technológií, ktoré je možné použiť k tvorbe webovej aplikácie splňajúcej požadované vlastnosti, a to najmä aplikačných rámcov Dash a Deck.gl.

Nasledujúca kapitola 3 obsahuje návrh aplikácie, ktorý sa zaoberá nielen návrhom funkcionality a používateľského rozhrania, ale aj problémom nahrávania dát.

Predmetom kapitoly 4 je popis implementácie navrhnutej aplikácie v programovacom jazyku Python s pomocným skriptom v jazyku JavaScript, ktorý slúži na optimalizáciu vykreslovania mračna bodov, čo bolo pri tvorbe práce najväčšou výzvou, pretože práve mračno bodov tvorí najväčšiu časť zobrazovaných dát. Je uvedený prehľad funkcionality jednotlivých modulov a bližší popis najdôležitejších častí kódu.

Na záver je v kapitole 5 vyhodnotená výkonnosť a používateľská prívetivosť aplikácie.

Kapitola 2

Vizualizácia dát z mobilných mapovacích systémov

Výstupom mobilného mapovacieho systému je množstvo dát z rôznych senzorov. Dáta, ktoré boli poskytnuté k tvorbe tejto práce, obsahovali v prvom rade mračná bodov získané z lidaru. Aby bolo možné s týmito mračnami bodov pracovať a vhodne ich zobrazovať, je potrebné, aby mobilný mapovací systém zaznamenával údaje o svojej polohe. V tomto prípade boli k dispozícii údaje o transláciách a rotáciách kamery s časovými pečiatkami. Ďalej býva súčasťou mobilného mapovacieho systému klasická kamera. Pre zobrazenie mračna bodov takým spôsobom, aby sa zobrazenie čo najviac zhodovalo s kamerovým záznamom, je nutné poznáť parametre kamery – kalibračnú maticu a prípadne aj parametre skreslenia.

Pri vývoji aplikácie, ktorá má umožniť vizualizáciu týchto dát a navyše aj ďalších vektorových dát, je nutné poznáť základné princípy zobrazovania 3D dát v počítačovej grafike. Ďalej je potrebné vybrať si a naštudovať technológie, pomocou ktorých bude aplikácia vytvorená, a to konkrétnie niektorý z frameworkov (aplikáčnych rámcov) pre tvorbu aplikácií v jazyku Python a vhodný framework pre zobrazenie grafických dát. Všetko toto je predmetom tejto kapitoly.

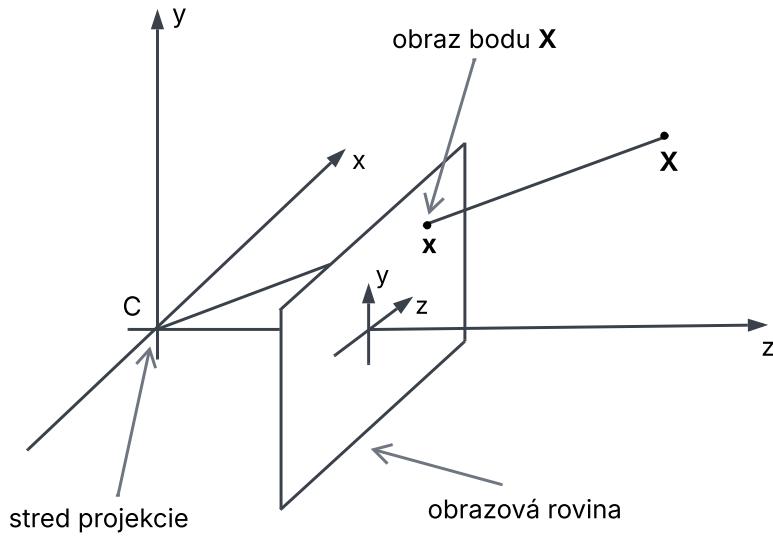
2.1 Dierkový model kamery

Zdrojom všetkých informácií, ktoré budú uvedené v tejto sekcii, je kniha *Multiple View Geometry in Computer Vision* od autorov R. Hartley a A. Zisserman [10].

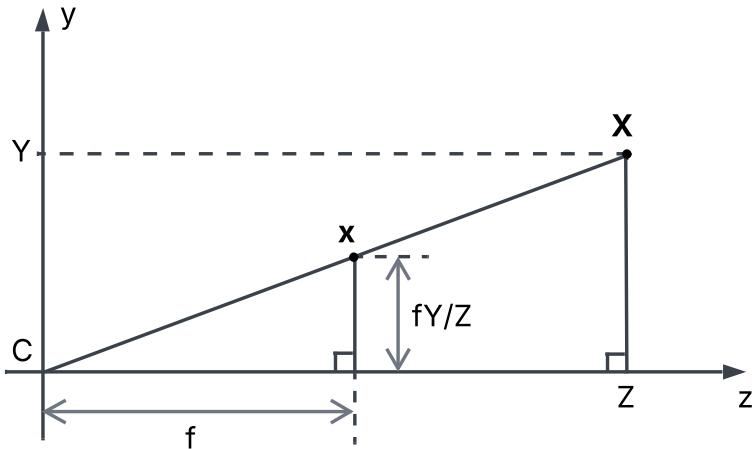
Kamera je v oblasti počítačovej grafiky a počítačového videnia pojem, ktorý označuje projekciu bodov z trojrozmerného priestoru do roviny. Túto projekciu je možné vyjadriť pomocou matíc a je väčšinou bodová (*central projection*).

Existuje niekoľko rôznych modelov kamery, z ktorých najjednoduchší je dierkový model kamery (*pinhole camera model*). U tohto modelu je stred projekcie **C** (*camera centre*) v počiatku Euklidovského súradnicového systému a body sa premietajú do roviny $z = f$, ktorá sa označuje ako obrazová rovina (*image plane*).

Princíp zobrazenia je nasledovný: obrazom bodu $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ je bod \mathbf{x} , kde priamka vedúca bodom \mathbf{X} a stredom projekcie **C** pretína obrazovú rovinu (obrázok 2.1). Z podobnosti trojuholníkov je možné odvodiť, že bod \mathbf{x} má súradnice $(fX/Z, fY/Z, f)^T$, postup je naznačený na obrázku 2.2.



Obr. 2.1: Základný princíp dierkového modelu kamery. Prevzaté z [10].



Obr. 2.2: Náčrt odvodenia súradníc bodu \mathbf{x} . Prevzaté z [10].

Kedže všetky obrazy bodov ležia v obrazovej rovine $z = f$, je možné poslednú súradnicu zanedbať a zapisovať súradnice bodu \mathbf{x} v súradnicovom systéme obrazovej roviny ako $(fX/Z, fY/Z)^T$.

Túto projekciu môžeme v homogénnych súradničiach zapísať pomocou násobenia matíc (rovinka 2.1).

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} fX \\ fY \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X} = \mathbf{P}\mathbf{X} \quad (2.1)$$

Maticu \mathbf{P} nazývame projekčnou maticou kamery (*camera projection matrix*).

Rozšírenia základného dierkového modelu kamery

V praxi väčšinou chceme vyjadriť body na obrazovej rovine v súradnicovom systéme, ktorý nemá stred v bode $(0, 0, f)^T$, ale v ľubovoľnom bode $(-p_x, -p_y, f)^T$ (obrázok 2.3). Obrazom bodu $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ (v súradnicovom systéme kamery) potom bude bod $\mathbf{x} = (fX/Z + p_x, fY/Z + p_y, f)^T$ (v súradnicovom systéme obrazovej roviny). To je možné zahrnúť do projekčnej matice (rovnice 2.2 a 2.3).

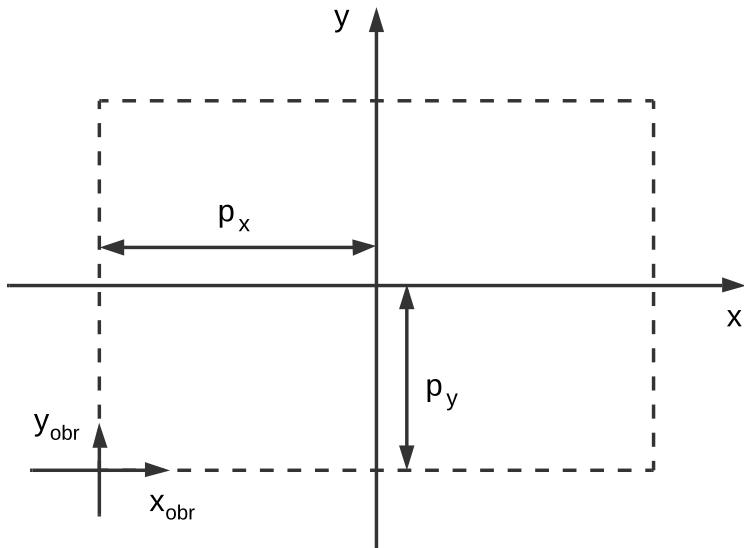
$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} fX/Z + p_x \\ fY/Z + p_y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fX + Zp_x \\ fY + Zp_y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} f & p_x & 0 \\ f & p_y & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} f & p_x & 0 \\ f & p_y & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Maticu

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f & p_x \\ f & p_y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

nazývame kalibračnou maticou kamery (*camera calibration matrix*) a medzi ňou a projekčnou maticou platí vzťah $\mathbf{P} = [\mathbf{K}|0]$, kde 0 predstavuje nulový stĺpcový vektor.



Obr. 2.3: Súradnicový systém so stredom v bode $(-p_x, -p_y, f)^T$ obrazovej roviny. Prevzaté z [10].

U niektorých kamier je možné, že súradnicový systém obrazovej roviny nemá rovnakú mierku na oboch osiach. Vtedy sú v kalibračnej matici namiesto parametra f parametre f_x, f_y (rovnica 2.5).

$$K' = \begin{bmatrix} f_x & p_x \\ f_y & p_y \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Parametre p_x , p_y a f , prípadne f_x a f_y označujeme ako **vnútorné parametre kamery**.

Až doteraz sme predpokladali, že kamera má stred v počiatku súradnicovej sústavy a je „otočená“ v smere osi z , t. j. že obrazová rovina je rovnobežná s rovinou xy . V praxi to tak však nebýva a kamera má v súradnicovom systéme, v ktorom sú definované zobrazované body, istú rotáciu a transláciu. V takom prípade rozlišujeme všeobecný súradnicový systém a súradnicový systém kamery (*world coordinate frame* a *camera coordinate frame*).

Ak $\tilde{\mathbf{X}}$ je vektor súradníc bodu \mathbf{X} vo všeobecnom súradnicovom systéme a vektor $\tilde{\mathbf{X}}_{\text{cam}}$ reprezentuje ten istý bod v súradnicovom systéme kamery, tak platí vzťah 2.6.

$$\tilde{\mathbf{X}}_{\text{cam}} = R(\tilde{\mathbf{X}} - \tilde{\mathbf{C}}) \quad (2.6)$$

$\tilde{\mathbf{C}}$ sú súradnice stredu kamery vo všeobecnom súradnicovom systéme a R je rotačná matica s rozmermi 3×3 reprezentujúca orientáciu súradnicového systému kamery. To viedie k novému vyjadreniu projekčnej matice ako $P = KR[I] - \tilde{\mathbf{C}}$, kde I je jednotková matica s rozmermi 3×3 .

Parametre R a $\tilde{\mathbf{C}}$ označujeme ako **vonkajšie parametre kamery**.

2.2 Skreslenie kamery

Dierkový model kamery zodpovedá spôsobu, akým zachytávajú obraz reálne kamery, iba približne, ale nie presne. Obraz z reálnej kamery má zvyčajne navyše ešte skreslenie.

Existujú rôzne modely skreslenia, z ktorých najčastejšie používané sú radiálne skreslenie (*radial distortion*) a tangenciálne skreslenie (*tangential/decentering distortion*) [20].

Radiálne skreslenie vzniká v dôsledku rozdielneho lomu lúčov v strede a na okraji šošovky a je tým väčšie, čím menšia je šošovka. Príklad radiálneho skreslenia je na obrázku 2.4. Tangenciálne skreslenie vzniká vtedy, keď šošovka nie je rovnobežná s obrazovou rovinou [22]. Reálne kamery zvyčajne majú radiálne skreslenie väčšie než tangenciálne [12].

Radiálne skreslenie sa počíta vzťahmi 2.7 [11].

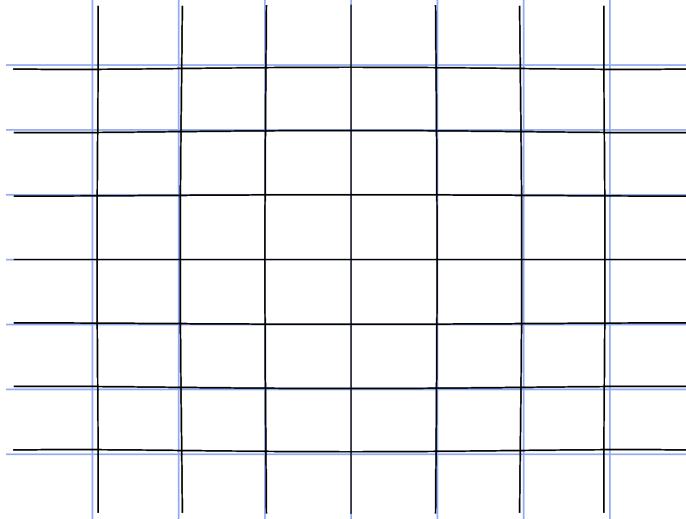
$$\begin{aligned} x_{\text{distorted}} &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \\ y_{\text{distorted}} &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Význam premenných je nasledovný:

- x, y sú normalizované obrazové súradnice (*normalized image coordinates*) bodu pred skreslením,
- k_1, k_2, k_3 sú koeficienty radiálneho skreslenia,
- $r^2 = x^2 + y^2$.

Normalizovaný obrazový súradnicový systém je kartesiánsky súradnicový systém, ktorý má tieto vlastnosti:

- Jeho stred je v strede obrazu,
- Väčšia dimenzia obrazu má veľkosť 1.



Obr. 2.4: Radiálne skreslenie ilustrované na mriežke. Bledomodrá mriežka je pôvodná, čierna skreslená. Pri tvorbe obrázku boli použité skutočné parametre radiálneho skreslenia kamery mobilného mapovacieho systému, ktoré boli súčasťou dát dodaných k tvorbe tejto práce: $k_1 = -0.183217$, $k_2 = 0.026917$, $k_3 = 0.335446$

Teda napríklad obraz s pomerom strán 4:3 bude v normalizovanom obrazovom súradnicovom systéme obdĺžnik s ľavým dolným rohom v bode $[-0.5, 3/4 \times (-0.5)]$ a pravým horným rohom v bode $[0.5, 3/4 \times 0.5]$.

Prevod zo súradníc pixelu v obraze s rozlíšením $w \times h$ pixelov do normalizovaných obrazových súradníc je popísaný vzťahmi 2.8 [15].

$$x_{norm} = \frac{x_{pix} - \frac{w-1}{2}}{\max(w, h)}, \quad y_{norm} = \frac{y_{pix} - \frac{h-1}{2}}{\max(w, h)} \quad (2.8)$$

Tangenciálne skreslenie sa počíta vzťahmi 2.9 [11].

$$\begin{aligned} x_{distorted} &= x + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_{distorted} &= y + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \end{aligned} \quad (2.9)$$

Význam premenných je nasledovný:

- x, y, r^2 sú rovnaké ako u radiálneho skreslenia,
- p_1, p_2 sú koeficienty tangenciálneho skreslenia.

Pre výpočet radiálneho a tangenciálneho skreslenia zároveň platia vzťahy 2.10 [20].

$$\begin{aligned} x_{distorted} &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + [2p_1xy + p_2(r^2 + 2x^2)] \\ y_{distorted} &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) + [p_1(r^2 + 2y^2) + 2p_2xy] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Koeficienty skreslenia sa zvyčajne udávajú ako päťica 2.11 [11].

$$(k_1, k_2, p_1, p_2, k_3) \quad (2.11)$$

Proces zisťovania parametrov kamery, vrátane koeficientov skreslenia, sa nazýva kalibrácia kamery (*camera calibration*) [22].

2.3 Vykresľovací reťazec

Proces vykresľovania trojrozmerných objektov na dvojrozmernú obrazovku v počítačovej grafike pozostáva z viacerých transformácií. Vykreslované objekty sú postupne prevádzané cez niekoľko súradnicových systémov pomocou transformačných matíc.

Abstraktný model, ktorý popisuje sériu krokov potrebných k zobrazeniu trojrozmernej scény zloženej z viacerých objektov, sa nazýva vykresľovací reťazec (*graphics/rendering pipeline*). Vykresľovací reťazec zahŕňa popis prenosu dát na grafickú kartu, výpočet finálnej polohy objektu na obrazovke, rasterizáciu (určenie, ktoré pixely zodpovedajú vektorovo popísaným objektom) a výpočet farby pixelov [19].

Vykresľovací reťazec môže mať rôzne podoby. V tejto sekcii je popísaná verzia, ktorú používa knižnica OpenGL, pretože, ako bude popísané v sekcií 2.4, pri implementácii tejto práce bol použitý framework, ktorý používa rozhranie WebGL, ktoré je založené práve na knižnici OpenGL [21].

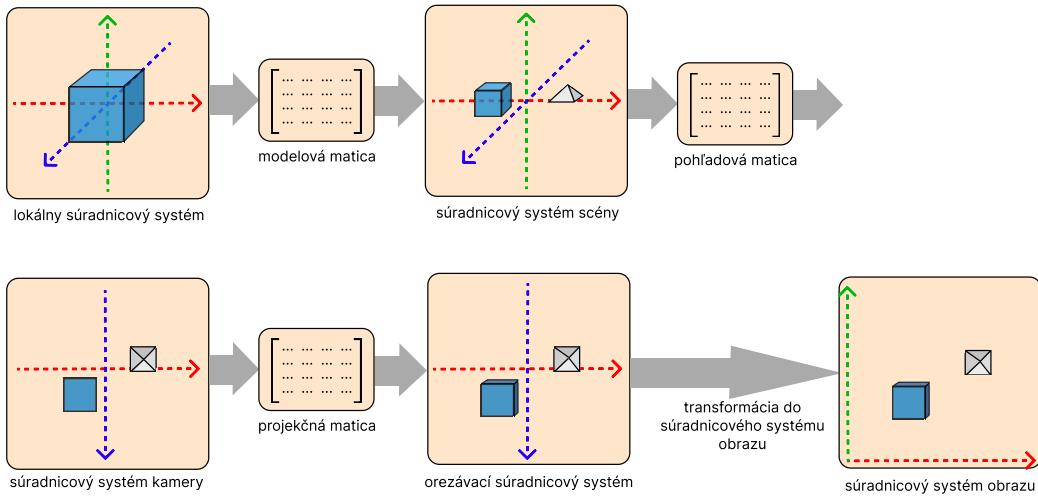
Vykreslované objekty sa typicky skladajú z bodov (*vertices*) pospájaných hranami do trojuholníkov [19]. Táto sekcia sa bude zaoberať iba popisom transformácie bodov z lokálneho súradnicového systému do finálnej polohy vo vykreslenom obraze.

Na začiatku vykreslovacieho reťazca sú body v lokálnom súradnicovom systéme (*local/object space*, každý objekt má vlastný súradnicový systém), s homogénnymi súradnicami v tvare $V_{local} = (x, y, z, 1)^T$. Potom prechádzajú transformáciami, ktoré sa počítajú násobením súradníc bodu maticami a sú znázornené na obrázku 2.5. Sú to nasledujúce transformácie:

1. Modelová transformácia (*model transformation*). Každý objekt vo vykreslovanej scéne má vlastnú modelovú maticu M_{model} (*model matrix*), ktorá popisuje jeho pozíciu, orientáciu a veľkosť v scéne. Po modelovej transformácii sú súradnice bodov v súradnicovom systéme scény (*world space*) [7, 19].
2. Pohľadová transformácia (*view transformation*). Prevádzza body zo súradnicového systému scény do súradnicového systému kamery (*view/camera/eye space*). Zodpovedá jej pohľadová matica M_{view} (*view matrix*), ktorá popisuje polohu a orientáciu kamery v súradnicovom systéme scény [7, 19].
3. Projekcia (*projection transformation*). Je buď ortografická, alebo perspektívna. Prevádzza body zo súradnicového systému kamery do orezávacieho súradnicového systému (*clip space*). Určuje, ktoré body scény budú viditeľné a ktoré nie, pretože sa zobrazia iba body, ktoré budú mať v orezávacom súradnicovom systéme všetky súradnice v intervale $(-1, 1)$ [19]. Týmto súradniciam sa hovorí aj *normalized device coordinates* (NDC). Oblast v súradnicovom systéme scény, ktorá bude vo finálnom obraze viditeľná, sa nazýva *frustum*. U ortografickej projekcie má tvar kvádra a u perspektívnej projekcie má tvar zrezaného ihlana [7], čo ilustruje obrázok 2.6. Zodpovedá jej projekčná matica (*projection matrix*), pre ktorú platí vzťah 2.12 [1].

$$M_{projection} = \begin{pmatrix} k_1 & 0 & k_2 & 0 \\ 0 & k_3 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(f+n)}{f-n} & \frac{-2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Premenné n a f zodpovedajú vzdialenosťam prednej a zadnej orezávacej rovniny od kamery (*near plane* a *far plane*, znázornené na obrázku 2.6).



Obr. 2.5: Transformácie medzi rôznymi súradnicovými systémami, ktoré sú súčasťou vykreslovacieho reťazca. Prevzaté z [7].

Po vynásobení projekčnou maticou budú súradnice bodov v tvare $(x, y, z, w)^T$. V tejto fáze je potrebné vydeliť ich homogénnu zložku, čím vznikne tvar $(x/w, y/w, z/w, 1)^T$, aby bolo možné zistiť, či sú všetky súradnice v intervale $(-1, 1)$, a teda či bude bod súčasťou výsledného obrazu. Táto operácia sa nazýva perspektívne delenie (*perspective division*) [7].

4. Transformácia do súradnicového systému obrazu (*viewport transform*). Prevádzza body z orezávacieho súradnicového systému do súradnicového systému finálneho obrazu (*screen space*) [7]. Matica, ktorá vykonáva túto transformáciu, sa nazýva *viewport transform matrix* a platí pre ňu vzťah 2.13 [2].

$$M_{viewport} = \begin{pmatrix} \frac{w}{2} & 0 & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & \frac{h}{2} & 0 & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & \frac{f-n}{2} & \frac{f+n}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Premenné w a h predstavujú výšku a šírku obrazu v pixeloch.

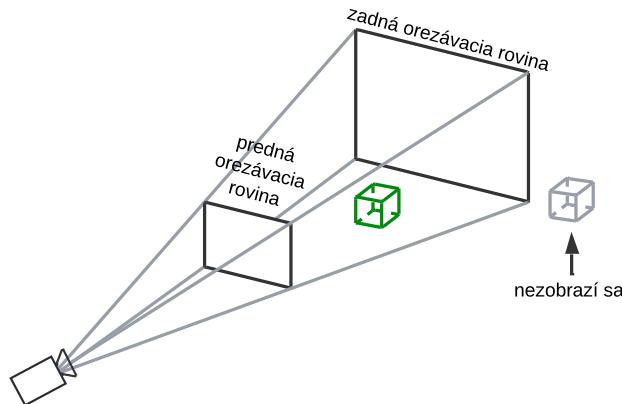
Pozíciu bodu V_{local} vo finálnom vykreslenom obraze scény je teda možné matematicky vyjadriť ako súčin 2.14 [7].

$$M_{viewport} \cdot M_{projection} \cdot M_{view} \cdot M_{model} \cdot V_{local} \quad (2.14)$$

Transformácia z lokálneho súradnicového systému do NDC prebieha na programovateľnej časti grafickej karty, ktorá sa nazýva *vertex shader* [7].

Vzťah vykreslovacieho reťazca k dierkovému modelu kamery

Vykreslovačí reťazec a dierkový model kamery sú modely, ktoré sú si podobné, pretože sa oba zaobrajú transformáciou trojrozmernej scény do dvojrozmerného obrazu. Používajú sa však



Obr. 2.6: *Frustum* – oblasť v súradnicovom systéme scény, ktorá bude vo finálnom obraze viditeľná – u perspektívnej projekcie. Prevzaté z [7].

v odlišných oblastiach – dierkový model kamery sa typicky používa v teórii počítačového videnia a vykreslovací reťazec sa týka počítačovej grafiky a zobrazovania trojrozmerných modelov.

Rozdiely a podobnosti oboch modelov je možné zhrnúť týmito bodmi:

- Dierkový model kamery nemá nič zodpovedajúce modelovej transformácii. Zobrazované body sú už od začiatku v rovnakom súradnicovom systéme ako kamera.
- Pohľadová transformácia zodpovedá vonkajším parametrom kamery.
- Vnútorné parametre kamery zodpovedajú projekcii a transformácii do súradnicového systému obrazu. Vykreslovací reťazec má špeciálny medzistupeň – orezávací súradnicový systém, ktorý dierkový model kamery nemá.
- Dierkový model kamery je jednoduchší, pretože na rozdiel od vykreslovacieho reťazca nemá prednú a zadnú orezávaciu rovinu a nerieši prekrývanie objektov. Vykrelovací reťazec ponecháva aj vo finálnych súradničiach bodu v obraze hodnotu z , teda hĺbkou, aby u prekrývajúcich sa objektov bolo možné zistiť, ktorý z nich je v popredí. Dierkový model kamery nič také nezahŕňa.

Za poznámku stojí, že v oboch modeloch sa vyskytuje termín *projekčná matica*, ale ide o dve rôzne matice.

V rámci tejto práce bolo potrebné skombinovať znalosti z oboch oblastí, pretože súčasťou dodaných dát bola kalibračná matica kamery, pomocou ktorej mali byť dátá zobrazené, ale použitý framework si vyžadoval zadáť projekčnú maticu (tú z vykreslovacieho reťazca).

Problém sa dá formulovať nasledovne: je známa projekčná matica (tá z dierkového modelu kamery), ktorá prevádzka body zo súradnicového systému kamery priamo do súradnicového systému obrazu, pričom nepočíta hodnotu hĺbky. Je potrebné vypočítať projekčnú maticu, ktorá bude prevádzkať body zo súradnicového systému kamery do orezávacieho súradnicového systému tak, aby následne po automatickom prevode do súradnicového systému obrazu výsledný obraz zodpovedal zadanej projekčnej matici. Rozmery $w \times h$ výsledného obrazu sú známe.

Riešenie je možné matematicky odvodiť. Známa projekčná matica, ktorá prevádzza body priamo do súradnicového systému obrazu, má tvar 2.15.

$$P = \begin{pmatrix} f_x & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f_y & p_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Potrebuje nájsť maticu $M_{projection}$ takú, aby platila rovnosť 2.16.

$$M_{viewport} \cdot M_{projection} \cdot V_{view} = P \cdot V_{view} \quad (2.16)$$

Teda potrebujeme nájsť také parametre k_1, k_2, k_3 a k_4 také, aby platila rovnosť 2.17.

$$\begin{pmatrix} \frac{w}{2} & 0 & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & \frac{h}{2} & 0 & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & \frac{f-n}{2} & \frac{f+n}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} k_1 & 0 & k_2 & 0 \\ 0 & k_3 & k_4 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(f+n)}{f-n} & \frac{-2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & p_x & 0 \\ 0 & f_y & p_y & 0 \\ ? & ? & ? & ? \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Ozázniky pridané do matice P v rovnosti 2.17 zastupujú výpočet súradnice z , ktorý pôvodná matica neobsahovala, ale pri vykreslovaní trojrozmernej scény v počítačovej grafike je nutný.

Rovnosť 2.17 je možné zjednodušiť na rovnosť 2.18. Tá po vydelení súradníc bodov homogénnou súradnicou (perspektívne delenie) nadobudne tvar 2.19, ktorý napokon zjednodušíme na tvar 2.20.

$$\begin{pmatrix} \frac{w}{2} & 0 & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & \frac{h}{2} & 0 & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & \frac{f-n}{2} & \frac{f+n}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} k_1x + k_2z \\ k_3y + k_4z \\ \frac{-(f+n)}{f-n}z + \frac{-2fn}{f-n} \\ -z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_xx + p_xz \\ f_yy + p_yz \\ ?z+? \\ z \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{w}{2} & 0 & 0 & \frac{w}{2} \\ 0 & \frac{h}{2} & 0 & \frac{h}{2} \\ 0 & 0 & \frac{f-n}{2} & \frac{f+n}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -k_1\frac{x}{z} - k_2 \\ -k_3\frac{y}{z} - k_4 \\ \frac{(f+n)}{f-n} + \frac{2fn}{z(f-n)} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x\frac{x}{z} + p_x \\ f_y\frac{y}{z} + p_y \\ ? + \frac{?}{z} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.19)$$

$$\begin{pmatrix} -k_1\frac{w}{2}\frac{x}{z} + \frac{w}{2}(1 - k_2) \\ -k_3\frac{h}{2}\frac{y}{z} + \frac{h}{2}(1 - k_4) \\ f + n + \frac{fn}{z} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x\frac{x}{z} + p_x \\ f_y\frac{y}{z} + p_y \\ ? + \frac{?}{z} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Z rovnosti 2.20 vyplýva, že parametre n a f je možné zvoliť ľubovoľne, pretože ich zadaná matica nedefinuje, a že musia platiť vzťahy 2.21.

$$\begin{aligned} -k_1\frac{w}{2} &= f_x, & \frac{w}{2}(1 - k_2) &= p_x, \\ -k_3\frac{h}{2} &= f_y, & \frac{h}{2}(1 - k_4) &= p_y \end{aligned} \quad (2.21)$$

Tým sme dospeli k hľadanému vyjadreniu parametrov k_1, k_2, k_3 a k_4 vzťahmi 2.22.

$$\begin{aligned} k_1 &= -\frac{2f_x}{w}, \quad k_2 = 1 - \frac{2p_x}{w}, \\ k_3 &= -\frac{2f_y}{h}, \quad k_4 = 1 - \frac{2p_x}{w} \end{aligned} \tag{2.22}$$

Hľadaná projekčná matica má teda tvar 2.23.

$$M_{projection} = \begin{pmatrix} -\frac{2f_x}{w} & 0 & 1 - \frac{2p_x}{w} & 0 \\ 0 & -\frac{2f_y}{h} & 1 - \frac{2p_x}{w} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-(f+n)}{f-n} & \frac{-2fn}{f-n} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \tag{2.23}$$

2.4 Framework Deck.gl a jeho nadstavba Pydeck

Pri vývoji webovej aplikácie pre vizualizáciu väčšieho množstva dát, u ktorej má vykreslovanie prebiehať na strane klienta, teda vo webovom prehliadači, sa hodí priamo či nepriamo použiť niektorý z frameworkov pre zobrazovanie dát v jazyku JavaScript.

Takým vhodným frameworkom je napríklad Deck.gl, ktorý je určený na zobrazovanie veľkých sád dát. Je zameraný najmä na zobrazovanie geografických dát na mapových podkladoch, ale hodí sa aj na iné typy dát. Vyznačuje sa vysokou presnosťou a výkonnosťou. Pre akceleráciu využíva rozhrania WebGPU a WebGL2 [13].

Vizualizácia dát sa vo frameworku Deck.gl skladá z dvoch základných častí:

- **Vrstvy (Layers).** Do vrstiev sa ukladajú zobrazované dátá. Framework Deck.gl ponúka vyše 30 preddefinovaných typov vrstiev, ktoré zodpovedajú rôznym často sa vyskytujúcim typom dát. Pre túto prácu je významná najmä vrstva **PointCloudLayer**, ktorá je určená na zobrazenie mračna bodov, a vrstva **PathLayer**, ktorá je určená na zobrazenie trás.
- **Pohľad (View).** Definuje vlastnosti kamery, napríklad zorné pole a prednú a zadnú orezávaciu rovinu (*near plane* a *far plane*). Je možné buď určiť všetky tieto vlastnosti osobitne, alebo rovno zadať vypočítanú projekčnú maticu. Časť **ViewState** určuje polohu a orientáciu kamery, pričom u orientácie je možné určiť iba dva uhly (*bearing* a *pitch*). Typ pohľadu definuje spôsob interakcie vizualizácie s používateľom, napríklad pre zobrazenie trate z pohľadu strojvedúceho je ideálny typ **FirstPersonView**.

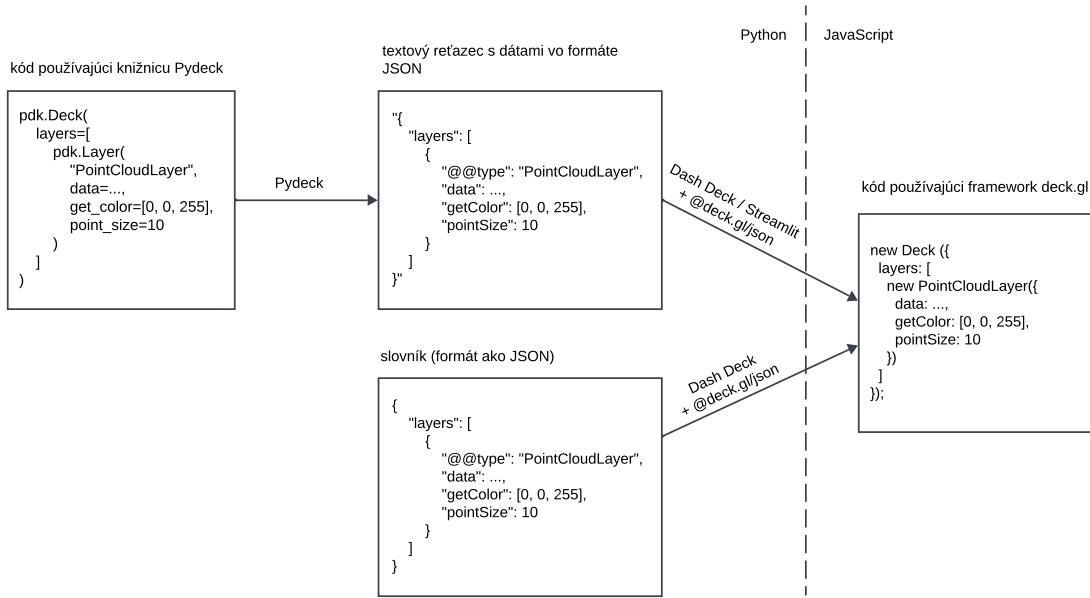
To, že sa framework Deck.gl na vizualizáciu dát z mobilného mapovacieho systému hodí, dokazujú ukážky na jeho webových stránkach. Použiteľnosť vrstvy **PointCloudLayer** demonštruje plynulá animácia mračna vyše 800 000 bodov.

Na webových stránkach frameworku Deck.gl sa tiež nachádza galéria pomocou neho vytvorených projektov. Medzi nimi je aj Autonomous Visualization System (AVS), toolkit pre vývoj webových aplikácií pre vizualizáciu dát z autonómnych vozidiel [24]. Na webových stránkach tohto projektu je ukážka takej aplikácie, ktorá je podobná aplikácii vyvájanej v rámci tejto práce. Bližší popis AVS sa nachádza v sekcií 2.7.

Hoci je framework Deck.gl primárne určený pre použitie v jazyku JavaScript, je možné použiť ho aj v jazyku Python, a to pomocou knižnice **Pydeck**. Tá je pomerne jednoduchá a podstatou jej činnosti je, že prevedie kód napísaný v jazyku Python do formátu JSON. Framework Deck.gl má totiž modul @Deck.gl/json, ktorý prijíma reprezentáciu vizualizá-

cie vo formáte JSON a transformuje ju do kódu v jazyku JavaScript (na definície funkcií a objektov)¹.

Knižnica Pydeck je dobrým prostriedkom na vytvorenie jednoduchých vizualizácií, s ktorými môže používateľ interagovať pohybmi myši. Jej možnosti sú však oproti pôvodnému frameworku Deck.gl veľmi obmedzené. Nie je vhodná na vytváranie zložitejších animácií s veľkým množstvom dát, pretože sa aj po tej najmenšej zmene musia dátá a definícia vizualizácie nanovo prevádztať do formátu JSON a následne na kód v jazyku JavaScript (obrázok 2.7), čo je veľmi časovo náročné.



Obr. 2.7: Schéma vztahov medzi technológiami Pydeck, Dash Deck a Deck.gl a transformácií, ktorými prechádza definícia zobrazenia.

2.5 Nastavenie polohy kamery vo frameworku Deck.gl

Súčasťou dodaných dát z mobilného mapovacieho systému boli rotácie a translácie kamery. Pre nastavenie polohy kamery vo frameworku Deck.gl existujú dve možnosti:

1. Aplikovať transformáciu na dátu a nechať kameru v počiatku súradnicového systému, prípadne v nejakom inom pevnom bode.
2. Nechať dátu v pôvodnom stave a aplikovať všetky transformácie iba na kameru.

Je zrejmé, že pre dosiahnutie rovnakého výsledku musí byť transformácia použitá v druhom prípade inverzná k tej, ktorá je použitá v tom prvom.

Bližším popisom a zhodnotením výhod a nevýhod týchto dvoch metód sa zaoberejú nasledujúce dve podsekcie.

¹Ukážka rozhrania modulu @Deck.gl/json je na <https://Deck.gl/playground>.

Aplikovanie transformácií na dátá

Ako bolo zmienené v sekcií 2.4, dátá sa vo frameworku Deck.gl členia do vrstiev. Každej vrstve je potom potrebné priradiť pole s dátami a definovať pre ňu takzvané prístupové funkcie (*data accessors*), ktoré určujú, akým spôsobom sa z pola s dátami získa poloha a farba prvku. Napríklad u vrstvy `PointCloudLayer` je potrebné definovať funkciu `getPosition` pre získanie polohy bodu a `getColor` pre výpočet farby bodu [13].

Práve vo funkcií `getPosition` je možné aplikovať na polohu bodu ľubovoľnú transformáciu.

Napríklad v prípade, že je potrebné posunúť kamery v mračne bodov o 10 jednotiek v kladnom smere po osi x, by bolo možné vykonať túto transformáciu pomocou funkcie `getPosition` tak, že by sa posunul každý bod po osi x o 10 jednotiek v zápornom smere. V prípade, že by bol v poli dát každý bod vo formáte `[x, y, z, intenzita]`, by potom funkcia `getPosition` vyzerala takto:

```
function getPosition(d) {  
    return [d[0] - 10, d[1], d[2]];  
}
```

Výhodou tohto prístupu je, že je možné vykonať ľubovoľnú transformáciu, pretože do funkcie možno napísať akýkoľvek kód.

Veľkou nevýhodou je časová náročnosť, pri zmene polohy kamery sa totiž musí prepočítať poloha každého bodu. Tieto výpočty sa vykonávajú na procesore a výsledky sa následne nahrávajú na grafickú kartu. To konštituje aj samotná dokumentácia frameworku Deck.gl, kde sa píše, že kľúčom k tvorbe výkonných aplikácií je minimalizácia aktualizácií vrstiev, pri ktorých dochádza k prepočítavaniu dát a ich opäťovnému nahrávaniu na grafickú kartu. Taktiež je tam uvedené, že prístupové funkcie by mali byť čo najtriviálnejšie, pretože sa počítajú pre každú položku v dátach, t. j. pre každý bod v mračne bodov, a teda sa každé pridanie operácií naviac výrazne prejaví na výkonnosti. 99% procesorového času venovaného aktualizácií dát vrstvy sa strávi práve volaním prístupových funkcií [14].

Aplikovanie transformácií na kameru

Meniť polohu a orientáciu kamery je vo frameworku Deck.gl možné pomocou troch parametrov: `position`, `bearing` a `pitch` [13]. To zahŕňa rotácie iba podľa dvoch osí, a teda nie je možné dosiahnuť všeobecnú rotáciu – chýba možnosť nastaviť rotáciu okolo tretej osi, takzvaný *roll* uhol.

V dokumentácii frameworku Deck.gl je popísaná aj trieda `Viewport`, u ktorej je možné namiesto parametrov `position`, `bearing` a `pitch` nastaviť maticu pohľadu `viewMatrix`, čo znamená možnosť použiť akýkoľvek rotáciu. Problém je však v tom, že sa v dokumentácii už nikde nepíše, ako túto triedu použiť. Ide teda o nezrovnanosť, pravdepodobne pozostatok z predchádzajúcich verzií frameworku Deck.gl, kde táto možnosť bola, ale medzičasom bola zrušená. V aktuálnej verzii je možné túto matice už iba prečítať, ale nie nahradíť vlastnou.

Nevýhodou tohto spôsobu nastavenia polohy kamery teda je, že sa nedá nastaviť *roll* uhol. Tento problém je však možné vyriešiť trikom, a to otočením HTML elementu `canvas`, do ktorého framework Deck.gl vykresluje výsledné zobrazenie, pomocou CSS vlastnosti `transform`.

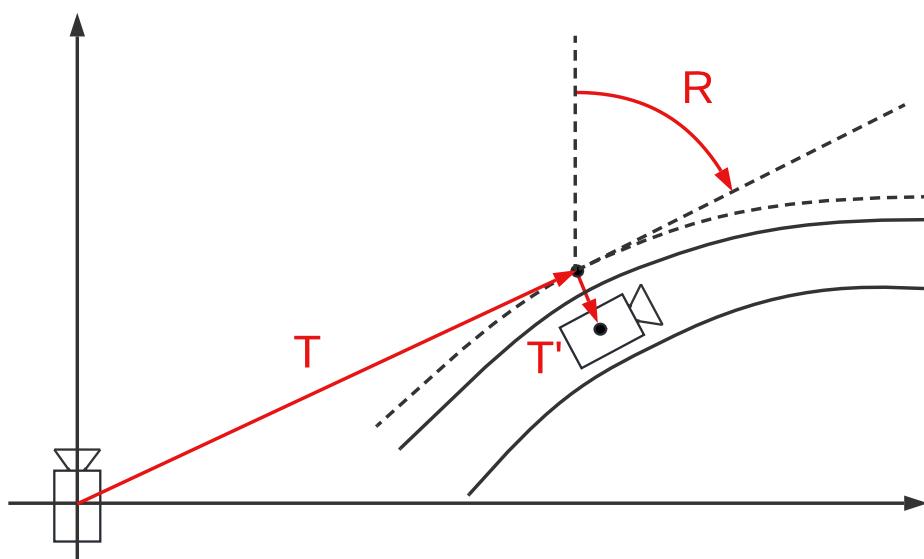
Miernou nevýhodou tiež je, že ak potrebujeme na kamery aplikovať nejakú zložitejšiu transformáciu než iba jednu rotáciu a posunutie, tak je potrebné odvodíť vzorce, ktorými sa

táto zložitejšia transformácia prevedie na parametre `position`, `bearing` a `pitch`. Konkrétnym prípadom, ktorý bolo potrebné vyriešiť v tejto práci, sa zaobráva nasledujúca kapitola.

Veľkou výhodou naopak je, že na rozdiel od predchádzajúceho spôsobu nedochádza k žiadnym aktualizáciám vrstiev, a teda nie je potrebné prepočítavať polohy bodov ani ich znova nahrávať na grafickú kartu. Pri použití tohto spôsobu je teda oveľa menej zaťažený procesor a aplikácia dosahuje lepšiu výkonnosť.

Upresnenie polohy kamery

Experimentmi s dodanými dátami sa zistilo, že ak je mračno bodov zobrazené presne podľa dodaných údajov o polohe a parametroch kamery, výsledné zobrazenie nesedí presne na záznam z kamery. Na to, aby sedelo, je potrebné pridať isté posunutie kamery. Taká situácia je zjednodušene znázornená na obrázku 2.8 – je zadaná translácia T a rotácia R , ale kameru je ešte potrebné posunúť doprava transláciou T' .



Obr. 2.8: Zjednodušený príklad situácie, kedy je potrebné kombinovať viacero transformácií kamery. Je k dispozícii translácia T a rotácia R , ale kameru je ešte potrebné posunúť doprava transláciou T' , aby bola v strede kolajníc.

Ak by bolo pri implementácii vo frameworku Deck.gl možné použiť aplikovanie transformácií na dátá, mal by tento problém jednoduché riešenie: z translácie T a rotácie R sa zloží transformačná matica, ktorá sa použije v prístupovej funkcií, a translácia T' sa priamo použije ako poloha kamery.

Ak však tento prístup nie je vhodný, napríklad z dôvodu horšej výkonnosti, je nutné nájsť transláciu T_V a rotáciu R_V tak, aby platil vzťah 2.24.

$$TRT' = T_V R_V \quad (2.24)$$

Transformácie T_V a R_V sa potom totiž dajú priamo previesť na parametre `position`, `bearing` a `pitch` (na prevod rotácie na `bearing` a `pitch` sa v jazyku Python dá použiť napríklad trieda `Rotation` z knižnice `scipy`).

Označme prvky matíc spôsobom popísaným vzťahmi 2.25 a 2.26.

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_1 \\ 0 & 1 & 0 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad T' = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t'_1 \\ 0 & 1 & 0 & t'_2 \\ 0 & 0 & 1 & t'_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.25)$$

$$T_V = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_{v1} \\ 0 & 1 & 0 & t_{v2} \\ 0 & 0 & 1 & t_{v3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{a} \quad R_V = \begin{pmatrix} r_{v11} & r_{v12} & r_{v13} & 0 \\ r_{v21} & r_{v22} & r_{v23} & 0 \\ r_{v31} & r_{v32} & r_{v33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

Potom platia vzťahy 2.27 a 2.28.

$$TRT' = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t'_1r_{11} + t'_2r_{12} + t'_3r_{13} + t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t'_1r_{21} + t'_2r_{22} + t'_3r_{23} + t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t'_1r_{31} + t'_2r_{32} + t'_3r_{33} + t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

$$T_V R_V = \begin{pmatrix} r_{v11} & r_{v12} & r_{v13} & t_{v1} \\ r_{v21} & r_{v22} & r_{v23} & t_{v2} \\ r_{v31} & r_{v32} & r_{v33} & t_{v3} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.28)$$

Zo vzťahov 2.24, 2.27 a 2.28 vyplýva, že musí platiť $R_V = R$ a vzťah 2.29.

$$\begin{pmatrix} t_{v1} \\ t_{v2} \\ t_{v3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t'_1r_{11} + t'_2r_{12} + t'_3r_{13} + t_1 \\ t'_1r_{21} + t'_2r_{22} + t'_3r_{23} + t_2 \\ t'_1r_{31} + t'_2r_{32} + t'_3r_{33} + t_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{v11} & r_{v12} & r_{v13} \\ r_{v21} & r_{v22} & r_{v23} \\ r_{v31} & r_{v32} & r_{v33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t'_1 \\ t'_2 \\ t'_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

Tým sme našli hľadanú transláciu T_V a rotáciu R_V .

2.6 Frameworky pre tvorbu webových aplikácií

Kedže hlavným cieľom práce bolo vytvoriť aplikáciu v jazyku Python, a to ideálne webovú, bolo potrebné preskúmať existujúce technológie, ktoré to umožňujú.

Porovnanie frameworkov Streamlit a Dash

Streamlit a Dash sú frameworky, ktoré majú rovnaké zameranie: oba slúžia na tvorbu webových aplikácií pre prácu s dátami (*data apps*) v jazyku Python. Framework Dash je oproti frameworku Streamlit na nižšej úrovni abstrakcie, pretože sám o sebe nemá žiadnen vizuálny štýl a mnohé jeho komponenty sa priamo mapujú na HTML elementy, napríklad `dash.html.Div` a `dash.html.H1` [16, 18].

Oba frameworky majú podporu pre Pydeck, u frameworku Streamlit je priamo k dispozícii element `st.pydeck_chart` a framework Dash má na tento účel vytvorenú prídavnú knižnicu **Dash Deck**. Ukázalo sa však, že `st.pydeck_chart` podporuje iba pohľad `MapView`, ktorý je určený na zobrazenie dát na mape a nedá sa použiť na perspektívne zobrazenie bodov v trojrozmernom priestore. Preto je pre účely tejto práce element `st.pydeck_chart` prakticky nepoužiteľný.

Knižnica Dash Deck má navyše tú výhodu, že umožňuje vyniechať Pydeck a definovať zobrazenie iba pomocou slovníkov so štruktúrou zodpovedajúcou tej, ktorú vyžaduje modul @Deck.gl/json, čo je tiež znázornené na obrázku 2.7. To trochu zefektívni vykonávanie zmien vo vizualizácii, keďže taká reprezentácia umožní jednoduchšie vykonávanie úprav.

Z týchto dôvodov bol pre implementáciu zvolený framework Dash, ktorý je podrobnejšie popísaný v nasledujúcej podsekcii.

Popis frameworku Dash

Dash je framework, ktorý umožňuje tvorbu webových aplikácií v jazyku Python. Interne používa na vytváranie používateľského rozhrania framework React [16]. Princíp jeho fungovania je nasledovný: kód aplikácie sa spúšta v rámci HTTP servera a generuje HTML dokument a skripty v jazyku JavaScript, ktoré server odošle klientovi. Tieto skripty následne komunikujú so serverom, čím sa zabezpečuje funkcionality aplikácie. Server je bezstavový a neuchováva si žiadne informácie o klientoch.

Kód webovej aplikácie napísanej s využitím frameworku Dash sa skladá z dvoch základných častí: komponentov a callbackov (funkcií spätného volania).

Komponenty sú prvky používateľského rozhrania, ktoré sa skladajú do stromovej štruktúry. Je možné použiť komponenty priamo zodpovedajúce HTML elementom (Dash HTML Components), komponenty z knižnice Dash Core Components (napríklad Graph, Tabs, Upload) a ďalšie špeciálne komponenty [16].

Pre túto prácu je významný komponent sklad (**Store**) z knižnice Dash Core Components, ktorý umožňuje uložiť dátá na strane klienta. Hodí sa na uloženie dát, ktoré sa následne zobrazujú pomocou frameworku Deck.gl.

Ďalej je možné použiť knižnicu **Dash Bootstrap Components** (DBC), ktorá poskytuje ďalšie komponenty, ikony, lepšie možnosti pre rozloženie stránky, a v neposlednom rade vizuálne štýly [8].

Tam, kde nestacia štýly a možnosti rozloženia stránky z DBC, je možné u komponentov dodefinovať vlastné pravidlá v jazyku CSS.

Callbacky vytvárajú funkcionality aplikácie. Každý callback je funkcia, ktorá má vstupy a výstupy. Vstupy a výstupy sú vždy atribúty konkrétnych komponentov. Callback sa spustí na začiatku behu aplikácie (táto vlastnosť sa dá zrušiť) a potom vždy, keď sa zmení niekterý z jeho vstupov. Callback môže mať aj špeciálne vstupy typu **State**, ktorých zmena callback nespustí. Platí obmedzenie, že každý atribút komponentu môže byť výstupom maximálne jedného callbacku [16]. U vstupov žiadne obmedzenia nie sú.

Existujú dva typy callbackov.

- Obyčajné callbacky. Sú napísané v jazyku Python. Klient má iba informáciu o ich vstupoch a výstupoch. Keď sa zmení niekterý zo vstupov, klient pošle na server požiadavok obsahujúci hodnoty všetkých vstupov. Server spustí kód callbacku a pošle klientovi odpoveď, ktorá obsahuje hodnoty všetkých výstupov.
- Klientske callbacky. Sú napísané v jazyku JavaScript. Klient má k dispozícii celý kód callbacku. Keď sa zmení niekterý zo vstupov, klient vykoná kód callbacku bez komunikácie so serverom.

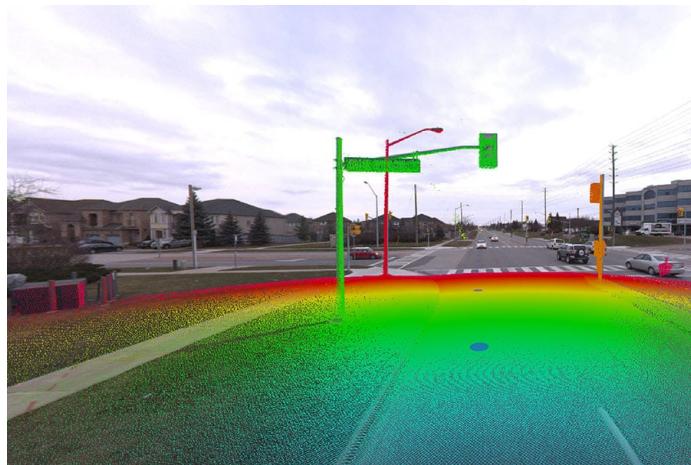
Je zrejmé, že klientske callbacky sú efektívnejšie než tie obyčajné, pretože ich nespomaľuje rézia komunikácie so serverom. Najvýraznejšie sa to prejaví vtedy, keď vstupy alebo výstupy obsahujú veľké množstvo dát.

K aplikácii vytvorenej pomocou frameworku Dash je možné pridať vlastné štýlové predpisy a skripty alebo moduly v jazyku JavaScript. Je potrebné uložiť ich do priečinka s názvom `assets` v koreňovom priečinku aplikácie. Rovnako je nutné postupovať aj pri vkladaní obrázkov a videí. Všetky štýlové predpisy, skripty a moduly z priečinka `assets` framework Dash automaticky načítava a pripája k aplikácii [16].

2.7 Existujúce riešenia

Existujúce systémy podobné vyvájanému systému by sa dali rozdeliť do dvoch kategórií.

Prvou kategóriu sú systémy určené na vizualizáciu dát z mobilných mapovacích systémov. Bývajú väčšinou komerčné a zobrazujú dátá agregované a spojené do väčších celkov. Príkladom môže byť napríklad robustná platforma Orbit od spoločnosti Bentley [5]. Na jej webovej stránke sa však nachádza aj ukážka zobrazenia, ktoré má veľmi blízko k aplikácii vyvájanej v rámci tejto práce, pretože zobrazuje mračno bodov ako vrstvu nad záznamom z kamery (obr. 2.9).

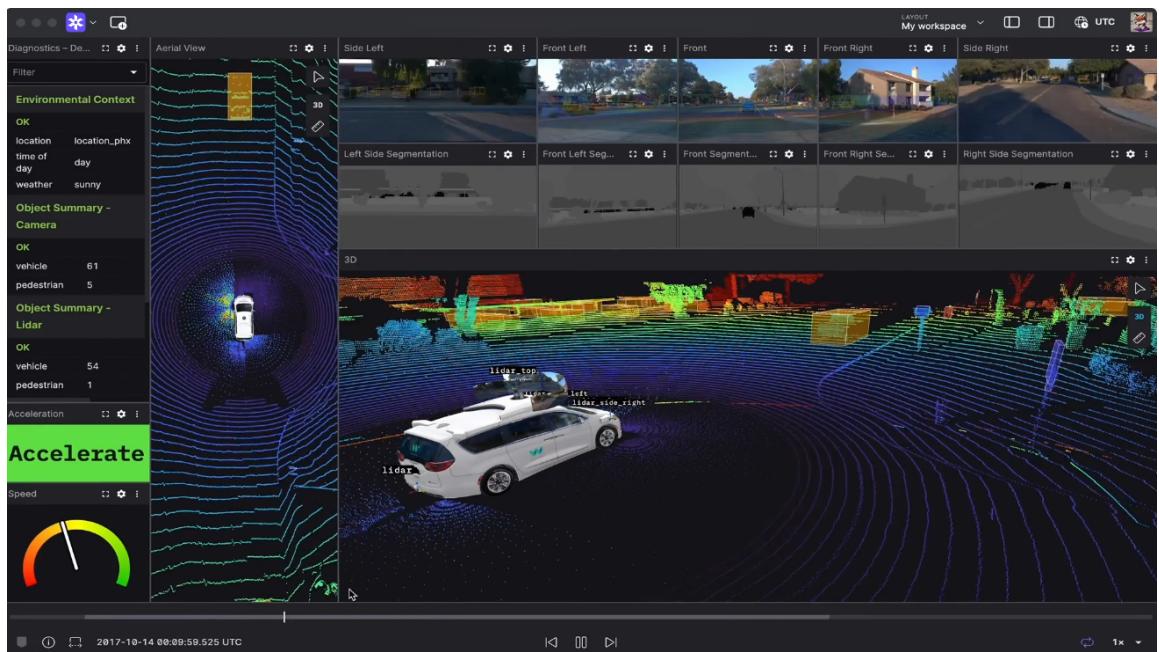


Obr. 2.9: Ukážka z webovej stránky platformy Orbit, na ktorej je mračno bodov zobrazené ako vrstva nad záznamom z kamery. Prevzaté z [5].

Druhou kategóriou sú systémy zamerané na vizualizáciu dát z autonómnych vozidiel a robotov, ktoré taktiež často zobrazujú mračno bodov, záznam z kamery a vektorové dátá, ale sú zamerané skôr na zobrazenie dát v reálnom čase.

Sem patrí napríklad Autonomous Visualization System (AVS), toolkit pre vývoj webových aplikácií pre vizualizáciu dát z autonómnych vozidiel, ktorý sa skladá z dvoch časťí: prenosového protokolu XVIZ a toolkitu pre vizualizáciu dát streetscape.gl [24]. Ukážka aplikácie vytvorenej pomocou toolkitu AVS na webových stránkach tohto projektu je veľmi podobná ukážke na stránkach komerčnej platformy Foxglove, ktorá vizualizuje dátá z robotov a autonómnych systémov (obr. 2.10) [9]. Obe zobrazujú dátá z autonómneho vozidla, ktoré sa skladajú z neagregovaného mračna bodov, vektorových označení ostatných identifikovaných vozidiel a záznamu z kamery v osobitnom okne.

Okrem toho ešte existuje množstvo komerčných aj voľne dostupných nástrojov, ktoré sú zamerané na zobrazenie a prácu s mračnami bodov, z ktorých niektoré dokážu zobraziť aj vektorové dátá, ako napríklad program CloudCompare.



Obr. 2.10: Ukážka z webovej stránky platformy Foxglove, ktorá zobrazuje lidarové a kamerové dátá z autonómneho automobilu spoločne s vektorovými dátami. Prevzaté z [9].

Kapitola 3

Návrh aplikácie

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť používateľskú aplikáciu. Výsledná aplikácia mala byť webová, aby ju bolo možné jednoducho spustiť pomocou webového prehliadača. Čo sa týka funkcionality, mala by splňať nasledujúce body:

- Zobrazenie dát z mobilného mapovacieho systému. Tieto dátá sú tvorené mračnom bodov z lidaru, kamerovým záznamom, údajmi o pohybe vlaku a ďalšími vektorovými dátami a mali by byť zobrazené z pohľadu strojvedúceho vlaku.
- Umožniť používateľovi vybrať si konkrétnu pozíciu a prehrať si animáciu pohybu po trati s nastaviteľnou rýchlosťou.
- Umožniť používateľovi nahrať súbory s dátami na zobrazenie: súbor s mračnom bodov, video z kamery na čele vlaku, súbor s vektorovými dátami, textové súbory s údajmi o pohybe vlaku – pole translácií, pole rotácií a pole zodpovedajúcich časových pečiatok.
- Zobrazovať dva typy dát z lidaru:
 - *real-time* – malé, postupne nasnímané kusy mračna bodov s časovými pečiatkami,
 - *postprocess* – jedno celistvé mračno bodov, ktoré vzniklo ich spojením.

(U oboch typov ide o agregované dátá – všetky body sú v jednej spoločnej súradnicovej sústave).

Umožniť používateľovi prepínať medzi týmito dvoma typmi.

- Poskytnúť používateľovi možnosti prispôsobenia zobrazenia, ako napríklad zmeny viditeľnosti jednotlivých vrstiev (mračna bodov, vektorových dát, kamerového záznamu) a základné nastavenia zobrazenia mračna bodov (rôzne farebné škály podľa intenzity, veľkosť a priečladnosť bodov, zobrazenie bodov len do určitej vzdialenosťi) aj vektorových dát (farba a hrúbka čiar).
- Mať prepínač na zapnutie a vypnutie skreslenia mračna bodov a vektorových dát podľa parametrov skreslenia kamery.
- Zobrazovať prejazdný profil vlaku v predikovanej polohe v rôznych vzdialostiach pred vlakom – 25, 50, 75 a 100m. Zobrazovať aj čiaru spájajúcu predikované polohy. (Súbory s predikovanými polohami sú súčasťou dát, ktoré aplikácia načítava.)

3.1 Návrh používateľského rozhrania

Pri návrhu používateľského rozhrania aplikácie bolo prioritou zobrazenie vizualizácie ako hlavnej časti aplikácie na čo najväčšej ploche a tiež tak, aby bola viditeľná vo všetkých stavoch.

Celkový návrh vzhľadu je na obrázku 3.1. Z ovládacích prvkov sú za najdôležitejšie považované prvky pre zmienu polohy na trati, ktoré sú umiestnené v spodnom paneli. Všetky ostatné ovládacie prvky sú umiestnené v bočnom paneli vľavo, ktorý sa dá skryť tlačidlom, a sú rozdelené do troch záložiek – nahrávanie dát, prispôsobenie zobrazenia a samostatná záložka pre prejazdný profil.

Hlavnou ideou návrhu je používanie čo najviac štandardných prvkov, aby sa v aplikácii používateľia lahko zorientovali. Tomu napomáha aj použitie knižnice Bootstrap, ktorá je u webových aplikácií veľmi často používaná, a preto budú jej prvky pravdepodobne pre používateľov intuitívne.

Pre používateľskú prívetivosť by mala aplikácia splňať nasledujúce body:

1. všeobecné vlastnosti:

- intuitívnosť,
- responzívny design,
- hladký beh animácií,
- možnosť exportu a importu nastavení zobrazenia,
- svetlý aj tmavý režim,
- kompatibilita s rôznymi prehliadačmi, prípadnú nekompatibilitu používateľovi ohlásť,

2. v záložke „Dáta“:

- prehľadné zobrazenie, aké dátá boli nahrané, možnosť ich nahradenia inými dátami,
- zobrazenie indikátoru, ak práve prebieha nahrávanie dát.

3.2 Problém nahrávania dát do aplikácie

Dáta, ktoré má vyvíjaná webová aplikácia zobrazovať, sú rozdelené do väčšieho množstva súborov rôznych typov. Nahrávať ich do aplikácie klasickým spôsobom po jednom či po skupinách by bolo sice možné, ale pre používateľov časovo náročné a nepraktické.

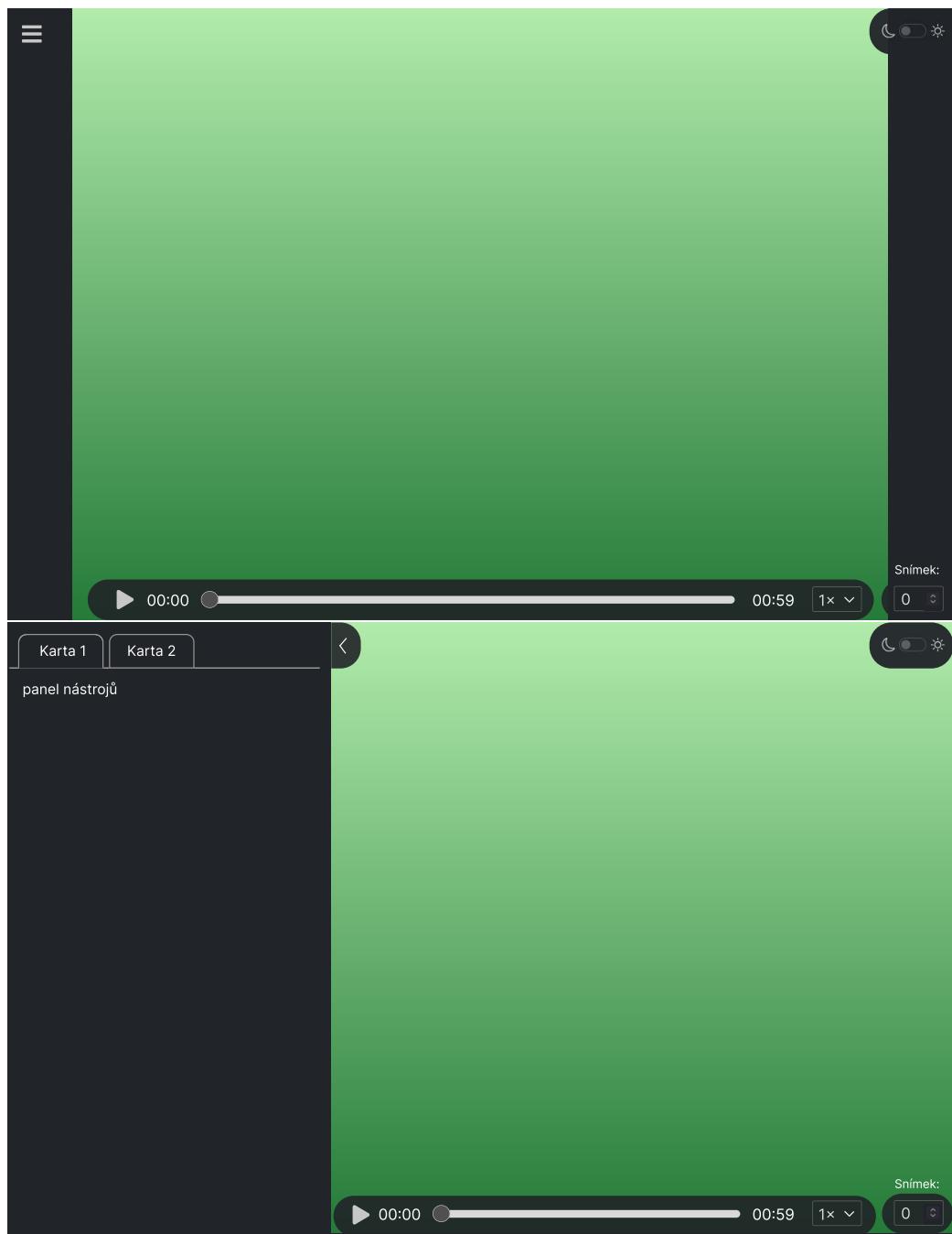
Kedže je aplikácia určená úzkej cieľovej skupine používateľov, tak je reálna možnosť, že používateľ bude buď spúštať server aplikácie lokálne, alebo bude mať k serveru aspoň prístup. Za tohto predpokladu má problém s nahrávaním dát elegantné riešenie, a tým je **projektový súbor**, teda textový súbor, v ktorom sú špecifikované cesty k dátovým súborom uloženým na serveri a prípadne aj ďalšie nastavenia. Používateľovi stačí nahrať tento súbor a aplikácia podľa neho automaticky nahrá všetky potrebné dátové súbory.

Presný formát projektového súboru bolo potrebné navrhnúť. Kompletný návrh je uvedený v prílohe A. Bol zvolený formát TOML, ktorý je jednoduchý, praktický a dobre čitateľný [23]. U dátových súborov, ktorých môže byť rôzny počet, napríklad súbory s dátami

z lidaru, sa do projektového súboru uvedie, v akom priečinku sa nachádzajú, ako sú pomenované a koľko ich je. Predpokladá sa, že sú tieto súbory jednotne pomenované a očíslované (napríklad `pcd_0.pcd`, `pcd_1.pcd`, ...).

Keby však bol projektový súbor jediným možným spôsobom nahrávania dát do aplikácie, malo by to isté nevýhody – napríklad pre vyskúšanie zmeny v jednom dátovom súbore by bolo potrebné meniť projektový súbor a znova ho nahrávať.

Preto by mala výsledná aplikácia kombinovať oba prístupy, projektový súbor aj klasické nahrávanie dát. Pre všeobecnú prístupnosť by mala umožniť nahranie všetkých súborov klasickým spôsobom. Pre praktickosť pri intenzívnejšom používaní by však mala mať aj možnosť automatizácie tejto činnosti pomocou projektového súboru. Potom by mal používateľ prehľadne vidieť nahrané súbory a mať možnosť tieto súbory jednotlivo nahradzovať inými súbormi.



Obr. 3.1: Návrh používateľského rozhrania aplikácie vytvorený pomocou nástroja Figma.

Kapitola 4

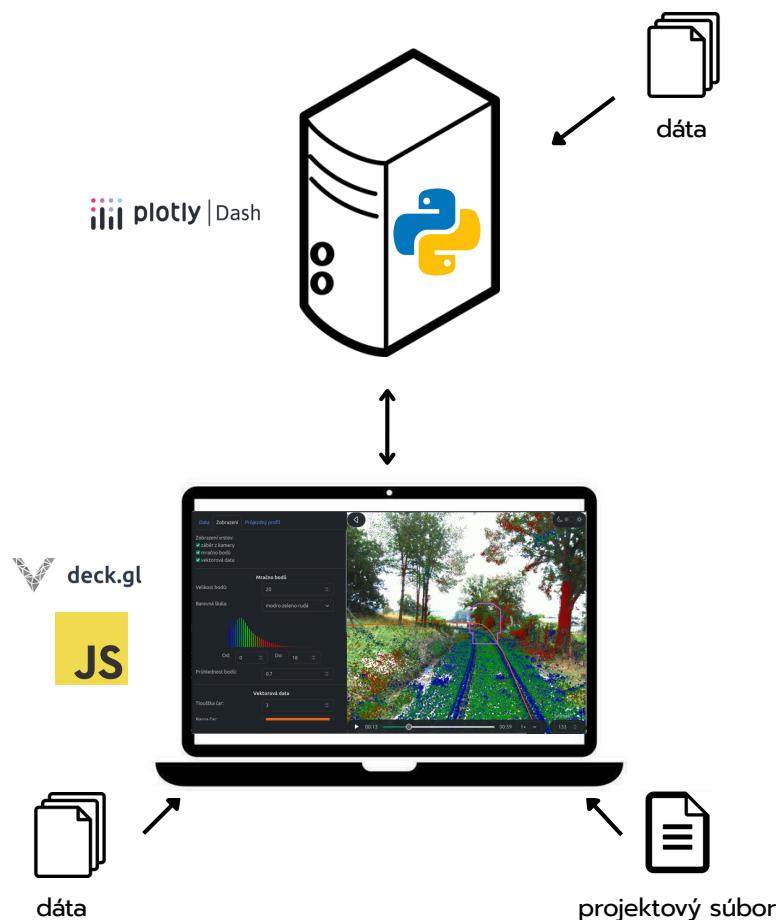
Implementácia navrhnutej aplikácie

Navrhnutá webová aplikácia je implementovaná v programovacom jazyku Python s využitím frameworku Dash. Pre optimalizáciu obsahuje aplikácia aj skript napísaný v jazyku JavaScript, ktorý používa pre vykreslovanie mračna bodov a vektorových dát hardvérovo akcelerovaný framework Deck.gl a na rozdiel od zvyšku kódu aplikácie sa vykonáva priamo na klientovi. Táto štruktúra je schematicky znázornená na obrázku 4.1. Snímka obrazovky finálnej implementácie je na obrázku 4.2.

Vizuálny štýl používateľského rozhrania čiastočne zabezpečuje knižnica Dash Bootstrap Components, čiastočne je dodefinovaný pomocou CSS.

Zdrojový kód je rozdelený do nasledujúcich súborov:

- `app.py` – Hlavný modul, inicializuje a spustí aplikáciu.
- `params.py` – Počiatočné parametre.
- `loading_functions.py` – Pomocné funkcie pre načítanie dát zo súborov.
- `general_functions.py` – Pomocné funkcie pre výpočet projekčnej matice, transformačných matíc a operácií s rotáciami.
- Moduly s komponentmi a callbackmi rozdelené podľa štruktúry používateľského rozhrania. Je to päť dvojíc modulov. V prvom module z dvojice sú vždy definované komponenty používateľského rozhrania vrátane ich vizuálneho štýlu, v tom druhom k nim patriace callbacky.
- `visualization.js` – Definícia objektu `window.vis`, ktorý vizualizuje mračno bodov a vektorové dát pomocou frameworku Deck.gl a riadi animáciu pohybu po trati. Činnosť tohto skriptu je podrobnejšie popísaná v sekciách 4.2 a 4.3. Pre pripojenie skriptu k aplikácii tak, aby sa pripojili aj zdrojové kódy frameworku Deck.gl, bolo nutné použiť bundler (zlučovač zdrojových súborov). V rámci tejto práce bol použitý bundler Webpack. K aplikácii sa teda nepripája priamo skript `visualization.js`, ale modul `bundle.mjs`, ktorý vytvára bundler a sú v ňom zahrnuté aj zdrojové kódy frameworku Deck.gl. Je nutné použiť modul namiesto obyčajného skriptu, pretože mimo modulu nie je v jazyku JavaScript možné použiť deklaráciu `import`, ktorá je nutná pre pripojenie zdrojových kódov frameworku Deck.gl.



Obr. 4.1: Schéma finálnej implementácie.

Graf závislostí modulov, ktorý obsahuje všetky moduly finálnej implementácie, ktoré sú napísané v jazyku Python, je na obrázku 4.6 na konci kapitoly. Bol vygenerovaný pomocou nástroja Pydeps¹.

4.1 Popis modulov

Táto sekcia sa venuje podrobnejšiemu popisu niektorých modulov.

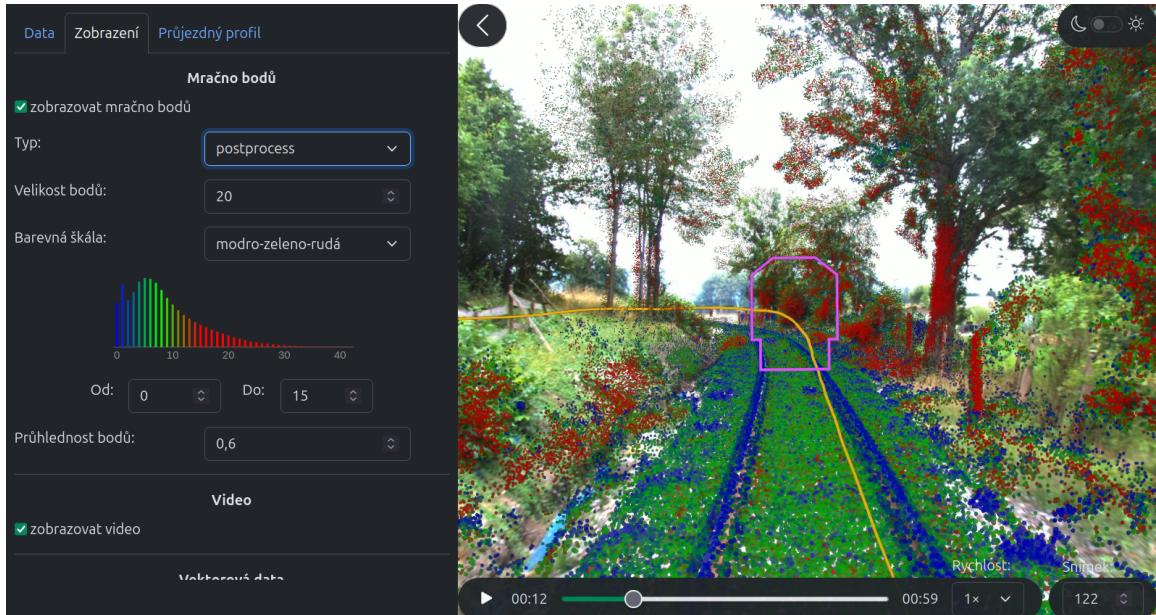
Hlavný modul

(súbor `app.py`)

Načíta zo súborov ukážkové dátá, ktoré aplikácia zobrazí po spustení. Tieto dátá spolu s počiatočnými parametrami uloží do skladov. Pripojí všetky potrebné komponenty a callbacky z iných modulov, inicializuje a spustí aplikáciu.

Obsahuje jeden klientsky callback, ktorý kopíruje dátá zo skladov do objektu `window.vis`, ktorý je definovaný v skripte `visualization.js`, a následne volá metódu tohto objektu pre inicializáciu vizualizácie.

¹<https://github.com/thebjorn/pydeps>



Obr. 4.2: Snímka obrazovky finálnej implementácie.

Dvojica modulov *layout*

(súbory `layout_components.py`, `layout_callbacks.py`)

Definuje základné rozloženie a vzhľad aplikácie – vizualizácia na celú výšku okna, spodný panel s ovládacími prvkami, bočný panel s troma záložkami a prvak na prepínanie svetlého a tmavého režimu. Vizualizácia je zložená z troch HTML elementov: `Video`, `Canvas`, do ktorého vykresluje dátá framework Deck.gl, a druhý `Canvas` pre implementáciu skreslenia. Toto základné rozloženie je definované väčšinou pomocou CSS pravidiel, ale na úrovni jednotlivých záložiek je už rozloženie definované hlavne pomocou knižnice Dash Bootstrap Components.

Záložka `Data` je obalená komponentom `Loading` z knižnice Dash Core Components, ktorý používateľovi zobrazuje indikátor, keď prebieha aktualizácia niektorého prvku z tejto záložky, teda keď aplikácia nahráva dátá.

Obsahuje dva klientske callbacky – jeden pre vysúvanie bočného panelu a jeden pre prepínanie svetlého a tmavého režimu.

Dvojica modulov *animation control*

(súbory `animation_control_components.py`, `animation_control_callbacks.py`)

Obsahuje prvky pre ovládanie animácie – spustenie a zastavenie, posunutie, zmena rýchlosťi, výber konkrétneho snímku, – ktoré sa nachádzajú v spodnom paneli. Prvky sú rozmiestnené s využitím CSS mechanizmov `grid` a `flexbox`.

Kedže riadenie animácie prebieha na strane klienta, všetky callbacky v tomto module sú klientske a väčšinou volajú metódy definované v skripte `visualization.js`. Mechanizmus riadenia animácie je popísaný v sekcií 4.3.

Zmena rýchlosťi animácie prebieha tak, že sa u videa zmení vlastnosť `playbackRate`. Tým sa zmení rýchlosť videa, a keďže vykreslovanie mračna bodov a vektorových dát je naviazané na video, zrýchli sa tým celá animácia.

Dvojica modulov *data*

(súbory `data_tab_components.py`, `data_tab_callbacks.py`)

Tvorí záložku *Data* v bočnom paneli a riadi nahrávanie dát do aplikácie. Obsahuje komponenty dvoch typov – `*_upload` a `*_uploaded_file[s]`. Komponenty typu `*_upload` umožňujú manuálne nahranie súborov do aplikácie. Keď také nahranie prebehne, komponent `*_upload` je skrytý a namiesto neho sa zobrazí komponent `*_uploaded_file[s]`, ktorý používateľovi pre kontrolu zobrazuje názov nahraného súboru a obsahuje aj tlačidlo v tvare x, ktoré skryje komponent `*_uploaded_file[s]` a znova zobrazí komponent `*_upload`, čím umožní používateľovi nahrať iný súbor.

Umožňuje tiež nastavenie kalibračnej matice, zadnej orezávacej roviny a parametrov skreslenia kamery.

Špeciálnym typom nahrávaného súboru je projektový súbor, ktorý vyvolá automatické nahranie všetkých v ňom definovaných súborov.

Väčšina callbackov je napísaná v Pythone, spracúvajú nahrané súbory a spracované dátá ukladajú do skladov (komponenty *Store*).

Isté špecifika sú u nahrávania súborov s mračnom bodov a videa. Framework Dash totiž načítané súbory odovzdáva callbackom ako pole bajtov, ale použitá knižnica `pypcd4` dokáže načítať súbor vo formáte `pcd` iba podľa cesty k súboru. Preto je nahraný súbor s mračnom bodov uložený ako dočasný súbor do priečinka `assets/temp`, odtiaľ nahraný a potom hned zmazaný.

Podobne je to u videa, ktoré je tiež potrebné uložiť ako dočasný súbor a potom nastaviť cestu k nemu do atribútu `src` komponentu `html.Video`. Na rozdiel od súboru s mračnom bodov ho však nie je možné zmazať hned v tom istom callbacku, musí v priečinku `assets/temp` po istú dobu zostať, pretože jeho nahranie do aplikácie nejakú dobu trvá. Preto je definovaný špeciálny callback, ktorý sa spustí každé dve minúty a vymaže všetky dočasné súbory staršie než dve minúty.

Ďalej sú v tomto module ešte klientske callbacky, ktoré kopírujú nové dátá zo skladov do objektu `window.vis`.

Dvojica modulov *visualization*

(súbory `visualization_tab_components.py`, `visualization_tab_callbacks.py`)

Tvorí záložku *Zobrazení* v bočnom paneli a obsahuje všeobecné nastavenia týkajúce sa zobrazenia. Dôležitou funkciou je voľba typu zobrazovaného mračna bodov – postprocess alebo real-time.

Najzložitejším komponentom je graf, ktorý zobrazuje rozloženie bodov podľa intenzity a zároveň aj farebnú škálu (ukážka je na obrázku 4.4). Ďalej táto záložka obsahuje aj posuvníky pre upresnenie polohy kamery a tlačidlá pre export a import nastavení zobrazenia. Nastavenia sa exportujú vo formáte TOML. Táto možnosť je užitočná najmä pre uloženie nastavenia posuvníkov, ale ukladá aj všetky ostatné nastavenia zo záložiek *Zobrazení* a *Prújezdny profil*.

Nachádza sa tu aj možnosť zapnutia a vypnutia skreslenia vizualizácie podľa parametrov skreslenia kamery.

Modul obsahuje niekoľko klientskych callbackov, ktoré zabezpečujú zmeny zobrazenia väčšinou volaním metód objektu `window.vis`.

Ďalej je tu viacero callbackov patriacich ku grafu zobrazujúcemu farebnú škálu. Kedže je to zložitý komponent, obsahuje štyri sklady, do ktorých sa ukladá typ farebnej škály, jej rozsah a agregácia mračna bodov oboch typov, ktoré aplikácia zobrazuje. Graf sa aktua-

lizuje, keď sa zmení ktorýkoľvek z týchto údajov, alebo keď sa zmení typ zobrazovaného mračna bodov.

V module sa ešte nachádzajú callbacky pre počítanie skreslenia, ktoré sú bližšie popísané v sekcií 4.4.

Dvojica modulov *profile*

(súbory `profile_tab_components.py`, `profile_tab_callbacks.py`)

Tvorí záložku *Prújezdny profil* v bočnom paneli a obsahuje iba nastavenia týkajúce sa zobrazenia prejazdného profilu a čiary spájajúcej polohy prejazdného profilu. Umožnuje používateľovi vybrať si, ktorú predikciu chce vidieť – na 25, 50, 75 alebo 100 metrov.

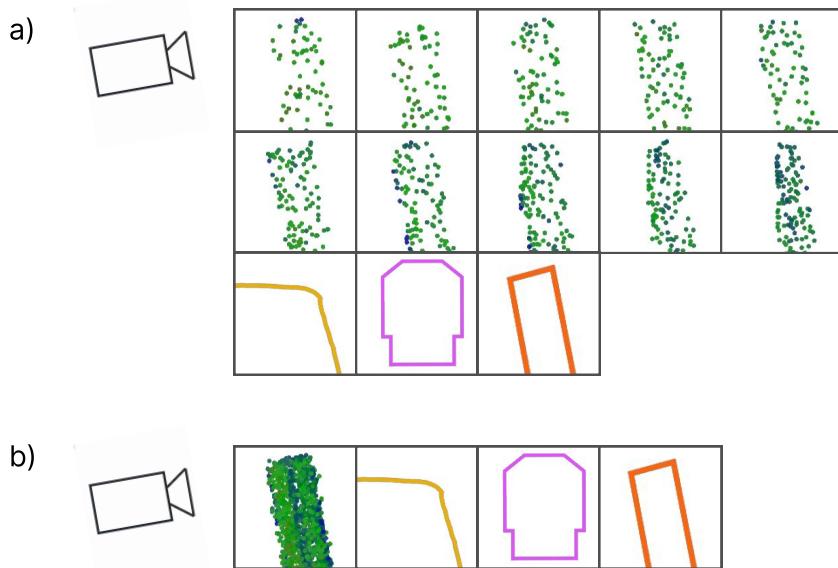
Callbacky sú klientske a volajú metódy objektu `window.vis`.

4.2 Rozdelenie dát do vrstiev

Pri vizualizácii dát pomocou frameworku Deck.gl sú použité dva typy vrstiev:

- `PointCloudLayer` pre mračno bodov,
- `PathLayer` pre vektorové dátá.

Rozdelenie vizualizácie na vrstvy je znázornené na obrázku 4.3.



Obr. 4.3: Schéma rozdelenia dát do vrstiev. Počet vrstiev s mračnom bodov závisí od typu zobrazovaného mračna bodov.

Na začiatku tvorby práce bola na zobrazenie vektorových dát použitá vrstva `LineLayer`. Ukázalo sa však, že vrstva `LineLayer` je prispôsobená iba pre zobrazenie čiar na mapách a pri použití nemapového pohľadu, ako napríklad `FirstPersonView`, nefunguje dobre – niektoré čiary sa otáčajú kolmo ku kamere a tým pádom sa ich šírka zmenšuje, niekedy až tak, že úplne prestanú byť viditeľné. Toto správanie u vrstvy `LineLayer` nie je možné

zmeniť. Naopak u vrstvy **PathLayer** je možné nastaviť vlastnosť **billboard**, ktorá znamená otočenie čiar smerom ku kamere, preto bola nakoniec táto vrstva použitá namiesto vrstvy **LineLayer**. **PathLayer** sa od **LineLayer** líši ešte tým, že čiary majú pevnú šírku v pixeloch a nezužujú sa podľa toho, ako ďaleko sú od kamery.

Vizualizácia obsahuje nasledujúce vrstvy:

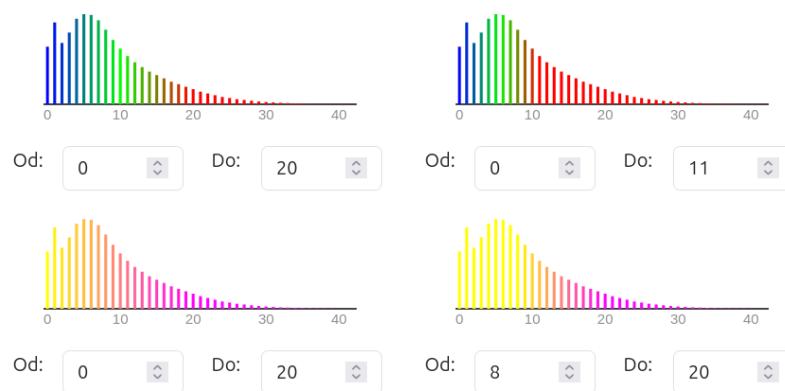
- Mračno bodov. Ak aplikácia zobrazuje mračno bodov typu real-time, teda malé, postupne nasnímané časti s časovými pečiatkami, tak je vrstiev desať a zobrazujú desať z týchto častí – jednu, ktorá zodpovedá danej pozícii, a deväť predchádzajúcich (obrázok 4.3, časť a)). Ak aplikácia zobrazuje mračno bodov typu postprocess, tak je celé v jednej vrstve (obrázok 4.3, časť b)).
- Čiara spájajúca predikované polohy prejazdného profilu vlaku.
- Prejazdný profil vlaku v predikovanej polohe. Od ostatných vektorových dát sa líši tým, že sa jeho poloha mení pri zmene polohy kamery. To je v implementácii dosiahnuté pomocou špeciálnej prístupovej funkcie **profileGetPath** (prístupové funkcie boli popísané v sekcií 2.5, podsekcia Aplikovanie transformácií na dátu).
- Ďalšie vektorové dátá.

Farebné škály

Okrem polohy má každý bod v mračne bodov v dodanej sade dát určenú ešte jednu vlastnosť – intenzitu v rozmedzí od 0 do 42, ktorú je vhodné farebne rozlíšiť.

Boli implementované dve farebné škály, klasická modro-zeleno-červená a žlto-fialová, pričom u oboch si môže používateľ zvoliť, od akej intenzity začína a pri akej končí. Ak je napríklad nastavená žlto-fialová farebná škála od 0 do 20, tak to znamená, že body s intenzitou 0 budú mať žltú farbu, body s intenzitou 20 a vyššou fialovú farbu a body s intenzitou od 1 do 19 kombinovanú farbu.

Pre prehľadnosť bol tiež implementovaný graf, ktorý používateľovi ukazuje relatívne počty bodov s jednotlivými intenzitami a aké majú nastavené farby. Ukážky možných nastavení sú na obrázku 4.4.



Obr. 4.4: Nastaviteľná farebná škála pre mračno bodov. Vodorovná os predstavuje intenzitu, vertikálna os predstavuje počet bodov.

4.3 Implementácia animácie pohybu po trati

Animácia pohybu po trati sa vykonáva výhradne na strane klienta, bez komunikácie so serverom. Zabezpečujú ju štyri metódy objektu `window.vis`, ktorých definícia sa nachádza v súbore `visualization.js`: `runDeckAnimation`, `stopDeckAnimation`, `animationStep` a `togglePlay`.

V tejto sekcii je popísaný princíp fungovania animácie, pre prehľadnosť boli vynechané niektoré menej dôležité implementačné detaily.

Ked' používateľ klikne na tlačidlo pre prehranie animácie, spustí sa klientsky callback, ktorý zavolá metódu `togglePlay`.

Metóda `togglePlay` vykoná nasledujúci kód:

```
const video = document.getElementById('background-video');
window.vis.runDeckAnimation();
video.play();
video.onpause = function(){ window.vis.stopDeckAnimation() };
```

Metóda `runDeckAnimation` reinicializuje niektoré parametre, ak je to potrebné, a potom volá metódu `animationStep`.

Metóda `animationStep` vykonáva tieto kroky:

1. Najprv zabezpečí, aby sa zavolala znova pri najbližšom vykreslení nového snímku vo videu:

```
const video = document.getElementById('background-video');
video.requestVideoFrameCallback(window.vis.animationStep);
```

2. Potom na základe časových pečiatok polôh kamery v mračne bodov a aktuálneho času videa vypočíta aktualizovanú polohu kamery. Ak je to posledná poloha, zastaví video metódou `pause`.

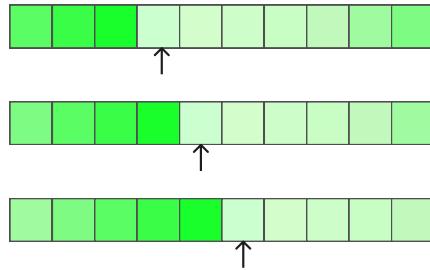
3. Ak aplikácia zobrazuje mračno bodov typu real-time, tak následne na základe časových pečiatok mračna bodov zistí, či by sa nemali zobraziť nejaké nové časti. Vymieňanie častí prebieha efektívnym cyklickým spôsobom, ktorý je znázornený na obrázku 4.5.

4. Potom prebehne samotná aktualizácia vizualizácie (v skripte metóda `updateDeck`), kedy sa kamera posunie na novú polohu a aktualizujú sa vrstvy (v skripte metóda `createLayers`), čím sa posunie prejazdný profil a prípadne sa vymenia časti mračna bodov.

5. Ako posledné sa aktualizujú prvky v grafickom používateľskom rozhraní, ktoré ukažujú stav animácie – posuvník, čas a vstupné pole s číslom snímky.

Animácia sa končí buď tak, že používateľ klikne na tlačidlo pre zastavenie animácie, čím sa spustí klientsky callback, ktorý zastaví video metódou `pause`, alebo tak, že skončí video, alebo tak, že je dosiahnutá posledná poloha kamery. V každom prípade sa spustí metóda `stopDeckAnimation`, pretože bola na začiatku animácie nastavená ako callback pre udalosť zastavenia videa.

Metóda `stopDeckAnimation` upovedomí framework Dash o novej hodnote posuvníka, času a vstupného poľa s číslom snímky. Toto sa nevykonáva počas animácie, pretože si to vyžaduje komunikáciu so serverom, ktorá by spôsobila zdržanie.



Obr. 4.5: Schéma cyklického prepisovania vrstiev obsahujúcich mračno bodov typu real-time. Vizualizácia obsahuje vždy desať vrstiev, ktoré zobrazujú desať častí mračna bodov. Ak podľa časových pečiatok má byť zobrazená nejaká nová časť, tak sa prepíše vždy tá najstaršia.

4.4 Implementácia skreslenia

Pri zobrazovaní mračna bodov a vektorových dát tak, aby zobrazenie čo najpresnejšie sedelo na záznam z kamery, je potrebné vziať do úvahy aj skreslenie kamery, ktoré bolo teoreticky popísané v sekcii 2.2.

Parametre skreslenia boli súčasťou dodaných dát. Existuje niekoľko možností, ako ich použiť:

1. Odstrániť skreslenie zo záznamu z kamery.
2. Aplikovať skreslenie na mračno bodov, a to:
 - (a) meniť súradnice bodov v rámci niektoréj transformácie vo vykresľovacom retazci,
 - (b) aplikovať skreslenie až na finálny obraz.

Možnosti 1 a 2b) sú výkonovo približne rovnako náročné a výkonnosť závisí od rozmerov vizualizácie v pixeloch.

Možnosť 2a) by bola v rámci frameworku Deck.gl realizovateľná dvoma spôsobmi: buď výpočtom skreslenia v prístupových funkciách, alebo implementáciou vlastných vrstiev a napísaním vlastného kódu pre vertex shader. Akékoľvek výpočty v prístupových funkciách však majú výrazný vplyv na výkonnosť, výpočet skreslenia je pomerne zložitý (v porovnaní s násobením súradníc bodu maticou, ktoré sa u bežných transformácií používa) a výkonnosť by sa naviac zhoršovala s počtom vykreslovaných bodov. Druhý spôsob je implementačne náročný a realizácia by zabrala veľa času.

Preto bola zvolená a implementovaná možnosť 2b).

Pri hľadaní existujúcich riešení podobných problémov bol nájdený článok od J. Balocha, ktorý sa zaobráva aplikáciou rôznych efektov na obrázky vo webových stránkach pomocou jazyka JavaScript [3].

Toto riešenie funguje tak, že vytvorí element `Canvas` rovnakej veľkosti ako pôvodný obrázok, cyklom prechádza všetky pixely obrázku a pre každý pixel vypočíta jeho novú polohu a vykreslí ho do elementu `Canvas`.

Myšlienka tohto riešenia bola využitá aj pri implementácii skreslenia v tejto práci, ale s niekolkými rozdielmi.

Po prvé, pixely sa nečítajú z obrázku, ale z elementu `Canvas`, do ktorého vykresluje zobrazenie framework Deck.gl. Kedže je tento element naviazaný na framework Deck.gl, nie je možné z neho prečítať pixel jednoducho príkazmi

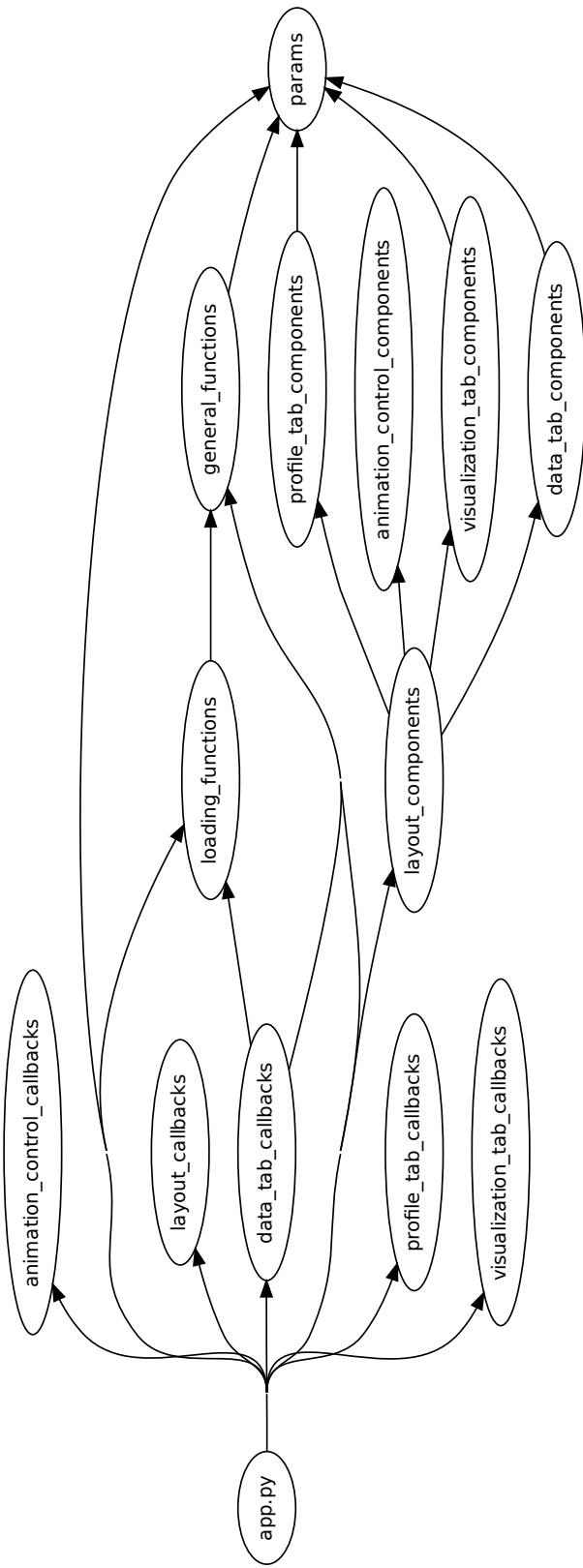
```
const ctx = canvas.getContext("2d");
const pixelData = ctx.getImageData(...);
```

Namiesto toho je nutné použiť rozhranie WebGL:

```
const gl_ctx = canvas.getContext("webgl2");
const pixelData = new Uint8Array(width * height * 4);
gl_ctx.readPixels(0, 0, width, height, gl_ctx.RGBA, gl_ctx.UNSIGNED_BYTE,
    pixelData);
```

Po druhé, keďže vo vyvájanej aplikácii je potrebné počítať skreslenie mnohokrát s tými istými parametrami a rozmermi obrazu, bolo by neefektívne pri každom výpočte počítať opakovane novú polohu pre každý pixel, pretože tieto hodnoty sa nemenia.

Preto je skreslenie implementované dvoma klientskymi callbackmi. Ten prvý vypočíta pre každý pixel jeho novú polohu v skreslenom obraze a výsledky uloží do pola v objekte `window`. Tento výpočet je nutné zopakovať iba vtedy, keď sa zmenia rozmery vizualizácie. Ten druhý reaguje na vypnutie a zapnutie skreslenia používateľom. Keď je skreslenie zapnuté, skryje element `visualization-canvas`, do ktorého vykresluje zobrazenie framework Deck.gl, zviditeľní namiesto neho element `distorted-visualization-canvas`, ktorý má rovnakú veľkosť a pozíciu, a zaregistruje klientsky callback, ktorý po každom vykreslení zobrazenia frameworkom Deck.gl prečíta hodnoty všetkých pixelov a prekreslí ich na vopred vypočítané pozície do elementu `distorted-visualization-canvas`.



Obr. 4.6: Graf závislostí modulov vo finálnej implementácii vygenerovaný pomocou nástroja Pydeps.

Kapitola 5

Testovanie a evaluácia

Pri vývoji aplikácie bola k dispozícii jedna sada dát, ktorú bolo možné použiť pre testovanie.

Už pri prvých pokusoch o zobrazenie mračna bodov sa ukázalo, že údaje o polohách kamery sú v inom súradnicovom systéme ako mračno bodov (líši sa poradie ôs), čomu bola implementácia prispôsobená.

Ďalej sa ukázalo, že aj pri zobrazení mračna bodov presne podľa dodanej polohy kamery a kalibračnej matice zobrazenie nesedí presne na záznam z kamery a aby sedelo, je potrebné pridať isté posunutie a rotáciu. Preto boli do používateľského rozhrania aplikácie pridané posuvníky, ktorými si používateľ môže prispôsobiť polohu virtuálnej kamery (posunutím a otočením v istom rozsahu), a tým opraviť nepresnosti v dátach. Snímky obrazovky znázorňujúce funkciu posuvníkov sú na obrázku 5.1.

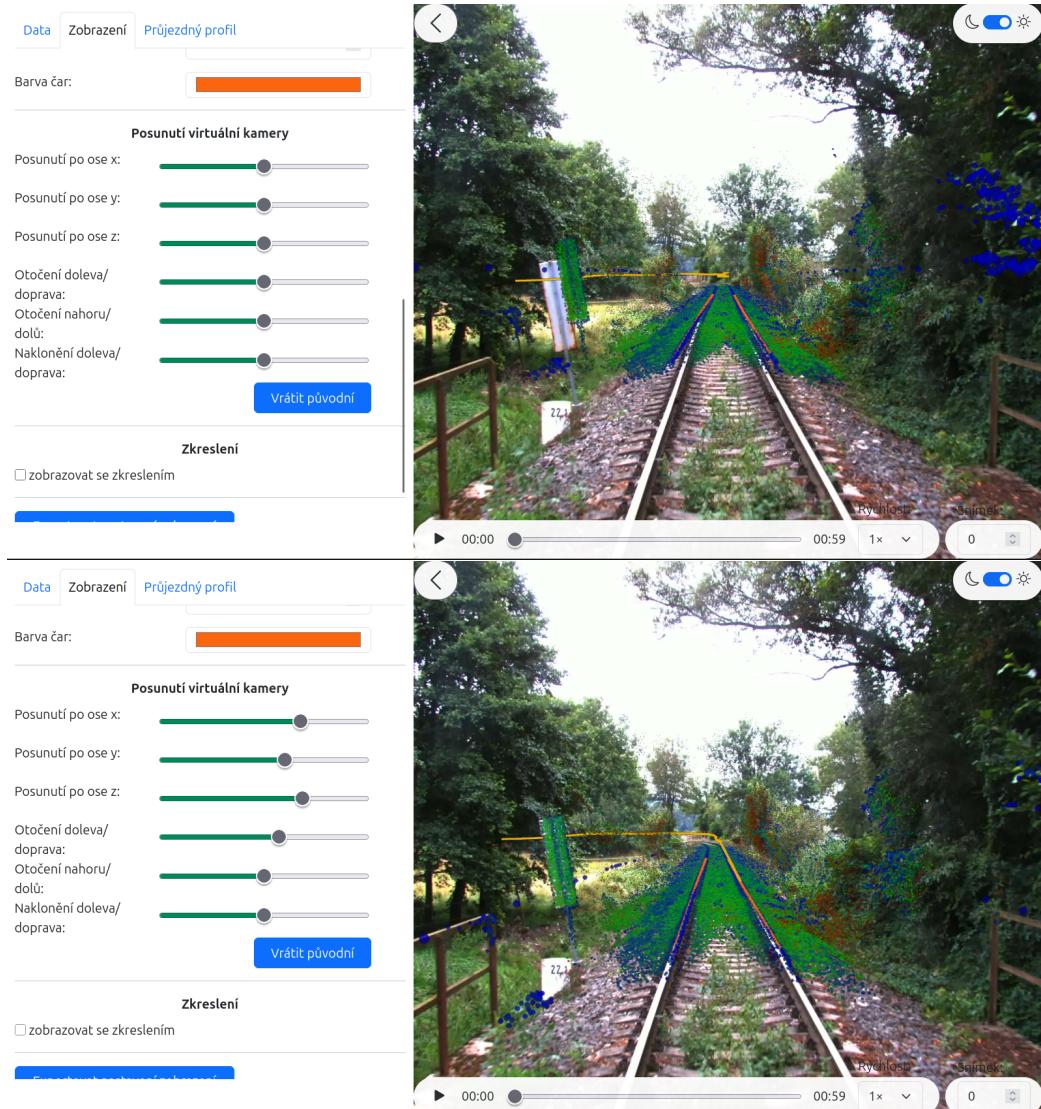
5.1 Optimalizácia vykreslovania mračna bodov

V priebehu implementácie bolo postupne vyskúšaných a porovnaných päť rôznych spôsobov vykreslovania mračna bodov:

1. Použitie knižníc Pydeck a Dash Deck tak, ako je to vo vzorových príkladoch v dokumentácii knižnice Dash Deck. Počítanie transformácií v prístupových funkciách.
2. Použitie iba knižnice Dash Deck, definícia vizualizácie pomocou slovníka. Počítanie transformácií v prístupových funkciách.
3. Použitie frameworku Deck.gl priamo pomocou kódu v jazyku JavaScript, riadenie animácie pomocou komponentu `Interval`¹. Počítanie transformácií v prístupových funkciách.
4. Použitie frameworku Deck.gl a riadenie animácie priamo pomocou kódu v jazyku JavaScript. Počítanie transformácií v prístupových funkciách.
5. Použitie frameworku Deck.gl a riadenie animácie priamo pomocou kódu v jazyku JavaScript. Aplikovanie transformácií iba na kameru.

Ukázalo sa, že každý z týchto spôsobov je lepší ako tie uvedené pred ním, takže finálna implementácia, ako už bolo popísané v predchádzajúcej kapitole, používa 5. spôsob.

¹Funkcionalita komponentu `Interval` frameworku Dash spočíva v tom, že periodicky spúšta callback, pričom periódu určuje parameter `interval`.



Obr. 5.1: Funkcionalita posuvníkov pre prispôsobenie polohy virtuálnej kamery. Na hornom obrázku je zobrazenie bez prispôsobenia, na dolnom s prispôsobením.

Cieľom tejto sekcie je porovnať všetky tieto spôsoby a zdôvodniť, prečo je práve 5. spôsob najlepší.

Všetky v tejto sekcií uvedené merania prebiehali na notebooku s operačným systémom Ubuntu 24.04.1, procesorom Intel Core i5-9300H × 8, grafickou kartou Intel UHD Graphics 630 (CFL GT2) a veľkosťou operačnej pamäte 16 GiB. Vykreslované mračno bodov obsahovalo 201 880 bodov a spolu s jeho zobrazením bolo prehrávané aj video.

1. spôsob

Prvý spôsob je výrazne neefektívny. Pri implementácii týmto spôsobom jedno vykreslenie mračna bodov zaberá zhruba 3 sekundy, čo je spôsobené transformáciami medzi rôznymi formátmi, ktoré boli popísané v sekcií 2.4.

2. spôsob

Meranie výkonnosti je uvedené v tabuľke 5.1 a predstavuje najlepší výsledok, aký bolo možné dosiahnuť iba pomocou kódu v jazyku Python, bez použitia jazyka JavaScript.

Nastavenie parametra <code>interval</code> [ms]	Čas, za ktorý prebehla celá animácia (100 snímok) [s]	Priemerný čas vykreslenia jednej snímky [ms]
1000	101	1010
800	80	800
750	76	760
700	72	720
650	71	710
600	70	700

Tabuľka 5.1: Výkonnosť animácie pohybu po trati pri použití 2. spôsobu vykreslovania mračna bodov (použitie knižnice Dash Deck). Z nameraných údajov vyplýva, že minimálny čas potrebný na vykreslenie jednej snímky je asi 750 ms, čo znamená, že rýchlosť nedosahuje ani 2 snímky za sekundu.

Podľa nameraných údajov tento spôsob predstavuje významné zlepšenie oproti prvému spôsobu, ani on však nie je dosť výkonný na to, aby umožnil hladký beh animácie pohybu po trati. Príčina neefektivity je v spôsobe implementácie knižnice Dash Deck, ktorá zrejme, podobne ako Pydeck, nie je stavaná na to, aby sa vo vizualizácii robili časté zmeny.

3. spôsob

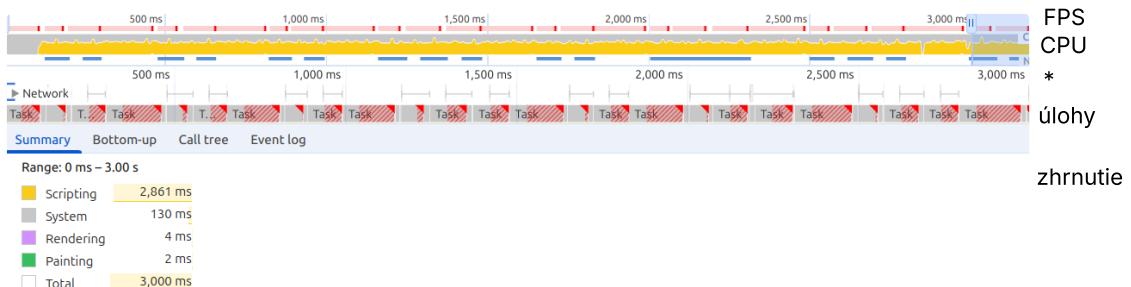
Ide o medzistupeň medzi 2. a 4. spôsobom, kedy je už vizualizácia riadená priamo pomocou kódu v jazyku JavaScript, ale riadenie animácie zostáva v rézii frameworku Dash.

Meranie výkonnosti je v tabuľke 5.2 a profilovanie na obrázku 5.2a.

Nastavenie parametra <code>interval</code> [ms]	Čas, za ktorý prebehla celá animácia (500 snímok) [s]	Priemerný čas vykreslenia jednej snímky [ms]
250	126	252
200	101	202
150	76	152
125	68	136
100	63	126
75	62	124

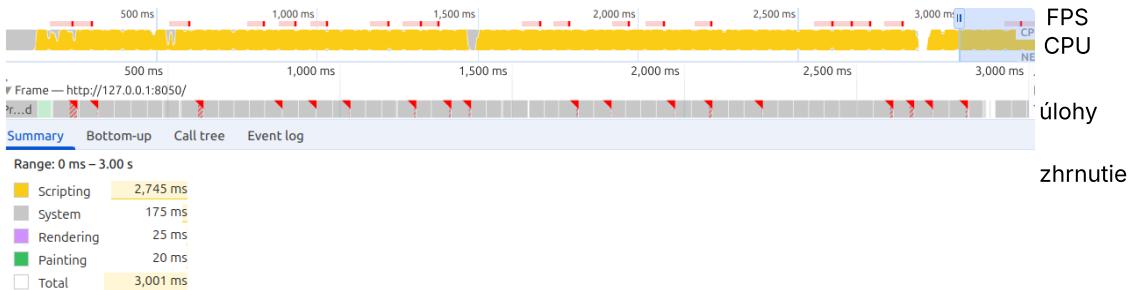
Tabuľka 5.2: Výkonnosť animácie pohybu po trati pri použití 3. spôsobu vykreslovania mračna bodov (riadenie vizualizácie v jazyku JavaScript, riadenie animácie v jazyku Python). Z nameraných údajov vyplýva, že minimálny čas potrebný na vykreslenie jednej snímky je asi 150 ms, čo zodpovedá rýchlosťi asi 6 snímok za sekundu.

Aj tento spôsob priniesol zlepšenie oproti tomu predchádzajúcemu, ale stále nie je dosťažný na hladký beh animácie. Riadenie animácie pomocou komponentu `Interval` frameworku Dash je totiž pomerne tažkopádne, pretože funguje na základe komunikácie medzi klientom a serverom a tým animáciu spomaľuje. Preto bolo vhodné nahradíť ho riadením animácie v jazyku JavaScript výhradne na strane klienta.

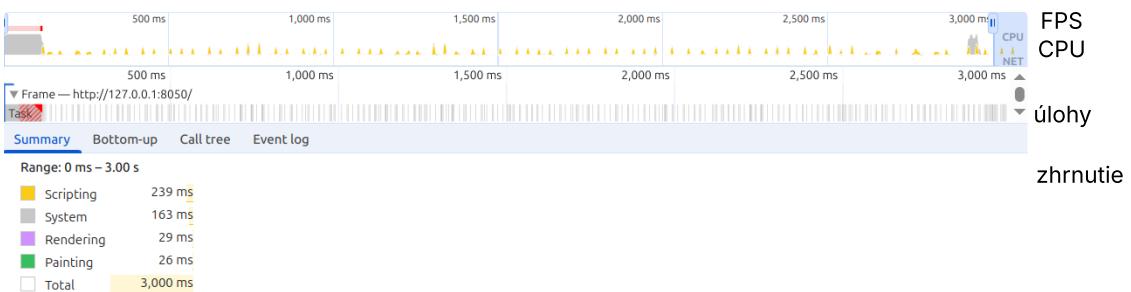


*sieťová komunikácia

(a) 3. spôsob, riadenie pomocou komponentu **Interval** a počítanie transformácií v prístupových funkciách.



(b) 4. spôsob, riadenie pomocou kódu v jazyku JavaScript a počítanie transformácií v prístupových funkciách.



(c) 5. spôsob, riadenie pomocou kódu v jazyku JavaScript a aplikovanie transformácií iba na kameru.

Obr. 5.2: Profilovanie animácie pohybu po trati pri použití rôznych spôsobov vykresľovania mračna bodov. Každý graf zachytáva tri sekundy behu animácie. Profilovanie prebiehalo v prehliadači Google Chrome 133.0.6943.126 s rozmermi okna 1480×832 pixelov. Bol použitý profilovací nástroj vstavaný v tomto prehliadači.

4. spôsob

Zmenou oproti predchádzajúcemu spôsobu je iba iný typ riadenia animácie, ktorý je použitý aj vo finálnej verzii implementácie a detailne popísaný v sekcií 4.3.

Profilovanie tohto spôsobu je na obrázku 5.2b. Pri porovnaní s profilovaním predchádzajúceho spôsobu sa ukázalo, že hoci sa zvýšilo zataženie procesora, výrazne sa znížil čas potrebný na vykreslenie jednej snímky animácie, čo umožnilo vykreslenie väčšieho počtu snímok za sekundu (v grafoch sekcia *úlohy*).

U tohto spôsobu už animácia pôsobila plynulo, ale výkonnosť aplikácie stále nebola vyhovujúca, pretože animácia výrazne zatažovala procesor a hodnota snímkovej frekvencie stále miestami dosahovala príliš nízke hodnoty (v grafoch červené čiary v sekcií *FPS*).

5. spôsob

V sekcií 2.5 boli popísané dva rôzne spôsoby nastavenia polohy kamery vo frameworku Deck.gl. U vyššie popísaných spôsobov vykresľovania mračna bodov bol použitý ten prvý, teda výpočet transformácií pomocou prístupových funkcií, pretože bol implementačne jednoduchší. Tento posledný, 5. spôsob sa od 4. spôsobu líši iba tým, že nepoužíva prístupové funkcie a transformácie aplikuje iba na kameru, nie na body.

Profilovanie tohto spôsobu vykresľovania mračna bodov je na obrázku 5.2c. Z nameraných údajov vyplýva, že táto optimalizácia veľmi výrazne znížila zataženie procesora. Zatiaľ čo pri 4. spôsobe sa počas trojsekundového intervalu vykonával kód v jazyku JavaScript 2,745 sekúnd, pri tomto spôsobe to bolo iba 239 milisekúnd, čo predstavuje viac než desaťnásobné zníženie.

Dôležitou metrikou pri posudzovaní výkonnosti animácií je snímková frekvencia meraná v FPS (*frames per second*, počet vykreslených snímok za sekundu). V ideálnom prípade by sa snímková frekvencia mala blížiť 60 FPS, pretože vtedy sa animácia ľudskému oku zdá hladká [4].

Podľa vstavaného ukazovateľa snímkovej frekvencie v prehliadači Google Chrome dosahovala skúmaná animácia pri 4. spôsobe vykresľovania mračna bodov zhruba 28 až 34 FPS, zatiaľ čo pri 5. spôsobe 51 až 55 FPS. Aj v tomto ohľade teda nastalo významné zlepšenie.

5.2 Meranie výkonnosti

Na výkonnosť aplikácie má najväčší vplyv mračno bodov. Táto sekcia obsahuje merania výkonnosti aplikácie pri prehrávaní animácie pohybu po trati s mračnami bodov rôznych veľkostí. Merania prebiehali s rovnakými technológiami ako v predchádzajúcej kapitole, na meranie záťaže procesora bol použitý nástroj Chrome Task Manager.

Výsledky merania výkonnosti animácie s mračnom bodov typu postprocess sú v tabuľkách 5.3 a 5.4.

U animácie bez skreslenia bola snímková frekvencia (FPS) dobrá až do menších jednotiek miliónov bodov, potom začala klesať. Deväť miliónov bodov už aplikácia nezvládla vôbec, pretože veľkosť dát spôsobila chybu vo frameworku Dash. Aby bola aplikácia schopná zobrazovať mračná bodov obsahujúce viac než osem miliónov bodov, musela by prejsť úpravou a deliť dátu na viacero častí.

Naopak u animácie so skreslením bola snímková frekvencia veľmi zlá aj pri menšom počte bodov, z čoho vyplýva, že je skreslenie implementované neefektívne a že režim so zobrazením vrátane skreslenia nie je vhodný na prehrávanie animácie.

Počet bodov	FPS	CPU (%)
200×10^3	51-54	70-210
500×10^3	48-51	90-160
1×10^6	47-50	60-190
2×10^6	45-50	70-170
5×10^6	30-42	70-250
8×10^6	21-24	70-190
9×10^6	—	—

Tabuľka 5.3: Výkonnosť vykreslovania mračna bodov typu postprocess *bez výpočtu skreslenia* v závislosti od počtu bodov, so zmenou polohy kamery desaťkrát za sekundu. V daných dátach jeden milión bodov zodpovedal približne štyridsiatim sekundám záznamu z lidaru.

Počet bodov	FPS	CPU (%)
50×10^3	4-5	140-200
100×10^3	3-4	130-240
200×10^3	2-4	150-180
500×10^3	1-3	130-180
1×10^6	2-4	70-230
2×10^6	1-3	70-230

Tabuľka 5.4: Výkonnosť vykreslovania mračna bodov typu postprocess *s výpočtom skreslenia* v závislosti od počtu bodov, so zmenou polohy kamery desaťkrát za sekundu.

Okrem snímkovej frekvencie bolo merané aj zataženie procesora. 100 % hodnoty CPU v tabuľke zodpovedá jednému plne bežiacemu jadru procesora. Táto hodnota je veľmi variabilná, ale u animácie s výpočtom skreslenia je mierne vyššia, čo je očakávané, pretože výpočet skreslenia prebieha na procesore.

Ďalej prebehlo meranie výkonnosti animácie s mračnom bodov typu real-time, ktorého výsledky sú v tabuľke 5.5.

Z merania vyplýva, že snímková frekvencia je veľmi dobrá a aplikácia nerobí problém ani zvýšenie počtu bodov či frekvencie striedania častí. Zataženie procesora je dokonca menšie a menej variabilné než u mračna bodov typu postprocess.

Celkovým záverom z tohto testovania je, že animácia má dobrú výkonnosť, ale iba bez výpočtu skreslenia. U mračna bodov typu postprocess sa výkonnosť začína zhoršovať u nižších jednotiek miliónov bodov a maximálny počet bodov, ktorý aplikácia zvládne vykresliť, je osem miliónov.

5.3 Vyhodnotenie používateľskej prívetivosti

Zistovanie používateľskej prívetivosti aplikácie prebiehalo v dvoch etapách.

V prvej etape bolo malému počtu účastníkov dané za úlohu iba oboznámiť sa s aplikáciou a zistiť, aká je jej funkcia. Účastníci boli pritom osobne sledovaní a cieľom bolo zistiť, či je aplikácia dostatočne intuitívna, teda či je na prvý pohľad zrejmá funkcia každého prvku.

Počet bodov v 1 časti	Frekvencia snímania (s^{-1})	FPS	CPU (%)
1×10^3	10	50-55	70-90
2×10^3	10	50-54	70-90
5×10^3	10	49-53	70-120
10×10^3	10	49-54	70-110
1×10^3	25	48-53	70-90
2×10^3	25	48-54	80-110
5×10^3	25	48-53	80-110
10×10^3	25	47-52	90-120

Tabuľka 5.5: Výkonnosť vykreslovania mračna bodov typu real-time *bez výpočtu skreslenia* v závislosti od počtu bodov v jednej časti mračna bodov a frekvencie snímania týchto častí lidarom. Frekvencia zmien polohy kamery bola pri testovaní totožná s frekvenciou snímania. V dodaných dátach bolo v jednej časti priemerne 2615 bodov a frekvencia snímania bola približne 10 častí za sekundu.

Závery boli nasledujúce:

- Prvky v používateľskom rozhraní nie sú dobre usporiadané, je potrebné ich preskupiť.
- K niektorým prvkom je potrebné pridať popis.
- Pre používateľov by bolo intuitívnejšie meniť farebnú škálu klikaním do grafu než použitím číselných vstupov pod ním.

Prvé dva body boli vyriešené, tretí nie, pretože je implementačne náročnejší.

Druhá etapa testovania mala dvanásť dobrovoľných účastníkov, väčšinou študentov FIT VUT, a prebiehala pomocou dotazníka. Účastníci dostali štyri úlohy, ktoré sa mali pokúsiť pomocou aplikácie vyriešiť, a potom vyplniť dotazník. Úlohy boli zámerne jednoduché, pretože ich cieľom bolo iba to, aby si účastníci vyskúšali prácu s aplikáciou.

Nedokonalosťou testovania bola skutočnosť, že účastníci testovania neboli cieľovými používateľmi, teda ľuďmi, ktorí pracujú s dátami z mobilných mapovacích systémov, ale na túto skutočnosť bol braný ohľad a veci, ktoré by im mohli byť nejasné, boli vysvetlené.

Prvou časťou dotazníka bolo meranie použiteľnosti metódou *System Usability Scale* (SUS). Táto metóda je rýchla a jednoduchá a zakladá sa na desiatich tvrdeniach, na ktoré účastník testovania vyberá odpoveď v rozmedzí „rozhodne nesúhlasím – skôr nesúhlasím – neviem – skôr súhlasím – rozhodne súhlasím“. Tvrdenia sú usporiadané tak, že sa striedajú tie, na ktoré majú účastníci tendenciu odpovedať skôr kladne a tie, na ktoré majú tendenciu odpovedať skôr záporne, čo ich nútí neodpovedať mechanicky a skutočne sa nad každým tvrdením zamyslieť. Odpovede sa následne obodujú a spočítava sa skóre od 0 do 100 [6].

Podľa článku J. Saura na stránke spoločnosti MeasuringU sa SUS stalo široko používanou metódou a systémy dosahujú priemerné SUS skóre 68 [17]. Testovaná aplikácia získala skóre 77,5, čo podľa grafu publikovaného v tomto článku zodpovedá približne percentilu 82, a je to teda nadpriemerný výsledok.

V druhej časti dotazníka mali účastníci testovania priestor na napísanie postrehov a návrhov na vylepšenia. Podali nasledovné návrhy:

1. panel nástrojov by mal byť implicitne otvorený alebo lepšie zviditeľnený (3×),
2. aplikácia by mala obsahovať nápovedy (2×),

3. ovládanie animácie pohybu po trati pomocou klávesnice,
4. zobrazenie ukazovateľa priebehu pri načítaní,
5. pridanie legendy ku grafu,
6. skrytie nastavení farieb a hrúbok čiar, pretože to nie je dôležitá vlastnosť,
7. pridanie prednastavených módov.

Jeden účastník upozornil na chybu, ktorú sa podarilo reprodukovať v prehliadači Google Chrome a následne opraviť.

Návrhy 1 a 3 boli zaradené do implementácie. Animáciu pohybu po trati je vo finálnej implementácii možné spustiť a zastaviť pomocou medzerníka a šípkami vľavo a vpravo sa posúva poloha o 3 sekundy dozadu alebo dopredu. Návrh 4 v rámci frameworku Dash nie je možné realizovať. Čo sa týka ostatných návrhov, bolo by možné v budúcnosti vykonať ďalší prieskum, ideálne s cielovými používateľmi, v ktorom by sa presnejšie zistilo, či a do akej miery je vhodné ich implementovať.

Kapitola 6

Záver

Cieľom tejto práce bolo vytvoriť systém pre vizualizáciu dát z mobilného mapovacieho systému. Tento cieľ bol splnený.

Návrh systému zahŕňal návrh funkcionality aj používateľského rozhrania. Pre zjednodušenie nahrávania dát do aplikácie bol navrhnutý špeciálny projektový súbor, ktorý je možné využiť, ak má používateľ prístup k serveru, na ktorom je aplikácia spustená.

Systém bol implementovaný ako webová aplikácia v programovacom jazyku Python s využitím frameworku Dash¹. Bolo preskúmaných niekoľko rozdielnych spôsobov implementácie vykreslovania mračna bodov pomocou rôznych technológií, z ktorých bol vybraný ten najlepší, a to vloženie skriptu v jazyku JavaScript, ktorý sa vykonáva na strane klienta a využíva hardvérovo akcelerovaný framework Deck.gl.

Bola vyhodnotená výkonnosť a používateľská prívetivosť aplikácie.

Výsledná aplikácia má dobrú výkonnosť s výnimkou výpočtu skreslenia. U mračna bodov typu postprocess sa výkonnosť začína zhoršovať u nižších jednotiek miliónov bodov a aplikácia zvládne mračná bodov do maximálnej veľkosti 8 miliónov bodov. Aplikácia splňa v dostatočnej miere všetky vlastnosti popísané v návrhu.

Používateľská prívetivosť aplikácie bola testovaná s použitím metódy *System Usability Scale*. Testovanie malo dvanásť účastníkov, ktorí dali aplikácii nadpriemerné hodnotenie a navyše poskytli aj užitočné podnety na jej ďalšie zlepšenie.

V práci by bolo možné pokračovať pridaním možnosti zobrazovať dátá vysielané servrom v reálnom čase. Existuje ešte mnoho možných zlepšení funkcionality aj používateľského rozhrania, napríklad rozšírenie možností nahrávania dát, umožnenie nastavenia farebnej škály klikaním do grafu, filtrácia mračna bodov a optimalizácia výpočtu skreslenia a procesu nahrávania dát. Hodilo by sa pridať validáciu nahrávaných dát a upozorniť používateľa chybovou hláškou, ak nahrá dátá v nesprávnom formáte.

V dlhodobejšom horizonte by bolo možné prácu rozšíriť okrem vizualizácie aj o niektoré možnosti spracovania mračna bodov, napríklad kolorizáciu podľa videa.

¹Zdrojové kódy vytvorenej aplikácie sú voľne dostupné na stránke <https://github.com/xmiska03/RailwayDataVisualization>.

Literatúra

- [1] AHN, S. H. OpenGL Projection Matrix. *Songho.ca* online. Dostupné z: <https://www.songho.ca/>. [cit. 2025-05-01]. Path: OpenGL.
- [2] AHN, S. H. OpenGL Viewport Transform. *Songho.ca* online. Dostupné z: <https://www.songho.ca/>. [cit. 2025-05-01]. Path: OpenGL.
- [3] BALOCH, J. Image Perspective Distortion in JavaScript. *Medium* online. 10. marca 2023. Dostupné z: <https://blog.bitsrc.io/image-perspective-distortion-with-javascript-and-html-canvas-14627233623d>. [cit. 2025-05-03].
- [4] BASQUES, K. Analyze runtime performance. *Chrome for developers* online. Dostupné z: <https://developer.chrome.com/>. [cit. 2025-04-14]. Path: Docs; DevTools; Performance.
- [5] BENTLEY SYSTEMS, INCORPORATED. Orbit 3DM Publisher & Orbit 3DM Cloud. *Bentley Systems* online. Dostupné z: <https://www.bentley.com/>. [cit. 2025-05-08]. Path: Software; Reality and Spatial Modeling.
- [6] BROOKE, J. SUS – A quick and dirty usability scale. In: JORDAN, P. W. et al., ed. *Usability Evaluation In Industry* online. 1. vyd. CRC Press, Január 1996, s. 189–194. ISBN 9780429157011. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781498710411-35>. [cit. 2025-05-08].
- [7] DE VRIES, J. *Coordinate Systems* online. Dostupné z: <https://learnopengl.com/>. [cit. 2025-05-01]. Path: Getting started.
- [8] FACULTY SCIENCE LTD. *Dash Bootstrap Components* online. Dostupné z: <https://dash-bootstrap-components.opensource.faculty.ai/>. [cit. 2025-04-24].
- [9] FOXGLOVE. Visualization and observability for robotics developers. *Foxglove* online. Dostupné z: <https://foxbglove.dev/>. [cit. 2025-05-08]. Path: Product; Visualization.
- [10] HARTLEY, R. a ZISSEMAN, A. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. 2. vyd. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 152-156 s. ISBN 978-0-521-54051-3.
- [11] OPENCV. *Camera Calibration* online. Dostupné z: <https://docs.opencv.org/4.x/>. [cit. 2025-04-29]. Path: OpenCV-Python Tutorials; Camera Calibration and 3D Reconstruction.
- [12] OPENCV. Camera Calibration and 3D Reconstruction. *OpenCV 2.4.13.7 documentation* online. Dostupné z: <https://docs.opencv.org/2.4/>. [cit. 2025-04-29]. Path: OpenCV API Reference; calib3d. Camera Calibration and 3D Reconstruction.

- [13] OPENJS FOUNDATION. *Deck.gl* online. 2024. Dostupné z: <https://deck.gl/>. [cit. 2025-01-14].
- [14] OPENJS FOUNDATION. Performance Optimization. *Deck.gl* online. 2025. Dostupné z: <https://deck.gl/>. [cit. 2025-04-12]. Path: Docs; Developer Guide; Using the API.
- [15] OPENSFM. Coordinate Systems. *OpenSfM* online. Dostupné z: <https://opensfm.readthedocs.io/>. [cit. 2025-04-30]. Path: Geometric Models.
- [16] PLOTLY. *Dash Python User Guide* online. 2025. Dostupné z: <https://dash.plotly.com/>. [cit. 2025-01-17].
- [17] SAURO, J. Measuring usability with the system usability scale (SUS). *MeasuringU* online. 3. februára 2011. Dostupné z: <https://measuringu.com/sus/>. [cit. 2025-05-08].
- [18] SNOWFLAKE INC. *Streamlit* online. 2024. Dostupné z: <https://streamlit.io/>. [cit. 2025-01-17].
- [19] STEMKOSKI, L. a PASCALE, M. *Developing Graphics Frameworks with Python and OpenGL* online. 1. vyd. Boca Raton: CRC Press, júl 2021. 344 s. ISBN 9781003181378. Dostupné z: <https://doi.org/10.1201/9781003181378>. [cit. 2025-05-01].
- [20] SUN, W. a COOPERSTOCK, J. Requirements for Camera Calibration: Must Accuracy Come with a High Price? In: IEEE. *2005 Seventh IEEE Workshops on Applications of Computer Vision (WACV/MOTION'05)* online. Los Alamitos, CA, USA: IEEE, Január 2005, sv. 1, s. 356–361. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ACVMOT.2005.102>. [cit. 2025-04-29].
- [21] THE KHRONOS GROUP INC. WebGL Overview. *The Khronos Group* online. Dostupné z: <https://www.khronos.org/>. [cit. 2025-05-01]. Path: WebGL.
- [22] THE MATHWORKS, INC. What Is Camera Calibration? *MATLAB Help Center* online. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/vision/ug/camera-calibration.html>. [cit. 2025-04-29]. Path: Image Processing and Computer Vision; Computer Vision Toolbox; Camera Calibration.
- [23] PRESTON-WERNER, T.; GEDAM, P. et al. *TOML v1.0.0* online. 1. novembra 2021. Dostupné z: <https://toml.io/en/v1.0.0>. [cit. 2025-04-11].
- [24] UBER ATG. *Autonomous Visualization System* online. Dostupné z: <https://avs.auto/>. [cit. 2025-04-11].

Príloha A

Projektový súbor

Pre nahrávanie dát do implementovanej aplikácie bol navrhnutý jednoduchý jednoúrovňový projektový súbor vo formáte TOML, ktorého štruktúra je popísaná tabuľkou [A.1](#).

Tabuľka A.1: Štruktúra projektového súboru.

Názov premennej	Dátový typ	Popis
<code>project_path</code>	reťazec	Absolútna cesta k priečinku s projektom. Všetky ostatné cesty sú relatívne vzhľadom k tomuto priečinku.
<code>postprocess_pcd_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k súboru s mračom bodov typu postprocess vo formáte <code>pcd</code> .
<code>realtime_pcd_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k priečinku so súborníkmi s mračom bodov typu real-time vo formáte <code>pcd</code> .
<code>realtime_pcd_filename_prefix</code>	reťazec	Prefix názvov týchto súborov. ¹
<code>realtime_pcd_files_cnt</code>	prirodzené číslo	Počet týchto súborov.
<code>realtime_pcd_timestamps_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k súboru s časovými razítkami mrača bodov typu real-time vo formáte <code>txt</code> . ²
<code>video_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k súboru s videom vo formáte <code>mp4</code> , s kódovaním H.264.
<code>vector_data_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k priečinku so súborníkmi s vektorovými dátami vo formáte <code>csv</code> .
<code>translations_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k súboru s transláciami kamery vo formáte <code>csv</code> .
<code>rotations_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k súboru s rotáciami kamery vo formáte <code>csv</code> .
<code>timestamps_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k súboru s časovými razítkami polôh kamery vo formáte <code>csv</code> .
<code>profile_translations_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k priečinku so súborníkmi s transláciami prejazdného profilu vo formáte <code>csv</code> . ³
<code>profile_translations_filename_prefix</code>	reťazec	Prefix názvov týchto súborov.
<code>profile_rotations_path</code>	reťazec	Relatívna cesta k priečinku so súborníkmi s rotáciami prejazdného profilu vo formáte <code>csv</code> . ⁴

¹ Jednotlivé súbory musia byť pomenované `[prefix]_0.pcd`, `[prefix]_1.pcd`, atď.

² Každý riadok súboru musí byť vo formáte `[cislo_riadku] [casove_razitko]`.

³ Každý riadok súboru musí byť vo formáte `[x] [y] [z]`. Jednotlivé súbory musia byť pomenované `[prefix]_25.csv`, `[prefix]_50.csv`, `[prefix]_75.csv`, `[prefix]_100.csv`.

⁴ Každý riadok súboru musí byť vo formáte `[yaw] [pitch] [roll]`.

profile_rotations_filename_prefix	reťazec	Prefix názov týchto súborov.
calibration_matrix	pole 9 čísel	Kalibračná matica.
far_plane	prirodzené číslo	Vzdialenosť zadnej orezávacej roviny v metrech.
distortion_parameters	pole 5 čísel	Parametre skreslenia kamery.