Doktori (PhD) értekezés tézisei

IMU szenzorok mechatronikai és járműipari alkalmazásai

Nagy Roland

Pannon Egyetem

Vegyészmérnöki- és Anyagtudományok
Doktori Iskola

Témavezető:
Dr. Szalai István

Mérnöki Kar
Veszprém
2026

1 Kivonat

A közúthálózat minőségének folyamatos romlása és a kialakuló felületi egyenetlenségek jelentős negatív hatást gyakorol a járművekre, azok utasaira, valamint a közlekedésbiztonság egészére. Az útegyenetlenségek által keltett rezgések felgyorsíthatják a járművek mechanikai és elektronikai alkatrészeinek degradációját, továbbá kedvezőtlenül befolyásolhatják az utasok komfortérzetét és egészségi állapotát.Ezekből adódóan az útfelületi hibák korai felismerése és javítása kiemelt társadalmi és gazdasági jelentőséggel bír, ugyanakkor ezen problémák súlya és mindennapi életünkre gyakorolt hatása személyesen is motivált kutatásom során. A kutatásom célja egy újszerű, költséghatékony és jól skálázható módszertan kidolgozása volt az útfelület minőségének automatizált értékelésére, általános személygépjárműre szerelt rezgésérzékelők és fejlett adatfeldolgozási technikák alkalmazásával.

A kutatás során megvizsgáltam a személygépjárművek különböző pontjain mért rezgésadatainak információtartalmát, az automatizált adatcímkézési eljárások alkalmazhatóságát, valamint a hirtelen járműmanőverekből következő hatások befolyását a mérési jelek minőségére.

A mért jeleket egy egyedileg fejlesztett előfeldolgozási és jellemző-kinyerő munkafolyamaton keresztül dolgoztam fel, amely tartalmazza az adatok szinkronizálását, zajszűrését és spektrális elemzését. Ezt követően az előfeldolgozott mérési adatokat gépi tanulási módszerek segítségével értékelem. Az eredmények alapján a több érzékelési helyről származó adatok kombinálása jelentősen növeli az osztályozási modell pontosságát és robusztusságát, megerősítve, hogy a jármű egyes

pontjain különböző információtartalmú jelek nyerhetők ki.

A dolgozatban továbbá bemutatok egy felügyelet nélküli tanuláson alapuló félautomatikus címkézési megközelítést, amely klaszterezési módszerekkel azonosítja az útfelület minősége szempontjából belsőleg homogén szakaszokat anélkül, hogy explicit referenciaadatokra volna szükség. Ez a félautomatikus annotációs eljárás következetes és értelmezhető minőségi kategóriákat eredményez, amelyek alkalmasak felügyelt tanulási modellek tanító-adathalmazának előállítására.

Ezen felül a jármű dinamikus viselkedését is elemeztem annak érdekében, hogy azonosítsam és mérsékeljem az agresszív oldalirányú és hosszirányú manőverek mérési jelekre gyakorolt kedvezőtlen hatásait. Egy detektálási és korrekciós módszert dolgoztam ki ezen zavaró hatások csökkentésére, amely növeli az útfelület-minősítés megbízhatóságát valós közúti körülmények között is.

Összességében a kutatás egy átfogó módszertant mutat be az útfelület állapotának közvetett, rezgésalapú értékelésére, kiemelve a többszenzoros mérés, az automatizált címkézés és a gépi tanulási technikák szerepét.

2 Tézisek

Tézis #1. Vizsgáltam a jármű utasterében és felfüggesztésén elhelyezett szenzorok adatainak hozzáadott információtartalmát a vibrációalapú útfelület-minősítés és osztályozásra, egy saját fejlesztésű, többérzékelős mérőrendszer alkalmazásával.

- Kifejlesztettem és megépítettem egy járművibráció-mérő és adatgyűjtő rendszert. A mérőegység képes három tengely mentén gyorsulás és szögsebesség rögzítésére az utastérben, valamint a hátsó felfüggesztés lengőkarjainak mindkét oldalán a függőleges gyorsulás mérésére. A rendszer a helymeghatározás céljából GPS adatokat is naplóz. A hátsó lengőkarokra 805M1-0020 típusú piezoelektromos gyorsulásmérőket szereltem, míg az utastérben egy MPU6050 MEMS alapú IMU érzékelő került elhelyezésre. A fő vezérlőegység egy Raspberry Pi 4B. A rendszer további elektronikai áramkörei, beleértve a 12 bites MAX186 típusú ADC modult és a jelszintillesztőket, egyedileg tervezett nyomtatott áramköri lapokon kerültek megvalósításra.
- Hosszú távú méréseket végeztem közutakon, elsősorban Zala és Vas vármegyék területén, városi és városok közötti útszakaszokon. Az így létrehozott adatbázis különböző minőségű útfelületeket fed le, az újonnan épített vagy felújított útszakaszoktól a közepes minőségű, illetve súlyosan kátyús, repedezett szakaszokig. A felügyelt tanulási modell tanításához felhasznált útszakaszok teljes hossza 82 km volt. A modell tanítása után további 267 km úthálózati adat szolgált a validálásra. A mérések

két különböző, eltérő felfüggesztési kialakítással rendelkező tesztjárművel történt: egy 1997-es BMW 318is (független, több lengőkaros hátsó felfüggesztés), valamint egy 2019-es Nissan Leaf (csatolt hosszlengőkaros hátsó felfüggesztés, külön rugó- és lengéscsillapító elemekkel). Ez a kettős konfiguráció lehetővé tette az eredmények általánosítását.

- A nyers mérési adatokat egy többlépéses, egyedileg fejlesztett adatelőkészítő algoritmussal dolgoztam fel, amelynek célja a mérési hibák kiszűrése, a jelek normalizálása, valamint a hirtelen manőverek és a járműsebességhatásának korrekciója volt. A mérési útvonalakat PELT algoritmus segítségével homogén szakaszokra osztottam az útfelület minősége alapján, a szakaszok számának vagy hosszának előzetes megadása nélkül. Az egyes szakaszokat a releváns változók mediánja és szórása jellemezte a dimenziócsökkentés érdekében. Az így kapott adathalmazt felügyelt gépi tanulási modellek segítségével dolgoztam fel, hogy vizsgáljam a különböző szenzorelhelyezés hatását az osztályozási pontosságra. A hat tesztelt modell közül a legjobb eredményt a Random Forest osztályozó adta. A hiperparaméter-optimalizálást követően a végső modell a Gini-kritériumot, minimum 2-es osztási mélységet, 1-es levélméretet és 300 döntési fát alkalmaz, mélységkorlátozás nélkül. A modell négy útfelület-minőségi kategóriába sorolja az útszakaszokat. A végső osztályozási pontosság 91.2%, míg a ROC-görbe alatti terület (ROC–AUC) értéke 98.6%.
- Főkomponens-analízis, jellemzőfontossági metrikák és a Random Forest modell SHAP értékeinek elemzése alapján megállapítottam, hogy a felfüggesztésen mért

rezgésadatok hasznos és relatíve nagy mértékű kiegészítő információkat hordoznak az utastérben elhelyezett szenzorok adataihoz képest. A felfüggesztés gyorsulásadatainak bevonása 6.9%-kal növelte az osztályozási pontosságot a kizárólag utastéri gyorsulás- és szögsebességadatokat használó modellekhez képest. Az eredmények megerősítették a több mérési helyet alkalmazó érzékelőelrendezés szükségességét, mivel az eltérő tengelyek és rögzítési pozíciók különböző útfelületi állapotok esetén eltérő, de kulcsfontosságú információkat szolgáltatnak. A legnagyobb befolyású változók az utastérben mért függőleges és oldalirányú gyorsulás, a jármű hossztengelye körüli szögsebesség, valamint a bal hátsó lengőkaron mért függőleges gyorsulás.

Kapcsolódó publikációk: 1, 2, 3, 8

Tézis #2. Bevezettem és értékeltem a felügyelet nélküli gépi tanuláson alapuló (Machine-In-the-Loop vagy MIL) annotációs módszer alkalmazhatóságát a vibrációalapú útfelületminősítésben.

- A mért útszakaszokra vonatkozó referenciaadatok és címkézés hiánya miatt egy félautomatikus címkézési eljárás alkalmazását dolgoztam ki. A javasolt módszer egy nem felügyelt gépi tanulási algoritmuson alapul, amelyben a szegmensekre bontott rezgésadatok klaszterezésére Gaussian Mixture Modellt alkalmaztam. A modell illesztése során a maximális iterációszámot 300-ra, a kovariancia típusát „full”-ra, a toleranciaértéket 10^{-4}-re, az inicializálási módszert pedig „k-means”-re

állítottam.

- Megállapítottam, hogy a fejlesztett MIL alapú klaszterezési algoritmus képes különböző hosszúságú útszakaszokot vibrációadatok alapján konzisztens csoportokba sorolni, térbeli felbontásbeli korlátozások nélkül. A klaszterezés eredményét a manuális felülvizsgálat mellett, továbbá a klaszterek optimális számát statisztikai mutatók alapján vizsgáltam, mint a Bayes-információs kritérium (BIC), Akaike-információs kritérium (AIC), Silhouette score és a Log-Likelihood érték. Az első három mutatót „elbow" módszer alapján vizsgáltam a K klaszterszám 2 és 9 közötti tartományában, amelyet az iparági gyakorlat és korábbi empirikus tapasztalatok alapján választottam.
- A vizsgálat kimutatta, hogy a BIC és AIC értékek a klaszterszám növekedésével csökkennek, de a javulás K = 5–6 felett már stagnált. A Silhouette score mérőszám értéke K = 3–5 tartományban érte el a maximumát, majd meredeken csökkent, jelezve a klaszterértelmezhetőség romlását. Megállapítottam, hogy a klaszterek optimális száma a $3 \leq K \leq 5$ tartományban van. Ez az osztályszám megfelel az iparági gyakorlatnak, mivel még könnyedén értelmezhető kategóriákat és megfelelő megkülönböztetést nyújt lehetővé a döntéstámogatáshoz. A klaszterhozzárendelés megbízhatóságát a kumulatív valószínűségi eloszlás alapján értékeltem, és kimutattam, hogy négy azonosított útfelületi osztály esetén az adatok mintegy 80%-a 90% feletti bizonyossággal sorolható be. A MIL címkézett adatokon tanított felügyelt tanulási modell képes volt visszaadni a vibráció és útfelületi minőség közötti összefüggéseket, és jó osztályozási pontosságot nyújtott. Ennek alapján megállapí-

tottam, hogy a javasolt MIL módszeren alapuló annotációs módszer alkalmas megbízható tanítóadatok előállítására a járműrezgés-alapú útfelület-minősítési modellek számára.

Kapcsolódó publikációk: 4, 9

Tézis #3. Vizsgáltam az oldalirányú és hosszirányú agresszív járműmanőverek negatív hatását a vibrációalapú útfelület-minősítés pontosságára, valamint bevezettem egy detektálási és korrekciós módszert a hirtelen járműmanőverek negatív hatásának mérséklésére.

- Vizsgáltam az agresszív járműmanőverek hatásait, melyek kedvezőtlenül befolyásolhatják a vibrációalapú útfelület-minősítés és osztályozás pontosságát. Egy gépi tanuláson alapuló algoritmust fejlesztettem ki ezen hirtelen manőverek detektálására, négy fő manővertípusra fókuszálva: balra kanyarodás, jobbra kanyarodás, hirtelen fékezés és hirtelen gyorsítás. A modell tanításához egy 31 km hosszúságú, kifejezetten e célra gyűjtött adathalmazt használtam, amely hozzávetőlegesen 70% egyenes és 30% íves útszakaszt tartalmazott. Összesen 340 hosszirányú és 200 oldalirányú manővert címkéztem a két tesztjármű adatai alapján. Az oldalirányú manőverek alulreprezentáltsága miatt a kisebbségi osztályokat a szintetikus minták előállítására szolgáló SMOTE eljárással bővítettem 150%-kal. A címkézési küszöbértékek a gyorsítás esetén 7 m/s^2, fékezés esetén 10 m/s^2, kanyarodásnál pedig 5 m/s^2 volt mindkét irányban. Egy többosztályos SVM osztályozó modellt alkalmaztam a

manővertípusok detektálására, polinomiális kernellel, $\gamma = 300$ és 3-as fokszám mellett. A modell mérőszámok alapján a laterális manőverek esetén nagyobb pontosságot értem el, különösen a jobbra kanyarodás esetén. A hosszirányú manőverek felismerése, mint a fékezés és gyorsítás, kissé magasabb hibát mutattak, különösen a Nissan Leaf esetén, ami a lágyabb felfüggesztés karakterisztikájával magyarázható. Az átlagos osztályozási hiba 7.3% (Nissan Leaf) és 6.7% (BMW 318is) volt, ami 93%-os átlagos pontosságnak felel meg.

- A detektált manőverek alapján elemeztem azok előfordulását és hatását a vibrációalapú útfelület-minősítés pontosságára. Megállapítottam, hogy az agresszív manőverek nemcsak íves, hanem egyenes útszakaszokon is előfordulhatnak, gyakran a külső forgalomból adódóan. Ezen hirtelen gyorsítások, fékezések és kanyarodási szakaszok torzíthatják a mérési adatokat, ezáltal rontva az útfelület-minősítő modell pontosságát.
- A korábban tanított osztályozó modell SHAP-alapú elemzése kimutatta, hogy normál, egyenes szakaszokon történő haladáskor az osztályozást leginkább befolyásoló jellemzők a függőleges gyorsulás és a hosszirányú tengely körüli szögsebesség, amelyek közvetlenül az útfelület állapotához kapcsolódnak. Hirtelen kanyarodások során azonban a domináns jelkomponens a függőleges tengely körüli szögsebesség lett, ami inkább a jármű mozgását, mintsem az útfelületet reprezentálja. Ezen eredmények megerősítették, hogy a manőverdetektálás és az ezt követő korrekció elengedhetetlen a vibrációalapú útfelület-minősítés megbízhatóságának fenntartásához. A hosszirányú manőverek elsősorban a hosszirányú gy-

orsulási jelet torzítják, míg az oldalirányú manőverek a függőleges tengely körüli szögsebesség-adatokat befolyásolják.

- A manőverek jelzavaró hatásának csökkentésére a SHAP elemzési eredményekre alapozva egy korrekciós eljárást dolgoztam ki. Egy szabályalapú döntési fa logikát alkalmaztam a leginkább érintett tengelyek hibájának arányos csillapítására. A laterális manőverek esetén a keresztirányú gyorsulás és a függőleges tengely körüli szögsebesség komponensek, míg a hosszirányú manőverek esetén a hosszirányú gyorsulás és keresztirányú tengely körüli szögsebesség komponensek kerültek korrekcióra. A módosítás a manőver események időbeli közelségével arányosan történt, így biztosítva az egyenletes korrekciót és elkerülve a hirtelen jelszintváltozásokat. Az eljárás eredményeként az útfelület-minősítő modell osztályozási pontossága összességében 2.9%-kal javult.

Kapcsolódó publikációk: 5, 10, 11

3 Tézisekhez kapcsolódó publikációk

Cikkek nemzetközi folyóiratban

1. R. Nagy, I. Szalai, "Design and Construction of a Vibration Data Acquisition System for Road Vehicles" *Hungarian Journal of Industry and Chemistry*, vol. 48(1), pp. 71-75, 2020, doi: 10.33927/hjic-2020-11.

   Scimago Journal Ranking: Q4, Impact factor: 0.5

2. R. Nagy, I. Szalai, "High-Resolution Road Segment Analysis using a Multi-Sensor Road Quality Classification System" *London Journal of Engineering Research*, vol. 23(1), pp. 9-20, 2023, ISSN: 2631-8474.

   Scimago Journal Ranking: -, Impact factor: -

3. R. Nagy, A. Kummer, J. Abonyi, et al., "Machine learning-based soft-sensor development for road quality classification" *Journal of Vibration and Control*, vol. 30(11-12), pp. 2672-2684, 2024, doi: 10.1177/10775463231183307.

   Scimago Journal Ranking: Q1, Impact factor: 2.4

4. R. Nagy, I. Szalai, "Vehicle maneuver recognition and correction algorithm for road quality measurement system optimization" *Measurement: Sensors*, vol. 38, 101816, 2025, doi: 10.1016/j.measen.2025.101816.

   Scimago Journal Ranking: Q2, Impact factor: -

5. R. Nagy, I. Szalai, "Development of an unsupervised learning-based annotation method for road quality as-

sessment" *Transportation Engineering*, vol. 21, 100358, 2025, doi: 10.1016/j.treng.2025.100358.

Scimago Journal Ranking: Q1, Impact factor: -

Cikkek konferencia kiadványban

6. R. Nagy, I. Szalai, "Gépjárművekben alkalmazható vibrációs adatgyűjtő rendszer tervezése és építése" *XXVII. Nemzetközi Gépészeti Találkozó (OGÉT), Nagyvárad*, 27, 2019, ISSN: 2068-1267.

7. R. Nagy, I. Szalai, "Személygépjárművekben alkalmazható több szenzoros útfelület minőségmérő eszköz fejlesztése" *XXX. Nemzetközi Gépészeti Találkozó (OGÉT), Székelyudvarhely*, 30, 2022, ISSN: 2068-1267.

Konferencia kivonatok

8. R. Nagy, I. Szalai, "Development of machine learning assisted suspension vibration data-based road quality classification system" *19th IMEKO TC10 Conference "MACRO meets NANO in Measurement for Diagnostics, Optimization and Control", Delft, The Netherlands*, pp 33-39, 2023, ISBN: 9789299009048.

9. R. Nagy, I. Szalai, "Applying data science methods to road vehicle maneuvre detection" *The People Events: 2nd World Conference on Data Science, Amsterdam, The Netherlands*, 17-19.06.2024.

10. R. Nagy, I. Szalai, "Unsupervised learning-based MIL annotation method for road quality assessment" *The People*

Events: 3nd World Conference on Data Science, Amsterdam, The Netherlands, 16-18.06.2025.

11. R. Nagy, I. Szalai, "Development of an unsupervised learning-based annotation method for road quality assessment." *D3A Danish Digitalization, Data Science and AI 3.0, Nyborg, Denmark*, 26-27.08.2025.

Tézisekhez nem kapcsolódó publikációk

Cikkek nemzetközi folyóiratban

12. R. Nagy, I. Szalai, "Investigation of the sedimentation characterization of magnetorheological fluids" *Journal of Molecular Liquids*, vol. 390, 123047, 2023, doi: 10.1016/j.molliq.2023.123047.

    Scimago Journal Ranking: Q1, Impact factor: 5.2

Konferencia kivonatok

13. R. Nagy, I. Szalai, T. Fülöp, "Pozíció meghatározása inerciális szenzorokkal" *XXIII. Energetika, Elektrotechnika, Számítástechnika és Oktatás Multi-konferencia, Marosvásárhely*, pp. 41-46, 2022, ISSN: 2734-6757.

14. D. Balogh, S. Mester, R. Nagy, et al., "Gépjármű gyalogossal való ütközése a gyalogos tesztbábu szempontjából" *XXIII. Energetika, Elektrotechnika, Számítástechnika és Oktatás Multi-konferencia, Marosvásárhely*, pp 1-6, 2022, ISSN: 2734-6757.