Eötvös Loránd Tudományegyetem

Informatikai Kar

Programozáselmélet és Szoftvertechnológiai Tanszék

Vasúti infrastruktúra hibadetektálásának automatizálása LiDAR pontfelhőben

Témavezető:
Cserép Máté
egyetemi tanársegéd

Szerző:
Horváth Milán
programtervező informatikus MSc

Budapest, 2023

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

INFORMATIKAI KAR

DIPLOMAMUNKA TÉMABEJELENTŐ

Hallgató adatai:

Név: Horváth Milán

Neptun kód: B1V655

Képzési adatok:

Szak: programtervező informatikus, mesterképzés (MA/MSc)

Tagozat : Nappali

Belső témavezetővel rendelkezem

Témavezető neve: Cserép Máté

munkahelyének neve, tanszéke: **ELTE-IK, Programozáselmélet és Szoftvertechnológia Tanszék**

munkahelyének címe: **1117, Budapest, Pázmány Péter sétány 1/C.**

beosztás és iskolai végzettsége: **egyetemi tanársegéd, programtervező informatikus MSc**

A diplomamunka címe: Vasúti infrastruktúra hibadetektálásának automatizálása LiDAR pontfelhőben

A diplomamunka témája:

(A témavezetővel konzultálva adja meg 1/2 - 1 oldal terjedelemben diplomamunka témájának leírását)

A vasúton egyik legfontosabb fogalom az űrszelvény, amelynek tisztaságát a biztonságos utazás és jelentős anyagi károk elkerülése érdekében folyamatosan fent kell tartani. Az űrszelvénybe benyúló növények komoly problémákat tudnak okozni a forgalomban ezért folyamatos ellenőrzés szükséges. Fontos továbbá a vasúti sínek ágyazatának vizsgálata. Többféle probléma felmerülhet, például az ágyazat felgyűrődése, ami a sínek és talpazat megsüllyedését jelzi, emellett problémát okozhat, ha az ágyazatot növényzet teríti be. Gondok nem csak az ágyazatnál, hanem a felsővezetéknél is előfordulhatnak. Ebben az esetben a felsővezeték vízszintes kígyózásának mértékét, illetve a sínpályától számított magasságát kell ellenőrizni. A mai napig a pálya állapotát és az űrszelvény vizsgálatát vonalbejáró személyzet végzi. A veszély csökkentése és a feladat automatizálása, rendszeresebbé tétele érdekében, a munkakörük bizonyos részét ki lehet váltani automatizált módszerekkel, melyek egy pontfelhő alapján különböző algoritmusok segítségével felismerik a vasúti infrastruktúra állapotát.

A lézer alapú távérzékelés röviden LiDAR egy olyan rendszer, amely nagy pontossággal fény segítségével határozza meg különböző tárgyak távolságát, ezáltal könnyen detektálhatunk épületeket, és egyéb tárgyakat a térben. Vasúti infrastruktúra szegmentálásához hatékony programokra van szükség, amely a nagy méretű LiDAR pontfelhőket is könnyen kezeli.

Diplomamunkám célja egy létező térinformatikai rendszer kibővítése, a sínpálya és felsővezeték szegmentációjának ismeretében hibadetektáló algoritmusokkal, amely az űrszelvény környezetében felmerülő problémákat ismeri fel. A feldolgozás nagy méretű LiDAR pontfelhőben történik. A rövid számítási időhöz hatékony algoritmus szükséges, aminek megtervezése és megvalósítása a célom.

Budapest, 2021. 11. 30.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés **3**

2. Technológiai háttér **4**

2.1. Fény alapú távérzékelés 4

2.1.1. Fényalapú távolságérzékelő rendszer felhasználási területei . . 4

2.1.2. Lézerszkennelés vasúti alkalmazása 6

2.2. Űrszelvény fogalma 7

2.2.1. Az űrszelvény részei 7

3. Szakirodalmi áttekintés **11**

3.1. Vasúti infrastruktúra detektálása 11

3.2. A vasúti felsővezeték és sínpár detektálása nyílt pályán 12

3.3. Vasúti infrastruktúra detektálása komplex környezetben 13

3.4. Összetett vasúti sín és felsővezeték detektálás 15

3.5. Korábbi űrszelvény vizsgálati módszerek összehasonlítása fényalapú távérzékeléssel 16

3.6. LiDAR méréssel végzett villamos űrszelvény detektálás és munkavezeték kilengés vizsgálata 17

3.7. Űrszelvény vizsgálata nagyvasúti környezetben 18

3.8. Mobil mérőeszközzel végzett hatékony űrszelvény felmérés 20

4. Mintaadatok **21**

4.1. Méréshez felhasznált rendszer és működése 21

4.1.1. Riegl VMX–450 rendszer 22

4.1.2. Mérést kiegészítő rendszerek 22

4.2. Kézzel végzett vizsgálatok ágyazaton és űrszelvényen 23

4.3. Méréshez felhasznált pontfelhők 24

5. Módszertani áttekintés **26**

5.1. A sínpár középtengelyének megtalálása 27
5.1.1. RANSAC (RANdom SAmpling Consensus) algoritmus 28
5.2. Hibakereső módszerek 30
5.2.1. Űrszelvénynél felmerülő hibák keresése 30
5.2.2. Felsővezeték hibáinak keresése, és ellenőrzése 31
5.2.3. Ágyazati hibák keresése 32
5.2.4. Algoritmusok utófeldolgozása 33
5.2.5. Pontok osztályozása 36

6. Implementáció **38**

7. Eredmények **40**
7.1. Keresési feltételek szigorítása 41
7.1.1. Hibakeresési feltételek szigorítása kábel ellenőrzésénél 42
7.1.2. Hibakeresési feltételek szigorítása ágyazat ellenőrzésénél 43
7.2. Eredmények összehasonlítása korábbiakkal 44

8. Összegzés **45**
8.1. Fejlesztési lehetőségek 45

Irodalomjegyzék **47**

Ábrajegyzék **51**

Táblázatjegyzék **53**

Algoritmusjegyzék **54**

1. fejezet

Bevezetés

A vasút a világ egyik legnagyobb forgalmát lebonyolító tömegközlekedési és szállítmányozási eszköz. EuroStat 2021-es kimutatása szerint [1, 2] évente 8 milliárd ember számára teszi lehetővé az utazást, ez mintegy 400 milliárd utaskilométert jelent. A teherszállítmányozás 390 tonnakilométer forgalmat bonyolít le az Európai Unió területén. Mindennapos forgalom zavartalan közlekedése érdekében a pálya vizsgálata elengedhetetlen. A jelen korban már minden technikai eszköz adott arra, hogy a vizsgálat emberi jelenlét nélkül is elvégezhető legyen. Az emberi beavatkozással végzett vizsgálatok lassúak, olykor nem teljes mértékben megbízhatóak, és rendkívül költségesek. Több lehetőség is említésre kerül a dolgozatomban, amelyek a kiváltás alternatíváját képzik. Ezenkívül a dolgozat LiDAR alapú ellenőrzésének lehetőségét, és módszerének leírását tartalmazza.

Diplomamunkám célja egy olyan rendszer LiDAR alapú pontfelhőben történő felmérés lehetőségének megvizsgálása és létrehozása, amely hatékonyan, alacsony üzemeltetési költséggel képes működni. Hibák feltárása LiDAR pontfelhőben manuálisan ugyan, de gyakorlatban előforduló elemzési módszer. Ennek automatizálását tartalmazza a dolgozat. A pontfelhőn háromféle hibakeresési algoritmusra térek ki részletesen. A felsővezeték kilengésének, illetve szabványban foglalt magasságának vizsgálatát mutatom be, amely hibamentessége a villamosított vasútvonalak elengedhetetlen feltétele. A felsővezetékek mellett vizsgálom az ágyazat felnyomódását és a vonat közvetlen környezetét, a tárgyakkal való ütközés elkerülése érdekében.

2. fejezet

Technológiai háttér

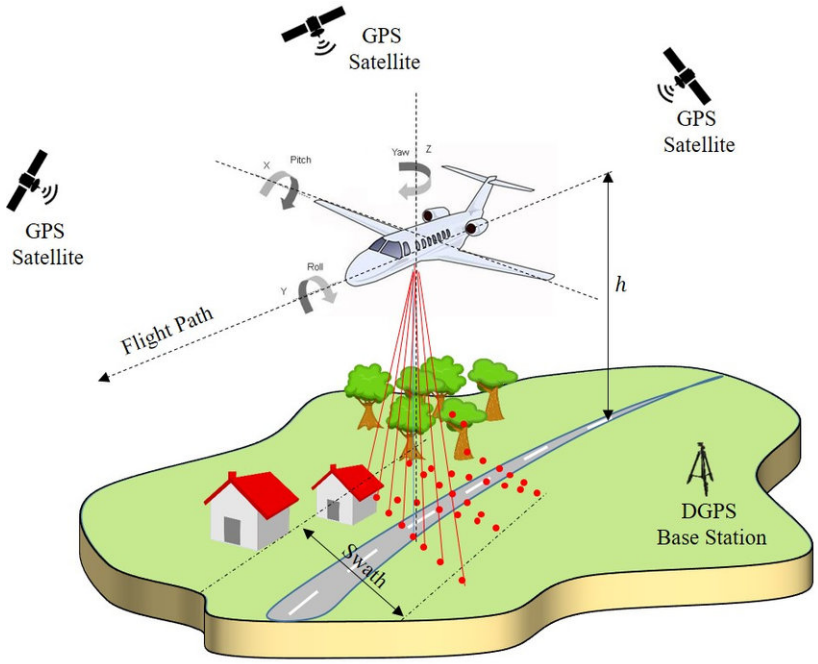
2.1. Fény alapú távérzékelés

A Light Detection and Ranging [3] – magyarul lézer alapú távérzékelés – egy olyan technológia, amely egy fénynyaláb segítségével néhány centiméteres maximális eltéréssel képes visszaverődésből távolságot mérni. A LiDAR bármely fénytartományt használhatja az infravöröstől a látható fénytartományon át az ultravioláig. A többszörös visszaverődések könnyen okozhatnak problémát, ez a jelenség azonban szűrhető.

2.1.1. Fényalapú távolságérzékelő rendszer felhasználási területei

Légi Lézer Szkennelés (ALS)

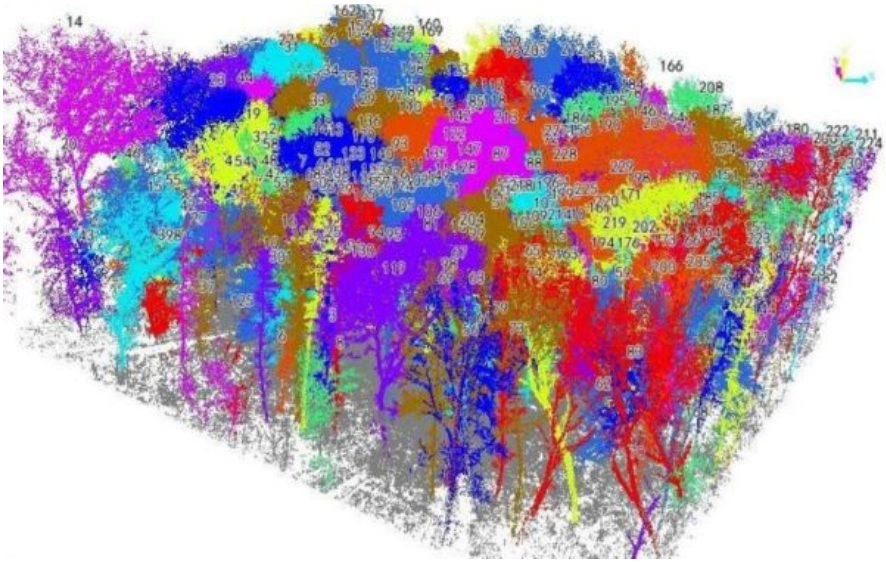
Az ALS levegőből készített felvételek, legtöbbször repülőgépekre szerelt mérőeszközökkel történik. Ezzel a módszerrel automatizálni lehet a fák felismerését. Használják még a technológiát épületek méretének meghatározására is. A 2.1 ábrán látható a rendszer működése.



2.1. ábra. Légi pásztázás szemléltetése [4]

Földi felmérés (TLS)

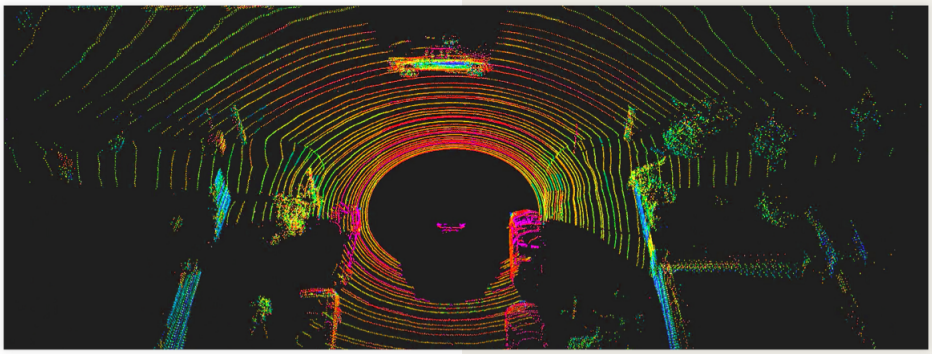
A földi lézerszkenneléssel stabil helyzetben készítenek tárgyakról, épületekről pontfelhőket, de végeznek ilyen módszerrel mezőgazdasági felméréseket is. A módszer hasonlít az ALS rendszerre, azonban ebben az esetben rögzített pozícióban van a mérőeszköz. A módszer előnye, hogy kis hibával végezhetők a mérések, viszont hátránya, hogy eközben nem lehet mozgatni, ezért a feltérképezhető terület mérete is viszonylag kicsi (50-300 m). A 2.2 ábrán egy erdőről készített pontfelhő látható.



2.2. ábra. Földi felmérés erdészeti célokból [5]

Mobil Lézer Szkennelés (MLS)

A lézeres mérőeszköz ebben az esetben egy mozgó eszközre kerül felhelyezésre. Ez a rendszer egy képalkotó, illetve egy navigációs rendszerből áll össze. A képalkotó részhez tartozik a lézer szkenner, illetve néhány fényképezőgép. A navigációs részhez tartozik a GNSS műholdas navigációs rendszer és az INS (Inerciális navigációs rendszer) is. A GNSS például történhet GPS pozicionálással. Az INS rendszer egy számítógépből, mozgásérzékelőből és egy egy elforgás érzékelőből áll. A 2.3 ábrán egy autó fedélzetéről készített mérés látható.



2.3. ábra. Földi lézerszkennelés mozgó járműből [6]

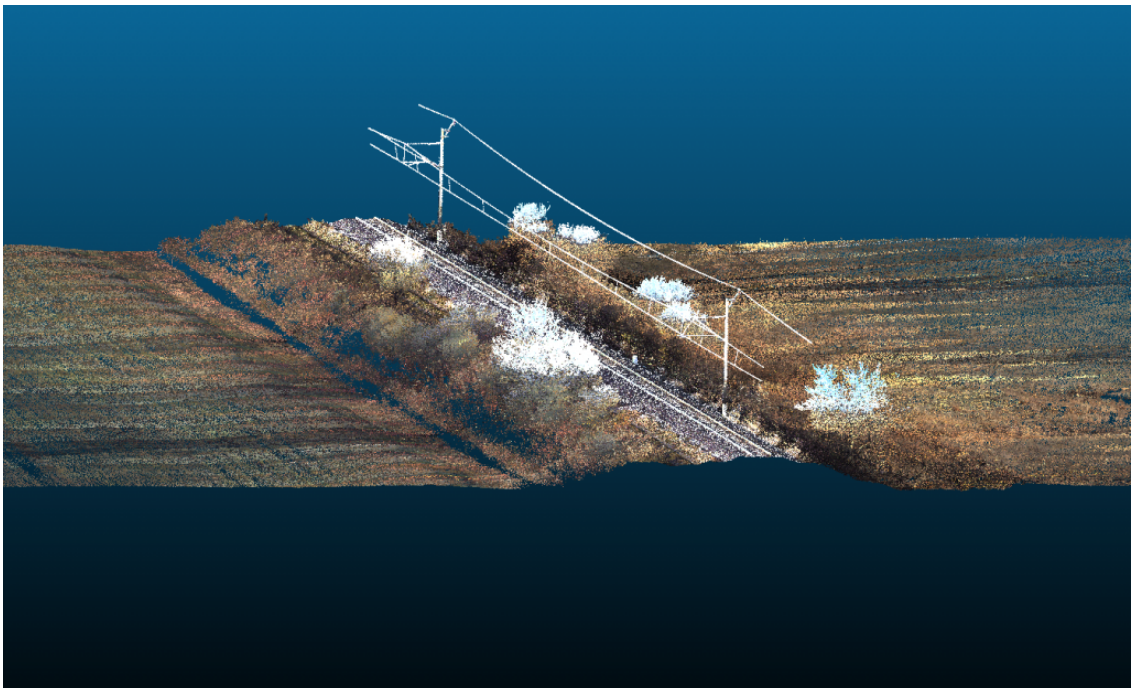
2.1.2. Lézerszkennelés vasúti alkalmazása

A vasúti környezet ellenőrzéséhez felhasználható a lézeres felmérés, kellő pontossága miatt több országban is alkalmazzák már ezt a technológiát. Ezzel meg lehet figyelni a sínpályát, a felsővezetékek szabványosságát, űrszelvénybe benyúló problémás növényzetet. A kötött pályás forgalomban a folyamatos ellenőrzés szükséges. A vasúti ágyazatnál felmerülhet többféle probléma.

- Az ágyazat felgyűrődése a sínek és a talpazat megsüllyedését jelzi.
- Az ágyazat növényzettel való beterítettsége.

Gondok nem csak az ágyazatnál, hanem a felsővezetéknél is előfordulhatnak. Ebben az esetben a felsővezeték vízszintes kígyózásának mértéke, illetve a sínpályától számított magassága ellenőrizhető. A mai napig a pálya állapotát és az űrszelvény vizsgálatát vonalbejáró személyzet végzi. A veszély csökkentése és a feladat automatizálása, rendszeresebbé tétele érdekében, a munkakörük bizonyos részét ki lehet

váltani automatizált módszerekkel, melyek egy pontfelhő alapján különböző algoritmusok segítségével felismerik a vasúti infrastruktúra állapotát. A 2.4 ábrán látható egy vasúti szakasz LiDAR pontfelhője.



2.4. ábra. Vasútvonal környezetének pontfelhője [7]

2.2. Űrszelvény fogalma

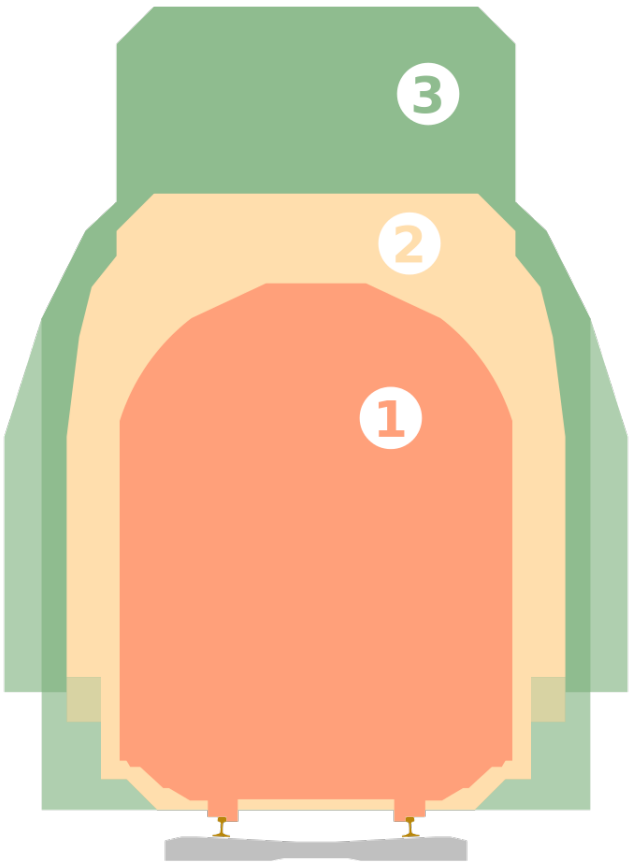
Az űrszelvény [8] a vasúti közlekedés akadálytalan haladása érdekében fenntartott tér. Ebbe a térbe semmilyen objektum sem nyúlhat be. Országokként a meghatározása néhány esetben eltérő, de a nemzetközi forgalom működése érdekében legtöbb országban azonos szabványt használnak.

2.2.1. Az űrszelvény részei

Az űrszelvény meghatározása egyenes pályán a vágánytengelyre vett merőleges segítségével, míg kanyarívben a vágánytér sugárirányú síkmetszetében történik.

A 2.5 ábrán látható űrszelvény részei egymásra vetítve:

- A nemzetközi rakszelvény (1)
- Villamos üzemű vonal űrszelvénye (2)
- Szabadon tartandó tér (3)



2.5. ábra. Űrszelvény vetületi képe [9]

Szabadon tartandó tér

A szabadon tartandó tér olyan vágány-közeli tér, amelyen belül nem helyezkedhet el épület, tartóoszlop vagy állomásokon peron. Ezt a teret biztosítani kell a vonat számára.

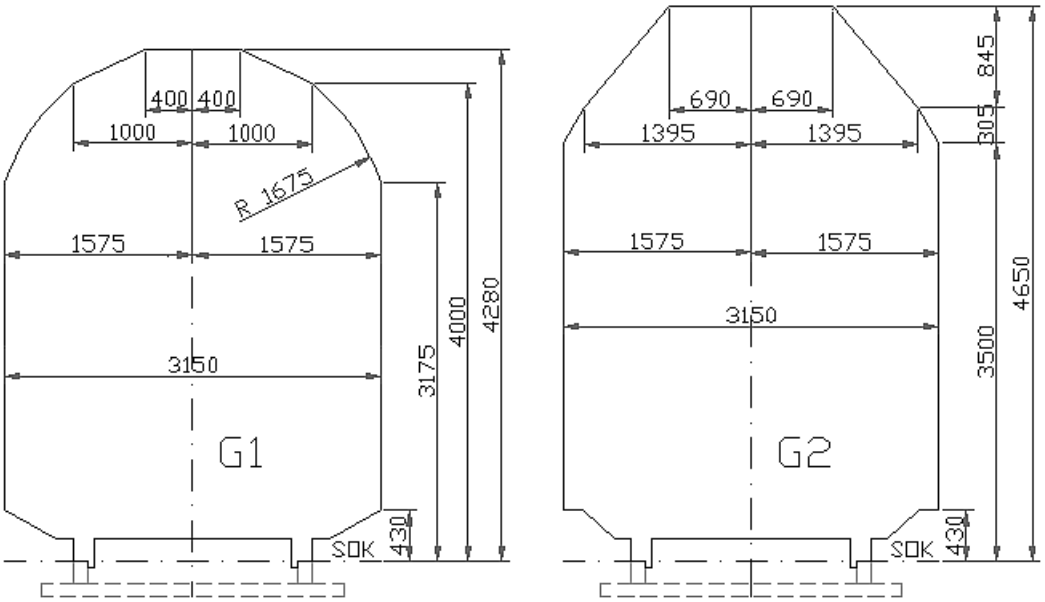
Ívpótlék, bővített űrszelvény

Abban az esetben, ha egy vasúti kocsi ívben helyezkedik el, közepe a kanyar belső íve fele kilóg, illetve a kerekeken túlnyúló rész pedig az ív külső irányában lóg ki. Ennek érdekében a szabadon tartó teret oldalsó irányban megnövelik. Az így kapott szelvényt bővített űrszelvénynek nevezik.

Szerkesztési szelvény

A szerkesztési szelvény az űrszelvénynek az a része, amelyet a vasúti pálya kezelője és fenntartója biztosít annak érdekében, hogy azon szerelvények, amelyek mérete nem haladja meg a szelvény szabványaiba foglaltakat, biztonságosan és sérülésmentesen közlekedhessen.

A szerkesztési szelvénynek sokféle típusa létezik. A belföldi és nemzetközi szelvény eltérő méretű. Az országból kilépő vagy belépő vonatoknak meg kell felelnie a nemzetközi szelvénynek, azonban a belföldi személy- és teherszállításra más szabályok vonatkoznak. A 2.6 ábrán látható a Magyarországon is használatos szerkesztési szelvény méretezése.



2.6. ábra. A nemzetközi *G1* és belföldi *G2* szerkesztési szelvény [10]

Rakminta használata

A rakománnyal megtöltött vasúti kocsikat rakminta segítségével ellenőrzik. Többnyire fémből készült sablon, amely alá a kocsit betolva ellenőrizhető, hogy a rakomány ténylegesen nem nyúlik-e túl a szerkesztési szelvényen. A 2.7 ábrán látható a rakminta, amellyel a belföldi és nemzetközi szerkesztési szelvénynek való megfelelést ellenőrzik.

2.7. ábra. Nemzetközi és belföldi szerkesztési szelvénnyel felszerelt rakminta [11]

3. fejezet

Szakirodalmi áttekintés

Ebben a részben bemutatásra kerülnek a munkám során felhasznált publikációk. Az áttekintés első részében az infrastruktúra szegmentálásának automatikus felismerését célzó kutatások olvashatók. Ezután annak a munkafolyamatnak leírása található, amelybe becsatlakozhatok, és munkám épül. Az áttekintés második felében korábban megvalósított vasúti űrszelvény-felismerő programok leírása és működési elveiknek bemutatása olvasható.

3.1. Vasúti infrastruktúra detektálása

A vasúti struktúrát automatizálás érdekében választjuk szét, hogy könnyebben vizsgálhatók legyenek az egyes elemek. Ezek vonatkozhatnak épületek, állomások karbantartásával kapcsolatos vizsgálatokra, de ugyanúgy meg lehet ilyen módon határozni nyílt pályán történő biztonságos forgalomhoz elengedhetetlen eszközöket is. Többek között ehhez sorolható a vasúti vezeték detektálása vagy akár a sínpálya detektálás is. Az infrastruktúra egyes elemei könnyebben elválaszthatók a környezettől, de vannak bonyolultabb és lassabban kiválasztható részek, ilyen például az ágyazatból kiemelkedő sínpár. Nagy pontosságú pontfelhőre van szükség, hogy ezeket az elemeket külön osztályokba lehessen csoportosítani. Ezt a tulajdonságot használják fel legtöbben kutatásaikban. Legtöbbször a távolság alapú szegmentálást valósítják meg. Ez leginkább az alacsony hibaaránnyal detektált pontfelhők esetén alkalmas. Nem szükséges továbbá tanuló algoritmus, hogy gyors eredményt kapjunk, akár több tízmillió pontból álló pontfelhő esetén is.

3.2. A vasúti felsővezeték és sínpár detektálása nyílt pályán

A nagyvasúti forgalom jelentős szakasza esik külterületekre. Ez azt jelenti, hogy a mért pontfelhőadatok nagy részében növényzet található. Megköti munkájában, hogy csak olyan szakaszokra működik megbízhatóan modelljük, ahol nem esnek a pályához közel nagy lombkoronájú növényzetek, ezáltal egyszerűsített modell alkalmazható a felsővezeték, tartóoszlopok, és mellékkábelek felismerésére. Arastounia publikációjában [12] megmutatja, hogy ezeknek az infrastrukturális elemeknek a felismeréséhez nem szükséges a mérésnek minden egyes adattípusát felhasználni. Munkájában algoritmikus felismerést részesíti előnyben a mintafelismeréssel szemben, kihasználva a nyílt pályára vonatkozó egyszerű – nem városi – környezet tulajdonságait. A pontfelhőben szereplő adatok távolság szerinti összehasonlítását végzi el. Ehhez azonban nem használ fel intenzitásértékeket, illetve szín adatokat. Ezzel valamilyen szinten egyszerűsödik a számítás, azonban nagy hátránya lehet a közeli fák hamis pozitív felismerése, tehát a környezet erősen befolyásolja az algoritmus pontosságát. Ehhez említést tesz, hogy a helyes működéshez szintén szükséges a bemeneti pontfelhő nagy részletessége.

Munkájában a detektálási folyamatot a következő lépésekben végzi el.

- Lokális szomszédság vizsgálata: Euklideszi távolságra vett tartományon belül eső pontok csoportja.
- Pontok csoportosítása: A pontok csoportját a pontok formája, és köztük látható kapcsolat alapján határozta meg.
- Pontok csoportjainak szegmentálása: A csoportosított pontok szétválasztását végezte el ebben a lépésben. Munkájában 3 különböző színnel jelöli.

Algoritmikus megoldást talált továbbá az ágyazat és sínpálya felismerésére. Elsőként a sínpálya alatti ágyazat felismerését végzi el, ezután a szomszédság keresésével a sínpár keresését is elvégzi. Az ágyazattól távolabb eső összefüggő kábeleket ettől külön ismeri fel. Előnye annak vizsgálásakor, hogy az oszlopok és a kábelek levegőben jól elkülöníthető objektumok. Befolyásolja viszont a szegmentálást a közelre nyúló növényzet ebben az esetben.

Munkájának eredménye, hogy a vasúti infrastruktúrát egyszerű nyílt szakaszon 95% pontossággal ismerte fel. Az algoritmus gyors könnyen felismerhető kábelek esetén, viszont az ágyazaton fekvő sínek detektálása annak bonyolultsága miatt lassabb metódus.

Az előforduló hibák nagy részét mintavételezési hiba okozta. Egyes részek takarásban voltak a méréskor, ez okozza a pontatlanságát néhány esetben. Az alacsony mintavételezés az objektum vékonyságától függ. Ha az objektum távol esik a szenzortól akkor is adódhat a hiba.

A módszer egyszerűsége és gyorsasága miatt, illetve eredményeinek nagy pontossága miatt vált népszerűvé.

3.3. Vasúti infrastruktúra detektálása komplex környezetben

Arastounia egy évvel későbbi munkájában városban is jól működő szegmentáló algoritmus kutatásán dolgozott. 2016-ban [13] megjelent Elberlink-kel közös munkájában olyan pályaszakaszokkal foglalkozik, amely már nem csak a nyílt pályák szegmentálására alkalmas, hanem zsúfoltabb, épületekkel, gépjárművekkel, alagutakkal telített vasúti szakaszon is képes elválasztani a pályához tartozó infrastruktúra egyes részeit. Munkájában említést tesz országúttal való kereszteződésekben autók és személyek felismerhetőségére is. Fontos fejlődést hozott kutatásában, hogy kevésbé pontos mintafelhő esetén is képes meghatározni és szegmentálni a különböző elemeket. A kutatásukban az előző éves módszerhez hasonlóan szintén nem használták fel a pontfelhő fájl által tartalmazott összes adatot, nem foglalkoznak intenzitásvizsgálattal és a különböző színekkel sem. Módszerükben térbeli vizsgálatot alkalmaznak a szegmentálásra.

A munkájuk során kétféle megközelítést alkalmaztak, melyek egymás hiányosságait javítják ki. A szegmentálást az alábbi módon végzik.

- Pontfelhőn való osztályozás magasság szerint.
- Sínpár pontjainak felismerése.
- Felsővezeték detektálása.

Az algoritmus lefutása után a módszerüket úgy pontosítják, hogy egy modell segítségével szűrik a tévesen felismert pontokat, illetve hozzáadják a hibásan fel nem ismert pontokat. Ez a többszörös szűrés pontosabb végeredményt ad.

A módszerrel hatékonyabban ismerik fel a sínpálya környezetét. Jól működik komplex környezetben és átlagosan 97%-os pontosságot sikerült elérniük. A felmerülő hibák oszlopok és táblák kitakarásából adódnak. Emellett hibák csatlakozásoknál, és egyéb fedéseknél jelentek meg.

Kutatásukat úgy összegezném, hogy a munkájuk jelentős áttörést eredményezett a vasúti infrastruktúrának szétválasztásában és felismerésében, nagy előrelépés látszódik a pontosságban, illetve megbízhatóságban. Az algoritmus viszont futási idejét tekintve nagy igényű mert rövid pályaszakaszokra is több órán keresztül fut az algoritmus, amely valós környezetben több kilométer hosszú pályaszakaszok esetén megengedhetetlen. Munkájuk egyetlen bizonytalanságaként ezt a szempontot lehet felhozni.

Ezt követő kutatásukban [14] egy gyorsabb algoritmust hoztak létre, amely a pontosság megtartásával képes szegmentálni a vasúti környezetet, akár komplex környezetben is. A korábbi munkájuk megközelítését, azaz távolság alapú megközelítést alkalmaznak ebben a kutatásban is.

A módszerük az alábbi elven működik:

- A módszer először megkeresi a sínpálya ágyazatát, a szakasz egy kisebb részére. Ezután osztályozza magasság szerint a pontfelhőt.
- A sínpálya pontjait tartalmazó osztályból megkeresi a sínek egyik oldali kezdőpontjait.
- Azon az elven, hogy a felsővezeték a sínpálya fölött és a sínpár között helyezkedik el, megkeresi azok kezdőpontjait.
- Az algoritmus párhuzamosan ismeri fel ezután a sínpályát és a felsővezeték teljes egészét.

Ebben a kutatásban nagy lépést jelentett, hogy egy általános modellre épített algoritmus helyett csak a távolság alapján képesek kiszűrni a tévesen felismert, illetve tévesen fel nem ismert pontokat egyaránt. Ez a módszer hatékonyabb futást eredményez, hiszen az algoritmus sokkal gyorsabban képes lefutni, mint egy modell-vezérelt algoritmus. A módszerükkel ebben a kutatásban közel 95%-os eredményt sikerült

elérniük. A hibákat ebben az esetben vasúti kocsik takaró oszlopok és táblák okozták. Komplex környezetben is a futási ideje jelentősen csökkent az előző kutatásban felhasznált algoritmushoz képest.

3.4. Összetett vasúti sín és felsővezeték detektálás

2018-as munkájuk során Cserép Máté, Hudoba Péter és Vincellér Zoltán [15] vasúti nyílt pálya szegmentáló algoritmusokat vizsgáltak. Az algoritmusok lineárisan jól ágyazhatók, egymás utáni szűrők futtathatók, ezzel az adott pontfelhő vasúti pályán kívül eső részeitől könnyen szabadultak meg. Ennek köszönhetően az algoritmus futása hatékony anélkül, hogy adatvesztés következett volna be. A pontfelhőre távolságalapú kábelfelismerést végeztek. Arastounia algoritmusaihoz hasonlóan ebben az esetben sem történt intenzitás vagy színezés alapú szegmentálás. Módszerük hatékonyságát felülnézeti vágásokkal igyekeztek javítani. A kábeldetektálás felülnézeti vágása olyan módon történik, hogy a közel eső kábel – az egymás felett futó felsővezeték felső kábelét – leválasztja a pontfelhőről, majd újbóli felülnézetes felismeréssel, az alatta elhelyezkedő alsó kábel is felismerhető, mivel az már nincs kitakarva.

Cserép Máté és Mayer Friderika [16] munkájuk során különböző módszerek pontosságát vizsgálták a vezetékek keresésénél. RANSAC [17] algoritmus bizonyult nagyságrenddel gyorsabb algoritmusnak a megvizsgáltak közül, viszont közel 24%-os pontatlansággal számított 100 méteres szakaszra. A Hough transzformáció [18] előzőhöz képest lassabban és pontatlanabbul futott. 100 méteren több mint 35% eltérést mutatott a valós pontokhoz képest. A legpontosabb mérést a területi növekedés algoritmusa adta, bár az előző algoritmusokhoz képest futása hosszabb ideig tartott, emellett a többivel szemben hibásan nem talált meg vezetékhez tartozó pontokat, úgynevezett hamis negatív eredményt produkált. Ezek a hibák általában nehezebben javíthatók, adatvesztésnek tekinthetők.

Cserép Máté és Demján Adalbert [19] 2020-as munkájuk során elkészítették a vasúti sínpár felismerését és megjelölését pontfelhőben. Módszerükben a sínpár ágyazaton való felismerését végezték, amely algoritmikusan egyik végtől kezdve a páron haladva lineáris felismeréssel történik. A sínpár felismerése az ágyazat kivágásának köszönhetően bonyolultabb pontfelhők esetén is működőképes, hiszen a megfelelő vágás megtalálásával a komplex környezet egészen az ágyazatig szűkíthető. Módszerük

100 méteres szakaszokon átlagos számítógépen futtatva is 3 percen belül felismerte és kiválasztotta a sínpárhoz tartozó pontokat.

3.5. Korábbi űrszelvény vizsgálati módszerek összehasonlítása fényalapú távérzékeléssel

2019-ben Toyama Takhashi és társai [20] hatékony megoldást kerestek űrszelvény detektálásra. A munkájukban a pályabejáró személyzetet, egy 1990-ben fejlesztett japán vasútbejáró technológiát – 3.1 ábrán látható, úgynevezett tisztaság ellenőrző kocsit [21] – és a fény alapú távérzékelést vetették össze. Két irányt vizsgáltak. A mérési pontosságot, illetve az üzemeltetési költséget.

3.1. ábra. Űrszelvény tisztaságmérő vasúti kocsi [22]

Az elemzésük során a pályabejáró személyzet hátrányai közé sorolták a magas vizsgálati költséget, a tévedés lehetőségét, és a veszélyes pálya közeli vizsgálatot. Ehhez viszonyították az űrszelvény tisztaságát feltérképező speciális vasúti kocsit, amelynek hátránya a megvalósítási költség, viszont előnye a személyzettel szemben, hogy folyamatos ellenőrzésre képes. Az általuk elérni kívánt cél az alacsony üzemeltetési és megvalósítási költség.

A kitűzött célokat a fény alapú távérzékeléssel kívánják elérni. Ehhez az alacsony beruházási költség, továbbá a viszonylag magas pontosság is nagy előnyt jelent. Mérésükben 200 mm hibahatárt engedtek meg, amelyen mérésük során belül maradtak maximális 180 mm eltéréssel messzebb eső elemeknél. Nagy előny a lézeres technológiánál, hogy éjjel is közlekedtethető, és nem kell különös figyelmet fordítani a peronon várakozó utasokra, állomáson való áthaladás során. Problémát okozott mérés közben a mérőkocsi vibrációja, amelyre sikerült megoldást találniuk. Eredményeik munkájuk során, hogy a vibráció kiküszöbölésével pontosabb pontfelhőt kaptak. Megállapították, hogy a LiDAR szenzor és a mérőkocsi hosszanti irányban 45°-ot bezárva adja a legpontosabb mérést. Amellett érvelnek, hogy ezzel a technológiával nagymértékű költségcsökkentést lehet elérni.

3.6. LiDAR méréssel végzett villamos űrszelvény detektálás és munkavezeték kilengés vizsgálata

Michal Strach és Przemyslaw Grabias 2020-as publikációjában [23] városon belüli vasúti űrszelvény feltárásával foglalkozik. Munkájuk során LiDAR pontfelhőben végeztek méréseket villamospályán, többek között a felsővezeték kilengésével kapcsolatban. Munkájuk során pontok távolságadataira hagyatkoztak, nem használtak egyéb információt a pontfelhőfájlból fel. Sík kanyarív oszlopainak vizsgálatát végezték, azok talpazatának távolságát és űrszelvényen kívül esését.

A tartóoszlopokat használták mérésükhöz. Különböző magasságokban vettek fel tachimetriai mérési pontokat, amellyel szenzortól való pontos távolságot, és annak vízszintes szögét határozták meg, majd ezeket hasonlították össze a LiDAR szenzor által mért adatokkal. Megállapították, hogy eltérést okoz például az anyag színezése, ez esetben a sötétzöld festékkel bevont fémoszlop, illetve a beton feketével bevont része más intenzitással veri vissza a fényt. Emellett azt is megfigyelték, hogy az

eltérő irányokból érkező jelek torzíthatnak.

Felhívják a figyelmet arra, hogy a szerelvények mérete meghatározza kanyarívben a pályáról való kilógását. Tehát itt a legfontosabb az űrszelvény megfelelő karbantartása. Az űrszelvény-kiterjesztések lehetővé teszik, hogy a villamosok különösen a kis sugarú kanyarívekben se akadjanak el. Részletezik ennek a számítási módszerét.

Mérésük során nem folytonos űrszelvény vizsgálatot, hanem egyenes szakaszon 5 méteres, kanyar ívben pedig 2 méteres ráhagyásokkal keresztmetszeteken végeztek. Méréseik során átfogó adatokat kaptak a vágánygeometria oldal irányú elmozdulásairól.

A villamos áramforrását a munkavezeték biztosítja, melynek kígyózására azért van szükség, hogy az áramszedő szerkezet ne egy nyomon kopjon, hanem egyenletes kopást biztosítson. Ennek a kilengésnek az átlagos mértéke ívben és egyenesben eltérő, maximális kilengés viszont meg van határozva. A kilengés mértékének vizsgálatát a vágányok által meghatározott középtengely alapján végezték. A kilengést befolyásolja a tartóoszlopok pozicionálása is. Az általuk vizsgált kis sugarú kanyarív miatt ezek az oszlopok 10 méterenként kerültek elhelyezésre. Végül pedig számítást végeztek a munkavezeték sín futófelületétől számított magasságáról mindezt szintén pontfelhőben.

Munkájuk alapján elmondható, hogy átfogó elemzőmunkát végeztek LiDAR pontfelhő segítségével az űrszelvényben történő változásokról és eredményesen képesek voltak néhány milliméteres pontatlansággal meghatározni a felsővezeték kígyózásának mértékét. Gyakori mérésekkel ezzel a módszerrel el lehet végezni az űrszelvényre vonatkozó ellenőrzéseket. Megemlítik továbbá, hogy a vizsgálat automatizálható, ennek hiányában viszont rendkívül időigényes a vizsgálat.

3.7. Űrszelvény vizsgálata nagyvasúti környezetben

Ivo Milev és társai [24] 2012-es publikációjuk során már létező rendszer leírását publikálták. Az űrszelvény detektálás LiDAR eszközzel való megvalósításának lépéseit mutatják be. A pontfelhő készítéséhez RIEGL VMX–250 rendszert használtak. Pontfelhő feldolgozást elsősorban a sínkorona megtalálására fókuszálták. A sínkorona legmagasabb közel vízszintes síkja felismerés után nagy segítséget nyújt a pálya közepének megtalálásához. Ezt automatizált módszerrel találják meg kezdőpontból

kiindulva. Nagy pontossággal ismeri fel a pontfelhőben az általuk bemutatott program.

A felmért pálya űrszelvényének vizsgálatát grafikus megjelenítéssel automatizált program végzi. Az űrszelvényen belül elhelyezkedő pontokat különböző színezéssel jelöli meg, melyeket a sínek alapján, pontosabban a sínpár középtengelyétől számított szerkesztési szelvényből határoz meg.

Munkájuk során megállapították, hogy a LiDAR alapú szelvény mérésének és kiértékelésének automatizálása lehetséges.

Ezt követő évben megjelenő cikkükben [25] részletesen foglalkoznak az űrszelvény vizsgálatával. Munkájuk során újabb rendszerrel VMX–450 lézeres mérőeszközzel dolgoztak.

Előző publikációjukhoz hasonlóan szintén beszámolnak a térbeli sínpár keresőrendszerről, amiből a középtengely számításra kerül. Az űrszelvény tisztaságát vizsgáló eljárás erre az alapra épül. Egy bemeneti fájl által tartalmazott bármilyen szerkesztési szelvény tisztaságát képes a bemutatott program vizsgálni. Támogatja a szabványos kétdimenziós szelvényeket, illetve bármilyen háromdimenziós vasúti kocsimodell szelvénye alapján való vizsgálatot. A kimenetek fajtája többféle lehet.

- Bemeneti pontfelhőn a kiválasztott pontok megjelölése.
- A kiválasztott pontok kiválogatása külön pontfelhőbe.
- A megjelölt pontok színezése az alapján hogy, mennyire mélyen nyúlik be az űrszelvénybe.

Az űrszelvény és a vasúti környezet felismerésének gondolatát beleültették felülnézeti térkép készítésébe. Munkájukban egy vasúti átkelőhely LiDAR alapú pontfelhőjéből készítettek felülnézeti térképet.

Összegzésként a két cikk leírja, hogy kellő pontossággal és megbízhatósággal lehet automatizálni a szerkesztési szelvény vizsgálatát. A futási időre nem adtak pontos adatot, de feltételezhető hogy a sínpár tengelyének kiszámítása után nem igényel sok időt a szelvény vizsgálata, emellett folytonos és nem diszkrét vizsgálatot végeztek, bármilyen – akár komplex – környezetben.

3.8. Mobil mérőeszközzel végzett hatékony űrszelvény felmérés

Jens Kremer és Albrecht Grimm 2012-ben LiDAR alapú térképészeti rendszer megvalósított változatát mutatták be. Megfogalmazták a nagy pontosságú méréshez szükséges komponenseket, melyek a következők:

- Egy vagy több lézer szkenner
- GNSS/IMU rendszer [26]
- A pálya georeferáló szoftvere

A német vasúttársaság által használt rendszer működésénél fontos, hogy a LiDAR felhőn a sínek profiljainak szabvány szerint illeszkednie kell. Ebből kiindulva lehet meghatározni a fontosabb paramétereket, mint például a szelvényt, profilmagasságot, és dőlésszögeket.

Vasúti átkelőhelyek felmérésének fontosságát is bemutatják, ahol a fényalapú távérzékelő rendszer segítségével készítenek szintén alaprajzi térképet, illetve említést tesznek az erdőn át futó vasútvonalakon, mennyire fontos a fák benyúlásának vizsgálata.

Cikkükben összegyűjtötték a LiDAR alapú mobil mérések vasúti és egyéb helyszínen történő gyakorlati alkalmazásait.

4. fejezet

Mintaadatok

Az adatok elemzéséhez a MÁV Magyar Államvasutak Zrt. által készített méréseket használom fel. Az adatgyűjtéshez MMS (Mobil Térképező Rendszer) nagy geometriai pontosságú rendszert használtak.

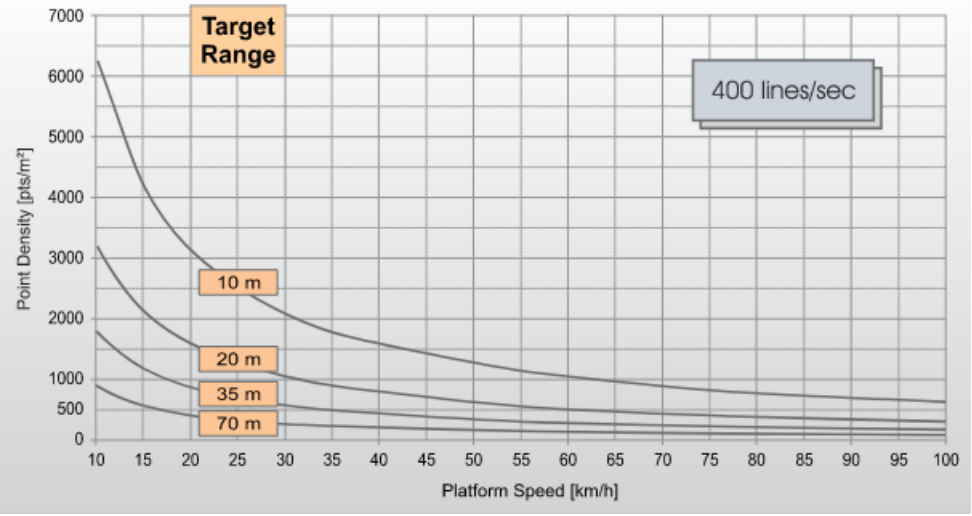
4.1. Méréshez felhasznált rendszer és működése

A felhasznált eszközök két darab forgótükrös lézerszkennerből, digitális kamerákból, GPS vevőrendszerből és vezérlő számítógép egységből áll. A lézerszkennelés másodpercenként 1,1 millió impulzus kibocsátására képes. A méréshez nem volt alkalmazható a vasúti közlekedésre alkalmas mérőkocsi alacsony maximális $25\frac{km}{h}$ sebesség miatt. A mérés eredményességéhez szükséges $60\frac{km}{h}$ sebességet, így a 4.1 ábrán látható mozdony és egy közúton használt autó vasúti kocsira helyezésével értek el.

4.1. ábra. A méréshez összeállított szerelvény

4.1.1. Riegl VMX–450 rendszer

A Riegl cég által fejlesztett mérőeszköz a VMX-450 fény alapú távérzékelő rendszerrel végezték a mérést. Ez a rendszer két forgási síkon végzi a mérést, amely 120°-ban keresztezi egymást. A függőleges síkhoz képest ezek a szenzorok 35°-ban előre döntöttek. A pontfelhőben ez az elhelyezés gyémánt mintázatot eredményez. Sűrűsége függ a tárgyak távolságától és haladási sebességtől. A mérési pontosság sebesség függvényében a 4.2 ábrán látható.



4.2. ábra. A mérési pontosság pontsűrűség-sebesség grafikonja

4.1.2. Mérést kiegészítő rendszerek

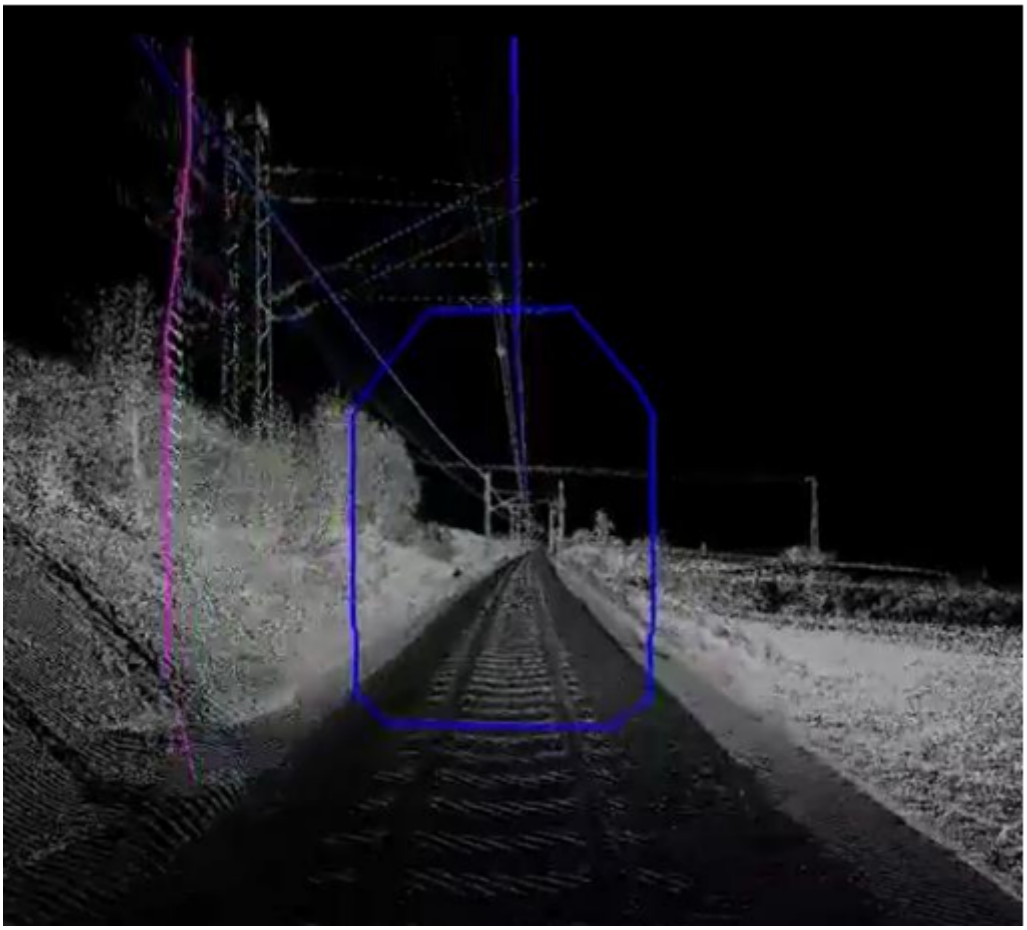
A Riegl rendszer GNSS helymeghatározó rendszerrel szinkronban működik, amely másodpercenként 20 alkalommal frissíti pozícióját. Emellett a rendszert ellátták egy IMU tehetetlenségi navigációs rendszerrel, amely másodpercenként 200 alkalommal végez helymeghatározást. Az adathalmaz átlagos hibája 3mm és maximálisan 7 mm az eltérés. Az IMU rendszer rázkódásból adódó hibák kiküszöbölését teszi lehetővé.

4.2. Kézzel végzett vizsgálatok ágyazaton és űrszelvényen

A zúzottkő ágyazat elöregedésének vizsgálatát lehet végezni távérzékelési módszerrel. Mivel a felpúposodás a sínpár között és két oldalán is vizsgálható. Szemmel látható elváltozásokat keresnek ebben az esetben. A 4.3 ábrán látható a kétoldali felpúposodás.

4.3. ábra. Az ágyazat kétoldali megpúposodása

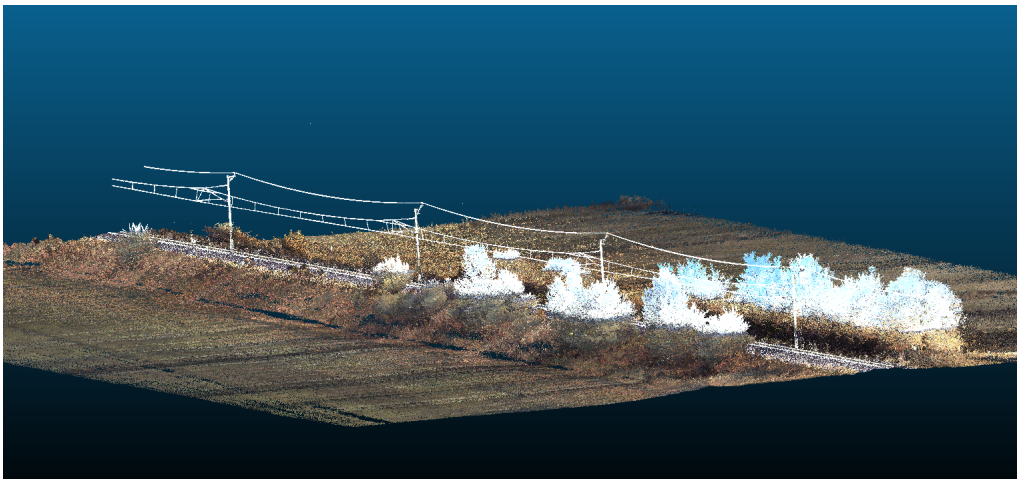
Az űrszelvény vizsgálatát pontfelhőre szerkesztett űrszelvény alapján mérik. A belógó objektumok nagy valószínűséggel felismerhetők, és nem okoz problémát a mérésbe belekerülő hibás pontok kiszűrése sem. A 4.4 ábrán kézzel LiDAR pontfelhőre szerkesztett űrszelvény látható.



4.4. ábra. A LiDAR pontfelhőn manuálisan felvett űrszelvény

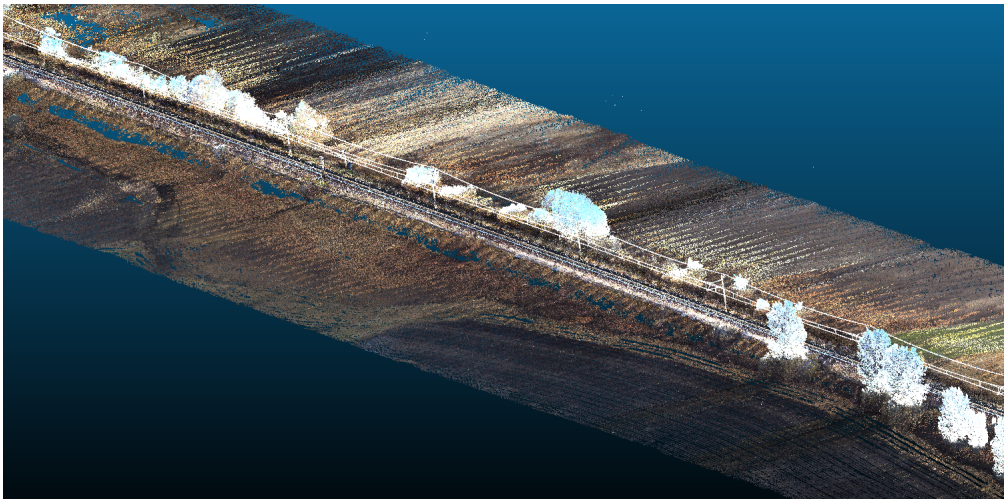
4.3. Méréshez felhasznált pontfelhők

Az első mintaadat 300 méter hosszú vasúti pályaszakaszról készült pontfelhő, amely 22,7 millió pontot tartalmaz. Későbbiekben 1.a számú pontfelhőként hivatkozok rá. Ennek a szakasznak egy 100 méteres és 7,3 millió pontot tartalmazó részhalmazát 1.b hivatkozással a teszteléskor felhasználtam.



4.5. ábra. Az 1.a adathalmaz pontfelhője

A második mintaadat az előzőtől eltérő irányban fekszik, kicsivel több mint 300 méteres szakasz, amely az irány felismerésének tesztelését szolgálja. A 4.6 ábrán látható a 2.a adathalmaz, amely 46,7 millió. Az adathalmaznak az előzőhöz hasonlóan egy 100 méteres közel 16 millió pontot tartalmazó részpontfelhőjére (2.b) is elvégeztem a mérést tesztelés során.

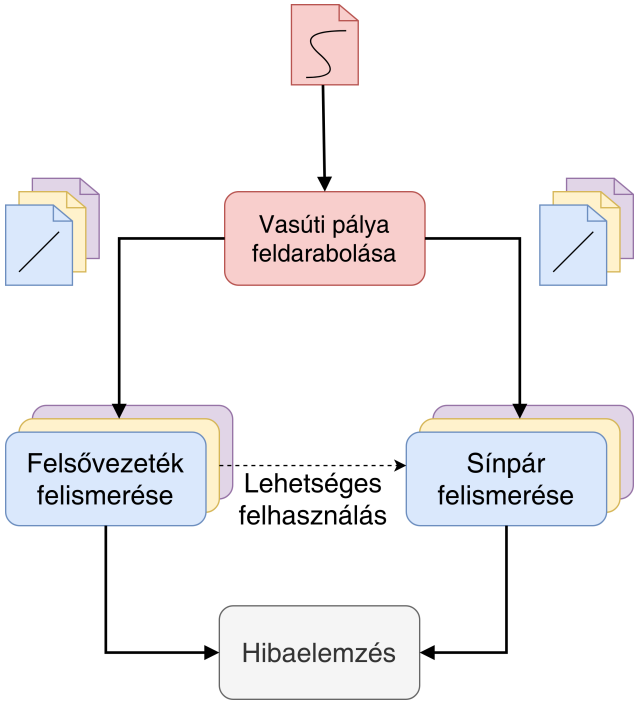


4.6. ábra. A 2.b adathalmaz pontfelhője

5. fejezet

Módszertani áttekintés

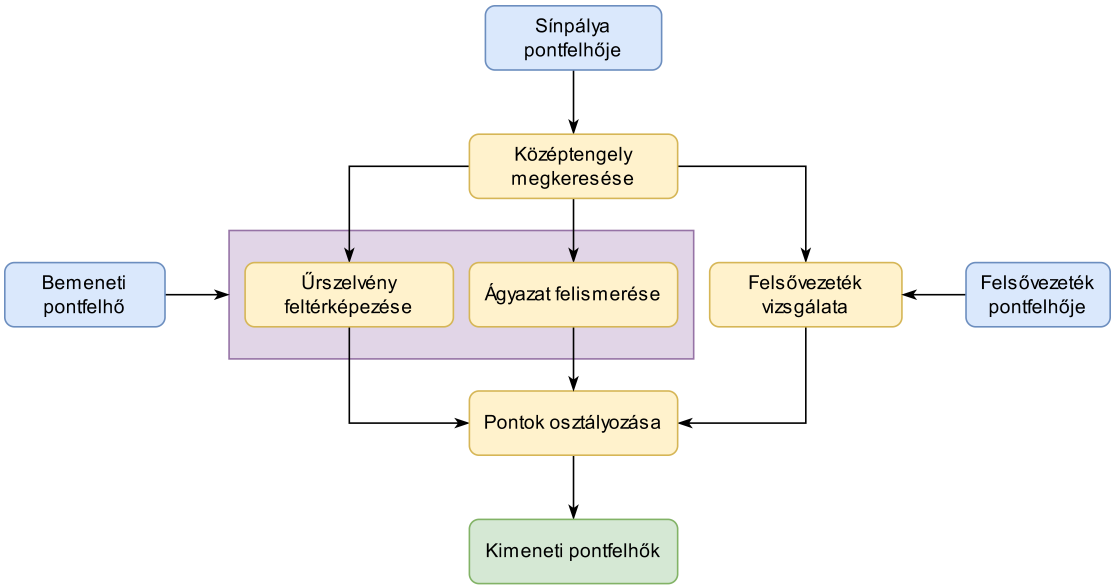
Ebben a fejezetben az általam felhasznált algoritmusok leírásai találhatók, amelyekre a munkámat építettem fel. Ezután következnek a hibakeresés során felhasznált algoritmusok leírásai, illetve ezeknek hatékonyság szerinti vizsgálatuk.



5.1. ábra. Hibakeresés algoritmusának függőségei

Bemeneti előfeltételként a korábban elkészített munkák fogalmazhatók meg. Az 5.1 ábrán látható a kapcsolódási folyamat. A pontos hibakereséshez szükség van a sínpár és a felsővezeték kábeleinek felismerésére. A hibakeresés három esetben hasonló alapra támaszkodik. A hibák detektálásánál tökéletes alapul szolgál a sínpár, hiszen ezeknek elhelyezkedésétől függ az űrszelvény, a kábelmagasság, illetve az

ágyazat mélysége is. Bemenetként az algoritmushoz tehát szükség van a bemeneti pontfelhőből kiszűrt sínpálya és felsővezeték pontjaira is. Az 5.2 ábrán látható a program működési terve.



5.2. ábra. Az algoritmus lépései

1. Algoritmus Hibakereső algoritmus

1. Sínpár középtengelyének megkeresése.
2. a. Az űrszelvény feltérképezése az alappontfelhőn.
2. b. Az ágyazat vizsgálata az alappontfelhőn.
2. c. A felsővezeték vizsgálata a szűrt felsővezeték pontjain.
3. Hibásnak vélt pontok osztályozása, ezután fájlba írása.

5.1. A sínpár középtengelyének megtalálása

A párhuzamos egyenesek irányát nehezen tudja meghatározni a legtöbb illesztő algoritmus. Az algoritmusok a párhuzamos egyenesek esetén nem egy vele párhuzamos illesztést találnak a legmegfelelőbbnek, hanem a két párhuzamos egyenest összekötő átlót. Ebből az átlóból viszont nehéz kiindulni, hiszen teljesen pontatlanná teszi a további méréseket.

Ötlet, hogy a két párhuzamos egyenes szétválasztása után a ponthalmazból alkotott különálló egyenesből kiszámítható a sínpár iránya.

2. Algoritmus Sínpár szétválasztás

1. A szétválasztandó pontfelhőre vágóegyenes illesztése.
2. A vágóegyenes elforgatása koordinátatengely irányába.
3. Sínpár pontjainak szétválogatása.
4. A sínek irányba forgatása.
5. Sínpár középtengelyének megtalálása.

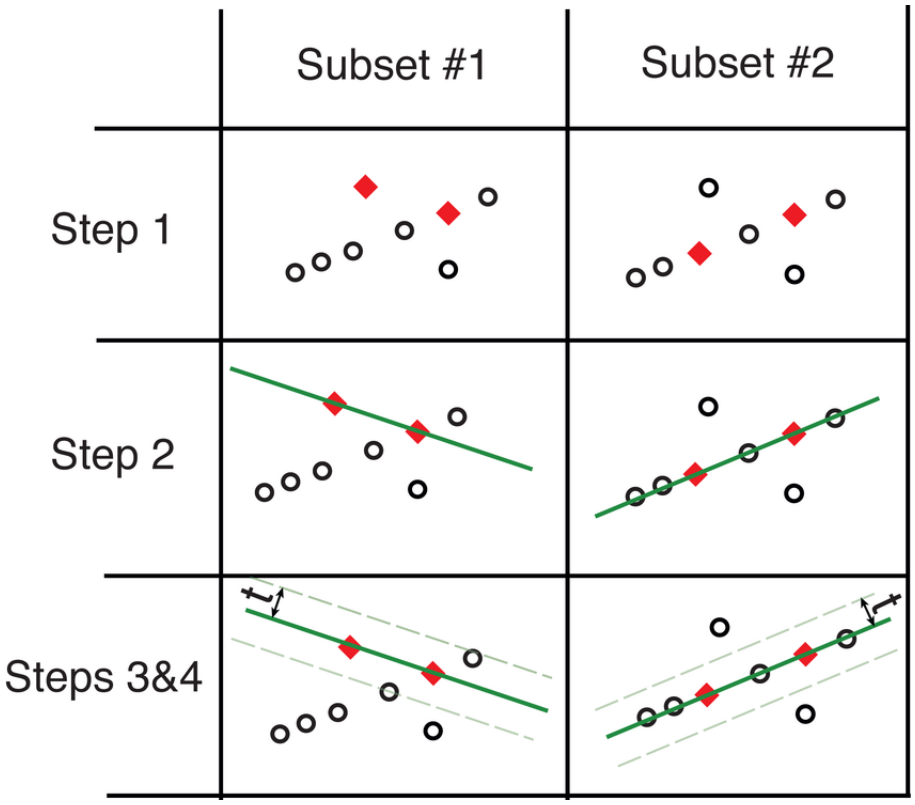
A sínpár irányának meghatározása és egy középpont meghatározása után meg tudjuk pontosan határozni a sínpár képzeletbeli tengelyét. Erre a tengelyre lehet ezután felépíteni az űrszelvény és egyéb vizsgálatok algoritmusait. Ahhoz, hogy az irány meghatározása gyors és nagy eséllyel pontos legyen a RANSAC algoritmus működését vizsgálom meg.

5.1.1. RANSAC (RANdom SAmpling Consensus) algoritmus

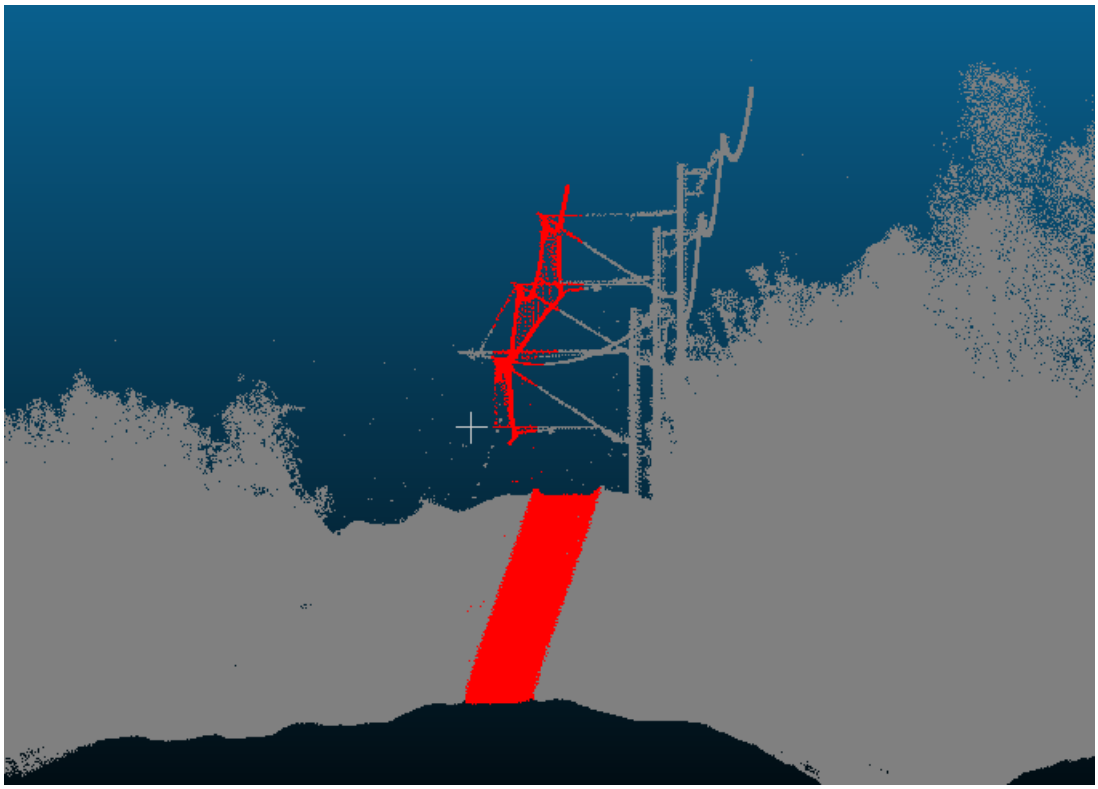
Az 5.3 ábrán látható módon a RANSAC algoritmus pontfelhőkre való matematikai modellek illesztésére készült. Az algoritmus más illesztő algoritmusok működését összevetve a lehető legkevesebb adatot használja fel. Képes a kiugró értékeket figyelmen kívül hagyni. Alapadatokra támaszkodva bővíti az algoritmus az alaphalmazt, és a legjobb eredmény kiválasztására törekszik, egy küszöbparaméter segítségével. Ennek megválasztása a környezettől függ. Van, ahol megengedőbb érték szükséges, de kis szórású pontfelhőkben az alacsony küszöbérték megadása pontosítja az illesztést. Az algoritmust lassítja, ha a pontok halmaza nem egyértelmű, azaz a pontok szórtak. Ez a probléma a sín pontjainak egyenes menti elhelyezkedése miatt jelen esetben nem fordulhat elő. Az 5.4 ábrán látható az algoritmus irány szerinti szélességi kivágása.

3. Algoritmus RANSAC [27]

1. Véletlenszerűen kiválasztja a legkevesebb számú pontot, amely a modell meghatározásához szükséges.
2. Megoldást ad a modell paramétereire.
3. Meghatározza, hogy a ponthalmazból hány pont illeszkedik a modellre előre megadott ϵ hibatűréssel.
4. Abban az esetben, ha az összes pontokhoz képest a modellre illeszkedő pontok száma meghalad egy előre meghatározott τ küszöbértéket, az algoritmus újra megbecsüli a belső pontok segítségével a ponthalmazra illeszkedő modellt és befejezi a számítást.
5. Egyéb esetben az 1-4. lépések ismétlődnek.



5.3. ábra. A RANSAC algoritmus lépései [28]



5.4. ábra. Az algoritmus által megtalált pálya

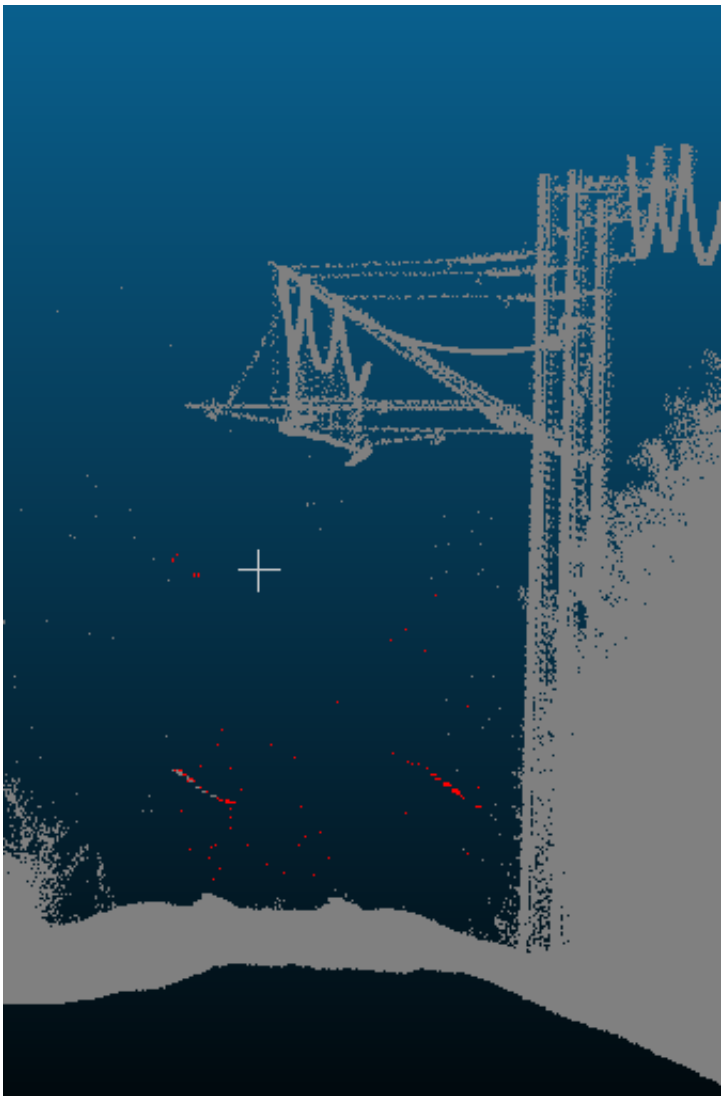
5.2. Hibakereső módszerek

A hibák keresési eljárásai két részre bonthatók. A pálya teljes környezetét tartalmazó pontfelhő az űrszelvény és az ágyazat feltérképezésekor kerül felhasználásra. A felsővezeték vizsgálata pedig a kábelkereső algoritmus futtatása után létrejött pontfelhőn történik. Mindhárom keresési módszer távolság alapú mérést végez a pontfelhőn. A módszerek egyike sem használ intenzitási értékeket vizsgálat során.

5.2.1. Űrszelvénynél felmerülő hibák keresése

Az űrszelvénybe eső pontokat – 5.5 ábra – könnyen meg lehet határozni az egyik tengelyre felvett kétdimenziós űrszelvénypoligon segítségével. A közre eső pontok jól látható módon jelennek meg az eredeti pontfelhőn megjelenítve. Az űrszelvény sokszög alakját vektorok segítségével tudjuk felvenni a térben. A program a nemzetközi és Magyarországi űrszelvényt foglalja alapértelmezetten magába. A két oldalon másfél méter magasságban egy közel folytonos vonal figyelhető meg, amelyről könnyen megállapítható, hogy a mérés során belógó tárgy okozta zaj. További pontok is megfigyelhetők, amelyeken látszik, hogy nagy szórásúak. Ezek a pontok fénytörésekből

adódó pontatlan méréseknek köszönhetők. Szintén olyan zaj, amelyet le kell szűrni a pontos mérés érdekében.

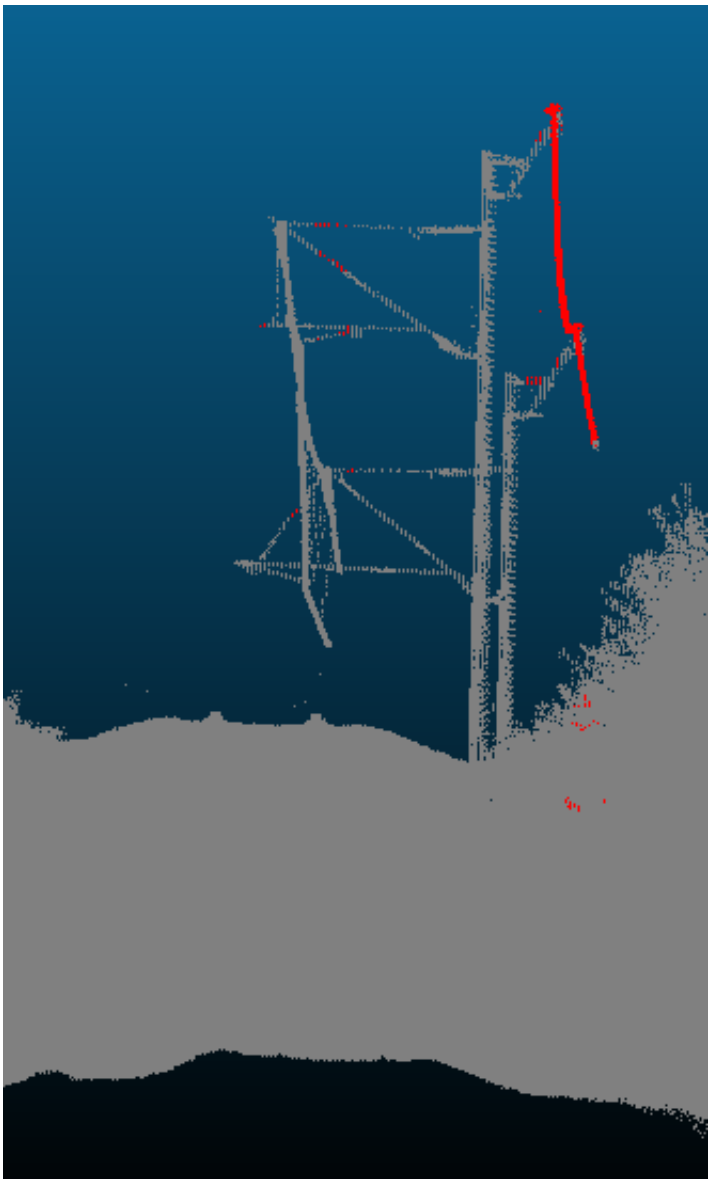


5.5. ábra. Az űrszelvényen belül eső pontok piros színnel jelölve

5.2.2. Felsővezeték hibáinak keresése, és ellenőrzése

A felsővezeték hibáit középtengelytől való kilengését és magasságát egységesen felbontott szakaszokra vizsgálunk, ezáltal hiba esetén a szakasz pontos helyét meg tudjuk állapítani. A felbontott szakaszok szélességi és magassági vizsgálattal ellenőrizhetők. A mérés során a tartórudak egyes elemei tévesen felismert hibának számítanak. Ezen felül a (harmadik vezeték) szintén nem tartozik ebbe a mérésbe, de nem is tévesen felismert pontok halmaza. Az osztályozás során részletesebben is kifejtem ennek leválasztását. Az 5.6 ábrán jól látható, hogy a felsővezeték kilengése nem

nagyobb, mint a maximálisan megengedett, illetve a magassága is a szabványban megfogalmazott keretek között marad.

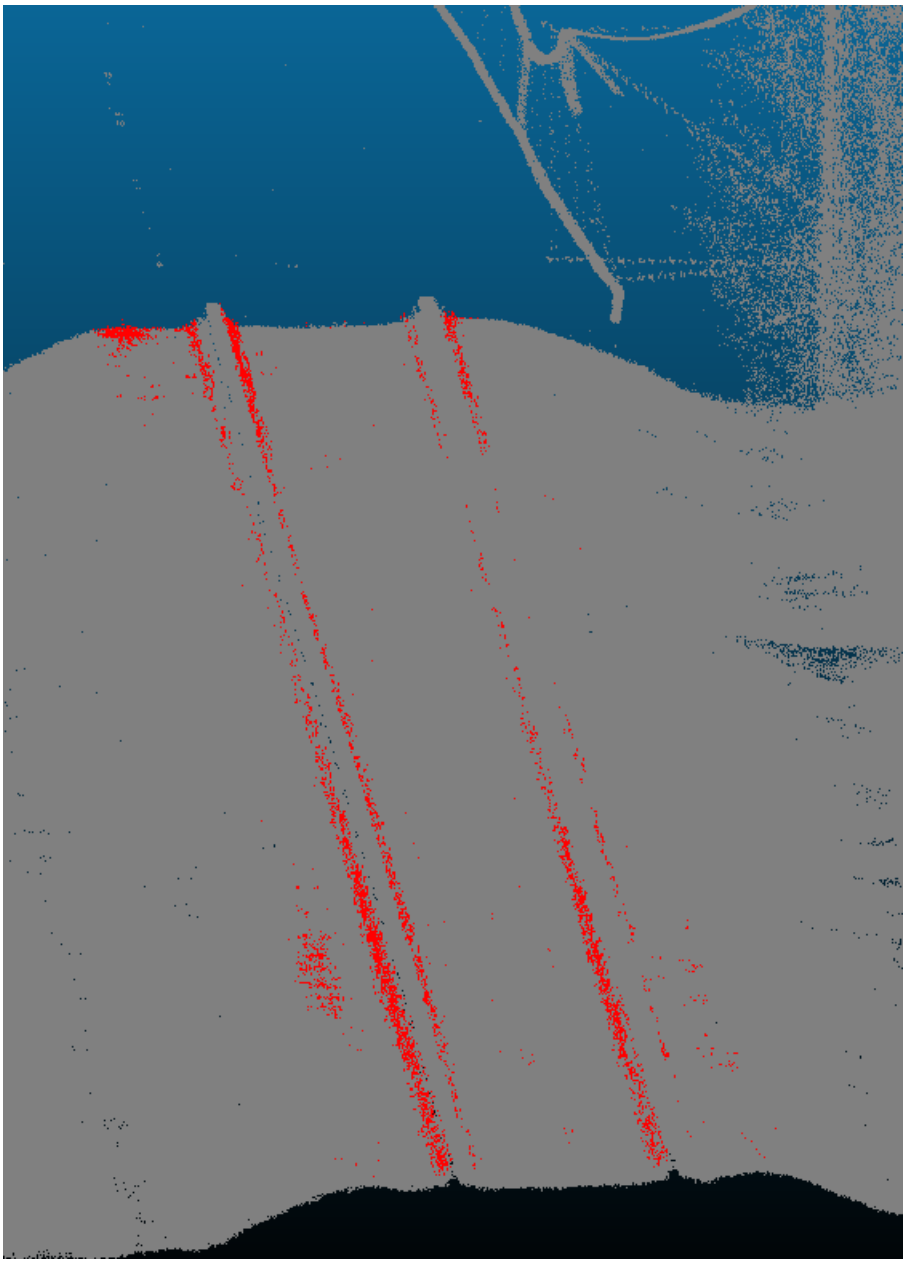


5.6. ábra. A felsővezeték hibahatárán kívül eső pontok piros színnel jelölve

5.2.3. Ágyazati hibák keresése

Az 5.7 ábrán látható, hogy az ágyazat síntalp közeli része magasodott, a rögzítő csavaroknak köszönhetően. A kép baloldalán látható, hogy az ágyazat megemelkedett, amely a talpfák fölé is emelkedik. A mérési módszer kihagyja a sínpár részét, annak két oldalát vizsgálja. Az elkülönítést pálya belső vagy külső részére esik, illetve helyét és nagyságát az osztályozás során állapítja meg az algoritmus. A sínekhez

közeli peremek nem számítanak ágyazati hibának, így a későbbiekben az is leválasztásra kerül az eredményül kapott pontfelhőben.



5.7. ábra. Az ágyazat felmagasodó részei

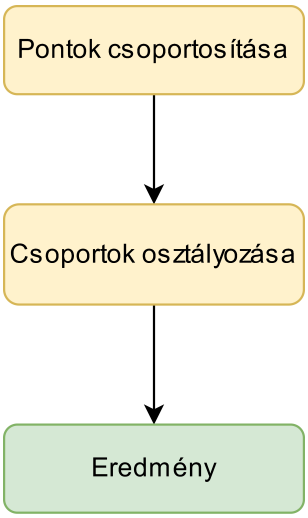
5.2.4. Algoritmusok utófeldolgozása

Az űrszelvénybe eső pontok csoportosítása után a csoportok osztályozása szükséges. A különálló pontok leszűrésre kerülnek, csak az egybefüggő, nagyobb objektumok jelentenek valós veszélyt, ezek okozhatnak problémát a vasúti járművekben.

A csoportok LiDAR szabványos osztályozása szerint kétféleképp történik:

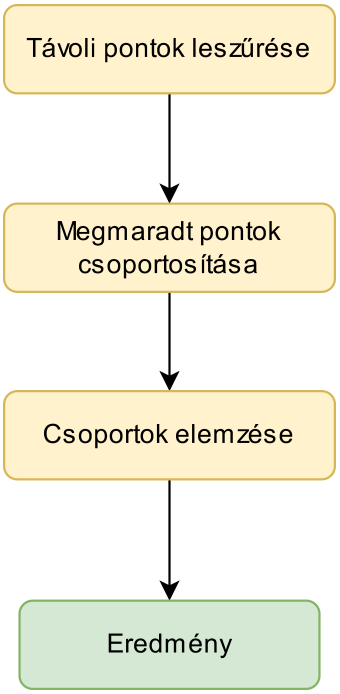
- Zaj: Olyan osztály, amelybe azok a pontok kerülnek amelyek nem valós pontok, csak a mérési bizonytalanság miatt létrejött pontok.
- Alacsony növényzet / közepes növényzet: Ebbe az osztályba kerülnek az űrszelvénybe belógó növények.

Az 5.8 ábrán látható osztályozási módszer után a kimeneti fájl kétféleképp kerül kiírásra. Egyik fájl csak a szűrt pontokat tartalmazó osztályozott pontfelhő. Másik az osztályozott zaj pontok az eredeti pontfelhőtől eltérő színnel megjelölve.



5.8. ábra. Az űrszelvénybe eső pontok osztályozásának módszere

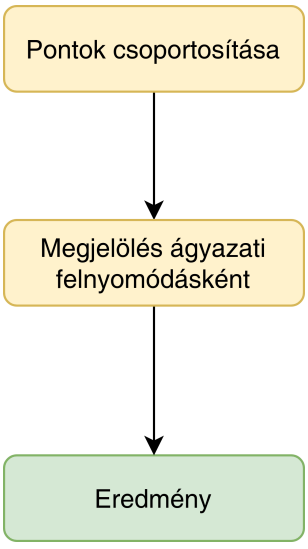
A felsővezeték hibáknál tévesen felismert pontokra először a szignifikánsan távolra eső pontok leszűrését végezzük el. Ezután a megmaradt pontokat csoportokba rendezzük. Ebben az esetben kisebb mértékben kell a zajjal foglalkozni, mivel az előre leszűrt pontfelhő csak a tartóoszlop és vezetékek pontjait tartalmazza. A pontok csoportjait ezután távolság alapon osztályozzuk. Az 5.9 ábrán a módszer folyamata látható.



5.9. ábra. Az felsővezetékhez tartozó pontok osztályozásának módszere

Ágyazatnál előforduló hibák keresése szintén a pontok csoportosításával kezdődik. Leszűrésre kerülnek a síntalpak pontjai. A csoportok ezután osztályozásra kerülnek földi osztályba sorolva.

A sínpár süllyedését jelzi az ágyazat felpúposodó része. Ebben az esetben a síntalpak között, vagy a pálya szélén felnyomódó ágyazat figyelhető meg. A csoportosított pontok a kimeneti fájlokban talajként megjelölt pontok osztályba kerülnek, illetve egy külön fájlba a földrajzi koordinátái is mentésre kerülnek. Az 5.10 ábra szemlélteti a módszer működését.



5.10. ábra. A ágyazat felnyomódásának ellenőrzése

5.2.5. Pontok osztályozása

A pontfelhő zajszűrését távolság alapú vizsgálattal oldom meg. A megoldás célja, hogy az elszórt pontok, amelyek hibásnak véltek, kiderítsük róluk, hogy valóban egy objektum részét képezik, vagy csupán tévesen felvett pontok közé tartoznak.

4. Algoritmus Zajszűrés

1. Minden pontra megszámolja hány pont esik ϵ sugarú környezetébe.
2. Ha nagyobb mint τ küszöbérték, akkor a pontot a valós hibák pontfelhőjébe teszi.
3. Egyéb esetben a zaj okozta pontok pontfelhőjébe kerül.
4. Kimenet: Két szétválogatott pontfelhő

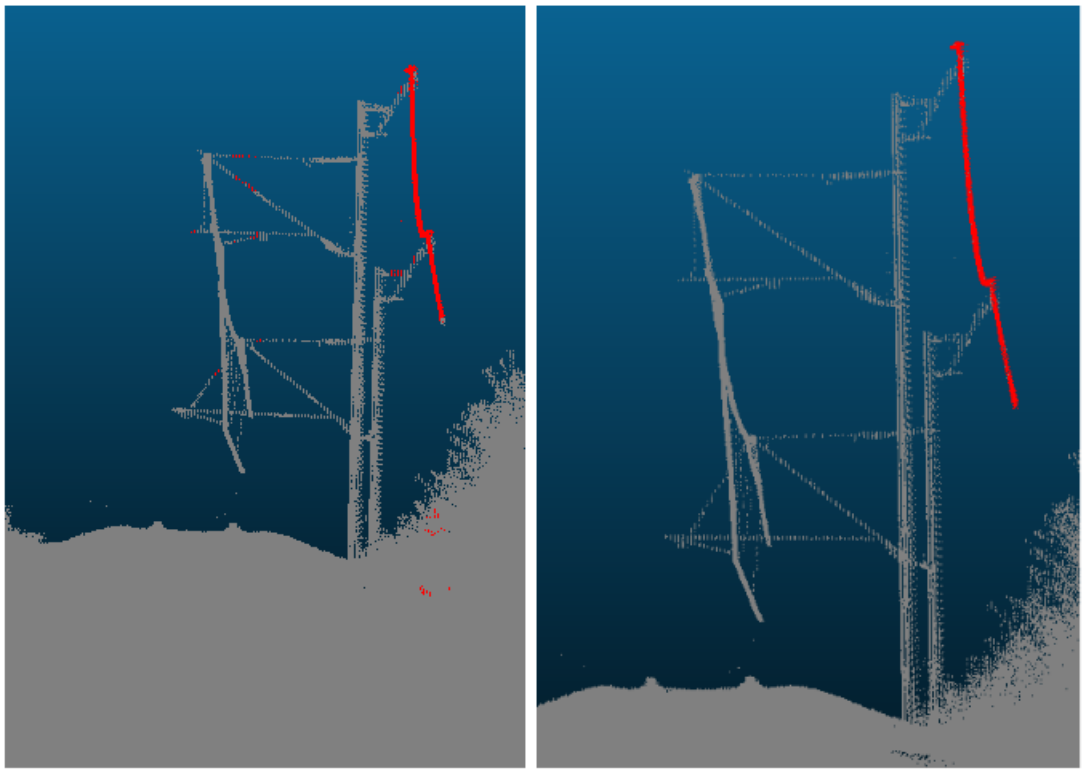
A szűrt pontok halmaza tehát

$$\big\{j \in P : \big|\{i \in P : \delta(i,j) < \epsilon\}\big| > \tau\big\},$$

ahol $P \subset \mathbb{R}^3$ a pontok véges halmaza, $\delta : P \times P \to \mathbb{R}$ az euklideszi térben vett távolságfüggvény, $|.| : A \to \mathbb{N}$ a halmaz számossága, $\tau \in \mathbb{N}$ pedig küszöbérték, amely $\epsilon > 0 \in \mathbb{R}$ sugarú környezetben elhelyezkedő pontok minimálisan megkövetelt számát jelöli.

Az általunk használt jó minőségű, magas pontsűrűségű, illetve kevés hibával rendelkező pontfelhő esetében a legoptimálisabb értékek $\tau = 40$ és $\epsilon = 0,8$ méterben határozhatók meg.

A szűrés 5.11 ábrán látható működése. Baloldalon a szűretlen pontok piros színnel jelölve, jobboldalon pedig a szűrés elvégzése után látható a fehérrel jelölt rész. Jól látszik, hogy a kábeltartó elemeken és az űrszelvényben felmerülő hamis pozitív pontok leszűrhetők ezzel az algoritmussal.



5.11. ábra. A kábeldetektálás zajszűrése

6. fejezet

Implementáció

A program elérhető nyílt forráskódú projektként a `https://github.com/mcserep/railroad` linken.

Az algoritmusok a korábban megvalósított állományhoz kapcsolódva C++ nyelven kerültek implementálásra. A RANSAC algoritmus, illetve a számításokhoz igénybe vett függvények és metódusok mindegyike a PCL könyvtár segítségével valósult meg.

Az algoritmusok a 3.4 alfejezetben említett projektbe [15] kerültek integrálásra. A program alapfunkcióit – pontfelhők kezelése, algoritmusok működésének nyomkövetése – a projektben korábban implementált metódusok biztosítják.

A program különálló futtatható állományként *railroad_benchmark* néven működik. A három hibavizsgálati algoritmust az *algorithm* paraméter segítségével lehet elindítani. A felsővezeték kábel hibáinak detektálására alkalmas algoritmus hívó neve *CableErrorDetection* az űrszelvény detektáló algoritmus *StructureGaugeFilter* névre hallgat, míg az ágyazat vizsgálata a *GroundErrorDetection* paranccsal indítható el.

Az algoritmus kétféleképp képes működni:

- **Előzetes számítások:** Ha nem adunk meg $--seed$ paraméterbe semmit, akkor az algoritmus futás előtt a bemeneti pontfelhőből megkeresi a sínt és a felsővezeték kábelt, amellyel az algoritmus dolgozni tud. Ebben az esetben a művelet időigénye a keresőalgoritmusok időigényével növekedik.

- **Szükséges adatok betöltése:** Abban azt esetben, ha adunk meg $--seed$ paraméterben korábban kiszámított sínpárt, az algoritmus időigénye redukálható.

A kábel hibáinak detektálása esetén, az algoritmusnak *−−merge* paraméterrel egy alappontfelhőt is megadhatunk, hogy a megjelenítés ne csak a kábel felhőjén, hanem a teljes környezet pontfelhőjén vizuálisan megjeleníthető legyen.

Az űrszelvény detektálás paraméterezésének példája:

```
railroad_benchmark -a StructureGaugeDetection -i cloud.laz
--seed railtrack.laz
```

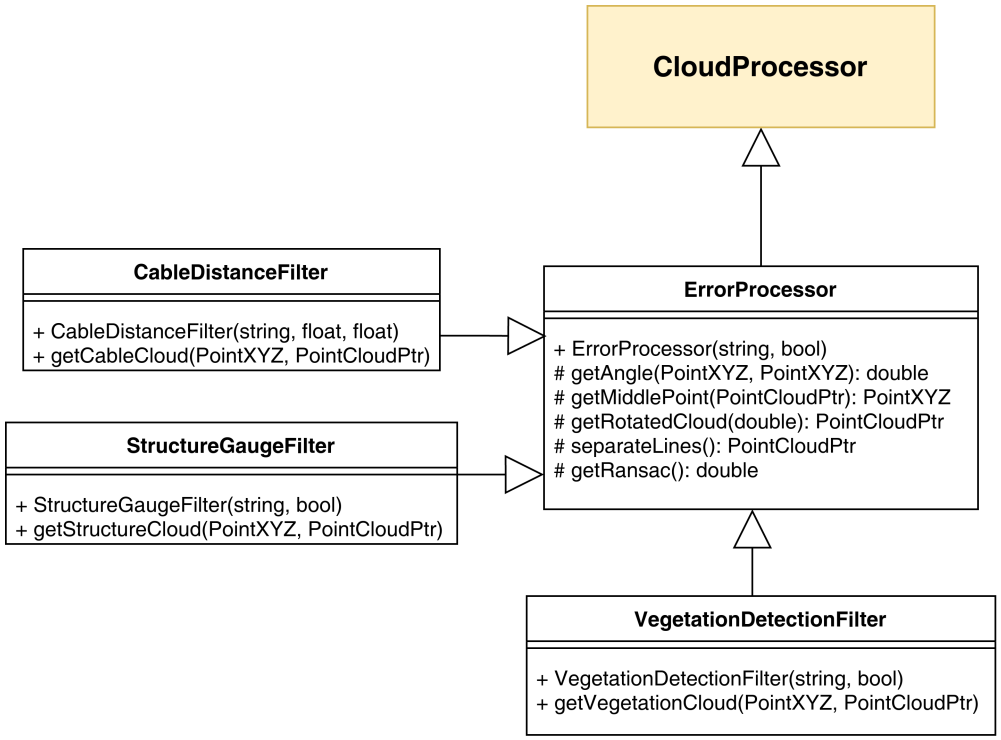
A kábeldetektálás paraméterezésének példája:

```
railroad_benchmark -a CableErrorDetection -i cable.laz
--seed railtrack.laz -m cloud.laz
```

Ágyazatvizsgálat paraméterezésének példája:

```
railroad_benchmark -a GroundErrorDetection -i cloud.laz
--seed railtrack.laz
```

Az alprogramok a korábban implementált *CloudProcessor* osztályból vannak leszármaztatva. A 6.1 ábrán látható az osztályok leszármaztatása.



6.1. ábra. Az osztályok származtatásának osztálydiagramja

7. fejezet

Eredmények

Az algoritmusok mindegyike Lenovo T430 laptopon lett futtatva. A számítógép az alábbi rendszertulajdonságokkal rendelkezik:

- Processzor: Intel Core i5-3320M 2.60GHz
- Memória: 8 GB
- Operációs rendszer: Ubuntu 20.04LTS

Mindhárom algoritmus futási igényének vizsgálata négy adathalmazon történik. Az első kettő adathalmaz egy helyen készült. Első egy 100 méteres kivágása a második 300 méteres szakasznak, illetve a harmadik adathalmaz 100 méteres részhalmaza a negyedik 300 mézeres szakasznak.

Adathalmaz	**Hibakeresés**	**Osztályozás / szűrés**	**Hibák száma**	**Zajpontok száma**
1.a (300m)	3 mp	21 mp	0 darab	40 zajpont
1.b (100m)	1 mp	7 mp	0 darab	16 zajpont
2.a (300m)	5 mp	25 mp	0 darab	536 zajpont
2.b (100m)	2 mp	13 mp	0 darab	326 zajpont

7.1. táblázat. Az űrszelvény hibakeresésének futási ideje

Ahogy az a 7.1 táblázatban is látható, a nagy fájlméret ellenére is gyors futási idejű az algoritmus. A feltérképezett szakaszon nem kaptam hibát, viszont az utolsó oszlopban látható hány darab pont számított kiszűrt pontnak amelyek nem számítanak a mérésbe bele.

Adathalmaz	Hibakeresés	Hibák száma
1.a (300m)	0,2 másodperc	0 darab
1.b (100m)	0,2 másodperc	0 darab
2.a (300m)	0,6 másodperc	0 darab
2.b (100m)	0,4 másodperc	0 darab

7.2. táblázat. Az kábel hibakeresésének futási ideje

A kábel hibakeresésének eredményeinél 7.2 táblázatban látszik, hogy hasonlóan kedvező futási időt kaptunk, illetve az algoritmus nem talált hibát a kábeldetektálás során. Mivel a pontok nagy része már korábbi szűrésen átment, ebben az esetben konkrét zajszűrésre nincs szükség, így a zajként megjelölt pontok száma minden tesztesetben nulla volt.

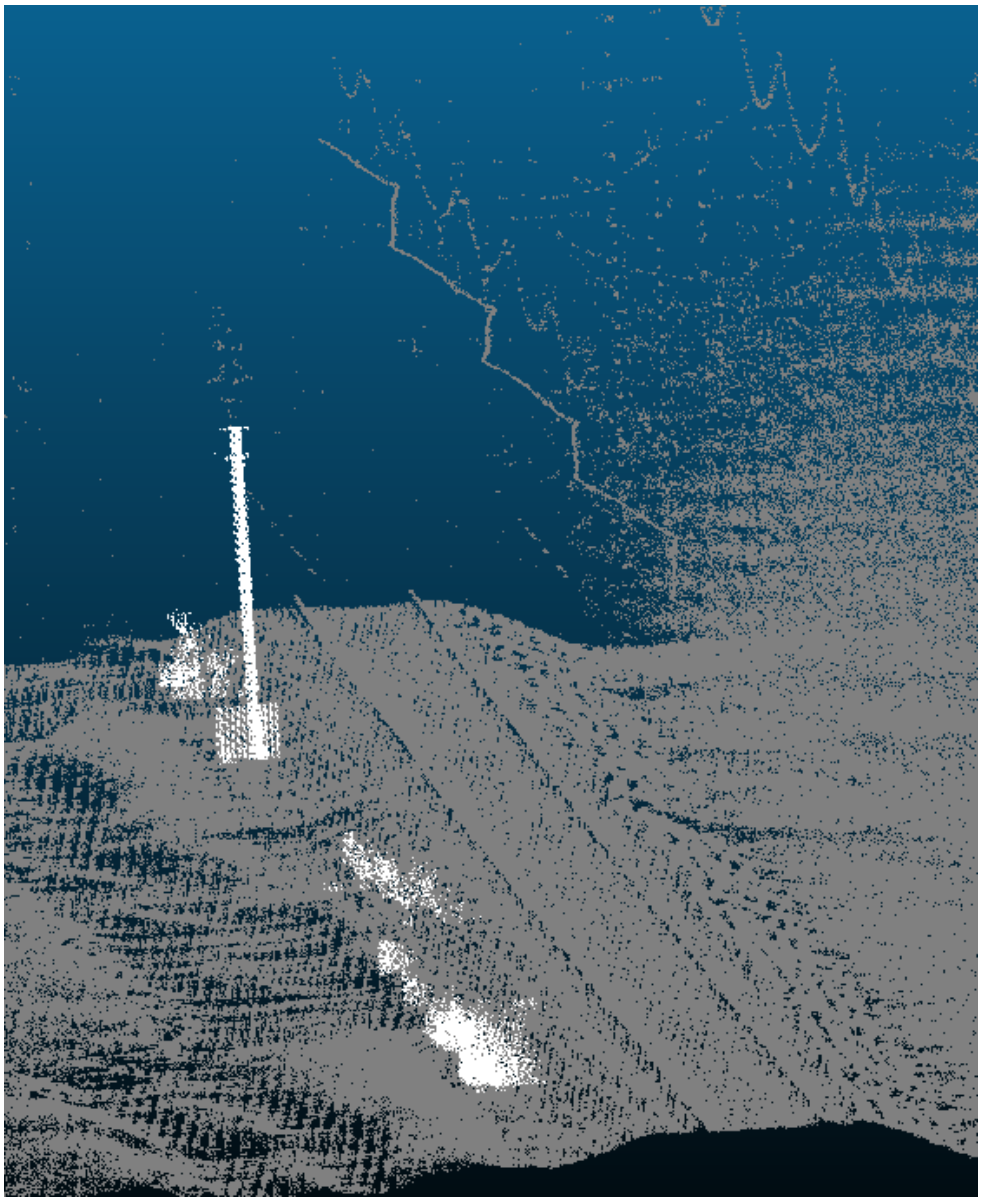
Adathalmaz	Hibakeresés	Osztályozás / szűrés	Hibák száma	Zajpontok száma
1.a (300m)	3 mp	20 mp	0 hiba	110 zajpont
1.b (100m)	1 mp	7 mp	0 hiba	2 zajpont
2.a (300m)	6 mp	25 mp	0 hiba	16 zajpont
2.b (100m)	2 mp	8 mp	0 hiba	2 zajpont

7.3. táblázat. Az ágyazat hibakeresésének futási ideje

A 7.3 ágyazatdetektálás algoritmusa az előző kettőhöz hasonlóan kedvező futási idővel képes detektálni a hibát. A hibakeresés során itt is előfordult zaj, de az adott szakaszokon nem találtam ágyazatpúposodásra utaló jeleket.

7.1. Keresési feltételek szigorítása

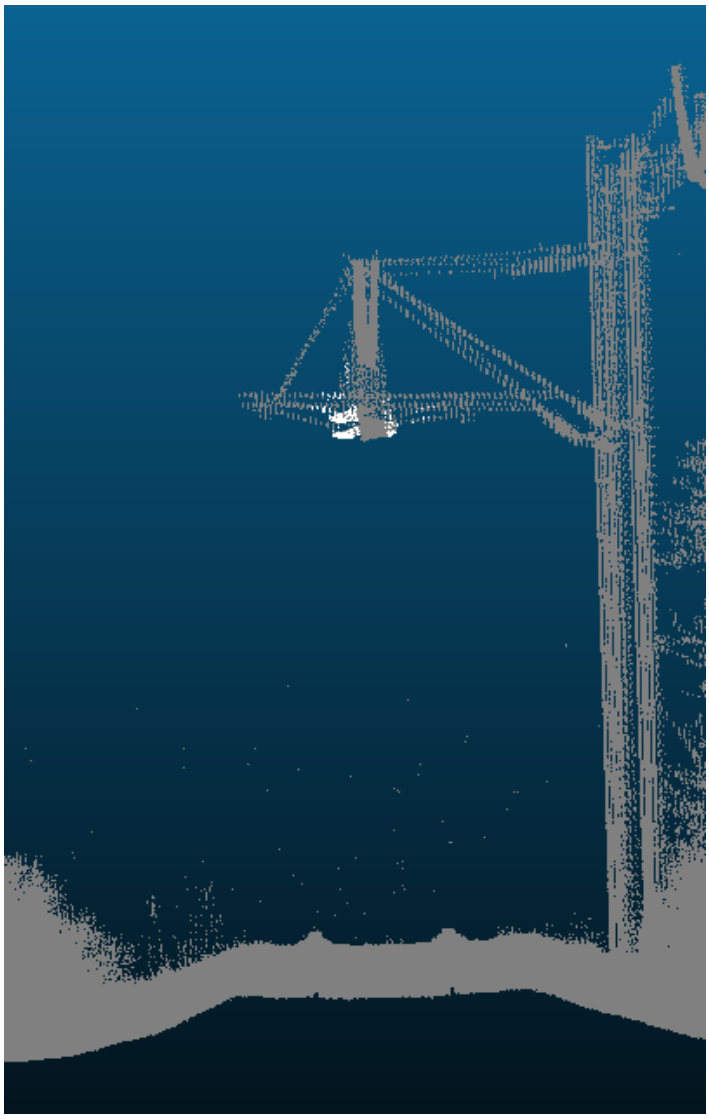
Az algoritmus eredményességét és helyességét nem szabványnak megfelelő, kiterjesztett űrszelvény vizsgálattal érem el. Így a pálya egyik oldalán a határértéket megnövelve belógó tárgyak eredményét kaptam. A 7.1 képen látható hogy a vasúti jelzőlámpa, illetve néhány bokor belenyúlik az űrszelvénybe. Az algoritmus jelezte a néhány hibát és ezek mindegyikét földrajzi hely szerint mentésre került a *StructureGaugeDetection.csv* fájlba.



7.1. ábra. Űrszelvény detektálás által megtalált objektumok

7.1.1. Hibakeresési feltételek szigorítása kábel ellenőrzésénél

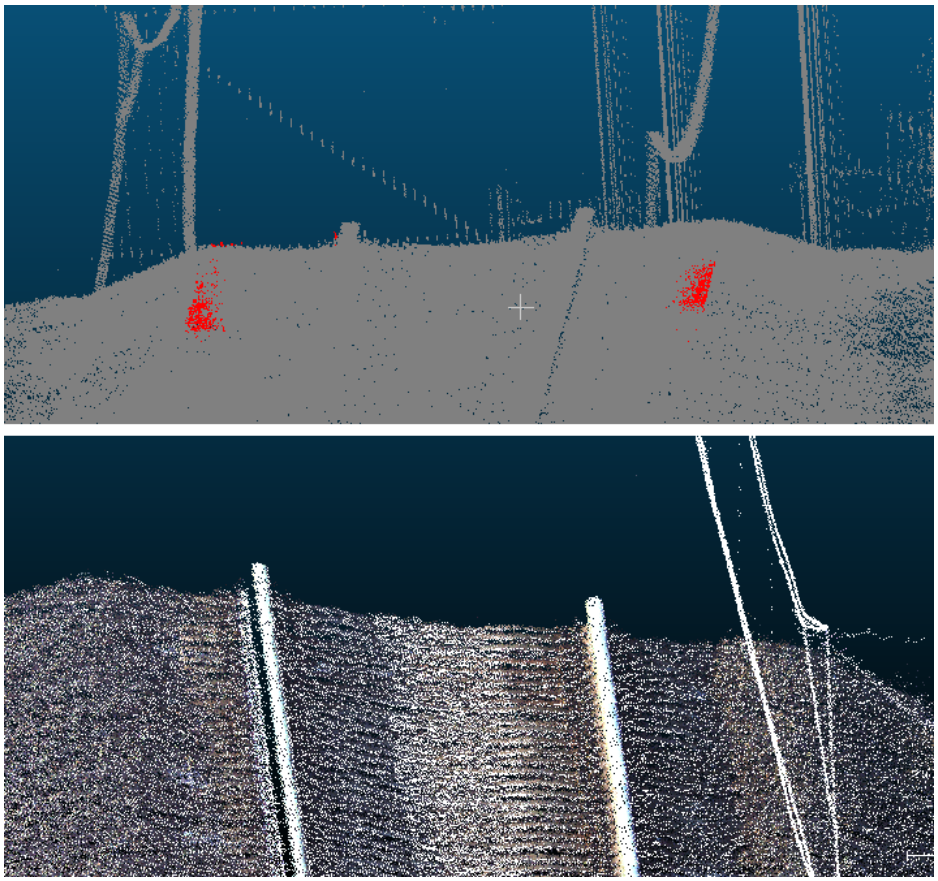
Ahhoz, hogy hibát találjunk a kábel kígyózásánál, a szabványtól eltérően szigorúbb értéket adtam meg. Ebben az esetben a vezeték két szélén kilógó, azaz hibás részeket kapunk. A 7.2 ábrán láthatjuk a hibákat, amelyeknek földrajzi koordinátáit a program kiírta a *CableErrorDetection.csv* fájlba.



7.2. ábra. Kábel hibadetektálás által megtalált részek

7.1.2. Hibakeresési feltételek szigorítása ágyazat ellenőrzésénél

Az ágyazatpúposodást, így szintén szigorúbb értékekkel nem a sín felületétől, hanem annak aljától számítva vizsgálom. A 7.3 ábra felső képén látható a felismert hiba, alul pedig a valós színekkel ellátott pontfelhő, amin látszik, hogy valóban enyhén magasodott az ágyazat azon a részen.



7.3. ábra. Az ágyazat hibadetektálás által megtalált részek

7.2. Eredmények összehasonlítása korábbiakkal

Ahogyan azt olvashattuk korábbi munkákból, a távolság alapú méréssel jól osztályozhatók a vasúti infrastruktúra elemei. Az űrszelvény felismerésének módjáról azonban kevés publikáció elérhető. Így korábbi publikációkban leírt és bevált algoritmusokat valósítottam meg munkám során. Ehhez tartozik a RANSAC algoritmus is. Emellett a pontok hibaszűrésénél Arastounia távolság alapú módszerének ötletéből [12, 13] kiindulva, saját algoritmust írtam. Ez az algoritmus kevés zajt, illetve hibát tartalmazó pontfelhőknél, 300 méteres vasúti szakaszok esetén is percen belüli futási időeredménnyel, hatékonyan működik.

8. fejezet

Összegzés

A munkám során megvizsgáltam a hibakeresés lehetőségeit. Ezzel kapcsolatban többféle korábbi kutatást mutattam be. Hatékony algoritmust találtam a hibák felismerésére, amely a dolgozatom nagyobb részét teszi ki. A hibakeresés három speciális esetének automatizált módszerét valósítottam meg. A kábel vizsgálat, amely magasság és szélesség alapú vizsgálaton alapuló megközelítést alkalmaz. Az ágyazat vizsgálata a sínkoronán felül eső terület és szélességi vizsgálaton alapul és az űrszelvény tisztaságának ellenőrzése is a korábbiakhoz hasonló módon területi keresésen alapszik.

Bemutattam egy módszert, amivel az eredményből a zaj leszűrhető, és az eredményeit külön felhőkbe írva megkapjuk. Emellett egy külön fájl tárolja a hibák földrajzi helyét és a hiba típusát is.

A munkám során bemutatott módszerek lehetőséget adnak a vasúti környezet automatizált vizsgálatára. Hatékonyságának köszönhetően jelentős időt és pénzt megtakarítva biztosít elegendő adatot a hibák feltárásához, hogy azokat későbbiekben jobban meg lehessen figyelni vagy adott esetben javítani lehessen.

8.1. Fejlesztési lehetőségek

Az ágyazat hibafelismerés algoritmusa bővíthető olyan módon, hogy az ágyazaton nem csak magasság szerinti hibavizsgálatot végzünk, hanem az ágyazatot belepő – a kövektől eltérő intenzitással bíró – növényzet vizsgálatát is futtathatjuk. Ekkor az ágyazat növényzettel való betelítettsége is – mint valós hiba – felismerhető lehet algoritmikusan.

A fájlbeolvasásnál problémát okozhat a memóriahasználat, a pontfelhő fájlok méretéből adódóan. A 300 méteres szakaszok mérése számítógépemen gond nélkül futott, de nagyobb szakaszok gondot okozhatnak. Ezenkívül algoritmus megkívánja, hogy a mért szakaszokon ne legyen kanyarív. Tábori Balázs diplomamunkájában [29] a kanyar ívek feldarabolását egyenes szakaszokra végezte el, emellett említést tesz arra, hogy az algoritmus ezen darabok segítségével párhuzamosítható. Ez a hatékony futtatást segíti elő. Ebben az irányban tovább lehet fejleszteni a programot. Ezt az irányt támogatja a munkámban leírt algoritmus is.

Irodalomjegyzék

[1] EuroStat. *Railway passenger transport statistics*. Techn. jel. 2021. okt. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway_passenger_transport_statistics_-_quarterly_and_annual_data.

[2] EuroStat. *Railway freight transport statistics*. Techn. jel. 2021. okt. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Railway_freight_transport_statistics.

[3] Wikipédia. "Lidar". (2022). URL: https://hu.wikipedia.org/wiki/LIDAR.

[4] Aravind Harikumar. *Légi pásztázás szemléltetés*. [Online; 2022. december 14.]. 2020. URL: https://www.researchgate.net/figure/Airborne-laser-scanning_fig5_342376734.

[5] Alföldi Erdőkért Egyesület. *Földi lézerszkennelés az erdészeti gyakorlatban*. [Online; 2022. december 14.]. 2020. URL: https://erdo-mezo.hu/wp-content/uploads/2020/01/erdoszkenner_3.jpg.

[6] Oliver Cameron. *Lidar*. [Online; 2022. december 14.]. 2017. URL: https://news.voyage.auto/an-introduction-to-lidar-the-key-self-driving-car-sensor-a7e405590cff.

[7] Cserép Máté. *Vasúti szegmens MLS LiDAR pontfelhője*. [Online; 2022. december 14.]. 2020. URL: http://gis.inf.elte.hu/projektek/lidar-algoritmusok/vasuti-infrastruktura-szegmentalasa/mav_pointcloud/.

[8] Wikipédia. "Űrszelvény". (2022). URL: https://hu.wikipedia.org/wiki/%C5%B0rszelv%C3%A9ny.

[9] Wikipédia. *Űrszelvénytípusok vetületei*. [Online; 2022. december 14.]. 2009. URL: https://hu.wikipedia.org/wiki/%C5%B0rszelv%C3%A9ny#/media/F%C3%A1jl:Urszelveny.svg.

[10] Regional Bahn. *Nemzetközi és belföldi űrszelvény*. [Online; 2022. december 14.]. 2019. URL: https://1.bp.blogspot.com/-Yy_xjqanasM/XQemA7nzX6I/AAAAAAABcCI/OlwnupW9ARwSfmDuPe4_AucTa0xUzYCyACLcBGAs/s1600/Lademass_EB0.png.

[11] Regional Bahn. *Nemzetközi és belföldi űrszelvény rakmintája*. [Online; 2022. december 14.]. 2019. URL: https://hu.wikipedia.org/wiki/%C5%B0rszelv%C3%A9ny#/media/F%C3%A1jl:Rakminta.jpg.

[12] Mostafa Arastounia. "Automated Recognition of Railroad Infrastructure in Rural Areas from LIDAR Data". *Remote Sensing* 7.11 (2015), 14916–14938. old. ISSN: 2072-4292. DOI: 10.3390/rs71114916. URL: https://www.mdpi.com/2072-4292/7/11/14916.

[13] Mostafa Arastounia és Sander Oude Elberink. "Application of Template Matching for Improving Classification of Urban Railroad Point Clouds". *Sensors* 16.12 (2016). ISSN: 1424-8220. DOI: 10.3390/s16122112. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/16/12/2112.

[14] Mostafa Arastounia. "An Enhanced Algorithm for Concurrent Recognition of Rail Tracks and Power Cables from Terrestrial and Airborne LiDAR Point Clouds". *Infrastructures* 2.2 (2017). ISSN: 2412-3811. DOI: 10.3390/infrastructures2020008. URL: https://www.mdpi.com/2412-3811/2/2/8.

[15] Máté Cserép, Péter Hudoba és Zoltán Vincellér. "Robust Railroad Cable Detection in Rural Areas from MLS Point Clouds". *Free and Open Source Software for Geospatial (FOSS4G) Conference Proceedings*. 18. köt. 1. 2018, 2. old. DOI: https://doi.org/10.7275/z46z-xh51. URL: https://scholarworks.umass.edu/foss4g/vol18/iss1/2.

[16] Máté Cserép és Friderika Mayer. "Powerline tracking and extraction from dense LiDAR point clouds". (2020). URL: https://gis.inf.elte.hu/wordpress/wp-content/uploads/2020/07/mayer_friderika_msc_compressed.pdf.

[17] Wikipédia. "Random sample consensus". (2022). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Random_sample_consensus.

[18] Wikipédia. “Hough transzformáció”. (2022). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Hough_transform.

[19] Máté Cserép és Adalbert Demján. “Object extraction of rail track from VLS LiDAR data”. (2020). URL: https://gis.inf.elte.hu/wordpress/wp-content/uploads/2020/07/demjan_adalbert_msc_compressed.pdf.

[20] Takashi TOYAMA és tsai. “Structure Gauge Measuring Equipment Using Laser Range Scanners and Structure Gauge Management System”. *Quarterly Report of RTRI* 60.1 (2019), 40–45. old. DOI: 10.2219/rtriqr.60.1_40.

[21] “Clearance car”. (2022). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Clearance_car.

[22] Alföldi Erdőkért Egyesület. *Földi lézerszkennelés az erdészeti gyakorlatban.* [Online; 2022. december 14.]. 2020. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Clearance_car#/media/File:Railroad_clearance_car.jpg.

[23] Michal Strach és Przemyslaw Grabias. “Application of laser scanning technology for structure gauge measurement”. *Open Geosciences* 12.1 (2020), 1653–1665. old. DOI: doi:10.1515/geo-2020-0056. URL: https://doi.org/10.1515/geo-2020-0056.

[24] Milev Ivo, Studnicka Nikolaus és Zach Gerald. “Rail infrastructure Measurement System based on Riegl vmx-450 MLS”. *Interexpo Geo-Siberia* (2012), 75–86. old.

[25] Milev Ivo és Studnicka Nikolaus. “New developments in railway data collection with the Mobile Laser scanning system riegl vmx-450 and subsequent post-processing with technet-rail software SiRailScan”. *Interexpo Geo-Siberia* 1 (2013), 42–52. old.

[26] Wikipédia. “GNSS/IMU”. (2022). URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_measurement_unit.

[27] Konstantinos G Derpanis. “Overview of the RANSAC Algorithm”. *Image Rochester NY* 4.1 (2010), 2–3. old.

[28] Benjamín Béjar. *Visual representation of the functioning of RANSAC.* [Online; 2022. december 14.]. 2014. URL: https://www.researchgate.net/figure/Visual-representation-of-the-functioning-of-RANSAC-Subset-1-and-2-represent-two-RANSAC_fig3_274678977.

[29] Tábori Balázs és Cserép Máté. “Vasúti sínpálya LiDAR pontfelhőjének fragmentálása”. (2021).

Ábrák jegyzéke

2.1. Légi pásztázás szemléltetése [4] 5
2.2. Földi felmérés erdészeti célokból [5] 5
2.3. Földi lézerszkennelés mozgó járműből [6] 6
2.4. Vasútvonal környezetének pontfelhője [7] 7
2.5. Űrszelvény vetületi képe [9] 8
2.6. A nemzetközi *G1* és belföldi *G2* szerkesztési szelvény [10] 9
2.7. Nemzetközi és belföldi szerkesztési szelvénnyel felszerelt rakminta [11] 10

3.1. Űrszelvény tisztaságmérő vasúti kocsi [22] 16

4.1. A méréshez összeállított szerelvény 21
4.2. A mérési pontosság pontsűrűség-sebesség grafikonja 22
4.3. Az ágyazat kétoldali megpúposodása 23
4.4. A LiDAR pontfelhőn manuálisan felvett űrszelvény 24
4.5. Az 1.a adathalmaz pontfelhője 25
4.6. A 2.b adathalmaz pontfelhője 25

5.1. Hibakeresés algoritmusának függőségei 26
5.2. Az algoritmus lépései 27
5.3. A RANSAC algoritmus lépései [28] 29
5.4. Az algoritmus által megtalált pálya 30
5.5. Az űrszelvényen belül eső pontok piros színnel jelölve 31
5.6. A felsővezeték hibahatárán kívül eső pontok piros színnel jelölve . . . 32
5.7. Az ágyazat felmagasodó részei 33
5.8. Az űrszelvénybe eső pontok osztályozásának módszere 34
5.9. Az felsővezetékhez tartozó pontok osztályozásának módszere 35
5.10. A ágyazat felnyomódásának ellenőrzése 35
5.11. A kábeldetektálás zajszűrése 37

6.1. Az osztályok származtatásának osztálydiagramja 39

7.1. Űrszelvény detektálás által megtalált objektumok 42
7.2. Kábel hibadetektálás által megtalált részek 43
7.3. Az ágyazat hibadetektálás által megtalált részek 44

Táblázatok jegyzéke

7.1. Az űrszelvény hibakeresésének futási ideje 40
7.2. Az kábel hibakeresésének futási ideje 41
7.3. Az ágyazat hibakeresésének futási ideje 41

Algoritmusjegyzék

1. Hibakereső algoritmus 27
2. Sínpár szétválasztás 28
3. RANSAC [27] 29
4. Zajszűrés 36