

Tisztelt Abonyi János Professor Úr!

Ezúton szeretném megköszönni, hogy időt és figyelmet szánt a doktori disszertációm alapos átolvasására és értékelésére. Külön köszönöm az igényes, részletes és szakmailag megalapozott opponensi véleményt, amelyben nemcsak a dolgozat erősségeit emelte ki, hanem számos hasznos észrevételt, valamint továbbgondolásra érdemes kérdést is megfogalmazott.

Az alábbiakban válaszolok a bírálatban szereplő kérdésekre és észrevételekre.

1. Kérdés

Mi a modellezés előnye és hátránya a klasszikus single-track és egyéb, értelmezhető paramétereket tartalmazó és így széles körben alkalmazható modellekhez viszonyítva?

A single-track modell napjainkban is széles körben alkalmazott, mivel egyszerűsége révén alacsony számítási igényű és könnyen implementálható. Hátránya ugyanakkor, hogy korlátozott a képessége a komplex járműdinamikai jelenségek, például a billenés (gördülés) modellezésére. Ezzel szemben a double-track modell részletesebb és pontosabb képet ad a jármű viselkedéséről, mivel külön kezeli a bal és jobb oldali kerékreakciókat, ugyanakkor számottevően több paraméterrel rendelkezik, és magasabb számítási kapacitást igényel. Mindkét modell esetén a paraméterek pontos azonosítása csak speciálisan megtervezett tesztmánóverekkel lehetséges, amelyek célja a paraméterek közötti összefüggések minimalizálása. Ezek a manőverek nagyfokú precizitást és ismételhetőséget követelnek meg, ezért végrehajtásukhoz magasan képzett tesztsofőrökre van szükség.

A kifejlesztett neurális hálózat alapú modellek ebből a szempontból jelentős előnyt kínálnak: nem igényelnek járműspecifikus bemeneti paramétereket, így robusztusabban alkalmazhatók különböző járműtípusokon és konfigurációkban. Szemben a hagyományos, fizikai paramétereken alapuló modellekkel, ezek az algoritmusok nem igényelnek speciálisan megtervezett manővereket sem az azonosításhoz, mivel tanításuk során már változatos és reprezentatív vezetési szituációkon lettek felkészítve. Vizsgálataim során bemutattam, hogy a kifejlesztett modellek robusztusan alkalmazhatók jelentős járműparaméter-változások mellett is, beleértve a gumibroncsnyomás módosulását, az utasok számának és elhelyezkedésének eltérését, valamint a karosszéria és futómű módosításait. Ez a tulajdonság különösen alkalmasá teszi őket a járműfejlesztés korai fázisaiban, amikor még csak prototípus jármű áll rendelkezésre, ugyanakkor megbízható járműdinamikai állapotbecslésre már szükség van.

2. Kérdés

Milyen gyakorlati tesztek, milyen gyakorlati fejlesztési folyamat (lenne) szükséges akkor ha az fejlesztett modelleket szeretnénk alkalmazni?

Az AI-alapú modellek beágyazott, biztonságkritikus járműrendszerekben való alkalmazásához szigorú fejlesztési és tesztelési folyamat szükséges, amely összhangban van a V-modell, ASPICE, ISO 26262 és AI-specifikus szabványok (pl. ISO/IEC 24029, SOTIF) elvárásaival.

A fejlesztés során a V-modell biztosítja a követelmények és a tesztelés összekapcsolását, míg az ASPICE megköveteli a követelményalapú, nyomonkövethető és dokumentált fejlesztést, beleértve a tanítási adatkészletek és a modellek validációját is. Az ISO 26262 szerint az AI-modellek csak akkor alkalmazhatók, ha működésük megbízhatóan igazolt, és megfelelnek a biztonsági integritási szinteknek (ASIL). Ennek támogatására elengedhetetlen a megfelelő safety barrier alkalmazása, mint például redundáns szenzorok, hibadetektálás és fallback működési

módok, amelyek biztosítják, hogy az AI-modell hibás működése esetén is fenntartható legyen a rendszer biztonsága.

A gyakorlati tesztek során valós adatgyűjtésre és szcenárió-alapú validációra van szükség különféle vezetési környezetekben (városi, agresszív, terepi, havas, jegyes stb.). A modellek robusztusságát érzékenységvizsgálatokkal kell ellenőrizni (pl. utasok száma, guminyomás, üzemanyag működése, különböző gumitípusok stb.).

A fejlesztés során célszerű alkalmazni a MiL, SiL, HiL, hogy a modellek megfeleljenek a biztonság, megbízhatóság és magyarázhatóság követelményeinek.

Első lépésben célszerű olyan modellt vizsgálni, amely nem közvetlenül vesz részt biztonságkritikus döntésekben. Ez lehetőséget ad a teljes alkalmazási pipeline értékelésére alacsonyabb kockázat mellett, miközben tapasztalatot szerezhetünk a validációs és integrációs folyamatokról.

3. Kérdés

Amennyiben a fejlesztett modellek gyakorlati alkalmazás érdemben felmerül, miként látja az ML-Ops módszertan alkalmazhatóságát?

Az ML-Ops módszertan alkalmazása akkor válik érdemben relevánssá, amikor a kifejlesztett modelleket valódi járműipari környezetben, folyamatos üzemű használatra integráljuk. Az ML-Ops hatékonyan támogathatja a modellek teljes életciklusának - fejlesztés, validáció, telepítés, monitorozás és frissítés - átlátható, reprodukálható és ellenőrizhető menedzselését, ami különösen fontos biztonságkritikus járműdinamikai alkalmazások esetén. Tekintettel arra, hogy az általam létrehozott modellek nem igényelnek járműspecifikus paramétereket, az ML-Ops folyamatok során a modellek integrálása és frissítése technológiailag egyszerűbbé és gyorsabbá válhat. Ugyanakkor az ML-Ops gyakorlati alkalmazása szempontjából kulcsfontosságú lesz a részletes implementációs folyamatok kidolgozása, különös tekintettel az automatizált minőségellenőrzésre, monitorozásra és visszacsatolásra. Ez a keretrendszer nemcsak a beágyazott rendszerek megbízhatóságát növelné tovább, hanem hozzájárulna a hosszú távú fenntarthatósághoz és a modellek szabályozási megfelelőségéhez is.

Zárásként szeretném még egyszer megköszönni Professzor Úr alapos és értékes bírálatát, amely nemcsak hozzájárult a dolgozat szakmai színvonalának emeléséhez, hanem további kutatási irányokra is rávilágított.

Veszprém, 2025. július 8.



.....
Kontos János
PhD hallgató