Mitigation of friction-induced vibrations through a dynamic vibration absorber

ZAHRAA A. J. ALMUKHTAR

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2022/2023/I. Supervisor: Dr. HABIB Giuseppe, associate professor, habib@mm.bme.hu

1. Introduction

Friction-induced vibrations (FIVs) are a significant issue in a wide range of engineering applications. The velocity-weakening friction model is one of the well-known sources of FIVs. A 2DoF mass-on-moving-belt model undergoing FIVs was considered in this study. A dynamic vibration absorber (DVA) is then attached to one of the primary system masses (Figure 1). The study aims at analysing the effectiveness of the DVA for suppressing FIVs. All mechanical components of the system are assumed linear, as the only nonlinearity is related to the stick/slip phenomenon between the belt and the mass moving on it.



1. Figure The mechanial model of the primary system with DVA.

2. Applied methods

The equations of motion were defined using Newton's law of motion and converted to dimensionless equations to simplify analysing the system. Both eigenvalues method and Routh-Hurwitz criterion were used to check the linear stability of the system around its equilibrium after optimizing the DVA parameters for a specified $\alpha = 0.9$ value, where α marks the value of the stiffness of the spring connecting the two masses. The optimization was done using brute force and bisection method combined to find the minimum critical velocity that leads to loss of stability, presented in Figure 2 (left).

The stability analysis illustrated that, for an optimized absorber, the system loses stability through a Hopf-Hopf bifurca

3. Results

The results of the optimization illustarted that the DVA with a mass of only 5% of the primary system left mass is able to reduce the critical velocity from 1.6 to 0.92, with an improvement of 57.5 %, as illustrated in Figure 2 (right). The absorber is robust against uncertainties of its damping, but its natural frequency should be accurately defined.



2. Figure (left) DVA parameters optimization (right) stability chart of the primary system without and with DVA.

Regarding the nonlinear behaviour of the system, the analysis revealed that both the primary system alone and the system with the DVA loses stability through a subcritical Hopf bifurcation, which generates a large bistable region, where the trivial solution is stable only locally. Nevertheless, the DVA is able to significantly reduce the extent of the bistable region and the amplitude of limit cycle oscillations. Numerical and analytical results displayed a good agreement in all investigated cases.



3. Figure The analytical and numerical solutions of the bifurcation analysis for the primary system without and with DVA at $\alpha = 0.95$.

tion. To partially unveil the complex dynamics involved, the Hopf bifurcations occurring in the vicinity of the Hopf-Hopf bifurcation were analytically investigated with the center manifold reduction technique and near identity transformation. Results were then validated numerically through the switch model.

Summary **4**.

The analysis showed that a properly tuned single-DoF DVA can effectively mitigate or suppress FIVs in primary systems with multiple vibration modes. Overall, the DVA was able to increase the stable region, reduce the bistable region, and decrease the limit cycle oscillation amplitude. These findings indicate that DVAs can be a viable engineering solution for many systems experiencing FIVs.



Korszerű súrlódási modellek dinamikája

Békési Balázs János

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2022/2023/I. *Témavezető*: Dr. Csernák Gábor, egyetemi docens, csernak@mm.bme.hu *Konzulens:* Dr. Antali Máté, óraadó adjunktus, antali@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A modern méréstechnikai eszközök térnyerésével egyre pontosabb mérési eredmények születnek a súrlódási erő vizsgálata során, mely segítségével a kutatók addig még nem látott jelenségeket vizsgálhatnak. Ilyen jelenség például a súrlódási erő nemlokális memóriája a pre-sliding tartományban. A diplomamunka fő célja az említett jelenség, és a jelenség modellezésére megalkotott súrlódási modellek közül a GMS modell vizsgálata egyszerű mechanikai példán keresztül.



1. ábra. A GMS modellhez rendelhető mechanikai modell.

A GMS modell alapját a mechanikai modellben bevezetett, több különböző tulajdonságokkal rendelkező sörték adják.

2. Alkalmazott módszerek

A jelenséghez köthető nemlokális memória igen gazdag matematikai leírással rendelkezik, ugyanis nem csak a súrlódási erő rendelkezik nemlokális tulajdonságokkal. A jelenséggel például mágneses anyagok kapcsán is találkozhatunk.



2. ábra. A lokális és nemlokális memória bemutatása.

A vizsgálat során analikikus számításokat, és numerikus szimulációkat is végzünk. A lokális és nemlokális memória matematikai/rendszertechnikai leírásának megfelelően a vizsgálatok típusa statikus és kvázistatikus. A lokális memória vizsgálatát a Dahl-modellen, a nemlokális memória vizsgálatát a GMS modellen keresztül végezzük.

3. Eredmények

A fázistér néhány jellegzetes trajektóriát összehasonlítjuk a súrlódási erő-elmozdulás diagramon létrejövő megoldásokkal.



3. ábra. A trajektóriák, és azoknak megfelelő megoldások.

A Dahl-modell és a GMS modell felhasználásával statikus vizsgálatokat végzünk, és a lokális és nemlokális memória tulajdonságait vizsgáljuk a "sündisznó" diagramok segítségével.



4. ábra. A Dahl-modell és a GMS modell sündisznó ábrája.

A Dahl-modell és a GMS modell felhasználásával kvázistatikus vizsgálatokat is végzünk, majd vizsgáljuk a kialakuló hiszterézis hurkokat, és azok topológiáját.



A jelenség mélyebb megértése érdekében a vizsgált rendszert annak állapotterében is vizsgáljuk. A GMS modellt alkalmazva a rendszer szakaszosan folytonos. Ennek vizsgálatához a Filippov-elméletet használjuk fel. -1 -0.8 -0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 -3 -2 -1 0 1 2 3 4 5 ×[m] ×10⁻³ ×10⁻³ ×[m] ×10⁻³ ×10⁻³

4. Összefoglalás

A vizsgálatok során megállapítottuk, hogy több, különböző tulajdonságú sörte párhuzamos kapcsolása nemlokális memóriát eredményez. A hiszterézis hurkok záródási módjára a sörték deformációját leíró differenciálegyenletek vannak hatással.



Zárt kinematikai láncú robotok szabályozása

BLAU SÁNDOR

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2017/2018/I. *Témavezető*: Dr. Insperger Tamás Antal, egyetemi tanár, <u>insperger@mm.bme.hu</u> *Konzulens*: Bodor Bálint, doktorandusz, bodor@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozat készítése során a célom, hogy megvizsgáljak robotok szabályozására használható szabályozó típusokat, módszereket szimulációs környezetben. A munkám során elkészítem pár egyszerűbb többtestből álló dinamikai rendszer szimulációját, amelyekhez ezt követően alkottam pozíció és pályakövető szabályozókat. Majd az elkészültük után az azonos modellekhez meglévőket összehasonlítom több szempont szerint.

2. Alkalmazott módszerek

Első lépésként elkészítettem egy RR robotnak egy inverz ingának és egy zárt láncú ötcsuklós mechanizmus szimulációját, majd ezekhez készítettem a szabályozókat.



1. ábra. A vizsgált rendszerek

A szimulációk elkészítéséhez első és másodfajú Lagrange egyenleteket használtam, ahol lehetet minimális számú koordinátával is elkészítettem a modellek szimulációját.

A rendszerek szabályozásához PD szabályozót, pályakövetésnél inverzdinamikai számításokkal kiegészítve, és végtelen horizontú LQR-t használtam. PD szabályozó használatakor készítettem csukló térben és operációs térben való szabályozót is. Csukló térben történő szabályozásnál inverz kinematikai szabályozást kell végezni, amihez Newton-Raphson iterációt használtam.

3. Eredmények

A szerkezetek mozgása pár esetben:



2-3. ábra RR robot mozgása pozíciószabályozás esetén balra csukló térben, jobbra operációs térben szabályozva

Az operációs térben szabályozott esetekben a szabályozott pont egyenes pályát próbált követni, ami nagyobb szabályozó nyomatékokat igényelt.



4-5. ábra inverz inga mozgása balra, ötcsuklós mechanizmus mozgása pályakövetés estén jobbra

Az operációs térben való szabályozás esetében a szabályozó jobban tartja a pályát. Az LQR lassabban ált be az előírt pozícióba, a pályát sem tudta olyan jól követni, de a szabályozó nyomatékokat jobban eloszlatta az aktuátorok közt.

4. Összefoglalás

A dolgozat során sikeresen elkészítettem az RR robot, az inverz inga és a zárt ötcsuklós mechanizmus szimulációját, majd ezekhez LQR-rel vagy PD-vel és inverzdinamikával mű-

Az RR robothoz PD szabályozót készítettem. Az inverz ingát LQR-rel állítottam be a felső instabil pozíciójába. Az ötcsuklós mechanizmus esetében mindkét szabályozót elkészítettem.

A szabályozók elkészülte után futtatam szimulációkat.

ködő szabályozót. PD esetén csukló és operációs térben szabályozva is.

Operációs térben történő szabályozás esetén bizonyult a szabályozó a legpontosabbnak, de nagyobb nyomatékokat is használt a szabályozó. LQR esetén lassú volt a beállás, de a szabályozó jól eloszlatta a nyomatékokat az aktuátorok között, ami kedvező lehet a szerkezet élettartamára nézve.



Investigation of parameters of human running depending on training

CZIPÓ MARCELL

Mechatronics BSc, Mechanical Modelling, 2022/2023/I. *Supervisor*: Giuseppe Habib, associate professor, <u>habib@mm.bme.hu</u>

1. Introduction

The main goal of this thesis is to compare parameters of professional and amateur runners at different velocities.

Running analysis can be applied to a wide variety of cases. Correction in running technique or injury prevention and rehabilitation are among the most frequently used fields.

Gait analysis is a procedure which provides biomechanical information and a method for analysing the movements and transitions during running.



Figure.1. Running gait cycle

2. Methods

The measurement is carried out on two different control groups, using OptiTrack camera system. The parameters are calculated with the help of inverse dynamics. Finally, a statistical method, Wilcoxon test is applied to be able correctly to conclude.



3. Results

Professionals executed the tasks at a higher speed than amateurs and spent less time on the ground. Knee angle in case of professional runners is smaller than amateurs, while hip and ankle angles are greater. Professionals generate more and absorb less work compared to amateurs. This corresponds to stiffnesses as well. Professionals have stiffer body structures during running.



Figure 3. Knee angle during the gait cycle



Figure 4. Absorbed and generated ankle joint work

Figure 2. Measurement setup

4. Summary

The calculated results corresponded with the characteristics of the literature results. The results indicates that professional runners have more effective running technique.



Control of chaotic systems

BONIFÁC LUKÁCS FAUCHER-TIMÁR

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2022/2023/I. Supervisor: Dr. Gábor Csernák, Associate professor, csernak@mm.bme.hu

1 Introduction

The aim of the thesis was to apply control methods on different chaotic systems. The methods used were two variants of the OGY control method. They were applied to one-, two-, and three-dimensional chaotic systems. The one- and twodimensional systems were two versions of the micro-chaos map and the three-dimensional system was a model of chip formation. The systems with their respective control methods were simulated and examined.



Figure 1: The mechanical systems described by the microchaps map.

2 Applied Methods

The OGY control method consists of waiting until the trajectory is in the vicinity of a fixed point of the discrete system and slightly altering a parameter of the system so that the trajectory remains near the fixed point. This can only be applied to discrete systems of the following form:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{F}(\mathbf{x}_n, p_n),$$

where \mathbf{x}_n is the state of the system at the n^{th} , p_n is the parameter chosen to apply perturbation at the n^{th} step and **F** is the function describing the map.

The control law that realises this is defined as

$$\Delta p_n = \begin{cases} -\mathbf{K}^T(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_F(\bar{p})) & if \quad |\mathbf{K}^T(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_F(\bar{p}))| < \delta \\ 0 & if \quad |\mathbf{K}^T(\mathbf{x}_n - \mathbf{x}_F(\bar{p}))| \ge \delta \end{cases},$$

3 Results

The OGY method was applied to the two-dimensional micro-chaos system. The controlled system was simulated and its phase-space is illustrated in Fig. 3.



Figure 2: A trajectory of the 2D system under control. Blue uncontrolled, red controlled.

The chip formation model is continuous therefore the Poincaré map had to be calculated. Similarly to the previous case the simulations resulted in a stable system around the fixed point.



Figure 3: The trajectory of the system. Continuous lines – uncontrolled, dashed lines – controlled.

where $\mathbf{x}_F(\bar{p})$ is the fixed point of the system at the nominal parameter \bar{p} , δ is the maximal perturbation allowed and \mathbf{K}^T is the feedback row vector.

The feedback row vector was calculated using Ackerman's method. The old poles of the system were kept if modulus were smaller than one and changed to zero otherwise. This way the controlled system was stable around the fixed point.

4 Summary

Two variant of the OGY method was applied on mechanical models related to engineering problems. In the three cases the control method stabilized the vicinity of the fixed points. Further examination could be the application of other control methods.



Development of torque vectoring for a race car with a hybrid powertrain

PÉTER MÁRTON GÁL

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2022/2023/I. Supervisor: Dr. Dénes TAKÁCS, Associate professor, takacs@mm.bme.hu

1 Introduction

In Formula Student a team of university students design, build, maintain and race a single seater formula type car. BME Motorsport is the combustion category team of our university, and from 2023 the team will race with a hybrid powertrain car. The two electric motors on each wheel gives the benefit of allocating different amount of driving torque. Due to this difference a yaw moment is present, which has a impact of the cars cornering performance. By prescribing the torque difference this moment can be controlled for the desired cornering behavior.



Figure 1: The race car of BME Motrosport on the track with visible body roll

2 Mechanical model

For modelling the vehicle a five and a six degrees of freedom bicycle model was constructed to model the lateral dynamics. The six degrees of freedom model is capable of calculating with the different normal forces of the tires,. This difference is coming from the weight transfer when the outer wheels have a greater mass on them.



dynamics model is the tire model.



Figure 3: The combined slip tire model

3 Results

For a circle with a radius of 8 meters the different front torque distributions we investigated with prescribed 40 Nm rear torque. From the data a surface was interpolated. The base of comparison is the fact that for given circle for higher yaw rate a lower lap time is associated with.



Figure 4: The interpolated surface with a maximum

4 Summary



Figure 2: The six degrees of freedom model

A combined slip tire model was also constructed for the mechanical model as one of the key element of a vehicle

The torque vectoring system is increasing performance and even has a stabilizing aspect. For zero driving torque at the front, or without the hybrid system, the yaw rate was $1.116 \frac{rad}{s}$ and with torque vectoring the maximal values was $1.232 \frac{rad}{s}$ which is a 10.4% increase. With further improvements the system will be capable of higher performance.



Geometriai kényszerekkel rendelkező mechanikai rendszerek szimulációja

GERGÁCZ BENDEGÚZ

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2022/2023/I. Témavezető: Bodor Bálint, doktorandusz, bodor@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A mindennapi életben körülvesznek minket a mechanizmusok. Gondoljunk csak az autó szélvédő törlőjére, vagy az ajtót záró négycsukló mechanizmusra. Ezeknek a rendszereknek a tervezéséhez fontos, hogy meg tudjuk határozni, hogy milyen pályát fognak leírni az egyes elemek. A dolgozatom során különféle módszereket fogok bemutatni, melyek segítségével ezek a mozgáspályák meghatározhatóak.

Alkalmazott módszerek 2.

A mechanizmusok által leírt mozgáspályák szimulálásához az Euler-Lagrange-féle differenciálegyenlet segítségével jutunk:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \left(\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathbf{q}} = \mathbf{0} .$$
(1)

Ehhez definiálnunk kell a rendszer \mathcal{L} Lagrange függvényét, amely a mechanizmus kinetikus és potenciális energiáinak különbsége. Minimális számú koordináta használata esetén a mechanizmus mozgásának szimulálása nem jelent gondot. Megkönnyítheti azonban a felírást ha a rendszert nem minimális számú koordinátával írjuk le, mert így nem kell törődnünk a koordináták közötti függésekkel. Ebben az esetben a koordináták közötti összefüggéseket kényszeregyenletek segítségével kell megadnunk. A Lagrange multiplikátorok módszerét alkalmazva a mozgásegyenlet a következő alakot veszi fel:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} + \mathbf{B}^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}.$$
 (2)

Hogy az egyenletrendszer megoldható legyen, fel kell használnunk a kényszeregyenleteket is, mivel a Lagrange multiplikátorok kapcsán új ismeretleneket vezettünk be. Ahhoz, hogy a rendszer megfelelően működjön, Baumgarte stabilizációt is alkalmaznunk kell. Ez garantálja, hogy a kényszeregyenletek a szimuláció teljes időtartama alatt teljesüljenek.

Ha a rendszert redundáns kényszerek segítségével írjuk fel, akkor a szimulációt a Penalty módszer segítségével végezhetjük el. Itt a kényszerek teljesülésének érdekében a mozgásegyenletet egy úgynevezett penalty taggal egészítjük ki:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}^{T}\boldsymbol{\alpha}\left(\ddot{\boldsymbol{\phi}} + 2\boldsymbol{\Omega}\boldsymbol{\mu}\dot{\boldsymbol{\phi}} + \boldsymbol{\Omega}^{2}\boldsymbol{\phi}\right) + \mathbf{C} = \mathbf{0}.$$
 (3)

Mivel azonban ennek a módszernek a stabilitása érzékeny a paraméterek megválsaztására, érdemesebb lehet az Augmented Lagrangian módszer használata, melynek alapelve hasonló, de iteratív eljáráson alapszik.

3. Eredmények

A módszerek működését egy matematikai kettősingán ellenőriztem. Ehhez felírtam a rendszert minimális, és redundáns koordinátákkal, valamint minimális, és redundáns geometriai kényszerek segítségével is. Ezután a felírásnak megfelelő módszert választva futtattam a szimulációt. A 2-es ábrán az egyes módszerekből származó eredmény egy koordinátáját ábrázoltam. Látható, hogy a görbék jól fedik egymást. A módszerek képesek voltak kezelni a különféle felírásmódokat.



2. ábra. A módszerek szemléltetése



1. ábra. Mechanizmus redundáns koordinátákkal

4. Összefoglalás

A dolgozat során bemutatom a mechanizmusok nem minimális számú koordinátával való felírásának kezelésére a Lagrange módszert, és a Baumgarte stabilizációt. Valamint ismertetem a Penalty, és Augmented Lagrangian módszert is, melyek redundáns geometriai kényszerek kezelésére is alkalmasak.



Balancing of the inverted pendulum in case of complex values perturbation

GREGOSITS TAMÁS

Mechatronical Engineering BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2022/2023/I. Supervisor: Dr. Insperger Tamás, University teacher, insperger@mm.bme.hu

1 Introduction

In daily life, several motion control task appears. The human brain can learn to handle several difficult control task and develop control models and strategies. The understanding of the working of the brain and the development of these control strategies has important implications. The main goal of this thesis is the better understanding of the working of the human brain in case of unknown perturbation. In this study, an inverted pendulum balancing was investigated and the pendulum length was described as a complex number.



Figure 1: The virtual environment.

2 Applied methods

In the study, a theoretical stability analysis was done, then in a virtual environment, a series of measurements were taken with human subjects.



In the stability analysis, the stick length in the equation of motion of the balanced inverted pendulum was replaced with a complex number. The modified stability chart was calculated and simulations were done to investigate the effect of the imaginary length to the size of the stable region in the stability chart.

In the measurement part of the study, human subjects balanced an inverted pendulum in a virtual environment with different imaginary lengths. The critical reaction time was used for investigate the effect of the imaginary length for the balancing.

3 Results

In the theoretical analysis, it was observed that the imaginary length does not affect the disappearing of the stable region, but the increasing imaginary length results decreasing stable region size. The stable region is symmetric for the same imaginary length with different sign.

During the measurements, it was observed that the changing of the imaginary length does not significantly affect the duration of the balancing and with increasing imaginary length, the pendulum dynamics was slower. However, with increasing imaginary length, the control movements of the subjects was less frequent.



Figure 3: The measurement results of the balancing of the subjects.



Figure 2: Stability chart in case of complex length.

4 Summary

As an overall conclusion, it can be said that the imaginary length has a small effect on the human balancing time, but has a larger effect on the control strategy during balancing.



Identifying the coefficient of friction based on the steering torque

Bendegúz Máté GYÖRÖK

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2022/2023/I. Supervisor: Dr. Dénes TAKÁCS, Associate professor, takacs@mm.bme.hu

Introduction 1

For precise vehicle motion control, accurate information about the tire-ground relationship is essential. However, the friction properties are not observable, therefore it requires special methods to estimate the coefficient of friction. The self-aligning torque induced in the contact patch of a steered tire is in close connection with the coefficient of friction. This phenomenon offers a possibility to estimate the friction properties based on the measured steering torque.

Modeling of the investigated me- $\mathbf{2}$ chanical system

To investigate the tire-ground contact, we used the so-called towed wheel model. To model torques and forces resulting from the deformation of tires, the brush tire model was selected from the literature, which is a popular analytical approach. Based on the mentioned modeling concepts, the governing equations were derived from the kinematic constraint of sticking in the contact region. Then, a numerical simulation environment was set up, where the deformation function of the elastic tire's center-line is examined as well as the steering-, and self-aligning torque characteristics.



Figure 1: Axonometric (left) and side (right) view of the caster-wheel system.

method is based on a neural network machine learning algorithm, therefore the coefficient of friction is estimated by data-driven modeling. The third algorithm incorporates the principle of the previous two, this hybrid method is called Scientific Machine Learning (SciML), which is a relatively new research area. All three methods provided an accurate estimation for simulated data, but for the validation of the methods, experimental measurements were carried out at the Department of Applied Mechanics.



Figure 2: Experimental rig with the used devices.

Summary 4



Figure 3: Results of the estimation methods for one of the validation measurements.

All three estimation methods were able to estimate the

Estimation of the coefficient of 3 friction

Three methods were derived for estimating the coefficient of friction between the tire and the ground. The first method is based on the analytic brush tire model. The second coefficient of friction reliably using simulation data set. On measured data, the numerical errors of the analytic calculation method caused large oscillations, therefore the accuracy of the method declined. The neural network-based estimation proved to be moderately accurate on measurement data, but far less time was needed for the calculations. And finally, the SciML implementation was the most accurate, but the time cost of the estimation was the largest for this algorithm.



Writing Abaqus subroutines for advanced hyperelastic models

KRISTÓF HAVASI

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2022/2023/I. Supervisor: Attila KOSSA, PhD, associate professor, kossa@mm.bme.hu

1 Introduction

My thesis also deals with hyperelastic material modeling. First, I summarize the continuum mechanics background of hyperelastic material modeling. Then, I introduce a new hyperelastic model and obtain the corresponding stress solutions for the following loading cases: uniaxial extension, equibiaxial extension and constrained uniaxial extension. I designed uniaxial and biaxial tensile test specimens on silicon specimens and performed mechanical tests on the material. Then, I determined the material parameters of the developed hyperelastic model by performing the corresponding parameter-fitting procedure. Furthermore, I created the UHYPER and VUMAT Fortran subroutines of the newly proposed hyperelastic model for the Abaqus finite element software. The performance of the user-written subroutines was verified by finite element simulations.

2 Tasks

The incompressible version of the strain energy density function of the new hyperelastic model (named as H-K model) is given by

$$W^{\mathrm{H-K}} = C_1 \left(e^{C_2(I_1 - 3)} - 1 \right) + C_1(I_1 - 3) + C_2 \ln\left(\frac{I_2}{3}\right), \ (1)$$

where $C_1...C_4$ are the material parameters. I_1 and I_2 denote the first and second principal scalar invariants of the left (or right) Cauchy-Green deformation tensor.



Figure 1 illustrates the uniaxial and equibiaxial tensile tests I performed on silicon test specimens. The incompressible UHYPER Fortran code written for the new H-K hyperelastic model is shown in Figure 2 for illustration.

C	SUBROUTINE UHYPER(BI1,BI2,AJ,U,UI1,UI2,UI3,TEMP,NOEL,CMNAME, 1 INCMPFLAG,NUMSTATEV,STATEV,NUMFIELDV, 2 FIELDV,FIELDVINC,NUMPROPS,PROPS)
č	INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
Ŭ	CHARACTER *80 CMNAME
	DIMENSION UI1(3), UI2(6), UI3(6), STATEV(*), FIELDV(*),
	1 FIELDVINC(*), PROPS(*)
С	
	PARAMETER (ZER0=0.0D0,ONE=1.0D0, TW0=2.0D0, THREE=3.0D0)
С	(1 - DRORG(1))
	C1 = PROPS(1) C2 = PROPS(2)
	C3 = PROPS(3)
	C4 = PROPS(4)
С	
	U=C1*(EXP(C2*(BI1-THREE))-ONE)+C3*(BI1-THREE)+C4*LOG(BI2/THREE)
	UI1(1) = C1 * C2 * EXP(C2 * (BI1 - THREE)) + C3
	UI1(2)=C4/BI2
	UI1(3) = ZERO
	U12(1) = C1 * C2 * C2 * EXP(C2 * (B11 - THREE))
	U12(2) = -C4/B12/B12 U12(3) = 7EP0
	UI2(4) = 7ER0
	UI2(5)=ZERO
	UI2(6) = ZERO
	UI3(1)=ZERO
	UI3(2)=ZERO
	UI3(3)=ZERO
	UI3(4)=ZERO
	UI3(5)=ZERO
	013(6)=ZERU
	KETUKN END

Figure 2: Incompressible UHYPER code for the new model.

3 Results

The material parameters of the new hyperelastic material model were obtained using a parameter-fitting procedure in Wolfram Mathematica. The accuracy and performance of the new model are demonstrated by comparing the new results with results obtained using existing hyperelastic models available in Abaqus. The Fortran subroutines I wrote were used for finite element simulations of non-homogeneous deformation in order to analyze the applicability of my codes in complex cases. One example is shown in in Figure 3.



Figure 1: Uniaxial and equibiaxial tensile tests.

Figure 3: Logarithmic strain distribution for the equibiaxial loading case using the UHYPER subroutine shown above.



Biharmonikus differenciálegyenlet megoldása félvégtelen lemezszalag esetén

HEGEDÜS MÁTYÁS ÁRPÁD

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2022/2023/I. Témavezető: Dr. Szabó László, egyetemi tanár, szabo@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A biharmonikus egyenlet összefoglalja a rugalmasságtan alapegyenleteit síkfeladatok esetén, a megoldásával kapott biharmonikus függvénnyel pedig leírható a feszültség- és elmozdulásmező. A dolgozat fő célja a biharmonikus egyenlet megoldása analitikusan, félvégtelen, egyik végén befogott, húzással terhelt lemezszalagok esetére. A megoldást ezután ellenőrizni kell végeselemes számítással, esetleg a szakirodalomban talált további analitikus megoldással. Az analitikus megoldások megalkotásán, illetve felkutatásán túl további cél hozzájuk tartozó számítási algoritmusok kidolgozása.

2. Alkalmazott módszerek

A feladat megoldását két különböző peremértékfeladat megoldásának szuperpozíciójaként állítottam elő. Az első feladat (I.) egyenletes húzással terhelt végtelen szalag (sáv). Ennek megoldása már ismert a szakirodalomból.

A második feladat (II.) esetén az x = 0 helyen olyan megoszló csúsztató feszültséget alkalmazunk y mentén, melynek hatására az y irányú elmozdulás az I. megoldásának (-1)-szerese. Ezután a két megoldást összegezve, az x=0 helyen a keresztirányú elmozdulás nullára adódik, a hosszirányú elmozdulás pedig a terhelés szimmetriája miatt nulla. Ez megfelel a befogásnak, ami az eredeti problémában szerepel.



A II. feladat megoldását olyan függvények soraként írhatjuk fel, melyek hosszirányban exponenciálisak, keresztirányban pedig a félvégtelen lemez geometriára jellemző trigonometrikus Papkovich-Fadle-féle sajátfüggvények jellemzik.

A feladatot megoldottam más módszerrel, G. D. Gupta művei alapján, valamint végeselem módszerrel is.

3. Eredmények

A befogott, húzással terhelt lemezszalag problémájára sikerült analitikus megoldást találni függvénysorok formájában, valamint egy algoritmust kidolgozni a függvénysorok ismeretlen együtthatóinak számítására. Szintén készült egy eljárás a Gupta-féle megoldási módszerhez, amellyel pontonként számíthatók a feszültségek a befogás keresztmetszetében. A két megoldással kapott eredmények közel megegyeztek egymással és a végeselemes megoldással.



^{2.} ábra A $\sigma_x(x, y)$ normálfeszültség eloszlása a befogás közelében

4. Összefoglalás

1. ábra. A megoldás előállítása szuperpozícióval.

A dolgozatban bemutatott módszerek jól használhatók befogott, húzással terhelt félvégtelen lemezszalagok megoldására. A megoldások figyelembe veszik a szingularitásokat a sarokpontokban. Ezen megoldások egyik lehetséges iránya a továbbfejlesztésre a véges hosszúságú lemezekre való vizsgálat. Ennek a feladatnak a megoldása numerikusan rutinszerűen elvégezhető, azonban analitikusan igen bonyolult. A szakirodalomban is csak néhány vizsgálat található erre a problémára.



Paraméteresen gerjesztett rugalmas szerkezetek modellezése a Chebyshev – féle polinomokkal

Horváth Gábor

Gépészmérnöki MSc Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2022/2023/I. *Témavezető:* Dr. Szekrényes András, egyetemi docens, szeki@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A mérnöki hivatás gyakorlása során meglepően gyakran találkozhatunk olyan gerjesztéssel, amikor a rendszer egy paramétere gerjesztődik valamilyen formában. Jelen esetben egy rugalmas szerkezet geometriai merevségi mátrixa változik az idő függvényében periodikus lefutással. A probléma az, hogy az ilyen rendszereknél analitikusan legtöbb esetben nem állítható elő a $\Phi(2\pi)$ főmátrix, aminek multiplikátorainak vizsgálatával meghatározható lenne a rendszer stabilitása, ezért szükség van egy optimális numerikus módszerre, melyre a Chebyshev polinomok alkalmazását választottam.



1. ábra. Eltolt elsőfajú Chebyshev polinomok.

2. Alkalmazott módszerek

A rendszer vizsgálatához természetesen nem elegendő csak egy jó numerikus matematikai módszer, a mechanika oldaláról szükséges egy térbeli diszkretizáció is. A végeselem modellhez 2. ábra szerinti elemtípust választottam, amivel létrehoztam a mozgásegyenlethez szükséges mátrixokat.



3. Eredmények

A módszer előnye a csekély számítási időben rejlik, hiszen kihasználjuk a polinomok rekurzív tulajdonságait, így a különböző operátormátrixokkal a differenciálegyenlet – rendszert egy algebrai egyenletrendszerre vezeti. A módszer által meghatározott eredmények ellenőrzésének legegyszerűbb módja, ha numerikusan validáljuk azt, így felépítettem egy szimulációt is, melynek eredményei 4. ábrán láthatók.



3. ábra. Multiplikátorok elhelyezkedése a komplex síkon.



4. ábra. c), d) paraméterpárhoz tartozó szimuláció.

2. ábra. Végeselem diszkretizáció BEAM1D elemmel.

4. Összefoglalás

Elmondható, hogy a módszer azon felül, hogy maximális megbízhatósággal prediktálja a stabil zónákat, nagyságrenddel kisebb számítási időt emészt fel más eljárásokhoz képest. Ezen tulajdonsága okán, jövőbeli célom, hogy a Chebyshev polinomok alkalmazásának módszerét átültessem időkésleltetett dinamikai rendszerek stabilitásvizsgálatába.



Continuation routine development for periodic orbits of piecewise-smooth dynamic systems

ROLAND HORVÁTH

Mechatronic Engineer BSc, Specialization in Mechanical Engineering Modelling, 2022/2023/I. Supervisor: Zsolt Iklódi, PhD student, zsolt.iklodi@mm.bme.hu

1. Introduction

The role, of piecewise smooth systems, is crucial in the modern engineering modelling. If during the modeling process of a piecewise smooth system, we also take account of impulselike effects (e.g. impacts), we get a so-called hybrid dynamical system With the help of such systems we can simulate for example the bipedal locomotion of a robot, a DC-DC Buck converter, the movement of a bell and its clapper or even vertical hopping too. Thus creating an algorithm as general as possible, which allows us to define arbitrary number of discontinuity manifolds, and on each of these manifolds both an impact-like projection as well as a vector field change, can be very useful to map periodic orbits of hybrid dynamical systems, and to follow hybrid system specific bifurcations such as grazing and sliding.

2. Applied methods

After setting up the boundary value problem of hybrid periodic orbits, the solution can be obtained with the help of the shooting method. After a periodic solution has been found, the continuation of that orbit can be carried in one parameter, using the pseudo- arc length method. As a result of the continuation runs, hybrid system specific bifurcations, such as grazing, and sliding can be found by solving the non-linear system of equations containing the boundary value problem and the condition of the bifurcation. Eventually the periodic orbit containing sliding or grazing bifurcation can be continued in two parameters by combining the three methods above. Furthermore, the stability of the periodic orbits can also be easily determined. The numerical methods were implemented in MATLAB environment and the numerical simulations were aided by built in event detection routines. With help of such routines an approximate method was applied in the case of the determination of the critical grazing parameter.

3. Demonstration of the algorithm

The developed algorithm is presented through an impact



2. Figure A periodic orbit with grazing bifurcation and a periodic orbit on the boundary of the sliding bifurcation



3. Figure Continuation of the grazing and the sliding bifurcation

4. Summary

The developed continuation routine is capable of finding critical periodic orbits containing grazing and sliding bifurcations and continuing them in 2 parameters. Employing these algorithms, a complete mapping of both the impact oscillator and linear oscillator subject to dry friction dynamics can be achieved. Moreover, it can also find and continue these bifurcations in 2 parameters in any generalized piecewise-smooth system, because the code was written completely independent of the system and the generalization is preserved throughout the structure of the algorithm.

oscillator, where grazing can occur and a linear oscillator subject to dry friction, where sliding can be detected.



1. Figure The model of the impact and linear oscillator



Háromtengelyes modális kalapács kalibrációja

Kálmán József Levente

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2022/2023/I. *Témavezető:* Dr. Bachrathy Dániel, egyetemi docens, bachrathy@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az általam vizsgált feladatban egy olyan modális kalapács elkészítése és validálása a cél, ami mindhárom tengelye mentén képes az erőt mérni. Ennek fontossága az emberi pontatlansággal bevitt hiba kontrolálása. Fratér Zoltán hallgatótársam diplomamunkájának folytatása ez a szakdolgozat.

Egyszerű geometriájú méréseknél is figyelni kellett, hogy a felületi normálisra párhuzamosan történjen a gerjesztés. Nagyon fontos ismerni a gerjesztés irányát a válasz függvény meghatározása érdekében. Ha rossz (ferde) volt az ütés, akkor olyan irányokat is rezgésbe hozunk, amikről nem tudunk. Nagyon kis eltérés is nagyban befolyásolja a mérési eredményeket.



1. ábra. Elkészült kalapács összeszerelt állapotban

2. Alkalmazott módszerek

Az időtartományból a frekvencia tartományba való vizsgálat során Fast Fourier transformációt használtuk.



Abban az esetben ha az ütés és a gyosulás mérés azonos tengelyen történik egy frekvencia csúcs adódik, mivel a kereszt irányú tagot nem gerjesztjük meg. Ha a mérés és az ütés tegelye merőleges egymásra, akkor az ábrán is látható, hogy megjelenhet a második csúcs. Fontos továbbá a diagrammon megfigyelni az amplitúdó skálát, mivel a vegyes mérések esetén egy nagyságrenddel kisebb az érték. Ezen két mérés esetén nem lenne szabad látnunk semmilyen más sajátfrekvenciát.

3. Eredmények

A koherencia számításánál a frekvencia spektrumot vizsgáljuk. Az a célunk, hogy minél inkább egy y = 1 egyenest kapjunk és a lehető legkevesebb legyen benne az egytől való eltérés. A különböző mérések sorána az ütés és a gyorsulásmérő felszerelésének iránya változott ([ütés iránya, gyorsulás mérés iránya], [x,x], [x,y], [y,x], [y,y]). A keresztirányú tagokat ki tudtuk mérni és a háromtengelyes kalapácsnak köszönhetően a mérési hibákat ki tudtuk válogatni.



3. ábra. Koherencia vizsgálata különböző gerjesztési és mérési irányok szerint

4. Összefoglalás

2. ábra. Frekvencia tartományban a vizsgált alkatrász első két sajátfrekvenciája, különböző gerjesztési és mérési irányok szerint

A háromtengelyes kalapács legjobb használata érdekében egy kisebbb tömegű fej legyártása mindenképpen szükséges. Továbbá éremes lenne egy olcsó és egyszerű megoldást találni a kalapács pozíciójának mérésére. Ilyen lehet egy viszonylag egyszerű kamerás megoldás, de ebben az esetben a feldolgozandó adatok mérete, jelentősen megnő. Másik opció a mobiltelefonokban használt giroscope feszerelésével egy kiindulási pozí- cióhoz való elmozdulás nyomonkövetése.



Lágy polimer habok benyomódásvizsgálatának kísérleti és numerikus vizsgálata

KOVÁCS GERGELY

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2022/2023/I. Témavezető: Dr. Berezvai Szabolcs, adjunktus, berezvai@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Polimer habokat elterjedten alkalmaznak számos iparágban a kedvező tulajdonságaik miatt. A széleskörű elterjedéssel azok modellezése iránti igény is megnőtt. Az összenyomható, hiperelasztikus habok modellezésére mindössze egy elfogadott és a kereskedelmi végeselem szoftverekbe is beépített anyagmodell létezik, ez az Ogden-Hill habmodell. Ezen konstitutív modell paramétereinek illesztése egyáltalán nem egyértelmű, még egyszerű esetekben, homogén deformációk esetén sem. A benyomódásteszt a komplex feszültségállapota miatt egy széleskörben alkalmazott vizsgálat az anyagmodell validálására. A diplomamunka célja a benyomódásteszt kísérleti és numerikus vizsgálata, továbbá a benyomódásteszt paraméterillesztés során történő használhatóságának felderítése.

2. Alkalmazott módszerek

A numerikus vizsgálatok elvégzéséhez egy automatizált végeselemes eljárás került kifejlesztésre. Az eljárás alkalmas a felhasználó által definiált paraméterkombinációkkal történő vizsgálatokra. Az eljárás az adott paraméterekre elvégzi a végeselem modell felépítését és a szimulációk futtatását ABAQUS-ban, majd a csomóponti koordinátákat tartalmazó eredmény fájlokból MATLAB segítségével történik a kimeneti paraméterek meghatározása és rendszerezése további vizsgálatokhoz. Egy meghatározott paramétertartományon paraméterérzékenységi vizsgálat történt.



1. ábra: A benyomódástesztet deformációját jellemző



2. ábra: A kísérleti elrendezés és a képfeldolgozás főbb lépései

3. Eredmények

A fizikai teszt eredményeket és a numerikus vizsgálatok eredményeit összehasonlítva a vizsgált habok anyagmodell paramétereire kvalitatív következtetéseket lehetett tenni.

A három paraméterillesztési eljárás eredményeit csak egy esetben igazolták a korábban tett kvalitatív megállapítások, de feszültségek tekintetében az illesztés még homogén deformációk esetében is pontatlan.

Az illesztett anyagmodell paraméterekkel futtatott új szimulációk eredményei nagy pontossággal egyeztek a mérésekkel.



3. ábra: A paraméterillesztés eredményei (balra) és a benyomódásteszt során bekövetkező térfogati deformáció (jobbra)

kimeneti geometriai paraméterek

Az elméleti számítások után két különböző típusú habon fizikai mérések következtek. Egy alkalmas kísérleti elrendezés és a képfeldolgozáson alapuló kiértékelés lehetővé tette a deformált alak vizsgálatát.

Egy- és kéttengelyű nyomás tesztek eredményeinek segítségével az anyagmodell paramétereinek illesztése is megtörtént három különböző megközelítésben.

4. Összefoglalás

Fizikai benyomódás tesztek alapján az anyagmodell paramétereire vonatkozóan kvalitatív becslések tehetők, de a pontos értékük nem meghatározható. Az illesztett paraméterekkel végzett szimulációk komplex feszültségállapotban is jól illeszkednek a mérési eredményekre a deformációk tekintetében, míg a feszültségek tekintetében még homogén deformációk esetén sem.



Numerical material constitutive model calibration workflow for continuous fibre reinforced plastics

ZOLTÁN LADÓ

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2022/2023/II. *Supervisor*: Dr. Szabolcs Berezvai, assistant professor, berezvai@mm.bme.hu *Consultant*: László Kovács (eCon Engineering), sr. sim. eng., laszlo.kovacs@econengineering.com

1. Introduction

Nowadays, the application of continuous fibre reinforced plastic (CFRP) materials become widely used due to their favourable mechanical properties. These advanced materials can offer better solutions than conventional materials in many engineering applications, such as aerospace and automotive industries. Even though they have excellent material properties, the accuracy of material behaviour prediction is still problematic due to inhomogeneity and anisotropy. As virtual approximations gain more importance in industrial practice, there is a demand to improve finite element analysis (FEA) of such materials. A new, industry-oriented approach has been identified, which has the aim to calculate material model parameters of orthotropic composite layers including nonlinearities as well as multiaxial failure behaviours of CFRPs. Within this project I developed an algorithm that automatically prepares virtual FEA simulations of standard test with the available test data for numerical material parameter optimisation purposes.



Figure 1 Material content by weight of Boeing 787 Dreamliner

2. Applied methods

The algorithm is basically an automated pre- and postprocessor of virtual test specimens. During its operation it uses several different files, which contain the settings and configurations, while the inputted parameters are specified by the user. After the user gives the inputs (standard type, settings, material model and parameters), the algorithm creates the FE model representing the experiment in question. When the solution is done, it extracts the results according to the standard prescriptions. Reaction force / moment, strains and displacement were examined. Currently, nineteen different specimen configurations and three material models are available for simulations.



Figure 2 Workflow of the algorithm

3. Results

The FE results of the algorithm were validated by conventional FE calculations in which each test was prepared with the same mesh quality and settings. During the validation all test specimens were checked with the available material models.



Figure 3 Comparison of the results for ASTM-D5379 test specimen

4. Summary

The developed algorithm and the database of test specimens can be used perfectly for the current cases. Further task is to complement the test specimen database with the missing ones, and to implement more constitutive material models in the algorithm. Furthermore, the most important step is to implement this script to the parameter optimizing algorithm.



Analysis of the improved car-following model based on measured data

KRISTÓF MARTINOVICH

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2022/2023/I. Supervisor: Ádám Kiss, research assistant, kiss a@mm.bme.hu

1 Introduction

The goal of the thesis is to validate our preliminary assumption of the varying nature of human driver reaction time (as opposed to the widely used constant delay), by comparing the extended car-following model, the constant time delay model and the measurement data. We use open-access US highway traffic measurements of various situations and the car-following model-specific road measurements.

2 Applied methods

The large quantity of highway trajectory data is evaluated using a semi-automatic driver delay estimation algorithm. The results in Fig. 1 clearly show an increasing trend in the relation between human reaction time and the headway, which can be modelled mathematically by headwaydependent time delay.



Figure 1: Delay estimation by highway trajectory data, illustrating the relation of time delays vs. headways.

We extend the commonly used car-following model utilizing a nonlinear state-dependent delay system. The measurement layout and the corresponding theoretical model are illustrated in Fig. 2. It is first examined via linear stability analysis, resulting in stability diagrams. Then nonlinear analysis is carried out to determine the steady-state periodic

3 Results

The results of the improved model perfectly fit the measured data for all points in both measurement configurations presented in Fig. 3, while the constant delay model, widely used in the literature, cannot even qualitatively describe the behaviour of the system. The parameters are consistent with the literature and the used state-dependent delay complies with the scatter data shown in Fig. 1.



Figure 3: Linear stability diagrams of the measurement and the state-dependent delay model.

The nonlinear analysis shows qualitatively good results for a significant part of the measurements, but it does not reproduce the seemingly large bistable area shown in Fig. 4. However, further numerical simulations and parameter tuning provide explanations for the difference between the theoretical model and the collected data.



Figure 4: Bifurcation diagrams comparing the measurements and the results of state-dependent delay model.

4 Summary

orbits using numerical continuation technique and numerical simulation.



Figure 2: Measurement layout and mechanical model of human drivers (blue, red) and one automated vehicle (green). Based on the highway measurement data, the human reaction time with respect to headway can be more accurately modelled with state-dependent time delay. Applying the model to the road measurements results in a perfect fit for the linear stability analysis and a qualitatively good description of the nonlinear behaviour of the system. On this basis, we can conclude that the improved car-following model can provide a qualitative leap in modelling traffic in the future.



Development of synchronous motor control algorithm for FPGA board of rapid prototyping unit

MÁTÉ DÁNIEL MOLNÁR

Mechatronic Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2022/2023/I. Supervisor: Dr. Zsolt Szabó, associate professor, zsolt.szabo@mm.bme.hu

1. Introduction

Permanent magnet synchronous motors (PMSMs) are very popular for servo drive applications due to their reliability and high power density. For the efficient and safe operation of these motors, a well-designed control algorithm is needed.

Rapid prototype development or rapid prototyping is a widely used development method in the automotive industry. The thesis is focused on rapid control prototyping. This makes the development of control algorithms very time- and cost-effective. Instead of manufacturing a new ECU (Electronic control unit, a printed circuit board with a microcontroller for example) every time an update occurs in the control algorithm, with the use of a rapid prototyping system the algorithm can be simulated real-time and tested on the real motor.

The rapid prototyping unit used in this thesis contains not just the real-time CPU, but also an additional FPGA board. FPGAs (Field-programmable gate array) can be used for rapid prototyping due to their flexibility and speed. The aim of this thesis is to develop a motor control algorithm for PMSM motors that can run on the FPGA board of the rapid prototyping unit.



1. Figure The equivalent circuit and structure of PMSM.

2. Applied methods

The control scheme of electrical drive systems is usually a cascade feedback control. The inner-loop is a current controller and the current reference values are calculated by another outer-loop controller, that realizes the primary objective, in this case speed control.

the other one is for the development of torque. These can be controlled separately with PI controllers.

The power supply of the motor is given by a two-level three-phase voltage source inverter using space vector PWM.

The control algorithm was developed in Matlab/Simulink environment with the use of specialised blocksets that can be translated into HDL (Hardware description language) code. The control parameters were calculated using pole-placement method. Simulations in Matlab/Simulink were carried out to verify the proper functioning of the control. It is important to note that the control can behave slightly differently on the real hardware due to the real-time task handling and the parallel computation of the FPGA but it is very useful. For this the inverter and PMSM were also simulated.

After the simulations all the necessary files were created, the program was compiled and uploaded to the real-time system. Tests were conducted on the real PMSM motor.

3. Results

It can be seen on figure 2. that the speed control algorithm works, the speed follows the reference signal well both in the case of simulations and the hardware test. However, in the hardware test the performance of the control is not as ideal as in the simulation results and there is a noise proportional to the speed. This in part can be attributed to the noise of the speed calculations that use angle measurements.



2. Figure The simulation (left) and hardware test (right) results for the mechanical speed

The current control is realized using field-oriented control method. This is based on the analogy of PMSM motors to DC motors. In the rotating reference frame one of the current components is responsible for the flux generation in the air-gap and

4. Summary

A speed control algorithm for PMSM motors was developed for the FPGA board of a rapid prototyping unit. Both simulation tests and hardware tests were conducted. Overall, the control works appropriately, however the performance on the real hardware is not as optimal as in the simulations. This can be improved upon in future works.



Demonstration of the bicycle dynamics by simulation and measurement

Ábel Mihály NAGY

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2022/2023/I.
 Supervisor: Dr. Giuseppe HABIB, associate professor, habib@mm.bme.hu
 Advisor: Dr. Ambrus ZELEI, assistant professor, zelei@mm.bme.hu
 Advisor: Dr. Paul FISETTE, full professor, paul.fisette@uclouvain.be

1 Introduction

Bicycles often exhibit a self-stable lateral dynamic behaviour at a certain speed range. The goals of this Thesis were to demonstrate this phenomenon through different mechanical models; and to develop a method to capture the joint coordinates based on video recordings of an experimental setup.

3 Results

The eigenvalues of the linearized holonomic model can be seen in Figure 2. For approximately $v \in [2.8 \mid 3.9]$ [m/s] the stable velocity range, where all the real parts are negative, is identified. The measured steering angle is visible in Figure 3, for which the weave mode is fitted.

2 Applied methods

I modelled the bicycle as a multibody system consisting of 4 rigid parts: the rear body with a rigid rider, the steering assembly and the 2 wheels. The 9 generalized coordinates are the position of the rear body center of mass $(x_{\rm B}, y_{\rm B}, z_{\rm B})$, the rotation of the rear body (ψ, ϕ, θ) , the steering angle δ and the rotation of the wheels $(\theta_{\rm R}, \theta_{\rm F})$ (see Figure 1).



Figure 1: The Whipple-Carvallo bicycle model.

I investigated two wheel-ground contact models: a nonholonomic model with rigid wheels and no-slip, and a holonomic model with compliant wheels and slip. The latter involved different tire models, which provided the longitudinal and lateral forces and the yaw torque. I implemented the models in Robotran environment and simulated their motion in the time domain. Additionally, modal analysis was performed based on the linearized equations.



Figure 2: The eigenvalues for different forward speeds.



Figure 3: The steering angle obtained from motion capture.

Regarding the experimental setup, I attached markers on a bicycle to capture its motion with a camera. After the post-processing, the joint coordinates were reconstructed from the recordings via nonlinear optimization.

4 Summary

Despite some mismatch between the holonomic and nonholonomic models, the developed simulation tools proved to be useful for predicting the bicycle dynamics. The motion capture method allowed to reasonably track the bicycle configuration; however, a more sophisticated hardware would improve precision of measurements.



Effect of the surface quality on the kinematic and dynamic properties of human running

Bendegúz Nagy

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/II. Supervisor: Dr. Ambrus Zelei, associate professor, zelei@mm.bme.hu

1. Introduction

Running is one of the most popular sports worldwide. Most people run to stay healthy, stay in shape, have fun or relieve stress. However there are some running-related injuries. Running analysis and understanding of movement can help to avoid these injuries and maximize the efficiency of running. Nowadays there are a large variety of methods to analyze the motion: kinematic- and kinetic analysis, including markerbased methods, foot pressure measurements. Several parameters, such as kinematic of the joints, ground reaction forces, work of the muscles, can be well determined by these methods and tools. These parameters facilitate the comparison of different running forms.

Our goal is to experimentally find the difference in the running form when someone runs on stiff or elastic surface. In parallel to the experiments, we would like to gain information by means of a model that includes ground stiffness. We would aim to find the factors and kinematic properties of the running form that help to reduce the risk of injuries and pain.

2. Applied methods

The SLIP models were created in MATLAB environment. The equations of motion of the system are second order ordinary differential equations. The built-in MATLAB function ode45 can solve nonstiff differential equations using medium order method.

During our measurement the OptiTrack camera system and Moticon OpenGo Sensore Insoles were used. The data stored by the Moticon OpenGo insoles were uploaded to the computer software via the mobile application, from where the data could be saved in .txt format. Data processing was performed using MATLAB. The measurement data recorded by the OptiTrack camera system were processed with the Motive software (OptiTrack's own software). The range of usable data were saved in .csv format, which were later processed using MATLAB.

In addition to the visual comparison, Wilcoxon rank-sum (unpaired) and signed-rank (paired) statistical tests were used to compare the measures for the different surfaces.

surface. The comparison of the measurement results was followed by a comparison of the measurement and the model.



1. Figure: SLIP models



1. Figure: Stroboscopic view of the SLIP model with foot elasticity and damping

Measures	Rubber sheet	Concrete	h _{signed-rank}	h _{rank-sum}
F _{RF,max} [-]	0.4068 ± 0.0632	0.3727 ± 0.0642	1	0
F _{FF,max} [-]	$0.8815 {\pm} 0.0407$	0.9177 ± 0.0337	1	0
s _a [Nm/rad]	2563 ± 101	2339±98	1	1
s _k [Nm/rad]	$3592{\pm}148$	3307±130	1	1
M _{a,IC} [Nm]	459.2 ± 145.1	329.0 ± 206.0	1	1
M _{k,IC} [Nm]	372.2±131.4	267.5 ± 181.1	1	1
s _{leg} [N/m]	$1334{\pm}61$	1348 ± 61	0	0
s _{vert} [N/m]	1387 ± 67	1406 ± 66	0	0
PTS $[g]$	$1.560 {\pm} 0.068$	1.652 ± 0.081	1	1
$\Delta_{\text{stride}} [m]$	1.392 ± 0.083	$1.457 {\pm} 0.066$	0	1
v _{avg} [m/s]	4.023 ± 0.280	$4.164 {\pm} 0.227$	0	0
$\Sigma W_{k,Abs} [k]$	-350.3 ± 40.9	-381.1 ± 66.8	1	1

 Table: Comparison of measures for different surfaces (h=1: there is a significant discrepancy between the measures of the different surfaces)

3. Results

The MATLAB script compared the different surfaces for one subject and the measurements of all subjects on the same

4. Summary

The measurement for different surfaces returned the conclusions of the literature. When comparing the measurement and the model, the measures differed in order of magnitude, but the tendencies were similar, therefore the model can be considered successful. By measuring more subjects, the result can be refined.



Turbinalapátok rezgéstani elemzése

NÉMETH OLIVÉR

Gépészmérnöki MSc Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2022/2023/I. Témavezető: Dr. Kovács Ádám, egyetemi docens, adamo@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Napjaink egyik fő villamos energiaforrása az erőművekben üzemelő gőzturbinákból származik, melyeknek egyik legkritikusabb alkatrésze a turbinalapát. A gőzturbinalapátoknak két gyakori tönkremeneteli oka van. A leggyakoribb ok egy kialakult repedés miatt megváltozott sajátfrekvenciák okozta rezonancia mely nagyciklusú kifáradáshoz vezet. A másik jellemző tönkremeneteli ok a képlékeny alakváltozás jelenléte mellett végbemenő kisciklusú kifáradás. Munkám során a százhalombattai erőműben üzemelő törést szenvedett gőzturbinalapát rezgéstani és szilárdsági vizsgálatát végeztem el végeselemes módszerrel.

2. Rezgésanalízis

A CAD geometria létrehozását követően a modális végeselemes modell peremfeltételit állapítottam meg, mely során a numerikus eredményeknek a rendelkezésemre álló kimért sajátfrekvenciákra történő legjobb illeszkedése volt a cél. A validált numerikus modellel megvizsgáltam a forgás (merevítő és giroszkópikus hatás), a szomszédos lapátok, illetve a lapáttőnél kialakuló repedés befolyását a lapát sajátfrekvenciáira. Eredményeim alapján kijelenthető, hogy a forgás, a szomszédos lapátok hatása, valamint egy tetszőleges méretű repedés létrejötte a szilárdsági szempontból kritikusnak mondható lapáttőnél nem idézhettek elő rezonanciát.

> 7000 6000 된 5000 4000 Sajátfrek 3000 à 2000 1000 0 500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 0 n. Fordulatszám [RPM]

rozásához egy olyan végeselemes modellt használtam melyben nemlineáris súrlódásos kontaktokon keresztül érintkezett egymással a lapát és a járókerék szelet. A peremfeltételek meghatározását követően submodellezési technikával hoztam létre a megfelelő sűrűségű hálót, mellyel megállapítható volt a lapáttő lekerekítésénél ébredő feszültségmező.



2. ábra. Alkamazott submodell.

A lineáris anyagmodellt alkalmazó numerikus modellel meghatározott feszültségeket szükséges volt átszámolni valós feszültségértékekre a kisciklusú kifáradás során létrejövő plasztikus nyúlás vizsgálatához. Ehhez a nemlineáris Ramberg-Osgood anyagtörvényt és a Neuber-formulát alkalmaztam.



3. ábra. Von Mises egyeneértékű csúcs feszültség [MPa]

1. ábra. Campbell diagram.

3. Szilárdsági analízis

A szilárdsági vizsgálat során a gőzturbinalapát statikus, kisés nagyciklusú kifáradásra történő kiértékelését végeztem el. A lapát terhelése húzás és hajlítás volt, mely a forgásból és a gőznyomásból származott. A feszültségértékek meghatá-

4. Összefoglalás

Eredményeim alapján elmondható, hogy a turbinalapát törésének oka nem lehetett rezonancia, a nyomásingadozás hatására bekövetkező nagyciklusú kifáradás sem következhetett be, illetve túlterhelés miatt keletkező képlékeny deformáció sem okozhatott statikus és kisciklusú tönkremenetelt.



Analysis of Zeno behaviour in low degree of freedom dynamic systems with impacts

Tímea Pál

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics 2022/2023/I. Supervisor: Dr. Dombóvári Zoltán (associate professor), Zsolt Iklódi (PhD student), dombovari@mm.bme.hu, zsolt.iklodi@mm.bme.hu

1 Introduction

With the so called Zeno effect can be faced in several fields of engineering life. However even nowadays, it means difficulties to properly dinvestigate these systems.

In this thesis the Zeno effect is presented through the model of an impact damper, it can be observed at he infinite number of collisions of the damper mass and the housing in finite time period.



Figure 1: Mechanical model of a simple impact damper

2 Mathematical model

The system of differential equations, characterising the model, after the nondimensionalisation have the following form:

$$\ddot{y}_1(t) = -1$$
, (1)

$$\ddot{y}_2(t) + 2\zeta \dot{y}_2(t) + y_2(t) = 0 .$$
(2)

The collisions of the bodies are taken into consideration with the law of impact.

It is possible, that the damping mass is sticked to the housing of the damper, which yields a new system with a single $(m_1 + m_2)$ vibrating mass:

$$\ddot{\tilde{y}}(t) + 2\zeta \frac{\tilde{\omega}_{\mathrm{n}}}{\omega_{\mathrm{n}}} \dot{\tilde{y}}(t) + \frac{\tilde{\omega}_{\mathrm{n}}^2}{\omega_{\mathrm{n}}^2} \tilde{y}(t) + \frac{m_1}{m_1 + m_2} = 0 \qquad (3)$$

the number of collisions of the bodies is proportional to the coefficient of restitution r, and inversely to the mass ratio μ of them. Moreover the number of sequences of collisions and the total energy of the system depend on μ and r inversely.



Figure 2: The number of occurring sequences of collisions and the total energy at the end of the first sequence

4 Analytical approximation

As in the small domain before the damping mass sticks to the damper the numerical solver fails, analytical approximations were determined based on the closed form solution of the system.



Figure 3: Accurate numerical solution with the analytical approximations

The objects move together until the condition of separation is not fulfilled:

$$m_1 g - k \left(\tilde{y} \frac{g}{\omega^2} - \eta_{st} \right) = 0 , \qquad (4)$$

3 Numerical Investigation

The system was solved numerically, furthermore parameter sweep simulation was carried out. According to the results

5 Summary

The behaviour and the dependencies on the parameters of the presented system is shown by the numerical results. Furthermore an acceptably accurate numerical mapping was determined to be able handle the collisions between the bodies in the range, where the numerical solver is not able.



Numerical modelling and stability-analysis of snap-through in soft rubber shells

BARNABÁS PIRI

Mechanical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Development, 2022/2023/I. Supervisor: Dr. Szabolcs Berezvai, Assistant Professor, berezvai@mm.bme.hu

1 Introduction

One of the limiting factors of current soft actuators - which are used in soft robotics - is their limited speed. The soft actuators typically made of silicone, which has nonlinear stress - strain characteristics. This behaviour can be described using hyperelastic material models. By exploiting instabilities, the actuators are capable of sudden movement. The goal of my thesis is to trigger the hyperelastic instability and optimize the released energy from the system by varying the actuator's geometric and material parameters.



Figure 1: The concept of the snap-through instability

2 Applied Methods

The aim of the work is to create an automatic simulation environment, where the released energy can be evaluated in terms of the input parameters, using finite element simulations made with ABAQUS. In my work, I used first - and second - order Ogden hyperelastic models to capture the material's response.



3 Results

The released energy can be obtained from the resultant pressure-volume curves of the simulated actuators, using numerical integration, which was the 3/8 rule of Simpson's method in my case. After setting up the range of every gemetric parameter, the results indicated that there are several geometric configurations with the same released energy.



Figure 3: The released energy in terms of the parameters

In order to optimize the material properties, I have chosen a few determinant geometries on which to perform the tests.



Figure 4: Resulting p-V curves for different materials

4 Summary



Figure 2: The geometry and its control points

The inflation is modeled using an ideal gas model and a predefined interaction in ABAQUS called 'Fluid Cavity'. The numerical modelling was performed using the RIKS method, which is a powerful method for solving nonlinear systems. In general, regarding the simulations, the optimization was succesful: using different geometries and materials, the released energy can be tuned, and the shape of the actuator can be chosen depending on the application. According to these simulations, comparing my results to scientific literature, my optimized actuator is capable of a slight ($\sim 20\%$) energy gain.



Feasibility Study of an Aeroelastic Pseudo-Satellite

Ákos Radványi

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2022/2023/I. Supervisor: Dr. Zoltán Dombóvári, associate professor, dombovari@mm.bme.hu

1 Introduction

High Altitude Platforms, or Pseudo-Satellites (HAPS) are unmanned vehicles operating in the stratosphere and providing services like Earth observation, telecommunication or navigation. However, the low driving power extracted from solar energy requires a specific design of these satellites including a lightweight structure and long, flexible wings (see Figure 1). These features make them particularly prone for harmful mechanical vibrations.



Figure 1: Structure of pseudo-satellites (Airbus Zephyr)

The main objective of my work is to develop a workflow suitable for estimating pseudo-satellite wing shapes and suppressing harmful vibrations, thereby improving the quality of onboard optical sensing techniques. My thesis was written in the framework of a project of SZTAKI.

2 Applied methods

The mechanical model of the simplified wing is shown in Figure 2.



carried out to select dimensions and material for the wing model. After transforming the finite element model of the wing to modal space, the corresponding state space model of the structure is obtained. Two different active vibration control strategies are tested: LQG and H_{∞} control method.

3 Results

As a result of the calculations, it was found that an AlMgSi0.5 alloy 5 m long beam model with 40×40 mm hollow square cross-section and 3 mm thickness is suitable to fulfill the design requirements. The LQG control showed a significant attenuation, however, only the H_{∞} control was capable of handling time delays coming from the characteristics of the actuator motor.



Figure 3: Performance of the designed control strategies

4 Summary

Commertial exploitation of high altitude platforms is still prevented by some technological barriers originated from harmful mechanical vibrations of the flexible structure due

Figure 2: The mechanical model

Analytical as well as finite element calculations were

to atmospheric excitations. In my thesis, I designed a simplified wing model suitable for imitating the flexible dynamics of pseudo-satellites. This model is installed in a laboratory of SZTAKI which provides a great opportunity to study the vibrations of such a satellite wing without expensive flight tests. Various active vibration control strategies were tested. In the future, the most promising strategy will be implemented on an embedded computer to test its performance on the physical model, too.



Nonlinear dynamics of balancing on rolling balance board

DÁNIEL RÓZSA

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2022/2023/I. Supervisor: Tamás Insperger, PhD, professor, insperger@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 nonlinear dynamics related to a two-degrees-of-freedom mechanical model of human balancing on a rolling balance board in the sagittal plane (see Figure 1). In case of humans, active control is necessary to maintain balance. This control torque was modelled as a delayed PD controller at the ankle. A combined visual/vestibular time delay (τ) was used to model the human reaction time. Having derived the equation of motion of the system and examining linear stability, the amplitude of a limit cycle that arises from a Hopf bifurcation was approximated analytically. The analytical results were then compared to measured data and results of numerical simulations.

2 Methods

and the Poincaré–Andronov–Hopf theorem. The analytical calculations were carried out using the Wolfram Language, while MATLAB scripts were used to perform numerical simulations. The calculations were run for nine different combinations of R and h mechanical parameters. Measurements were also conducted using a digital motion capture system that consists of 18 cameras.

3 Results

The Hopf bifurcation induced limit cycle amplitudes were approximated both analytically and numerically. A brief summary of the effect of different R and h parameters on the amplitude of stable limit cycles is shown in Figure 2. This figure also shows compares the analytical and numerical results.



Figure 2: The effect of different R and h parameters on the amplitude of stable limit cycles.

4 Summary

A direct method, called Walton-Marshall method, was used to determine the critical time delays of the system. It can determine the time delay intervals that lead to a stable system in case of a fixed control parameter combination. Furthermore, optimal control parameters were calculated with the help of theorems related to multiplicity induced dominancy. The analytical approximation of the amplitude of a limit cycle is obtained by applying Center Manifold Reduction Experimental results differ from the model based ones in many aspects but an alternative measurement setup or the choice of different control parameters in the model might be able to capture the oscillations that result from a Hopf bifurcation. The knowledge of the exact human reaction time that is needed for balancing on a balance board could also help confirm the validity of the results obtained from the mechanical model.



Human balancing on rolling balance board with adjustable geometry in the frontal plane

SÁRDI FERENC ZSOLT

Faculty of Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Modelling, 2022/2023/I. Supervisor: Molnár Csenge Andrea, lecturer, csenge.molnar@mm.bme.hu

1. Introduction

In my thesis I built a model which can represent the human balancing on a rolling balance board. The first main part of the applied model is the balance board which can be seen on *Figure 1*.



Figure 1 – Balance board

The second main part of the model is the representation of the human body. The structure of the model is basically a four-bar mechanism. The two legs, the hip, and the trunk is represented in this model. We can observe the combined, two-dimensional model of the human body and the balance board in the coronal plane on *Figure 2*.



2. Applied methods

I determined the equations of the motion for the model by the Lagrange method. At first, I determined the position coordinates and the velocity coordinates at the centre of gravity of each body of the model. As the next step I calculated the potential energy and the kinetic energy of the system. Now the nonlinear and the linearized equations of the motion can be written. For the control law I used a PD controller with time delay applied in the hip joints of the model (*point B and point*) C). By this controller we can model the sensory system of the body and the delay int intervention originates from the reaction time of the body. We can determine a critical time delay of the system where the system cannot be stabilized anymore. For this purpose, I used the MID method. The method could be used after we write the characteristic equation of the system. The characteristic equation contains a polynomial originated from the system dynamics, a polynomial originated from the control law and term which contains the time delay. The point of the MID method is that we can express the critical time delay by the coefficients of the open loop characteristic polynomial if the roots of this polynomial are strictly real and has a positive average.

3. Results

The resulted critical time delay values can be observed on Figure 3 for different balance board parameters. We can conclude that the critical time delay is the smallest if the wheel radius is increased and the standing board level is decreased, while it is the largest when the radius and board level is also increased. We can also observe the measured data where the radius of the marker corresponds to the number of the subjects who successfully completed the balancing task with the defined specimen.



Figure 2 – Model of human balancing on balance board

The determined model has two degrees of freedom. One general coordinate measures the motion of the balance board by the angle of the standing board compared to the horizontal position, while the other general coordinate measures the motion of the humanoid model by the angle of its left leg compared to the horizontal position.

Figure 3 – Critical time delay with different parameters



Investigation of traffic dynamics on a ring in the presence of an automated vehicle

BALÁZS DÁRIUS SZAKTER

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2022/2023/I. Supervisor: Bence Máté Szaksz, PhD student, szaksz@mm.bme.hu

1 Introduction

The term automated vehicle is by definition a vehicle technology that is capable of performing all aspects of dynamic driving tasks without an intervention by a human being via an equipped automated-driving-system. Traffic congestion is the main factor of increased travel length, extensive disruption in dynamic traffic flow causing unnecessary air polluting driving behaviour. This problem can be resolved by utilizing connected/automated vehicles to mitigate traffic flow with continuous feedback of position and speed of other vehicles participating in the traffic. The model investigated is Adaptive Traffic Control where the automated vehicle's motion is based on the velocity of the vehicles both in front and back.



Figure 1: Adaptive Traffic Control

2 Dynamics

The investigation of the dynamics of three vehicles were carried out, out of which two were human vehicles and one was an automated vehicle. The vehicles were connected with a ring configuration where the last vehicle is capable of impacting the first vehicle's dynamics.



wards control was applied to the automated vehicle. Lastly, time delay was introduced to the human vehicles.



Figure 3: Stability chart for $\beta_{\rm B}$, $\beta_{\rm AV}$ control gains as a function of the minimal eigenvalue

Simulations were conducted for the above mention cases to analyse the efficiency of the chosen control gains in a perturbed equilibrium state.



Figure 4: Simulation of the delayed model in case of stable control gains chosen



Figure 2: Three vehicles on a ring configuration

Stability analysis was conducted for three cases to determine the stable regions of the control gains. Firstly, the automated vehicle had only forwards control. Secondly, back-

3 Summary

Real-time simulations proved the capability of describing real traffic with high accuracy. The effect of backwards control resulted in expanding stable regions and more efficient dynamics which can have vital impact on traffic flow, efficiency and carbon-dioxide emission.



Átviteli függvény számítása mérési adatok alapján

SZILASI MÁRTON

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2022/2023/I. *Témavezető:* Dr. Hajdu Dávid, adjunktus, hajdu@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A frekvencia-átviteli függvények méréssel történő meghatározása során a mért jeleket terhelő zaj hatása zavarhatja az átviteli függvény mérhetőségét. A szakdolgozatom során az ezen zaj hatását csökkentő H_1 , H_2 és H_v számítási eljárások összehasonlítását végeztem el [1].

A dolgozat második felében a vizsgált becslési módszerek közül legjobbnak ítéltet egy rezgő rendszer mérésének elvégzésére használtam.

2. Becslőmódszerek összehasonlítása

A feladat során a szimulált jeleket diszkrét időpillanatokra bontva állítottam elő egy *MATLAB* programban. Az impulzusgerjesztés közelítéséhez a rezgést előállító erőt rövid, konstans nagyságú jellel közelítettem. Az így kapott diszkrét jelekhez minden pillanatban normál eloszlás szerinti véletlen értéket adtam, szimulálva a terhelő zajt.

Mivel az algoritmusok használatához többszörös mérés szükséges, a véletlenszerű zaj sokszoros újragenerálással további szimulált méréseket állítottam elő, amelyek alapján átlagoltam a kapott frekvencia-átviteli függvényeket.

A feladat során több eltérő esetet vizsgáltam meg, attól függően, hogy melyik jelre helyeztem zajt, illetve, hogy mekkora mértékű volt a zaj. Minden esetben az egyes becslőmódszerekkel meghatározott frekvencia-átviteli függvényeket a tiszta jelből generált függvénnyel összehasonlítva határoztam meg a módszerek közül a legjobbat.



A szimulációk alapján a módszerek közül H_1 módszert találtam a legjobbnak a legtöbb esetben. A módszer simább eredményt adott kis mérésszámok esetén, mint az egyes mérésekből számolt frekvencia-átviteli függvények egyszerű átlagolása, és követte a valós függvény alakját kis alábecsléssel. A H_2 és H_v módszerek használata impulzusgerjesztés mellet kevésbé hasznosnak bizonyult, mivel azok alakja a válaszjelen található zaj hatására jelentősen torzult.

3. Dinamikai rendszer mérése

A második feladatban a H_1 módszer alkalmazásának bemutatására egy CNC gép frekvencia-átviteli függvényét határoztam meg. A módszer segítségével megállapítottam a szerkezet sajátfrekvenciáit és a hozzá tartozó csillapításokat, továbbá több pontban méréssel a szerkezeten felvett modális hálóval lengésképeket is ábrázoltam. A kimért frekvenciaátviteli függvényeket egy függvényillesztési módszerrel is összehasonlítottam.



2. ábra. Kimért lengésképek 103, 332 és 643 Hz-es frekvenciákon

4. Összefoglalás

A szakdolgozaton eredményeképpen igazolható a H_1 módszer hasznossága zajos mérések esetén, amely könnyeben értelmezhetővé teszi az átviteli függvényt az egyszerű átlagolásnál. A módszer alkalmazását továbbá egy dinamikai szerkezet mérésével is igazoltam. A dolgozat ezen felül megmutatja a H_2 és H_v módszerek kevésbé általános alkalmazási helyzeteit.

1. ábra. 1000 mérésből átlagolt frekvencia-átviteli függvény becslések, zajjal terhelt gerjesztő- és válaszjel esetén

A kutatás a témában tovább folytatható egyéb gerjesztési módszerekkel és egyéb átlagolási, ablakozási módszerek vizsgálatával.

Hivatkozások

[1] Ewins, D. J. [2009], Modal testing: theory, practice and application, John Wiley & Sons.



ÁDÁM WEINHARDT-KOVÁCS

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2022/2023/I. Supervisor: Dr. Giuseppe Habib, Associate professor, habib@mm.bme.hu

Introduction 1

Hopping is a very peculiar type of locomotion. With respect to other kinds of legged locomotion, such as walking, running, skipping or galloping, it presents very specific issues related to energy consumption, control and dynamical phenomena involved. The control strategies are mainly based on the metabolic cost.

Hopping model $\mathbf{2}$

The mechanical model is a human-like, 6 DoF, planar, hopping leg structure. Where the mass and length of the foot, the shank and the thigh are given by human-like data. The control torques are acting in the ankle, in the knee and the hip. The jumping locomotion has different characteristics regarding the state of the jumping. During the flight phase the goal is to maintain or achieve stability, while during the ground or stance phase explosive torque values give momentum and height to the model. The original control of the system is based on periodical path finding with a PD based control. The jumping locomotion is very complex, thus, more advanced control strategies are investigated.



Figure 1: Mechanical model

Then, the next generation is created with selection, crossover and mutation.

Reinforcement learning 3.2

The disadvantage of the genetic algorithm is the finite number of variations of the control parameters, which is limiting the exploration of the model. Thus, in reinforcement learning control torques are given in every time step by the agent. We used a DDPG agent, which is a neural network based actor-critic method, that maximizes the long term reward. To help the training of the agent we performed pre-training, obtained by regression for the neural network of the actor.



Figure 2: Reinforcement learning of the system

Conclusion 4

The genetic algorithm optimization performed in various environments and with different weights of the fitness function was able to partially explain certain real-life motions, such as efficient hopping locomotion in reduced gravity environments. While reinforcement learning pre-training was effective in reducing computational cost, the method was still computationally expensive for the available hardware and did not yield any meaningful results. Overall, these findings suggest potential for further optimization and improvements in these methods.

								_
1 5							_	
1.5					······ Path of the tiptoe		iptoe	

Applied methods 3

Genetic algorithm 3.1

In this approach the original, control parameters of the PD control are varied with a genetic algorithm. A fitness is assigned to the individuals, based on the metabolic cost of the jumping locomotion, which determines how well the jumping locomotion is performed, and on the locomotion speed.



Figure 3: Simulated jumping locomotion obtained by the pre-training of the agent



AFM mikroaktuátor érzékenység vizsgálata nagy elmozdulás és követőerő esetén

Zeller András Marcell

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2022/2023/I. *Témavezető:* Dr. Kovács Ádám, egyetemi docens, adamo@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A feladatom az Atomerő-mikroszkóp (Atomic Force Microscope, AFM) mikroaktuátor érzékenységének vizsgálata. A dolgozat célja egy pontos mechanikai modell felállítása, amely figyelembe veszi a nagy elmozdulást és a terhelő erő követő jellegét. Feladatom továbbá: végeselemes modell készítése valamint numerikus szimulációk futtatása, ezek kiértékelése és összehasonlítása az eszköz érzékenységének meghatározása érdekében. A felvázolt probléma megoldása rendkívül körülményes, ugyanis a nagy elmozdulások, valamint a terhelő erő irányának változása a deformáció függvényében csak nemlineáris differenciálegyenlet rendszerrel írható le, amelyekre nincs zárt alakú megoldás. Ebből kifolyólag analitikusan csak közelítések segítségével, numerikus szimuláció során pedig csak iterációk alkalmazása esetén juthatunk megoldásra.



1. ábra. Az Atomerő-mikroszkóp felépítése

2. Alkalmazott módszerek

Az AFM mikroaktuátora egy rugalmas konzol, amelyet egy befogott tartóként modelleztem. A rúd szabad végén a súlypontvonallal α szöget bezáró követőerőt alkalmaztam a mikroszkóp szondáját érő valós terhelés alapján.



A pontos mechanikai modell leírására három analitikus módszert használtam: ezek a homotóp perturbációs metódus (HPM), HPM a nemlinearitások szétosztásának módszerével kombinálva (NDHPM), végül az Euler-Bernoulli gerendaelmélet kiterjeszése (EBGK). Az EBGK módszer volt az egyetlen, amelyet különböző α szögek esetén is alkalmazni tudtam a tartó szögelfordulásának és elmozdulásának meghatározására. Az analitikus számításokat Wolfram Mathematica 13.0 szoftverrel végeztem. Végül végeselemes analízis segítségével vizsgáltam a konzol deformációját, azonban a szoftver hibájából adódóan a követőerő nem működött, így ehelyett globálisan állandó irányú erőt alkalmaztam.

3. Eredmények

A dolgozatban összehasonlításra kerültek az egyes módszerekkel kapott végponti elmozdulások, a súlypontvonal deformált alakjai, valamint a maximális húzófeszültség - értékek. Tapasztalatom szerint az analitikus közelítések eredménye jó közelítéssel azonos, azonban a végeselemes szimuláció nagy eltéréseket mutat, amelynek oka a rosszul működő követő terhelés, valamint az iteratív megoldó szoftver. Végül ezen eredmények felhasználásával meghatároztam az eszköz érzékenységét a terhelés α szögére, erőegységre fajlagosítva.

α	S_f (EBGK)	S_f (VEM)
90°	0	0
72°	0.05274	0.3034
54°	0.1974	0.5384
36°	0.4183	0.5681
18°	0.6947	0.7724

1. táblázat. Maximális érzékenység értékek

4. Konklúzió

2. ábra. A pontos mechanikai modell sematikus ábrája

The Treatment of the second se

A kapott eredmények alapján kijelenthető, hogy a konzol érzékenyen reagál α értékének csökkenésére, továbbá megállapítható, hogy a terhelő erő nagysága és a konzol szögelfordulása között lineáris a kapcsolat. Fontos tapasztalat továbbá, hogy kis α szögben ható terhelés esetén a végeselemes modell leegyszerűsíthető globálisan állandó irányú erő alkalmazásával.

