

Járműdinamikai rendszerek integrált fuzzy - sztochasztikus modellezése és identifikációja

T 042826

Témavezető: Dr. Várlaki Péter

egyetemi tanár , MTA doktora

Zárójelentés

I. Előzetes célkitűzések

A korábbi kutatási munkáink során a járműdinamikai modellezés, a lineáris és nemlineáris járműdinamikai rendszeridentifikáció és az aktív járműdinamikai algoritmusok területén dolgoztunk ki összetett matematikai, fuzzy és sztochasztikus alapokon nyugvó modelleket. Az itt kapott eredmények megjelentek az alkalmazott modellekben, az irányítási algoritmusok kidolgozásában, kísérleti szoftverek létrehozásában is. Kutatásaink tervezett célja volt a klasszikus és az úgynevezett lágy számítási eljárások (fuzzy rendszerek, neurális hálózatok) együttes alkalmazásával kidolgozott olyan összetett járműdinamikai modellek megalkotása, melyek felhasználhatóak a gyakorlati rendszer-identifikációs problémák megoldásához is. Az együttesen alkalmazott összetett modellek alkalmazásával lehetővé vált nagyméretű és bonyolult feladatok kezelése, melyre a módszerek izolált felhasználásával eddig nem volt lehetőség. A kutatómunka módszertani célja volt olyan lágy számítási eljárásokon nyugvó járműdinamikai modellezési és identifikációs algoritmusok kidolgozása, amelyek lehetővé teszik a komplexitás csökkentő redukciós eljárások alkalmazását és integrálását a mérnöki munkába. Céljaink között szerepelt olyan, szinguláris érték felbontást (SVD, HOSVD) adaptálni képes eljárás kidolgozása, amely alacsony számításgényű és lehetővé teszi a már redukált hierarchikus modellek valós időbeni adaptálását. Ezen belül kifejezett elvárás volt annak az igénynek a kielégítése, hogy a redukcióval kapott modell megtartsa az eredeti bázisok lényeges tulajdonságait, mint például a pozitivitás és a normalitás. Kutatásaink további területe volt a járműdinamikai modellezés és rendszeridentifikáció fuzzy logikán alapuló algoritmusainak továbbfejlesztése és alkalmazása az eddig jobbra csak a klasszikus módszerekkel vizsgált területen.

II. Az elért eredmények ismertetése

a. Baleseti járműtest deformációk fuzzy alapú identifikációja

Egyik fontos célkitűzésünknek tekintettük új fuzzy modellezési eljárások kidolgozását, általában heurisztikus jellegű identifikációs algoritmusok alkalmazásával, és a kiegészítő statisztikai elemzések elméleti megalapozását is szoros összefüggésben a felhasznált fuzzy logikai eszköztárral. Az így elméletileg megalapozott sztochasztikus, statisztikai jellegű analitikus módszereket a kidolgozott szoftver rendszerekben összekapcsoltuk a neurális hálózatok ugyancsak részben fuzzy, részben valószínűségi bázison kidolgozott heurisztikus tanuló algoritmusaival. Az elméletileg megalapozott és részben már kidolgozott módszereket több területen is hatékonyan alkalmazni tudtuk a nagy alakváltozással járó járműdinamikai modellezési feladatok megoldásában. Az alkalmazások különösen eredményesnek bizonyultak a frontális jellegű közúti járműbalesetek során bekövetkező nagy alakváltozással járó szerkezeti deformációk informatikai ill. mechanikai jellegű identifikációja során.

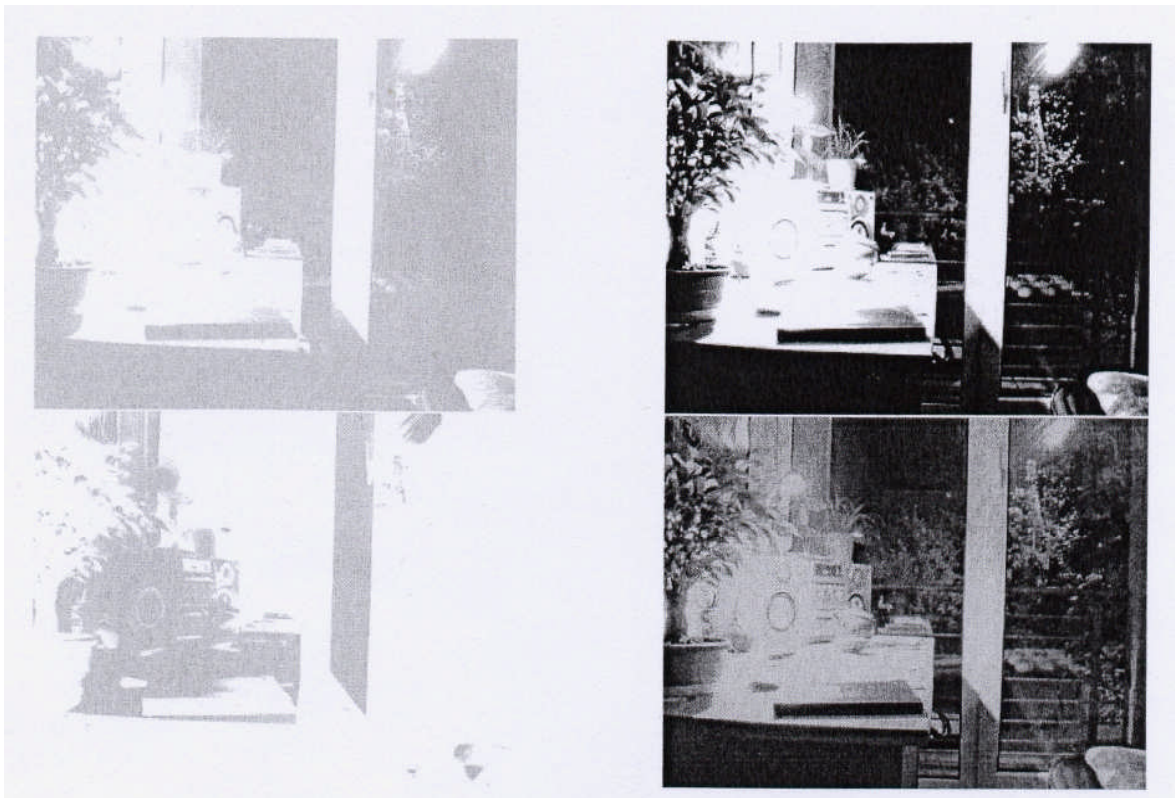
Módszereket dolgoztunk ki a deformált test identifikálására lágy számítástechnikai módszerek alkalmazásával. A módszertani bázist természetesen a fuzzy logikai ill. fuzzy irányítási eljárások valamint a neurális hálózatokon alapuló technikák jelentették. A járműtest deformáció finom strukturális identifikációjában elsősorban a csúcsok és az élek hatékony azonosítását hajtjuk végre a különböző típusú sztochasztikus algoritmusok kidolgozásával. Így a nagyvonalú informatikai térbeli formák előzetes azonosítása során kapott mintázatokban a tévesen azonosított csúcs és él szakaszok megbízható módon kiszűrhetők. Az így kidolgozott eljárásokkal előkészítettük a komplex fuzzy-sztochasztikus modelleket, melyeket a járműtest deformációs karakterisztikájának meghatározására eredményesen alkalmazhatunk.



A kutatás további szakaszában a járműtest deformáció optikai úton történő mérésére, valamint a járművek környezetében jelenlévő akadályok vizuális alapon való detektálásának támogatására fejlesztettünk ki újszerű módszereket. Mivel a járműtest deformációjának eredményeként többnyire bonyolult felületek keletkeznek, nagy hangsúlyt fektettünk a takarásban lévő felületelemek mérésére ill. modellezésére. A jelenleg alkalmazott 3D modellezésre szolgáló módszerek előre meghatározott statikus kamerapozíciókból készített képeket alkalmaznak, így a takarásban lévő felületelemek rekonstruálására nem alkalmazhatók. Az általunk kifejlesztett módszer lehetővé teszi a kamerák tetszőleges pozícióba való áthelyezését, biztosítva ezzel a nem látható deformált felületelemeknek a kamera látószögébe való hozását. Mindemellett szükséges volt a kamerák térbeli helyzetének nyomon követése, amely lehetőséget adott a különböző kamerapozíciókból készített képek alapján rekonstruált

felületelemek egymáshoz való illesztésére. A fejlesztésnél nagy hangsúlyt fektettünk a kamerák optimális elrendezésének megtervezésére, ill. azok kalibrálására, amely nagyban hozzájárult a mérési hiba csökkentéséhez. A kalibrációnál ill. az egyes kamerák nyomon követésénél fennálló zajokat minimalizációs eljárásokkal küszöböltük ki. A módszer eredményeként kapott deformált felületet a gyűrődési folyamat során felemésztett deformációs energia meghatározására alkalmazzuk.

Nem csupán a balesetelemzés, hanem a baleset megelőzés területén is új eredményeket értünk el. Ezek közé elsősorban a jármű környezetében elhelyezkedő akadályok ill. gyalogosok rossz látási viszonyok mellett való detektálásának támogatására fejlesztettünk ki újszerű módszereket. A gyalogos elütéses balesetek viszonylag nagy százaléka a rossz látási viszonyoknak tudható be. Az emberi szem a gyorsan változó fényviszonyokhoz nem képes gyorsan adaptálódni, ami balesetveszélyes helyzetek kialakulásához vezethet.



A jelenlegi rendszerek által alkalmazott kamerák intenzitástartománya (dynamic range) nem elegendő ahhoz, hogy rossz látási viszonyok mellett is olyan képeket továbbítsanak a feldolgozó egységek felé, amelyeken az objektumokat detektálni lehetne. Ezeket a korlátokat figyelembe véve új algoritmusokat fejlesztettünk ki különböző expozíciós idővel készült képek azon részeinek elemzésére ill. azok egyesítésére, melyek a feldolgozás szempontjából a legtöbb használható információt tartalmazzák. Ennek támogatására szegmentálási módszert fejlesztettünk ki, amelynél a kép elementáris régióinak gradiens alapú vizsgálatát alkalmazzuk.

A komplexitás csökkentése érdekében fuzzy eszközökkel redukáltuk a szegmensek számát, amely a feldolgozás sebességének szempontjából fontos tényezőnek bizonyult. A szegmentálást a bemenetként megadott különböző expozíciós idővel készült képek mindegyikén elvégeztük. Az egyes képek leginformatívabb szegmenseinek egyesítésére fuzzy keverő függvényeket alkalmaztunk. Az így kapott képen rossz és gyorsan változó fényviszonyok mellett is mindazon objektum megtalálható, melyeknek időben történő gépi felismerése fontos lehet a balesetelkerülés szempontjából.

b. A deformációs energia eloszlásának modellezése

A kutatás során megalapoztuk a baleseti járműtest-deformáció modelljének tenzor szorzat alapú leírását.

A deformációs folyamat klasszikus leírásához ismernünk kellene a járműtest minden összetevőjének fizikai paramétereit, mint például rugalmassági modulus, nyírési modulus. Ezek általában pontosan nem ismertek, de egzakt paraméterek esetén is igen bonyolult differenciálegyenletek megoldása jelentené a deformációs folyamat leírását. Ilyen típusú megközelítésen alapulnak a bonyolult deformációs folyamatok modellezésére általában alkalmazott véges elem módszerek is. Ezen módszerek általános hátránya, hogy egyrészt a paraméterek nagyfokú ismeretét tételezik fel, másrészt még ilyen pontos ismeretek esetén is akár több nap is lehet egy deformációs folyamat számítógéppel történő teljes rekonstrukciója.

Az új identifikációs eljárás alap gondolata szerint a járműtestet előre meghatározott számú cellára osztjuk fel, vagyis egy ortogonális térbeli rácshálóval partíciónáljuk a deformációs folyamat előtti, kezdetben sértetlen járműtestet. Az így kapott cellák mindegyikéhez rendelünk egy függvényt, mely a teljes cella energia elnyelési, illetve áteresztési tulajdonságát írja le. Ezen függvény paramétereit becsülhetjük törési kísérletek eredményeiből, vagy egy hasonló, balesetben deformációt szenvedett járműtestről készült digitális fényképek feldolgozásával nyert adatok alapján. Mivel az egyes cellák energia áteresztési karakterisztikája az anyag szerkezeti tulajdonságaiból adódóan függvénye a külső hatás (vagyis az ütközés) irányának, ezért egy – egy cellához célszerű több ilyen típusú függvényt rendelni, melyek egymástól eltérő irányokra adják meg az adott cella energia elnyelési és áteresztési tulajdonságait. Célszerűnek tűnik az ortogonális rácshálónak megfelelő irányokra cellánként három ilyen típusú függvény megadása, de az egy cellához tartozó karakterisztikus függvények száma akár több is lehet, ha az egyes irányokhoz előjelet is rendelünk. Egy tetszőleges irányból történő ütközés esetén a külső hatást a rácshálónak megfelelően ortogonális komponensekre bontjuk, az egyes komponensek hatását pedig egymástól függetlenül vizsgáljuk. Az egyes irányokban végbemenő változás (a cellák által elnyelt és áteresztett energiára vonatkozólag) a szomszédos cella szintek között leírható tenzor szorzat alakban, a teljes járműtest energia változása pedig ezek összegeként áll elő. A deformáció során fellépő energia eloszlás – változást az összes ortogonális komponens szuperpozíciójával írhatjuk le.

Az így kapott modell segítségével lehetőségünk nyílik a baleseti járműtest deformációk során az elnyelt energia eloszlásának közelítő jellegű identifikálására, amely felhasználható a

biztonságos, az ütközési energiát az utasok szempontjából megfelelően elnyelő és továbbító járművek tervezésénél is.

c. Tenzor szorzat modell transzformációval kapcsolatos eredmények

A gépjárműveknél fellépő lengésekkel és rezgésekkel kapcsolatban LPV modell reprezentációt alkalmaztunk. Az LPV rendszerek analíziséhez és azzal kapcsolatos tervezések végrehajtásához az egyik leghatékonyabban alkalmazott, a modern technikák közül a politóp reprezentációban értelmezhető lineáris mátrixegyenlőtlenségen alapuló megoldásokat alkalmaztunk. A politóp reprezentációra épülő modellek megalkotásához tenzorszorzat-modell transzformációt alkalmaztunk és azzal kapcsolatos különböző kanonikus és konvex formákat definiáltunk és vizsgáltunk.

A tenzorszorzat-modell transzformáción alapuló megközelítések illetve modellezési technikák eredményesen alkalmazhatóak a földi járművek (közúti haszongépjárművek) dinamikai modelljeinek vizsgálatában, így többek között hatékonyan felhasználható a közúti haszongépjárművek vázszerkezetének modális analízisében is a végeselem alapú módszerek kiegészítéseként. Hasonló módon a transzformáció jól alkalmazható haszongépjárművek irányítási, lengéssel és rezgéssel, fékezéssel és kormányzással kapcsolatos, feladataiban.

Az OTKA támogatásával elért eredményeink az elmúlt évtizedben szinte párhuzamosan megjelent, áttörő jelentőségű irányításelméleti és matematikai eredményekre, illetve rendszerelméleti szemléletváltásra támaszkodik.

A fentiek alapján a következő műszaki feladatot vizsgáltuk meg a gépjárművek lengő rezgő rendszereinek tervezéséhez és vizsgálatához. Ha egy adott modellt - irányítási céloktól függően - konvex optimalizációs feladatként meg tudunk fogalmazni (például lineáris mátrixegyenlőtlenségek segítségével), akkor a feladatok tág osztályát meg tudjuk oldani - függetlenül attól, hogy analitikus megoldó módszer létezik-e vagy sem. A szakirodalomban számos (analitikus) megoldási módszer található arra a feladatra, hogy egy (analitikus formában) adott, lineáris paraméterváltozós állapotter-modellt hogyan lehet olyan affin alakra felbontani, amely a fentiek alapján már könnyen átírható lineáris mátrixegyenlőtlenségekké, természetesen az adott tervezési célok figyelembe vételével. Viszont a modell analitikus átalakítása, például megfelelő affin felbontása, sok esetben nehézkes, időigényes, illetve bonyolultabb modellek esetén a jelenlegi analitikus eszközökkel nem is lehetséges. Ez különösen igaz akkor, amikor a modern identifikációs módszerekkel kapott modell nem - a klasszikus értelemben vett - képletekkel adott, hanem a lágy számítástechnika algoritmikus eszközeivel, például egy neurális hálózattal (ahol az adott modell dinamikáját a neuronok közötti kötések struktúrája, és a kötések súlyainak értékeiből képezhető nagyméretű számtömb reprezentálja). Hasonlóan, ha az adott modell dinamikáját fuzzy szabályok vagy genetikus algoritmusok reprezentálják, akkor az analitikus átalakítás szinte megoldhatatlan. További nehézséget jelent, hogy az analitikus megoldás sem egységes, különböző modellek vagy a modellek megváltozása esetén új levezetést igényel.

Kutatómunkánk során egyik fő cél az volt, hogy mind a szemlélet, mind a matematikai eszköztár szempontjából nézve egységes rendszert dolgozzunk ki bonyolult modellekre épülő irányításelméleti feladatok megoldására. Ezen belül az alábbi feladatokat végeztük el:

Megvizsgáltuk - különös tekintettel a lineáris paraméterváltozós állapotter modellek esetére -, hogy létezik-e olyan modell-reprezentáció, amelyben a konvex optimalizációs feladatok megoldására kidolgozott lineáris mátrixegyenlőtlenségek értelmezhetőek és felírhatóak, valamint amelyre - szemlélet és matematikai eszközök szempontjából egyaránt - egységesen át lehet térni fizikai megfontolások alapján analitikusan levezetett, vagy más modern identifikációs módszerrel eredményezett modell-reprezentációkból.

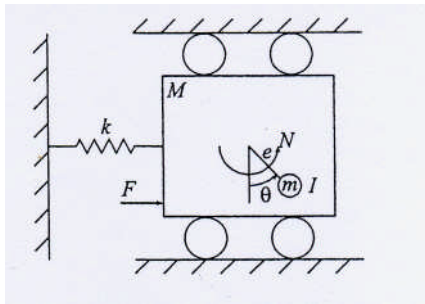
Bemutattuk, hogy a tenzorszorzat-modell transzformáció alkalmazásával a tenzorszorzat-modell reprezentációra való áttérés adott feltételek esetén automatikusan, „emberi beavatkozás nélkül” egységesen elvégezhető. Itt a transzformáció, mint numerikus módszer alkalmazása elsősorban nem egy analitikus képlet megoldását, hanem annál tágabb értelemben vehetően analitikus képletek, vagy különböző modern identifikációs reprezentációk és a tenzorszorzat-modell analitikus képlete közötti átalakítást jelenti, amely egyszerűbb, szerencsésebb esetekben esetleg analitikus levezetéssel is megoldható. A transzformáció numerikus átalakítások sorozatát foglalja magába (mint például N -ed rendű szinguláris értékelbontás), amely tágabb értelemben ugyan, de úgy tekinthető az analitikus levezetéssel egyenértékűnek, mint ahogy ma már egy analitikus képlet megoldásaként elfogadjuk a numerikus módszerek eredményét is. A transzformáció és a lineáris mátrixegyenlőtlenségek együttes megoldása elfogadható időn belül végrehajtható.

Megmutattuk, hogy a tenzorszorzat-modell transzformáció lényeges új, alkotó jellegű szemléletet jelenthet az irányításelméletben, annak ellenére, hogy valamelyest hasonlít a lineáris paraméterváltozós állapotter-modellek affin felbontásához. Felvetettük azt a hipotézist, hogy a szabályozási feladat megoldása során a lineáris mátrixegyenlőtlenségek megoldhatóságát jelentősen befolyásolja az adott dinamikai modell konvex burkának típusa, amely az új reprezentációban jól szemléltethető, vizsgálható és tervezhető. Olyan tervezési szempontok is (például szűk konvex burkok típusainak előállítása) vizsgálhatóak, melyek az eddigi analitikus módszereknél nem merültek fel.

A fenti kutatásokat az alábbi módszerre alapoztuk: A lineáris paraméterváltozós állapotter-modellek, a lineáris mátrixegyenlőtlenségek, valamint a modern - tágabb értelemben vett - identifikációs reprezentációkban megszokott mátrixalgebrai operátorok használata túl bonyolult leírást és többszörös hierarchikus indexelési technikát igényelt volna, különösen az N -ed rendű szinguláris értékelbontás különböző kiegészítései és módosításai esetében. A tenzor-algebrai operátorok alkalmazásánál a *Lathauwer* munkáiban ismertett szemléletet követtük.

A kidolgozott módszerek és bizonyítások az N -ed rendű szinguláris értékelbontásra épülnek. A mátrixalgebrában, és különösen a numerikus lineáris algebrában központi szerepet játszik a mátrixfelbontás vagy kanonikus forma. Az egyik leginkább alkalmazott felbontás a szinguláris értékelbontás. Megjelenését a műszaki alkalmazásokban és szinte minden tudományterületen a számítógépek megnövekedett teljesítménye segítette elő. A szinguláris értékelbontással kapott szorzat mindegyik összetevőjének eltérő, fontos tulajdonsága van, melyekre az alkalmazásokban különböző feladatok megoldását építik.

Az elmúlt évtizedekben megjelent a többdimenziós mátrixok szinguláris-érték felbontása, amit N -ed rendű szinguláris értékelbontásnak neveznek a szakirodalmi tanulmányok. Kulcsszerepet kapott a független komponens analízisben, és dimenzió-redukcióként is megjelent az N -ed rendű faktoranalízisben. Az elmúlt években *Lathauwer* szisztematikus tenzoralgebrai rendszerbe foglalta a szinguláris értékelbontást, információ és reprezentáció szempontjából új tulajdonságok bizonyításával együtt. Ezeket az eredményeket kutatásainkban implicit módon használtuk, és megmutattuk, hogy a tenzorok N -ed rendű szinguláris érték szerinti felbontásának mintájára olyan tenzorszorzat-modellek definiálhatók és állíthatók elő, melyek a szinguláris értékelbontás tulajdonságait kihasználva a dinamikus modellek lényegesen új reprezentációját és vizsgálatát teszik lehetővé. Továbbá megmutattuk, hogy ennek a felbontásnak az analógiájára a folytonos függvények is felbonthatóak - numerikus úton - úgy, hogy azok öröklik a tenzor-felbontás kedvező tulajdonságait.



A tenzor szorzat transzformáció gyakorlati alkalmazhatóságának illusztrálásaként a TORA (Translational Oscillator with an eccentric Rotational proof mass Actuator) rendszer megfigyelő és irányító tervezését (observer and controller design) valósítottuk meg. A vizsgált rendszer jól modellezi a járműrendszerek dinamikai leírásában előforduló problémákat. Ezzel a módszerrel a szabályozó tervezése numerikus feladat, mely könnyen megoldható a MATLAB rendszer felhasználásával.

A rendszert, mint LPV (lineáris paraméter változós) rendszert leíró egyenlet általános alakja az alábbi:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{p}(t)) \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{p}(t)) \cdot \mathbf{u}(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(\mathbf{p}(t)) \cdot \mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(\mathbf{p}(t)) \cdot \mathbf{u}(t)$$

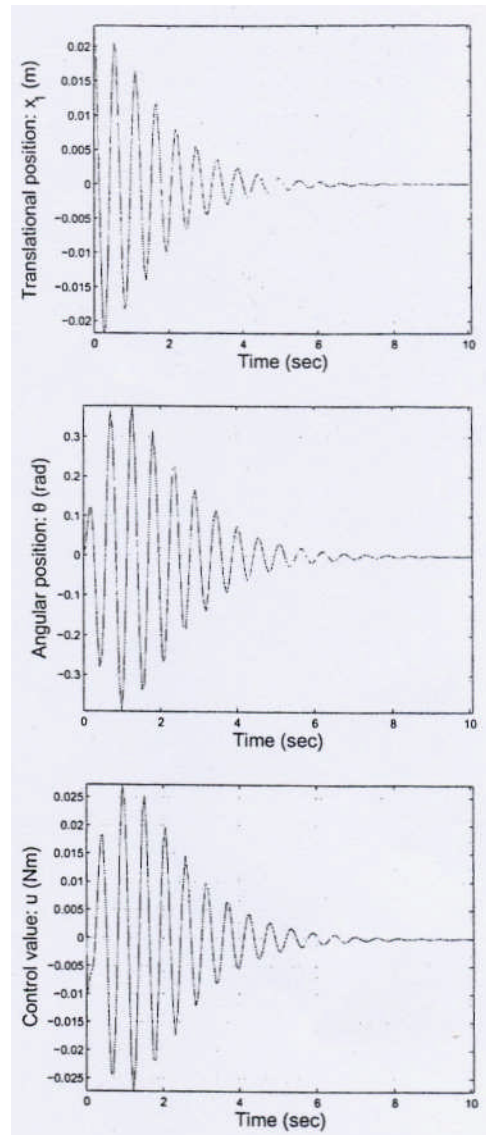
Rendszermátrixa pedig:

$$\mathbf{S}(\mathbf{p}(t)) = \begin{pmatrix} \mathbf{A}(\mathbf{p}(t)) & \mathbf{B}(\mathbf{p}(t)) \\ \mathbf{C}(\mathbf{p}(t)) & \mathbf{D}(\mathbf{p}(t)) \end{pmatrix} \in R^{O \times I}$$

A rendszert minden paraméterérték esetén LTI (lineáris időinvariáns) rendszerek konvex kombinációjával approximáltuk, vagyis a súlyfüggvényekre fennáll, hogy

$$\forall \mathbf{p}(t) : \sum_{r=1}^R w_r \cdot (\mathbf{p}(t)) = 1$$

A rendszer közelítése pedig:



$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{pmatrix} \approx \sum_{r=1}^R w_r \cdot (\mathbf{p}(t)) \cdot \mathbf{S}_r \begin{pmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix}$$

A közelítés hibájára érvényes az alábbi összefüggés, ahol $\varepsilon=0$ véges R esetén általában nem érhető el.

$$\left\| \mathbf{S}(\mathbf{p}(t)) - \sum_{r=1}^R w_r \cdot (\mathbf{p}(t)) \cdot \mathbf{S}_r \right\| \leq \varepsilon$$

A tenzor szorzat transzformációval az adott LPV rendszer rendszermátrixát az alábbi alakra hoztuk:

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{pmatrix} \approx \mathbf{S} \otimes_{n=1}^N \mathbf{w}_n \cdot (p_n(t)) \begin{pmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix}$$

, ahol \mathbf{S} a közelítésnél használt LTI rendszerek rendszerekből felépülő $N+2$ dimenziós tenzor.

Az eljárás során azt kaptuk, hogy a TORA rendszer LPV állapotter modellje megadható tenzor szorzat modellel nyolc LTI vertex rendszerrel. Mint a mellékelt, a szimuláció eredményeit bemutató ábrákon látható, a tervezett irányító és megfigyelő garantálja a megkívánt stabilitást.

III. Összefoglalás

A kutatómunka fő célja olyan integrált nagy méretű járműdinamikai modellek kidolgozása volt, melyek együttesen képesek alkalmazni a különböző statisztikai és fuzzy irányítástechnikai módszereket illetve identifikációs eljárásokat a járműtervezés és méretezés sajátos problémáinak megoldása során.

Kutatásaink során a lineáris és a nemlineáris járműdinamikai rendszerek bizonytalansági tényezőket is figyelembe vevő új típusú modellezési eljárásainak és rendszeridentifikációs algoritmusainak kidolgozásával foglalkoztunk. A járműdinamikai modellezés metodológiai megközelítésében a hagyományos statisztikai rendszeridentifikációs módszerek alkalmazása mellett a különböző lágy számítástudományi megközelítési módok, így többek között a fuzzy logika, fuzzy irányítástechnika, a neurális és fuzzy-neurális hálózatok, továbbá a szinguláris értékdekompozíció (SVD) módszerei is szerepelnek.

A kutatómunka gyakorlati eredményei alkalmazhatóak a hierarchikus modellek komplexitás redukciójában, a balesetelemzés, a járműdinamikai rendszeridentifikáció és a járműirányítás komplex feladatainak megoldása során.