Experimental and numerical analysis of impact phenomena of squash ball and racket

BENCE BERENCSI

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. *Supervisor*: Dr. Attila Kossa, associate professor, kossa@mm.bme.hu

1. Introduction

The paper was written with the purpose of continuing my research started in my BSc thesis then followed by the Students' Scientific Conference. My main goal at the time was to form an overall summary of the dynamics of squash balls which now will be completed by the investigation of the ballracket impact phenomenon. My aim was to perform high-speed camera recordings and to develop a finite element model then compare the results of the numerical simulation to the measurements.



1. Ball-Racket impact

2. Applied methods

I used a self-built air-cannon which allowed me to adjust the ball's initial velocity through the air pressure. I recorded the impacts with a high-speed camera and evaluated the videos in Matlab. I performed compression tests on the balls and tensile tests in case of the strings to build up their material models. I used the Arruda-Boyce hyperelastic material model with material damping (Rayleigh) to describe the ball's mechanical behavior. During the comparison of the simulations and the results of the measurements, I searched explanations for the differences that may occur.



3. Results

I compared the results based on two important impact parameters which were the rebound velocity and the deformation of the ball.



3. Figure Comparison of the undamped and damped finite element solution with the measurement result



4. Figure Comparison of the deformations (FEA-Measurement)

2. Self-built air-cannon and the racket

4. Summary

To sum up, I think my research proved to be useful in a subject, where such a comprehensive summary have not been made before. This thesis could give a larger insight into the dynamics of squash, which can be useful to an engineer or to an athlete as well.



Analysis of dry and wet detachment of suction cups based on experiments and finite element simulation

SÁNDOR FÜLÖP

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Attila KOSSA, associate professor, kossa@mm.bme.hu

1 Introduction

The commercial use of engineered hierarchical fibrillar structures is in its infancy, but low-cost fixtures in the form of suction cups have been widely used in numerous applications moreover, they can combine high strength and quick release. Adhesion of suction cups is enabled by vacuum, generated inside the cup upon applying and releasing a compressive load. The suction effect has also been exploited for reusable adhesives by using fibrillar structures with concave tips.

The aim of the work was to investigate the adhesion performance of commercially available suction cups both in dry and wet conditions for different preload values and the failure mechanism which leads to detachment. To experimentally investigate the adhesion performance, the contact area during detachment using video recordings and to measure the load-displacement characteristics of two different suction cup geometries a custom-made testing equipment was built.



Figure 1: Mushroom-shaped adhesive microstructure pillars made of PDMS (Emre at al. 2017.) (right). Novel cupped microstructures with concave tips (Yue et al. 2019) (middle). Suction Cups used for measurements (left).

2 Experiments

The measurements were performed using a specially designed testing equipment (shown in Figure 2) which was installed into a tensile tester.



The contact area was also analysed in order to get a clearer picture about the detachment process and failure mechanism. Figure 3 shows the different stages of the contact area during the measurement process. After preloading, during force relaxation (stage 2) residual water and air flows into the centre of the contact area. In the tensile loading stages air bubbles starts to accumulate and merge in the centre underneath the stalk, while the contact zone (the sealed zone) starts to decrease firstly because of the inward slipping of the outer rim, secondly because of the propagation of the detached zone from centre towards the rim. The final detachment occurs by a segment of the rim collapsing inward, leading to a large water (or air) influx (visible in stage 10), equilibration of the pressure and complete detachment of the suction cup. The detachment mechanism was the same in each and every case regardless the compressive preload force and/or measurement condition (dry/wet).



Figure 3: Detachment process. Abbreviation: Ft-tensile force)

3 Finite element simulations

In order to analyse the detachment process, the effect of friction between the suction cup and glass surface finite element simulations were performed. In these I used a rough assumption and presupposed that perfect vacuum is formed underneath the cup during attachment. The so obtained load-displacement characteristics were in good agreement with measurement results in case of Suction Cup 1. Figure 4 shows the deformed shapes seen in experiments and FE simulations for different tensile force values.





Figure 2: Custom-made testing equipment

Based on measured data the load-displacement characteristics and the adhesion performance of suction cups was determined and compared. One of the main conclusions was that the adhesion performance was insensitive to applied compressive preload force and to measurement conditions. Furthermore, a softer material combined with the proper geometry (cup profile) is considered to contribute to the formation of a more extensive and thus more stable (less sensitive to the defects in the seal) contact between the cup and contact surface.

Figure 4: Deformed shapes: measurement and FEA - Suction Cup 1

4 Summary

As a result of the work a testing equipment was designed and tested with success which can be used in further measurements. Moreover, a detailed and comprehensive analysis of the adhesion performance and detachment process was performed which revealed many interesting phenomena and served with important conclusions.



Valóságos befogások modellezése rugalmas ágyazással végeselemes környezetben

NÉMETH OLIVÉR

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető:* Kovács Balázs András, doktorandusz, balazs.kovacs@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A műszaki feladatok során számos alkalommal előforduló elmozdulás kényszer az úgynevezett befogás. Komplexebb berendezések numerikus vizsgálata során, a számítási idő csökkentése végett szükséges egyszerűsítések elvégzésével meg kell határoznunk egy modell határt, és az ott elhagyott részt egy peremfeltétellel egyszerűsítjük. A befogás helyét információ hiányában ideális kényszerekkel helyettesítjük, melyek sokszor túl nagy elhanyagolásnak minősülnek, így a valós rendszer szilárdsági és dinamikai tulajdonságait nagyban befolyásolhatják.

2. Alkalmazott módszerek



1. ábra. Alkalmazott modell

A nemideális kényszer vizsgálatára egy MATLAB-ban létrehozott végeselem-módszeren alapuló programot készítettem, melyben egydimenziós Euler-Bernoulli-féle síkbeli gerendaelemeket alkalmaztam (tetszőleges számú elem felhasználása). A befogás helyét a Winkler-féle egyparaméteres rugalmas ágyazás modellel helyettesítettem, melyben a rugalmas ágyazás úgy van reprezentálva, hogy egy gerendaelemet sok függőleges, szorosan elhelyezkedő, egyenes és egymástól független rugók támasztanak alá. Ezen rugók merevsége az ágyazási merevség, mely paraméter optimalizációjával lehet illeszteni a vizsgált rúdmodellt a mérési eredményekhez.



shakerrel törtné gerjesztés alkalmával végeztem el méréseket, melyek során gyorsulásérzékelőkkel mértem a válaszjeleket. A mérési adatsorokból ábrázoltam a frekvencia átviteli függvényeket, melyek képzetes részéből leolvastam a sajátfrekvenciákat, valós részéből pedig a "Hegy-völgy"-módszerrel determináltam a Lehr-féle csillapítási tényezőket.

3. Eredmények

A rugalmas ágyazás merevségének meghatározására kétféle optimalizációs algoritmust is alkalmaztam. A cél egy olyan ágyazási merevség meghatározása volt, mely alkalmazásával a mért és számított, műszaki szempontból veszélyes első sajátfrekvenciák eltérése minimális. A rugalmas ágyazással és az ideális kényszerrel meghatározott lengéskép vektorokat összehasonlítottam a MAC-szám alapján is.

1. táblázat. Mért és számított sajátrekvenciák

Módszer	$k_{ m r}~[{ m N/m^2}]$	$f_{\mathrm{n},1}$ [Hz]	$f_{\mathrm{n,2}}$ [Hz]	$f_{\mathrm{n,3}}$ [Hz]
Ideális	∞	222.40	1382.5	3825.6
Mérés	-	166.95	1322.4	3178.8
Számítás	$4.6719 \cdot 10^8$	166.95	1051.5	2921.6



3. ábra. Lengésképek összehasonlítása a MAC-szám alapján

4. Összefoglalás

2. ábra. Modális analízis shakerres gerjesztéssel A modális analízis során gerjesztés szempontjából kétféle módszert alkalmaztam. Mind a modális kalapáccsal, mind a

0

A rugalmas ágyazásokkal kapcsolatos szakirodalmi kutatást követően, létrehoztam egy nemideális megtámasztásokkal rendelkező VEM modellt. Ennek paraméterét a modális analízis útján megállapított értékek alapján kalibráltam. Az így determinált dinamikai jellemzőket felhasználva rámutattam az ideális befogás kényszer alkalmazásából eredő pontatlanságokra mind a sajátfrekvenciák, mind a lengésképek esetében.



Investigation of phase change models

GERGELY OLEXÓ

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Zsolt SZABÓ, Associate professor, szazs@mm.bme.hu

Introduction 1

OpenFOAM is az open-source toolbox for Computational Fluid Dymanics (CFD) simulations. This software was used to simulate a melting validation experiment, where a block of solid gallium is heated from one side, as depicted on figure 1. Gravitation induces a natural convection which makes the top section melt faster.



Figure 1: The schematics of the gallium melting experiment used for validating the two models

Two options are available in OpenFOAM that are compared in this thesis:

- \bullet icoReactingMultiphaseInterFoam multiphase (asolver) with Lee mass transfer model
- *solidificationMeltingSource* extension to add source terms to an arbitrary single phase solver

Simulation results $\mathbf{2}$

When comparing the results of the two models (figure 2), a conspicuous difference can be seen in the phase front shape.



comparing to the experiment, simulation in 3D is indispensable.



Figure 3: Phase boundaries for 3 different time instants (3D) simulation)

3 Phase fraction - temperature field coupling stability

There is a coupling between the heat equation and the phase indicator field equation, since the transferred mass (the incrementum in the phase indicator field) absorbs latent heat, and mass transfer is proportional to the temperature field. A stable simulation can be done when controlling the amount of transferred mass with a time relaxation parameter Rx. A calculation can show that when the velocity field effects are neglected, 0 < Rx < 2 is the stability domain. On figure 4 this calculation is ensured with a simulation. It also illustrates the type of stability: overdamped (0 < Rx < 1), critically damped (Rx = 1), underdamped (1 < Rx < 2), marginally stable (Rx = 2) and unstable (2 < Rx).





Figure 2: Phase boundaries for 3 different time instants (2D) simulation)

Lee model resulted in a sharp edge, whereas the transit in *solidificationMeltingSource* is smooth as in the experiment. The main characteristics of the phase front shape do not change when going from 2D to 3D (figure 3), but when

Figure 4: Temperature of a melting cell for different time relaxation parameters

Summary 4

It was found that *solidificationMeltingSource* is more applicable to this problem. Also the stability region is illustrated for the time relaxation parameter.



Biztonságkritikus szempontok dinamikai rendszerek tervezése során

SIRÁK MÁRTON

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető:* Kiss Ádám, tudományos segédmunkatárs, kiss a@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Dinamikai rendszerek tervezésekor legtöbbször nemlineáris rendszerekkel találkozunk. Bár sok esetben elfogadható ezek linearizálással történő közelítése, azonban az eredmények csak kis, pontosan nem meghatározható mértékű kitérések esetén érvényesek. A nemlinearitás komplexitása hatalmas potenciált rejt magában. Egyrészt – Ljapunov módszerén keresztül –lehetőséget ad jobb, a rendszer természetes dinamikáját kihasználó szabályozók megalkotására, különböző állapotokban az optimális beavatkozás meghatározására. Másrészt lehetővé teszi a biztonságot garantáló szabályozók tervezését, melyek képesek az állapotváltozókat egy meghatározott tartományon belül tartani. A dolgozatban előszőr a modern szabályozótervezési eljárások bemutatása olvasható egy szemléltető példán. Ezután a legfejlettebb bemutatott módszer kerül alkalmazásra két példán.

2. Módszerek bemutatása

A szükséges elméleti alapok bevezetése után a dolgozat első részében olyan szabályozótervezési módszerek bemutatása olvasható, melyekkel garantálható egy kívánt cél teljesülése. Az egyszerű, lineáris szabályozótól kezdve egészen a kvadratikus programozási problémákon keresztüli optimalizált beavatkozásig négy egyre kifinomultabb, a nemlineáris tulajdonságokat jobban kezelő, sőt kihasználó tervezési metódus kerül ismertetésre és alkalmazásra egy inverz inga példáján, ahogy az 1. a) ábrán látható. Ezután a biztonság fogalma, illetve garantálásának módszerei kerülnek ismertetésre, bevezetésre kerül továbbá egy szintén optimalizáció alapú módszer, amellyel egy dinamikai rendszer biztonságossá tehető. Végül a két szempont egyesítéseként egy biztonságos cél megvalósítása kerül górcső alá, ld. 1. b) ábra. Látható, hogy a megoldás trajektóriája nem keresztezi a pirossal jelölt határt.



3. Alkalmazás példákon

A fenti bemutatást követően a legfejlettebb, a kívánt célt optimalizált bemenet mellett biztonságosan megvalósító szabályozó alkalmazásra kerül két példán. Az első egy sebességtartó automatika (tempomat) adaptívvá tétele. A példában egy $c_{\rm L}$ sebességgel haladó, 30 másodperc elteltével gyorsító jármű, és egy magasabb $c_{\rm F}$ sebességgel érkező követő autó szerepel (ld. 2. b) ábra). A 2. a) és c) ábrákon megfigyelhető, hogy a szabályozás hatására a nagyobb sebességgel érkező jármű mérsékli a sebességét, miközben biztonságos követési távolságot tart.

A második példa egy sávtartó asszisztenst modellez egyszerű biciklimodellel (ld. 2. b) ábra). A bemutatott szabályozással nem csak a stabil sávtartás garantálható, hanem az is, hogy egy nagyobb perturbáció esetén a jármű Y oldalirányú elmozdulása ne legyen túl nagy, azaz ne hagyja el a sávot, ahogy ez a 2. d) ábrán látható.



2. ábra. a) Adaptív tempomat példa sebesség-idő diagramjai. b) A példákban vizsgált modellek. c) Adaptív tempomat példa követési távolság-idő diagramja. d) Sávtartó asszisztens példa oldalirányú elmozdulás-idő diagramja a biztonságos és a biztonságot nem tekintő esetben.

1. ábra. a) Célt teljesítő szabályozók melletti közös fázisdiagram. b) Egy célt teljesítő és egy biztonságos célt teljesítő szabályozó melletti közös fázisdiagram.

4. Összefoglalás

A bemutatott eljárásokkal hatékonyan lehetséges a nemlineáris dinamikai rendszerek optimalizált, biztonságos szabályozásának tervezése. Az ismertetett elmélet alapján az egyes módszerek mélyebb megismerése, továbbfejlesztése, kiterjesztése már egyszerűbben lehetséges.



Saját fejlesztésű DIC szoftver készítése Python környezetben

TÓTH GERGELY

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető*: Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A digitális kép korreláció (angolul: Digital Image Correlation) egy egyedülálló roncsolásmentes mechanikai anyagvizsgálati módszer, ami segítségével nagyfelbontású képet kaphatunk egy vizsgált test felszínén kialakuló alakváltozás mezőről. A mérések előkészítésekor a próbatestre 'speckle' mintázatot viszünk fel, ami lehetővé teszi az egyes anyagi pontok azonosítását különböző időpillanatokban, majd a mérésről készült felvételt elemezzük a DIC algoritmussal. A dolgozatomban bemutatom a saját fejlesztésű DIC programom elméleti hátterét, majd validáló méréseket végzek az algoritmus pontosságának ellenőrzésére. Az utolsó fejezetben egy lehetséges alkalmazást mutatok be, ahol egy MC-PET polimer lap Possion-tényezőjét számítom ki a DIC algoritmus segítségével.



1. ábra. Egy DIC vizsgálat mérési összeállítása

2. Alkalmazott módszerek

A DIC algoritmust Python és C nyelven készítettem. A felvételen vizsgálni kívánt pontok környezetét egy elsőrendű formafüggvénnyel írtam le. A formafüggvények paramétereit Gauss-Newton féle iteratív módszerrel állítottam elő. A pontosság javítására, az optimalizációban magas rendű spline interpolációt és megbízhatóságon alapuló kezdeti érték algoritmust használtam. Az eredmények megjelenítésére automatizált grafikus könyvtárat készítettem. elmozdulások amplitúdójában vétett hiba 0-20 %, amíg az elmozdulások irányítottságában vétett hiba 0-0,8 % között alakult. Ezt követően az MC-PET polimer lap szakítóvizsgálatáról készült felvételt elemeztem. A próbatestről minden 1mm-es megnyúlást követően képet készítettem. A felvételek alapján számított Possion-tényező kis szórást mutatott.



Possion tényező a húzás függvényében

2. ábra Poisson-tényező mérés eredménye.

Végül vizsgálatokat végeztem gyengített próbatesteken a program felhasználási lehetőségeinek bemutatására.



3. ábra. Egy gyengített MC-PET lap x irányú nyúlásai (balra) és y irányú nyúlásai (jobbra) szakítóvizsgálat során.

3. Eredmények

A DIC program pontosságát generált videófelvételeken vizsgáltam transzláció, rotáció és nemlineáris elmozdulás mező esetén. A mért elmozdulások amplitúdóját és irányítottságát összevetettem az előírt elmozdulás mező értékeivel. Az

4. Összefoglalás

A dolgozatban bemutatásra került egy saját fejlesztésű DIC program elméleti háttere, mérési pontossága és lehetséges felhasználási területei. A kiemelkedő pontosságának köszönhetően, további anyag és feszültség modellek, tönkremeneteli módok elemzésében lehet hasznos eszköz.



Redundáns kényszerek kezelése többtestdinamikai szimulációkban

Blau Sándor

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejleszt Specializáció 2020/2021/I.

Témavezet : Dr. Zelei Ambrus, tudományos munkatárs, zelei@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Napjainkban dinamikai rendszerek szimulációja a tervezés, fejlesztés során elengedhetetlen. A dolgozat során szimulációkhoz használt számítási módszereket vizsgáltam mind olyanokat, amik alkalmasak a redundáns kényszerek kezelésére és olyanokat, amelyek nem. A cél, pontosság és a számításhoz szükséges id szerint összehasonlítani ket.

2. Alkalmazott módszerek

A dolgozat során négy módszert alkalmaztam. A Másodfajú-Lagrange féle módszert, ezzel csak egy referencia megoldáshoz kell, amihez hasonlíthatjuk majd a többit, ez a módszer nehezen alkalmazható bonyolult rendszerek szimulációjánál, a Lagrange multiplikátorok módszerét, a Penalty módszert és, annak a Lagrange formulával kiegészített változatát. Az el bbi kett nemalkalmas a redundáns kényszerek kezelésére, a többi igen.

3. A vizsgált rendszerek

Egyszer bb többtest-dinamikai rendszereken végzem el, az egyes módszerekkel történ szimulációt.



(2. Ábra: redundáns kényszereket tartalmazó rendszerek)

4. Eredmények

A szimulációk elvégzése után a hibát megállapítottam, abból, hogy a kényszeregyenletek teljesülnek-e.



(3. Ábra: A kényszerek hibája, a kett singa szimulációjakor, az egyes módszerekkel)

A különböz paraméterekre kapott hibákat és a futási id ket egy grafikonon ábrázoltam.



(4. Ábra: hiba-számítási id diagram)

Az eredmények alapján a Penalty módszer Lagrange formulával kiegészítve a leghatékonyabb és képes a redundáns kényszerek kezelésére is.

BEZMÉR

A szökdelés tömeg rugó-modelljének paraméterhangolása és geometriai pontosítása

HEGEDÜS MÁTYÁS ÁRPÁD

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető*: Dr. Zelei Ambrus, tudományos munkatárs, zelei@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Dolgozatom készítése során két különböző mechanikai modellt vizsgáltam. Ezek egyike az egyszerű SLIP (Spring Loaded Inverted Pendulum) modell, a másik egy nemlineáris, a láb testszegmenseivel bővített modell volt. Célom a modellek paramétereinek hangolása volt oly módon, hogy az ezekkel leírt mozgás a lehető legjobban hasonlítson az emberi futáshoz és szökdeléshez. Ezen mozgások megismerése, matematikai modellekkel való leírása a biomechanika és a robotika területén is hasznos, nem csak jobban működő robotok megépítését, de sportolók teljesítményének növelését, sérülések elkerülését is segítheti.



1. ábra: A vizsgált mechanikai modellek

2. Alkalmazott módszerek

A vizsgált modellekkel leírható az emberi futás mindkét szakasza, vagyis a repülés és a talajjal érintkezés fázisa is. A mechanikai modellek alapján felírtam az egyes fázisokra érvényes mozgásegyenleteket, valamint a fázisok közötti váltást leíró eseményfüggvényeket. Ezután numerikus szimulációt végeztem, ezzel számolva a tömegpontok koordinátáit, illetve sebességeit az idő függvényében. A modellek paramétereit úgy változtattam, hogy az eredmények stabil periodikus pályák legyenek. Ezek ismeretében további biomechanikai paraméterek is számíthatók, amelyek segítségével a számított értékek öszszehasonlíthatók mérések adataival. A rendelkezésre álló mérési adatok alapján a futásra a lépésfrekvenciát, a lépéshosszt, a talaj fázis időarányát, a függőleges elmozdulás nagyságát és a talajra átadódó erőt, a szökdelésre a lépésfrekvenciát és a függőleges merevséget választottam. A periodikus pályák hangolását úgy végeztem, hogy ezek közül egyet kiválasztottam, és úgy változtattam a modell paramétereket, hogy a választott paraméterre pontos legyen.

3. Eredmények

A számítás eredményeinek és a mérések adatainak, ezekre illesztett görbéknek ismeretében összehasonlíthattuk a modellek mozgását a valósággal. Az eltéréseket számszerűsítettem, relatív hibák számításával, valamint vizsgáltam az illesztett görbék jellegének hasonlóságát is. A két modell közül a paraméterektől függően változott, hogy melyik modell adott jobb eredményt. A szegmensekkel bővített modellel kisebb sebességeken sikerült a mérésekhez hasonló eredményeket számítani.



2. ábra: A frekvenciára kapott értékek különböző sebességű szökdelésekre.

4. Összefoglalás

A legalább egy paraméterre pontosan illeszkedő pályák alapján megadtam, hogy a modellek melyik paraméterre lehetnek egyszerre pontosak. A futás esetén megállapítható, hogy a vizsgált paraméterek közül legalább az egyik minden periodikus pálya esetén pontatlan lesz. A szökdelésnél vizsgált két paraméter közül viszont bizonyos esetekben mindkettő egyezett a referencia értékkel.

1. táblázat: A modellekkel kapott eredmények pontossága különböző paraméterekre.

Futas		Ls	t _s	DF	Fuggöleges mozgas	F _{max}
SUD		jó	jó	közepes/rossz	közepes	jó/közepes
	SLIP		közepes	jó	közepes	közepes/rossz
Láb czogmons	Láb szegmenseivel bővített modell		rossz	jó	jó	közepes/rossz
Lab szegmens			jó	rossz	jó	közepes/rossz
Szökdelés			f _s		k _{vert}	
SLIP	Helyben	jó		jó		
SLIP	Vízszintes mozgással	közepes		jó		
Láb	Láb szegmenseivel		jó		közepe	25
szegmenseivel			közepes		jó	
bővített modell	Vízszintes mozgással	jó		jó		



Investigation of nonsmooth dynamic effects in boring operations

ZSOLT IKLÓDI

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Zoltán Dombóvári, associate professor, dombovari@mm.bme.hu

1 Introduction

This thesis aims to explore the nonsmooth dynamical effects arising during a turning operation when a displacementconstrained tuned mass damper (TMD) is present. Through a simple 2 degree-of-freedom model (DoF), the occurrence and effect of both rigid body impact and cutting edge contact loss phenomena are investigated in detail. The dynamics of the system is analysed by exhaustive time domain simulations and a self-developed periodic orbit continuation algorithm. Based on the numerical results, a pseudo transfer function for constrained TMD's, and a nonsmooth "stability" map for acceptable cutting tool vibrations are derived.



Figure 1: Boring bar, with motion constrained tuned-mass damper.

2 Applied methods

Considering the subtleties and difficulties of handling piecewise-smooth systems, first a time domain simulations scheme with event detection, then a self-developed collocation algorithm for continuation of hybrid periodic orbits is developed for a 2 DoF model with a motion constrained harmonic oscillator. Subsequently all methods are generalised for the delayed case of boring, where the cutting edge contact loss is also taken into account, introducing another type of nonsmoothness into the system. metrically increase, resulting in a characteristic similar to that of a 1 DoF system.



Figure 2: Transfer characteristics of 2 DoF harmonic impact oscillator, based on continuation of hybrid orbits.

Through time domain simulations, an acceptability map was derived for boring with displacement constrained tuned mass dampers, and was then validated by two parameter continuation of critical contact loss orbits, on the boundary of a bistable region. As demonstrated on Figure 3, impacts arising during turning operations are seldom capable of restricting the vibration amplitude to an acceptable level, however they also make the system susceptible to bistable behaviours.



Figure 3: Acceptability map of turning in presence of motion constrained tuned-mass damper.

3 Results

Guided by numerical simulation results a pseudo transfer function was derived for the motion constrained harmonic oscillator, through the collocation of continuation results from following different families of hybrid period one orbits. As seen on Figure 2, approaching the resonance frequency the number of impacts and the vibration amplitude sym-

4 Summary

Based on the time domain simulation and continuation results, in case of boring operations, even though allowing the tuned mass damper to impact can be seldom beneficial, most of the time guaranteeing the free displacement of its inertial mass offers more fruitful results.



Investigation of chaotic behaviour of digitally controlled mechanical systems

ATTILA SULYOK

Mechatronic Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Gábor Csernák, associate professor, csernak@mm.bme.hu

1. Introduction

Digitally controlled mechanical systems often exhibit small amplitude, stochastic-like vibrations due to the so-called *digital effects*; sampling, quantization, and processing-delay. Sampling means that the digital controller receives data about the system periodically, while the control signals sent out also with respect to the given sampling period. Quantization occurs during the conversions of analog and digital signals, meaning that the measured analog signals rounded towards discrete values, while the calculated necessary control efforts rounded, as well, since digital-to-analog converters can operate at a certain resolution. The processing-delay is related to the fact, that computing the control signals from the measured states takes a certain amount of time. Although this time-delay is usually small, in some cases it cannot be neglected.

In consequence of the digital effects, these control systems must be modelled and analysed differently, compared to the continuous time case.

2. Applied methods

After deriving the equation of motion in the classical form for the given 2 DoF mechanical system, the digital effects are considered by introducing dimensionless variables and parameters. As a result, a *piecewise linear map* can be constructed, which makes connection between the system's state in the successive sampling instants. This map is also called as *microchaos map*, implying the chaotic nature of system's dynamics.



Mathematica. The characteristic structures (e.g. fixed points, absorbing sets, etc.) of the phase space were also investigated from various aspects, to gain a better understanding in the system's behaviour.

3. Results



^{2.} Figure: Phase space and a trajectory of the system.

The simulations showed that the systems exhibit indeed chaotic, small amplitude vibrations, while the examination of the phase space revealed the existence of *chaotic attractors* and repellors, influencing the resultant control error. In addition, the largest *Lyapunov exponent* turned out to be positive for all points of the phase space, meaning that the systems are sensitive to initial conditions.



3. Figure: Control error estimation (purple) compared with the results of numerical simulations (black).

1. Figure: A projection of the 4D domain of stability.

The stability analysis of the controlled system is carried out by applying the Möbius transformation to the characteristic polynomial of the map without quantization, allowing to determine the stability conditions for stable control parameters by means of the Routh-Hurwitz criterion.

To examine the system's evolution at stable control parameters, numerical simulations were performed in Wolfram

4. Summary

The examined mechanical systems exhibited chaotic behaviour (i.e. small amplitude, irregular vibrations) in consequence of the digital effects. It was found that chaotic attractors exist in the phase space, influencing the control error and control time. Additionally, analytical, and numerical methods were provided for estimating the control error, which is also important in the aspect of practical applications.



Súrlódással befolyásolt mozgások vizsgálata nemlineáris mechanikai modellekben

TÓTH SZILVESZTER

Gépészmérnöki MSc Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető:* Dr. Szabó Zsolt, egyetemi docens, zsolt.szabo@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az akadozó csúszás számos szerkezet működése közben felléphet, és nem kívánt rezgéseket okozhat. A munkám eleje szakirodalom kutatással kezdődött, ahol felkerestem az akadozó csúszással kapcsolatos műszaki problémákat.

Több mechanikai modellt megvizsgáltam, melyeknek közös jellemzője, hogy egy rúdon lecsúszó csúszka mozgása valósul meg. A végső modell egy ferde helyzetű rúdon lecsúszó csúszka.



1. ábra. A vizsgált mechanikai modell

A csúszka y irányú mozgásegyenlete

$$\ddot{y} + \frac{\mu^2(\dot{y})dg\cos(\alpha)}{2\mu(\dot{y})x_s - h} - g\sin(\alpha) = 0$$

ahol a súrlódási együttható a Stribeck súrlódási modell szerint exponenciálisan csökken a sebesség növekedésével.

$$\mu(\dot{y}) = c\mu_0 + (1-c)\mu_0 e^{-\beta|\dot{y}|}$$

2. Analitikus vizsgálat, szimuláció

A rendszer dimenziótlan modelljén stabilitásvizsgálatot végeztem, így beláttam, hogy létrejöhet olyan stabil egyensú-



2. ábra. A stabilitástérkép és az I. zóna fázisképei

A stabilitásvizsgálat helyességének ellenőrzésére numerikus szimulációt készítettem Wolfram Mathematica programban, mellyel sikerült igazolni az analitikus számításokat.



3. ábra. I. zóna foronómiai görbéi eltérő kezdeti sebességgel

3. Megtervezés, megépítés, mérés

A kísérleti berendezést megterveztem, majd sajátkezűleg meg is építettem azt. A tervezés során ügyeltem arra, hogy a stabil működési zóna összes tartománya bejárható legyen a geometriai paraméterek változtatásával. Ezután méréseket végeztem az eszközön, a csúszkára szerelt 2 db gyorsulásérzékelő segítségével. A mért jelekből FFT után meghatározható volt az ütközési frekvencia, melyet összehasonlítva egy ütközéses modellel nagyságrendileg nagyon jó közelítést ad a mérésre.

lyi sebesség, amivel a csúszka állandó sebességgel mozoghat a rúdon. Adódhat olyan eset is amikor a stabil egyensúlyi sebesség mellé egy instabil egyensúlyi sebesség is társul. Ennek megfelelően készítettem el a dimenziótlanított geometriai paraméterek síkjában a stabilitási térképet, valamint az 1 dimenziós fázisportrékat. A dimenziótlan paraméterek

$$\varepsilon = \frac{h}{x_s} [1], \delta = \frac{d}{x_s} [1], \tilde{\delta} = \frac{\delta}{\tan(\alpha)} [1].$$

[$h \; [\mathrm{mm}]$	α [°]	Zóna	f_{meres} [Hz]	f_{szim} [Hz]
	10,5	45	V.	9,03	2,76
ĺ	4,2	45	II.	12,04	2,85
ĺ	$1,\!68$	45	IV.	14,24	2,86

1. táblázat. A frekvenciák összehasonlítása



Self-Learning Control of Mechatronic Systems Using Gaussian Process

PÉTER ANTAL

Mechatronics Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Henrik Sykora, Research assistant, sykora@mm.bme.hu

Introduction 1

Nowadays due to the increased computational power of modern computer architectures machine learning algorithms are becoming widely used in several fields of science and technology, e.g. autonomous vehicle control.

In this work, we propose to achieve a fusion of machine learning and control engineering by developing a joint approach of Gaussian processes (GPs) based model augmentation, and model predictive control (MPC), resulting in a self-learning MPC paradigm. This state-of-the-art approach uses collected data for compensating model uncertainties, complex non-linear effects and machine specific properties, with respect to a baseline linear model of the system. It provides adaptability, safety guarantees, and has computationally efficient implementations. The controllers are demonstrated on a self-designed cart-pole dynamic system, built from the mechanism of an inkiet printer.



Figure 1: Photo of the self-designed cart-pole mechanism.

$\mathbf{2}$ Gaussian Process Regression

As a branch of supervised learning, Gaussian Process Regression is a flexible, non-parametric, stochastic approach for function estimation, taking into account measurement and model uncertainties. After learning the dynamics of a system, predictions can be computed based on measurement data, through Bayesian inference techniques.

3 Self-Learning Control Methods

Explicit MPC is implemented based on a probabilistic reinforcement learning control approach (PILCO), which learns the dynamics fully from data, and does not need on-line optimization. In contrast, implicit MPC augments a nominal model based on physical principles. The model error is learned via GPs, and on-line optimization is carried out in order to satisfy state constraints.

Results 4

Simulation results have shown, that although PILCO has higher settling time than other methods, it is more efficient in terms of energy required for the balancing task. Also GPMPC has better performance, than nominal MPC, or LQR.



Figure 3: Simulation of closed loop responses.

Regarding the control of the real mechanism, the explicit MPC approach proved to be very successful. The measurement results were within the confidence bound of the prediction made with the probabilistic GP dynamic model for most of the scenario's duration, which means, that the algorithm sufficiently learned the dynamics of the real system.



Figure 4: Simulation and measurement with probabilistic explicit MPC (left) and linear feedback controller (right).



Figure 2: Overview of Gaussian Process Regression.

Summary $\mathbf{5}$

After the extensive investigation of control approaches with Gaussian Process Machine Learning, carrying out both simulations and experiments on the real mechanism, we obtained, that learning algorithms enhance the quality of the balancing. The implemented probabilistic explicit model predictive controller balanced the self-designed inverted pendulum with a much better performance, than the baseline linear state feedback controller.



Optimisation of the Cycling Biomechanics Based on Multibody Models

ZSOMBOR WERMESER

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Ambrus Zelei, Associate professor, zelei@mm.bme.hu

1 Introduction

My dissertation aims to investigate the motion and pedaling mechanism of a cyclist using a multibody dynamic model. Based on the set up of the model, I would like to use simulations to map which biomechanical and dynamic characteristics change as a result of different input parameters. In the case of the performance is sensible for the parameter change, I would like to find an optimal parameter set, where the cyclist power output is maximalized. Optimization can help to increase the efficiency of cycling performance, and it helps to understand the relationships between injury-prone posture and settings used. I would like to compare the results of the simulation with real measurements. In the performance aspect of view, I would like to investigate, which input parameter or parameters affect most of the cycling performance and the motion bounds of the lower limb.



Figure 1: The model of the lower limb

2 Applied Methods

The closed kinematic chain of the lower limb was constructed using a multibody dynamics model. The state of the system is written by a system of differential-algebraic equations. I solved only its solution with a numerical explicit Runge-Kutta method using the Matlab program. In the system of equations, the physical relationship between the bicycle, external factors, and the cyclist appears. I recalculated the effect of external factors on the pedal that connects the cyclist and the cyclist. Against external factors, the cyclist must exert torque to force his bicycle to move. I calculated the torques in each "human" joints and assumed that it always exerts a maximum torque in its given angular position and state of motion of the four-element mechanism.

3 Results

Firstly I created a model for one parameter set. I validate the simulation results with an online theoretical calculator. The difference is quite small between the results. Then I use a parameter sweeping algorithm to find out the best parameter set of the input variables. The input variables are the saddle height, crankarm length, saddle horizontal position and cleat position. I looked for the point where the speed is maximum.



Figure 3: The results of the parameter sweeping

4 Summary



Figure 2: Free body diagramm of the driving mechanism

The final result was a system that works as the mechanical laws described. The simulation mainly gives accurate and realistic results for many factors. The optimum solution of the simulation with real measurement highlighted that the system works properly from a purely mechanical point of view. But in the functioning of the human body, certain effects of fatigue and comfort are not negligible either, which can affect the results.



Route planning and obstacle avoidance with a tracked robot

JONATÁN MÁRK BAKUCZ

Mechatronic Engineer BSc, Spacialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Gyebrószki Gergely, research assistant, gyebro@mm.bme.hu

1. Introduction

Pathfinding is getting a seriously significant topic in the era of autonomous robots and devices. The use of these devices requires the ability to search for a suitable path from the start point to the target location independently with the ability to avoid obstacles. The found path must fulfil various constrains like optimality, security and the time it takes to find a path should be minimal. My task was to program a tracked robot to be able to reach its target-object without colliding with other objects.



1. Figure The tracked Anki Cozmo robot

There are two main kinds of classical path planning: online and offline. In case of the latter, the environment is known a priori including the position of the obstacles, the initial position of the robot and the location of the target. In case of online planning these information are not-, or just partially provided.

2. Applied methods

2.1.Offline algorithm

My initial solution based on the Dijkstra's algorithm, which does not make use of the knowledge about the target location, thus this method is usually slower. I expanded the program later with a heuristic function to get the A* algorithm, which has the same properties of the Dijkstra's, but evaluates the search faster. I experienced also with further improvement of the run times, but it did not have a huge effect on results.

ning the path. The online methods returned a suboptimal solution, which is a result of the lack of knowledge about the unsearched space.



Figure 2 The path found with different techniques

3. Results

The found paths could be realised in Python language with the help of the Cozmo Sofware Development Kit (SDK). The object and marker recognition capability of the robot could be used to orient the obstacles and place them on the virtual map and also to detect, whether the environment changed. The program has been executed perfectly in every case, regardless of the obstacle composition.



3. Figure The found path reconstructed

4. Summary

2.2.Online algorithm

To manage an online solution, I modified the programmed A* method, with a function, that detects changes in the environment, thus makes the robot able to react to them by replan-

Based on my consultation in the literature of the classical path planning algorithms and my results with experiments, I was able to choose the proper techniques, which suit the task and give optimal results. With the help of the SDK I could implement these techniques to make the robot able to move along the shortest route and avoid all obstacles.



Delaminált kompozit rudak rezgése és dinamikus stabilitása

FERENCZI CSONGOR

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2020/2021/I. Témavezető: Dr. Szekrényes András, egyetemi docens, szeki@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozat során az 1. ábrán látható delaminált kompozit rúd szabadrezgését és dinamikus stabilitását vizsgáltam, különböző modellek segítségével.



1. ábra. A vizsgált delaminált rúd

2. Alkalmazott módszerek

Először a szabadrezgési feladatot vizsgáltam. Euler-Bernoulli, majd Timoshenko-féle rúdmodellel is meghatároztam a delaminált rúd mozgásegyenletét. Mindkét modellben az elmozdulásmezőből felírtam az alakváltozási jellemzőket és az igénybevételeket, majd ebből az alakváltozási energiát és a kinetikus energiát. Így megkaptam a Lagrange-függvényt, amely által levezettem a mozgásegyenleteket. A mozgásegyenleteket megoldva megkaptam a sajátfrekvenciákat, lengésképeket és igénybevételi ábrákat. Midnkét modellt végül kiegészítettem úgy, hogy a befogás helyett rugalmasan ágyazott szakaszt használtam.



2. ábra – Delaminált rúd modellje rugalmas ágyazással kiegészítve

3. Eredmények

A szabadrezgést vizsgálva a rugalmas ágyazással kiegészített Timoshenko-féle rúdmodell adta vissza legjobban a mérési eredményeket – a rugalmas ágyazás pontosította a modellt.

A harmonikus egyensúly módszerében egy végtelen nagyságú determinánst kaptam, amelyet véges tagig kifejtve megkaptam a frekvencia-erő síkon a stabilitási határokat. A stabilitási diagramról leolvasható tetszőleges környezeti frekvencia esetén a delamináció kihajlásához tartozó kritikus erő értéke.



3. ábra – Stabilitási diagram és a kritikus dinamikus erő meghatározásának módja.

A dinamikus stabilitás vizsgálatánál azt tapasztaltam, hogy nagy mértékben függ a delamináció kihajlásához tartozó kritikus erő a környező szerkezet, azaz a paraméteres gerjesztés frekvenciájától. Továbbá a determinánst magasabb tagig kifejtve egyre több határgörbe jelenik meg az egyre kisebb frekvencia tartományokban. A delaminált szakasz felső rúdjának sajátfrekvenciája felett (v>1) már nem indul határgörbe a vízszintes tengelyről, ezért ha a környező szerkezet frekvenciája ennél nagyobb, akkor nagy lesz a kritikus erő értéke – azaz kevésbé veszélyes dinamikus kihajlás szempontjából a modell alapján.

4. Összefoglalás

A delaminált rudak szabadrezgését vizsgálva a Timoshenko-

A delaminált szakaszon periodikusan változó normálerő ébred, amely paraméteres gerjesztést okoz, és a felső rúd kihajlását okozhatja. Ezt a harmonikus egyensúly módszerével vizsgáltam, melynek során a elmozdulásvektort Fourier-sor alakban kerestem, amihez a delaminált felső rúdszakaszt felírtam egyszerű hajlított végeselem-modellel. Továbbá modális dekompozíciót is alkalmaztam, amivel egyszerűbb is lett a megoldás, és általa csak a feladat szempontjából releváns első kihajlási alakhoz tartozó eredmények jelentek meg.

féle rúdmodell rugalmas ágyazással kiegészítve adta vissza legpontosabban a mérési eredményeket. A modális dekompozíció abban javítja a dinamikus stabilitás modelljét, hogy általa a magasabb módusokhoz tartozó – és a feladat szempontjából nem releváns – határgörbék nem jelennek meg a stabilitási diagramon. A dinamikus stabilitás modelljét a csillapítás hatását figyelembe véve tovább lehetne javítani – ez növelné a stabil tartományokat.



Extension of the Spring-Loaded Inverted Pendulum Model With the Control of the Total Mechanical Energy

Máté István SZILÁGYI

Mechatronics Engineering BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Ambrus ZELEI, Research associate, zelei@mm.bme.hu

1 Introduction

When traversing through rough or uneven terrain, artificial locomotory systems equipped with wheels or tracks are outperformed by legged animals. Motivated by this, engineers in the field of biomechanics and robotics attempt to create legged systems that are inspired by nature. In the design of such systems, intuitive approaches based on biology alone have shown limited progress. In order to create better designs, the underlying physical principles of locomotion were implemented in the models as well.

The spring-loaded inverted pendulum (SLIP), which in its simplest form consists of a point mass and a massless spring, describes the dynamics of human running and hopping remarkably well. Therefore, it is the main template used for designing and controlling robots, such as RHex hexapod or the ATRIAS biped.



Figure 1: The mechanical model of the SLIP

2 Applied Methods

After the derivation of the equations of motion with the Lagrange-equation of the second kind, a MATLAB environment, capable of simulating the dynamics of the system, was created.

In this environment, numerous simulations with different initial conditions and system parameters were carried out. A return map analysis was executed in order to better understand the behaviour of the system under these varying inputs. The Poincaré map served as a basis of designing the controllers in the second part of the thesis. Two types of controllers, based on the control of the total mechanical energy of the system, were constructed. One works with the active modulation of the damping coefficient in the flight phase, while the other one is based on the active modulation of the spring stiffness in the stance phase. The mechanical model, depicted in Figure 1, was slightly modified in both cases, in order to implement the controllers.



Figure 2: The return map for ten different energy levels

3 Results

The system parameters resulting in a stable or unstable periodic motion could be determined from the analysis of the return map.

Both controllers were able to establish a stable periodic motion on a slope and a ramp as well. Furthermore, both of them were capable of providing a transition between energy levels, where stable periodic motion exist.



Figure 3: The trajectory of the mass descending on a slope with the damping coefficient controller

4 Summary

The control applications of the extended SLIP model were examined. It was found that based on the control of the total mechanical energy, controllers could be created which are capable of establishing stable periodic motion on a slope and a ramp as well.



Hiperelasztikus anyagok modellezése alap terhelési esetek egyidejű alkalmazásával

Hulka László

Gépészmérnöki MSc Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2020/2021/II. *Témavezető:* Dr. Berezvai Szabolcs, adjunktus, berezvai@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A nagyrugalmasságú (hiperelasztikus) anyagokat a kedvező mechanikai tulajdonságainak köszönhetően nemcsak az iparban, hanem a háztartásokban is előszeretettel használják. Ennek megfelelően az autóipar, sportszergyártók stb. mellett az ilyen tulajdonságokkal bíró anyagok képezik a matracok, szivacsok, kárpitok stb. alapját ezzel megfelelő komfortot biztosítva a felhasználóknak. Bár matracok esetén a habszivacsok jellemző igénybevétele egyszerű nyomás, addig az ipari felhasználás esetén a nyomás mellett többtengelyű összetett terhelés is felléphet. Dolgozatom célja ennek megfelelően a hiperelasztikus anyagok vizsgálata olyan homogén deformációk esetén, amelyek univerzális szakítógépen elvégezhetők, mint pl.: egytengelyű húzás-nyomás, gátolt egytengelyű nyomás, kéttengelyű nyomás (-húzás) és egyszerű nyírás.



1. ábra. Nyílt- és zárt cellás habszivacs

2. Alkalmazott módszerek

A hiperelasztikus anyagmodellek alapját képező konstitutív egyenletet Gerhard A. Holzapfel munkája alapján írtam fel és ennek segítségével kifejezésre kerültek -a mérésekből meghatározható főnyűlások segítségével, az egyes főfeszültségek.



A szükséges mérési eljárások megvalósításához 3D nyomtatott készülékeket terveztem 3D modellező szoftver segítségével. Ezen készülékek felhasználásával több mint 30 mérést végeztünk, melyek során regisztráltuk a terhelő erő változását az elmozdulás függvényében. Minden mérést egy nagyfelbontású kamerával rögzítettünk, annak érdekében, hogy ahol lehetett megvizsgáljam a keresztirányú alakváltozás mértékét is.

3. Eredmények

A kapott nyers adatokból összesen 14 mérési eredményt dolgoztam ki. Ezek során az erő-elmozdulás függvényekből feszültség-alakváltozás görbéket állítottam elő, hogy erre a különféle görbeillesztési módszerek segítségével meghatározzam az anyagmodellben szereplő μ_i, α_i, β_i anyagparaméterek értékét egy- és kéttengelyű húzó-nyomó igénybevétel mellett egyszerű nyírásra.



3. ábra. Nyomásméréssel meghatározott- és illesztt görbék nyílt cellás habokra

4. Összefoglalás

Dolgozatom során a hiperelasztikus anyagok különféle ho-

2. ábra. A mérés menete

mogén deformációinak vizsgálatára alkalmas 3D nyomtatott készülékeket terveztem, melyek segítségével elvégeztem a szükséges méréseket. A kapott erő-elmozdulás görbékből feszültség-alakváltozás függvényeket állítottam elő az egyes deformációkra érvényes számítási eljárások segítségével. Majd ezeknek a görbéknek az ismeretében különféle illesztési eljárások segítségével meghatároztam az anyagmodell leírásához szükséges μ_i, α_i, β_i hiperelasztikus anyagparamétereket.



Helmholtz eigenvalue analysis of optical fibers for determining the microbending loss and related parameters

ÁDÁM CSATÓ

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Szabolcs BEREZVAI, Assistant Professor, berezvai@mm.bme.hu

1 Introduction

Fiber optics is a technology associated with data transmission using light propagating in a long fiber usually made of silica glass. The basic fibers contain an inner core layer surrounded by a cladding layer, which refractive index is smaller than the core. This structure is usually protected with coating layers. Light propagates in the core by the phenomenon of total internal reflection. Optical fibers are widely used in telecommunication and sensor technology. Due to its significance in today's technology, it is a highly important research area. At Furukawa Electric Institute of Technology Ltd., there are various research and simulations in the field of optical fibers, cables and devices. The goal of this thesis was to build a model which is able to examine important parameters of fibers such as bending losses, effective mode area, cut-off wavelength, and dispersion properties.

2 Applied Methods

To achieve these goals, a finite element model was set up in COMSOL Multiphysics. At first, the propagation core, and the lossy cladding modes were examined. Figure 1 shows the mode searching areas and some mode field distributions. The microbending losses were calculated using the coupledmode theory, which explains the loss as coupled power from the core mode to the lossy cladding modes. The macrobending loss and the cut-off wavelength was examined using the confinement loss of the propagating mode. To obtain dispersion parameters, the wavelength dependence of the effective refractive index was examined.



3 Results

The microbending loss was examined with a straight, and a bent model because, during measurements, the fiber undergoes bending. The results of the microbending loss simulation for various fibers are shown in Figure 2. The bent model showed better fitting to the measurement results. After that, the fiber with the smallest microbending loss was further examined. With the increase of the effective mode area, and with a wider and deeper trench layer, the bending loss can be decreased significantly. Finally, the macrobending, cut-off wavelength, and dispersions parameters of this fiber were examined, and compared with standard values.



Figure 2: The simulated loss results as a function of the measurement results

4 Summary

In this thesis, the most important parameters of optical fibers were examined. A highly effective model was presented for the bending losses, cut-off wavelength, and dispersion parameters. Overall the built model provides an excellent opportunity for further research and development in the field of optical fiber optimisation.

Figure 1: Mode searching areas and mode field distributions

The thesis was supervised by Furukawa Electric Institute of Technology Ltd. With their deep knowledge and experience in fiber optics, they provided outstanding guidance and support.





ZALÁN HODRUSZKI

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2019/2020/II. Supervisor: Henrik Sykora, Engineer, sykora@mm.bme.hu

1. Introduction

Nowadays, automotive industry shows a great tendency to increase driving safety and minimise fuel consumption. To optimise fuel consumption and providing smooth traffic flow even on busier roads connected cruise control has been proposed that is based on vehicle-to-vehicle communication technology. The applied control in such a connected cruise control system must fulfil some basic requirements such as it must be plant stable and string stable as well as it must provide passenger comfort during its operation. The aim of this thesis was constructing a machine learning supported control design framework which can be used to find appropriate control parameters for connected cruise control systems with respect to the above written requirements.



Figure 1. Model of connected cruise control

2. Applied methods

The applied connected cruise controllers were built up by using linear neural network in one hand, and nonlinear neural network on the other hand. So that, the basis of the controller design was training these neural networks. The training process was realized with the help of metaheuristic optimization methods such as Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization. Furthermore, the stability properties of the controlled system of connected automated vehicles (CAVs) were traced during the training processes. The plant stability of the system was investigated by measuring the spectral radius of the coefficient matrix that was constructed after semidiscretizing the equation of motion, while frequency transfer functions were used to measure the string stability of the controlled vehicle chain.



3. Results

By using the constructed machine learning supported control design framework, a complete vehicle string, which consisted of four vehicles was trained in three steps. First, the control parameters of CAV 2 then the control parameters of CAV 1 and finally the control parameters of CAV 0 were optimized. As it can be seen in (a), the derived acceleration peaks were smaller and smaller as more and more connected automated vehicles were added to the end of the vehicle chain, which meant that the trained controllers were plant stable. Furthermore, one can conclude, that the optimized vehicle chain was string stable as well, since the amplification diagrams were below the critical value, 1. Moreover, by adding more and more trained vehicles to the end of the vehicle string, the amplification characteristics improved in the introduced example.



Figure 3. Acceleration diagrams of the four connected vehicles (a); and the amplification properties through the connected vehicle chain (b)

4. Summary

Figure 2. Applied methods

A machine learning supported control design which based on training neural networks was introduced. Moreover, we provided techniques of measuring plant stability and string stability properties of a vehicle chain during its control design process. It can be concluded that the constructed control design framework could produce appropriate controllers with respect to the considered requirements.



Különféle súrlódási modellek dinamikai összehasonlítása

Békési Balázs János

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető*: Dr. Antali Máté, posztdoktori kutató, antali@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Ismeretes, hogy különböző szárazsúrlódási modellek különböző súrlódási hatásokat képesek figyelembe venni. A súrlódási modellek 2 fő csoportra sorolhatók, statikus- és dinamikus súrlódási modellekre. Ezen súrlódási modellcsoportokból felhasználásra került néhány főbb típus, 3 egyszerűbb mechanikai példán keresztül.



2. ábra. Néhány statikus súrlódási modell karakterisztikája



3. ábra. A felhasznált dinamikai súrlódási modellek mögötti elképzelés, avagy a "sörtés modell"

2. Alkalmazott módszerek

A súrlódási ellenállással terhelt modellek mozgásegyenletei nem-folytonos differenciálegyenletekhez vezetnek. Ezen nem-folytonos hatások matematikai leírásában és vizsgálatában nyújt segítséget az úgynevezett Filippov-elmélet.

3. Eredmények

A súrlódási modellek vizsgálatának célja a különböző modellek összehasonlítása, súrlódási hatások vizsgálata, illetve a nem-folytonos viselkedés szemléltetése analitikus módszerekkel, illetve numerikus szimulációkkal. Az eredmények vizsgálatainak legszemléletesebb módja az egyes fázisterek vizsgálata különböző súrlódási modellek, és példák esetén.



Az x elmozdulás 5. ábra. 2. példa fázistere egyszerű Coulomb-modell esetén





4. Összefoglalás

Egyszerűbb mechanikai példákon keresztül szemléltetésre,



4. ábra. A differenciál tartalmazás, avagy "sliding" tartomány

és összehasonlításra kerültek a különböző súrlódási modellek, illetve nem-folytonos viselkedések az egyes mechanikai példák bifurkációs diagramjain, fázisterükben, bonyolultabb modellek esetén az egyes egyensúlyi helyzetek stabilitástérképén. Továbbá néhány súrlódási-, és mechanikai paraméterek változásainak hatásaira is kitértünk. Az egyszerűbb mechanikai példák tapasztalatai remek kiindulási pontok lehetnek a szerzett ismeretek átültetésére a gyakorlati feladatokban, és összetettebb mechanikai példák eseteire, ahol a súrlódás hatása jelentős.



Investigation of Cumulative Surface Errors in Milling Operations

MÁRTON JAKAB

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Ádám KISS, Scientific assistant, kiss a@mm.bme.hu

1 Introduction

In milling processes, the desired machined surface cannot be achieved due to numerous reasons. The aim of this study is to examine errors caused by cutting force induced vibrations, neglecting other phenomena, that could cause errors.

In the case of roughing operations, the errors of the consecutive machining operations have an impact on the actual radial immersion and thus, due to errors depending on the immersion, on the other errors. Due to this, in the case of consecutive roughing steps, the SLEs, Surface Location Errors, of the steps can converge to a specific value, or values, the so called Cumulative Surface Location Error, CSLE. The aim of this study is to investigate the CSLEs and their phenomena depending on machining parameters.



Figure 1: Illustration of the surface errors impacting the radial immersion.

2 Applied Methods

For the calculation of the *SLE* Surface Location Error value as a function of the machining parameters, a mechanical model of the milling tool and workpiece is used, as can be seen in Fig. 1. The system was modeled as a 1 DoF vibrating system, where the tool can vibrate only in the direction perpendicular to the machined surface. The vibrations of the tool in other directions, as well as the vibration of the workpiece are neglected.

3 Results

The *CSLE* values, yielded by the two different mathematical models, have different possible phenomena. Both can produce higher period regions, but the explicit model can produce bistable regions, while, in contrast, the implicit model can have bistable period regions. As well, both can produce chaotic solutions, as visualized in Fig. 2.



Figure 2: Bifurcation diagram, where chaotic solutions appear.

The other base of comparison is the safe- and unsafe zones on the $a_0 - n$, dimensionless radial immersion - spindle speed machining parameter domain. The unsafe zones are machining parameter combinations, where undesirable error cumulation phenomena occur. An example for these can be seen in Fig. 3. The most notable difference between them, besides the different kinds of unsafe zones, is the implicit model yielding larger unsafe domains.



Figure 3: Charts of the *CSLE*s of the explicit (left) and implicit (right) model and of the unsafe domains.

The cumulation of errors is modeled using two mathematical models, an explicit and an implicit one. The base difference between them is that the implicit model takes the error of the actual step into consideration when calculating its actual radial immersion, and the explicit one only considers the previous one.

4 Summary

The investigation of surface error cumulation was conducted, discussing both the bifurcation phenomena and the safe zone charts over the machining parameter domain. The two models of cumulation are compared based on the results yielded by these two basics of comparison.



Control of robots using redundant coordinates

KRISTÓF HAVASI

Mechatronical Engineering BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Bálint Bodor, PhD student, bodor@mm.bme.hu

1 Introduction

Nowadays there are more and more fields in both the industry and everyday life, where robots appear. This phenomenon is mainly the consequence of the multifunctionality of the robots we are using. They can be helpful during several industrial tasks, like assembling different parts. In the everyday life they can be useful as an assistant, that are working actively near people. They are called collaborative robots because they interact with humans and acknowledge their presence and actions during their work processes. For this we must be able to provide proper control, and this is not a trivial thing to solve. One of the first questions during model creation is the selection of coordinates, which should describe the mechanism. It can be made easier if we use redundant coordinates in case of closed kinematic loop, because we do not have to care about dependencies between the coordinates we use.



Figure 1: A robot mechanism with redundant coordinates

2 Applied Methods

First we need the equation of motion. It is fairly easy for the independent coordinates, which make up the degrees of freedom of the structure, but with redundant coordinates \mathbf{q} it is a little more complicated. We must use a Lagrange equation of first kind. In order to be able to solve the system of equations, we need to use the geometrical constraints as well by the fact we introduce more variables into the system of equations via the Lagrange multipliers $\boldsymbol{\lambda}$. The system of use of the second derivative of the geometrical constraints. Our robot must be able to track a desired trajectory. A good choice for this is the inverse dynamics control, which I applied with a PD controller. For that I used the so-called servo constraint,

$$\mathbf{r}(\mathbf{q}) = \mathbf{r}_{\mathrm{d}}(t). \tag{3}$$

This way we can compute actuator inputs $\boldsymbol{\tau}$.

3 Results

The results can be shown with simulations of the system. We want to track the trajectory with the D point of the mechanism. It is clear that the robot can accomplish trajectory tracking control with the controller implemented, and is quite fast and responsive, with a fast decay of error. All these properties ensure a proper behaviour, our robot can move in the plane, that is visualised in figure 2, for a circle arc tracking with instant stop in the desired trajectory.



Figure 2: The outputs during trajectory tracking simulation for an arc

4 Summary

Overall the control of robots is a key to work with such machines, which also helps us improve certain processes, that are dangerous for humans, either because of high temperatures or unhealthy conditions during the process. The robots can do these without problem, but we must provide the optimal control for them. Based on the thesis we can say that the redundant coordinates, while they describe the system in a more complex way, are of great use for the inverse kinematics, because it really is easy with them. In conclusion, the control can benefit from the usage redundant coordinates.

equations is of the form of a differential-algebraic system of equations,

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{c}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{B}^{\mathsf{T}}(\mathbf{q})\boldsymbol{\lambda} = \mathbf{H}\boldsymbol{\tau}, \qquad (1)$$
$$\mathbf{\Phi}(\mathbf{q}, t) = 0. \qquad (2)$$

In order to work correctly, we must also use a Baumgarte stabilization during the simulations, otherwise the geometrical constraints change with time, which would lead to a false solution by these numerical errors, that appear via the



Formula Student versenyautó kormányrendszerének szilárdsági és dinamikai elemzése

SZABÓ DÁNIEL

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/I. Témavezető: Dr. Magyar Bálint, adjunktus, magyar@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A kormányművek feladata, hogy a sofőr által kifejtett nyomatékot eljuttassa egészen a kerekig, hogy azokat elfordítva a jármű mozgási irányát megváltoztassa. Maga a kormánymű koncepcióktól függően különböző méretű rudakból, tengelykapcsolókból, fogaskerekekből vagy valamilyen forgó mozgást lineáris mozgássá alakító mechanizmusból áll.

Az autósportban jellemzően fogasléces kormányművek dolgoznak, a pilóta kezére optimalizált kormánykerekekkel.



1. ábra A BME Formula Racing Team 2019-es versenyautójának kormányrendszer modellje.

A dolgozatom célja bemutatni a BME Formula Racing Team versenyautójának kormányrendszert felépítő elemek szilárdsági méretezését.

2. Alkalmazott módszerek

A szilárdsági számítások minden esetben végeselem módszerrel történtek, mivel komplex geometriákról van szó nem lehet kellő pontossággal meghatározni analitikus úton. Éppen ezért az Ansys programcsomag segítségével szilárdsági szimulációkat végeztem az egyes alkatrészeken.



A szilárdsági ellenőrzés után a tervezés utolsó fázisában annak érdekében, hogy minél könnyebb alkatrészt hozzunk létre egy topológiai optimalizációt hajtunk végre szintén az Ansys szoftverben.

3. Eredmények

A kormánymű tartókonzoljának topológiai optimalizációja látható a 3. ábrán, ebből a végleges geometriára futtatott szilárdsági ellenőrzés során a merevsége minimális csökkent a tömege viszont kevesebb mint felére csökkent.



3. ábra A tartókonzol geometriája a topológiai optimalizáció után

A feszültségeloszlás egyenletes köszönhető a topológiai optimalizációnak.



4. ábra A tartókonzol feszültségeloszlása MPa-ban

1. ábra A kormányzási nyomaték számításának modelje

4. Összefoglalás

Összességében anyagi paraméterek, tervezés és optimalizálás segítségével sikerült 400 grammot faragni a teljes rendszer tömegéből. Tekintve, hogy a beépítési környezet nehezítette az alkatrészek vázhoz való rögzítését az 14%-os csökkentés sikeresnek mondható.



Magasabb rendű rúdelméletek hatása rúdszerkezetek mechanikai viselkedésére

SZEMESI TAMÁS

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2017/2018/I. *Témavezető*: Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu *Konzulens*: Pölöskei Tamás, szimulációs mérnök, Furukawa Electric Technológiai Intézet Kft.

1. Bevezetés

A különböző végeselemes módszerek hatásosak bonyolult mérnöki problémák megoldására, azonban numerikus eljárás lévén sose lesznek tökéletesek. Ez nem jelenti azt, hogy nem érdemes a fejlesztésükre időt fordítani. A diplomamunka során egy újfajta eljárással, a Carrera Egyesített Leírásmóddal (CEL) foglalkoztam, mellyel statikus és dinamikus 1D gerenda problémákat oldottam meg, melyek alkalmasak az elmélet tesztelésére.

2. Alkalmazott módszerek

A modell felépítése nem tér el a megszokottól, vagyis az elemek egy tengely mentén követik egymást. Továbbá a csomópontok száma határozza meg a formafüggvényeket, melyek a tér minden irányában egy tengely elmozdulásainak leírására szolgálnak. Bonyolultabb geometria esetén viszont kérdés lehet a keresztmetszetek deformálódása is. Ennek lírására az Euler-Bernoulli elmélet nem alkalmas, azonban a magasabb rendű keresztmetszeti közelítések igen, melyek ugyanúgy polinomokból állnak, így összeegyeztethetők a formafüggvényekkel. Egy adott feladat megoldását két programra bontottam fel. Az első tartalmazza az elemekhez kapcsolható mátrixokat, illetve függvényeket szimbolikusan meghatározva. A második programban a számítások találhatók numerikusan, melyek az előző rész eredményeit használják fel.



A programban tetszőleges terhelés, illetve kényszer megadható, azonban az ellenőrzéshez egységes feltételeket használtam: egyik végén befalazott, másik végén szabad. A CEL Python környezetben meghatározott eredményeinek ellenőrzéshez ANSYS-t használtam héjelemekkel.



2. ábra. Rúd statikus vizsgálatánál a kontrakció

3. Eredmények és összefoglalás

Összességében elmondható, hogy a keresztmetszeti közelítés fokszámának jelentős hatása van az eredményre. Egy minimum határérték alatt pontatlan megoldás kapható, míg túl nagy érték választása esetén csak a számítási idő növekszik feleslegesen. Az ideális közelítést gyakran nehéz megbecsülni, elsősorban a deformáció és a geometria bonyolultságától függ. A csomópontok számának a növelésével gyorsabb konvergencia figyelhető meg, melynek eredményeként kevesebb DoF esetén kapható hasonlóan pontos megoldás.



1. ábra. L-szelvény esetén 0 és 1 közbelső csomópontos lengésképek vetületei

3. ábra. Konvergencia két csomópontos L-szelvényre



MODELLING AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF STICK BA-LANCING

ROCH FRESSON

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Tamás Insperger, head of department, insperger@mm.bme.hu

1. Introduction

In this thesis, human stick balancing was analyzed. The goal is to tune a controller to behave like a human. I started by creating a model for the experiment and the controller. The goal was to get a model suitable for both and easy to use and modelize. That is how I ended up with a 2D model of a stick fixed on a cart.



1. Figure Modelisation of the problem.

2. Methodology

Using the D-curves method, I have tuned my controller depending on the time-delay and the stick length used. Thanks to this, I have PD-controller capable of doing the balancing task.





3. Figure Value of $\varphi(t)$ *during the experiment.*

3. Results

As the behaviour of the machine and the human are not directly comparable, I used stabilometry parameters to know which parameters results on the controller the more human like.

	Error ratio	Rank
Controller 1	215,462	6
Controller 2	55,272	4
Controller 3	8,112	1
Controller 4	88,394	5
Controller 5	8,559	2
Controller 6	12,146	3
min	8,112	

1. Table Error ratio of every controller (subject 1, l=60cm).

4. Summary

Even though I can determine which of my controller is the closest, their overall behaviour is still far from human. Using a more complex controller, with more parameter to contol it may achevie a closest response to the human behaviour.



2. Figure Stability zones of the PD-controller.

I have then compared these controllers to the data of experiment done on several subjects with different stick lengths: 60 cm and 90 cm.



Design and production of uniaxial testing machine for small specimens

BALÁZS BAJNÓCZI & LEVENTE HARSÁNYI

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Attila Kossa, associate professor, kossa@mm.bme.hu

1 Introduction

In many fields of mechanical engineering it is of high importance to know the properties of several materials. In many cases these can be found in the literature but if not, then material testing is necessary. During the project a uniaxial tensile testing machine was designed and built for small size specimens.



Figure 1: Schematic diagram of the tensile testing machine

2 Hardware

During the design a uniaxial frame concept was chosen which contains a linear actuator with a 100 millimeters stroke length, a moving and a standing grip. For the driving system a DC motor was selected which fulfills the requirements. Two different sensors were applied. The displacement of the moving grip was obtained by the application of Hall sensors and the arise force was measured with a loadcell.



Figure 2: The tensile testing machine

speed, the preference in the interval numbers, the opportunity to export the measured data to an Excel file and a safety property which terminates the test status at any given time. Inward every predefined interval the operator can set the displacement value, the direction of the motion and the waiting time.

4 Results

Eventually a few measurements were made with the machine. The applied five different material specimens were the followings: a rag from a mop, an inner rubber tube of a bicycle, a balloon, a hair scrunchy and a cable tie. These probes were made manually so the evaluation of the assessed data are providing only for information. Two separate investigation cases were established: a stress relaxation and a tensile strength test.



Figure 3: The measured stress-strain curve of the cable-tie.

Material Parameter	Cable tie	Unit
UTS	22.46	MPa
Yield strength	17.07	MPa
Fracture toughness	22.01	MPa
Fracture strain	0.495	1
Initial Young's modulus	155.2	MPa

Table 1: The determined parameters of the cable tie probe.

3 Software

In order to regulate the movement a serial communication based microcontroller was used. Two different regulation types were developed: the Displacement and the Manual control. Inside the first one several features were implemented which help the engineer to specify the characteristic of the desired measurements. These are the initialize function, the selection chances of the minimum and maximum

5 Summary

The established instrument is able to make uniaxial measurements carried out by a single engineer. To sum it up the basic of this uniaxial tension machine now is given. According to the results of this project it can be conclude that depending on the wideness of the available budget and the time and effort spent on improving it, the innovation possibilities are endless.



Költséghatékony robotkar modellezése, tervezése és megépítése

BAKONYI DÁVID

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető*: Vizi Máté Benjámin, PhD hallgató, vizi@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A XI.-századi ipar elengedhetetlen részét képezik a robotok. Megvalósításuk igen komplex műszaki feladat ennek megfelelően a kifejezetten költséges gépek közé tartoznak. Dolgozatomban arra kerestem megoldást, hogyan lehetne egyet kisebb költségvetésből megépíteni.

2. Alkalmazott módszerek



1. ábra. Az egyik csuklópár CAD modellje

Az első és legfontosabb feladat a gépészeti tervezés volt. Annak érdekében, hogy a lehető legkevesebb darab és legkevesebb különböző alkatrészt kelljen megtervezni és legyártani. A robot három gömbcsuklóból épül fel, ezek közül kettő egyforma. A megoldás további előnye, hogy így ha szükséges egy szabadsági fokot két motor együtt mozgathat, mégis elég hat motort beépíteni. A legjobb helykihasználás érdekében a motorokhoz tartozó lassító áttételek a csuklókon belül kaptak helyet, ezzel csökkentve a holtjátékot is. Ezek az áttételek saját tervezésű hullámhajtóművekkel valósultak meg amik rendhagyó módon 3D nyomtatással készültek a robot számos többi alkatrészéhez hasonlóan. A tervezés közben végig szem előtt



tartva a szilárdsági, szerelhetőségi és gyártáshelyességi szempontokat.

A második főfeladat a robot irányításához szükséges matematikai modell felállítása és mickrovezérlőn alkalmazható formába öntése volt. Az inverzkinematikai feladat megoldásához alkalmazásra került a Denavit-Hartenberg konvenció és algoritmust kellett találni a léptetőmotorok pozíció szabályzására.



3. ábra: Pályakövetés a szimulációban

A Matlab szoftver csomag és egy speciális fejlesztői környezet a Processing 3 segítségével a robot mozgása szimulálhatóvá vált a virtuális térben. A 3.ábra egy paraméteres térgörbével adott pálya követését szemlélteti.

3. Eredmények

A hullámhatjóművek a végeselem modellnek megfelelően képesek biztosítani mozgások nyomaték igényét. Az eddig megépült csuklók a terveknek megfelelően működnek, hardver ígéretesnek tűnik a folytatáshoz.

Továbbá elkészült a mozgásvezérlőprogram, ami szimulációban képes koordináltan mozgatni a hat szabadsági fokot, illetve a léptetőmotoroknak szolgáltatni a vezérlésükhöz szükséges frekvencia modulált négyszögjelet.

4. Összefoglalás

Annak ellenére, hogy a teljes projekt a beadásig nem fejező-

2. ábra. Az egyik elkészült hullámhajtómű szétszerelt állapotban

dött be úgy gondolom, hogy a leküzdendő műszaki akadályok legnagyobb része már megoldódott és a sikeres befejezés csupán idő kérdése. Véleményem szerint a mérnöki munka szépségét éppen az adja, amikor megvalósulni látjuk a munkánk eredményét, hiszen minden elméleti eredmény akkor nyer igazán értelmet, amikor a fizikai valóságban ölt testet



Mobiltelefon dinamikai jellemzőinek mérése belső szenzorokkal és gerjesztővel

SZABÓ BENDEGÚZ VILMOS

Gépészmérnöki alapszak (BSc), Gépészeti fejlesztő specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető*: Dr. Stépán Gábor József, egyetemi tanár, stepan@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Bonyolult rezgőrendszerek irányításához elengedhetetlen, hogy ismerjük a rezgőmotorokkal felszerelt eszköz fő tehetetlenségi nyomatékait. Ilyen rezgőrendszerrel felszerelt mobiltelefont véletlen elejtés közben forgatni lehetne, elkerülve a nagyobb károsodásokat, továbbá bonyolult, orientációra épülő alkalmazásokat lehetne rá fejleszteni: a telefonban található excenterrel be lehetne lengetni az ingaként felfüggesztett készüléket. Ehhez először is mérnünk kell a készülék fő tehetetlenségi nyomatékait a lehető legegyszerűbb módon.



1. ábra. A mérési összeállítások

2. A mérési módszer

A feladat megoldásához fejlesztett C# nyelven készült



2. ábra. Két különböző elrendezésű mérés időjele és frekvenciatartománybeli jele (balra Θ_{Sx} mérése, jobbra a kettős ingaként viselkedő telefon)

3. Eredmények

A mért tehetetlenségi nyomatékokat egy közelítő hasáb tehetetlenségi nyomatékaival hasonlítottam össze, az eredmények az 1. táblázatban láthatók.

Tengely	Mért $ heta_{ m S} [{ m kg} { m m}^2]$	Számolt $\theta_{\rm S}$ [kg m ²]	Abszolút hiba [$\mathrm{kg}\mathrm{m}^2$]	Relatív hiba
x	$2,042 \cdot 10^{-4}$	$2,508 \cdot 10^{-4}$	$0,466 \cdot 10^{-4}$	18,57%
у	$5,638 \cdot 10^{-5}$	$5,749 \cdot 10^{-5}$	$0,111 \cdot 10^{-5}$	1,94%
z	$3,031\cdot 10^{-4}$	$3,071\cdot10^{-4}$	$0,040 \cdot 10^{-4}$	1,30%

1. táblázat. Mért és számolt tehetetlenségi nyomatékok

4. Összegzés

A kapott eredmények alapján a fejlesztett kísérletek θ_{Sz} és θ_{Sy} méréséhez megfelelően pontosak. A harmadik főtehetetlenségi nyomaték, θ_{Sx} pontosabb számításához viszont ismerni kellene a telefon alkatrészeinek sűrűségét és pontos pozícióját, ezzel kiküszöbölhető lenne a belső inhomogenitásokból adódó hiba.

Android alkalmazás a virtuális orientációs szenzor segítségével rögzíti a telefon helyzetét a mérések során. A kvaternióban megadott orientációkat a repüléstechnikában használt Tait-Bryan szögekbe konvertáljuk, majd FFT segítségével megállapítjuk a mozgások frekvenciáit. Két mérés időjele és frekvencia tartománybeli jele a 2. ábrán látható. Az ingaszerűen felfüggesztett mobiltelefont egyedül a benne található excenter segítségével nem sikerült mozgásba hozni, ezért a készülék kettős ingaként való használatához egy nagyobb teljesítményű, vagy változtatható fordulatszámú excenterre lenne szükség.



Finite element modelling of actuated structures

CSONGOR PAPP

Mechatronics Engineering BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Szabolcs BEREZVAI, Assistant professor, berezvai@mm.bme.hu

This thesis project was conducted at the Hungarian distributor of Ansys, eCon Engineering Ltd. With their deep knowledge in the field of FEA of composite structures, they provided excellent support and supervision.

1 Introduction

The study examined the effect of actuation on the mechanical properties of aluminium and composite structures. The specific goal of this project was to familiarize with numerical methods that are capable of simulating the designed effect of actuators on structures reliably. Piezoelectric actuators are utilized for vibration damping in all kinds of mechanical structures where vibrations are undesirable. In the case of aeroplanes and helicopters, vibration-damping can reduce noise levels and realizes a more efficient fuel consumption. The thesis concludes the investigation of the operation of a chosen piezoelectric actuator on aluminium and composite structures with simplified geometry and terminates with the static structural and modal analysis of a composite airfoil.

2 Applied Methods

In the final task, the effect of actuation was examined on an airfoil of a glider by placing M-8557P1 type of MFC patches along the trailing edge with idealized supports as Figure 1 shows.



Figure 1: Simulation arrangement

The composite structure of the airfoil was modelled with T300/967 woven with varying number of layers, and fiber directions on its parts as Figure 2 depicts. The actuation was provoked by a thousand volts which is a theoretical upper limit for a small aircraft.

3 Results

Figure 3 illustrates the deformed airfoil shape compared to the undeformed one, indicating the maximal deformation by D_m and the maximal deformation of the trailing edge by D_t .



Figure 3: Airfoil deformation

$$D_t = 5.516 \text{ mm}, \quad D_m = 11.850 \text{ mm}$$
(1)

The modification of the natural frequencies of the airfoil by actuation is summarized in Figure 4.



4 Summary

Figure 3 shows that the airfoil deformation occurs on a large extent, and by a CFD simulation, it was proven that the shape deformation of the wing has a significant effect on the lift- and drag coefficients, which is an important observation regarding the utilization of the technology. For the natural frequencies, the simulation shows that the frequencies stay relatively close to each other; they are shifted downwards as a whole, and the differences are significant in terms of percentile change. The simulation showed that piezoactuators indeed could be used to modify airfoil geometries and their parameters by that sufficiently and the modelling of piezo elements is feasible despite several difficulties. The technology has numerous details for further research, but it is proven that the utilization of it can bring several positive and useful effects.



Figure 2: Laminate codes of the airfoil parts



Control of a Juggling Robot

BOLDIZSÁR ZEMPLÉNYI

Mechatronics Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Bálint BODOR, PhD Student, bodor@mm.bme.hu

1 Introduction

Juggling is a physical skill, performed by a juggler, involving the manipulation of objects for recreation, entertainment, art or sport. This complex activity requires concentration, good hand-eye coordination and a lot of practise. Designing a robotic system that is able to perform toss juggling is a great challenge that provides an opportunity of studying and developing the principles of real-time mechanical control. This thesis aimed at this task.

The process requires the design of a mechanical system, selecting and designing the control method as well as planning an adequate trajectory for the robot.



Figure 1: Mechanical model

2 Control Task

The main expectation is that the controller in demand has to be robust. This way the actual value of m_3 during juggling is not necessary to be known. Three control methods are discussed, which are the PD, Inverse Dynamics and Sliding Mode Control. They were compared on a test trajectory.



3 Trajectory Planning

The robot needs a prescribed trajectory that it will follow during juggling. Based on some research people move their hands along an oblique ellipse, so the goal is to reproduce this. A polynomial fitting method and an extended least square method were applied to this task.



Figure 3: Created trajectories: Polynomial fitting (left), Least Square Method (right)

4 Results

The simulations showed that the best accuracy was provided by the Sliding Mode Control, although the Inverse Dynamics worked quite well too. From the trajectories the polynomial fitting proved to be better in this case. Finally the selected control method was applied to the trajectory.



Figure 4: Error in joint space

Figure 2: Absolute error in joint space

5 Summary

After the investigation of controllers and trajectory planning methods the initial goal was reached, the system was able to juggle three balls in simulation. The obtained results provide a starting point to realize such a system in real life, but in that case other circumstances would be needed to be taken into account.



Optimization Methods in the Mechanical Modelling of Running

Ábel Mihály NAGY

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Ambrus ZELEI, Research associate, zelei@mm.bme.hu

1 Introduction

It is beneficial and exciting to study the biomechanics of human locomotion. By a deeper understanding of human motion control, humanoid robots and exoskeletons can be designed and analysed, and better sports equipment can be produced. In my work, I investigated the most widespread model of human running, the Spring Loaded Inverted Pendulum (SLIP) model, which can be seen in figure 1. SLIP is a hybrid dynamical system, since its motion consists of continuous phases, which can be described by ordinary differential equations, and instantaneous discontinuities. The goal of the thesis was to apply optimisation on this simplest model to obtain a deeper understanding of the optimal gaits for different objective functions.



Figure 1: The Spring Loaded Inverted Pendulum (SLIP) model.

$m \; [\mathrm{kg}]$	$k \; [\rm kN/m]$	r_0 [m]	$g \; \mathrm{[m/s^2]}$	$\beta \; [\mathrm{rad}]$
80	15	1	9.81	1

Table 1: The reference values of the parameters.

2 Applied Methods

The equations of motion of the model were made dimensionless and were numerically integrated using MATLAB. The periodic orbits were found by parameter continuation using the Adolfsson's iteration extended with the equation fixing total mechanical energy. The stability of the found periodic orbits was analysed by two different approaches: by the monodromy matrix and by perturbation methods. 3 different objective functions were minimised using an adapted optimisation technique based on the Nelder-Mead simplex algorithm. Additionally, the SLIP parameters were fit to real human running measurement data.

3 Results



Figure 2: The characteristic Floquet-multipliers, which determine the stability of the found periodic orbits for different values of the dimensionless spring stiffness.



Figure 3: The ground ratios of the fitted models against the measured data for different average velocities.

4 Summary

The different objective functions were minimised along the dimensionless parameters. It was found that both Energy Cost Of Running and Maximal Leg Spring Force is optimal if the touchdown angle and the total mechanical energy is as large as possible, but while ECOR is optimal for a certain dimensionless spring stiffness, MLSF is optimal for its smallest possible value. Furthermore, it was concluded that it is possible to fit the SLIP model to 4 specified biomechanical quantities in a certain speed range.



Követési távolságtól függő reakcióidő hatás a járműkövető modellre

MARTINOVICH KRISTÓF

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető:* Kiss Ádám, tudományos segédmunkatárs,

1. Bevezetés

A szakdolgozat során a járműkövető modellt vizsgáltuk (angolul car-following model), amely a szakirodalomban elterjedten használt a gyorsforgalmi utak egysávos modellezésére. A választott állapotváltozók az egyes járművekhez tartozó követési távolság és sebesség. Bevezetésre került az állapotfüggő időkésés, ami ebben a modellben újdonságnak számít. Ez abból a tapasztalatból ered, hogy a sofőrök időkéséssel modellezett reakcióideje függ a körülményektől. Kisebb követési távolság esetén jobban figyelnek a sofőrök, így kisebb az időkés, megnövekedett követési távolság esetén kevésbé "feszesen", figyelmesen vezetnek, így növekszik az időkésés. Ezt a modellben implicit módon felírt, a követési távolságtól lineárisan függő időkéséssel vettük figyelembe. A kutatás során az eredményeket konstans időkéssel felírt modellel hasonlítottuk össze.



1. ábra. Az állapotfüggő időkésést leíró függvény változásának hatása a stabilitás diagramra

2. Alkalmazott módszerek

A dolgozatban az elmélettel párhuzamosan esettanulmányon keresztül vizsgáltuk a két rendszert és hasonlítottuk össze őket. A konstans-, és az állapotfüggő időkésés esetén is levezetésre került a karakterisztikus egyenlet. A gyökök és a stabilitástérkép számítása MATLAB DDE-BIFTOOL szoftvercsomaggal, követő módszerrel történt. Ezt követően numerikus szimuláció futtatásával is megvizsgáltuk a rendszereket, így a lineáris stabilitáson túl már a bistabil tartományokat is ki lehetett mutatni, a periodikus megoldások figyelembevételével. Végezetül a rendszer globális tulajdonságainak vizsgálata következett nemlineáris számításokkal. Ehhez szintén a DDE-BIFTOOL követő módszerét alkalmaztuk. Ennek segítségével pontosan meg lehetett határozni a rendszer egyensúlyi helyzettől távoli viselkedését és a megválasztott paramétertérben a kialakuló periodikus pályák alakulását.



3. Eredmények

Az állapotfüggő időkésés a lineáris stabilitási határt aszimmetrikussá tette a konstans időkéséssel szemben: kis követési távolságok esetén csökken az időkésés, így javul a rendszer stabilitása, nagy követési távolságok esetén, a növekvő időkésés miatt romlik a stabilitás, ahogyan az 1. ábra szemlélteti. Az egyensúlyi helytől távolabb, a kialakuló periodikus pályákat is aszimmetrikussá tette, elnyújtotta a nagyobb követési távolságok irányába, az összehasonlítás a 2. ábrán látható. A 3.
b. ábrán, a bifurkációs diagramon $v_{\rm amp}, \, h$ metszetben szerepelnek a stabil és instabil periodikus pályák. Ezáltal jelentősen megnövekedett a gyakorlati, mérnöki szempontból igen veszélyes bistabil tartomány is, ami a 3.c. ábrán szerepel. Ilyen paraméterekkel üzemeltetve a rendszert, kis perturbáló hatás következtében (jelen modell esetén ez egy kis fékezést jelent) a járművek követési távolságában és sebességében bekövetkező rezgés lecsillapodik és beáll az egyensúlyi helyzethez, a járművek kis idő után egyenletesen haladnak tovább. Azonban egy túl nagy perturbáció, azaz fékezés hatására a járművek mozgása rááll egy nagy amplitúdójú periodikus pályára, ami a forgalmi dugókat reprezentálja. A 3.a. ábrán látható a rendszer 3 dimenziós bifurkációs diagramja: a lineáris stabilitási határ és a periodikus pályák együtt ábrázolva.





4. Összefoglalás

Összefoglalva elmondható, hogy az állapotfüggő időkésés jelentős hatással van a

rendszer lineáris és globális viselkedésére. Kis követési távolság esetén javít a stabilitáson, nagy követési távolság esetén akár a teljes paramétertartományon instabillá teszi, továbbá a veszélyesnek tekinthető bistabil tartományokat jelentősen megnöveli. A kutatás eredménye alapján az állapotfüggő időkésést a pontosabb modellezés érdekében érdemes figyelembe venni.

2. ábra. Periodikus pályák összehasonlítva: állapotfüggő-, és konstans időkésés esetén



Nonlinearity and Delay in Robotic Machining Applications

Bártfai András

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Dombóvári Zoltán, associate professor, dombovari@mm.bme.hu

1 Introduction

Nowadays, there is an increasing number of robots in manufacturing facilities. There are great opportunities to use these robots for machining, because of their versatility and relatively low cost compared to machine tools. These processes expose the slender and not especially stiff robotic arms to great forces. Furthermore, the drive can generate significant nonlinearities, especially at large displacements.



Figure 1: Model of the robotic arm in milling process.

Usually, a proportional-derivative control is used in the inner controller of the robot to decrease the positioning error. In this study, the arising vibrations are mitigated by a proportional acceleration feedback control scheme fed through the conventional control of the robot. This study investigates the stability of the mathematical model based on real life robotic arms, considering the nonlinearities, time delays and feedback controllers in orthogonal cutting and milling processes.

2 Applied methods

The control loop of the robot includes time delay, and the investigated machining applications have the so called regenerative effect, which leads to time delay in the machining processes as well. This means, that the investigated systems are modelled with delay differential equations (DDEs). The stability charts of relatively simple delay differential equations can be obtained with the D-subdivision method. Analytical solutions were obtained with this method, if possible. When analytical solutions could not be obtained, the semi discretization method, which is a powerful and robust numerical method that deals with delay differential equations, was used to obtain the stability charts. It approximates the delays with a sawtooth-like time periodic delays as it can be seen in Figure 2.

3 Results

The results with and without the acceleration feedback control and given data set in orthogonal cutting process can be seen in Figure 3 and in milling process in Figure 4. The continuous lines represent the stability limits with the acceleration feedback control and the dashed lines represent the stability limits without it.



Figure 3: Stability charts in orthogonal cutting process with (continuous) and without (dashed) acceleration feedback control.





Figure 2: Sawtooth-like time-periodic delay.

Figure 4: Stability charts in milling process with (continuous) and without (dashed) acceleration feedback control.

The results clearly show that a proper choice of acceleration feedback control parameters can improve regions of stability significantly in both orthogonal cutting and milling processes. Furthermore, the unstable region at high speed of revolutions in milling process can be influenced greatly as well.



Autókövetési modell vizsgálata heterogén rendszerben

HERTELENDY KRISZTIÁN GYÖRGY

Gépészmérnöki BSc, Matematikus-mérnök Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető:* Dr. Hajdu Dávid, tudományos segédmunkatárs, hajdu@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A kooperatív adaptív sebességtartó automatika (cooperative adaptive cruise control – CACC) az automatizált járművek sebességének forgalomtól függő szabályozását végzi egyszerre több járművel történő kommunikáció segítségével. A szakdolgozat témája automatizált járműveket és emberi vezetőket vegyesen tartalmazó járműsor modellezési lehetőségeinek vizsgálata.



1. ábra. A vizsgált járműcsoport vázlata

2. Alkalmazott módszerek

Az említett két típusú jármű közötti fő különbség az időkésésben mutatkozik. Az ember időkésése a kísérletek alapján állandónak tekinthető. Ezzel szemben az automatizált jármű időkésése a mintavételezésből eredően a 2. ábrához hasonlóan periodikusan változik.



2. ábra. Az automatizált jármű periodikus időkésése

Lehetséges és a szakirodalomban gyakran használt módszer a változó időkésés helyettesítése egy állandó τ értékkel, ahol differenciaegyenletre vezet, ahol $\mathbf{X}(k)$ a rendszer állapotvektora, \mathbf{A} a rendszermátrix, \mathbf{B}_0 , \mathbf{B}_1 bemeneti vektorok, u(k)a bemenet, az elöl haladó jármű sebességingadozása.

3. Eredmények

Az automatizált jármű minősítésének alapjául két kritérium szolgál, a különböző modellek is ezen kritériumokon keresztül kerültek összehasonlításra. A rendszer-stabilitás lényegében elvárja az automatizált járműtől, hogy önmagától ne vessze el a stabilitását. Az ennél erősebb minőségi kritérium a teljes lánc-stabilitás, ami már azt is elvárja a járműtől, hogy csökkentse az első jármű sebességében fellépő rezgések amplitúdóját.



3. ábra. Folytonos és diszkrét idejű teljes lánc-stabil határok

A 3. ábrán az erősebb kritérium, tehát a teljes láncstabilitási határgörbe kiértékelése látható az 1. ábra szerinti négy járműből álló sorra folytonos idejű és diszkretizált rendszerben a $\beta_{3,1}$ és $\beta_{3,0}$ szabályozóparaméterek síkján. A kiértékelés egy olyan esetre készült el, ahol egyéb hatások is figyelembevételre kerültek, így az automatizált jármű további statikus időkésése, valamint az időkésés ingadozási sávjának növekedési kimaradó adatcsomagok következtében.

4. Összefoglalás

 τ az időkésés középértékét jelöli. Ez viszonylag egyszerű, folytonos időtartományban könnyen kezelhető modelljét eredményezi a járműsornak. A szakdolgozat célja ennek ellenkezőjének vizsgálata, diszkrét modell alkalmazása a teljes rendszerre. Ezáltal elérhető, hogy az automatizált jármű időkésése megfelelően legyen figyelembe véve, míg az emberi vezető állandó időkésése is megközelíthető az időlépés növelésével. A leírás végül a

 $\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}_0 u(k) + \mathbf{B}_1 u(k-1)$ (1)

A vizsgált esetekről elmondható, hogy többségében kellően közeli görbék adódtak a stabilitási határokra, ami ezen esetekben a gyorsabb futási idejű és egyszerűbben kezelhető folytonos idejű modell használatát teszi indokolttá. Azonban a jövőben az automatizált járművek elterjedésével és így nagyobb arányú részvételével a forgalomban, valamint egyéb hatások figyelembevételével, amik a változó időkésés hatását hangsúlyozzák indokolttá válhat a vizsgált diszkrét idejű modell használata az említett negatívumok ellenére is.



Sávváltó járművek vizsgálata dőlés figyelembevételével

JUHOS-KISS ÁLMOS

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető:* Vörös Illés, doktorandusz, illes.voros@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A sávváltó és sávtartó segédek napjaink vezetést támogató rendszereinek (röviden DAS) meghatározó elemei, melyek a biztonságos közlekedést segítik elő. A DAS rendszerek jellemzően a járműre szerelt szenzorok, kamerák és radarok segítségével gyűjtenek információt a környezetről és az alapján hoznak meg döntéseket, illetve avatkoznak be adott esetben például fékezéssel, vagy irányváltoztatással egy lehetséges baleset elkerülése érdekében. Dolgozatomban az autonóm járművek laterális pozíciószabályozását vizsgáltam síkbeli és térbeli egynyomvonalú járműmodelleken keresztül, az időkésés hatását is figyelembe véve.

2. Alkalmazott módszerek



1. ábra. Síkbeli egynyomvonalú járműmodell



Routh-Hurwitz és Liénard–Chipart kritériumokkal, a késleltetett esetben pedig a D-szétválasztás módszerével vizsgáltam. Végül négylépéses Runge-Kutta módszerrel előállítottam a mozgásegyenletek diszkrét leképezését, mely segítségével numerikus szimulációkat végeztem.

3. Eredmények

A szimulációk során egy sávváltást vizsgáltam különböző szabályozóparaméterek esetén. Az időkésés hatása mindkét modell eredményeinél megfigyelhető, mely nem elhanyagolható oszcillációkat okozott a beállás ideje alatt. A térbeli modell számításainál különböző torziós merevségek hatását is figyelembe vettem, ahol azt az eredményt kaptam, hogy kisebb merevség esetén a beállás során fellépő maximális dőlésszög növekszik.



3. ábra. Merevség hatása a dőlésszögre

A rendszerbe a dőlésszöget is visszacsatolva közel azonos beállás mellett csökkent a jármű dőlése, ami biztonság és komfortérzet szempontjából is előnyös.



4. ábra. Dőlésszög visszacsatolás hatása a pályagörbékre

2. ábra. Térbeli egynyomvonalú járműmodell

A számítási módszerek a síkbeli és térbeli esetben azonosak voltak. A mozgásegyenleteket a Gibbs-Appell módszer segítségével határoztam meg, majd ezeket linearizálva a szabályozást jellemző állapottér reprezentációs alakra jutottam. A rendszerbe a laterális pozíció és a szögelfordulás lett visszacsatolva. Az időkésést elhagyva a stabilitást a

4. Összefoglalás

A pozíciószabályozás vizsgálatánál rengeteg jelenség leírására van lehetőség, már viszonylag egyszerű jármű- és szabályozó modell esetén is. Még az általam használt modellnél is sok más további kutatásra van lehetőség, mint például a kerekek elemelkedéséhez szükséges dőlésszög, vagy a "jerk", azaz a gyorsulás deriváltak vizsgálata.



Geometriai nemlinearitás és bifurkációk rugalmas rúdszerkezetekben

SZIKLAI KRISZTIÁN

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető*: Dr. Szekrényes András, egyetemi docens, szeki@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A hagyományos mechanikai módszerek alkalmazásával általában kis elmozdulásokat, illetve lineárisan rugalmas viselkedést feltételezünk. Nagy deformációjú rúdszerkezetek esetén ez pontatlan eredményhez vezethet, ezért ilyen esetekben a hajlítás nemlineáris elméletére van szükség.

2. Alkalmazott módszerek

Az általános probléma egy erővel és nyomatékkal együttesen terhelt befogott tartó, melynek nagy deformációja elliptikus integrálokkal és Jacobi-függvényekkel modellezhető. A rugalmas szál mentén több inflexiós pont, vagy akár több körülfordulás is lehetséges. A deformált alakok stabilitását a potenciális energia második variációjának előjele alapján kell meghatározni. Ez a legegyszerűbben a Jacobi-teszt segítségével számítható.

3. Eredmények

Az egyszerű, függőleges erővel terhelt tartó esetén a több inflexiós ponttal rendelkező állapotok is figyelembe vehetők. Néhány lehetséges lehajlott alak az 1. ábrán látható.



Az erő-elmozdulás függvény a 2. ábrán látható. A folytonos vonal a stabil, a szaggatott vonal az instabil állapotokat jelöli.



Követőerővel való terhelés esetén a lehajláshoz viszonyított erőszög konstans, a terhelő erőt folyamatosan növeljük. A 3. ábrán az axiális követőerővel és nyomatékkal együttesen terhelt tartó deformált alakjai láthatók.



3. ábra. Követőerővel és nyomatékkal terhelt rúd.

Hárompontos hajlítás esetén figyelembe kell vennünk a változó ívhosszat, a súrlódást, illetve a megtámasztás sugara miatt a kontaktpont eltolódását. A 4. ábrán a hárompontos hajlítás néhány egyensúlyi állapota látható.







 $\delta[m]$

5. ábra. Erő-elmozdulás függvény különböző súrlódások esetén.

4. Összefoglalás

A dolgozatban a nemlineáris hajlítás néhány alkalmazási példája került bemutatásra, ide értve a befogott rúd, a követőerő, a kihajlás, és a hárompontos hajlítás problémáját. A modell végeselemes módszerrel is ellenőrzésre került.



Lábakon közlekedő rendszerek szimulációja és optimalizálása

SÁRDI FERENC ZSOLT

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető*: Dr. Zelei Ambrus, tudományos munkatárs, zelei@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Szakdolgozatomban természetből átvett gyakori mozgásformákat modelleztem. Elsőként az ugrás és a futás tömeg-rugó modelljét vizsgáltam, ezután pedig egy kétlábú modellt. Az *1. ábrán* látható ugró modell, és a *2. ábrán* látható futó modell esetében is a mozgás két váltakozó fázisból áll. Ezek a repülő és a talaj fázis.



1.-2. ábra – Az ugrás és a futás tömeg-rugó modellje

Azonban a *3. ábrán* látható kétlábú-tömeg rugó modell esetében a mozgásfázisok sorrendisége előre nem ismert. A soron következőt mindig az előző fázist lezáró események vizsgálatával határozhatjuk meg. Négyféle mozgásfázis különböztethető meg ebben az esetben: repülő fázis, dupla talaj fázis, mellső lábi talaj fázis, hátsó lábi talaj fázis.



3. ábra – Kétlábú tömeg-rugó modell fázisai

2. Alkalmazott módszerek

3. Eredmények

Ábrázoltam a mozgásformák síkbeli pályáit, mindhárom esetben találtam stabil periodikus megoldásokat. Erre példa a kétlábú modell esetében a *4. ábrán* látható. Pirossal a rúd bal végének, zölddel a rúd jobb végének, kékkel pedig a súlypont pályáját jelöltem. A kék kör és rombusz a lábak földet érési pontját jelölik.



A rendszereimre kapott összenergia minden esetben konstansnak adódott, ugyanis a modellek nem tartalmaztak energia elnyelő elemet. Erre példa az 5. *ábrán* látható, szintén a kétlábú modell esetére.



4. Összefoglalás

Sikerült egyszerű, természetbeli példákon alapuló mozgásokat modelleznem: ugrás és futás tömeg-rugó modellje. Vizsgáltam egy kétlábú tömeg-rugó modellt is, amely esetében nem egyértelmű, hogy a mozgásfázisok milyen sorrendben követik egymást, ezt csak az aktuális fázist lezáró esemény vizsgálata alapján dönthetjük el.

A mozgásformák egyes fázisaihoz tartozó mozgásegyenleteket a Newtoni egyenletek segítségével írtam fel, és ellenőriztem a másodfajú Lagrange-egyenlettel.

Az egyes fázisok mozgásegyenleteit numerikusan megoldottam, majd az ugró és a futó modell esetében a megoldásokat egymásután fűztem és egy "*for*" ciklussal periodikussá tettem, míg a kétlábú modell esetén a fázist lezáró esemény vizsgálata után egy "*switch*" kapcsoló vált a megfelelő következő fázisba. A szimulációk során sikerült mindhárom modell esetében stabil periodikus pályákat találni. Az előzetes várakozások, miszerint az összenergia konstansnak adódik minden esetben beigazolódtak.

A modellek jó alapjai az emberi mozgás modellezésének, bár ehhez továbbfejlesztésre szorulnak.



Reliability of multiwire proportional chambers in the field measurements: thermal and mechanical limits

ÁDÁM LÁSZLÓ GERA

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Bálint Magyar, assistant professor, magyar@mm.bme.hu Advisor: Dr. Dezső Varga, group leader, varga.dezso@wigner.hu

1. Introduction

The REGARD group is focused on the research and development of gaseous detectors through Charpak's idea which resulted the usage of the multiwire proportional chambers as the core element of an imaging system. The Hungarian-Japanese collaboration helped to establish the Multiwire proportional chamber-based Muon Observatory System (MMOS) in Japan near the Sakurajima volcano. This few years of work during the upgrade of the MMOS brought us a lot of experiences in this area including the possible limits of the system. My work aims to investigate the effects of the environmental parameters to our chambers and the effectiveness in a mechanical sense of the used adhesive.



1. Figure (A) The photograph of mMOS system near the Sakurajima volcano in Japan. (**B**) Schematic view of 1 mMOS, currently 11 system is working continuously.

2. Applied methods

In the first section of the thesis, I investigated the effects of the environmental parameters (temperature, pressure) to our detectors. I successfully built a measurement setup that can imitate the outdoor conditions and our chambers can be tested. In this so called "heatbox" the temperature inside can be changed in a specified range and its effect can be characterized quantitatively.

on one chamber. Due to the lack of the fatigue test, I validated my model with the measurement and successfully made the Random Vibration analysis on our chamber. In order to somehow connect the "static" (Tensile test) and "dynamic" (Vibration analysis) measurements a quite conservative approach was used to be on the safe side.

3. Results

I made a 1 month long measurement where the temperature was changed from 25 to 50°C and the pressure according to the weather. After applying corrections the different environmental effects could be charactherized quantitatively. During the measurement I observed an interesting "tempering effect" that resulted a higher temperature limit after applying each heat cycle that can be adapted in the construction.



2. Figure The current of the system as a function of the temperature. The temperature limit can be increased with heat cycles due to the ,, tempering effect"...

I compared the results from the different measurements and the first six eigenfrequencies are the same within 10%. In the next step the highest test profile was used with the highest scale factor for the Random Vibration analysis corresponding the most dangerous case. A relatively small damping ratio was applied resulted from the modal analysis. In the end even safety factor remains therefore the chambers can be transported without a problem.

In the second section I was interested in the mechanical properties of the adhesive that is used for the construction. During the transportation to Japan random vibration effects present that can damage the system. First I measured the tensile strength of the adhesive in different configuration. After that a modal testing and a Finite Element simulation was performed

Connection	Tensile strength	Simulation	S.f.
G10-base plate	<i>σm</i> =1.47 MPa	<i>σrv</i> =0.15 MPa	<i>n</i> =9.8
FR4-base plate	<i>σm</i> =1.47 MPa	<i>σrv</i> =0.46 MPa	<i>n</i> =3.2
Pillar-base plate	<i>σm</i> =5.7 MPa	<i>σrv</i> =2.12 MPa	<i>n</i> =2.7

1. Table The comparison of the results from tensile test and the vibration simulation.



Trajectory planning of autonomous vehicles

PÉTER LUKÁCS-BORBÉLY

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: László Bencsik, research associate, bencsik@mm.bme.hu

1. Introduction

The idea of autonomous cars is a dream for many people since the construction of the first motor vehicle. With the most recent innovations in the automotive industry this dream has come true and the first self-driving cars became available to the public in the last years. This is a significant step in many aspects since it promises great improvements regarding safety, driving comfort, travel time and fuel economy. The aim of my work was to find the optimal trajectories that a self-driving car should use during certain maneuvers, particularly forward parallel parking and overtaking.

2. Applied methods

For my work I used the so-called bicycle model, which assumes that the vehicle can only move in horizontal directions, the vertical dynamics are neglected. The model contains of only two wheels and the chassis connecting them.



Figure 1. The bicycle model

Using this model, I ran simulations for forward parallel parking and overtaking. To describe these maneuvers, I worked with a move set that I called the S-maneuver.



This means that the simulations were parametrizable using the yaw (α) and turning (β) angles. Using these and some other parameters simulations were performed, and the area of the maneuver were measured in each case.



3. Results

After all the simulations were done, I compared the areas of every parameter combination. I examined three cases: forward parallel parking with and without obstacle and overtaking. The results vary in every case. For example, in case of parallel parking without obstacle, the best solution is to choose the lowest possible yaw and turning angle. For overtaking the complete opposite turned out to be true: higher angles required less space for the maneuver. However too high turning angles are not feasible when driving at high speed because of slipping.



Figure 5. Results for a parallel parking situation

4. Summary



Figure 2. The S-maneuver

A model and a simulation environment were introduced, and different realizations of parallel parking and overtaking were compared. The obtained results provide some information about how the yaw and turning angles affect the required area for the investigated maneuvers and give us an idea what the best trajectories would be in certain situations.



Design and production of uniaxial testing machine for small specimens

BALÁZS BAJNÓCZI & LEVENTE HARSÁNYI

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Attila Kossa, associate professor, kossa@mm.bme.hu

1 Introduction

In many fields of mechanical engineering it is of high importance to know the properties of several materials. In many cases these can be found in the literature but if not, then material testing is necessary. During the project a uniaxial tensile testing machine was designed and built for small size specimens.



Figure 1: Schematic diagram of the tensile testing machine

2 Hardware

During the design a uniaxial frame concept was chosen which contains a linear actuator with a 100 millimeters stroke length, a moving and a standing grip. For the driving system a DC motor was selected which fulfills the requirements. Two different sensors were applied. The displacement of the moving grip was obtained by the application of Hall sensors and the arise force was measured with a loadcell.



Figure 2: The tensile testing machine

speed, the preference in the interval numbers, the opportunity to export the measured data to an Excel file and a safety property which terminates the test status at any given time. Inward every predefined interval the operator can set the displacement value, the direction of the motion and the waiting time.

4 Results

Eventually a few measurements were made with the machine. The applied five different material specimens were the followings: a rag from a mop, an inner rubber tube of a bicycle, a balloon, a hair scrunchy and a cable tie. These probes were made manually so the evaluation of the assessed data are providing only for information. Two separate investigation cases were established: a stress relaxation and a tensile strength test.



Figure 3: The measured stress-strain curve of the cable-tie.

Material Parameter	Cable tie	Unit
UTS	22.46	MPa
Yield strength	17.07	MPa
Fracture toughness	22.01	MPa
Fracture strain	0.495	1
Initial Young's modulus	155.2	MPa

Table 1: The determined parameters of the cable tie probe.

3 Software

In order to regulate the movement a serial communication based microcontroller was used. Two different regulation types were developed: the Displacement and the Manual control. Inside the first one several features were implemented which help the engineer to specify the characteristic of the desired measurements. These are the initialize function, the selection chances of the minimum and maximum

5 Summary

The established instrument is able to make uniaxial measurements carried out by a single engineer. To sum it up the basic of this uniaxial tension machine now is given. According to the results of this project it can be conclude that depending on the wideness of the available budget and the time and effort spent on improving it, the innovation possibilities are endless.



Közbülső koncentrált tömeggel kiegészített Pflüger-oszlop dinamikai stabilitásvizsgálata

SZABÓ MÁRTON

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető:* Dr. Csernák Gábor, egyetemi docens, csernak@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozatom célja egy olyan viszkoelasztikus, egyik végén befogott rúd stabilitásvizsgálata, melyre a rúd deformációját lekövető, tangenciális követőerő hat, és található rajta egy közbülső és egy rúd végén lévő koncentrált tömeg is. Ebben a rendszerben kétféle instabilitás léphet fel, az egyik a ún. flutter, ez egy dinamikus instabilitás, és a másik pedig a divergencia, ami pedig statikus instabilitás. A rúd stabilitásának vizsgálatakor ezen két instabilitás megjelenéséhez szükséges kritikus követőerőket figyeltem, a közbülső tömeg nagyságának és elhelyezkedésének függvényében.



1. ábra. A vizsgált modell és a megépített szerkezet

2. Alkalmazott módszerek

A feladat megoldását három különböző módszerrel végeztem. Elsőként analitikusan vizsgáltam a szerkezetet. Itt a rúd viszkoelasztikus voltát a Kelvin-Voigt anyagmodellel vettem figyelembe. A koncentrált tömegeket a peremfeltételekben realizáltam. Továbbá a szerkezet linearizált mozgásegyenletét írtam fel:

$$EI\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + E^*I\frac{\partial^5 w}{\partial t \partial x^4} + P\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + m\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + K\frac{\partial w}{\partial t} = 0$$

Ezt követte egy nemlineáris numerikus szimuláció, végeselemes módszerrel, mely során a követőerőt már nem lineari-

3. Eredmények

A vizsgálatok eredményei azt mutatták, hogy a közbülső koncentrált tömeg jelenléte, illetve nagyságának növelése általában megemeli, mind a flutter, mind a divergencia instabilitás megjelenéséhez szükséges kritikus követőerőt. Ez utóbbit sokkal drasztikusabban. A tömeg helyzete is befolyásolja a kritikus követőerőket, de nem ilyen egyértelműen. Továbbá az a tapasztalat, hogy a közbülső koncentrált tömeg csökkenti a rezgés frekvenciáit.



2. ábra. A sajátkörfrekvenciák a követőerő függvényében



3. ábra. A kritikus követőerők függése a közbülső és a rúd végén található tömeg arányától

záltam, de az anyagmodell linearitását megtartottam. Végezetül az 1. ábrán látható kísérleti eszközt is elkészítettem. Ezen méréseket végeztem, azért, hogy az előző két módszerrel számolt eredményeket validáljam. A három módszer segítségével aztán kiszámítottam, illetve kimértem egy közbülső tömeggel kiegészített és egy anélküli Pflüger-rúd rezgési frekvenciáit a követőerő függvényében. Továbbá a stabilitási tartományok határterheléseinek változását is meghatároztam a közbülső tömeg nagyságát és helyzetét változtatva.

4. Osszefoglalás

Összességében elmondható, hogy mind a három módszerrel igen hasonló, egymást alátámasztó eredmények jöttek ki. Következtetésként levonható a dolgozatból, hogy bármilyen követőerővel terhelt rendszer esetén, legyen az egy csővezeték végén található kiömlőnyílás, vagy egy fellőtt rakéta, **a** helyesen elhelyezett közbülső tömeg bevezetése növeli a rendszer stabilitását.



Parametric Study of Human Balancing on Rolling Balance Board

Anna Lántzky

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Insperger Tamás, associate professor, insperger@mm.bme.hu

1 Introduction

The analysis of human balancing is becoming very important nowadays, by understanding it, designing the motion of humanoid robots and diagnosing musculoskeletal diseases at an early phase can become possible. The main purpose was leading a parametric study on human, balancing on rolling balance board. For this 10 individuals were recorded by motion capture, and their movements were evaluated with stabilometry parameters. Different modelling approaches are compared with the use of the measured data, including the adequateness of the single inverted pendulum (SIP) model.

2 Evaluation

The equations of motion are derived for SIP model (Fig. 1), and the measured angle values are substituted into it for obtaining the control torque

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{S} \cdot \mathbf{q} = \mathbf{Q}_{\mathbf{j}}^{*}(t). \tag{1}$$

A full body skeleton model is also built for validating the model. According to the full body motion capture results, the dominant direction of the motion is in the frontal plane, so it can be concluded as planar.



3 Results

For the angles, the averaged results are collected, in general, the angle of the hip is higher, than the ankle's, this means, that the double inverted pendulum (DIP) model is more adequate for modelling the motion.

Angle	STD $[^{\circ}]$	LA $[^{\circ}]$	NPL $[^{\circ}/s]$	MPF [Hz]
SIP	0.263	0.868	0.071	0.893
DIP	1.398	5.965	2.884	0.812

Table 1: Stabilometry of the angles

The averaged stabilometry results for the different parameters are collected into Table 2.

Parameter	STD $[^{\circ}]$	LA $[^{\circ}]$	NPL $[^{\circ}/s]$	MPF [Hz]
h = 0	2.1576	8.5567	1.2176	1.0195
h = 75[mm]	1.7677	7.4679	0.9466	1.0206
f = 0	2.0031	7.8152	1.1787	1.0230
f = 5[cm]	1.8253	7.7617	1.0301	1.0227
f = 10[cm]	2.0600	8.4081	1.0311	1.0141
Athlete	1.7997	7.5186	0.9892	1.0105
Not	2.0573	8.3034	1.1335	1.0269
1995	1.6584	6.7966	0.9152	1.0211
1998	1.8896	7.7845	0.9767	1.0050
2001	2.2984	9.3498	1.3029	1.0287

Table 2: Averaged stabilometry results

The calculated torques for the different models showed a correlation higher, than 0.99. The averaged RMS values of the torques were similar to the angle's, the division according to the individual's gender is shown in Table 3.

Parameter	$M_{RMS,av}$ [Nm]
female subjects	1.898
male subjects	1.120

Table 3: Averaged M_{RMS} values

4 Summary

Figure 1: The mechanical model and the marker positions

The stabilometry parameters are calculated for the φ , β and ϑ angles (Fig. 1) and for the ankle torques. The control torque is also calculated for a model, where the ankle is assumed to be on the middle of the board and for a model, where the pendulum is fitted onto the measured markers of the body. During the tests two parameters are varied, the ankle positions and the height of the board. Overall, it can be concluded, that the motion is planar and the SIP model is not adequate enough, because the hip moves excessively during the motion. From Table 2., it can be stated, that males and athletes used smaller torques and angles for balancing themselves, while younger subjects performed worse in the task, than the older ones. The difficulty order of the boards, as expected from the volunteer's feedback is $U_0 < U_{10} < D_0 < U_5 < D_{10} < D_5$, from the hardest to the easiest.



Modelling of human balancing on balance board in the sagittal plane

DÁNIEL RÓZSA

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Csenge Andrea MOLNÁR, PhD student, csenge.molnar@mm.bme.hu

1 Introduction

Studying simple models of human balancing could help us better understand the functioning of our central nervous system and then develop simple balancing tasks or even complex therapies that could help elderly people in balancing.



Figure 1: The 2 DoF model of balancing on a balance board

The main goal of my thesis was to build and analyse a two degrees-of-freedom mechanical model (see Figure 1) of human balancing on a rolling balance board in the sagittal plane. In case of humans, active control is necessary to maintain balance. This control action is modelled as a delayed PD controller at the ankle. A combined visual/vestibular time delay (τ) is used to model the human reaction time. After deriving the equation of motion of the system, linear stability around equilibrium was investigated. The relationship between two mechanical parameters (e and h) and the stability of the system was also examined.

2 Methods



Figure 2: Stable regions of τ on the number line

Matlab scripts were used to calculate the critical time delays for six different combinations of the e and h mechanical parameters. When these delays were calculated, sensory uncertainty was taken into account as well. In the parametric simulations, single percentage parameter indicates the "control gain tuning precision" of our central nervous system. This uncertainty parameter can also be interpreted as the robustness of the applied PD controller. The critical time delays are called robustly critical delays when sensory uncertainty is taken into account.

3 Results

The best results were achieved by using a 5% uncertainty parameter. A brief summary of the effect of different h and e parameters on the robustly critical delays is shown in Figure 3. By increasing e, the robustly critical delay increases as well, which means, that it is easier to balance if the ankle is further from the center of the board. Standing lower on the balance board also suggests easier balancing.



Figure 3: The effect of different h and e parameters on the robustly critical delays

A direct method, called Walton-Marshall method, was used to determine the critical time delays of the system. Having a higher reaction time than the critical time delay causes a loss of stability. The Walton-Marshall method determines stability based on the roots of the characteristic equation of the equation of motion. It can determine the time delay intervals that lead to a stable system in case of a fixed control parameter combination. An example of these time intervals is shown in Figure 2.

4 Summary

If it was possible to measure, through experiments, the exact reaction time that is needed for balancing on the board, better predictions could be made about the "control gain tuning precision" of our central nervous system. The knowledge of the exact human reaction time could also help confirm the validity of the results obtained from the mechanical model.



Delaminált kompozit lemezek modellezése két darab egyenértékű réteg módszerével

HAUCK BENCE

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető:* Dr. Szekrényes András, egyetemi docens, szeki@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A kompozit lemezek alkalmazása nagyon széleskörű, a járműipartól a sporteszközökig sok helyen találkozhatunk ilyen rétegelt szerkezetekkel. Ezen lemezek egyik leggyakoribb anyaghibája a delamináció, amikor két réteg között megszűnik az adhéziós kapcsolat egy adott lemezrészen. Ennek hatására megváltozik az elmozdulásmező és a belső erőrendszer. Illetve a delamináció, mint egy háromdimenziós repedés, tovább is terjedhet. A dolgozatban statikus terhelésnek kitett delaminált lemezekhez készítettünk analitikus modellt.

2. Delaminált lemezek modellezése

A modellalkotáshoz felhasználjuk az egyenértékű rétegek módszerét, esetünkben két darab egyenértékű réteget alkalmazva. Ez azt jelenti, hogy a delamináció síkja alatti, illetve feletti részeket egy-egy különálló lemeznek tekintjük. Itt az 1. ábrának megfelelően a felső részt a *top*, az alsó részt a bottom jelölés jelenti. Ahol nincs delamináció ott az ún. határfelület kényszerrel írjuk elő a leíró paraméterek folytonosságát.



1. ábra. A kettő egyenértékű réteg módszere.

Az egyenértékű rétegek kezeléséhez a Mindlin-féle lemezelméletet használtuk. Ezáltal egy tetszőleges lemez elmozdulásmezejét 5 darab független paraméterrel definiáljuk. Továbbá csak téglalap alakú és két szemközti peremén egyszerűen alátámasztott lemezeket vizsgáltunk, így alkalmazható a Lévy-féle megoldás. Ezen megoldás alapja, hogy a leíró paramétereket és a terhelést Fourier-sor alakban keressük. Igy végtelen sok közönséges differenciálegyenlet rendszert kell megoldani. Természetesen a Fourier-soros megoldást csak véges számú együtthatóig határoztuk meg. Matematikai szempontból a 2. ábrán látható terhelési eset a legösszetettebb, ezért a modellt erre készítettük el.



2. ábra. A lemez geometriai jellemzői.

3. A modell alkalmazása

A modellt különböző delaminációs esetekre alkalmaztuk, majd az eredményeket végeselemes számításokkal vetettük össze. A dolgozat fő kérdése, hogy a delaminált és nem delaminált részen a nyomatékok folytonosságát hogyan írjuk elő, ugyanis erre nincs egyértelmű előírás. Emiatt háromféle folytonossági feltétellel is elvégeztük a példák megoldását. A különböző illesztéssel kapott eredmények és a VE megoldás látható a 3. ábrán, ami az egyes törési módusokhoz tartozó repedésfeszítő erők arányát mutatja a teljes repedésfeszítő erőhöz viszonyítva.



3. ábra. A repedésfeszítő erők arányának eloszlása.

Összefoglalás 4.

Célunk az időigényes VE modellezés kiváltása egy jól működő analitikus modellel. Viszont az eredmények alapján, az általunk létrehozott modell csak bizonyos határokon belül ad elfogadhatóan pontos megoldást. Ha a delamináció a globális középsíktól távol van, akkor egyik illesztéssel sem kapunk a VE eredményekre jól illeszkedő megoldást, ezért az alkalmazhatósági határ meghatározásához további számítások szükségesek.



Rétegelt memóriahabos matracok modellezése és szimulációja

Tóth Milán Károly

Gépészmérnöki MSc Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2020/2021/I. *Témavezető:* Dr. Berezvai Szabolcs, adjunktus, berezvai@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A rétegelt habok mára már annyira általánossá váltak, hogy a mindennapi életünk alig lenne elképzelhető nélkülük. Gyakran csak egy rossz alvás, vagy egy kényelmetlen ülés során vesszük észre a jelentőségüket. A dolgozatomban a leggyakrabban alkalmazott hideghabokkal, memóriahabokkal és ezek változó rétegkombinációjával létrehozott, úgynevezett memóriahab matracokkal foglalkoztam. Ezekre különböző mechanikai méréseket és szimulációkat végeztem. Végezetül pedig az emberi ülés és a rétegelthabok VEM szimulációjával foglalkoztam.



1. ábra. Használt ülési szimuláció modellje

2. Alkalmazott módszerek

A különböző típusú habok anyagviselkedését leíró elméletek igen sok ismeretlen paramétert tartalmaznak, amelyek meghatározása csak mérések segítségével lehetséges. Így különböző mechanikai nyomóvizsgálatokat végeztem, majd a kapott mérési eredményekre az anyagviselkedést leíró paramétereket illesztettem.



A paraméter illesztést követően az eredményeket Abaqus végeselemes rendszerben is ellenőriztem, ahol a program numerikus úton számítja az anyagparaméterek alapján a mérési görbéket. Ezt a numerikus számítást Wolfram Mathematica rendszerben is elkészítettem, hogy a program konvergenciáit és időlépéseit becsülni tudjam.

3. Eredmények

Végül az ülés szimulációt végeztem el egy állandó 12 cm rétegvastagságú, kétrétegű memóriahabon, ahol a memóriahab rétegek vastagsága 1-6 cm-ig növekedtek (1.ábrán látható a szimulációhoz használt modell felépítése). A kapott eredmények a 3. ábrán láthatóak. Az első szakasz a feszültségek eloszlását mutatja a bőr rétegben, a második szakasz a zsírban lévő feszültség eloszlást jelenti, ahol látható, hogy habvastagságtól függetlenül azonos nagyságú feszültség ébred. Az utolsó szakasz a farizomban lévő feszültségek változásait mutatja.



3. ábra. Ülési szimuláció eredmények

Az eredményből az derül, hogy a memóriahab rétegvastagságának növekedésével közel azonos mértékben csökken a feszültség az izomzatban.

2. ábra. Rétegelt habos mérési minták

4. Összefoglalás

A dolgozatom célja egy olyan összetett ülési modell szimulációja és tesztelése volt, amelyet eddig még nem használtak a tanszéken. Emellett nagy hangsúlyt fektettem a memóriahabok numerikus megoldóprogramjának vizsgálatára, amelynek eredményei a későbbiekben a validációk és a VEM szimulációk optimalizálásban fog segíteni.



Átviteli függvények interpolációja

KISS HUNOR

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2019/2020/II Témavezető: Sykora Henrik, tanszéki mérnök, sykora@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Működő gépészeti rendszerek esetén felmerül annak közismert igénye, hogy azok rezgéstani szempontból lehetőleg optimális állapotban legyenek üzemeltetve, vagy legalább azok elkerüljék a kritikusan kedvezőtlen állapotokat, úgymint a rezonancia tartományban való működést, kikerülve ezáltal azok idő előtti tönkremenetelét, károsodását, valamint a hibás munkadarabok létrejöttét. Ezen rezgéstani kondíciók megállapításához mérésre lehet szükség, amely során megtudjuk állapítani a szerkezet egy-egy állapotához tartozó rezgéstani tulajdonságokat, azonban ennek időigénye, ezáltal költsége is jelentős. Ilyen jellegzetes rezgéstani befolyásoló tényező például a CNC gépek főorsójának helyzete. Ezen okokból előnyös mérésket lehetőségekhez mérten minél kevesebbszer elvégezni. Így adódik az opció, hogy történjen meg ez adott véges számú pontra, majd ezen, már ismert állapotokból, további számunkra lényeges pontra készüljön ez interpolációval. Dolgozatomban ezen probléma megoldása frekvenciaátviteli függvények (FRF) neurális hálózattal történő interpolációja segítségével történt.



1. ábra. Az áttviteli függvények generálására használt rezgőrendszer

2. Alkalmazott módszerek

Az interpolálandó FRF-ek változó paramétere az 1. ábrán megjelenített rezgőrendszer 1-es tömege volt. Az átviteli függvények interpolációjára konvoluciós és kódoló-dekódoló neurális hálózat kombinációjával történt.



generált jellemző, sűrített információt tartalmazó formájuk. Itt történik az átviteli függvények interpolációja, majd, azokból a dekódoló felhasználásával újra generálódik a már interpolált frekvencia átviteli függvények.

3. Eredmények

A 3. ábrán látható, hogy az interpoláció minőség meglehetősen jó a pontos, köztes és a neurális hálózattal FRF1 és FRF2-ből interpolált függvények között, érdemleges eltérés nincs.



3. ábra Interpolált FRF nagyítási részének eredménye

Hozzávetőlegesen 9400 tanítási iteráció, másnéven epoch alatt már konvergensé vált az illesztés, ezáltal az interpoláció minősége a továbbiakban nem javult tovább. Ezen felül megfigyelhető, hogy az interpolációk minősége függ, a frekvenciaátviteli függvények látens térben leképzett értékük egymáshoz viszonyított különbségétől, minél kisebb az annál jobb eredményeket érhetünk el.

Összefoglaló 4.

2. ábra. Alkalmazott neurális hálózat strukturális felépítése

A konvoluciós lépések során az x bemenettel érkezett FRF-ek jutnak át a kódolón, ahol dimenziójuk csökken, ezáltal a z látens térben megképződik róluk egy a neurális háló által

Modális paraméter illesztéssel szemben a neurális hálóval történő megoldásnak fő előnye, hogy nem szükséges ismerni a kívánt állapothoz tartozó rezgéstani tulajdonságokat. Interpoláció során képes lekövetni a frekvencia csúcsot változását, azonban ahhoz hasonlóan jelenleg nem képes kezelni a nemlinearitást, valamint szabadsági fokok szempontjából csak egy adott típusú rendszer tud kezelni egyelőre.



Controlling of nonholonomic systems

JÁNOS CSIZMADIA

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Máté Benjámin VIZI, PhD student, mate.vizi@mm.bme.hu

1 Introduction

Monowheels are special vehicles having only one wheel. They have been present for one and a half century already with the first models appearing in 1869. Figure 1 shows a modern day motorized model. Due to its structural characteristics, a monowheel is very unstable in the lateral direction, and also during braking or accelerating. This fact attracts the attention of many researchers, because the thin, compact, possibly sealable structure offers a lot of advantages next to the challenges. Most of the recent studies deal with making their model controlled without a human factor or even making it autonomous, at any arbitrary speed. The purpose of our model is the same, stabilizing our monowheel model in its unstable equilibrium state.



Figure 1: A modern McLean monocycle

2 Applied Methods

Our monowheel's mechanical model can be seen in Figure 2. It consists of a thin circular loop and a point-like mass functioning as the control element.



After building up our mechanical model, a mathematical model was implemented using *Appell's equations*. This method provides the simplest solution for nonholonomic problems in the form of first order ordinary differential equations (ODE). With these results numerical simulations are easy to carry out. In the control part the critical velocities were examined for two cases, once the control mass was free without a control force and then it was fixed in the middle of the circle. The second case gave a lower critical velocity, because the gyroscopic forces are greater due to the bigger mass. As a next step, the *state-space representation* of our linearized model was examined, and the states necessary for the control were determined. Then a *linear state feedback* controller was implemented with the help of Ackermann's formula. Every investigated controlled case simulation was carried out below the critical velocities.

3 Results

The results of the numerical simulations met the expectations. Both the free-mass and fixed-mass cases lost stability below the corresponding critical velocities, but also had a steady, stable motion above. With the control applied, the monowheel always got stabilized in its unstable equilibrium point after little initial disturbances, even in standstill. In Figure 3 we can see the comparison of the roll angle's change in time between the fixed mass case under its critical velocity and the controlled case at the same velocity, having the same initial disturbance.





Figure 2: The mechanical model of the monowheel

The global coordinate system CS_0 was used for the calculations, all of the quantities had to be transformed here. Figure 3: Comparison of the numerical results

Since all of our expectations in the different cases were met by the numerical simulations, it can be stated that our model is verified. The designed controller is functional and capable of stabilizing the monowheel under the critical velocity in the case of small disturbances. The model could be further developed by taking variable motion, turning tasks, path following and uneven surface into account.



Machine Tool Vibration Mitigation by Piezoelectric Actuation

Zoltán Gábos

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Zoltán Dombóvári, associate professor, dombovari@mm.bme.hu

1 Introduction

During cutting processes machine tools are exposed to high force excitation intensity due to the surface roughness of the workpiece. This regenerative effect related to the surface integrity and can cause high amplitude vibrations, often called as chatter. In order to extend the boundaries of stable machining processes, there are several ways to absorb the unwanted vibrations. One of the popular ones are using a tuned mass damper (TMD) which is an effective and widely used tool in vibration mitigation theory.



Figure 1: Simplified machine tool model with the passive piezoelectric shunt circuit.

In the past few decades piezoelectric ceramic materials (e.g. lead zirconate titanate: PZT) has became more popular in vibration absorption theory. Combining PZT with passive or active circuitry can lead to significant vibration mitigation. This study shows the derivation of a theoretical model for a single mode electromechanical TMD system which includes a piezoelectric actuator, built into the clamping of the machine tool.

2 Applied methods

The well-known Den Hartog model has been used for modelling the electro-mechanical connection between the passive circuit and the machine tool. By combining the so-called half vehicle and the TMD model, the simplified analytical model can be derived. The optimization and the drawbacks of the mitigation method has been discussed, where the procedure proved to be a successful method. Usually, the piezoelectric actuators are assumed to be linear but more often than not this is not the case. Therefore, the typical nonlinear modelling of piezoelectric materials are introduced and discussed in this thesis. Although there are a few options to model hysteresis behaviour in piezoelectric actuators, there are no existing general model. That raises the necessity of sufficient and accurate system identification methods (numerical continuation problem, Poincaré sections, etc.) which are also discussed in this study.



Figure 2: Continuation of unstable branches in the case of experimental methods.

3 Results

The linear electro-mechanical TMD system leads to quick and sufficient vibration mitigation for both the analytical and receptance coupling models.



Figure 3: Time-displacement impulse simulation of a TMD system and its phase portraits.

The introduced measurement procedures of nonlinear systems are consist of deterministic and stochastic methods. The results of these measurements leads to the understanding of the nonlinear dynamic behaviour of real systems.





Figure 4: Jumping back and forth between stable periodic orbits for the nonlinear TMD system excited by stochastic and harmonic forcing.



Periodikusan változó axiális erővel terhelt karcsú munkadarab esztergálásának stabilitása

Mészáros Gergely Péter

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2020/2021/I. Témavezető: Béri Bence, PhD hallgató, beri@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az anyagleválasztási folyamatok során fellépő öngerjesztett rezgések megjelenése komoly problémát jelent a gépgyártástechnológiában. A jelenség elsősorban a megmunkált munkadarab felületi minőségére van rossz hatással, de a szerszám és a szerszámgép élettartamát is csökkenti. A cél tehát, hogy a káros rezgések elkerülése mellett a megmunkálási folyamat a lehető leghatékonyabb legyen. Erre számos megoldás létezik az irodalomban, de a szakdolgozatban egy olyan lehetséges új módszert vizsgálunk esztergálási folyamat esetén, aminél a rezgésmentes, stabil paramétertartomány növekedését egy, a szegnyeregnél ható, periodikus gerjesztőerővel érjük el.



1. ábra. A megmunkálási folyamat elrendezése és a mechanikai modell.

2. Dinamikai leírás

A karcsú és rugalmas munkadarab a megmunkálás során a tokmánnyal és a szegnyereggel van rögzítve. Ezek hatását a mechanikai modellünkben befogás és görgős támasz peremfeltételekként írjuk elő. Mivel az anyagleválasztás a munkadarab hossza mentén történik, így a szerszám helyzetét is figyelmbe vesszük a modellezés során. A forgácsolási folyamat stabilitásvizsgálatát az 1. ábrán látható egy szabadsági fokú rezgőrendszer segítségével végezzük. A modális paraméterek azonosításához a munkadarab laterális merevségét és a hajlítórezgéseinek sajátfrekvenciáit kell meghatározni. A vizsgált eljárás során a rezgésmentes paramétertartomány növekedését a szegnyeregnél ható periodikus nyomóerővel érjük el. Ez elsőre ellentmondásosnak tűnhet, hiszen konstans nyomóerő esetén a stabil tartomány zsugorodna a lecsökkent merevség miatt. A

szakdolgozat eredményei alapján azonban megállapíthatjuk, hogy a nyomóerő periodikus modulálása a stabilitási tulajdonságok javulását eredményezi.

A periodikus nyomóerő a modális paraméterek periodikus változását idézi elő. A felületi regeneratív hatást is figyelmbe véve, a megmunkálást leíró egy szabadsági fokú lengőrendszer mozgásegyenlete egy periodikus időkésleltetett differenciálegyenlet. A stabilitásvizsgálatok során a gerjesztő erő hatását három eltérő modulációs jelre vizsgáljuk (szinusz-, háromszög- és négyszögjel). Emellett a gerjesztési periódusidőt két módon adjuk meg. Elsőként a gerjesztési periódusidő arányos a regeneratív hatás miatt megjelenő időkéséssel, míg a második esetben konstans értékű.

3. Eredmények

Az eredmények bemutatása a szakdolgozatban stabilitási és frekvencia diagrammokkal történt. A 2. ábrán a három vizsgált modulációs jelre kapott stabilitási térképek láthatóak dimenziótlan forgácsszélesség - fordulatszám nézetben, amikor a gerjesztési periódusidő az időkésés kétszerese. Ezek alapján látható, hogy a színes stabil tartományok a gerjesztetlen esetben kapott szürke területeknél jóval nagyobbak, elsősorban a kisebb fordulaszám tartományon. A stabil tartományok mellett a stabilitásvesztések szemléltetésére instabil lencséket is meghatároztunk (szaggatott görbék).



2. ábra. Stabilitási térképek szinusz-, háromszög- és négyszögjel szerinti nyomóerő gerjesztések esetén (kék, sárga és lila területek).

4. Összefoglalás

A stabilitásvizsgálat alapján kapott eredmények szerint kijelenthető, hogy a munkadarab periodikus nyomóerővel történő gerjesztése jótékony hatással van az esztergálási folyamat stabilitására. Egyes esetekben a leválasztható anyagmennyiség akár a gerjesztetlen eset többszörösére is növekedhet. A legjelentősebb növekedést az esztergálás szempontjából releváns, alacsony fordulatszámtartományon értük el.



Hybrid active-passive vibration absorber for self-induced vibration mitigation

MARCELL ÁKOS BARTOS

Mechatronics Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. Giuseppe HABIB, Assistant professor, habib@mm.bme.hu

1 Introduction

Self-induced vibrations are vibrations that are not caused by an explicit excitation coming from an external effect, instead they develop owing to the system's inherent instability. For this thesis, this feature has been modelled by the negative damping of the host system $(c_1 < 0)$.

Hybrid vibration absorbers (HVAs) are composed of an active and a passive part. For this study, acceleration feedback control was used as the active part, both with and without time delay in the feedback loop. The passive part - often called a dynamic vibration absorber (DVA) - is a secondary mass-spring-damper system attached to the host system. The thesis focuses on investigating the HVA's ability to improve the system's stability, in comparison with a simple, passive, uncontrolled DVA.



Figure 1: The mechanical model

2 Applied Methods

After using Lagrange's equation of the second kind to formulate the equations of motion for the 2DoF system, we partially nondimensionalized them by transitioning to dimensionless time and introducing further dimensionless parameters.

For the case without time delay, the stability analysis has been carried out using the Routh-Hurwitz criterion. Further analytical proof is presented in the thesis regarding the evolution of the stable region as the parameter used to represent conditions, oscillations decay. The results were validated through numerical simulations.

3 Results

The stability analyses have shown that the stable region shrinks and eventually disappears as ψ approaches $\psi_{\rm cr}$, regardless of the presence of time delay. On the other hand, we have found that it is possible to choose the control law parameters so that the implementation of a HVA results in a faster settling.



Figure 2: Evolution of the stable region (without time delay)



Figure 3: Time histories of the settling of m_1

the unstable feature of the system (ψ) approaches its critical value (ψ_{cr}) , above which the passive DVA is unable to 4 stabilize the system.

The stability boundaries corresponding to the delayed acceleration feedback control have been determined by implementing the D-subdivision method. In order to decide which regions correspond to a stable behaviour, numerical methods have been applied. We used numerical tools to investigate the HVA's effect on the rate by which, in stable

1 Summary

In conclusion, a HVA with acceleration feedback is unable to improve the stability of the system compared to a simple DVA, regardless of the presence of time delay in the feedback loop. However, the implementation of a HVA can be advantageous when it comes to the topic of the speed of convergence.

