

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS
GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

TÉZIS FÜZET

**Intelligens távérzékelési és
modellezési módszerek a mobil
gépek automatizálásában**

Szerző:

RÓZSA Zoltán

Témavezetők:

Dr. SZIRÁNYI Tamás

Dr. KOVÁCS Gábor

Anyagmozgatási és Logisztikai Rendszerek Tanszék

2019-03-21

1 Bevezetés

A disszertáció célja a gépi transzport optimalizálása; ez a dolgozatban több lépésben, átfogó értelemben kerül bemutatásra: először a menedzsmenttel és logisztikával kapcsolatos problémák kerülnek előtérbe; a második részben pedig a szenzorok oldaláról megközelítve, a gépek speciális és biztonsági igényeit figyelembe véve a követési/felismerési feladatok kerülnek elemzésre.

Az automatizálás és az autonóm közlekedés nagymértékű fejlődése jelentős előrelépést hozott mind a távérzékelők, mind az ezeket támogató intelligens módszerek területén. Az építőipari folyamatok összetettek, mindegyik eljárás egyedinek tekinthető a különböző minőségű és mennyiségű erőforrások, valamint eltérő körülmények és feladatok következtében. Azonban az építésgépesítés területén sok analógiát találhatunk a közlekedés témakörével (az építőipar járművei, szállítóeszközei a mobil munkagépek). A területek hasonlósága miatt érdemes az autonóm járműkutatásokban jól bevált módszereket alkalmazni építésgépesítési problémákra. Az építési területeken is legalább annyira fontos az optimális folyamatok megvalósulásának érdekében a munkagépek útvonaloptimalizálása, mint az utakon a jármű útvonalaké. Ennek az építőiparban első feltétele egy optimális építési terület elrendezés (layout) megléte, illetve az, hogy ismerjük az építőipari járművek helyzetét. Annak érdekében, hogy az önjáró gépek biztonságosan közlekedhessenek, és minél megbízhatóbb módon tudjanak reagálni a különböző (akár előre nem látható) szituációkra, az intelligenciájukat távérzékelőkkel és ezeket támogató módszerekkel szükséges növelnünk. A környezet feltérképezése és felismerése teheti lehetővé a gépek számára a teljesen autonóm közlekedést és munkavégzést. A kutatásom célja az volt, hogy megvizsgáljam, hogyan hasznosíthatná az építésgépesítés a más iparágban már sikerrel alkalmazott módszereket, szenzorokat, megvizsgáljam ezen technológiák milyen fejlesztési lehetőségeket rejtenek magukban. Ezenfelül az ipari vezetónélküli berendezések speciális szenzoraihoz is kidolgoztam olyan környezetérzékelési eljárásokat, amik elvükben is újak és az autonóm közlekedés előnyeit itt is lehetővé teszik. Sőt, a kidolgozott eljárások részben a közutakon is eredményesen használhatók, ahogy ennek ipari hasznosítása is tanúsítja. A szenzorok közül elsősorban LIDAR technológia alkalmazhatóságával foglalkoztam. Különböző tudományágak úgymint a döntéstámogatás és a gépi látás módszereit alkalmaztam és fűztem

össze a mobilgépeket alkalmazó folyamatok optimalizálása érdekében.

Jelenleg tanársegéd vagyok a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Anyagmozgatási és Logisztika Rendszerek Tanszékén. A doktori tanulmányaimat 2014-ben kezdtem meg ezen a tanszéken. Az építési folyamatokat kutató munkámat is itt kezdtem meg, az "Építési folyamatok kutatása a logisztikai és informatikai jellemzők javítása érdekében" projekt keretében. 2016 óta a Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet Gépi Érzékelés Kutató Laboratóriumának tudományos segédmunkatársa is vagyok, MTA fiatal kutatói munkakörben. Itt kutatási és ipari fejlesztési projektekkel egyaránt foglalkozom. Több autóiipari beszállítóval állunk kapcsolatban (pl. Bosch, Knorr-Bremse), részben a bemutatott tézisek is kapcsolódnak ezen együttműködések keretein belül létrejött fejlesztésekhez.

Az első tézisem az építőipari személy- és anyagmozgatás tervezésével és bizonytalanságaival foglalkozik. A hozzákapcsolódó két altézisben döntéstámogató módszert és szempontrendszert javaslok a döntés segítésére, a bizonytalanságok kiküszöbölésére. A környezetérzékelés területén elsősorban a LIDAR technológia, pontfelhő feldolgozás újdonsága, ezenfelül pedig a részleges információból történő felismerés jelentették a kihívásokat. A második tézisben akadály felismerő módszert javaslok az ipari vezető nélküli targoncák részére. A harmadik tézis egy tárgy klasszifikációs módszerről szól, ami nagy sebességű és tetszőleges szenzorhelyezésű esetekben is alkalmas lehet.

2 Kitekintés

Ebben a fejezetben röviden bemutatom az értekezés témáival kapcsolatos építés gépesítés és mobil gépek automatizálás témakörben jelenleg alkalmazott módszereket és folyamatban lévő kutatásokat, a később bemutatott tézisek sorrendjében.

A több kritériumú döntéstámogató (MCDM) módszerekről alapos áttekintését készített [Jato-Espino et al., 2014]. A döntéstámogatás és az ez irányú kutatások a kezdetektől az építőipari projekt menedzsment részei voltak, és még továbbra is aktív kutatási területek [Erdogan et al., 2017]. Az építőipari logisztika sok szinten igényel döntést. Az első szintek közé tartozik a gépkiválasztás. [Temiz and Calis, 2017] például Analytical Hierarchy Process (AHP) és Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluation (PROMETHEE) döntéstámogató módszerek segítségével választja ki a megfelelő kotrógépet. A disszertáció szerzője egyben társszerzője is egy gépkiválasztással foglalkozó kutatásnak. Ebben a publikációban fuzzy-alapú szakértői rendszert fejlesztettek ki daruk és építőipari szállító berendezések kiválasztására [Bohacs et al., 2013]. Ez a munka jó kiindulási alapot nyújtott a disszertáció részét képező hibrid MCDM módszer kifejlesztéséhez. Az építési logisztika másik fontos része, amely gyakran használja a döntéstámogatást, az ellátás menedzsment ([Jakowski et al., 2018], [Cengiz et al., 2017]), és többek között hasznos lehet a layout tervezési fázisban is ([Moghtadernejad et al., 2018]). A disszertációban bemutatott módszert (4.1.1 fejezet tézise) is egy layout kiválasztási problémára alkalmazom.

A lokalizációs probléma az építési területeken több formában is jelen van. Szükség van arra, hogy ismerjük a dolgozók [Park and Brilakis, 2016], anyagok, szerszámok [Cheng et al., 2011] és a gépek [Ibrahim and Moselhi, 2016] helyzetét is. A különböző erőforrások nyomonkövetése csökkentheti az idővesztést, elkerülve az anyagihiányt, a hibás működést vagy a felesleges leállásokat. Ez a követés lehet egyaránt kültéri vagy beltéri probléma [Ibrahim and Moselhi, 2015] különböző nehézségekkel. Az 4.1.2 fejezet tézise a különböző technológiákról, értékelésükről és elemzésükről szól az építőipar és a közlekedés eseteiben.

A gépi látás sok szempontból segíthet az építési folyamatok optimalizálásában. A dolgozók és a berendezések mozgásának előrejelzésével növelheti a biztonságot [Zhu et al., 2016], alkalmazható különböző felismerési feladatok megoldására [Yang et al., 2016], autonóm robotegység irányítására [Feng et al., 2015], építési

folyamat azonosításra [Siebert and Teizer, 2014] vagy éppen hidak szerkezeti ellenőrzésére [Riveiro et al., 2016] is. A disszertáció szempontjából (4.2 és 4.3 fejezet tézisei) az objektumfelismeréssel kapcsolatos alkalmazások a legfontosabbak. [Kim et al., 2016] nagyszámú kategóriát ismer fel, [Fang et al., 2018] konvolúciós neurális hálózatot használ (CNN) a munkavállalók észlelésére. Még ezen a témakörön belül is különösen fontosak a 3D-s látás alkalmazásai, pl. [Xu et al., 2018], ahol a szerzők az építési terület pontfelhőjének voxel-alapú szegmentálását érik el, vagy [Chen et al., 2018], ahol jól ismert pontfelhő-leírókat értékelték az objektumok felismerésére az építési alkalmazásokban.

A kamerarendszerek gyári alapfelszereltségnek számítanak az építőipari gépeken. A radarok alkalmazása szintén a bevett gyakorlat, annak érdekében, hogy a gépek és a járművek biztonságosabban és hatékonyabban mozoghassanak, és növeljék a kezelő látóterét. Napjainkban az autonóm építőipari szállító rendszerek több mint egy évtizede működnek (az elsőt a Komatsu indította el), és ezek különböző akadályfelismerő rendszereket (ODS) igényelnek. Emellett viszont az építőipari gépekben nagyon kevés az aktív biztonsági technológia alkalmazása, a berendezések veszélyességének ellenére. A Volvo csak a közelmúltban kezdett a LIDAR használatát célzó fejlesztésbe a biztonság növelése érdekében. Ez azt mutatja, hogy az építőiparnak nagy igénye van arra, hogy alkalmazza a távérzékelési technológiákat és az ezen alapuló intelligens módszereket.

Az ipari környezetben évtizedek óta rendszeresen alkalmaznak 2D LIDAR-okat vezető nélküli targoncákon. Ezek az érzékelők biztonsági berendezésként működnek (megállítja a járművet veszélyhelyzetben), figyelmeztetik a járművet a lelógó daruhorogokról vagy a polcokból kilógó tárgyokról (a pozíciójuktól függően) és navigációs célokra is alkalmasak. Ezeket azonban ritkán használják fel a jármű intelligenciájának növelésére, például objektumfelismerésre. Mindkét esetben nagy potenciál mutatkozik ezek fejlesztésére.

3 Módszertan

Először kidolgoztam egy új több kritériumos döntéstámogató (MCDM) módszert. Ez a KIPA (Kindler és Papp) döntéshozatali módszeren és a fuzzy logikán alapul. A fuzzy logika egy jól alkalmazható eszköz a bizonytalanságok kezelésére, én ezen a témakörön belül a bizonytalan fuzzy halmazok elméletét használtam fel, annak érdekében, hogy több döntéshozó véleményét is figyelembe tudjam venni.

Az első tézis, második altézisében elemeztem a rendelkezésre álló flottakövetési módszereket. Ehhez a Guilford-módszert alkalmaztam a kritérium súlyok és a KIPA-módszert a jármű lokalizáció és adatátviteli típusok közötti preferencia sorrend meghatározására különböző iparágak vizsgálatakor.

A képfeldolgozás és a 3D képfeldolgozás területeit vizsgálva kiterjedt szakirodalmat találunk. 3D-s képfeldolgozás esetén egyre több mélység szenzor jelenik meg, az autonóm vezetés kiszolgálása céljából (pl. a nagyfelbontású Velodyne VLS-128¹, vagy solid state LIDAR-ok, mint a Quanergy S3²) és új típusú adatokat, például pontfelhőket szükséges feldolgozni. Számos, nyilvánosan hozzáférhető adatbázis és algoritmus áll rendelkezésre. A legismertebbek: a KITTI [Geiger et al., 2012] az adatbázisok, és a Point Cloud Library (PCL) [Rusu and Cousins, 2011] a 3D-s képfeldolgozó könyvtárak közül. Ezek elérhetősége előnyös lehet, mert az új belépők gyorsan bővíthetik az ismereteiket, a drága szenzorok megléte nem feltétlenül szükséges teszt adatok generálásához, és az elérhető algoritmusok könnyen továbbfejleszthetők. Ez azonban azt eredményezi, hogy ezen a területen nagyon nagy a verseny. Az innováció helyes kiértékelése legalább olyan fontos, mint maga az ötlet. A módszereknek reprodukálhatóknak és összehasonlíthatóknak kell lenniük, ezeket az összehasonlításokat pedig nyilvános adatokon szükséges megtenni; a tudományos eredményeket korrekt módon kell prezentálni, hogy szignifikánsnak minősüljön.

A 3D képfeldolgozással kapcsolatos tézisek esetében, olyan módszereket dolgoztam ki, amelyek lehetővé teszik a különböző fokú és szituációkban előforduló részleges pontfelhők felismerését. Ehhez a saját fejlesztések mellett, felhasználtam

¹<https://velodynelidar.com/vls-128.htm>

²<https://quanergy.com/s3/>

a szakirodalomból ismert pontfelhő-feldolgozási módszereket és tovább fejlesztetem őket. A teljesség igénye nélkül: Random Sample Consensus (RANSAC) variáns alapú talajdetektálás [Torr and Zisserman, 2000], Iterative Closest Point (ICP) az egymás utáni frame-k regisztrációjához [Besl and McKay, 1992], Euklideszi klaszterezés az objektum szegmentálásához [Rusu, 2009] vagy 3D Harris a kulcspontra kereséshez [Sipiran and Bustos, 2011]. Természetesen a tesztek is elérhető adatbázisokon végeztem ([Veltkamp and Haar, 2007], [Geiger et al., 2012], [Borcs et al., 2017]). Mindkét rendszer esetében Matlab programnyelven és a környezetben készítettem el a prototípusokat, később pedig a C++ implementációjukat is elkészítettem. Ezek részben ipari bevezetésre is kerültek, a működés körülményeit valós környezeti tényezők és követelmények szabják meg.

4 Új tudományos eredmények

4.1 Tézis: Mobil gépek útvonal optimalizálásával kapcsolatos döntéstámogatás alkalmazása és fejlesztése

Az útvonaloptimalizálás alfeladataihoz (layout meghatározás, követés) dolgoztam ki új döntéstámogató szempontrendszert és módszert. Ezeket építésgépesítéssel kapcsolatos feladatoknál alkalmaztam.

A mobil gépek és az ezekkel kapcsolatos folyamatok (pl.: kiválasztás, térkép tervezés) automatizáltsága még nem kellően magas a gyakorlatban. Ezen potenciál kihasználását célozta meg az ebben a tézisben (és altézisekben) összefoglalt, döntéstámogatással kapcsolatos kutatás.

4.1.1 Altézis: Hibrid MCDM módszer alkalmazása az építőipari logisztikában

Kidolgoztam egy új MCDM módszert, ami ötvözi a KIPA (Kindler és Papp) módszert és a fuzzy logikát. A módszer a korábban rendelkezésre állókkal ellentétben képes a bizonytalanságok és egyszerre több döntéshozó véleményének figyelembevételére is. Ezt a módszert egy a szakirodalomból vett layout kiválasztási problémán mutattam be.

Az építőipari folyamatok optimalizálása sokrétűségük miatt egy sokváltozós célfüggvény optimalizálását jelenti. Az egyik meghatározó eleme, a szállítási útvonalak optimalizálása, ez azonban csak akkor valósítható meg, ha egy másik meghatározó eleme, az építési layout is optimális (egy alkalmatlan layout-on nem lehetséges az útvonaloptimalizálás).

Ennek a döntési problémának a megoldására fejlesztettem ki egy új módszert, ami más általános döntési problémára is alkalmazható. A módszer alapja a fuzzy logika [Zadeh and Bellman, 1970] és a KIPA [Kindler and Papp, 1975] módszer, ezek korábban külön-külön is eredményes döntéstámogató módszereknek bizonyultak, de a kifejlesztett hibrid módszerben sikerült ötvözni ezek előnyeit (érett módszer, több döntéshozó figyelembevétele, elmosódott halmazok).

A layout tervezési döntési problémánál lean construction [Marzouk et al., 2012] alapelveire épülő kritériumokat vettem figyelembe, amit egy kapcsolódó publikációban a társszerzőm határozott meg. A módszert egy a szakirodalomból vett problémán mutattam meg.

Kapcsolódó, saját publikációk:

- [Rozsa and Sztrapkovics, 2015]
- [Sztrapkovics and Rozsa, 2015]
- [Sztrapkovics and Rozsa, 2016]

4.1.2 Altézis: Flotta követési módszerek elemzése és értékelése az építőiparban és a közlekedésben

Meghatároztam egy szempontrendszert, ami alapján értékeltem a flottakövetési módszereket. Ezt az értékelést a közlekedést és az építőipart különválasztva tettem meg, így ezzel segítettem az optimális rendszer kiválasztását egy adott feladathoz.

A logisztikai folyamatok optimális megvalósítása érdekében elengedhetetlen a járművek optimális útvonalainak biztosítása, ehhez viszont a járművek nyomon követése a szükségszerű.

Megvizsgáltam a jármű és a flottakövetéssel kapcsolatos szakirodalmat, az építőipart [Pradhananga and Teizer, 2013], és a közlekedést [Jain and Goel, 2012] érintőleg. Ez alapján pedig kifejlesztettem egy szempontrendszert ami alapján összemértem a különböző technológiákat (Global Positioning System - GPS, Sign-Post - SP, Ground Based Radio - GBR, Dead-Reckoning - DR), és a különböző feladatokhoz javasoltam a legalkalmasabbat.

Ezt az összemérést a KIPA [Kindler and Papp, 1975] módszer alapján tettem meg, és végezetül a kapott eredmény alapján javaslatot tettem alkalmazási sorrend formájában a különböző esetekre (városi közlekedés, távolsági közlekedés, építőipar) a különböző technológiákra vonatkozóan.

Kapcsolódó, saját publikációk:

- [Kovacs and Rozsa, 2015]

4.2 Tézis: 3D alakfelismerő rendszer kidolgozása részleges pontfelhőkhöz

Kidolgoztam egy teljes rendszert, ami képes részleges alakok felismerésére pontfelhőkből. Ez a munka magában foglalta a skála definíció bevezetését, illetve kulcspont keresési eljárás, lokális és semi-globális leírók kidolgozását. A módszer a szakirodalomban eddig megoldatlan problémára, a részleges 3D alakzatok felismerésére ad megoldást, de a szakirodalommal közös mérési tartományban is State of the Art-nak megfelelő teljesítményt nyújt.

A szakirodalmat áttanulmányozva kiderült számomra, hogy bár jól működő alakfelismerő módszerek léteznek, azonban részleges alakfelismerésre korábban gyakorlatilag próbálkozások sem voltak. Annak ellenére, hogy a minél korábbi döntés elengedhetetlen a környezetfeltérképezése közben - bármilyen robotról legyen is szó.

4.2.1 Altézis: Lokális skála definíció, és ez alapján kulcspont keresési eljárás kidolgozása 3D alakfelismeréshez

Új lokális skála definíciót vezettem be, ami független a teljes mérettől. Ezt a mérőszámot sikerrel alkalmaztam mind az erre épülő kulcspont keresésnél, mind pedig a lokális környezet leírásánál, amik a 3D-s alakfelismerés részfolyamatai.

Az alakfelismerés lokális vagy globális leírók alapján történhet. Mivel a globális leírók alkalmazásához szükség van a teljes 3D alak ismeretére (aminek feltérképezésére a gyakorlatban nincs lehetőség), így a lokális leírók használatosak 2.5D pontfelhők esetében. Az alakfelismerést megvalósító rendszerek leggyakrabban a következő lépésekből tevődnek össze [Guo et al., 2014]:

- Kulcspont keresés
- Kulcspont és lokális környezetének leírása
- Leírók egyeztetése
- Hipotézis verifikáció

A fellelhető kulcspont keresési eljárásokat megvizsgálva azt tapasztaltam, hogy hiányolnak egy nagyon fontos tulajdonságot, a megismételhetőséget (ugyanazon az alakzaton ugyanazokat a kulcspontokat találja meg, hasonlókon pedig hasonlókat). Ezért egy, már a képfeldolgozásban jól bevált Harris kulcspont keresést [Sipiran and Bustos, 2011] javasoltam, hogy javítsak ezen a tulajdonságon.

Mivel korábban csak hálózott modellekre alkalmazták, első lépésben kidolgoztam a pontfelhőkre alkalmazható variánsát.

A részleges alakból történő felismerés problémájára többek között azért sem született korábban megoldás, mert hiányzott egy megfelelő lokális skála definíció, ennek hiányában ugyanis hiába ismerjük az abszolút skálát, nem tudjuk megbecsülni, hogy mekkora lesz a teljes alakzatunk.

A kulcspont keresésnél kidolgozott módosított Harris módszer lokális görbület mérőszámaiból kiindulva, definiáltam egy új lokális skála definíciót, megmutattam, hogy ez segítette mind a részleges pontfelhőből történő felismerést (leíró részeként), mind pedig a Harris módszer megismételhetőségének javítását. Egy adott típusú kulcsponthoz hozzá tudtunk rendelni egy környezetet, amin belül már nem kerestünk új kulcspontokat.

4.2.2 Altézis: Lokális minta definíciója, amely alkalmas részleges pontfelhőkből történő felismerésre

Új lokális minta definíciót vezettem be, aminek heterogén kulcspontokból felépített részgráfok képezik az alapját. Ezt a mintát részleges pontfelhők szekvenciális felismerésére alkalmaztam. A minta hatékonyságát a felismerésben mesterséges és valós tesztekkel egyaránt igazoltam.

Az alakfelismerés, így a járművek, munkagépek környezetének felismerése nagyon nagy szerepet játszik a biztonságos közlekedésben, munkavégzésben legyen szó autonóm vagy hagyományos járművekről. Ennek a döntésnek pedig olyan gyorsan kell megszületnie, amilyen gyorsan csak lehetséges. Ezért a részleges pontfelhőkből való felismerésre dolgoztam ki egy módszert, amely a szekvenciálisan látott környezetből, 3D rekonstrukcióval, folyamatosan javítja a felismerési pontosságot. Többek között, az AGV-eken biztosított a 3D rekonstrukció és a szekvenciális felismerés lehetősége, azzal, hogy mind helymeghatározó rendszerrel, mind pedig döntött LIDAR (Light Detection and Ranging) szenzorokkal rendelkeznek.

A szakirodalomban korábban nem foglalkoztak részleges pontfelhőkből való felismeréssel, túl nehéz feladatnak bizonyult. Így a 2D képfeldolgozásban hasonló problémára bevált módszer, a Bag of Features [Csurka et al., 2004] jelentette az én módszerem kiindulási alapját. A korábban kidolgozott kulcspont kereső módszeremmel stabil kulcspontokat találtam, a skála definíció miatt jól definiált környezettel, amely környezetet kitérítve (3 legközelebbi szomszédból heterogén gráfot alkotva) egy semi-globális leíró t kaptam, ami már nem csak

egy felületet jellemzett egy alakzatnál, de még nem is a teljes alakzatra volt jellemző. Tehát jól leírhatóak vele pl.: testrészek, alkatrészek.

A kidolgozott módszer hatékonyságát először publikus adatbázisokon teszteltem, majd pedig valós pontfelhő szekvenciákon is kísérletileg igazoltam több lépésben, különböző környezetekben, különböző alakokra.

Kapcsolódó, saját publikációk:

- [Rozsa and Sziranyi, 2016a]
- [Sziranyi and Rozsa, 2016]
- [Rozsa and Sziranyi, 2016b]
- [Rozsa and Sziranyi, 2016c]
- [Rozsa and Sziranyi, 2017]
- [Rozsa and Sziranyi, 2018a]

4.3 Tézis: Alakfelismerő módszer kidolgozása kontúr görbékől történő felismerésre

Alakfelismerő algoritmust fejlesztettem ki, ami a függőleges irányban a 3D mintavételezési tételt nem teljesítő esetekben is képes a felismerésre, akár egy LIDAR szkennelési síkból is. Amennyiben több szkennelési sík információja áll rendelkezésre a módszer képes ezeket is figyelembe venni. A módszer eredményességét nagyméretű publikus adatbázison bizonyítottam.

A járművek, mobilgépek nagyon gyakran fel vannak szerelve 2D, esetenként 3D LIDAR szenzorokkal, egyrészt biztonsági megfontolásokból, másrészt pedig, azért, hogy a gépek intelligenciáját növelni tudják. 2D LIDAR-ok esetében egy, a metszett síkban rögzített 2D pontsorozatból nagyon kevés információ nyerhető ki, ami aligha használható felismerésre [Maturana and Scherer, 2015]. 3D-s LIDAR-ok esetében más a helyzet, azonban itt is megjelenik az a probléma, hogy egy felismerni kívánt alakot csak egy síkban látunk, amennyiben ez az objektum a LIDAR-tól távol esik.

Megvizsgálva a szakirodalmat [Beyer et al., 2017] [Kurnianggoro and Jo, 2017] a kontúrpontról történő alakfelismerés esetében azt tapasztaltam, hogy a rendelkezésre álló módszerek nem veszik figyelembe, hogy ha adott magasságban vizsgáljuk is az adott objektumot (az én módszeremnél ez nem kritérium), a szenzor, vagy az objektum mozgása miatt, a látott kép folyamatosan változik. Az én módszerem egy erre a problémára még nem használt leíró alkalmazása

mellett (Fourier [Cooley et al., 1969]), abban is újszerű, hogy figyelembe veszi, hogy az egymást követő frameken hogyan változik az alakzat.

A fent leírtakon kívül, egy egyszerű szavazási sémát javasoltam, arra az esetre, ha esetleg rendelkezésre áll több, mint egy szkennelt sík az objektumból. A módszer teljesítményét pedig több tízezer mintán teszteltem, amelyek publikus adatbázisból származnak, és annak függvényében vizsgáltam, hogy hány frame-n keresztül tudjuk követni az alakzat változását. A korábbi, szakirodalmi eredményekkel összevetve már a legalapvetőbb esetben is eredményesebbnek bizonyult.

Kapcsolódó, saját publikációk:

- [Sziranyi and Rozsa, 2018]
- [Rozsa and Sziranyi, 2018b]
- [Rozsa and Sziranyi, 2019b]
- [Rozsa and Sziranyi, 2019a]

5 Alkalmazhatóság

A kutatási eredmények jelentős része beépült különböző ALRT által oktatott tananyagokba (Építőipari logisztika, Képfeldolgozás). Ez bizonyítja a kutatás elméleti jelentőségét. A gyakorlati alkalmazásokat a következőkben foglalom röviden össze.

Az első tézisben, a lean construction alapelveit figyelembe vevő szempont-rendszert felhasználva, amelyet kollégám dolgozott ki közös munkánk során, az építőiparban tevékenykedő szakemberek alapos döntést tudnak hozni a layout tervezési problémát illetően. A döntést támogató algoritmust pedig bármilyen általános döntési problémára lehet alkalmazni.

Az első tézis második altézise a flottakövetés szakembereinek nyújt támpontot abban a kérdésben, hogy milyen feladatra milyen technológiát érdemes alkalmazni, ezenkívül a tézist tartalmazó cikk egy alapos összehasonlítás, ami a területre újonnan belépőket segíti.

A második tézis a mobilgépek, járművek biztonságosabb közlekedését, autonómmá tételét, intelligenciájuk növelését célozza. A bemutatott módszerek valós időben működése hozzájárul ahhoz, hogy akár közvetlenül, módosítás nélkül lehessen a módszereket alkalmazni autonóm gépek esetében. Ezt vezető nélküli targoncán készült tesztekkel műszakilag igazoltam.

A harmadik tézis a nagy sebességű intelligens járművek (pl.: építőipari szállító járművek) felismerési feladatában nyújt segítséget. A kifejlesztett keretrendszer egy neves autóipari beszállítónak került átadásra. A módszert jelenleg különböző környezetben közlekedő tehergépjárműveken tesztelik.

Mindkét környezetérzékelési rendszerben (második és harmadik tézis) követelmény volt a valós idejű futtathatóság.

A disszertációban számos eredményről számolok be. Ezek nagy része az építésgépesítés fejlesztését célozza, azonban kivétel nélkül mindegyik eredmény alkalmazható más területen is.

6 Jövőbeli kutatási tervek

Az elért eredmények ígéretessége és a kutatási téma időszerűsége előrevetíti, hogy a jövőben is hasonló irányban fogom folytatni a megkezdett kutatást. A kifejlesztett döntést támogató módszer alkalmazhatóságát szeretném más építésgepesítési problémákra is megvizsgálni. Ezenkívül az elkövetkezőkben nagyobb hangsúlyt szeretnék fektetni a gyakorlati alkalmazás oldalára. A gépek nyomon követését és környezetük elemzését tervezem egy olyan szintre emelni, ahol akár a különböző gépek automatikus feladathoz rendelése is megtörténhet, elsősorban a környezetérzékelésre fókuszálva.

Konkrétabban, szeretném tesztelni a dolgozatban kifejlesztett tárgy reprezentációt más típusú neurális hálózatokon is. Ezenfelül, szeretném kiterjeszteni a kutatást más szenzorok (pl.: kamera), lokalizáló algoritmusok (pl.: SLAM) és feladatok irányába (pl.: változásdetekció). Ehhez mindenképpen különböző esetekben és környezetekben lesz szükséges méréseket végrehajtanom. A disszertáció tudásanyaga jó alapot nyújthat egy jövőbeli tantárgy kifejlesztéséhez ami a 3D képfeldolgozás alkalmazásait tárgyalná az autonóm vezetés és intelligens közlekedés tématerületein.

Saját publikációk

- [Kovacs and Rozsa, 2015] Kovacs, G. and Rozsa, Z. (2015). Survey on vehicle/fleet tracking methods applied in the transportation and construction industry. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 43(3):154–161. Available at <https://pp.bme.hu/tr>.
- [Rozsa and Sziranyi, 2016a] Rozsa, Z. and Sziranyi, T. (2016a). 3D alakfelismerés részleges pontfelhőkből. In *VIII. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia (GRAFGEO 2016)*.
- [Rozsa and Sziranyi, 2016b] Rozsa, Z. and Sziranyi, T. (2016b). Lidar alapú gépi látás a közlekedésben részleges pontfelhőkből. In *Innováció és fenntartható felszíni közlekedés (IFFK) 2016*.
- [Rozsa and Sziranyi, 2016c] Rozsa, Z. and Sziranyi, T. (2016c). Object detection from partial view street data. In *2016 International Workshop on Computational Intelligence for Multimedia Understanding (IWCIM)*, pages 1–5.
- [Rozsa and Sziranyi, 2017] Rozsa, Z. and Sziranyi, T. (2017). Alakfelismerés az utakon részleges pontfelhőkből. In *Képfeldolgozók és Alakfelismerők Társaságának 11. országos konferenciája (KEPAF 2017)*.
- [Rozsa and Sziranyi, 2018a] Rozsa, Z. and Sziranyi, T. (2018a). Obstacle prediction for automated guided vehicles based on point clouds measured by a tilted lidar sensor. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(8):2708–2720. Available at <https://ieeexplore.ieee.org>, **IF:4.051**.
- [Rozsa and Sziranyi, 2018b] Rozsa, Z. and Sziranyi, T. (2018b). Street object classification via lidars with only a single or a few layers. In *Third IEEE International Conference on Image Processing, Applications and Systems (IPAS 2018)*.
- [Rozsa and Sziranyi, 2019a] Rozsa, Z. and Sziranyi, T. (2019a). Object detection from a few lidar scanning planes. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*. In press.

- [Rozsa and Sziranyi, 2019b] Rozsa, Z. and Sziranyi, T. (2019b). Utcai objektumok osztályozása lidar adatokon csak egyetlen vagy néhány síkból. In *Képfeldolgozók és Alakfelismerők Társaságának 12. országos konferenciája (KEPAF 2019)*.
- [Rozsa and Sztrapkovics, 2015] Rozsa, Z. and Sztrapkovics, B. (2015). Application of a hybrid mcdm method in construction logistics. *Advanced Logistic Systems: Theory and Practice*, 1(9):17–29. Available at <http://web.alt.uni-miskolc.hu/alsjournal/index.php/als>.
- [Sziranyi and Rozsa, 2016] Sziranyi, T. and Rozsa, Z. (2016). Exploring in partial views: Prediction of 3D shapes from partial scans. In *2016 ICCA '16. International Conference on Control and Automation*.
- [Sziranyi and Rozsa, 2018] Sziranyi, T. and Rozsa, Z. (2018). Városi objektum felismerés mindösszesen néhány lidar szkennelési síkból. In *IX. Magyar Számítógépes Grafika és Geometria Konferencia (GRAFGEO 2018)*.
- [Sztrapkovics and Rozsa, 2015] Sztrapkovics, B. and Rozsa, Z. (2015). Application of an automated hybrid mcdm method in site layout planning based on the principles of lean construction. *Logisztikai Évkönyv* (22).
- [Sztrapkovics and Rozsa, 2016] Sztrapkovics, B. and Rozsa, Z. (2016). Validating the aggregation of hybrid fuzzy-kipa mcdm method used in site layout planning. In *Challenges in Process Management: Decision points, network systems and strategies in practice*, In: Gyenge Balázs, Kozma Tímea (szerk.), pages 108–124, Gyöngyös. Károly Róbert Kutató-Oktató Közhasznú Nonprofit Kft.

Irodalomjegyzék

- [Besl and McKay, 1992] Besl, P. and McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 14(2):239–256.
- [Beyer et al., 2017] Beyer, L., Hermans, A., and Leibe, B. (2017). DROW: Real-time deep learning-based wheelchair detection in 2-D range data. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2(2):585–592.
- [Bohacs et al., 2013] Bohacs, G., Balpataki, A., Odonics, B., Gyimesi, A. D., and Rozsa, Z. (2013). Introduction of a fuzzy-based expert system for selection of materials handling machinery at construction sites. In *1st International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering: IS-CAME 2013*, pages 13–18.
- [Borcs et al., 2017] Borcs, A., Nagy, B., and Benedek, C. (2017). Instant object detection in Lidar point clouds. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(7):992–996.
- [Cengiz et al., 2017] Cengiz, A., Aytekin, O., Ozdemir, I., Kusan, H., and Cabuk, A. (2017). A multi-criteria decision model for construction material supplier selection. *Procedia Engineering*, 196:294 – 301. Creative Construction Conference 2017, CCC 2017, 19-22 June 2017, Primosten, Croatia.
- [Chen et al., 2018] Chen, J., Fang, Y., and Cho, Y. K. (2018). Performance evaluation of 3D descriptors for object recognition in construction applications. *Automation in Construction*, 86:44 – 52.
- [Cheng et al., 2011] Cheng, T., Venugopal, M., Teizer, J., and Vela, P. (2011). Performance evaluation of ultra wideband technology for construction resource location tracking in harsh environments. *Automation in Construction*, 20(8):1173 – 1184.
- [Cooley et al., 1969] Cooley, J., Lewis, P., and Welch, P. (1969). The finite Fourier transform. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 17(2):77–85.

- [Csurka et al., 2004] Csurka, G., Dance, C. R., Fan, L., Willamowski, J., and Bray, C. (2004). Visual categorization with bags of keypoints. In *In Workshop on Statistical Learning in Computer Vision, ECCV*, pages 1–22.
- [Erdogan et al., 2017] Erdogan, S. A., aparauskas, J., and Turskis, Z. (2017). Decision making in construction management: AHP and expert choice approach. *Procedia Engineering*, 172:270 – 276. Modern Building Materials, Structures and Techniques.
- [Fang et al., 2018] Fang, W., Ding, L., Zhong, B., Love, P. E., and Luo, H. (2018). Automated detection of workers and heavy equipment on construction sites: A convolutional neural network approach. *Advanced Engineering Informatics*, 37:139 – 149.
- [Feng et al., 2015] Feng, C., Xiao, Y., Willette, A., McGee, W., and Kamat, V. R. (2015). Vision guided autonomous robotic assembly and as-built scanning on unstructured construction sites. *Automation in Construction*, 59:128 – 138.
- [Geiger et al., 2012] Geiger, A., Lenz, P., and Urtasun, R. (2012). Are we ready for autonomous driving? the KITTI vision benchmark suite. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
- [Guo et al., 2014] Guo, Y., Bennamoun, M., Sohel, F., Lu, M., and Wan, J. (2014). 3D object recognition in cluttered scenes with local surface features: A survey. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 36(11):2270–2287.
- [Ibrahim and Moselhi, 2015] Ibrahim, M. and Moselhi, O. (2015). Enhanced localization for indoor construction. *Procedia Engineering*, 123:241 – 249. Selected papers from Creative Construction Conference 2015.
- [Ibrahim and Moselhi, 2016] Ibrahim, M. and Moselhi, O. (2016). Inertial measurement unit based indoor localization for construction applications. *Automation in Construction*, 71:13 – 20. The Special Issue of 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction.
- [Jain and Goel, 2012] Jain, K. and Goel, R. (2012). Gps based low cost intelligent vehicle tracking system (IVTS). In *International Conference on Traffic and Transportation Engineering (ICTTE 2012) IPCSIT*, pages 93–97.
- [Jato-Espino et al., 2014] Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., and Canteras-Jordana, J. C. (2014). A review of application

- of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45:151 – 162.
- [Jakowski et al., 2018] Jakowski, P., Sobotka, A., and Czarnigowska, A. (2018). Decision model for planning material supply channels in construction. *Automation in Construction*, 90:235 – 242.
- [Kim et al., 2016] Kim, H., Kim, K., and Kim, H. (2016). Data-driven scene parsing method for recognizing construction site objects in the whole image. *Automation in Construction*, 71:271 – 282.
- [Kindler and Papp, 1975] Kindler, J. and Papp, O. (1975). *Comparison of complex systems in Hungarian*. Műszaki Kiadó.
- [Kurnianggoro and Jo, 2017] Kurnianggoro, L. and Jo, K. H. (2017). Object classification for LIDAR data using encoded features. In *2017 10th International Conference on Human System Interactions (HSI)*, pages 49–53.
- [Marzouk et al., 2012] Marzouk, M., Bakry, I., and El-Said, M. (2012). Application of lean principles to design processes in construction consultancy. *International Journal of Construction Supply Chain Management*, 1:43–55.
- [Maturana and Scherer, 2015] Maturana, D. and Scherer, S. (2015). VoxNet: A 3D Convolutional Neural Network for Real-Time Object Recognition. In *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*.
- [Moghtadernejad et al., 2018] Moghtadernejad, S., Chouinard, L. E., and Mirza, M. S. (2018). Multi-criteria decision-making methods for preliminary design of sustainable facades. *Journal of Building Engineering*, 19:181 – 190.
- [Park and Brilakis, 2016] Park, M.-W. and Brilakis, I. (2016). Continuous localization of construction workers via integration of detection and tracking. *Automation in Construction*, 72:129 – 142.
- [Pradhananga and Teizer, 2013] Pradhananga, N. and Teizer, J. (2013). Automatic spatio-temporal analysis of construction site equipment operations using GPS data. *Automation in Construction* 29, pages 107–122. DOI:10.1016/j.autcon.2012.09.004.
- [Riveiro et al., 2016] Riveiro, B., DeJong, M., and Conde, B. (2016). Automated processing of large point clouds for structural health monitoring of masonry arch bridges. *Automation in Construction*, 72:258 – 268.

- [Rusu, 2009] Rusu, R. B. (2009). *Semantic 3D Object Maps for Everyday Manipulation in Human Living Environments*. PhD thesis, Computer Science department, Technische Universitaet Muenchen, Germany.
- [Rusu and Cousins, 2011] Rusu, R. B. and Cousins, S. (2011). 3D is here: Point Cloud Library (PCL). In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Shanghai, China.
- [Siebert and Teizer, 2014] Siebert, S. and Teizer, J. (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an unmanned aerial vehicle (uav) system. *Automation in Construction*, 41:1 – 14.
- [Sipiran and Bustos, 2011] Sipiran, I. and Bustos, B. (2011). Harris 3D: A robust extension of the Harris operator for interest point detection on 3D meshes. *Vis. Comput.*, 27(11):963–976.
- [Temiz and Calis, 2017] Temiz, I. and Calis, G. (2017). Selection of construction equipment by using multi-criteria decision making methods. *Procedia Engineering*, 196:286 – 293. Creative Construction Conference 2017, CCC 2017, 19-22 June 2017, Primosten, Croatia.
- [Torr and Zisserman, 2000] Torr, P. and Zisserman, A. (2000). Mlesac: A new robust estimator with application to estimating image geometry. *Computer Vision and Image Understanding*, 78(1):138 – 156.
- [Veltkamp and Haar, 2007] Veltkamp, R. C. and Haar, F. B. t. (2007). SHREC2007: 3D shape retrieval contest. Technical Report UU-CS-2007-015, Department of Information and Computing Sciences, Utrecht University.
- [Xu et al., 2018] Xu, Y., Tuttas, S., Hoegner, L., and Stilla, U. (2018). Voxel-based segmentation of 3D point clouds from construction sites using a probabilistic connectivity model. *Pattern Recognition Letters*, 102:67 – 74.
- [Yang et al., 2016] Yang, J., Shi, Z., and Wu, Z. (2016). Vision-based action recognition of construction workers using dense trajectories. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3):327 – 336.
- [Zadeh and Bellman, 1970] Zadeh, A. L. and Bellman, R. (1970). Decision making in a fuzzy environment. *Management Science*, vol. 17B, no. 4, pages 141 – 164.
- [Zhu et al., 2016] Zhu, Z., Park, M.-W., Koch, C., Soltani, M., Hammad, A., and Davari, K. (2016). Predicting movements of onsite workers and mobile

equipment for enhancing construction site safety. *Automation in Construction*, 68:95 – 101.