

Terepjáró vertikális modellezése és irányítástervezése korszerű módszerekkel

Nagy Dávid*, Németh Balázs**

*MSc hallgató, Közlekedésautomatikai Tanszék, BME, H-1111 Budapest Bertalan L. u. 2.
(E-mail: david.nagy@sztaki.hu)

**PhD hallgató, Közlekedésautomatikai Tanszék, BME, H-1111 Budapest Bertalan L. u. 2.
(Tel: +36 (1) 463-1111; e-mail: bnemeth@sztaki.hu)

Absztrakt: A cikk egy kisméretű, kis sebességű (1 m/s alatti), aktív felfüggesztésű vezető nélküli szárazföldi jármű (UGV) vertikális modellezését, az aktív felfüggesztési irányítás tervezését és a szabályozó implementálását mutatja be. A tervezett aktív felfüggesztési rendszer lehetővé teszi, hogy egy véletlenszerű, durva terepen végighaladva a jármű felépítménye közel vízszintes helyzetben maradjon, azaz a szabályozás a bólintó és oldaldőlési mozgásokat minimalizálja. A kidolgozott LQ szervo típusú szabályozó és a PI állapotmegfigyelő működését szimulációk és a valós járművön végzett mérések illusztrálják. A rendszer, felépítéséből adódóan, egyszerűen bővíthető és alkalmas az implementált szabályozó paramétereinek valós idejű monitorozására és módosítására, így az eszköz a kutatásban és az oktatásban is hatékonyan használható.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a vezető nélküli szárazföldi járművek (angolul „unmanned ground vehicle”, UGV) egyre nagyobb teret hódítanak. A rendszerint kisméretű járműveknek, a civil és katonai alkalmazások mellett, a kutatásban és az oktatásban is nagy jelentőségük van, mivel egyszerű, gyorsan fejleszhető és olcsó platformként szolgálnak a járművekkel kapcsolatos kutatási eredmények bemutatásához és a fejlesztéshez.

A vezető nélküli szárazföldi járművekkel kapcsolatban számos irányítási probléma felvetődik. Autonóm irányítás esetén a járműnek térképadatbázisok alapján és saját szenzorjaira támaszkodva kell közlekednie, amelyhez releváns kutatási területek kapcsolódnak. Ide sorolhatók például a mono vagy sztereó kamerás képfeldolgozó módszerek, ezen belül az útpálya vagy ösvény nyomvonalának és egyéb tereptárgyaknak a felismerése, térbeli lokalizációja. Kihívást jelent a sok szenzoradat hatékony feldolgozása, a rendelkezésre álló szenzorok fúziója - például kamera, inerciális szenzormodul, radar, lidar, lézer és ultrahang szenzorok együttes alkalmazása. Az említett problémákkal foglalkoznak például [4,11] irodalmak. Szintén járműirányítási feladat a megtervezett nyomvonal- és sebességtrajektóriák követésének megvalósítása, a stabil futás biztosítása, a kerék-talaj közti kapcsolati erők optimalizálása illetve a felépítmény mozgásának irányítása, ld. például [1,5,8] irodalmakat. Járműdinamikai szabályozórendszerekhez korszerű tervezési módszereket találhatunk [2,3] irodalmakban.

Jelen kutatás célja egy olyan aktív felfüggesztési rendszer tervezése és implementálása UGV járművön, amely egy speciális irányítási célt képes megvalósítani, olcsó illetve a kutatás és oktatás számára elérhető eszközök segítségével. A cél egy olyan kisméretű, kis sebességű (1 m/s alatti), aktív felfüggesztésű UGV építése és irányításának tervezése, amely

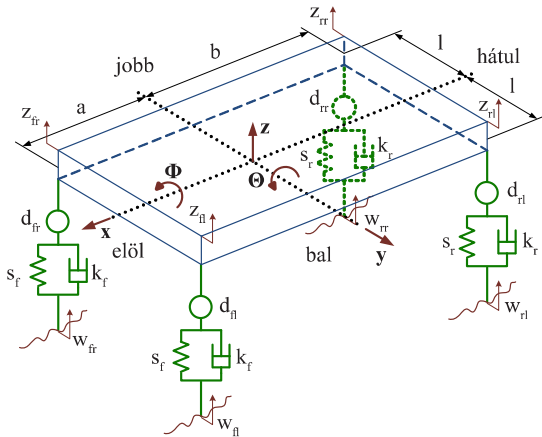
képes úgy végighaladni egy véletlenszerű durva terepen, hogy közben a járműfelépítmény közel vízszintes helyzetben marad, azaz a felépítmény bólintó és oldaldőlési lengései minimálisak. A jármű irányítórendszerétől elvárjuk, hogy kizárólag a járművön elhelyezhető szenzorokat alkalmazzon, illetve rugalmas megoldást nyújtson az aktív felfüggesztési szabályozórendszerek laboratóriumi vizsgálatához, illetve megfelelő alapot nyújtson az UGV-k egyéb irányítási feladatainak szemléltetésére és vizsgálatára is. További cél, hogy a járművet a kutatásban az és az oktatásban is hatékonyan lehessen alkalmazni.

2. A JÁRMŰMODELL

Terepjáró építéskor alapvetően kétféle aktív felfüggesztési koncepció kerül előtérbe: a párhuzamos illetve a soros aktuátor-beépítés - ld. [6,9]. A célkitűzés szerint a szabályozónak vízszintes helyzetben kell tartania a felépítményt nagy akadályok és lassú haladás esetén is, ami általában nagymértékű kerékelmozdulások tartós kifejtését eredményezi. A feladathoz ezért jobb választás a kis frekvencián kedvezőbb működést mutató soros elrendezésű aktív felfüggesztési rendszer.

Az irányítás tervezéséhez egy lineáris teljesjármű-modellt alkalmaztunk, melynek vázlata az 1. ábrán látható. A klasszikus modellektől eltérően ez esetben eltekintünk a kerekek tömegétől, valamint a gumiabroncsok rugalmasságától és csillapításától - ezt megtehetjük a kis járműsebesség és a kis tömegű kerekek miatt. További egyszerűsítésként a járműmodell több szempontból lineárisnak tekintjük: egyrészt a rugó- és csillapítókarakterisztikák lineárisak, másrészt úgy vesszük, hogy a felépítmény négy futómű bekötési pontjának függőleges elmozdulásai a felépítmény koordinátáinak lineáris kombinációjaként adódnak. Ezt megtehetjük, mert feltételezzük, hogy a szabályozás, mely a karosszériát igyekszik

vízszintes helyzetben tartani, jól működik, így a súlypont körüli szögelfordulások elegendően kicsik.



1. ábra A járműmodell

A modellt – [6] alapján - a gépjárművek vizsgálatánál megszokott jobbsodrású jármű koordináta-rendszerben vizsgáljuk. A karosszériát merev testként modellezzük, melynek három szabadságfoka érdekes az irányítás szempontjából: a rázás (z), a bólintás (θ) és az oldaldőlés (ϕ). Ennek megfelelően három tehetetlenségi jellemzőt tekintünk: a tömeget (m) és a két tehetetlenségi nyomatékot (J_θ és J_ϕ). A w_i útgerjesztések közvetlenül a k_i csillapítású és s_i merevségű rugós tagok alsó végeit gerjesztik. A passzív elemek felső végeit a beavatkozók képesek függőlegesen mozgatni (d_i).

A szabályozótervezéshez felírtuk a rendszer állapotterbeli modelljét, amelybe beépítettük a beavatkozók egyszerűsített (egyábrólós arányos taggal leírt) modelljét is. Ezzel a szabályozó tervezésekor a beavatkozók dinamikáját is figyelembe lehetett venni. Az állapotvektor a következő:

$$x = [\dot{z} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\phi} \quad z \quad \theta \quad \phi \quad d_{fr} \quad d_{rl} \quad d_{rr} \quad d_{rl}]^T$$

A rendszer állapotterbeli modellje:

$$\dot{x} = Ax + Bu + w \quad (1)$$

ahol w a talaj gerjesztéséből származó ismeretlen folyamat, u a beavatkozók kiadott hosszváltozások, A és B a mozgásegyenletekből és a beavatkozók modelljéből adódó konstans mátrixok.

3. IRÁNYÍTÁSTERVEZÉS

A járműtől megköveteljük, hogy aktív felfüggesztése segítségével egy véletlenszerű terepasztalon úgy tudjon végighaladni, hogy közben a felépítménye közel vízszintes helyzetben maradjon. Ehhez a szabályozórendszernek a bólintó és oldaldőlési szögeket – azaz a rendszer állapotter reprezentációját tekintve az $x_5 = \theta$ és az $x_6 = \phi$ állapotokat – nulla közelében kell tartani. Emellett a beavatkozók kitérését is korlátozni kell, mivel a beavatkozási tartományuk véges.

Az optimális állapot-visszacsatolás lineáris kvadratikussal (linear quadratic, LQ) módszerrel lett kiszámítva. Az állapot-

térben felírt modellt, az LQ szervo szabályozási struktúrájának megfelelően, két új állapottal bővítettük ki: a bólintási és oldaldőlési szögek időbeli integráljával (z_1 és z_2). Az LQ módszerrel történő tervezés egy optimális állapot-visszacsatolást ad eredményül, amellyel 60° -os fázistartalék és végtelen erősítési tartalék biztosítható. A szabályozási célkitűzést szem előtt tartva az LQ módszer minimalizálandó célfüggvényében a bólintási és oldaldőlési szögek integráljai (z_1 és z_2) és a bemenetek (u_i) kvadratikussal funkcionáljai szerepelnek, megfelelő súlyokkal (q_θ , q_ϕ és r). Ezzel a célfüggvény a következőképpen írható fel:

$$J = \int_0^\infty \{q_\theta z_1^2 + q_\phi z_2^2 + r \sum_{i=1}^4 u_i^2\} dt \quad (2)$$

A célfüggvényben alkalmazott súlyokat a szimulációk és a valós mérések alapján hangoltuk.

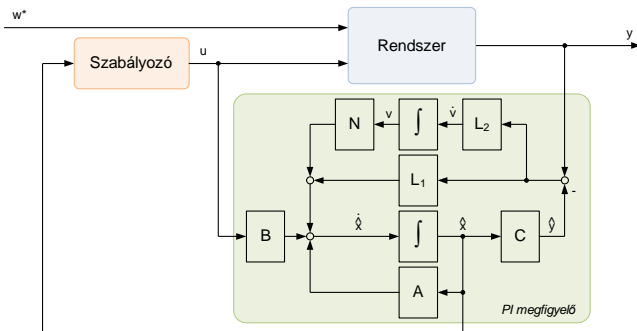
4. ÁLLAPOTMEGFIGYELŐ TERVEZÉSE

A megépített jármű olyan szenzorokkal lett felszerelve, melyek a kutatásban és az oktatásban könnyen beszerezhetők. Ennek megfelelően a felépítményen egy hatszabadságfokú inerciális szenzormodul lett elhelyezve, amely három tengely mentén képes a gyorsulások és a tengelyek körüli szögsebességek mérésére. Ezen kívül a beavatkozó szervomotorok aktuális pozícióját is mérni lehet, de az összes rendszerállapot így sem mérhető. Emiatt az állapotokat a rendelkezésre álló mérésekből kell becsülni, melyhez állapotmegfigyelő szükséges. A teljes irányítórendszer tehát kimenet-visszacsatolt struktúrájú.

Az állapotbecslés során a legnagyobb problémát az jelentette, hogy a szabályozás célja a bólintási és oldaldőlési szögek minimalizálása, ugyanakkor ez a két szög közvetlenül nem mérhető - kész szenzor sem áll rendelkezésre. Ezért olyan egyedi struktúrájú állapotmegfigyelő kidolgozására volt szükség, amely az inerciális szenzormodul és a beavatkozók jeleiből képes az állapotok megfelelően gyors és pontos becslésére - különös tekintettel a szabályozás szempontjából kritikus θ és ϕ szögekre.

A bólintási és oldaldőlési dinamika gyors mérésére a szögsebességszenzorok a legalkalmasabbak, azonban egy egyszerű állapotmegfigyelővel a szögek becslése végtelenbe tartó hibával terhelt, ha a szögek deriváltjain bármilyen kis nullpont hiba jelentkezik - ez a valós szenzorok esetében elkerülhetetlen, illetve ezen felül egyéb zajok is jelen vannak. Jelen kutatást megelőzően kidolgozásra került egy terhelésbecslőt alkalmazó állapotmegfigyelő, amely a problémát részben kiküszöböli, azonban a szabályozás minőségét nagymértékben elrontja - ld. [7].

Az állapotbecslés problémáját egy egyedi arányos-integráló struktúrájú állapotmegfigyelővel (*proportional-integral (PI) observer*) sikerült kielégítően megoldani -ld. [10]. A terepjáróhoz kidolgozott módszer - a jármű dinamikájának figyelembe vételével - felhasználja a gyorsulásmérések nyújtotta többletinformációt. Az irányítórendszer struktúráját mutatja a 2. ábra.



2. ábra A PI állapotmegfigyelőt alkalmazó irányítórendszer struktúrája

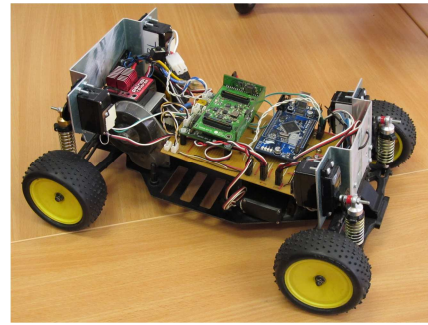
A PI állapotmegfigyelő a fenti rendszermodell alapján lett megtervezve. A mérési hiba visszacsatolásában szereplő L_1 , L_2 és N mátrixokat a v állapotokkal (az erősített mérési hiba integráljai) kibővített rendszer duálisára tervezett optimális állapot-visszacsatolással számítottuk ki. Az állapotmegfigyelő a szimulációk és a megépített járművön végzett mérések alapján úgy lett hangolva, hogy a rendszer állapotait a lehető leggyorsabban és legpontosabban becsülje – különös tekintettel a bólintási és oldaldőlési szögek rekonstrukálására. A rendszer kimenetei, azaz a mért jelek a következők:

$$y = [\theta \ \dot{\phi} \ \theta \ \dot{\phi} \ d_{fr} \ d_{fl} \ d_{rr} \ d_{rl}]^T$$

A tervezett rendszer különlegessége, hogy a θ és $\dot{\phi}$ szögeknek csak durva becslései állnak a megfigyelő rendelkezésére, melyeket az irányító algoritmus alapvetően a gravitációs gyorsulás méréséből állít elő. A kidolgozott irányító algoritmus a gravitációs gyorsulás mérését a jármű dinamikájának figyelembe vételével kompenzálja, így a jármű haladásából származó járulékos gyorsulások jelentős része kiküszöbölhető.

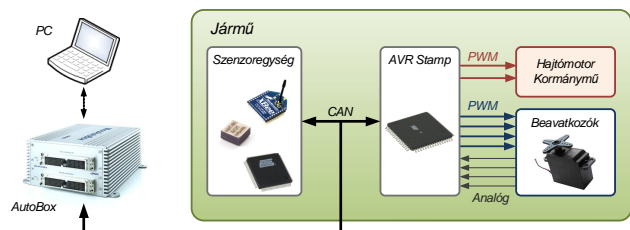
5. A SZABÁLYOZÓ IMPLEMENTÁLÁSA

Az irányítórendszer egy 1:10 méretarányú villanymotoros hajtású modellautón lett implementálva. A jármű futóművei a soros elrendezésű aktív felfüggesztési konstrukciónak megfelelően lettek átalakítva, így négy mechanikailag független, keresztlengőkaros felfüggesztés áll rendelkezésre. A rugócsillapító elemek felső bekötési pontjai a beavatkozó szervomotorokhoz kapcsolódnak. Az elkészített kisméretű terepjáró – a futómű mozgástartományának teljes kihasználásával – legfeljebb 4 centiméteres tereptárgyakat képes leküzdeni. A jármű – a fedélzeti elektronikával és az átalakított futóművekkel – a 3. ábrán látható.



3. ábra Az aktív felfüggesztésű terepjárómodell

A terepjárón megvalósított irányítórendszer felépítését mutatja a 4. ábra. A járművön egy moduláris felépítésű fedélzeti elektronika lett kialakítva, mely egyszerűen módosítható, például további érzékelők és beavatkozók beépítésével. Az egyes modulok az erre a célra kialakított, CAN 2.0A szabványnak megfelelő, 500 kbit/s sebességű CAN buszon képesek kommunikálni egymással. A fedélzeti elektronika a következő fő komponensekből áll. A szögsebességek és gyorsulások mérését a hatszabadságfokú inerciális szenzoregység végzi. A szervomotorok aktuális pozícióit – a szervomotor saját potencióméterének kicsatolt jele alapján – egy AVR Stamp panel olvassa ki. Az AVR Stamp panel emellett a beavatkozó szervomotorok, a kormánymű szervomotor és a hajtómotor vezérléséhez szükséges PWM jeleket is előállítja. A mért jelek és a beavatkozó jelek 10 ms időközönként kerülnek továbbításra, CAN üzenetek formájában.



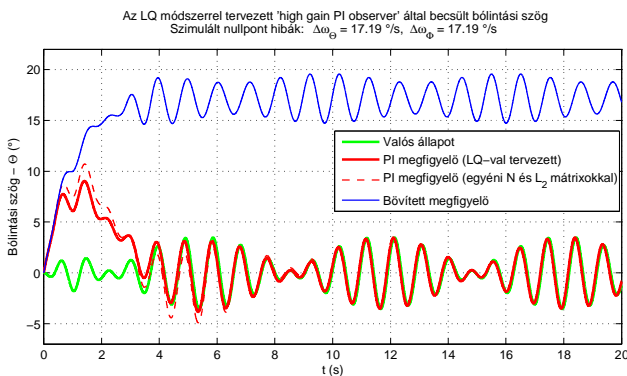
4. ábra Az irányítórendszer vázlatja

Az irányítórendszer központi eleme egy dSpace MicroAutoBox hardver, amely a járművön kívül helyezkedik el és a jármű fedélzeti elektronikájával a CAN buszon keresztül kommunikál. A MicroAutoBox egy kompakt eszköz, melyben egy nagy teljesítményű mikroszámítógép (IBM PowerPC, 900 MHz) található számos perifériával. Az eszköz lehetővé tette az aktív felfüggesztési rendszerhez kapcsolódó mérések hatékony elvégzését, illetve a rendszer gyors hangolását és tesztelését.

A MicroAutoBox hardveren futó irányító szoftverben a 2. ábrának megfelelő szabályozó lett implementálva. Az algoritmus, időbeli lefutását tekintve, egy inicializálási szakaszból (finom kalibráció) és a szabályozó futásából áll. Az irányító szoftver MATLAB/Simulink környezetben lett felépítve, majd a MicroAutoBoxon futó kódot a Real-Time Workshop (RTW) és az RTW Embedded Coder kiegészítő csomagokkal készítettük el és töltöttük le a hardverre.

6. SZIMULÁCIÓK

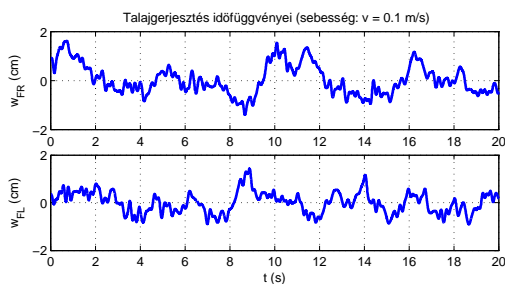
A következőkben szimulációk fogják illusztrálni a kidolgozott PI állapotmegfigyelőt alkalmazó irányítórendszer működését. Az 5. ábrán a PI állapotmegfigyelő működését bemutató szimuláció látható, összehasonlítva más, a tervezés korábbi fázisaiban kialakított állapotmegfigyelőkkel. A gerjesztést a jármű két oldalán alkalmazott szinuszos gerjesztőfüggvények adják, továbbá a szabályozás ki van kapcsolva, tehát a beavatkozók mindvégig alaphelyzetben vannak. A szimulált szögsebességmérésen a jellemző valós értéknél tízszer nagyobb nullpont hibát (17.2 °/s) generáltunk. A diagramon a jármű gerjesztésre adott válasza, a felépítmény bólintási szöge lett ábrázolva.



5. ábra A PI állapotmegfigyelő működése - szimuláció

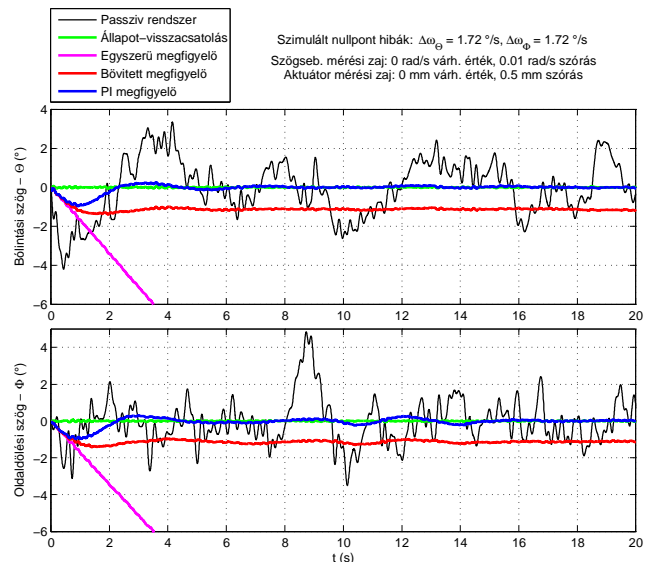
A bólintási szög valós értékét a zöld vonal jelöli, míg a többi vonal az egyes megfigyelők által becsült értékeket mutatják. Az összehasonlítás végett két kevésbé összetett állapotmegfigyelő működése is ábrázolva lett, piros szaggatott illetve kék folytonos vonallal. A piros folytonos vonal jelöli a PI állapotmegfigyelő által becsült bólintási szöveget. Látható, hogy a PI rendszerstruktúra vezetett a legjobb eredményre, hiszen ebben az esetben cseng le leggyorsabban a kezdeti tranzienst, majd az állapot becslése szinte teljesen egybeesik a valós állapottal.

A következő példa egy összetett szimuláció eredményein keresztül mutatja be az irányítórendszer működését. A rendszer a 6. ábrán látható útgerjesztés éri, mely a valós terepviszonyokat modellezi. A példában a valós járművön tapasztalt jellemző szenzor- és rendszerzajokat szimuláltuk, illetve a szabályozás be van kapcsolva.



6. ábra A jobb első és bal első kerekek útgerjesztése

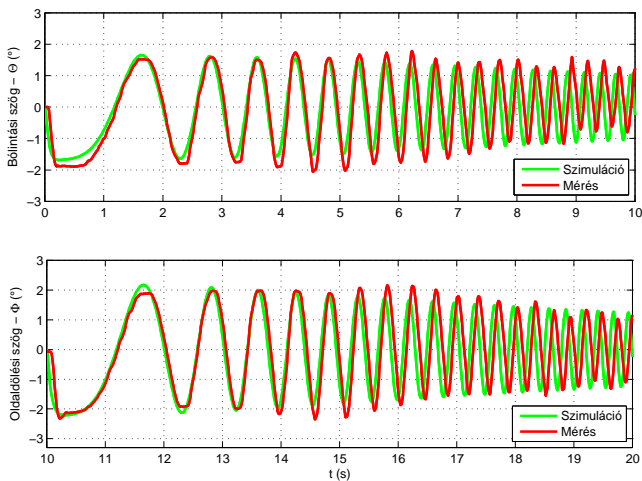
A 7. ábra a szabályozás szempontjából releváns két rendszer-állapot valós értékeit, azaz a felépítmény tényleges bólintási (θ) és oldaldőlési (Φ) szögeit mutatja. Fekete folytonos vonal jelöli a szabályozás nélküli, azaz a passzív felfüggesztésű járművet, melynek bólintási és oldaldőlési lengései elérik a 4–5°-os amplitúdót. Az irányítástervezési folyamat illusztrálása céljából rózsaszínnel és pirossal egy-egy egyszerűbb struktúrájú állapotmegfigyelő, illetve zölddel egy ideális (a valóságban nem kivitelezhető), tiszta állapot-visszacsatolás működése is fel lett tüntetve. Az egyszerűbb struktúrájú megfigyelők működése nem elfogadható, mivel hibával becslik a rendszer állapotait, elrontva ezzel a szabályozást is. Ezzel szemben a PI állapotmegfigyelővel működő rendszer (kék vonal) rövid, közel két másodperces kezdeti tranzienst (szenzorhibák elnyomása) után a szabályozási célkitűzéseknek megfelelően működik, azaz az ismeretlen talajgerjesztés ellenére a jármű felépítményét nagyon jó közelítéssel vízszintes helyzetben tartja – a θ és Φ szögek $\pm 0.3^\circ$ -on belül maradnak.



7. ábra A tervezett szabályozók összehasonlítása a bólintási és oldaldőlési szögek alapján

7. MÉRÉSI EREDMÉNYEK

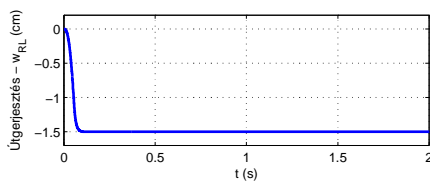
A következő ábrások a valós járművön végzett mérések eredményeit mutatják be. A 8. ábrán a valós jármű és a szimulált modell összehasonlítása, a modell validálásának egy részlete látható. Ebben az esetben az irányítórendszer ki volt kapcsolva, illetve a gerjesztést a beavatkozókra adott változó frekvenciájú szinuszos vezérlőjelek adták – így a beavatkozók dinamikája is mérhető volt.



8. ábra A rendszermodell validálása: a bólintási (Θ) és az oldaldőlési (Φ) szögek

A felső ábrán a bólintási szög (Θ) időbeli alakulása látható a mérés első felében, amikor a bólintási dinamikát hangsúlyozó gerjesztést alkalmaztunk. Az alsó ábra az oldaldőlési szöveget (Φ) mutatja a mérés második felében – ekkor az oldaldőlést hangsúlyozó gerjesztést alkalmaztunk. A zöld vonal a szimulált, a piros pedig a valós rendszer értékeit mutatja. A szimulált modell bólintási és oldaldőlési szögei láthatóan jól illeszkednek a valós járművön mért szögekre, tehát a rendszer modellje (a szervomotorok dinamikáját is beleértve) a számunkra érdekes 0–20 rad/s működési tartományon (szervo motorok működési tartománya) jól közelíti a valós rendszer viselkedését - a modellt érvényesnek tekintjük.

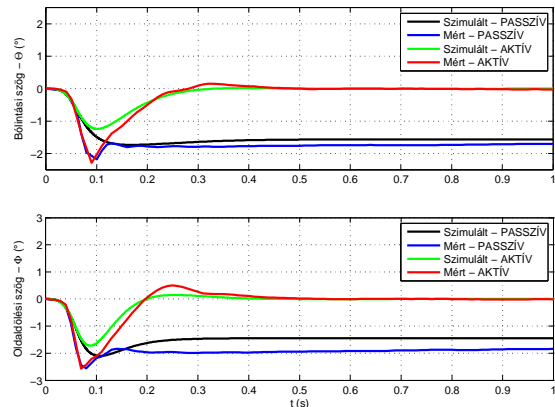
Az implementált PI állapotmegfigyelő struktúrájú irányítórendszer működését az egyik kerékre alkalmazott egységugrászerű gerjesztés példáján demonstráljuk. A bal hátsó kerékre alkalmazott gerjesztőfüggvény a 9. ábrán látható. A mérést kikapcsolt szabályozással (passzív járművel) és az irányítórendszer inicializálása után, bekapcsolt szabályozással (aktív jármű) is elvégeztük.



9. ábra A szimulációban a bal hátsó kerékre alkalmazott gerjesztőfüggvény - a többi kerék elmozdulása zérus

Az implementált szabályozó minőségét a bólintási és az oldaldőlési szögek alakulásán vizsgálhatjuk – ld.10 ábra foglalja össze. A kék vonalak a passzív jármű viselkedését mutatják: a gerjesztés hatására a felépítmény adott bólintási és oldaldőlési pozícióban stabilizálódik. A piros vonalak a szabályozott rendszer tényleges szög állapotait mutatják. Az ábrákon fekete és zöld vonallal a szimulált passzív és aktív rendszer működése is megfigyelhető. Megállapítható, hogy a

szabályozó rövid tranziens (kb. 0.1–0.2 s) után vízszintes helyzetbe hozza a felépítményt, tehát az implementált irányítórendszer a célkitűzéseknek megfelelően működik.



10. ábra A bólintási (Θ) és az oldaldőlési (Φ) szögek alakulása az aktív és a passzív rendszer esetében

8. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során elkészült egy aktív felfüggesztésű, vezető nélküli terepjárómű és egy vizsgálatokra alkalmas mérési környezet, amely a kutatás és oktatás számára beszerezhető alkatrészekből és eszközökből épül fel. Kidolgoztunk és a rendelkezésre álló járművön implementáltunk egy olyan speciális struktúrájú aktív felfüggesztési irányítórendszert, amellyel a jármű képes egy véletlenszerű, durva terepasztalon úgy végighaladni, hogy közben a járműfelépítmény közel vízszintes helyzetben marad. A kidolgozott hardver- és szoftverkörnyezet egyszerűen módosítható és bővíthető, illetve a rendszer lehetővé teszi további szabályozók gyors és egyszerű implementálását, tesztelését. Az irányítórendszer működése közben a teljes algoritmus monitorozható és módosítható, így a rendszer hatékonyan használható a kutatásban és az oktatásban.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatási munkát a SIEMENS Zrt. támogatta a Siemens és a BME Pro Progressio Alapítvány együttműködésével, a hallgatói szakmai körök számára kiírt pályázat keretében.

A cikkben bemutatott kutatásokat az OTKA CNK 78168 pályázat támogatta.

HIVATKOZÁSOK

- [1] N. Bouton, R. Lenain, B. Thuilot, J-C. Fauroux: A rollover indicator based on the prediction of the load transfer in presence of sliding: application to an All Terrain Vehicle, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2007, Roma, Italy
- [2] P. Gáspár: Design of an Integrated LPV-Based Vehicle Control, *Workshop on Systems and Control Theory*, Eds. Hangos K.M., Nádai L., Proceedings of the workshop on systems and control theory, Budapest, 141-156. 2009.

- [3] P. Gáspár, Z. Szabó, J. Bokor: Active Suspension in Integrated Vehicle Control, Switched Systems, *Ed. Janusz Kleban, IN-TECH Education and Publishing*, 1-22, 2009.
- [4] M. Grimes, Y. LeCun: Efficient Off-Road Localization Using Visually Corrected Odometry. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, Kobe, Japan
- [5] G. M. Hoffmann, C. J. Tomlin, M. Montemerlo, S. Thrun: Autonomous Automobile Trajectory Tracking for Off-Road Driving: Controller Design, Experimental Validation and Racing. *Proceedings of the 2007 American Control Conference*, 2007
- [6] U. Kiencke, L. Nielsen: Automotive control systems for engine, driveline and vehicle. *Springer*, 2005, Berlin
- [7] D. Nagy, P. Gáspár: Active Suspension Control Design for Unmanned Ground Vehicles, *Periodica Polytechnica, Transportation Engineering*, 2012
- [8] K. J. Waldron, M. E. Abdallah: An Optimal Traction Control Scheme for Off-Road Operation of Robotic Vehicles, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 12(2): 126-133, 2007.
- [9] J. Y. Wong: Terramechanics and Off-Road Vehicle Engineering. *Elsevier*, 2010, ISBN: 0-7506-8561-1
- [10] A-G. Wu, G-R. Duan: Design of Generalized PI Observers for Descriptor Linear Systems, *IEEE transactions on circuits and systems*, Vol. 53, No. 12, December 2006
- [11] A. Yaniv, A. Ferencz, A. Shashua: Off-road Path Following using Region Classification and Geometric Projection Constraints, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006