Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

Autonóm járművek térinformatikai támogatása

PhD értekezés tézisfüzet

Potó Vivien

okl. földmérő és térinformatikai mérnök

Témavezető:

Dr. Barsi Árpád

Budapest, 2022

1 Bevezetés és célkitűzések

Az önvezető járművek különböző szenzorokkal vannak felszerelve, (ezek jellemzően kamera, lézerszkenner és radar,) melyekkel az embert kiegészítve, helyettesítve figyelik a járműkörnyezetet, és kisebb-nagyobb mértékben reagálnak az eseményekre, segítik a jármű biztonságos közlekedését. A doktori kutatásom során célom az önvezető járművek kutatásának támogatása a térinformatika eszközeivel.

A járművek helymeghatározásának, navigációjának alapját képezi a térkép, ami az önvezető autó által értelmezve más adatokat, jellemzőket tart fontosnak, mint a hagyományos térképek. A gépnek nincs szüksége például a környezetábrázolásra, ami az ember számára a legfőbb információforrást jelenti, viszont nagyobb a térkép iránti pontossági és részletességi igénye. Az önvezető járművek által használt térképek, a HD-térképek (High-Definition Map – nagyfelbontású térkép) segítik a jármű pozicionálását, navigációját, támogatják a járművet a vezetési feladatok végrehajtásában és elősegítik a biztonságos közlekedést. A célom nagyfelbontású térképi alapok létrehozása, melyek segítik a vezetéstámogató asszisztenseket a sávváltásnál és a parkolásnál.

Az önvezető járművek számára kulcsfontosságú a helyzetük ismerete, melyhez a hagyományos műholdas megoldások nem nyújtanak kellően pontos és folytonos adatot (például városi környezetben jelentős számú műholdat takarnak ki a szűk utcák magas épületei). Emiatt további helymeghatározási módszerek szükségesek, melyekkel a jármű helyzete redundánsan meghatározható. Az önvezető jármű szenzoradatait felhasználva a jármű helyzete pontosabban meghatározhatóvá válik. A célom egy hatékony tárolású környezeti modell létrehozása, mellyel a jármű pozíciójának meghatározása is lehetővé válik.

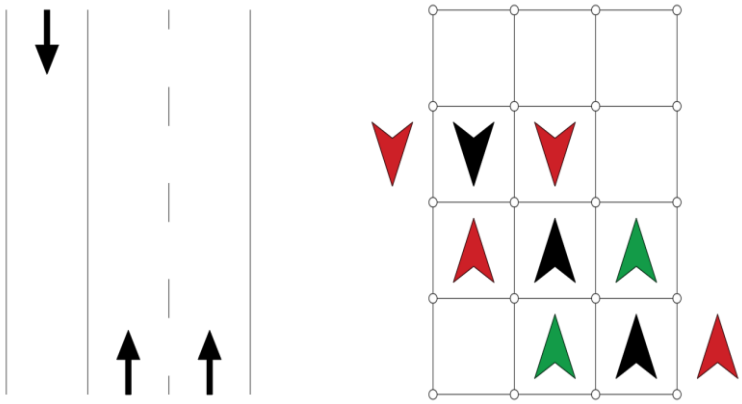
A szimulációk a járművek tesztelési folyamatainak szerves részét képezik, segítségükkel biztonságosan és költséghatékonyan tesztelhetők az újítások. Az OpenDRIVE-modell utak geometriai leírására használható, és jó a kompatibilitása a különböző szimulációs szoftverekkel. Célom a szabvány megismerése, majd különböző típusú terepi állományokból OpenDRIVE-modellek fejlesztése.

Az OpenCRG az OpenDRIVE szabványcsaládjához tartozik. A modellel az útfelület nagy felbontással írható le egy ívelt rácsos szerkezetben, ahol a cellák általában a magasságértékeket tartalmazzák. A modell az OpenDRIVE-hoz hasonlóan jól használható szimulációs szoftverekben, segíti a járműdinamikai és kerékabroncs teszteket. Célom olyan útfelületi modell előállítása, mely valós mérési adatokból képes megjeleníteni az utat a szimulációs szoftverekben.

2 Térképi támogatás az önvezetéshez

A Budapesthez közeli tököli repülőtéren földi lézerszkennerrel és GNSS-vevővel végeztünk méréseket. A mérések feldolgozás után megszerkesztettem a mintaterület végeselemes sávmodelljét, ami alapján létrehoztam a térképmodellt. A célom kettős, a térkép megmutatja a jármű aktuális helyzetét és irányát, továbbá a sávváltás lehetőségét.

A modell topológiája végeselemes hálóra (VEM) épül. A térképsávok konvex négyszögletes hálóelemekre vannak felosztva. Ismert, hogy a jármű melyik sávban, és annak melyik részén található. A helyzetét a rácsmodellre rávetítve a minimális befoglaló téglalap elve alapján logikai tesztekkel meghatározható a jármű helye a rácsmodellben. A megfelelő cella megtalálása után a szomszédsági viszonyok alapján a sávváltás lehetőségéről is ad a program visszajelzést. Az 1. ábra egy példát mutat be a modell működésére. Az a részábrán az út sávfelosztása látható a nyilakkal jelölt menetiránnyal. A b részábrán három példa jelenik meg egymás alatt, a jármű három lehetséges helyzetével, amit a fekete nyilak jelölnek. A jobbra illetve balra történő sávváltás lehetőségét színkódok jelzik: a zöld színű nyilak esetén az adott irányba lehetséges a sávváltás, a piros színű nyilak esetén nem.

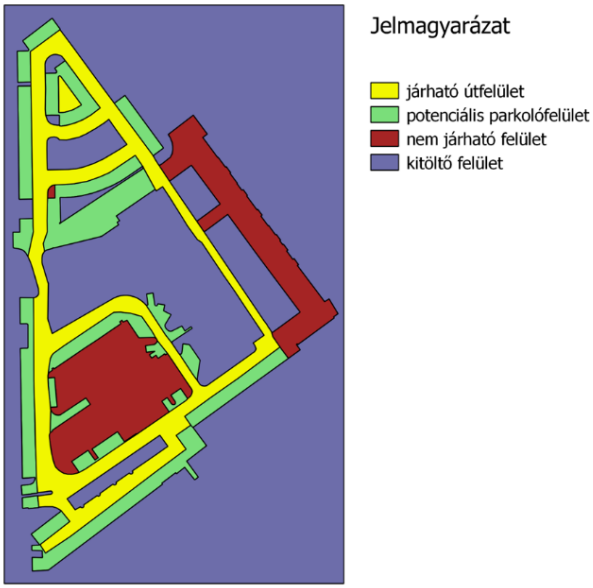


a) Út sávfelosztása a menetirány jelzésével

b) Lehetséges sávváltások megvalósíthatósága (fekete: jármű helyzete, zöld: lehetséges sávváltás, piros: nem lehetséges sávváltás)

1. ábra Sávváltás támogatásának bemutatása

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem kampuszán egy olyan térképet hoztam létre, ami az alapját képezi a jármű parkolását támogató foglaltsági rácsnak (occupancy grid). A területen földi lézerszkennelést hajtottunk végre GNSS-mérésekkel kiegészítve. Hallgatói segítséggel létrejött a terület vektoros térképe, mely topológiai ellenőrzés után bemenetként szolgált a foglaltsági rácsot előállító programkódhoz. A megírt eljárás eredményeképpen előállítottam a területről készült deciméteres felbontású foglaltsági rácsot (2. ábra). Az ábrán citromsárga szín jelöli a jármű számára járható útfelületet, zöld jelzi a potenciális parkolófelületet, bordó a nem járható felületeket és lila a kitöltő felületet. Az előállított foglaltsági rácsot a BME KJK kutatói további vizsgálatokhoz (főleg trajektóriatervezéshez) is felhasználták.



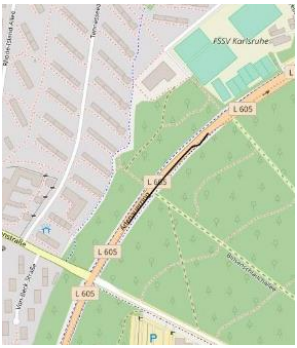
2. ábra Foglaltsági rács jelmagyarázattal

Tézis:
Két önvezető járműirányítási – sávváltási és parkolási – asszisztens működésének támogatására szolgáló, nagyfelbontású térképet hoztam létre részletes sávleíró jellemzők azonosításával és tárolásával földi lézerszkennerrel végrehajtott felmérési adatokra támaszkodva.

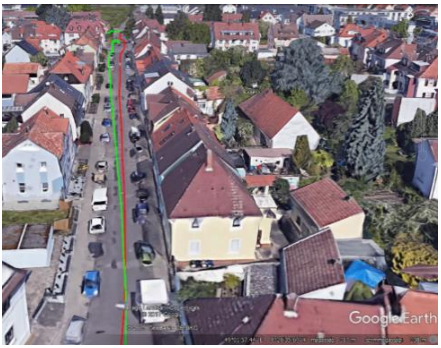
Tézist alátámasztó publikációk: [1] [2]

3 Környezeti modell létrehozása

Vizuális odometria használatával a jármű pozíciójának és orientációjának meghatározása kameraképek alapján történik. Az SfM (Structure-from-Motion) technológia képes térbeli objektumok felületi pontjainak térbeli meghatározására a kétdimenziós képsorozatokat alkotó, mozgás miatti parallaxist tartalmazó képek feldolgozásával. Érdeklődési operátorokat használva a kép jellegzetes pontjai kinyerhetők, segítségükkel a képek összekapcsolhatók. Az illesztés utáni eredmény a képek külső tájékozási elemei az első kép által meghatározott (lokális) koordináta rendszerben. A képek vetítési középpontjainak koordinátái jelentik a kamerahordozó eszköz mozgását, vagyis a jármű trajektóriáját. A feldolgozáshoz a Pix4D szoftvert használtam, a validáláshoz az adathalmaz GNSS-méréseinek eredményét, illetve különböző térképalapokon való megjelenítést használtam (3. ábra).



a) Adathalmaz validálása OpenStreetMap környezetben



b) Adathalmaz validálása Google Earth környezetben (kapott eredmény: zöld szín, GNSS mérés eredménye: piros szín)

3. ábra Validált adathalmazok

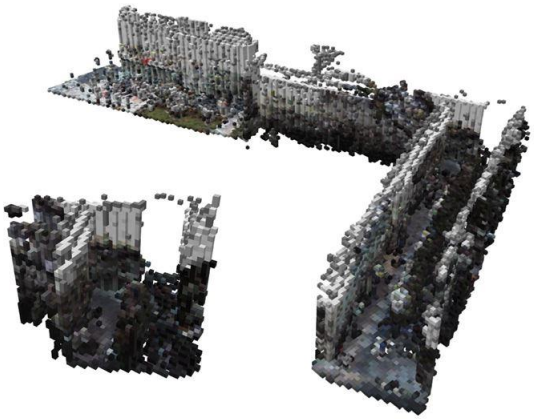
A helymeghatározási jelölők olyan tereptárgyak, melyek helye rögzített, ezért jó viszonyítási alapot nyújtanak; használhatók helymeghatározás támogatására. Kiinduló adatként a Leica Pegasus: Two mobil térképező rendszerrel a BME kampuszán végzett felmérést választottam. Hallgatói segítséggel megtörtént a pontfelhő előkészítése, majd a fejlesztett módszer alapján a helymeghatározási jelölők létrehozása. A vízszintes jelölők esetén egy metszeten felülnézetből átrajzolható a jellemzően téglalap, illetve kör alakú objektum. (4.a részábra) A függőleges jelölők esetén több vízszintes metszetbeli jelölés felvételével a síkbeli, illetve térbeli jelölő előállítható. (4.b részábra)

a) Csatornafedlapok jelölése

b) Henger alkalmazása közlekedési tábla oszlopaként

4. ábra Helymeghatározási jelölők alkalmazása

A helymeghatározás pontosítása a jármű szenzoraival érzékelt környezet és a környezeti modell azonos pontjai alapján is megtehető. Olyan algoritmust fejlesztettem, ami mobil- és földi lézerszkennelt pontfelhőből voxelmodellt hoz létre. A nagy kiterjedésű modell hatékony tárolásához, a MATLAB kétdimenziós ritka mátrixos tárolási formáját továbbfejlesztettem. A megfelelő voxelméret meghatározásához különböző elemzéseket végeztem. Az MLS-mérésekből előállított méteres felbontású voxelmodell az 5. ábrán látható.



5. ábra MLS mérésekből előállított voxelmodell a teljes mintaterületre és annak egy részletére

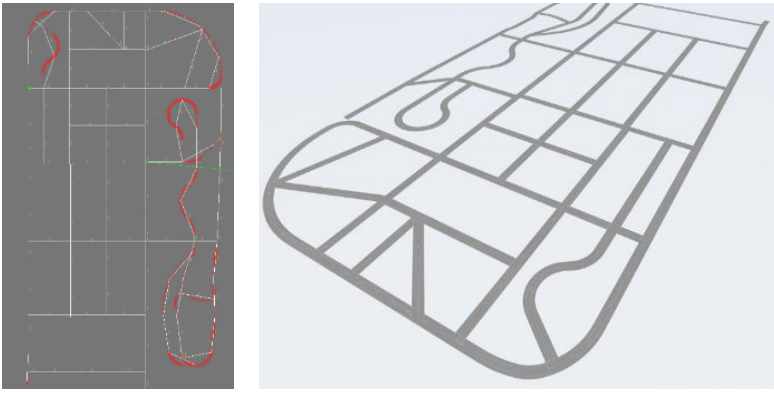
A helymeghatározás támogatásának igazolásához egy finomabb felbontású voxelmodellt használtam fel. A járművet elhelyeztem a modell egy kisebb mintaterületén és a városmodell pontjait használtam fel, zajjal terhelve a helymeghatározás elvégzéséhez. A modellből centrális vetítéssel előállítottam egy olyan képet, ami az autó szemszögéből mutatja a környezetet. Az ábra képmátrixának a koordinátái jelölik az objektum helyét, a benne lévő érték pedig az adott irányban legközelebb lévő objektum távolsága. Ezt normális eloszlású, ±30 cm-es zajjal terhelve megkaptam a szimulált, jármű által érzékelt kiinduló adatokat. Síkbeli vetítés alkalmazásával előállítottam a térmodellt, melynek pontjaira távolságegyenleteket felírva megkaptam a jármű koordinátáit. A szimulált járműadatoknak köszönhetően, a kapott eredményt könnyen ellenőrizhető. A létrehozott városmodell centiméteres pontosságú, a helymeghatározással deciméteres pontosságot értem el és igazoltam a modell alkalmazhatóságát helymeghatározásra.

Tézis:
Mobiltérképezéssel és földi lézerszkenneléssel nyert adatok hatékony tárolására új voxelmodellt dolgoztam ki, majd különböző nagyságú mintaterületeken gyakorlati tesztekben igazoltam a módszer használhatóságát. Környezeti modell alapú helymeghatározás feladaton keresztül bizonyítottam, hogy a modell megfelelő pontosságot nyújt. A járműfedélzeti kamerák képeinek SfM-technológián nyugvó módszerével vizuális odometriai eljárást fejlesztettem és KITTI-képsorozatokon igazoltam eljárásom megfelelőségét járműtrajektória levezetésében.

Tézist alátámasztó publikációk: [3] [4]

4 OpenDRIVE-modell létrehozása

A ZalaZone magyar tesztpályáról rendelkezésünkre álltak a tervezési CAD-állományok, melynek Smart City részéből létrehoztam a terület OpenDRIVE modelljét. Az úttengelyek leválogatása után topológiai ellenőrzést végeztem. Majd további konverziók (-> dxf -> shp) után az állomány betölthetővé vált a MATLAB szoftverbe, aminek segítségével állítottam elő az OpenDRIVE-modellt. A modell VIRES szimulációs környezetbe való betöltése után néhány ívet nem megfelelően ábrázolt (6.a részábra), manuális javítás után 6.b részábrát kapom eredményül.

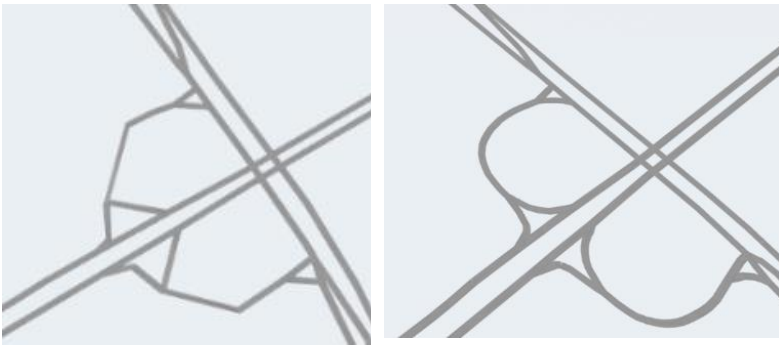


a) A betöltés utáni hibás állapot

b) A javítás utáni állapot

6. ábra A zalaegerszegi tesztpálya Smart City része VIRES környezetben

A Geofabrik átalakításának köszönhetően az OpenStreetMap (OSM) adatokat shape formátumban töltöttem le, majd a fenti eljárás felhasználásával előállítottam az OpenDRIVE-modellt. Ez a példa jól mutatja be a paraméterek megválasztásának fontosságát. A 7.a és 7.b részábrák között látható a különbség. OSM-alapot felhasználva egy bonyolultabb geometriai objektumra is előállítottam az OpenDRIVE-modellt.

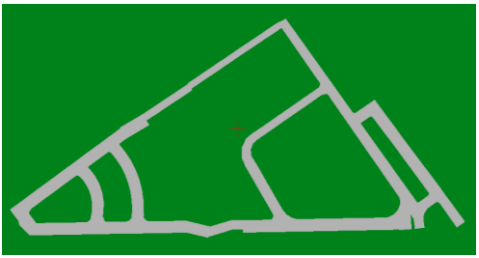


a) A létrehozott OpenDRIVE-modell nem megfelelő paraméterezéssel

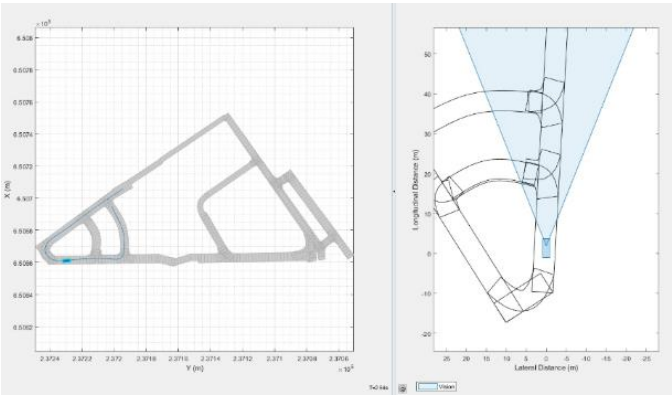
b) A létrehozott OpenDRIVE-modell megfelelő paraméterezéssel

7. ábra A budapesti Petőfi híd budai hídfőjének OpenStreetMap adatokból előállított OpenDRIVE-modellje VIRES környezetben

A kezdetleges próbálkozások után a következő lépcsőfok egy olyan modell előállítása, mely pontosabban követi az útgeometriát, valóságosan ábrázolja az út különböző szélességű szakaszait is. Ennek fejlesztésére a BME kampuszán mobil térképező rendszerrel végzett felmérés pontfelhőjéből hallgatói segítséggel előállt az útszegély. Az úthálózat egyenesekből és tiszta körívekből áll, az úttengely az útszakaszok közepén halad, az út sávjai poligonként jelennek meg. Az út megjelenítése ezáltal sokkal valóságosabbá vált, viszont az úttengelyek folytonossága még nem biztosított. A modellt OpenDRIVE ODR Viewer-ben jelenítettem meg (8. ábra), majd a MATLAB Driving Scenario Designer megjelenítőjében teszteltem, ahol külön megadható a jármű trajektóriája. A 9. ábrán látható a szimulált jármű is a modellen kék téglalappal.

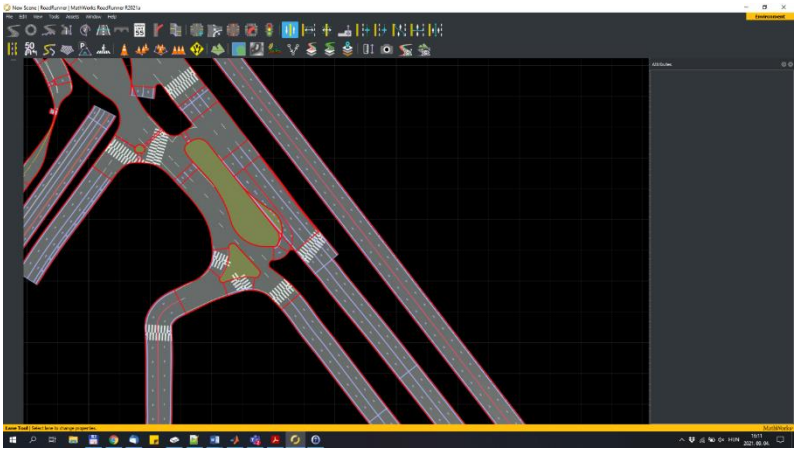


8. ábra Az MLS pontfelhőből előállított modell megjelenítése OpenDRIVE ODR Viewer környezetben



9. ábra Az MLS pontfelhőből előállított modell megjelenítése MATLAB Driving Scenario Designer környezetben

Az előző esetben a modellek megjelenítése kellően részletes volt, azonban a geometriai kapcsolat nem valósult meg a sávokban. A budapest 11. kerületi térinformatikai adatbázisából letöltöttem a Szent Gellért teret és környékét. Hallgatói csapattal zajlott az állomány kézi felüldigitalizálása RoadRunner programban, ami már lehetőséget adott a sávpoligonok összekapcsolására is, illetve az útburkolati jelek megválasztására. (10. ábra)



10. ábra Ortofotó alapján létrehozott OpenDRIVE-modell RoadRunner szoftverben

Tézis:
A járműipari fejlesztésekben alkalmazott szimulátorok számára kidolgozott bemenő környezeti leírást tartalmazó szabványos OpenDRIVE-fileformátum feltöltéséhez négyféle terepi felmérésből származó adatok feldolgozásának módszertanát dolgoztam ki. Ezek az adatforrások a CAD-modell, OpenStreetMap adatállomány, mobil lézerszkennelés és ortofotó. Az adatforrások megfelelő feldolgozásával a környezet leírását megadtam a szabvány által megkövetelt eszközökkel. Az előállított környezetleírásokat szimulációs környezetekben ellenőriztem és igazoltam azok használhatóságát.

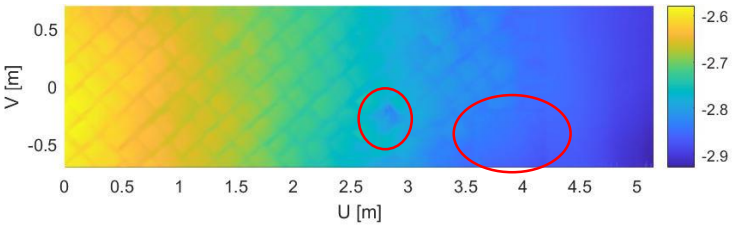
Tézist alátámasztó publikációk: [5] [6]

5 OpenCRG-modell létrehozása

A MATLAB szoftvert használva eljárást írtam, melynek segítségével tetszőleges felbontású CRG rács állítható elő a mintaterületre. A függvény bemenő paramétere a pontfelhő, a rács felbontása és az úttengely koordinátái. Az eljárás a CRG-rács előállítását, paraméterezését és adatokkal való feltöltését végzi el. Az

eljárást több mintaterületen is teszteltem, ellenőrizve, hogy az út sajátosságai megjelennek-e a modelleken. A 11. ábrán a kiindulási adat látható, a Csiky utca részletének pontfelhődarabja CloudCompare szoftverben. Az előállított CRG-modell a 12. ábrán látható. Az előállított modellen is felismerhetőek az út sajátosságai, az út mintázata, és az ellipszisekkel jelzett akna és hiányzó kődarab.

11. ábra Csiky utca pontfelhőjének részlete



12. ábra Csiky utca 1 cm felbontású CRG-modellje

Tézis:
Az útburkolat mikroszintű felszínmodelljének leírására kidolgozott, eddig csak szintetikus (elméleti) adatokkal történő előállítása helyett valós terepi felmérésekből nyert felületi adatok bevonására gyakorlati módszertant dolgoztam ki, majd földi és mobil lézerszkenneléssel kapott pontfelhők segítségével előállítottam a szabványos OpenCRG-modelleket. A mért magassági adatokkal igazoltam, hogy az útpálya felületének szabályos és szabálytalan mintázatai, valamint annak különféle rendellenességei a lézerszkennelésből származó mérésekkel reprezentálhatók, így igazoltam a szabványos leírásra épülő módszertan alkalmazhatóságát valós felszínek bevonására és fejlesztési támogatására.

Tézist alátámasztó publikációk: [7] [8]

6 Összefoglalás

Doktori kutatásom során az önvezető járművek fejlesztésének támogatása volt a célom. Önvezető funkciók támogatására fejlesztettem térképet, mely megadja a jármű helyzetét, és ezáltal megmutatja a sávváltás lehetőségét. Foglaltsági rácsot állítottam elő, mely a járművet támogatja a parkolás folyamán a lehetséges parkolóhelyek mutatásával. Vizuális odometria és SfM együttes felhasználásával, helymeghatározási jelölők használatával pontosítható a jármű helyzete annak (szenzoraival érzékelt) környezete ismeretében. Az útkörnyezeti voxelmodell létrehozásával a jármű környezetleírása előállítható, hatékonyan tárolható, és a segítségével végzett pozicionálás pontosítja a jármű helyzetét. OpenDRIVE-modelleket hoztam létre különböző bemeneti formátumokból (CAD-fájl, OSM, MLS-pontfelhő, ortofotó), és többféle szimulációs szoftverben mutattam meg az alkalmazhatóságukat. Algoritmust fejlesztettem, mellyel terepi adatokat tartalmazó OpenCRG-modellt hoztam létre különböző mintaterületekre.

Irodalomjegyzék

[1] Vivien Potó, József Árpád Somogyi, Tamás Lovas, Árpád Barsi, Viktor Tihanyi, and Zsolt Szalay, “Creating HD map for autonomous vehicles - a pilot study,” in *34th International Colloquium on Advanced Manufacturing and Repairing Technologies in Vehicle Industry*, 2017, no. January 2018, pp. 127–130.

[2] Árpád Barsi, Vivien Potó, Árpád Somogyi, Tamás Lovas, Viktor Tihanyi, and Z Szalay, “Supporting autonomous vehicles by creating HD maps,” *Prod. Eng. Arch.*, vol. 16, pp. 43–46, 2017, doi: https://doi.org/10.30657/pea.2017.16.09.

[3] Vivien Potó and Árpád Barsi, “Applying Structure-from-Motion technique for visual odometry,” in *AIS 2017 - 12th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas*, 2017, pp. 145–149.

[4] Vivien Potó, József Árpád Somogyi, Tamás Lovas, and Árpád Barsi, “Laser scanned point clouds to support autonomous vehicles,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 27, pp. 531–537, 2017, doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.130.

[5] Vivien Potó, Nikol Krausz, János Máté Lógó, and Árpád Barsi, “OpenDRIVE Standard for Road Description,” in *AIS 2019 14th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas organized in the frame of Hungarian Science Festival 2019 by Óbuda University Proceedings*, 2019, pp. 134–138.

[6] Árpád Barsi, Vivien Potó, János Máté Lógó, and Nikol Krausz, “Creating an OpenDRIVE Model of the Campus of the Budapest University of Technology and Economics for Automotive Simulations,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 64, no. 4, pp. 1269–1274, Sep. 2020, doi: 10.3311/PPci.16768.

[7] Árpád Barsi, Vivien Potó, and Viktor Tihanyi, “Creating OpenCRG Road Surface Model from Terrestrial Laser Scanning Data for Autonomous Vehicles,” in *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, no. 9783319756769, 2018, pp. 361–369.

[8] Vivien Potó, András Csepinszky, and Árpád Barsi, “Representing road related laserscanned data in curved regular grid: A support to autonomous vehicles,” in *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 2018, vol. 42, no. 2, pp. 917–921, doi: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-917-2018.