

Válasz Prof. Molnár Sándor bírálatában megfogalmazott kérdésekre

az *Analysis and Synthesis Methods for the Optimal Design of
Control Systems in Automated Vehicles*

című MTA doktora cím elnyerésére benyújtott értekezés
vonatkozásában.

Mindenek előtt szeretném megköszönni Professzor Molnár Sándor opponens munkáját, az elem tart alapos és szakszerű bírálatát. A bírálatban feltett kérdésekre az alábbiakban szeretnék válaszolni.

Első bírálói kérdés:

A 4. fejezet 4.21-es összefüggésrendszere (supervisor) egy optimalizálási feladatot ír fel a jármű különböző szempontok szerinti optimális sebességének meghatározására nézve. Megítélésem szerint ez a megfogalmazás abból a szempontból egyoldalú, hogy kizárólag a hosszirányú dinamikára fókuszál és nem vesz figyelembe további szempontokat, mint például az utasok kényelmét a megengedhető oldalgyorsulás szempontjából. Habár a supervisor célja elsősorban a biztonsági követelmények betartatása, érdemes lenne az alapvető utaskényelmi tényezőket figyelembe venni. Hogyan lehetséges ezt megtenni a jelenlegi formalizmusban?

Válasz

Egyetértek a kérdéshez kapcsolódóan megfogalmazott állítással, miszerint a supervisor elem - jelen értekezésben - kizárólag a hosszirányú dinamikára fókuszál. Ennek oka, hogy az általam kidolgozott módszertanban a supervisor célja a biztonsági jellemzők kapcsán megfogalmazott követelmények garantálása. Mindazonáltal a (4.21) egyenletrendszerben megfogalmazott optimalizálást lehetséges úgy bővíteni, hogy az alkalmas legyen az utaskényelmi tényezőket is figyelembe venni.

Ennek egyik lehetősége a megfogalmazott formalizmusban, hogy az oldalgyorsulásra nézve egy további korlátozó feltétel kerül megfogalmazásra. Mérésre alapuló vizsgálatok szerint az utasok számára elfogadható gyorsulás mértéke legfeljebb $0.4g$, lásd [1, 2]. A hosszirányú gyorsulásból (a_i) és az oldalirányú gyorsulásból $\frac{v^2}{R}$ származó eredő gyorsulás

korlátja: $a_{tot,i} = \sqrt{a_i^2 + \left(\frac{v^2}{R}\right)^2} \leq 0.4g$, amiből a $v \leq \sqrt{R\sqrt{(0.4g)^2 - a_i^2}}$ hosszirányú sebességre vonatkozó korlátozó feltétel származtatható.

Egy másik lehetőség a gyorsulás korlátozására nézve az ISO 2631 nemzetközi szabvány figyelembe vétele. A szabványban definiált tényező számítása az oldalgyorsulási adatok gyakorisággal súlyozott négyzetes középértékén alapul. Egy erre épülő analízist egy korábbi publikációmban alkalmaztam az utaskényelmi mutatók figyelembe vételére [3].

Második bírálói kérdés:

Az automatizált járművek prioritizálása fontossá válik, amikor a forgalomban megjelenik egy megkülönböztető jelzést használó jármű. Ebben az esetben a sorrendképzés illetve a koordináció szempontjai értelemszerűen megváltoznak – a Jelölt fogalmaival élve – az elsődleges performancia követelmények sora bővül a jármű elengedésének igényével. Az 5. fejezetben bemutatott koordinációs stratégia hogyan képes kezelni ezt a közlekedési szituációt?

Válasz:

Az értekezés 5. fejezetében bemutatott irányítási megoldás képes kezelni azokat a helyzeteket, amikor megkülönböztető jelzést használó jármű halad a forgalomban. Ezen helyzetekben az adott irányból érkező járműveknek elsőbbséget kell biztosítani, amelyre a különböző irányítás megoldások reflektálnak is [4–6].

Az általam kidolgozott megoldásnak alapfeltétele, hogy a járműirányítási rendszernek ismerete van a megkülönböztető jelzést használó járműről. Ez úgy valósulhat meg, hogy a jármű maga ad jelzést a koordinált járműirányítást végző rendszernek és ezzel egyidejűleg megosztja vele saját pozícióját és sebességét, valamint a jövőbeli útvonalát [7]. Egy másik megoldás, hogy a jármű-, illetve közlekedésirányítási rendszernek magának kell felismernie [8] az érkező megkülönböztető jelzést használó járművet.

Az 5. fejezetben bemutatott irányítási megoldás az általam definiált kvázi-kinetikus energián keresztül képes elsőbbséget biztosítani a megkülönböztető jelzést használó járműnek. Az i -edik jármű $E_i(t) = (1 - \eta_i) \frac{1}{2} m_i v_i^2(t)$ kvázi-kinetikus energiájában ugyanis m_i egy virtuális tömeg. Amennyiben ez a virtuális tömeg nagymértékű súlyozó tényezőként kerül felvételre a megkülönböztető jelzést használó járműre vonatkoztatva, abban az esetben az (5.2) összefüggésben adott optimalizálás ennek a járműnek a sebességét fogja a megengedett legnagyobb értéken tartani.

Harmadik bírálói kérdés:

Az értekezés „6. Learning-based control design with guarantees for safety critical interactions” fejezete több automatizált jármű mozgásának koordinációját mutatja be, az alkalmazási példa kifejezetten kereszteződési esetekre nézve mutatja be ennek hatékonyságát. A dolgozatban azonban nem számszerűen megjelölt, hogy az irányítási megoldás futtatása mennyi időt vesz igénybe. Hogyan változik ez a számítási idő abban az esetben, ha a kereszteződésben haladó járművek száma elkezd növekedni?

Válasz:

A bemutatott irányítási eljárás esetében valóban kihívást jelenthet a környező járművek számának növekedése. Ebben az esetben ugyanis a (6.12) optimalizálás korlátozó feltételeinek száma növekszik. Jelen kontextusban ez azt jelenti, hogy a felírt mixed-integer probléma egyre több térrészre esik szét, amelyen az optimalizálási feladatot meg kell oldani. Az általam vázolt megoldásban ennek a növekedésnek azzal lehet elejét venni, hogy az n_s paraméter értékét alacsonyan kell tartani a (6.12)-es optimalizálási feladatban. Az n_s ugyanis azt reprezentálja, hogy az adott automatizált jármű a környezetében hány további jármű mozgását veszi figyelembe.

n_s	1	2	3	4	5	6	7	8
T_{comp} (s) for ind.	0.012	0.022	0.044	0.057	0.080	0.106	0.226	0.426
n_s	9	10	11	12	13	14	15	
T_{comp} (s) for ind.	0.866	1.904	3.097	6.610	16.292	34.886	66.817	

1. táblázat. A supervisor mögött lévő algoritmus számítási idejének elemzése

A számítási idő (T_{comp}) kiértékelését az 1. táblázat mutatja be különböző n_s értékek esetében. Jelen számításokat MATLAB 2020a programmal végeztem Intel Core i7 10th processzorral rendelkező számítógépen futtatva az algoritmusomat [9]. Az általam vázolt eredmények megerősítik az előzetes elképzelést, miszerint a figyelembe vett járművek számának növekedésével jelentősen növekszik a (6.12) optimalizálási feladat megoldási ideje. Figyelembe véve, hogy egy hosszirányú járműirányítási rendszerbe a szükséges beavatkozást hozzávetőlegesen 0.05s időközönként szükséges számítani az $n_s = 3$ értéknél nem javaslok magasabbat választani, azaz a jármű kereszteződésben való mozgását minden időpillanatban a legközelebbi három (vele konfliktushelyzetben lévő) jármű mozgása alapján szükséges meghatározni.

Negyedik bírálói kérdés:

A 8. fejezet egy értékes eredményt mutat be, amelyben az SoS módszer segítségével stabilitási határok kerülnek meghatározásra. A megoldás Lyapunov-függvények felírásán keresztül valósul meg, amely a dolgozatban paraméterfüggő (lásd pl. 8.20 összefüggést). A dolgozatban közölt eredmények vonatkozásában a Lyapunov-függvény milyen formában került meghatározásra, azaz hogyan függ az egyes paramétereiktől?

Válasz:

A forgalomáramlás stabilitásának vizsgálatához a $V(\rho(k), x(k))$ Lyapunov függvényt paraméterfüggő formában választottam meg, ahol a $\rho(k)$ paraméter két tényezőt foglal magában: az $R_{1,i}(k)$ tervezési súlyt, illetve a $\kappa(k)$ automatizált járműveknek a forgalom egészében való arányát. A $b(R_{1,i}(k), \kappa(k))$ bázisfüggvényt a konkrét feladathoz illően választottam meg előzetes szimulációs vizsgálatok alapján, illetve a (8.21)-(8.22) optimalizálási feladat megoldásának kiértékelését követően módosítottam. A 8.1-es ábra egy példát mutat a kiszámított u_{max} függvényre. A bázisfüggvény megválasztásának értékeléséhez azt vettem figyelembe, hogy a $V(\rho(k), x(k))=1$ szintvonal minél jobban illeszkedjen az instabil állapotterrérszek határaihoz.

Végezetül, köszönöm még egyszer Professzor Molnár Sándor opponens munkáját és bírálatában megfogalmazott támogatását!

Budapest, 2023.12.15.



Németh Balázs

Hivatkozások

- [1] M. Abduljabbar, N. Meskin, and C. G. Cassandras, „Control barrier function-based lateral control of autonomous vehicle for roundabout crossing,” in *2021 IEEE International Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2021, pp. 859–864.
- [2] I. Bae, J. Moon, and J. Seo, „Toward a comfortable driving experience for a self-driving shuttle bus,” *Electronics*, vol. 8, no. 9, 2019.

- [3] B. Németh, „Coordination of lateral vehicle control systems using learning-based strategies,” *Energies*, vol. 14, no. 5, 2021.
- [4] D. Dang, J. Tanwar, and S. Masood, „A smart traffic solution for high priority vehicles,” in *2015 1st International Conference on Next Generation Computing Technologies (NGCT)*, Sept 2015, pp. 466–470.
- [5] S. Smith, M. Pavone, F. Bullo, and E. Frazzoli, „Dynamic vehicle routing with priority classes of stochastic demands,” *SIAM Journal on Control and Optimization*, vol. 48, no. 5, pp. 3224–3245, 2010.
- [6] K. Nellore and G. Hancke, „Traffic management for emergency vehicle priority based on visual sensing,” *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 16, no. 11, 2016.
- [7] G. Karmakar, A. Chowdhury, J. Kamruzzaman, and I. Gondal, „A smart priority-based traffic control system for emergency vehicles,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 14, pp. 15 849–15 858, 2021.
- [8] R. Carvalho Barbosa, M. Shoaib Ayub, R. Lopes Rosa, D. Zegarra Rodríguez, and L. Wuttisittikulij, „Lightweight pvidnet: A priority vehicles detection network model based on deep learning for intelligent traffic lights,” *Sensors*, vol. 20, no. 21, 2020.
- [9] B. Németh and P. Gáspár, „Hierarchical motion control strategies for handling interactions of automated vehicles,” *Control Engineering Practice*, vol. 136, p. 105523, 2023.

