

Tolatás szabályozása összetett járműszerelvény esetében

Control of Reversing a Truck-Full Trailer Combination

MIHÁLYI Levente¹, Dr. TAKÁCS Dénes²

¹doktorandusz, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Műszaki Mechanikai Tanszék, Cím: H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. Telefon: +36 1 463 1369,
e-mail cím: mihalyi@mm.bme.hu

²egyetemi docens, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar,
Műszaki Mechanikai Tanszék, Cím: H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. Telefon: +36 1 463-1227,
e-mail cím: takacs@mm.bme.hu

Abstract

In this paper, reversing a truck-full trailer along a straight-line is investigated. The main purpose is to design a linear feedback controller to stabilize the motion. The system is analyzed using the kinematic model, in which the dynamics of the steering mechanism is considered. In the analysis, we also emphasize the effect of the time delay that occurs in the control loop. In order to validate the results, experimental tests are carried out using a small-scale gauging apparatus.

Keywords: autonomous vehicle, truck-full trailer, reversing, time delay, experimental tests

Kivonat

Jelen kutatás egy összetett járműszerelvény egyenes vonalú tolatásának szabályozásával foglalkozik, fő célja pedig egy szabályozó algoritmus megalkotása, mely alkalmas a vizsgált mozgás stabilizálására. Modellalkotáskor a rendszer kinematikai modelljét egészítettük ki a kormánymű dinamikájával, valamint külön hangsúlyt fektettünk az időkésés figyelembevételére. A módszer helyességét kísérleti úton igazoltuk egy kisskálájú mérési berendezésen.

Kulcsszavak: önvezető funkció, tehergépjármű, tolatás, időkésés, kísérleti mérés

1. BEVEZETÉS

A személyautók számára számos vezetéstámogató rendszer került kifejlesztésre a közelmúltban, és a legtöbb autógyártó cég elérhetővé is teszi ezeket már a középkategóriás járműveihez is. Ilyen például a ráfutásos ütközés elkerüléséért felelős rendszer, a sávkövető asszisztens, a holtérészlelés és a különböző tolatási balesetekre figyelmeztető funkciók. Ugyan egyelőre a tehergépjárművek önvezető funkciói kisebb népszerűségnek örvendnek, néhány cég legalább akkora hangsúlyt fektet az ezzel kapcsolatos kutatásokra, mint mások az önvezető személyautók fejlesztésére. Vontatmánnyal szerelt járműszerelvények tolatása komoly feladatot jelent még a tapasztalt sofőrök számára is [1, 2]. Így az alapvető vezetéstámogató rendszerek átültetésén felül az ilyen járműszerelvények esetében rendkívül hasznos funkciót jelent a különböző manőverek megvalósítása hátramenetben, mint például egy rakodóállomásra történő parkolás. Hasonló problémák megoldásával évtizedek óta foglalkozik a szakirodalom [3], azonban napjainkban talán még aktuálisabb ennek a problémakörnek a vizsgálata [4].

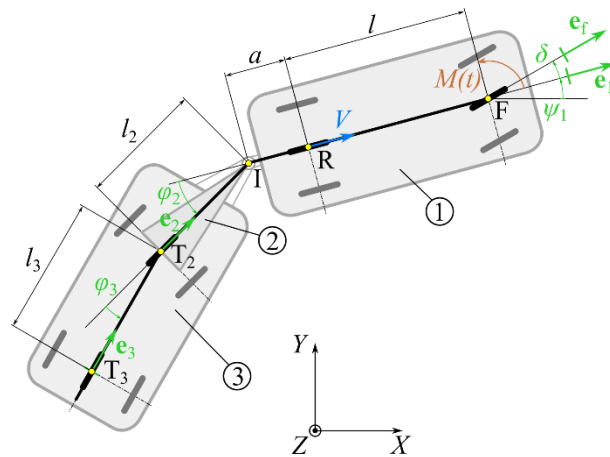
Jelen kutatás fő célja egy szabályozási algoritmus megalkotása, mely képes egy összetett járműszerelvény egyenes vonalú egyenletes tolatását megvalósítani a szabályozási körben fellépő jelentős időkésés ellenére. Az egyenes menti tolatás jó alapot jelent az általános pályakövető funkció megalkotásához, amely lehetővé teszi az említett manőver biztonságos kivitelezését.

2. MECHANIKAI MODELL

A kutatás során vizsgált összetett járműszerelvény három részből áll. A vontató járműből, ami egy egyszerű teherautó, melynek első tengelye kormányozott. A vontatmány mechanikailag két elkülönítendő részből

tevéődik össze: egy egytengelyű pótkocsiból, és a kapcsolódást biztosító, köztes csatlakoztató vonóháromszöges kiskocsiból, melyre a pótkocsi súlyának egy része átadódik. Az ilyen típusú vontatmány egybeépített változatát szokás teljes pótkocsinak nevezni, de a modellezés szempontjából célszerű erre két külön egységként tekinteni.

Mechanikai modellként a szakirodalomban igen elterjedt kinematikai biciklimodellt alkalmazzuk. A modell vázlatát az 1. ábrán látható, melyen a fent bemutatott szerkezeti részeket a bekarikázott számok jelölik: 1 a vontató jármű, 2 a köztes csatlakoztató kiskocsi, 3 pedig a vontatmány. A biciklimodellnek megfelelően a járműszerelvényt egynyomú járműként modellezzük, melyben F és R jelölik a vontató jármű első- és hátsó tengelyeit, T_2 és T_3 pedig a vontatmány tengelyeit – tehát a köztes kiskocsi-, és a pótkocsi tengelyeit. A vizsgálat során a vontató jármű hosszirányú sebességét konstansnak tekintjük, jelölje ezt V .



1. ábra. Mechanikai modell

A mechanikai rendszer általános koordinátáit az ábrán feltüntetjük, mégpedig X és Y a vontató jármű hátsó tengelyének pozícióját, ψ_1 a legyezési szögét jelöli; φ_2 és φ_3 pedig a köztes kiskocsi- és a vontatmány relatív szögei rendre az előttük álló szerkezeti elemhez képest. Továbbá δ a kormányaszögét, vagyis a vontató jármű első tengelyének szögét jelöli a hosszirányú tengelyéhez képest, ami egyúttal az egyetlen beavatkozási lehetőséget is jelenti az összetett járműszerelvény esetében. A kormányaszög megkívánt értékre való beállításáért az $M(t)$ kormányzási nyomaték felel.

A kinematikai kényszer egyenletek felírásával és átalakításával előállnak a nemlineáris mozgásegyenletek, melyek felhasználásával – az egyensúlyi helyzet körül linearizálva – elvégezhetjük a lineáris stabilitásvizsgálatot. A pontosabb eredmények érdekében a modell kiegészítésre kerül a kormánymű dinamikájának mint egy egyszabadságfokú lengőrendszernek figyelembevételével.

3. SZABÁLYOZÓ

Jelen dolgozatban a járműszerelvény X tengely mentén történő tolatásának stabilizálását egy állapotvisszacsatolós szabályozó segítségével érjük el. Ehhez három darab arányos tagot alkalmazunk, ahol a visszacsatolt mennyiségek a vontató jármű referenciaegyenestől mért Y laterális pozíciója és ψ_1 legyezési szöge, valamint a pótkocsi hátsó tengelyének φ_3 relatív legyezési szöge. Ennek megfelelően az alkalmazott szabályozási törvényben a kívánt kormányaszögöt a következőképpen írjuk elő:

$$\delta_{\text{kívánt}}(t) = -P_Y Y(t - \tau) - P_{\psi_1} \psi_1(t - \tau) - P_{\varphi_3} \varphi_3(t - \tau), \quad (1)$$

ahol P_Y , P_{ψ_1} és P_{φ_3} a magas szintű szabályozás erősítési tényezői, valamint τ a szabályozási körben megjelenő időkéset jelöli. Ebből is látható, hogy a kutatás során kiemelt célunk az időkéset stabilitásra vett hatásának vizsgálata. A kormánymű dinamikáját figyelembe vevő alacsony szintű szabályozást a kormányzási nyomatékkal szabjuk meg, mégpedig:

$$M(t) = -k_p(\delta(t) - \delta_{\text{kívánt}}(t)) - k_d \dot{\delta}(t), \quad (2)$$

ahol k_p és k_d a szervomotor belső szabályozására jellemző erősítési tényezők. Mint látható, az alacsony szintű szabályozásban megjelenő további időkést elhanyagolható mértékűnek tekintjük és számításainkban nem vesszük figyelembe.

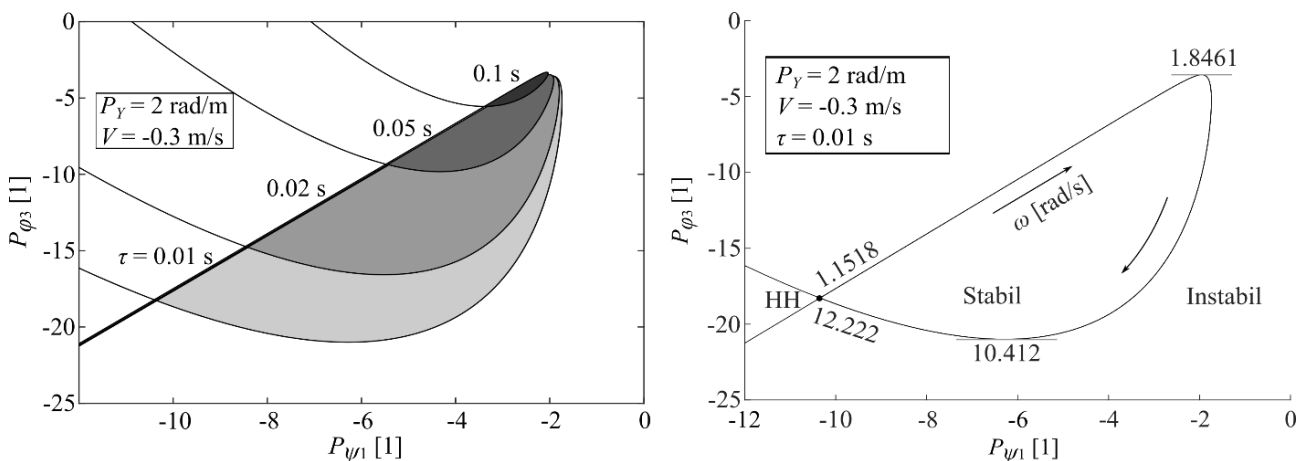
Fontos tényként megemlítendő, hogy magas szintű szabályzásban a köztes csatlakoztató kiskocsi φ_2 relatív legyezési szögének visszacsatolása – ezáltal mérése – nem szükséges a stabilitás eléréséhez. Ez hatalmas előnyt jelent a megvalósítás során, ugyanis az önvezető járművek esetében komoly kihívást okoz a szerkezetek szenzorokkal történő felszerelése, ami különösen kritikus a cserélhető vontatmányok esetében.

4. STABILITÁSVIZSGÁLAT

A tolatás lineáris stabilitásvizsgálatát, figyelembe véve az időkést okozta végtelen-dimenziós problémát, elvégezzük mind a D-szeparáció, mind a szemidiszkrétizáció módszerével, kihasználva mindkét módszer előnyét. Előbbi egy fél-analitikus módszer, mely nem ad információt a stabilitásról, csupán a stabil–instabil határokat képes megkeresni, azonban lehetővé teszi az instabilitás során kialakuló rezgési frekvenciák becslését. Utóbbi pedig egy numerikus módszer, melynek segítségével információt kapunk a mozgás stabil jellegéről is. Eredményként a 2. ábrán látható, erősítési tényezők terében kirajzolt stabilitástérképek adódnak olyan módon, hogy a laterális eltéréshez tartozó erősítési tényező értéke rögzítve van $P_Y = 2$ rad/m értékre. A longitudinális sebesség értéke $V = -0.3$ m/s, ahol a negatív előjel a tolatásra utal. A különböző időkéstértékekhez tartozó stabil területeket mutatják a szürke különböző árnyalatai.

A bal oldali ábra az időkést stabilitásra vett hatását mutatja, mely alapján kijelenthető, hogy ugyan nagy hatása van az időkéstnek a stabil terület méretére, de még viszonylag nagy időkést mellett is lehetőség van a vizsgált mozgás stabilizálására. Ezen a grafikonon egyszerre szerepel mindkét módszer számítási eredménye: a folytonos fekete D-görbék mutatják a lehetséges stabilitási határokat, a szemidiszkrétizációval kapott különböző árnyalatú tartományok pedig a tényleges stabil tartományokat; ez egyben mutatja a két eltérő módszerrel kapott eredmények elegendően pontos egyezését is.

A jobb oldali grafikon egy adott időkésthez tartozó stabilitási határgörbét ábrázol a D-szeparáció módszerével. A görbe körül feltüntetett számérték az elméleti stabilitási határhoz tartozó rezgési frekvenciaértéket jelenti. A HH-val jelölt pont egy dupla-Hopf bifurkációs pont, amihez láthatóan két frekvenciaérték is tartozik; ezen áthaladva összetett, több frekvenciaösszetevőjű rezgések alakulhatnak ki.



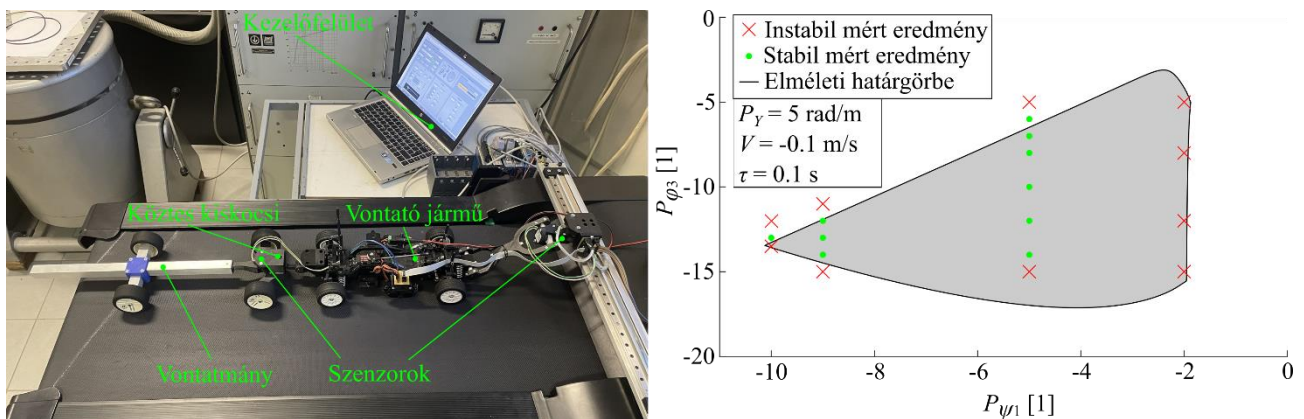
2. ábra. Időkést hatása a stabilitásra (bal) és a D-szeparációs frekvenciavizsgálat eredménye (jobb)

5. KÍSÉRLETI VALIDÁLÁS

Jelen kutatás végén a kapott számítási eredményeket kísérleti úton is validáljuk. Ehhez a 3. ábra bal oldali képén látható kisskálájú mérési berendezést használjuk. A vontató jármű oldalirányú pozíciója egy lineáris encoderrel, a legyezési szöge és a vontatmány relatív legyezési szöge pedig szögszenzorok segítségével vannak mérve. A szabályozási algoritmus egy NI cRio rendszeren keresztül fut, amit az ábrán látható kezelőfelületen állíthatunk.

A 3. ábra jobb oldali grafikonja a kísérleti validálás eredményét mutatja. A szürke terület az elméleti stabil tartományt jelenti, ahol a laterális eltéréshez tartozó erősítési tényező értéke $P_Y = 5$ rad/m, a hosszirányú sebesség $V = -0.1$ m/s, az időkést pedig $\tau = 0.1$ s. Ezek az értékek, illetve az egyéb geometriai méretek

megegyeznek a kísérlet során alkalmazottakkal. A kísérlet elvégezhető az erősítési tényezők különböző konfigurációja mellett, ennek eredménye zöld pontokkal (stabil tolatás) és piros keresztekkel (instabil tolatás) van ábrázolva. A grafikon alapján egyezés tapasztalható az elméleti- és a mért stabilitási határok között, ami a validálás sikerességét igazolja.



3. ábra. Kiskálájú kísérleti berendezés (bal) és a mérések eredménye (jobb)

6. KONKLÚZIÓ

Jelen kutatás egy lineáris, állapotviszacsatolásos szabályozó tervezésére és annak kísérleti validálására irányult, melynek feladata egy összetett járműszerelvény egyenes vonalú tolatásának stabilizálása. Mechanikai modellként a járműszerelvény kinematikai modelljét alkalmaztuk, kiegészítve a kormánymű dinamikájával. A számításokat elvégeztük numerikus- és fél-analitikus módszer segítségével is, méghozzá a szabályozási körben fellépő időkésés figyelembevételével. Ennek stabilitásra vett hatását külön figyelemmel vizsgáltuk. A kísérleti validálás egy kiskálájú mérési berendezésen történt, mely során a kapott eredmény elfogadható egyezést mutatott az elméleti számítás eredményével.

Jövőbeni cél az általános pályakövető szabályozás megvalósítása és tesztelése, mely további matematikai- és mérnöki kihívásokat rejt magában. Ehhez kapcsolódóan az elméleti számításokat követően szükséges a kiskálájú mérési berendezés fejlesztése és újragondolása is, hogy az alkalmassá váljon a pályakövetés validálására. Ez a funkció elengedhetetlen a korábban említett, bonyolult manőverek kivitelezéséhez, ami pedig fontos előrelépést jelentene az önvezető tehergépjárművek fejlesztésében.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki az NFKI-128422 keretében kapott támogatásért. A szerző konferencia részvételét a BME Gépészmérnöki Kar NTP-HHTDK-21-0051 pályázata támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] M. Werling, P. Reinisch, M. Heidingsfeld and K. Gresser *Reversing the General One-Trailer System: Asymptotic Curvature Stabilization and Path Tracking*, in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 15, no. 2, pp. 627-636, April 2014, doi: 10.1109/TITS.2013.2285602.
- [2] Hafner M. and Pilutti T. *Dynamic trajectory planning for trailer backup*. Conference Proceedings - IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. 2014. 2501-2506. 10.1109/smc.2014.6974302.
- [3] D. Tilbury, R. M. Murray and S. Shankar Sastry, *Trajectory generation for the N-trailer problem using Goursat normal form*, in IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 40, no. 5, pp. 802-819, May 1995, doi: 10.1109/9.384215.
- [4] Ljungqvist O., *On motion planning and control for truck and trailer systems*, 2019, doi.org/10.3384/lic-diva-153892