Járműstabilitás kanyarodás közben

BOTTYÁN ZSOLT

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/II. *Témavezető*: Várszegi Balázs, egyetemi tanársegéd, varszegi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozatban azt vizsgáljuk, hogy egy adott körívre történő szabályozáskor stabil lehet-e egy gépkocsi mozgása. A vizsgálat két járműmodellel történik. Az első modellben egy egyszerű kinematikai modellt alkalmazunk, az ún. biciklimodellt, gördülést feltételezve a kerekek és az út kapcsolatában. A második modell egy dinamikai modell, amely figyelembe veszi a gumiabroncsok viselkedését is. Az analitikus számítások eredményeit numerikus szimulációval támasztjuk alá. Ezekben az esetekben a szabályozás valós idejű visszacsatolással működik. A valóságban azonban nem lehet időkésés nélkül visszacsatolni a hibát. A szabályozástechnika kritikus része az időkéséssel történő visszacsatolás, ezért a kinematikai modellen időkésés esetére is elvégezzük a vizsgálatot. A dinamikai modell bonyolultabb és nagyobb számú mozgásegyenletei segítségével pedig numerikus szimulációt hajtunk végre.



1. ábra: A kormányszög alakulása az idő függvényében, PD-szabályozó használatával

2. Alkalmazott módszerek

A stabilitás vizsgálatát a kinematikai modellen először a hibával arányos szabályozótaggal végezzük. A hibát az előírt és a valós pályaív sugarának különbségeként definiáljuk. Ezt a szabályozót bővítjük később a hiba deriváltjával arányos tag bevezetésével. Az analitikus számítások és a numerikus szimu-

3. Eredmények

Kinematikai modellünk esetében az aszimptotikusan stabil egyensúlyi helyzetbe való beálláshoz elégséges volt egy PDszabályozó használata. A stabilitási kritériumok ebben az esetben elég tág határok között engedik meg a paraméterek választását. A vizsgálat során kiderítettük, hogy egy egyszerű P-szabályozóval nem érhető el aszimptotikus stabilitás, annak eléréséhez szükséges egy D-tag is. A stabilitási térképeken látható, hogy a sebesség növelésével a stabil tartomány területe szűkül. A mi esetünkben 10 [m/s]-ról 35 [m/s]-ra történő váltás esetén igen jelentős ez a területszűkülés. Hasonló eredményt hozott a a stabil tartomány időkésés növelésével járó területváltozása is. Az időkésés értékének 0,5 másodpercről 1 másodpercre történő növelésével a stabil tartomány területe drasztikusan lecsökkent. A dinamikai modellnél a kinematikai modell egyensúlyi helyzetét és stabilitási kritériumait felhasználva nem jutottunk az egyensúlyi helyzet körüli stabil mozgáshoz. A rendszerben állandósul egy hiba, amelyet PD-szabályozóval nehézkes kiküszöbölni. A hiba kiküszöbölésére PID-szabályozót lehetne használni. Az integráló tag megfelelő megválasztásával a hibát meg lehet szüntetni.



2. ábra: A dinamikai modell pályájának előírt (narancssárga) és valós (kék) sugara a szimuláció során

4. Összefoglalás

lációk eredményeinek összehasonlítása után az időkésés hatását vizsgáljuk a stabilitásra. Stabilitási térkép segítségével határozzuk meg a stabil paramétertartományt. A térképet több sebességnél és időkésés értéknél is megrajzoljuk, majd ebben az esetben is futtatunk numerikus szimulációt. A dinamikai modell mozgásegyenleteit a Kane-módszer szerint határozzuk meg, majd időkésés nélküli numerikus szimulációt hajtunk végre a kinematikai modelléval azonos feltételekkel. A kinematikai és dinamikai modelleket összehasonlítva látszik, hogy míg az egyszerűbb modell PD-szabályozóval is stabillá tehető, a dinamikai modell esetében ez már nem elégséges. A kinematikai modell három, viszonylag egyszerű mozgásegyenletet eredményezett, míg a dinamikai modell esetében a mozgásegyenletek száma már öt. Ebből látható, hogy a modellek valóságot jobban közelítő finomítása bonyolultabb szabályozókat igényel a stabilitás eléréséhez.



Squash labda becsapódásának végeselemes szimulációja

Fejér András

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/II. *Témavezető:* Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozatom célja egy squash labda becsapódásának vizsgálata a becsapódás előtti sebesség függvényében. A squash labda egy gumiból készült gömbhéj, melynek belsejében környezeti nyomású levegő van. A labda dinamikáját a labda belsejében lévő levegő és a természetes gumiból készült külseje egyaránt befolyásolja.

2. Alkalmazott módszerek

2.1. Mérések

Alapvetően kétféle mérést alkalmaztam. Először a Műszaki Mechanikai Tanszéken található nagysebességű kamera segítségével készítettem felvételeket a labda becsapódásáról, hogy meghatározhassam a visszapattanási sebességeket.



1. ábra. A mért és szimulált deformációk összehasonlítása

Több nyomókísérletet is végeztem különböző squash labdákon. Minden labdát kétszer mértem le, egyszer úgy, hogy nem volt lyuk a labdán, és egyszer úgy, hogy fúrtam rá egy lyukat, így a levegő szabadon tudott távozni a squash labdából.



hiperelsztikus tulajdonságot modelleztem. Először egy szimulációt végeztem a kifúrt labda összenyomására, majd a nem kifúrt labdára és végül a labda becsapódását is szimuláltam.



3. ábra. A feszültség eloszlások összehasonlítása

3. Eredmények

A szimulációs és mérési eredmények összehasonlítása a 4 ábrán látható.



4. ábra. Mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása

Azokat az elhanyagolásokat figyelembe véve, amiket a szimuláció során alkalmaztam, a szimulációs eredmények megfelelően egyeznek a mérési eredményekkel. A 4 ábrán látható, hogy a becsapódás előtti sebesség növelésével a labda ütközésekor a szimuláció és a mérés esetén is az energia

2. ábra. A mért és szimulált nyomókísérletek összevetése

2.2. Szimulációk

Háromféle szimulációt végeztem ABAQUS környezetben. Mindhárom szimuláció esetén a squash labda viszkoelsztikus tulajdonságát elhanyagoltam és csak a súrlódást és a veszteség nő.

4. Összefoglalás

A dolgozatom eredményei alapján megállapítható, hogy az alkalmazott módszer egy jó közelítést ad a squash labda becsapódásának modellezésére, és tovább fejlesztve egy megfelelő módszert adhat a labda dinamikájának megismerésére.



Virtuális mérési háló létrehozása szimulációs modelleken

LÁSZLÓ LEVENTE

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/II. *Témavezető:* Pölöskei Tamás, doktorandusz, poloskei@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Szakdolgozatom során az AUDI HUNGARIA Zrt. által indított folyamat fejlesztési projektben vettem részt. Modális analízis során mért pontok drótváz hálójának létrehozására kerestem új, innovatív megoldást.

Cél volt, hogy minél gyorsabb, pontosabb és lehetőség szerint automatizálható, vagy algoritmizálható legyen az új eljárás, a régi lassú, pontatlan, sok többletmunkát igénylő folyamattal szemben. Továbbá meghatározott szempont volt, hogy a mérés kiértékelő szoftver az LMS Test.Lab, az elkészült hálót ebben kell tudni olvasni.

A drótváz hálónak mérések kiértékelésénél és dokumentációk készítésénél van szerepe, mert ezen vizualizálhatók a lengésképek, a gyorsulásérzékelők által mért adatok alapján.

2. Alkalmazott módszerek

A haló a korábbi módszer szerint úgy készült, hogy lemérték a szenzorok közötti távolságot mérőszalaggal, ezeket feljegyezték, majd az egyes pontok helyét ezen adatok alapján kiszámolták, majd egyesével LMS Test.Lab-be betáplálták az adatokat. Ezután az egyes pontokat elnevezték, majd összekötötték őket. Érzékelhető, hogy ez nagyon időigényes és pontatlan folyamat.



1. ábra. Szimuláció szoftverben létrehozott drótváz háló

Az új módszer során a pontok létrehozásához, elnevezéséhez és összekötéséhez egy szimulációs szoftvert hasz-

3. Eredmények

A fejlesztési folyamat befejeztével egy valós projekten próbáltam ki a módszert. Itt egy autó egyes alkatrészeinek modális analízisét végezték beépített környezetben. Az ajtókon, a motorházfedélen és a csomagtérfedélen voltak gyorsulásérzékelők, összesen 62 darab. A pontok létrehozása és összekötése gördülékenyen ment, az elkészült háló megfelelt az elvárásoknak. Így a mérést kiértékelő dokumentációban ezen a drótvázhálón szemléltették a lengésképeket.



2. ábra. Elkészült drótváz háló LMS Test.Lab programba beolvasva

4. Összefoglalás

Sikerült egy jobb és több szempontból javított eljárást kifejleszteni. Ennek eredményeképp a folyamat jelentősen gyorsult. Egy 2 hetes határidejű projekt során az új módszer használatával akár 2-3 napot lehet megspórolni. További előny, hogy a háló pontosabb lett, jobban követi az autó vonalait, valamint ahol lehetett automatizáltuk az eljárást. Így elmondható, hogy teljesültek az előzetesen kitűzött célok.

náltunk, a BEAT CAE cég által fejlesztett META posztprocesszálót. A különböző folyamatok a lehető legnagyobb mértékben automatizálva lettek, az elnevező és összekötő modulok segítségével.

A szimulációs szoftverrel támogatott drótváz háló készítést a cégnél elfogadták. A tesztek jól sikerültek, jelenleg standardizálás alatt áll a eljárás, így a modális analízis munkautasítási dokumentumába is be lesz építve.



Numerical simulations of an astronomy related deformable mirror

DÁVID JÁGER

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2017/2018/I. Supervisor: Dr. Bálint Magyar, assistant professor, <u>magyar@mm.bme.hu</u>

1. Introduction

The goal of the thesis is to prepare the FEA and investigate the applicability of a demonstrator deformable mirror developed in OPTICON program for astronomy applications. The study is divided into two parts. Firstly, the actuator FEA, measurement and their comparison are presented. This part includes the applicability investigation as well. The most relevant task is to determine the characteristics of the actuators for further examinations and simulations. The second part was to prepare the FEA of the mirror concept by using the results of actuator investigation. The active mirror is a brand-new design in terms of the direction of actuators with respect to the normal vector of the optical surface. The forces on the mirror from actuators act perpendicularly to the normal vector. This new concept can lead to reduction the number of actuators.



1. Figure Schematic representation of the two ways of deforming a mirror utilizing actuators Left: basic design, right: new design

2. Applied methods

During both parts of the study, FEA were utilized and compared to measurement results. In the first part, the actuators were investigated. The FE model was simplified to reduce computational efforts. Linear variable differential transformer (LVDT) and Load cell were applied in the tests to obtain the characteristics of the actuators.

After that, a general actuator characteristic was used in the part of mirror simulation. Interferometer measurement was conducted to verify the model. The final goal was to produce a coma on the mirror optical surface by using the actuators. The required actuator positions were calculated by the verified FE model.



2. Figure Characteristics of the actuators.

Producing the coma, the tested 10 actuators were mounted on the back of the mirror. Due to neglect as appying a deduced general actuator characteristics instead of their real force-displacement functions, the goal was not to produce a perfect shape but only a similar one.



3. Figure Coma produced on the mirror optical surface. Left: required, middle: FEA, right: interferometer

Furthermore, the FE model is applicable for node and actuator layout optimization in further studies.

4. Summary

The FE models performed were useful from the point of view of the project and the numerical simulations were able to be verified by the measurement methods presented. The investigated actuators could deform the mirror as we requested, and actuator layout optimization can be performed for the as-built

3. Results

Although, the actuator characteristics differed from each other, generally they were similar to the FEA result. Thus, the characteristics applied later was deduced from the numerical simulation.

Budapest University of Technology and Economics Faculty of Mechanical Engineering Department of Applied Mechanics H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. www.mm.bme.hu



mirror. Last but not least, node layout simulation is also able to be applied for a new mirror design.

Vibráció kritikus elektronikai vezérlőegység dinamikai viselkedésének modellezése végeselemes módszerrel a komponensek közti kapcsolatok figyelemebe vételével

ÁCS DÁNIEL

Gépészmérnöki MSc Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2017/2018/I. *Témavezető:* Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozat szimulációs módszerfejlesztésről szól, aminek célja a dinamikus viselkedés pontosabb predikciója. A vizsgálatokat rázóasztalon végeztem és a mért eredményeket hasonlítottam össze a szimulációból érkező eredményekkel. Az összehasonlítás során az eredmények igen eltérőek voltak, ami abban nyílvánult meg, hogy az átviteli függvény szimulációból nem látszottak bizonyos módusokat. A dolgozatom egyik fő célja volt, hogy ennek okát feltárjam és implementálni tudjam a szimulációs modellembe.



1. ábra. A vizsgált PCB szimulációs modellje

2. Alkalmazott módszerek

A vizsgálat során a rázóasztalra négy referencia szenzor lett elhelyezve. A mérés során használt szenzorokból egyet kiválasztva megvizsgáltam az 'x,y,z' irányú jelét, amit a 2. ábra is mutat. A sárga szín a 'z' irányt jelöli a beállított 9.81 $[ms^{-2}]$ -es gyorsulással, valamint kékkel az 'x' és pirossal az 'y' kereszt irányokat.



nem tudja megvalósítani a beállított egy tengelyű gerjesztést és az egyes frekvenciákon mind az 'x' és mind az 'y' irányban ébrednek jelentős gyorsulások, amik már nem elhanyagolhatóak a beállítotthoz képest. Ezt felhasználva a szimulációban azért nem volt látható bizonyos sajátfrekvenciákat az átviteli függvényekben, mert a keresztirányok körüli rotáció és transzláció olyan módusokat is meggerjeszt, amik tiszta 'z' irányban nem gerjeszthetők. A módszer jelenleg 4 [kHz]-ig mondható stabilnak, ugyanis ez a frekvencia felett már akkora hibával dolgozik a rázóasztal, hogy az már nem felel meg a korábban beállított értéknek.

3. Eredmények

Az átviteli függvényben az egytengelyű gerjesztést kiegészítve az elfordulással az összes módus láthatóvá vált, amint az a 3-as ábrán is látszik. Az ábrán pirossal a szimuláció, míg kékkel a mért eredmények láthatók. A bekarikázott részeket korábban a szimulációk nem látták, viszont az új gerjesztéssel ezek is láthatóvá váltak az átviteli függvényben. A mérés és a szimulált eredmények között ugyan van némi különbség, viszont a szimuláció fedi a mérést, ami a biztonság irányába tolja el a tervezést.



3. ábra. Rotációval és transzlációval kiegészített átviteli függvény

4. Összefoglalás

2. ábra. Referencia szenzor által rögzített jel

A referencia szenzor jeléből látszik, hogy a rázóasztal

A szimulációk sokáig a rázóasztalos vizsgálatokat egytengelyű gerjesztéssel vizsgálták. A mérések során referenciaszenzorok által mért értékek megmutatták, hogy hiába egytengelyű gerjesztés lett beállítva, a valóságban a rázóasztal nem tudja teljesíteni, még alacsonyabb frekvenciákon sem. Ezeket az úgynevezett "bólogatásokat" implementálva a szimulációs modellbe, az újonnan kapott átviteli függvények már az összes frekvenciát megtalálták az átviteli függvényben, amik a mérésben is láthatóak voltak.



Inverz inga egyensúlyozása nemlineáris Nomura-szabályozóval

Furka Levente

Gépészmérnök MSc, Alkalmazott mechanika specializáció, 2017/2018/II. Témavezető: Dr. Insperger Tamás, egyetemi docens, insperger@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az emberi egyensúlyozás folyamatát leíró késleltetett *PD* illetve *PDA* szabályozókat tartalmazó modellek szerint a legrövidebb inga, amit az ember egyensúlyozni képes *PD*-esetben $\sim 39[cm]$ *PDA*-esetben $\sim 22[cm]$, ami nem felel meg a valóságnak, mert az ember képes akár $\sim 19[cm]$ hosszúságú pálcát is az ujjhegyén egyensúlyozni. A dolgozatom célja a nemlineáris Nomura-szabályzó vizsgálata, amely alkalmazása esetén a szabályzóerő a fázissík bizonyos tartományaiban ki illetve bekapcsol, növelve ezzel a *P-D* paramétersíkon a stabil tartományok területét.



1. ábra: Szabályzás a fázissík alapján

2. Alkalmazott módszerek

Stabilitási térképeket készítettem a szakaszos szabályozás esetére a késleltetett

PD illetve *PDA* szabályozót tartalmazó differenciálegyenletek numerikus szimulációja segítségével. A két említett modell a következő alakú:

$$\ddot{\varphi}(t) - a\varphi(t) = -P\varphi(t-\tau) - D\dot{\varphi}(t-\tau)$$
$$\ddot{\varphi}(t) - a\varphi(t) = -P\varphi(t-\tau) - D\dot{\varphi}(t-\tau) - A\ddot{\varphi}(t-\tau)$$

A szimulációkat a *P-D*-paramétersík pontjaira a negyedrendű Runge-Kutta-módszerrel végeztem c# nyelven. Ha egy adott ponttal végzett számítás esetén a pálca dőlésszöge meghaladt egy kritikus értéket (a pálca ledőlt az ujjról) a paraméterpár instabilnak, ellenkező esetben stabilnak minősült. Az így kapott stabilitási térképek nagyban különböznek a

3. Eredmények

Alapvető tapasztalat, hogy a szabályozóerő ki-be kapcsolását meghatározó tartomány a fázissíkon, nagyban befolyásolja a kialakuló stabil paramétertartományok méretét illetve alakját. *PD*-szabályozás esetén a Nomura-szabályozással elérhető minimális ingahossz a folytonos esettel ellentétben ~27[*cm*], azonban a *PDA*-esetben nem következett be csökkenés a legrövidebb egyensúlyozható inga hosszának tekintetében. A szimulációk ellenőrzése céljából méréseket is végeztem a tanszéki kamerarendszer segítségével, aminek az eredményei azt mutatják, hogy a Nomura-szabályozásra utaló jelek néhol megfigyelhetőek a mért függvényekben azonban a teljes folyamat nem teljesen a modellel összhangban zajlik le.



2. ábra: Túlélési idők PD-szabályozás esetén

4. Összefoglalás

A mérések és a szimulációk alapján elmondható, hogy megfigyelhetőek a szakaszos szabályozásra utaló tendenciák a mért jelekben, azonban az emberi agy pontos szabályozási módszerét még mindig nem ismerjük. A számítások alapján viszont egyértelműen kijelenthető, hogy a Nomura-*PD*-szabályzó jobb eredményt ad, mint a folytonos megfelelője a legrövidebb egyensúlyozható inga tekintetében.

folytonos szabályozás esetén kapottaktól. Mivel a rendszerek stabilitása nagyban függ a kezdeti feltételektől ezért a paramétertartományok pontjaihoz az ún. túlélési időt is hozzárendeltem, ami azt mutatja, hogy a pont alkalmazása az egyenletekre 90 különböző kezdeti feltétel esetén átlagosan hány másodperces stabil mozgást eredményezett.



Modelling and Simulation of Break-Away and Pull-Off Tests of Electronic Battery Sensor CLASSIFIED

KIRÁLY, PÉTER

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2017/2018/I. *Supervisor*: Dr. Attila Kossa, associate professor, kossa@mm.bme.hu

1. Introduction

In my study I develop simulation methods for two mechanical tests (*Figures 1-2*) of a sheet metal part and measurement methods to validate them using existing measurement machines and finite element software.



1-2. Figure Break-Away (left) and Pull-Off test (right)

2. Applied methods

First it was crucial to build up a relationship between the tightening torque and the axial force in the bolt during bolt tightening of the sheet metal part, thus isolating thread and nut friction, the effect of which should be neglected in the simulation.

For this I designed a special measurement tool (*Figure 3*) with which tightening measurements can be carried out without the bolt (solution: cylindrical joint instead of a helical one).

Next with explicit simulation method in LS-Dyna the bolt tightening was simulated with the help of a loaded virtual beam element. (The other solution was cylindrical joint with a "joint motor", but this displacement driven method showed too much oscillation.)

3.Figure Measurement tool

After determining the friction coefficient between the pole clamp and the battery pole,

great results were achieved with the characterized pole clamp material model and a scanned pole clamp geometry.



4. Figure Tightening torque vs Axial force curve fitting

I developed and tested new measurement setups for the two mechanical tests and built up simulation methods for them. With the final models both phenomenon-wise and value-wise good match was found comparing the simulation results with the measurements. This can be seen in *Figures 5-6*.



5-6. Figure Final measurements vs. Simulation comparison of the two tests

3. Results

I found linear relationship between the tightening torque and the axial force (*Figure 4*).

4. Summary

Building up simulation models for the tests was successful. However, either more parameters should be taken into consideration or the boundaries should be considered within which they can be used to give realistic results.

Budapest University of Technology and Economics Faculty of Mechanical Engineering Department of Applied Mechanics H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. www.mm.bme.hu



Finite element simulation of stress state in HTS coils

Péter Árpád Mizsák

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2017/2018/II. Supervisor: Dr. Attila Kossa, associate professor, kossa@mm.bme.hu Advisor: Dr. Attila Pálfalvi, research engineer, paf@mm.bme.hu

1 Introduction

The phenomenon of superconductivity provides the opportunity for numerous new and more advanced applications in the field of electromagnetics, however the currently available high temperature superconductors (HTS) often face mechanical degradation during application. Failure was repeatedly reported for epoxy impregnated coils wound from 2nd generation (2G) HTS tape caused by the delamination of the superconducting tape presumably due to excessive tensional radial loading. Stronger 2G HTS materials are being developed, but the present goal is to exploit the opportunities of the available technology, hence many researchers focus on developing degradation-free coil manufacturing techniques.

The goal this work was to support these developments with FE simulations, thus the main ideas published in this topic are collected and tested.



Figure 1: Structure of a SuperPower 2G HTS tape

2 Simulation model

In order to test different coil fabrication techniques a Java model generator was used (made by my advisor) which is capable of building coil models having arbitrary number of turns in COMSOL. These models were modified according to techniques mentioned in the literature in order to test their effectiveness. The coil simulation usually consisted of

3 Results

The simulations confirmed that tensile radial stress appears in the winding due to the mismatch of the thermal contraction coefficients of the materials in the construction. The main source of the radial tension was identified in the excessive shrinkage of the coil form, hence the methods eliminating this effect resulted in the least dangerous stress states.



Figure 2: Radial stress distribution in the winding visualized with magnified $(10\times)$ deformed shape

A comprehensive series of coil experiments was carried out at Siemens in 2012 with 9 different configurations. Their tested coils were modelled, and their results were reproduced by simulations. The source of degradation was found in the highly contracting coil form again.

Finally, the time dependence of the cooling process was modelled in order to examine the transient effects. By this simulation a more dangerous stress state was identified during the cool-down than at the isothermally cooled construction due to the huge temperature differences in the system. More precisely the coil form cools faster than the impregnated winding, hence the effect of its contraction is magnified.

4 Summary

the following three steps:

- winding of the 2G HTS tape on a coil form,
- impregnation with epoxy resin at the sides, and
- cooling to operational temperature (77 K).

The 2G HTS is an anisotropic tape which is sensitive to transverse tension, hence this (radial) stress component was examined in the winding. According to the literature the degradation criterion is 10-15 MPa radial tension. A better criterion was not in the scope of the present project.

Based on the results of the many simulated cases suggestions are made for degradation-free coil fabrication. The most important point is the appropriately selected coil form material having matching thermal contraction properties with the winding. A release layer between the former and the first turn is still suggested due to the transient effects. The winding tension should be increased until the hoop stress remains below the longitudinal strength of the tape. This way epoxy impregnation can be used without problem.

Budapest University of Technology and Economics Faculty of Mechanical Engineering Department of Applied Mechanics H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. – www.mm.bme.hu



Járművek pozíció szabályozása optimális irányítás felhasználásával

MOLNÁR GERGELY

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2017/2018/II. *Témavezető*: Várszegi Balázs, tanársegéd, varszegi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozatban egy egyszerűsített 3 szabadságfokú jármű modellen, az iparban is népszerű lineáris kvadratikus szabályozás (LQR) módszere került bemutatásra. A sávváltásnak, mint gyakori forgalmi eseménynek az optimális megvalósítását tűztük ki célul. Elsőnek egy tisztán gördülő modellen alkalmaztuk a módszert, ahol a kerekek sebességének iránya mindig egybe esett a kerekek menetirányával. Ebben az esetben kinematikai kényszereket írhatunk elő, amelyek igazak lesznek a mozgásra. Az így kapott eredményeket hasonlítottuk össze a klasszikus állapotvisszacsatolásos módszerrel. Majd egy bonyolultabb, a kerék kúszását is magába foglaló modellen vizsgáltuk a szabályozó működését.



1. ábra. Sávváltás szemléltetése az egyszerűsített járműmodellel

2. Alkalmazott módszerek

A lineáris kvadratikus szabályozó, lineáris rendszerek esetén (1) meghatározza az optimális megoldáshoz szükséges **K** erősítési mátrixot a megadott **Q** és **R** súlymátrixokra. A megoldás a lineáris rendszerekre meghatározott funkcionál minimumának kereséseként adódik (2).

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \left(\boldsymbol{A}(t) - \boldsymbol{B}(t)\boldsymbol{K}(t)\right)\boldsymbol{x}(t) \,. \tag{1}$$

A kinematikai és dinamikai modell mozgásegyenleteinek felírásához a Gibbs-Appell módszert alkalmaztuk. A módszer előnye, hogy a megoldást elsőrendű differenciálegyenlet rendszer formájában szolgáltatja. A dinamikai modell esetén a kerék kúszását és az ebből adódó erőt az úgynevezett Pacejkaféle gumi modellel vettük figyelembe.

3. Eredmények

A sávváltás minőségét olyan szempontok szerint határoztuk meg, mint a jármű hosszirányú sebessége és annak változása, a sávváltás időtartalma. A dinamikai modell esetén figyelembe vettük továbbá a jármű laterális- és szögsebességét. Az egyszerűbb kinematikai modell esetén kisebb javulás volt elérhető az LQR módszerrel. A bonyolultabb, a kerék kúszását is figyelembe vevő modell esetén a sávváltás megvalósítása minőségileg jobbnak tekinthető. Egy ilyen mindkét szabályzási módszerrel megvalósított mozgást szemléltet az x - y síkon az alábbi ábra:



2. ábra A jármű mozgása LQR és állapotvisszacsatolásos irányítás során

4. Összefoglalás

A kinematikai modell esetén valamivel jobb eredményt sikerült elérni az LQR módszerrel. Ebben az esetben viszont az állapotvisszacsatolásos módszerrel történő szabályozás sem volt nehéz feladatnak mondható.

A dinamikai modell esetén, a meghatározott differenciálegyenlet rendszer hat darab állapotváltozóból állt. Ezt a rendszert a hagyományos állapotvisszacsatolásos módszer segítségével nehezebb volt a minőségi szempontokat figyelembe véve szabályozni. A lineáris kvadratikus szabályozás erőssége itt mutatkozott meg, mivel bizonyos mértékig egymástól függetlenül tudtuk korlátozni az egyes állapotváltozók, és szabályozási paraméterek maximális eltérését a kívánt értéktől.

$$\min\left(\int_{t_0} \mathbf{x}^{\prime}(t)\mathbf{Q}\mathbf{x}(t) + \mathbf{u}^{\prime}(t)\mathbf{R}\mathbf{u}(t)dt + \mathbf{x}^{\prime}(t)\mathbf{S}\mathbf{x}(t)\right)$$
(2)

A \mathbf{Q} és \mathbf{R} mátrixokat aszerint határoztuk meg, hogy az egyes állapotváltozóknak és szabályozási paramétereknek legfeljebb mekkora eltéréseket engedhetünk meg a kívánt értékektől.



Vontatott kerék dinamikája

SERFŐZŐ DÁNIEL

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2017/2018/II. *Témavezető*: Dr. Antali Máté, egyetemi adjunktus, antali@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Egy kereket abban az esetben nevezünk vontatottnak, ha a kerék talajjal érintkező pontja a menetirány szerint hátrébb helyezkedik el, mint a kereket a járműhöz vagy valamilyen más guruló szerkezethez kapcsoló tengely talajra eső döféspontja. Erre a gyakorlatban számos példát lehet mondani, mint az utánfutó, félpótkocsi vagy éppen egy babakocsi vagy biciklikerék. Ezek modellezése többféleképpen, akár egymástól lényegesen eltérő megközelítések szerint történhet. A feladat kidolgozása során az 1. ábra szerint adott 3 DoF mechanikai modellt vizsgáljuk, elsősorban a kerék mozgásának szimulációjára koncentrálva.



1. ábra. A vontatott kerék mechanikai modellje

2. Mozgásegyenletek

A kerék mozgását illetően két lényegesen eltérő esetet különböztethetünk meg, gördülést és csúszást. Ezekre vonatkozóan a mozgásegyenleteket is különbözőképpen kell levezetni. Előbbi esetben ez a Routh-Voss egyenleteknek megfelelően történik, melyet a gördülő kerékre alkalmazva a következő eredményt kapjuk:

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \sin(\psi) + l\omega \\ \omega \\ f_{\omega}(\psi, w, \omega) \end{bmatrix}$$

Amennyiben a kerék csúszik, úgy a másodfajú Lagrange egyenleteket érdemes használni. Így a mozgásegyenletek az alábbi alakban írhatók fel:

3. Eredmények

A mozgásegyenletek meghatározását követően elvégezhetjük a rendszer lineáris, majd nemlineáris stabilitásvizsgálatát. Eszerint a rendszerben szub- és szuperkritikus bifurkáció egyaránt előfordulhat. A számítások megkezdése előtt érdemes meghatározni a csúszási határt jelentő szögkitérést a hossz függvényében, így az ábrázolható a bifurkációs görbékkel közös diagramban. A szimulációt explicit Runge-Kutta módszert alkalmazva végezzük. Az így végzett vizsgálat célja, a hossz függvényében meghatározni azon kezdeti szögkitérés értékeket, melyeknél a kialakuló rezgés szögkitérés amplitúdója 90 [°] alatt marad. Vizsgáljuk továbbá a kialakuló rezgés jellegét is, eszerint a számított tartomány további részekre bontható. A számított felosztást szemléltető 2. ábrán a szaggatott vonal jelöli az egyensúlyi helyzetet gördülés esetén, illetve a kialakuló határciklus amplitúdóját. A folytonos szürke vonal pedig azt a maximálisan megengedhető szögkitérést mutatja, ahol a kerék még nem csúszik meg.





2. ábra. A bifurkációs diagram felosztása a szögkitérés maximuma és a rezgés jellege szerint (szubkritikus esetben)

4. Összefoglalás

Végezetül elmondhatjuk, hogy az általunk elvégzett vizs-

$$\begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\omega} \\ \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot \sin(\psi) + l\omega + u_2 \\ \omega \\ f_{\omega,u}(\psi, w, \omega) \end{bmatrix}$$

gálat segítségével meghatározható, hogy adott sebesség és rendszer paraméterek esetén miként alakulnak a kerék mozgását leíró változók időfüggvényei. A bifurkációs diagramra felrajzolt tartományok tetszőleges szögkitérés maximumra vonatkoztatva előállíthatók. Emellett az általunk használt modellen végzett szimuláció segítséget nyújthat a megfelelő szerkezeti paraméterek kiválasztásához is. Így a jelen dolgozat eredményein keresztül bemutatott eljárás akár valós konstrukciók fejlesztése során is jó kiindulási alapot szolgáltathat.



Erőforrások megosztásával történő szabályozási stratégiák

KOPASZ MÁRK DÁVID

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/II. *Témavezető*: Dr. Csernák Gábor, egyetemi docens, csernak@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A cél olyan szabályozási stratégiák kidolgozása, melyek használatával két különálló rendszert tudunk szabályozni úgy, hogy a rendelkezésre álló erőforrást megosztjuk azok között. Ez azt jelenti, hogy a két rendszert egyszerre nem tudjuk szabályozni: a szabályozás hol az egyik, hol a másik rendszerbe avatkozik be. Első feladat az erőforrások megosztásának matematikai leírása úgy, hogy vizsgálható legyen a rendszerek viselkedése és stabilitása. A dolgozatban az erőforrások megosztását egy mechanikai példán keresztül vizsgáltam: az erőforrást két inverz inga között osztottam meg, majd két konkrét szabályozási stratégiát is megvizsgáltam.

2. Alkalmazott módszerek

Az erőforrások megosztásának matematikai leírása kapcsolt dinamikai rendszerek segítségével valósítható meg. Egy kapcsolt dinamikai rendszer több alrendszerből áll. Lényege, hogy egy bizonyos kapcsolási szabály szerint kapcsolgat az alrendszerei között úgy, hogy azok stabilak maradjanak. A teljes kapcsolt rendszer leírásához egy olyan mátrixot kell létrehozni, mely az alrendszereket leíró mátrixokból állítható elő. A vizsgált stratégiákban a leíró mátrix az alrendszermátrixok szorzatából jött ki. A kapcsolt rendszert leíró mátrixot stabilitás szempontjából két módszerrel is vizsgáltam. Az első módszer a mátrix sajátértékeinek elhelyezkedését vizsgálta a komplex számsíkon. Diszkrét idejű rendszereknél a rendszer akkor stabil, ha a leíró mátrix sajátértékei az egység sugarú körön belül helyezkednek el, azaz a mátrix Schur. A második módszer a Ljapunov-tételeken alapuló módszer. Lényege, hogy a diszkrét idejű Ljapunov-egyenlet (1. egyenlet) megoldása a leíró mátrixra nézve (A) pozitív definit legyen, tehát bármely Q>0 esetén **P** pozitív definit.

$$\boldsymbol{P} - \boldsymbol{A} \boldsymbol{P} \boldsymbol{A}^T = \boldsymbol{Q} \tag{1}$$

A dolgozatban két konkrét stratégiát is kidolgoztam, melyek két inverz ingát kapcsolt rendszerként szabályoznak.



Az első stratégia a periodikus kapcsolás. Lényege, hogy előre definiáljuk a kapcsolási szabályt, ami szerint kapcsolgatunk az ingák között, majd ezt a kapcsolási sorrendet ismételjük. A rendszert leíró mátrix ekkor egy mátrixszorzat, melyet úgy kapunk, hogy a megfelelő sorrendben összeszorozzuk az alrendszermátrixokat. Így a stabilitás vizsgálható, szimulációkkal a karakterisztika megkapható (*1. ábra*).

A második stratégia a kritikus állapothoz kötött szabályozási stratégia. Ekkor egy kritikus kitérési értéket adunk meg, melyet, ha az ingák kitérése meghalad, aktiválódik a szabályozás.



2. ábra. A kritikus értékhez kötött szabályozás sebesség-állapot

diagramja

A szabályozás digitális, így a szabályozás kerekítéssel él. A kerekítést zavarásként vizsgálhatjuk. A stabil kapcsolt rendszert nem teszi instabillá a zavarás, ha az korlátos. Tehát, ha belátható, hogy a jelen levő zavarás korlátos, akkor kimondható, hogy stabilitás szempontjából az nincs hatással a rendszerre.

A kerekítésből adódó zavarás $-b\chi_j$ tagként jelenik meg a rendszerben, ahol **b** konstans, χ_j pedig -1 és 1 közötti értékű. Tehát a zavarás korlátos.

3. Összefoglalás

A két kidolgozott stratégia megfelel a stabilitási kritériumoknak, és képesek stabilan szabályozni a két inverz ingát. A szabályozási szempontok döntik lel, hogy melyik stratégiát érdemes használni. Például, ha a kisebb számítási igény az elsődleges szempont, akkor célszerű a periodikus kapcsolási stratégiát választani, hiszen ekkor előre definiáljuk a kapcsolási szabályt, azt nem változtatjuk. Viszont ha az elsődleges szempont az, hogy a szabályozás csak indokolt esetben legyen aktív, akkor a kritikus értékhez kötött szabályozási stratégiát tekinthetjük alkalmasabbnak.

1. ábra. A periodikus szabályozás sebesség-állapot diagramja

Fejlesztési lehetőség: olyan célfüggvény meghatározása, mely nem csak teljesíti a fent említett stratégiák feltételeit, hanem optimalizálja is azokat.

