

naše č. j. TSK/Zde031/2026

vyřizuje: 

V Praze dne 13. 04. 2026


Věc: Poskytnutí informací žadateli k žádosti dle zák. č. 106/1999 Sb., informačního zákona, v platném znění, ve věci č.j. TSK/Zde031/2026

Vážený pane ,

Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a.s. (dále jen „TSK“), se sídlem: Veletržní 1623/24, Holešovice, 170 00 Praha 7, IČO: 03447286, obdržela dne 31.03.2026 Vaše podání ze dne 30.03.2026 (dále také jako „Žádost“), které bylo dle jeho obsahu vyhodnoceno jako žádost o poskytnutí informací dle zák. č. 106/1999 Sb., informační zákon, v platném znění (dále jen „Zspi“). TSK jako subjekt povinný dle ust. § 2a, písm. b) Zspi, vyřizuje tímto dle ust. § 4a a souvisejících, jakož i ust. § 14, odst. 5, písm. d) Zspi Vaši Žádost o poskytnutí informací, týkající se informací o „sdělení informací kompletní Data, Anotace i Report (viz Příloha 3, poslední odrážka) tak jak je definuje plnění smlouvy číslo 3/23/3346/0019 SMLOUVA O ANALÝZE DAT Z GNSS, která byla uzavřena mezi Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a.s. na straně jedné a Iterait a.s. na straně druhé“, takto:

přílohou tohoto vyřízení Vaší Žádosti zasíláme plnění poskytnuté smluvním partnerem spol. Iterait a.s. dle smlouvy č. 3/23/3346/0019 Smlouvy o analýze dat z GNSS, konkrétně tedy Analýzu přesnosti lokalizace GNSS v kontextu zakázky Monitoring místních komunikací ze dne 10.01.2024.

S pozdravem 


vedoucí oddělení právního a corporate governance

příloha: dle textu shora

Upozornění:

Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a.s. (dále jen „TSK“) odmítá při své činnosti jakékoli protiprávní a neetické jednání a v maximální míře dodržuje transparentnost a legalitu. Zaměstnanci a osoby jednající za TSK jsou povinni se při svém jednání řídit zásadami Etického kodexu společnosti Technická správa komunikací hl. m. Prahy, a.s. (dále jen „Etický kodex“), který je nedílnou součástí firemní kultury TSK. Každá z osob jednajících za TSK je povinna oznámit jakékoli podezřelá a protiprávní jednání, které je v rozporu s Etickým kodexem. Pokud osoba jednající za TSK jedná v rozporu s Etickým kodexem, není takové jednání považováno za jednání v rámci nebo zájmu TSK.

Analýza přesnosti lokalizace GNSS v kontextu zakázky Monitoring Místních Komunikací



Vyhotovil: Adam Blažek

Kontakt: adam.blazek@iterait.com

Datum: 10.1. 2024



Zakázka: 3/23/3346/0019

Obsah

1. Úvod	2
2. Cíle	4
3. Struktura	5
4. Kontext zakázky MMK	6
5. GNSS modul	10
Postupy zpřesňování lokalizace	10
Stínění odrazů	10
Kalmanův filtr	10
RTK korekce	11
6. Metodika sběru dat	12
Anotace	13
7. Přehled dat	15
GNSS data	15
Anotace	20
8. Ukazatel kvality GNSS lokalizace	23
9. Faktory související s kvalitou lokalizace	24
10. Shrnutí analýzy	27
Vymezení oblastí se sníženou přesností lokalizace	27
11. Možnosti detekce snížené přesnosti	28
12. Možnosti prevence a kompenzace	29
Dead reckoning	29
Alternativní GNSS modul	30
Integrace OBD II	30
Vizuální lokalizace	31
Shrnutí možností zpřesnění	32
Doporučení	33
13. Závěr	34

1. Úvod

V tomto dokumentu je vyhotovena analýza přesnosti lokalizace vozidel pomocí Global Navigation Satellite System (dále jen GNSS) senzorů v kontextu realizace zakázky Monitoring místních komunikací (dále jen MMK) pro společnost Technická správa komunikací hlavního města Prahy, a.s.

Hlavními cíli analýzy je zpracovat data o přesnosti lokalizace pro potřeby MMK a identifikovat faktory, které přesnost ovlivňují. Vedle samotné analýzy jsou v dokumentu dále identifikovány další techniky či postupy, které mohou zvýšit kvalitu lokalizace s ohledem na získané poznatky.

2. Cíle

Cílem analýzy je zajistit kolekci dat ze senzorů GNSS v rámci provádění MMK, doplnit data o anotaci charakteru monitorovaných oblastí a konečně zpracovat vše výše uvedené a provést analýzu s cílem identifikovat oblasti se sníženou přesností lokalizace.

Konkrétně jsme při vypracování této analýzy vázáni:

1. Měřit ze senzorů GNSS v rámci provádění Monitoringu zejména následující údaje:
 - a. Pozice určená senzorem spolu se sebehodnotícím kritériem přesnosti;
 - b. Počty použitých satelitů a další metriky určující kvalitu měření;
 - c. Rychlosti vozidla a data z inerciálních senzorů;
 - d. Čas všech předchozích měření;
 - e. (dále souhrnně jen „Data“);
2. Provést pro území, kde budou měřena, anotaci oblastí podle
 - a. typu zástavby či dalších specifických charakteristik oblastí, které mají nebo mohou mít vliv na přesnost měření polohy za pomoci senzorů GNSS (dále jen „Anotace“);
3. Zpracovat ze získaných Dat a vytvořených Anotací statistickou analýzu (dále jen „Analýza“), která bude obsahovat přinejmenším:
 - a. Identifikaci oblastí s konzistentně nižší přesností měření polohy a kategorizaci těchto oblastí s ohledem na vytvořené Anotace;
 - b. Určení externích či kontrolovatelných faktorů vedoucích k časově či územně omezenému snížení přesnosti senzorů GNSS;
 - c. Možnosti detekce, kompenzace či prevence snížené přesnosti GNSS senzorů v kontextu Monitoringu i mimo něj;
 - d. Shrnutí statisticky významných jevů plynoucích ze získaných Dat a vytvořených Anotací.

Těmto cílům odpovídá struktura dokumentu, která je popsána v následující kapitole.

3. Struktura

Dokument začíná popsáním kontextu zakázky monitoring místních komunikací (Kapitola 4) a zakotvením základních pojmů technologie GNSS (Kapitola 5). Tyto kapitoly jsou důležité zejména pro správnou interpretaci navazující analýzy.

Metodika a rozsah měřených dat ze senzorů GNSS jsou popsány v navazující Kapitole 6. Samotná struktura a popis naměřených dat jsou popsány v Kapitole 7 a to včetně popisu anotací. Samotná data v surové podobě jsou předána jako příloha analýzy.

Předpokladem pro vypracování robustní analýzy je správné vymezení cílové metriky - přesnosti lokalizace. V kapitole 8 proto zkoumáme vlastnosti parametru přesnost použitého modulu GNSS.

V Kapitole 9 jsou identifikovány a zhodnoceny samotné parametry (ne)ovlivňující přesnost. Poznatky jsou pak shrnuty v Kapitole 10. V navazujících Kapitolách 11 a 12 jsou identifikovány a blíže popsány možnosti detekce snížené přesnosti lokalizace a možnosti prevence či kompenzace.

Závěry celé analýzy jsou pak shrnuty v poslední 13. kapitole.

Dříve definované cíle analýzy jsou tak plně pokryty a to zejména následovně:

1. Cíle z bloku 1 a 2: Kapitoly 6 a 7
2. Cíle z bloku 3: Kapitoly 8, 9, 10, 11 a 12

přičemž ostatní kapitoly slouží čtenáři jako zasazení poznatků do správného kontextu.

4. Kontext zakázky MMK

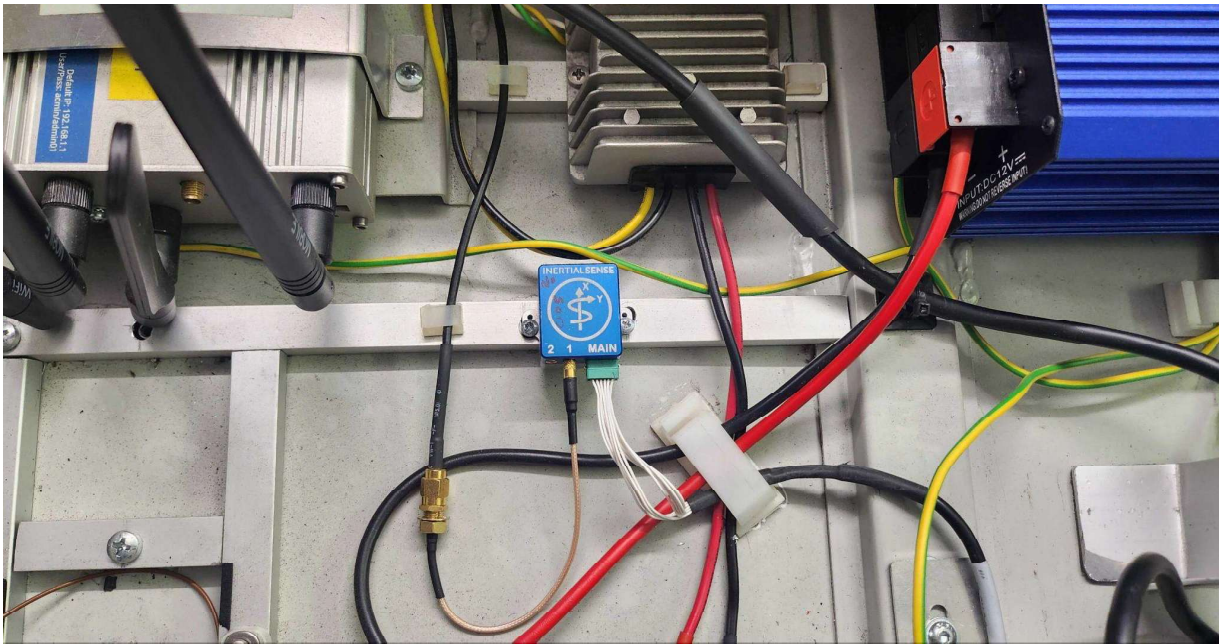
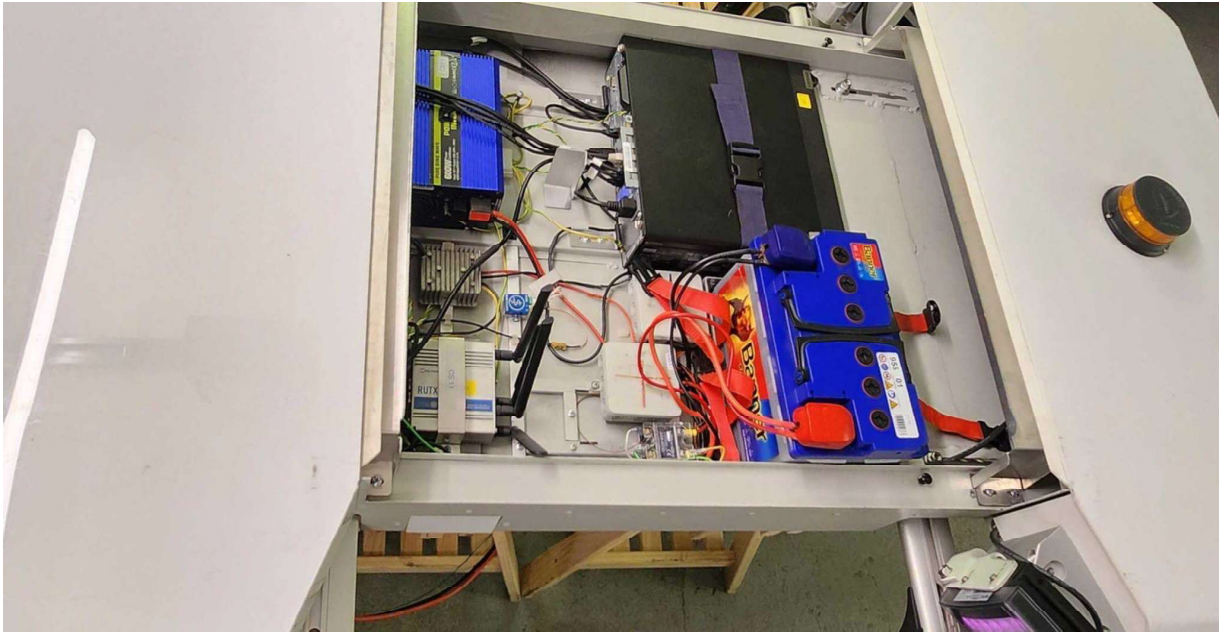
Analýza je vypracována zejména pro účely vyhodnocení stávajících možností technologie použité v rámci zakázky Monitoring Místních Komunikací. Pro pochopení souvislostí a vyvození relevantních závěrů proto v této Kapitole stručně popíšeme technologii CitySense od stávajícího dodavatele předmětného plnění.

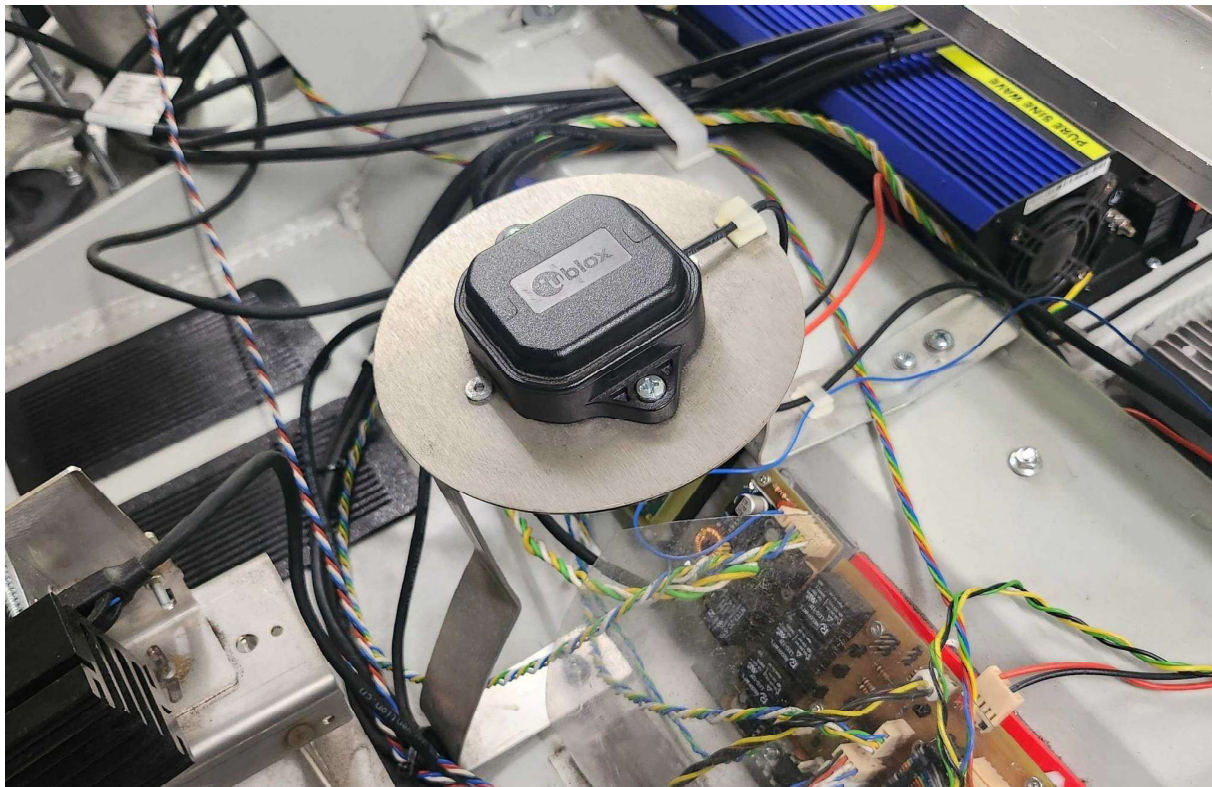
Hlavním cílem MMK je monitoring dopravy v klidu a související dopravní infrastruktury. Zejména tedy jde o rozpoznání stojících (parkujících) vozidel v reálném čase pro účely zahájení přestupkového řízení v případě porušení odpovídajících předpisů. Pro každé takové porušení je třeba pořídit důkazní materiály, které mimo jiné musí obsahovat přesné a spolehlivé údaje o čase a poloze daného vozidla.

Zakázka je v současné době realizována pomocí technologie CitySense od společnosti Iterait a.s. přičemž stěžejním prvkem technologie je monitorovací vozidlo respektive CitySense KIT instalovaný na monitorovací vozidlo. Pro splnění požadavku na přesnost lokalizace obsahuje CitySense KIT vysoce přesný modul GNSS a 3D time-of-flight kamery, které slouží pro určení relativní vzdálenosti detekovaného vozidla od monitorovacího vozidla. Výše popsany CitySense KIT je zachycen na následujících fotografiích a to po řadě:

1. Celkový pohled na monitorovací vozidlo CitySense
2. Detail pohled na částečně otevřený CitySense KIT, GNSS anténa je deinstalována
3. Detailní pohled na instalaci GNSS modulu
4. Detailní pohled na anténu GNSS včetně "stínící" podložky



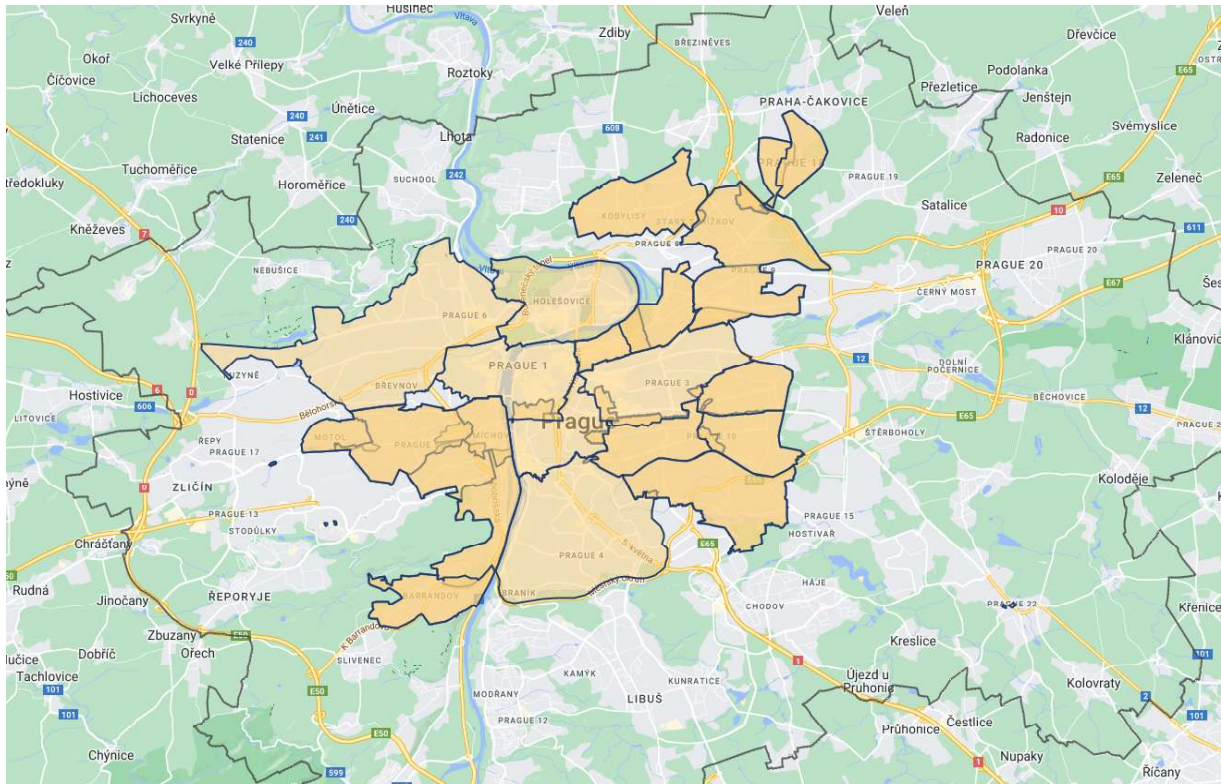




Pro zajištění monitoringu na území Hlavního města Prahy je dodavatelem provozováno 16 monitorovacích vozidel s výše popsány CitySense KITy. Monitoring probíhá ve dvou či tři směnném provozu a to v pracovní dny i o víkendy a svátcích. Každé vozidlo ujede přibližně 50.000 až 70.000 km ročně.

Pro maximální efektivitu provozu jsou trasy vozidel plánovány algoritmicky tak, aby byly požadavky monitoringu splněny s co možná nejmenším nájezdem monitorovacích vozidel. Určené trasy proto běžně hustě pokrývají lokální pod-oblast celého území monitoringu a obsahují značné množství odbočování. Některé uliční úseky mohou být v rámci jedné trasy projety mnohokrát. Uvedené vlastnosti tras kladou značné požadavky na samotné řidiče a jejich navigaci. Lokalizace monitorovacího vozidla tak hraje další kritickou roli pro navigaci vozidla. Bez přesné lokalizace nelze vytvořit validní přestupkovou dokumentaci ani nelze vykonávat samotný monitoring.

Monitoring je prováděn na podstatné části území Hl. m. Prahy a to podle požadavků jednotlivých městských částí. Přehled monitorovaných oblastí s výskytem modrých zón je zachycen na mapě níže. Vedle oblastí s modrými zónami je monitoring realizován i v dalších oblastech Prahy dle požadavků Zadavatele. Analýze je vypracována na základě měřených dat z běžného provozu monitoringu.



Během realizace MMK v roce 2023 byla zjištěna v průměru dostatečná kvalita lokalizace, nicméně v jistých oblastech, zejména v městské části Praha 1, docházelo opakovaně k výskytu netriviálních diskrepancí v lokalizaci. Tyto zjištění, mimo jiné, jsou motivací k vypracování této analýzy.

5. GNSS modul

Globální navigační satelitní systémy (GNSS) poskytují přesnou lokalizaci a časové informace na celém světě pomocí signálů vysílaných z řady družic obíhajících Zemi. Tyto signály, přijímané speciálními GNSS přijímači, umožňují určení polohy objektu s vysokou přesností. Proces triangulace, kdy přijímač měří vzdálenost od alespoň čtyř družic s využitím časových rozdílů příjmu signálů, je základem pro určení přesné polohy. Tato metoda využívá známé polohy družic a časové značky signálu, aby vypočítala přesnou pozici přijímače na zemském povrchu. GNSS systémy jsou klíčové pro řadu aplikací, od navigace a mapování až po synchronizaci času v telekomunikačních sítích.

Při realizaci MMK je využito GNSS přijímačů (dále také sensorů) právě pro lokalizaci monitorovacích vozidel v reálném čase.

Postupy zpřesňování lokalizace

S ohledem na široký výčet aplikací lokalizace pomocí GNSS má použitý modul (stejně jako podobné moduly) řadu konfiguračních možností jak optimalizovat přesnost lokalizace. Vedle nastavení firmware se jedná i o způsob instalace do monitorovacího vozidla. V následujících sekcích jsou popsány a stručně okomentovány jednotlivé techniky pro zvýšení přesnosti lokalizace.

Stínění odrazů

Jedním z problémů ke kterému dochází zejména v městské zástavbě je odraz signálu z GNSS družic od okolních objektů včetně samotného povrchu vozovky. Odražený signál v případě zachycení putuje k anténě GNSS modulu déle než signál zachycený přímo. Delší trajektorie implikuje zpoždění v přijetí signálu a tím způsobí chybu v lokalizaci.

Pro minimalizaci šance na zachycení odraženého signálu je na monitorovacích vozech MMK anténa GNSS modulu podložena kovovým stíněním, které zamezuje přijetí signálu odraženého od střechy vozidla, KITu či vozovky. Tento způsob instalace předpokládá stabilní horizontální polohu antény modulu což je v případě užití v MMK splněno. Instalace GNSS antény tak v tuto chvíli odpovídá doporučení výrobce.

Kalmanův filtr

Kalmanův filtr je predikční model s širokou škálou užití, zejména na systémy, kde pomocí mnoha nepřesných pozorování dokáže odhadnout reálný stav systému. Jedním z takovýchto systémů je například odhad polohy GNSS přijímače pomocí signálu z družic a potenciálně dalších vstupů, jako např. data z akcelerometru, gyroskopu a magnetometru. Kalmanův filtr existuje v mnoha dalších variantách, které oproti základnímu filtru zvládají modelovat i různé nelineární závislosti. Díky schopnosti modelovat pozorovaný systém a integrovat informace z

různých zdrojů se Kalmanův filtr stal klíčovým nástrojem pro zvyšování přesnosti a spolehlivosti GNSS navigačních systémů.

V kontextu MMK je Kalmanova filtru (dále jen EKF) použito ve firmware zvoleného GNSS modulu. Daný modul však neumožňuje bližší konfiguraci EKF ani přesně nedokumentuje jeho konkrétní parametrizaci. Firmware modulu lze nastavit do různých módů lišících se právě parametry EKF, ale také frekvencí celého výpočtu. V praxi se experimentálním postupem došlo k nastavení v módu airborne<4G.

RTK korekce

Real-Time Kinematic (RTK) je technologie, která významně zvyšuje přesnost GNSS lokalizace tím, že využívá pevné pozemní referenční stanice k poskytování diferenciálních korekcí GNSS signálům. Tato metoda umožňuje dosahovat přesnosti polohy v řádu centimetrů, což je výrazné zlepšení oproti běžným GNSS systémům, jejichž přesnost je typicky v řádu metrů. RTK systémy pracují tak, že referenční stanice přijímá signály z GNSS družic současně s mobilním přijímačem (v našem případě vozidlem) a vypočítává korekční faktory na základě známé pevné polohy stanic. Tyto korekce jsou poté v reálném čase přenášeny do mobilního přijímače, který je využívá k upřesnění své vlastní polohy.

V RTK systému může být použito více stanic a korekční výpočet tak může informace kombinovat. V kontextu MMK je RTK využíváno a jeho dostupnost, respektive stáří RTK signálu je jedním ze sledovaných parametrů pro další kroky analýzy.

6. Metodika sběru dat

Důležitým předpokladem pro objektivní hodnocení dat je vhodný postup jejich sběru zejména co se týče uniformnosti, úplnosti a přesnosti. Každý rozdíl vůči praktickému provozu MMK by znamenal snížení vypovídající hodnoty analýzy v kontextu MMK. Sběr dat byl proto realizován paralelně s praktickým provozem a to všemi dostupnými vozidly bez rozdílu v období 28. 8. 2023 až 18. 9. 2023.

Vozidlo, které v daný moment sbíralo data, provádělo běžný monitoring bez zvláštního zadání či vědomí obsluhy vozidla. Program pro sběr dat odečetl dostupná data ze sensorů každou sekundu a tyto data strukturovaně uložil do perzistentní paměti CitySense KITu. Po skončení monitoringu byla data stažena do centrálního úložiště. Množství uložených GNSS dat je zanedbatelné vůči množství dat samotného monitoringu a to jak v objemu tak v době potřebné pro zpracování či uložení. Ukládání GNSS dat tak nemělo pozorovatelný vliv na provoz technologie monitoringu.

Každé odečtení dat ze sensorů obsahuje následující pole:

Skupina	Pole	Popis	Jednotka
	timestamp	Čas odečtení dat	ISO 8601
ins1	height_m_sea	WGS84 výška nad střední hladinou moře	metr
	latitude	WGS84 stanovená zeměpisná šířka	stupně
	longitude	WGS84 stanovená zeměpisná délka	stupne
	velocity	Aktuální rychlost pohybu	m/s
gpsPos	cnoMean	Průměr všech nenulových sil signálu z jednotlivých GNSS družic	dBHz
	cnoMeanSigma	Standardní odchylka cnoMean za posledních 5 sekund.	dBHz x10
	hAcc	Odhad horizontální přesnosti	metr
	leapS	Odchylka GPS a UTC času	sekunda
	satsUsed	Počet satelitů použitých pro výpočet pozice	-
	vAcc	Vertikální přesnost	metr
gpsRtkRel	baseToRoverDistance	Vzdálenost vozidla od RTK stanice	metr
	differentialAge	Čas od poslední aktualizace RTK korekce	sekunda
gpsSat	numSats	Počet viditelných GNSS satelitů	-

Vedle uvedených polí byly zaznamenány další údaje charakteru metadat (například identifikace vozidla, stav jízdy apod.) a také další údaje, které nebyly podrobněji zpracovávány. Důvodem pro vynechání daného pole z podrobnějšího zpracování je typicky nízká statistická signifikantnost daného pole či redundance s jiným polem. Plný výčet sbíraných polí včetně příkladů je uveden v příloze analýzy.

Jednotlivá měření jsou organizována v časově souvislých sériích, které zachycují jednotlivé jízdy monitoringu. Série kratší než 5 minut jsou z analýzy vyřazeny, neboť takové jízdy neodpovídají běžnému provozu MMK.

Výsledný dataset obsahuje celkem 900 jízd s přibližně 9 milióny měření.

Anotace

Cílem anotace byla charakterizace monitorovaných oblastí a to zejména dle typu zástavby či dalších specifických vlastností, které mohou mít vliv na kvalitu lokalizace. Pro anotaci byl vytvořen seznam segmentů uliční sítě a pro každý takový segment bylo ručně stanoveny následující charakteristiky:

Charakteristika	Popis	Jednotka
left_distance	Přibližná vzdálenost zástavby vlevo od vozidla	metr
left_height	Přibližná výška zástavby vlevo od vozidla	počet pater zástavby
left_full	Zástavba vlevo od vozidla je v rámci úseku souvislá	indikátor ano/ne
right_distance	Přibližná vzdálenost zástavby vpravo od vozidla	metr
right_height	Přibližná výška zástavby vpravo od vozidla	počet pater zástavby
right_full	Zástavba vpravo od vozidla je v rámci úseku souvislá	indikátor ano/ne
trams	V uličním úseku se vyskytuje trakční vedení pro tramvaje	indikátor ano/ne
trees	V uličním úseku se vyskytují stromy	indikátor ano/ne
obstacles	V uličním úseku se vyskytují jiné překážky	indikátor ano/ne

Zejména jde tedy o charakterizaci oblastí, respektive vybraných uličních úseků, v ohledech majících vliv na viditelnost GNSS satelitů či potenciálu pro narušení procesu lokalizace.

Uvedené charakteristiky byly manuálně stanoveny a také zkontrolovány u přibližně 1400 uličních úseků. U uličních úseků a charakteristik, které byly nejednoznačné (např. variabilní vzdálenost zástavby) byla hodnota stanovena na základě většinové či průměrné hodnoty pro daný uliční úsek.

Pro potřeby analýzy byly anotované vlastnosti interpolovány metodou nejbližšího souseda na zbylé uliční úseky. Navzdory značnému úsilí je hodnocení jednotlivých uličních úseku komplikované a ne zcela jednoznačné. Důvodem je často subjektivní hodnocení nebo heterogenita daného uličního úseku. I přes pečlivou ruční anotaci a validaci předpokládáme jistý šum či nejednoznačnost anotací. Výsledkem tak může být nižší korelace se zbytkem dat.

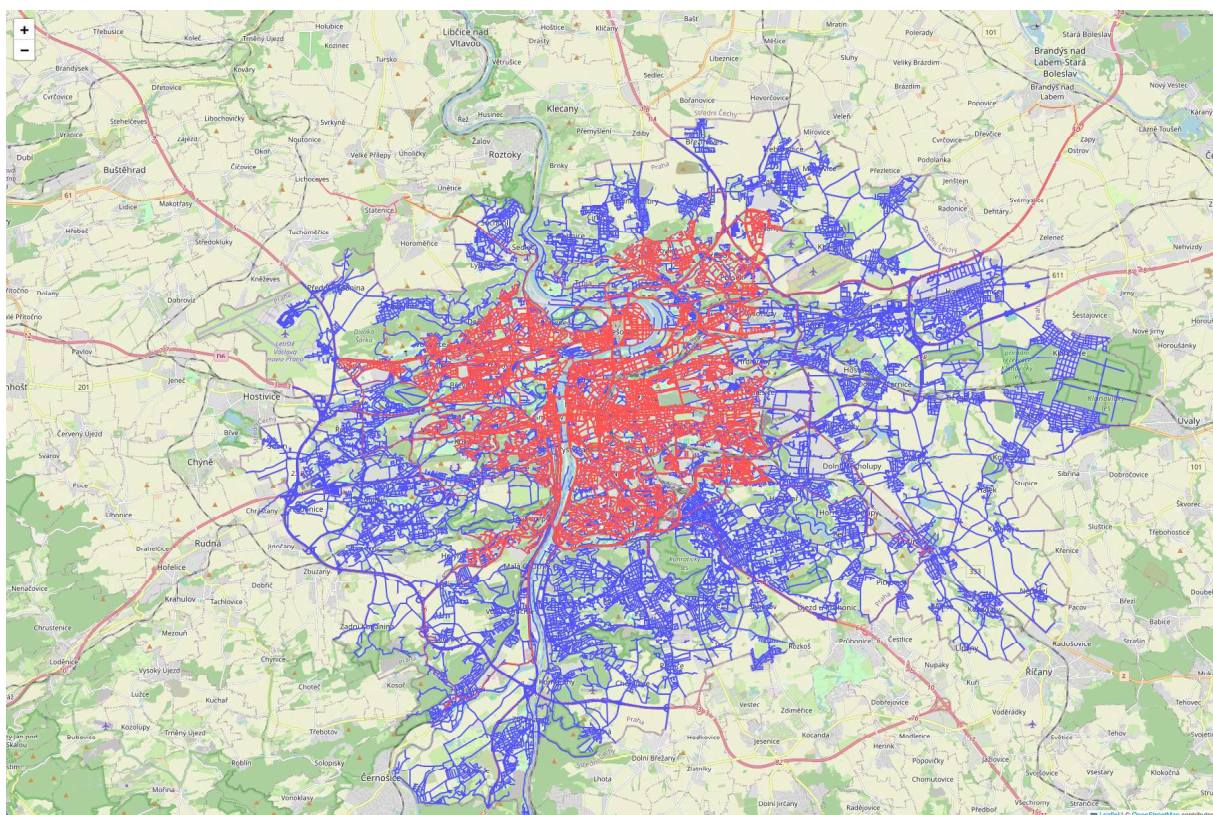
7. Přehled dat

V této kapitole představíme jednoduché vizualizace a přehledy GNSS dat a anotací. Mapy a grafy v originálním rozlišení spolu s interaktivními mapami jsou k dispozici jako příloha analýzy.

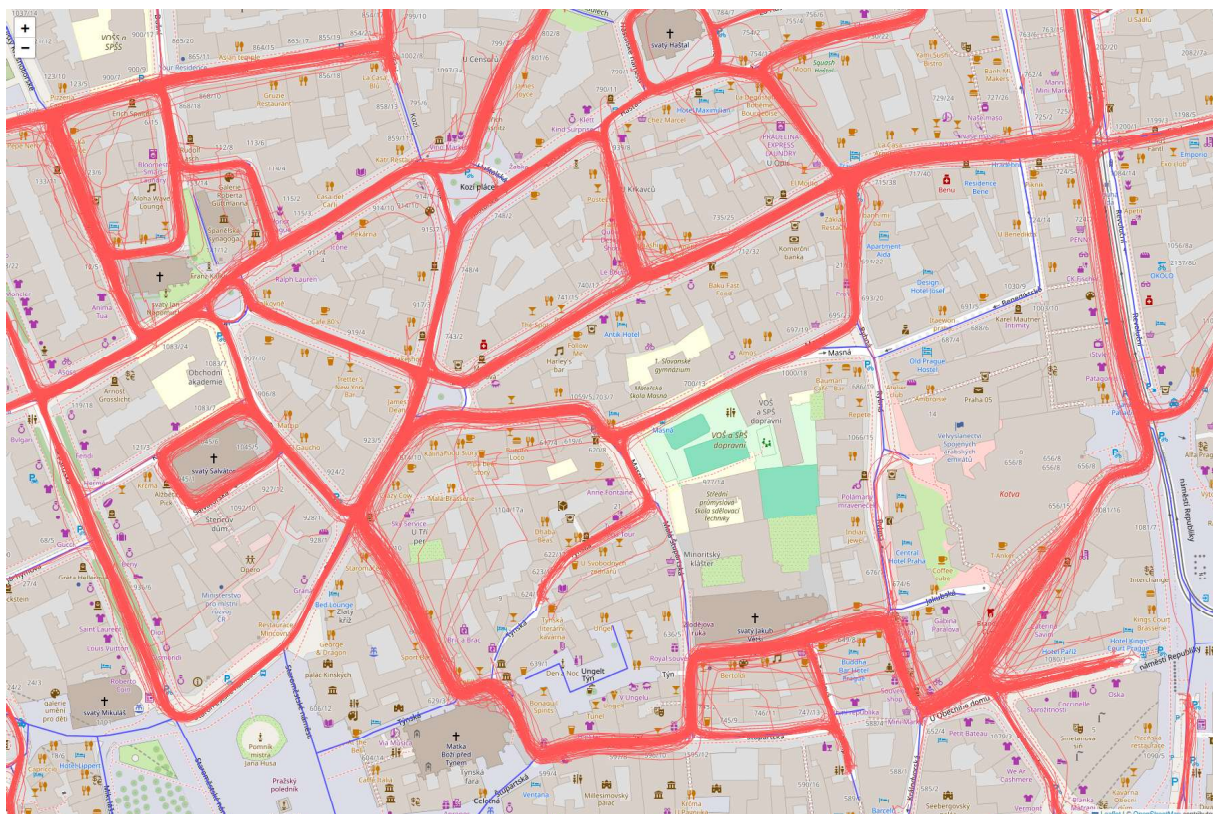
GNSS data

V následující mapě jsou vizualizovány:

- modře: uliční úseky
- červeně: jednotlivé průjezdy realizované ve sledovaném období v rámci provozu MMK



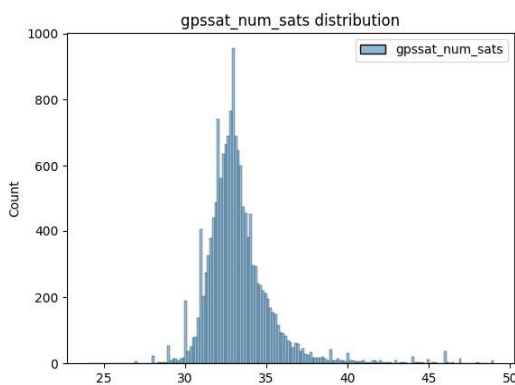
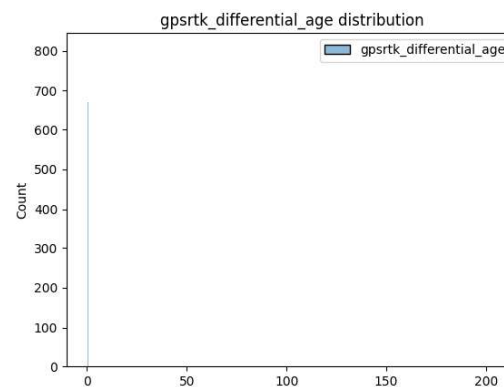
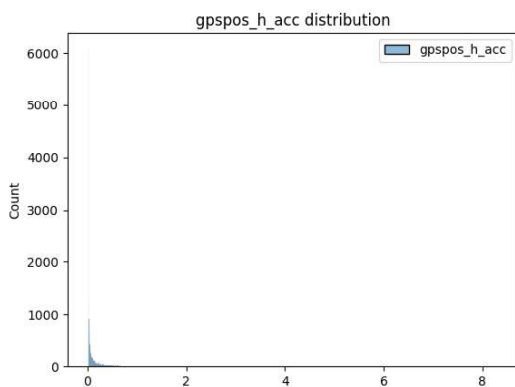
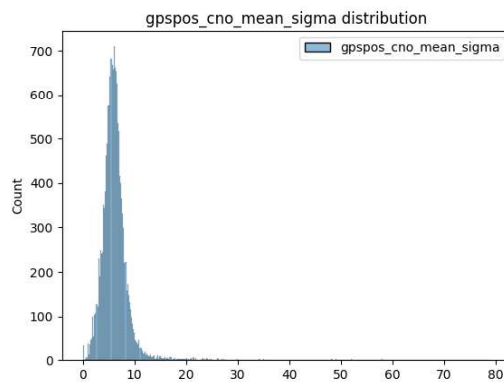
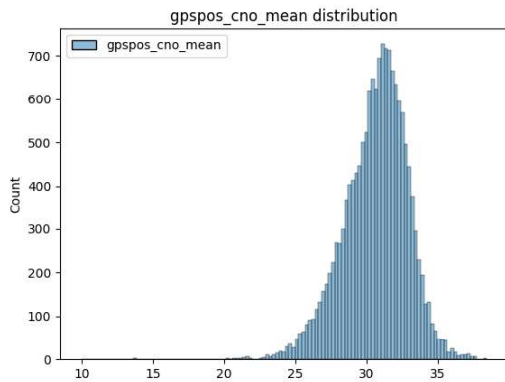
Detail průjezdů je vidět na následující detailní mapě (část městské části Praha 1). V tomto detailu je vidět, že většina průjezdů (desítky až stovky průjezdů) je soustředěna v blízkosti definovaného uličního úseku. Část průjezdů však vykazuje vyšší varianci a v extrému lokalizace zcela selhala.



V následujících grafech uvádíme distribuci hodnot pro vybrané veličiny. Pro každý uliční úsek vypočítáme průměrnou hodnotu dané veličiny ze všech měření asociovaných (geograficky) s daným úsekem. Každý uliční úsek má desítky až stovky měření a vypočtením průměru tak snížíme výskyt extrémních hodnot.

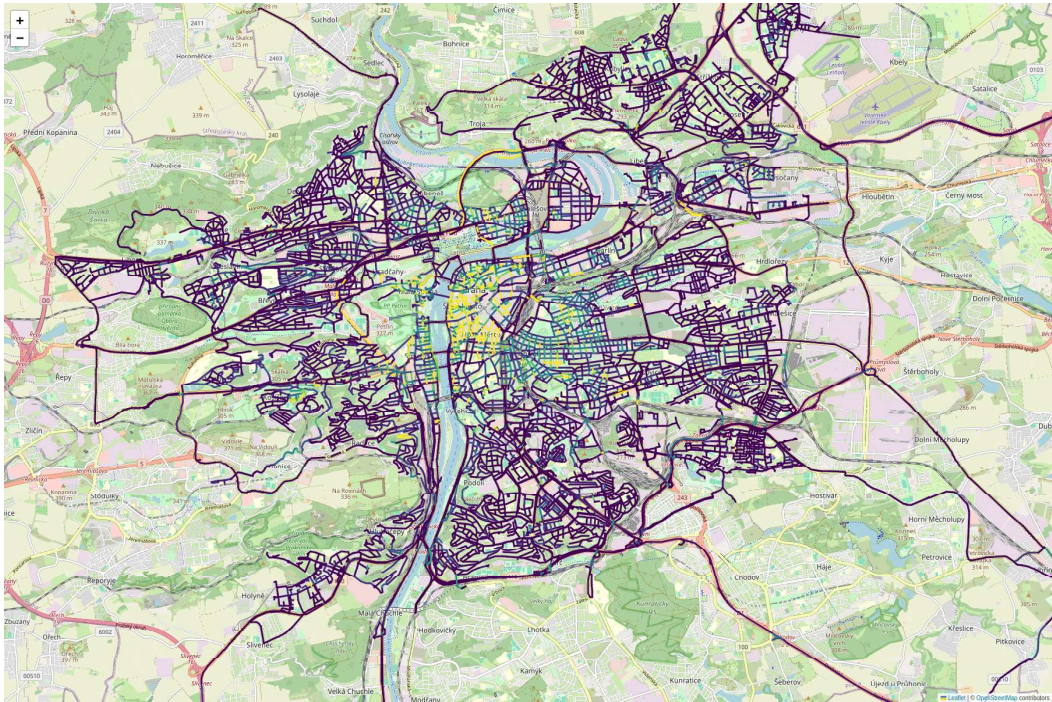
Konkrétně uvádíme:

- `gpspos_cno_mean` - průměrnou sílu signálu z GNSS družic
- `gpspos_cno_mean_sigma` - průměrnou varianci síly signálu z GNSS družic
- `gpspos_h_acc` - průměrná přesnost (očekávaná velikost chyby) lokalizace
- `gpsrtk_differential_age` - průměrné stáří signálu RTK korekce
- `gps_num_sats` - průměrný počet dostupných GNSS družic

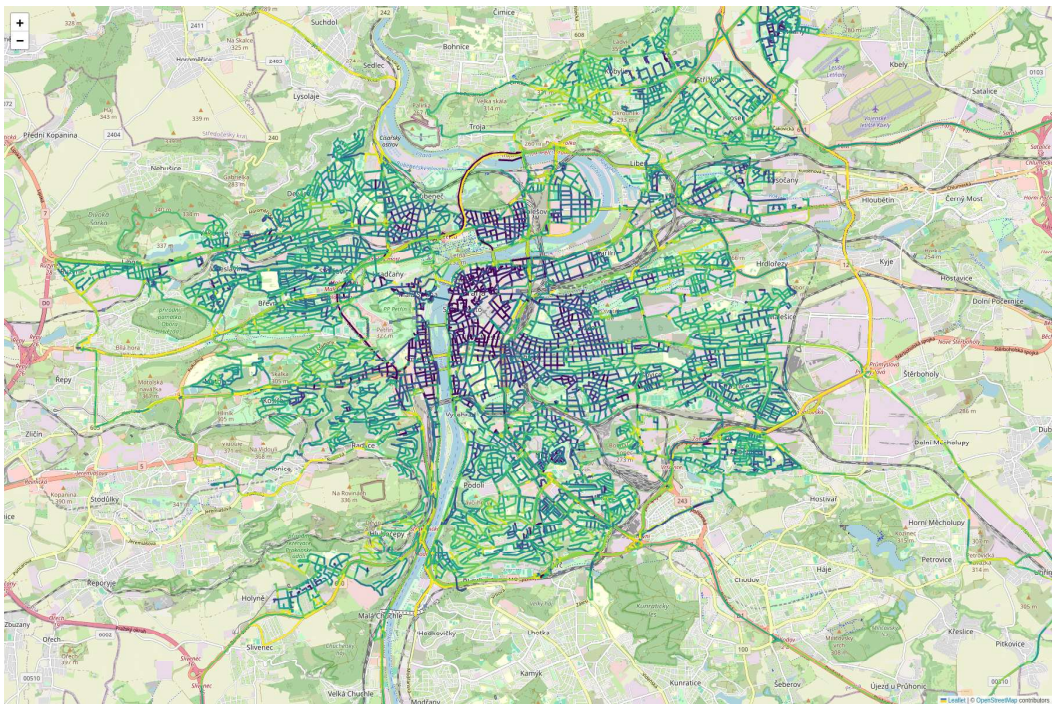


U veličin `gpspos_cno_mean`, `gpspos_cno_mean_sigma` a `gpssat_num_sats` lze pozorovat relativně “normální” distribuci. U veličiny `gpspos_h_acc` vidíme, že ve většině případů je průměrná hodnota pro daný uliční úsek velmi nízká (menší než metr) nicméně jsou úseky s vyšší hodnotou. Z distribuce `gpsrtk_differential_age` vidíme, že RTK korekce je téměř vždy dostupná a aktualizovaná.

V následujících mapových vizualizací představujeme průměrné hodnoty daných veličin ve sledovaných uličních úsecích barevně odstupňované.

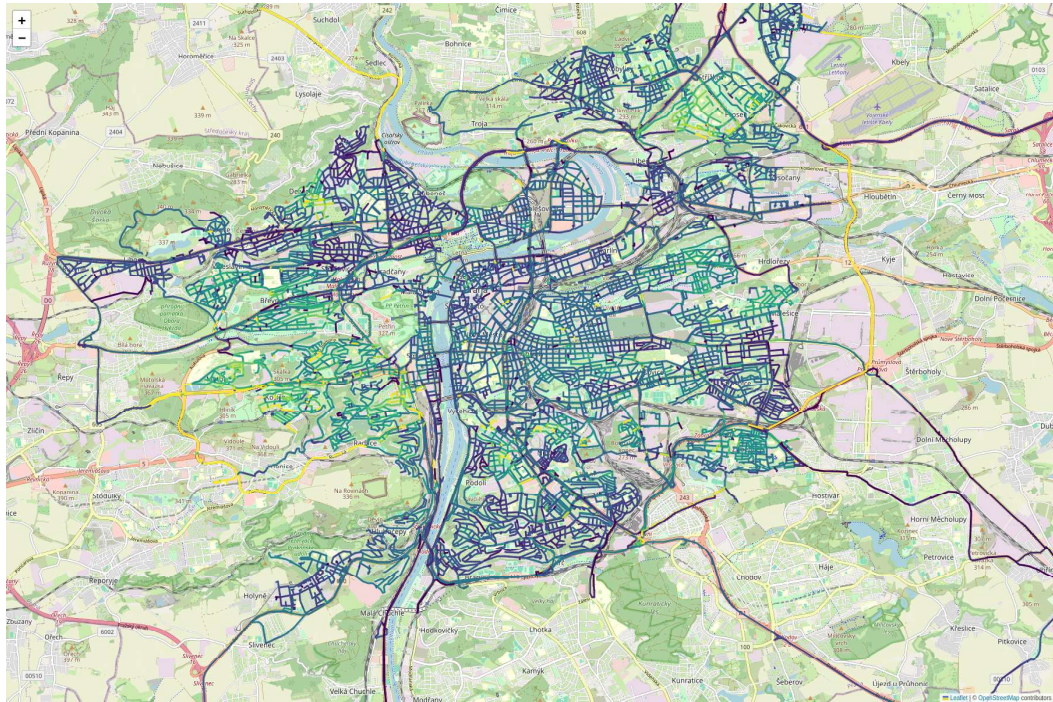


gps_h_acc



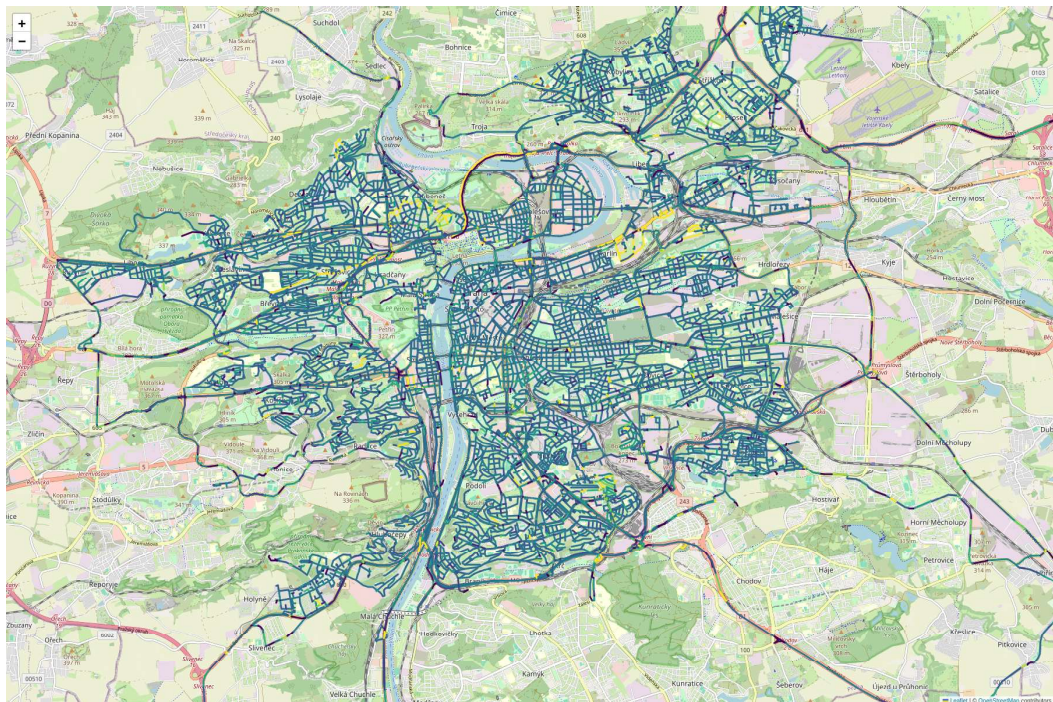
gps_cno_mean





gpsat_num_sats

27  43



gpsrtk_differential_age

0  30

Z vizualizací vidíme, že veličiny `gpsat_num_sats` a `gpsrtk_differential_age` vykazují relativně nízkou varianci a není možné identifikovat specifické oblasti s podstatně vyššími či nižšími hodnotami. Naopak veličiny `gps_cno_mean` (tedy síla signálu z družic) a `gps_h_acc` (odhad chyby lokalizace) vykazují nižší respektive vyšší hodnoty na území Hl. m. Prahy. Lze tedy očekávat významnější korelaci těchto veličin a potenciálně také korelaci s reálnou chybou v lokalizaci.

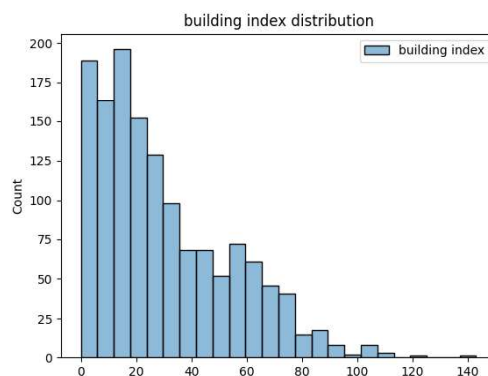
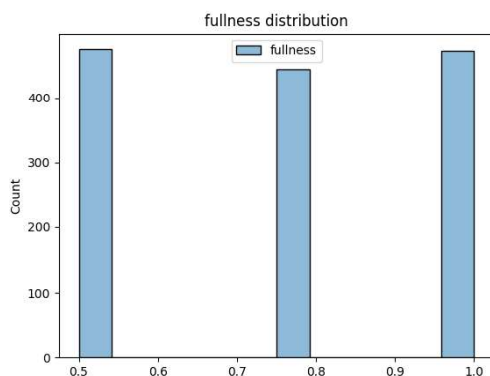
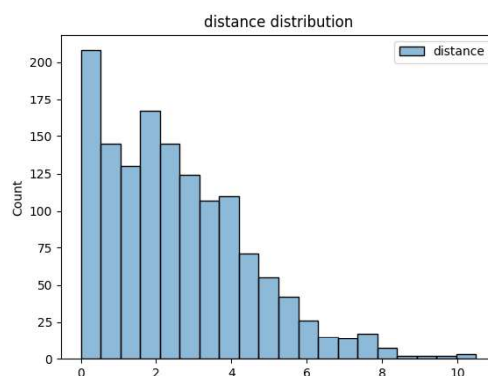
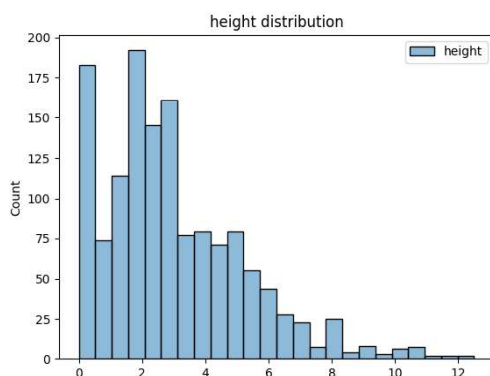
Anotace

Z výše popsaných anotací byly odvozeny agregované charakteristiky pro všechny anotované uliční úseky a to konkrétně:

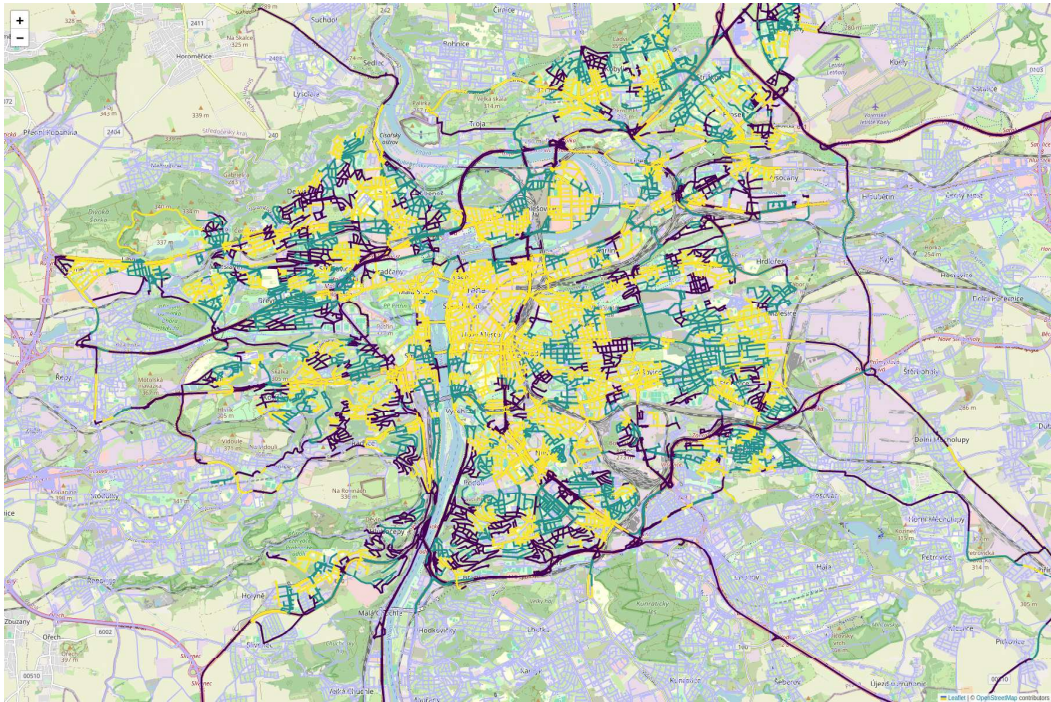
1. `height` - průměrná výška zástavby po obou stranách uličního úseku
2. `distance` - průměrná vzdálenost zástavby po obou stranách uličního úseku
3. `fullness` - indikátor souvislosti zástavby 0.5/0.75/1 po obou stranách dle vzorce

$$\text{fullness} = (0.5 + \text{left_full}/2 + 0.5 + \text{reight_full}/2)/2$$
4. `building index` - celkový index zastavěnosti dle vzorce

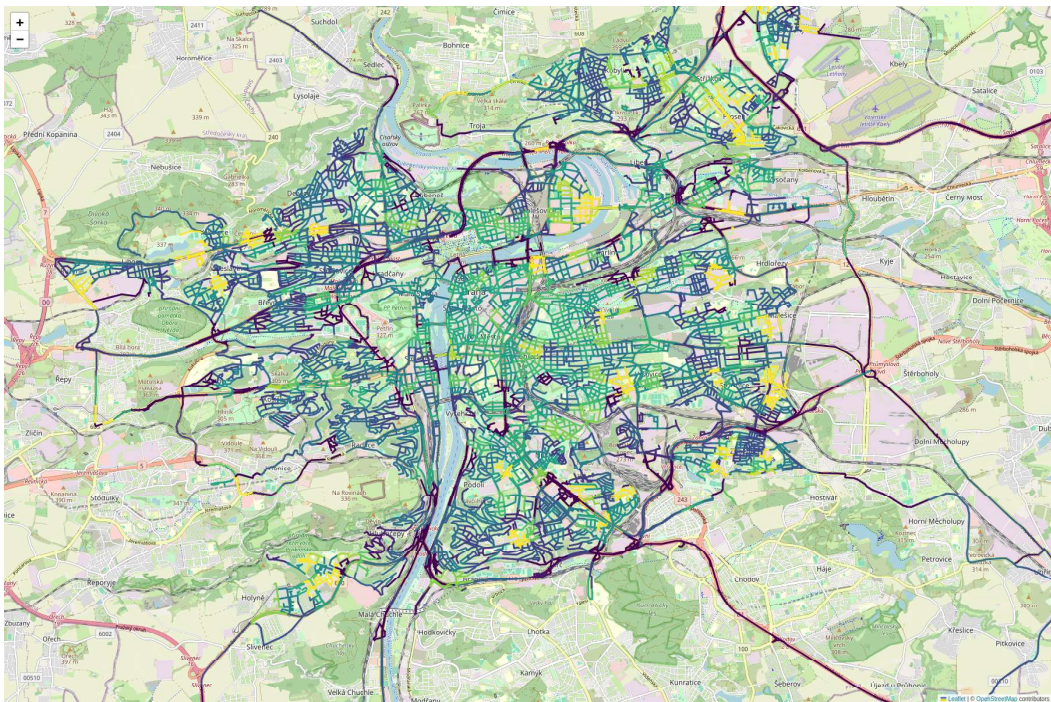
$$\text{building index} = \text{height} * \max(1, 15 - \text{distance}) * \text{fullness}$$



Vypočtené charakteristiky jsou nepřekvapivě distribuovány a to jak v četnosti jednotlivých hodnot tak geograficky.

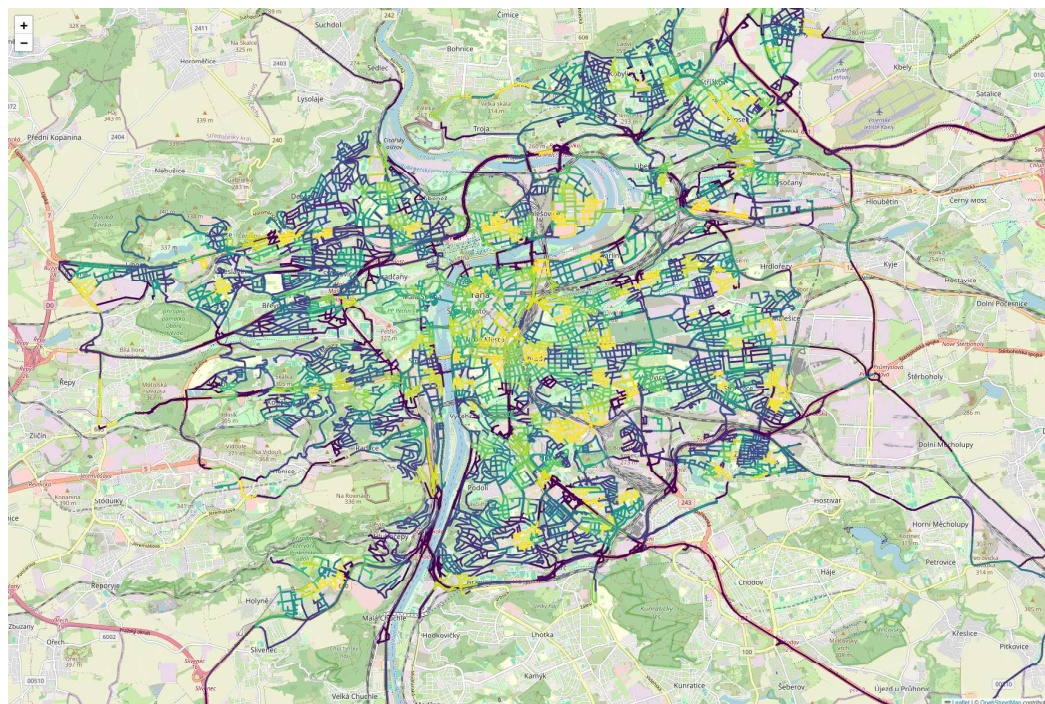


fullness



height





building index 0  100

Na mapových vizualizaci lze pozorovat, že index zástavby dosahuje vyšších hodnot v užším centru města. Vyšší hodnoty indexu lze ovšem pozorovat i v okrajových částech. Tyto sekundární oblasti s vyšším indexem mohou být způsobeny mimo jiné i přítomností šumu v anotovaných datech.

8. Ukazatel kvality GNSS lokalizace

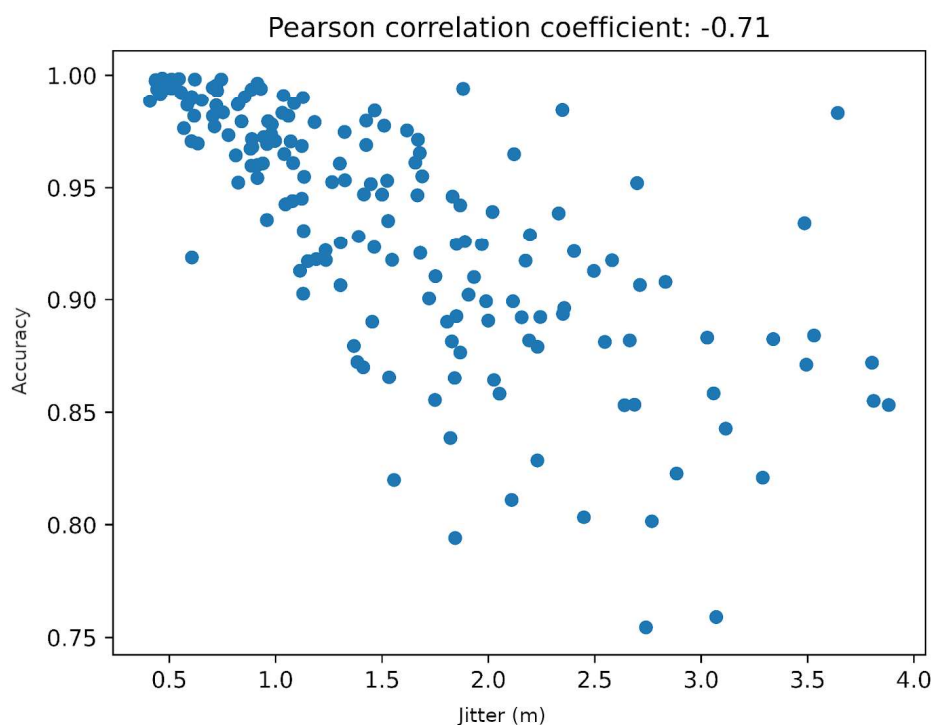
Pro další kroky analýzy je potřeba stanovit spolehlivý ukazatel kvality lokalizace. S ohledem na množství měřených dat není možné lokalizaci validovat ručně. Nabízí se použít bez dalšího parametr GNSS modulu `gps_h_acc` (tedy odhad horizontální chyby v lokalizaci v metrech) nicméně není zřejmá kvalita tohoto parametru a míra korelace se skutečnou chybou v lokalizaci.

V této kapitole se pokusíme kvalitu parametru `gps_h_acc` kvantifikovat. Abychom se vyhnuli potřebě přesné manuální lokalizace, definujeme míru variance v lokalizaci při jednotlivých průjezdech - "jitter". Konkrétně definujeme

jitter = průměrná vzdálenost jednotlivých průjezdů od průměrného průjezdu

accuracy = $1 - \text{gps_h_acc}$ (škálováno do intervalu 0-1)

Jitter tedy zachycuje míru v jaké se liší jednotlivé průjezdy dané uličního úseku od sebe. Tím je vyjádřen rozptyl lokalizace i bez znalosti skutečné polohy. Vztah obou veličin je zachycen v následujícím grafu.



Vidíme, že definované veličiny vykazují silnou souvislost (Pearson=-0.71). Pro vyšší hodnoty `gps_h_acc` tak lze se značnou mírou jistoty očekávat i vyšší chybu lokalizace. **V další analýze proto použijeme `gps_h_acc` jako důvěryhodný odhad reálné chyby v lokalizaci.**

9. Faktory související s kvalitou lokalizace

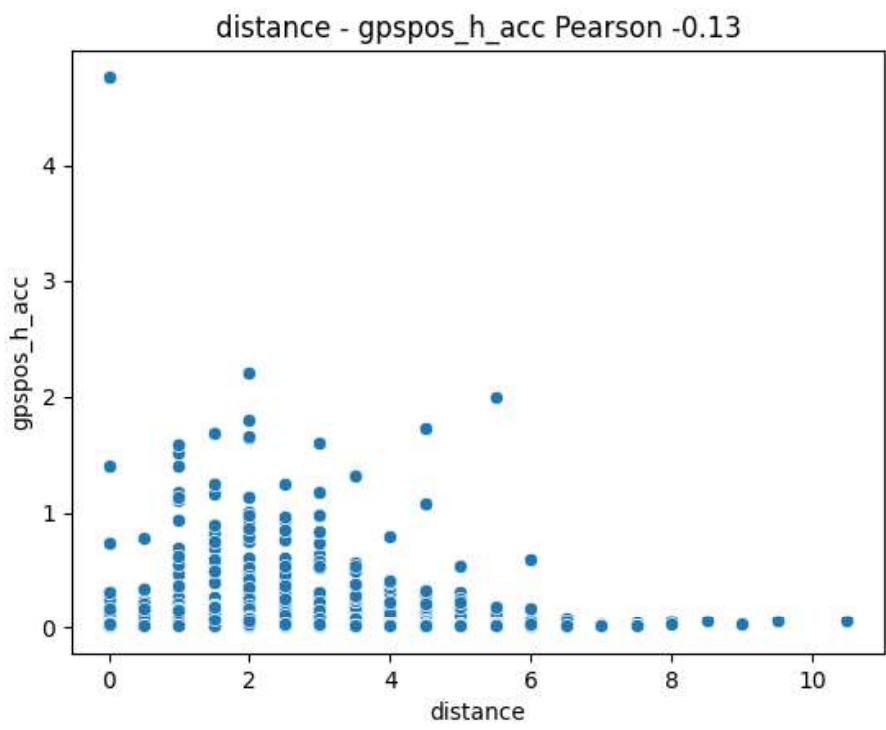
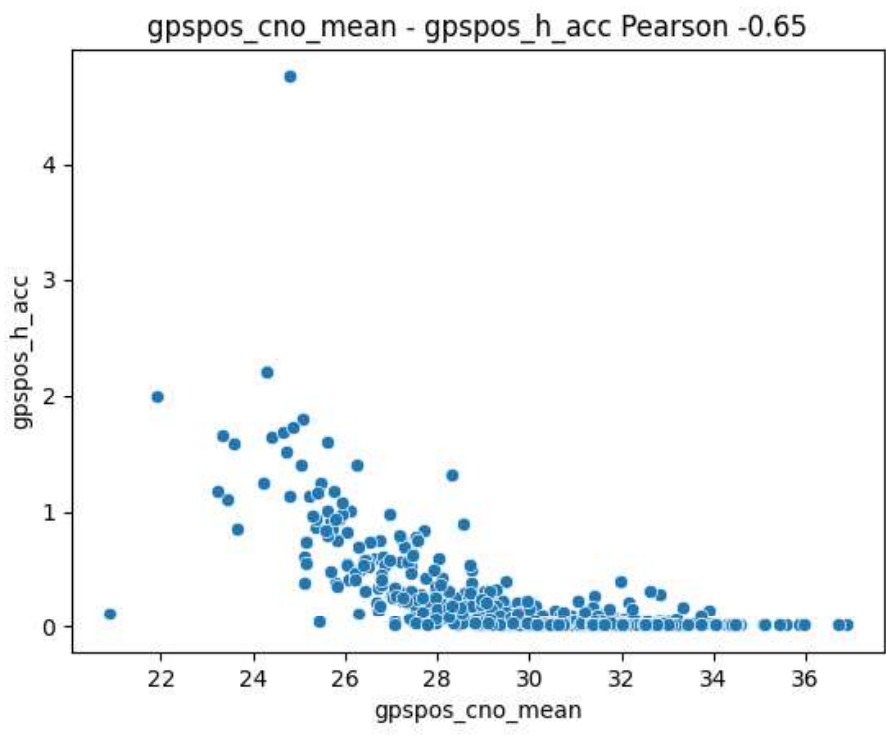
V následující kapitole budeme identifikovat vztahy jednotlivých anotovaných parametrů s ukazatelem kvality gps_h_acc. Konkrétně bude spočtena korelace následujících dvojic veličin:

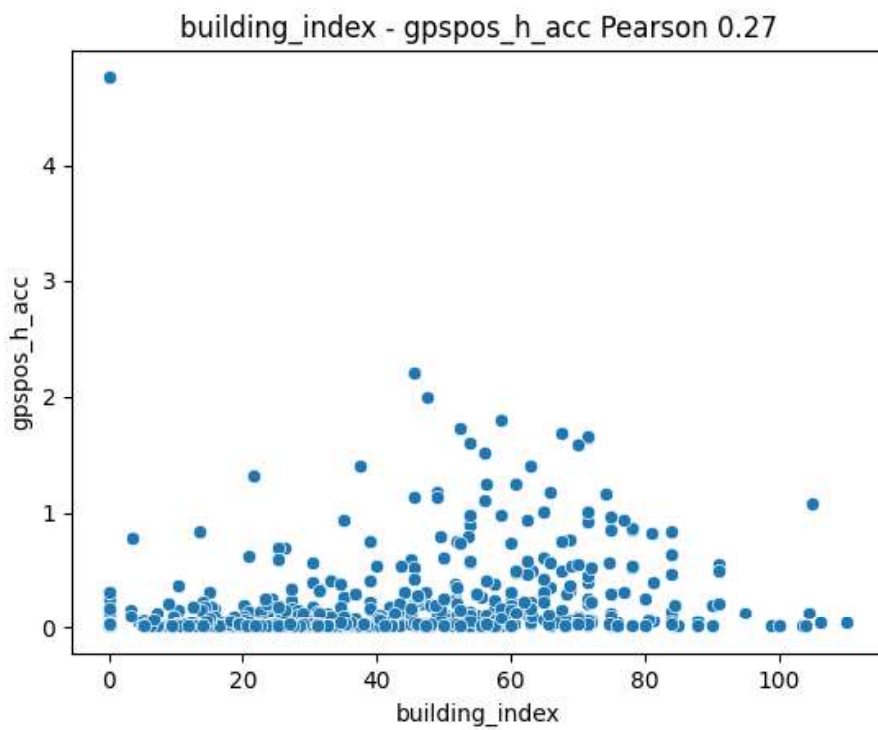
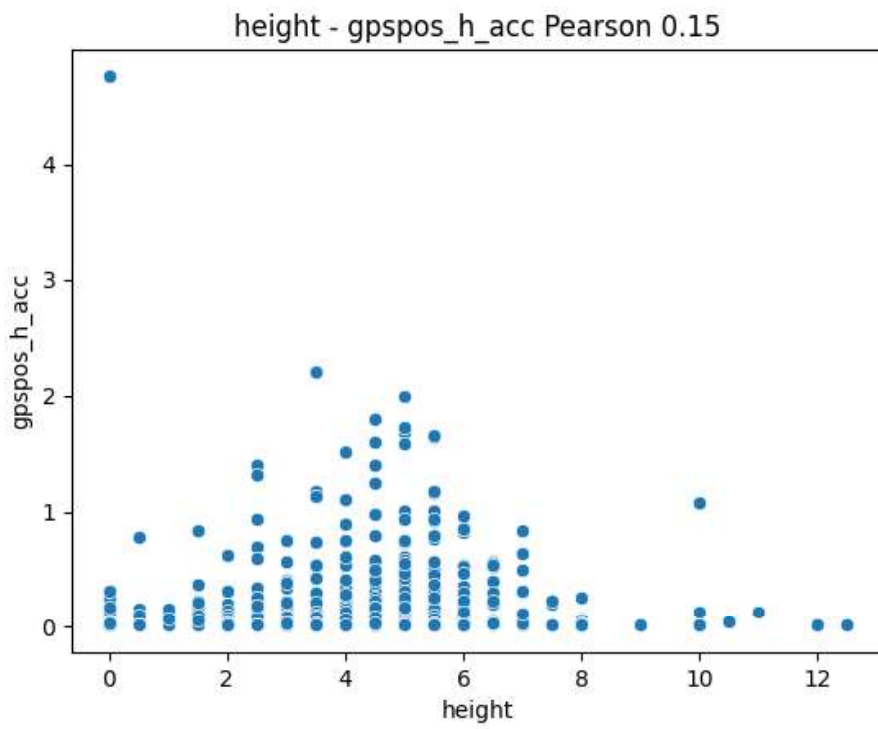
Parametr 1	Parametr 2 - ukazatel kvality lokalizace	Popis
gps_cno_mean	gps_h_acc	Kvalita GNSS signálu vs. kvalita lokalizace
distance	gps_h_acc	Vztah vzdálenosti od zástavby s kvalitou lokalizace
height	gps_h_acc	Vztah výšky zástavby s kvalitou lokalizace
building index	gps_h_acc	Vztah indexu zástavby s kvalitou lokalizace

V rámci analýzy byly spočteny korelace všech párů parametrů nicméně vedle zde uvedených párů byly výsledky nezajímavé či nepřekvapivé. Např. parametr gps_v_acc je silně korelovaný s parametrem gps_h_acc, nicméně toto zjištění nepřináší užitečné poznatky. Naopak další anotované parametry (tramvaje, další překážky) vykazovaly velmi slabou korelaci (v absolutní hodnotě <0.1) s ukazatelem kvality lokalizace gps_h_acc.

Spočtené korelace zachycuje následující tabulka a jednotlivé vztahy jsou pak vizualizovány v příložených grafech.

Parametr 1	Parametr 2 - ukazatel kvality lokalizace	Pearson koeficient	Slovní hodnocení
gps_cno_mean	gps_h_acc	-0.65	silný vztah
distance	gps_h_acc	-0.13	velmi slabý vztah
height	gps_h_acc	0.15	velmi slabý vztah
building index	gps_h_acc	0.27	slabý vztah





10. Shrnutí analýzy

Na základě vypočtených korelačních koeficientů lze učinit následující pozorování:

- 1. Přesnost lokalizace silně souvisí s kvalitou signálu z GNSS družic (Person -0.65).** Ačkoli se může zdát toto zjištění banální, značná míra korelace naznačuje silný vztah kvality signálu z GNSS družic a kvality lokalizace. Se značnou mírou pravděpodobnosti jde v případě kvality signálu o dominantní faktor. O dalších faktorech jako např. použitý model pohybu (EKF) lze soudit, že jsou spíše podružného významu.
- 2. Přesnost lokalizace velmi slabě souvisí s výškou zástavby či vzdáleností od zástavby (Pearson -0.13, Pearson 0.15).** Výsledný korelační koeficient není dostatečně vysoký pro označení uvedených faktorů za zásadní.
- 3. Přesnost lokalizace slabě souvisí s indexem zástavby (Pearson 0.27).** Výsledná korelace není významně vysoká nicméně kombinovaný faktor vykazuje korelace podstatně vyšší než dílčí parametry. Je možné, že při alternativní (ne)lineární kombinaci dílčích parametrů by index vykazoval korelaci vyšší.

Vymezení oblastí se sníženou přesností lokalizace

Oblasti se sníženou přesností lokalizace lze popsat v jednoduchosti jako oblast městské části Praha 1. Společným jmenovatelem je středně vysoká avšak souvislá zástavba s úzkou průjezdnou šířkou ulic. Tato charakterizace vykazuje pouze slabou statistickou korelaci s přesností lokalizace z důvodu výskytu podobných oblastí i v jiných částech Prahy. V oblasti Prahy 1 je tento charakter zástavby homogenní a souvislý. Důsledkem je dlouhodobý pohyb monitorovacího vozidla bez dostupnosti silného signálu z GNSS družic a tedy významný vliv pohybového modelu na lokalizaci.

11. Možnosti detekce snížené přesnosti

S ohledem na zjištěné souvislosti je možnost detekce snížené kvality lokalizace omezená respektive je omezená nad rámce dnes již využívaných parametrů. V analýze bylo ukázáno, že parametr přesnosti poskytovaný samotným senzorem sám o sobě obsahuje značnou vypovídající hodnotu o faktické přesnosti lokalizace. V rámci MMK je tento parametr v současné době již využíván pro odhad okamžité přesnosti lokalizace. Míra korelace zbývajících parametrů nevykazovala dostatečnou úroveň pro podstatné zlepšení tohoto odhadu.

Další možností je využít geografického vymezení oblastí se sníženou kvalitou lokalizace, nicméně tyto oblasti byly určeny na základě parametru přesnosti a nepokystují tak další přidanou hodnotu na samotný parametr.

Vedle výše uvedeného si nejsme vědomi dalších možností detekce. V další kapitole se proto soustředíme na možnosti samotné prevence či korekce nepřesností v lokalizaci.

12. Možnosti prevence a kompenzace

V následujících sekcích uvedeme, popíšeme a zhodnotíme další, dosud nevyužité, techniky zpřesnění lokalizace. Techniky budou hodnoceny zejména v náročnosti či nákladnosti implementace, potenciálního přínosu pro celkovou přesnost a míry rizika asociovaného s danou technikou.

Dead reckoning

Základním poznatkem o fungování lokalizace pomocí GNSS modulu je vstup mnoha faktorů do výsledného určení polohy. Vedle samotných dat z dostupných satelitů to je zejména faktor modelu pohybu použitý v Kalmanově filtru (EKF). Model EKF má řadu parametrů a limitů, které zachycují možnosti pohybu sledovaného tělesa. V kontextu MMK je model nastaven v módu letadla a je tedy zřejmé, že nebude odpovídat praktickému pohybu, např. možnostem akcelerace či maximální a obvyklé rychlosti monitorovacího vozidla. Tento rozpor mezi teoretickým modelem pohybu a praxí je vyvážen vysokou vzorkovací frekvencí díky které je předpokládaný pohyb vozu často validován daty ze senzorů. Právě při jejich nižší přesnosti však nedokonalost pohybového modelu může vést k vyšší nepřesnosti i vyšší nejistotě určení polohy.

Jednou z možností, jak pohybový model zlepšit je technika “dead reckoning”, česky lze přeložit jako “lokalizace výpočtem”. Firmware výrobce sice neumožňuje definovat či implementovat vlastní pohybový model nicméně připouští validaci či korekci toho stávajícího právě technikou dead reckoning.

Korekce je dosaženo pomocí (opakovaného) měření jízdy po dopředu známé trase. Na konci trasy a případně i v dalších pevných bodech, je reálná poloha známa zatímco stávající model pohybu se spolu s daty ze senzorů snaží polohu určit. Odchylka známé polohy od odhadu je použita jako zpětná vazba pro zpřesnění pohybového modelu. Konkrétně lze upravit parametry a limity modelu tak, aby v dané množině měření byla minimalizována odchylka od známých poloh např. v metrice mean square error. Tímto postupem lze například model “naučit”, že monitorovací vozidlo se nebude pohybovat v nadzvukových rychlostech.

Aby výše popsaný postup byl opravdu přínosný a aktualizovaný pohybový model vykazoval lepší přesnost, je potřeba vedle dostatečného množství měření zajistit také trasy odpovídající co nejlépe praktickému provozu MMK. Faktory zachycující podobnost jsou mimo jiné ale nejen: délka trasy, charakter trasy (množství a podoba zatáček, délka jednotlivých úseků), povrch vozovky či okolní podoba okolní zástavby.

Přínos Výsledkem použití techniky dead reckoning je aktualizovaný pohybový model který věrněji zachycuje praktické možnosti pohybu sledovaného objektu - monitorovacího vozidla. Lze očekávat podstatné zlepšení predikce polohy zejména při horší kvalitě či nižším množství dat z GNSS družic. Při úspěšné aplikaci pak bude vozidlo lokalizováno v akceptovatelné kvalitě po delší dobu než při použití současného pohybového modelu. Po diskuzi s výrobcem GNSS senzoru bylo toto řešení doporučeno jako vhodný krok pro způsob užití MMK.

Náklady Nevýhodou metody je, že je třeba ji aplikovat pro každý modul zvlášť a zároveň řada servisních zásahů v technickém vybavení vozidla vynucuje techniku opakovat. Jinými slovy kalibrace vozidla se stane podstatně složitější a nákladnější.

Rizika Dopředu není jisté jak velký přínos metoda dead reckoning bude mít. Dále není zřejmé jaké množství známých tras je třeba připravit a absolvovat pro dosažení žádaného přínosu pro kvalitu lokalizace. Dalším rizikem je možnost časté potřeby re-kalibrace osazené technologie. Rizika vyšších vstupních i provozních nákladů lze považovat za značná.

Alternativní GNSS modul

Použitý modul GNSS Inertial Sense Rug 3 lze charakterizovat jako střední třídu mezi GNSS moduly. Ačkoli princip lokalizace je u všech GNSS modulů stejný, algoritmy pro selekci a zpracování signálů se lišit mohou stejně jako modely pohybu a možnosti jejich konfigurace. Jednou z možností je nahradit stávající GNSS modul jiným high-end modulem, u kterého lze očekávat lepší vlastnosti a potažmo i přesnost lokalizace.

Následující moduly GNSS považujeme za vhodné kandidáty:

1. [VectorNav VN-310](#)
2. [Movella Xsens MTi-7](#)
3. [Honeywell HGuide n580](#)

Přínos Potenciální míru zlepšení je těžké určit bez praktického vyzkoušení modulu v kontextu MMK. Od investice do high-end modulu lze očekávat netriviální přínos v přesnosti lokalizace, nicméně s ohledem na prokazatelně horší kvalitu vstupních dat v jistých regionech MMK nelze očekávat úplné a definitivní řešení otázky přesnosti.

Náklady Výhodou řešení jsou zejména jednorázové vstupní náklady bez podstatných změn v nákladech na správu a údržbu technologie. Zároveň lze řešení otestovat např. jedním či dvěma kusy a do nasazení v celém MMK přejít až o ověření přínosu.

Rizika Hlavním rizikem je nižší než očekávaný přínos, nicméně toto riziko je přítomno v obdobné podobě u všech alternativ.

Integrace OBD II

Řešení integrace dat o pohybu vozidla se opírá podobný princip jako metoda dead reckoning popsaná výše. Obě řešení usilují o zlepšení výsledků pohybového modelu. Zatímco dead reckoning upřesňuje samotný pohybový model, zahrnutí dat o pohybu vozidla z inerciálních senzorů rozšiřuje množinu vstupů, se kterými model pracuje.

Konkrétně lze do modelu pohybu zahrnout data o rychlosti, akceleraci a úhlu zatáčení monitorovacího vozidla, která by měla být dostupná v reálném času na portu OBD II většiny na trhu dostupných vozidel. Odečtená data lze předat firmware GNSS modulu a ten je využije ke korekci pohybového modelu zejména při snížené kvalitě dat z GNSS družic.

Přínos V případě úspěšné integrace lze očekávat podstatné zlepšení lokalizace a to v obecnosti ve všech oblastech se sníženou kvalitou dat z GNSS družic. Předpokladem pro značný přínos je správné využití dat v modelu pohybu daného GNSS modulu. Šance na dosažení dobrého výsledku je značná při testování vícero modulů GNSS od více výrobců.

Náklady Integrace do všech vozidel MMK představuje značné vstupní náklady nicméně po úspěšné integraci řešení nepředstavuje dodatečné provozní náklady. Aplikace řešení však představuje potenciálně dodatečné náklady při užití jiných vozidel. Navzdory snahy o standardizaci se mohou data dostupná z OBD II portu lišit v závislosti na výrobcu a modelu.

Rizika Hlavním rizikem je nedostupnost potřebných dat na OBD II portu vozidel MMK (Renault Captur) nebo špatné využití dat daným GNSS modulem. Pro mitigaci těchto rizik lze realizovat prototyp řešení s více moduly GNSS souběžně. Kvalitní a dostupná OBD II data mohou být také motivací využít jiných modelů a značek vozidel MMK.

Vizuální lokalizace

Poslední diskutovanou možností je využití optických senzorů k lokalizaci. Jednou z variant je využít obrazových dat pro odhad rychlosti a akcelerace a dále tyto informace využít podobným způsobem jako v řešení integrace OBD II dat. V této variantě tedy jde stejný princip - rozšíření vstupů pohybového modelu o dodatečná data o pohybu vozidla - pouze s jiným zdrojem dat. Optické senzory sice nevyžadují integraci s konkrétním vozidlem nicméně mohou být jako zdroj dat méně spolehlivá, zejména při snížené viditelnosti nebo v nočních podmínkách. Druhá varianta využití vizuálních dat je rozpoznání pevných orientačních bodů v oblasti MMK a spolu se znalostí jejich přesné polohy využít tento moment pro přesnou aktualizaci polohy daného vozidla. Tuto variantu dále popíšeme v této sekci.

Ačkoli se může zdát úloha rozpoznání orientačních bodů jednoduchá, v praxi její použití představuje značnou výzvu. V první řadě je třeba orientačních bodů značné množství, zejména v oblastech se sníženou kvalitou dat z GNSS družic. V dané oblasti je jejich počet dán zejména rychlostí divergence predikované polohy vozidla. I při konzervativních odhadech se jedná o stovky až tisíce bodů na území Prahy. V tomto rozsahu je výzvou samotná správa a vyhodnocení úspěšnosti rozpoznání daných bodů, ať už jsou tyto kroky automatizované či manuální.

Samotné orientační body musí být dostatečně charakteristické a rozpoznatelné za všech podmínek. Dále je třeba se vyhnout dynamickým prvkům, u kterých lze předpokládat podstatnou změnu v horizontu dnů a měsíců jako například reklamní plochy. Samotný algoritmus pro rozpoznání daného orientačního bodu musí být robustní vůči směru jízdy a obecně směru ze kterého je daný bod pozorován. Nabízí se řešení postavené na neuronových sítích a/nebo starší metody rozpoznání bodů SIFT či SURF či jejich kombinace.

Za předpokladu úspěšného rozpoznání orientačního bodu je dále třeba určit relativní polohu a orientaci vozidla vůči rozpoznávanému bodu. Pro tento krok je možné využít dostupných 3D kamer využitých v rámci MMK nicméně tento krok klade další požadavky na orientační body, respektive na jejich maximální přípustnou vzdálenost od monitorovacího vozidla.

Nehledě na výše uvedené kroky, v okamžik rozpoznání daného orientačního bodu lze upravit aktuální pozici vozidla. Úpravu lze provádět buďto absolutní či pravděpodobnostní přičemž druhý přístup připouští chybu v rozpoznání orientačního bodu nicméně přináší další komplexitu pohybového modelu.

Výsledný systém je dále fixovaný na konkrétní území. Ačkoli to pro samotný provoz MMK nepředstavuje zásadní problém, rozšíření MMK na další území se stává komplikovanější a v důsledku také nákladnější.

Přínos Při úspěšné implementaci všech potřebných algoritmů lze očekávat podstatné zlepšení lokalizace v oblastech nižší kvality dat z GNSS družic.

Náklady Vývoj, testování i optimalizace řešení představuje značné náklady a to i v minimalistické MVP variantě. V závislosti na množství manuálních kroků potřebných pro údržbu systému je šance na zvýšení provozních nákladů MMK.

Rizika Řešení obsahuje významné výzkumné nejistoty, které jsou zároveň největším rizikem. I při vynaložení značných prostředků na implementaci není zaručen dostatečně dobrý výsledek a dlouhodobá udržitelnost dodatečného systému.

Shrnutí možností zpřesnění

Uvedené možnosti zpřesnění jsou shrnuty v následující tabulce. Ve sloupci náklady jsou odhadnuty jednorázové náklady pro realizaci a měření prototypu metody s jedním vozidlem v kontextu MMK. Uvedené náklady jsou pouze orientační a mohou se podstatně lišit dle konkrétního zadání. Symbol K představuje tisíce, zatímco symbol M představuje milióny korun.

Metoda	Přínos	Náklady	Rizika
Dead reckoning	Vyšší přesnost pohybového modulu	300K CZK	Komplikace při kalibraci technologie
Modul GNSS	Vyšší celková přesnost	900K CZK	Limitovaný přínos alternativních modulů
OBD II	Vyšší přesnost pohybového modulu	500K CZK	Různé značky a modely aut
Vizuální lokalizace	Korekce lokalizace	5M CZK	Výzkumná nejistota, kvalita algoritmů

Nebo také numericky s následující škálou:

Přínos

1. Očekáváme malé nebo žádné zlepšení

2. Očekáváme střední zlepšení nebo podstatné zlepšení v alespoň v části MMK
3. Očekáváme podstatné zlepšení na většině území MMK

Náklady

1. Bez dodatečných provozních nákladů, přiměřené vstupní náklady
2. Nízké provozní náklady, střední nebo větší vstupní náklady
3. Značné provozní náklady

Rizika

1. Přiměřená rizika
2. Střední rizika nebo přiměřená rizika s možností mitigace
3. Podstatná rizika bez možnosti mitigace či velká rizika

Metoda	Přínos	Náklady	Rizika
Dead reckoning	2	1	2
Modul GNSS	2	2	1
OBD II	2	2	1
Vizuální lokalizace	2	3	3

Doporučení

S ohledem na výše uvedené shrnutí doporučujeme v případě zájmu investovat zdroje do prototypu zlepšení lokalizace na jednom vozidle a to nejprve použitím dead reckoning řešení podporovaného stávajícím senzorem, poté použitím alternativního GNSS modulu a v případě neúspěchu pomocí integrace OBD II dat.

Použití techniky vizuální lokalizace s ohledem na výše uvedená rizika nedoporučujeme.

13. Závěr

Na základě vypracované analýzy GNSS dat lze říci, že kvalita lokalizace v kontextu MMK je v obecnosti uspokojivá. Lokalizační systém se drží široce používaných postupů a na většině území monitoringu dosahuje značné míry přesnosti.

Významnou oblastí s prokazatelně nižší kvalitou lokalizace je městská část Praha 1. Tuto oblast lze na základě dat geograficky ohraničit nicméně ekvivalentního výsledku může být dosaženo zohledněním již používaného parametru confidence založeném na parametru `gps_h_acc` modulu GNSS.

Nižší kvalita lokalizace vykazuje silnou souvislost s nižší kvalitou signálu z GNSS družic ve vymezené oblasti (Pearson -0.65). Oblast se dále podařilo charakterizovat pomocí "indexu zástavby", který má s ukazatelem kvality lokalizace nejméně slabou souvislost (Pearson 0.25). Analýza dále zkoumala možnosti zpřesnění lokalizace, a to s ohledem na výše uvedené poznatky. Navrhované techniky mířili zejména na vylepšení pohybového modelu respektive kompenzaci snížené kvality signálu z GNSS družic. Z analýzy benefitů a rizik spojených s jednotlivými technikami vychází nejlépe prototyp dead reckoning.