Tengeri navigáció gyorsulásmérések alapján

BAKACS VIKTOR

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. Témavezető: Dr. Csernák Gábor, egyetemi docens, csernak@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozat célja annak vizsgálata, hogy hogyan tudnánk a mai modern módszerek segítségével navigálni csak a hullámokra támaszkodva a nyílt vízen, mint a mikronéziai őslakosok. Ahhoz, hogy elsajátítsuk ezeket a készségeket, sok évnyi tapasztalatra és tudásra lenne szükségünk, az őslakosok többsége az egész életét a navigálás mesterségének szentelte. A következő ábra (1. ábra) a feladat megoldása során használt koordináta rendszert mutatja be, melynek segítségével egy adott hajó útra meg lehet határozni a hajó hullám irányával bezárt szögét (μ) .



1. ábra. A hullám irányának a meghatározása

Alkalmazott módszerek $\mathbf{2}.$

A feladatot részben a *Maxsurf* program segítségével oldottam meg, mivel a megoldás során több geometriai és hidrosztatikai paraméterre volt szükségem, melyeknek számítása igencsak bonyolult.



A megoldás során két hullám típus jellegét kellett vizsgálnom: az ismertnek tekintett állandósult hullámét és az egy-egy pontból kiinduló körkörös hullámokét, amelyek a szigetekre voltak jellemzőek. Matlab segítségével a hullámképek és az azok által keltett hajólengések számíthatóak voltak. A hajót merev testnek feltételezve elegendő volt három szabadsági fokban számolni a kitéréseket: előre-hátra dőlés (bukdácsolás), jobbra-balra (billegés) és fel-le lineáris mozgás (jojózás). Ezután a szigetektől induló hullámokat hozzáadott gerjesztésként vettem a rendszerbe és megvizsgáltam egy adott hajó úton kialakuló lengéseket a szigetekkel és azok nélkül, kiértékeltem az eredmény közötti eltéréseket. Az eredményeket a következő fejezetben összefoglaltam.

3. Eredmények

Az eredményekből arra a következtetésre jutottam, hogy mindhárom mozgás vizsgálata szükséges, mivel az egyes szögirányokra a kitérések zérusok lesznek (ha a sziget felé néz a hajó akkor a billegés lesz zérus). A gyorsulásmérőket a hajótesten elhelyezve ezek a kitérések mérhetőek lesznek. Az alábbi táblázatban 5 másodperces felbontásban figyeltem meg a hajó és a hullám közötti szög változását (μ), a szigettől való távolságot (r), a gerjesztő körfrekvenciát (ω) és a különböző szabadsági fokokhoz tartozó szögeltéréseket.

t [s]	μ[°]	r [m]	ω [rad/s]	Δη_3 [m]	Δη_4 [°]	Δη_5 [°]
5	141.20	90.74	2.58	0.170	0.450	1.010
10	148.69	82.76	2.70	0.223	0.423	1.022
15	157.59	76.49	2.81	0.243	0.647	0.943
20	167.78	72.35	2.89	0.233	0.753	0.898
25	178.82	70.73	2.92	0.259	0.740	0.855
30	189.94	71.79	2.90	0.238	0.751	0.883
35	200.36	75.42	2.83	0.239	0.672	0.936
40	209.55	81.28	2.73	0.232	0.461	1.009
45	217.34	88.94	2.61	0.179	0.289	1.023
50	223.79	97.96	2.48	0.155	0.461	0.923

1. táblázat. Szögeltérések egy adott sziget elrendezésnél



2. ábra. Egy kő vízbedobása után kialakult hullámkép

4. Összefoglalás

Osszességében elmondható, hogy a navigálás habár elméletileg lehetséges gyorsulásmérők alkalmazásával, mivel ezek nagyon pontos műszerek, de csak kis távolságra a szigetektől érzékelhetünk elegendő eltéréseket a hajó lengéseinél. Ezentúl az irreguláris hullámok és viharok keltette hullámképek ezektől még bonyolultabbak, így a valóságban a jelenlegi módszerre nem lehet támaszkodni.



Marási folyamatok időbeli szimulációja

BALOGH LEVENTE

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető:* Dr. Hajdu Dávid, adjunktus, hajdu@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Mai napig a legpontosabb alkatrészgyártási eljárás az anyagleválasztással járó forgácsolás. Évről évre rengeteg fejlesztés és innováció valósul meg ezen a területen, amikkel pontosabbá és produktívabbá próbálják tenni a megmunkálógépeket. Azonban van egy terület amivel kevésbé foglalkoznak a tervezők és a gyártástechnológusok, az pedig a szerszámgéprezgés. Ez a rezgés rontja a megmunkált felület minőségét, valamint a szerszám élettartamát is csökkenti.

Dolgozatomban egy olyan szimulációs szoftver fejlesztésével foglalkozom, aminek segítségével könnyen lehet modellezni ezeket a rezgéseket és megfelelő következtetéseket vonhatunk le, a megmunkálás jellegéről.

2. forgácsolás folyamatának szimulálása

A marási megmunkálás lényege, hogy a szerszámél elmetszi a munkadarab felületét és egy új, forgácsolt felületet hoz létre. Ezt az elvet próbálta követi a program. Ahhoz, hogy ez lehetséges legyen, a munkadarab felületét fel kellett osztani diszkrét pontokra, továbbá az él pályáját is csak adott időpillanatokra számítani.



1 (1) C^{-1}

3. Eredmények



2. ábra. Szimulált stabilitási térkép ellenirányú marásra (radiális fogás 1 mm)



3. ábra. Szimulált lengés amplitúdók ellenirányú marásra (radiális fogás 1 mm)

A programmal meghatározhatóak az alap stabilitási térképek, vizsgálhatók a megmunkálások minden pontban, mind stabilitás, mind a rezgés jellegének és az amplitúdók nagyságának szempontjából.

4. Összefoglalás

Az eredmények alapján a program első verziója, sikeresen teljesítette a hozzá fűzött elvárásokat. A dinamikai modell diszkretizálása lehetővé tette a forgácsvastagság pontosabb meghatározását, aminek következtében a szimuláció alkalmassá vált, az instabil megmunkálások vizsgálatára.

1. ábra. Szimuláció elvi áttekintése

A szimulációval kapott eredmények összehasonlíthatóak a tanszéken elvégzett mérésekkel, illetve a szemidiszkretizációs módszerrel kapott stabilitási térképekkel.



Horgászcsomók mechanikai viszonyainak vizsgálata szakítóvizsgálatok, gyorskamerás mérések és numerikus szimulációk segítségével

CSENDE BÁLINT

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető*: Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A csomók rendkívül hasznosak a mindennapi életben, felhasználásuk nagyon széleskörű. A dolgozatban elsősorban a horgokra megkötött, leggyakoribb horgászcsomókat tanulmányoztam. A horgászok körében közismert tény, hogy a különböző kötések szignifikánsan gyengítik az alkalmazott zsineg teherviselő képeségét. Ez főként a csomózást követően létrejött görbületek feszültséggyűjtő hatásának, valamint a kontakt felületeken a súrlódásnak tulajdonítható. Nem egyértelmű, hogy a rengetek csomó közül melyiket érdemes választani, így többek között, ennek megsegítése céljából jött létre a dolgozat.



1. ábra. A vizsgált horgászcsomók

2. Alkalmazott módszerek

A károsodási folyamat komplex, analitikus vizsgálata nehéz, így empirikusan közelítettem meg a problémát. A damil vastagság hatásának vizsgálata érdekében három eltérő átmérőjű zsineget alkalmaztam. A mechanikai tulajdonságok meghatározása szakítóvizsgálatokkal történt. Gyorskamerás mérések segítségével az egyes csomók meghúzási folyamatát, valamint a szakadás jelenségét is nyomon követtem. Végül, végeselemes analízist készítettem az egyszerű csomó esetén a feszültségkoncentráció meghatározására.



3. Eredmények

A 240 db szakító mérést elvégezve, az átlag értkékek alapján, körvonalazódott a csomók közti sorrend teherbíró képesség szerint.



3. ábra. Terhelhetőség a névleges értékhez képest

A felvételek alapján szembetűnő volt a damil tekintélyes mértékű alakváltozása, a legtöbb esetben szinte felismerhetetlen módon deformálódott a keresztmetszet. A szakadás kiindulási régióit is sikerült közelítőleg beazonosítani.



4. ábra. A palomar csomó szakadása



5. ábra. A HMH-féle egyenértékű feszültség az egyszerű

2. ábra. A mérőberendezés

csomó környezetében

4. Összefoglalás

Úgy gondolom, hogy a munkám jó alapja lehet egy jövőbeni kutatásnak és közelebb kerülhetünk a csomók károsodásának pontos megértéséhez.



Characterization of piezoelectric MEMS cantilever

ÁDÁM DACHER

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Szabolcs Berezvai, Assistant professor, berezvai@mm.bme.hu

Introduction 1

The main goal of this thesis is to help and improve the design of a frequency selective acoustic MEMS (Micro Electromechanical Systems) sensor, depicted on figure 1. The frequencies covered by the cantilever system should correspond to the human speaking range. Additionally, the load resistance are to be optimized for each cantilever in an attempt to achieve better performance, so the need for an external power source can be eliminated.



Figure 1: The analyzed device attached to the printed circuit board

Research $\mathbf{2}$

The geometries of the cantilevers were designed intentionally to cover specific frequencies, the difference between them being their length. The respective natural frequencies were acquired using three different methods, presented on figure 2 by a formula, by a measurement utilizing a vibrometer, and by FEM (Finite Element Method) simulation.





Next, the damping (isotropic loss factor) was adjusted in the FEM simulation. This was achieved by sweeping the damping values, and evaluating the accuracy of the displacement amplitude of the vibration relating to the measurement.

Lastly, the load resistances (for 3 cantilevers) were optimized for maximum output power by performing a sweep of resistance values in the simulation, and by carrying out measurements with different load resistances.

Results 3

The formula proved to be useful for roughly predicting the range of natural frequencies in a very fast and reliable way, even more so with a bit of additional manipulation of the cantilevers lengths, as presented in table 1. The simulations performed can be considered successful, but there is still room for improvement.

Table 1: Evaluation of natural frequencies in [Hz]

Length $[\mu m]$	Formula	Formula 80%	Measured	Simulated
2400	2923	4086	3865	4223.5
1900	4665	6520	6009	6669.5
1700	5827	8144	7400	8270.1

The determined optimal load resistance values are close to each other in the two cases, but the respective output powers seem to differ largely. The results for a singular cantilever depicted in figure 3 have the simulations output power values scaled up 10x.



Figure 2: Methods of determining the natural frequencies: vibrometer measurement (left), formula (top right) and the meshed geometry used in the FEM simulation (bottom right)

Figure 3: Output power comparison of a singular cantilever (x axis log scale)



Finite-strain constitutive modelling of polymer foams including the Mullins-effect

BÁLINT DOBROVICS

Mechanical Engineering MSc, Applied Mechanics Specialization, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Szabolcs Berezvai, assistant professor, berezvai@mm.bme.hu

1 Introduction

The Mullins-effect describes the behaviour of polymer foams, where the material exhibits stress softening, when subjected to cyclic loading conditions. The energyabsorbing capability of the foam is reduced, as well, which effect is potentially significant in vehicle bumper applications. The characteristic Mullins-behaviour is depicted in Figure 1.



Figure 1: Typical behaviour of polymer foam subjected to cyclic compressive load. a) Idealized behaviour, b) Realistic behaviour

2 Applied methods

Hyperelastic material models can describe deformations, where the infinitesimal strain approach does not hold. The stresses of a hyperelastic material are dependent on the strain-energy function, which in ABAQUS's Hyperfoam material model is given as

$$\tilde{U} = \sum_{i=1}^{N} \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} \left(\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3 + \frac{1}{\beta_i} \left((J)^{-\alpha_i \beta_i} - 1 \right) \right),$$

where α_i, β_i and μ_i are the hyperelastic parameters, $\lambda_{1,2,3}$ are the principal stretches, J is the volume ratio and N is the order of the strain-energy function. The elements of the first Piola-Kirchhoff (or engineering) stress tensor in the principal directions are calculated as

$$ilde{P}_k = rac{\partial ilde{U}}{\partial \lambda_k}, \quad ext{ where } \quad k=1,2,3.$$

To model the Mullins-effect, the Ogden-Roxburgh material model employed by ABAQUS was used. The model uses a damage parameter (η) to penalize the strain-energy function and consequently the stress, which becomes

of the strain-energy function and r, m and β are the Mullinsparameters. From the definition of the η parameter, it follows that $\mathbf{P} = \tilde{\mathbf{P}}$ if $\tilde{U} = U^m$.

The material model assumes an idealized behaviour, where the unload and reload response of the polymer foam follows the same stress-stretch curve (see Figure 1/a). The realistic behaviour is, however, characterized by a hysteretic stressstretch loop (see Figure 1/b). Therefore, after conducting uniaxial and biaxial measurements with different load profiles, the measured loops were averaged and these averaged curves were used for parameter fitting.

The parameter fitting took place in two steps. First, hyperelastic material parameters were fitted to the primary upload curve. As a next step, Mullins-parameters were optimized to the averaged stress-stretch loops. The effect of taking only one, or multiple stress-stretch loops for the parameter optimization was investigated.

3 Results

The measurement results and the fitted curves are shown for a uniaxial and a biaxial measurement in Figure 2.



Figure 2: Fitting hyperelastic and Mullins-parameters to measurement data. a) Uniaxial measurement, b) Biaxial measurement

To validate the fitted parameters, punch tests were conducted and the measured force was compared with the results of a finite element simulation. The measurement and simulation results were comparable when using material pa-

$$\mathbf{P}(\eta, \lambda_k) = \eta \tilde{\mathbf{P}}(\lambda_k), \quad \text{where} \quad \eta = 1 - \frac{1}{r} \operatorname{erf}\left(\frac{U^m - \tilde{U}}{m + \beta U^m}\right),$$

where $\tilde{\mathbf{P}}$ represents the value of the first Piola-Kirchhoff stress tensor in the primary upload stage (see Figure 1) and \mathbf{P} represents the penalized value. U^m is the maximal value rameters fitted to uniaxial measurements.

4 Summary

The modelling of the Mullins-effect was investigated for uniaxial and biaxial measurements using the Ogden-Roxburgh material model. Mullins-parameter fitting methods were investigated for different load profiles and the fitted material parameters were validated by comparing the results of a punch measurement to a two-dimensional finite element model.



Kálmán-szűrők alkalmazása járművek oldalirányú pozíciószabályozására

FAZEKAS LAJOS MÁTÉ

Gépészmérnöki MSc Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2021/2022/I. *Konzulens:* Vörös Illés, doktorandusz, illes.voros@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A XXI. század egyik legjelentősebb járműipari kihívása az önvezető járművek és a vezetést támogató rendszerek fejlesztése. A dolgozat keretében egy jármű oldalirányú pozíciószabályozását valósítottam meg, figyelembe véve a mechanikai modellek bizonytalanságát és a szenzorok mérési zaját. A pontosabb szabályozás érdekében Kálmán-szűrő algoritmusokat alkalmaztam. A jármű mozgását numerikus szimulációk segítségével, valamint futópados mérési berendezésen végzett kísérletekkel vizsgáltam.

2. Alkalmazott módszerek

A jármű haladásának leírására a járműdinamikában széleskörűen alkalmazott biciklimodellt használtam a kormányrendszer dinamikáját is számításba véve.



1. ábra. Mechanikai modell.

A mozgásegyenletek felírását az Appell-Gibbs módszerrel valósítottam meg. A gumiabroncsoknál ébredő laterális kerékerők, önbeálló nyomatékok és az oldalkúszás közötti nemlineáris kapcsolatot is modelleztem. Három különböző állapotbecslő algoritmust használtam és hasonlítottam össze a szimulációk és a kísérletek során: a hagyományos, az extended és az úgynevezett unscented Kálmán-szűrőt. Az oldalirányú pozíciószabályozást sávváltás és sávtartás keretében elemeztem a szimulációk és a kísérletek során. Az egyes futtatások jelentősen eltéretnek egymástól a véletlenszerű hatások miatt. Ennek kiküszöbölése érdekében érdemes több futtatás eredményét összességében vizsgálni, amire a Monte-Carlo szimuláció egy megfelelő módszer. A kísérleteket egy 1:10 méretarányú modell járművel végeztem el, mely a futópad keretéhez volt rögzítve egy öt szabadsági fokú felfüggesztéssel, azaz a járműhöz képest mozgott a futószalag.



2. ábra. Kísérleti összeállítás.

3. Eredmények

Mindhárom Kálmán-szűrő javított a sávváltás és a sávtartás minőségén, valamint a Monte-Carlo szimulációk alapján elmondható, hogy csökkentették a pályák szórását.



3. ábra. Egy szimuláció és Monte-Carlo módszer szűrőalgoritmus nélkül és unscented Kálmán-szűrővel.

4. Összefoglalás

A Kálmán-szűrő algoritmusok alkalmazása megkönnyíti a zajjal terhelt folyamatok szabályozását. A teljesítményük nagyban függ a futtatási körülményektől. Ennélfogva figyelembe kell venni az optimális választás érdekében az adott probléma jellemzőit, valamint a rendelkezésre álló számítási időt is. Érdemes lehet a későbbiekben a szimulációkat és a kísérleteket más pályák és eltérő manőverek esetén is elvégezni.



Utánfutók rezgéseinek elméleti és kísérleti vizsgálata

Fehér Ádám Bálint

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető:* Horváth Hanna Zsófia, doktorandusz, hanna.horvath@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az utánfutók a közlekedési ipar széles körben használt termékei. Ezek vontatása során kialakulhatnak olyan rezgések is, amelyek az utánfutó stabilitásvesztését okozhatják. Hatásukra a vontatmány kígyózó-pattogó mozgásba kezd. Szakdolgozatomban ezeket a rezgéseket vizsgáltam elméleti és kísérleti úton. A vontatmányt egy 4 szabadsági fokú térbeli mechanikai modell segítségével modelleztem. A stabilitás szempontjából kritikus paraméterek hatását állapítottam meg. Stabilitástérképeket készítettem ezeknek a paramétereknek a tanulmányozásával.

A Tanszéken található mérési berendezést felhasználva méréseket végeztem. A mérés során az utánfutó mozgását OptiTrack rendszer segítségével rögzítettem. A mérési eredményeket összehasonlítottam az elméleti modell megoldásaival. Ehhez numerikus szimulációt is készítettem.



1. ábra. A vontatmány mechanikai modellje

2. Alkalmazott módszerek

Az utánfutó rezgéseinek vizsgálatához a vontatmány egyenes vonalú egyenletes mozgása körül linearizált mozgásegyenletet használtam fel. Az együttható mátrixokban szerepelnek a rendszer tehetetlenségi nyomatékai, geometriai paraméterei, merevségei és csillapításai, továbbá a talajkerék kapcsolatot leíró Magic Formula konstansai. A stabilitástérképeket a *Multidimensional Bisection Method* felhasználásával állítottam elő. Ez a módszer a mozgásegyenlet karakterisztikus polinomjának ismeretében képes a stabil tartományok meghatározására a vontatási sebesség és a vizsgált paraméter függvényében. A mozgásegyenlet Cauchy átírása után negyedrendű Runge-Kutta módszert alkalmaztam a numerikus szimuláció elvégzéséhez.

3. Eredmények

A kimért lineáris stabilitásvesztési tartományok összehasonlítása a mechanikai modell által leírt stabilitástérképpel a (2) ábrán látható. S jelöli a stabil, I pedig az instabil tartományt.



2. ábra. Stabilitástérkép e_2 paraméter hatását vizsgálva

A numerikus szimuláció eredményeit is összehasonlítottam a kísérleti modell mozgásaival.



3. ábra. A numerikus szimuláció és a mérés összehasonlítása lecsillapodó esetben $v=1\left[\frac{\rm m}{\rm s}\right]$ vontatási sebesség esetén

4. Összefoglalás

Sikerült az elmélet által alkotott eredményeket mérések segítségével igazolni. Néhány esetben azonban az elmélet és a kísérlet nem egyezik egymással. Több, a mérést befolyásoló tényező és nemlineáris hatás nem került modellezésre. Ezek viszont a mérés kimenetelére hatással voltak. Ezen hatások vizsgálata jó kiindulási alapot nyújt a jövőbeli modellek megalkotásához.



Háromtengelyű modális kalapács tervezése

FATÉR ZOLTÁN

Gépészmérnöki MSc Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető:* Dr. Bachrathy Dániel Sándor, egyetemi docens, bachrathy@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A szerkezeti rezgések tapasztalati vizsgálata mindig különös figyelmet kapott annak érdekében, hogy megértsük és szabályozni tudjuk gépészeti szerkezeteink rezgését. A rezgések vizsgálatának egyik legelterjedtebb módja az impulzusgerjesztésen alapuló modális analízis. Az impulzusgerjesztés kivitelezéséhez iparban is használt modális kalapácsok csak egy tengely mentén mérik a gyorsulást és/vagy az erőt. Így nem tudják figyelembe venni azt, ha az impulzusgerjesztés tengelye nem esik egybe a felületi normálissal. Ha az ütés és ezzel együtt a gerjesztés iránya és a felületi normális nem egyezik meg, akkor a kalapács által mért erőjel nem fog megegyezni a gerjesztés valós értékével és irányával. Ezért célom egy olyan modális kalapács tervezése és kivitelezése, amellyel az emberi hiba - ferde ütés, megcsúszás a felületen - felismerhető, kompenzálható.

2. Hiba meghatározása

Először az impulzusgerjesztés során elkövetett pozíció- és irányhibák mértékét határoztam meg különböző görbületi sugarú felületeken. Az ütési irány és pozíció meghatározásához a munkadarabokat egy erő- és nyomatékmérő platformra erősítettem fel. A mért erő- és nyomaték értékekből a testre ható erőrendszer centrális egyenese meghatározható. A centrális egyenes és tárgy felületének ismeretében az találati hely és az ütési irány meghatározható volt.



Számos mérést végeztem különböző formájú felületeken, amikre meghatároztam a pozíció és irányhibát. Ezek alapján kijelenthető, hogy a görbületi sugár csökkenésével az irányhibák és azok szórásai növekednek, a pozícióhibát viszont a felületek formája érdemben nem befolyásolta.

3. Hibás ütés detektálása

Terveztem és építettem egy háromtengelyes modális kalapácsot, ami sajnos a szenzor hiánya miatt jelenleg nem használható. Ezért a Tanszéken meglévő modális kalapácsot egészítettem ki gyorsulásmérőkkel, annak érdekében, hogy az ütközés során ébredő keresztirányú erőket meg tudjam határozni. Ezt kétdimenziós esetbe redukálva tudtam megtenni, a kalapács mozgásállapotának és tehetetlenségi adatainak ismeretében, a dinamika alaptételének felhasználásával.



2. ábra. Mért és gyorsulásból számolt keresztirányú erőértékek összehasonlítása, narancssárgával a hiba mértéke ábrázolva..

4. Összefoglalás

Összességében elmondható, hogy sikeresen meghatároztam az impulzusgerjesztés során jelentkező hibák mértékét. Terveztem illetve építettem egy háromtengelyű modális kalapácsot, majd erőmérőszenzor hiányában gyorsulásmérők segítségével határoztam meg a gerjesztés során ébredő keresztirányú erőket. Illetve beláttam, hogy pontos hibameghatározás a gyorsulásmérőkkel nem lehetséges.

1. ábra. Gömb felület mérése esetén a mérési elrendezés. Feltüntetve az ütési irányok és a találati helyek.



Paraméterillesztő szoftver készítése az általánosított Maxwell-féle viszkoelasztikus anyagmodellhez Python környezetben

GÁCSI LÁSZLÓ

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető:* Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A szilárdsági szimulációkhoz elengedhetetlen az anyagok tulajdonságainak pontos ismerete, amelyekre elsősorban a különféle mérések eredményei alapján következtetünk – nemlineáris esetben jellemzően paraméterillesztéssel. Ehhez szükséges egy anyagmodell egzakt definiálása, másnéven egy konstitutív egyenlet, amely kapcsolatot teremt a nyúlás és az annak hatására ébredő feszültség között. Erre a legtöbb viszkoelasztikus anyag esetében tökéletes választás az általánosított Maxwell-modell, hiszen ennek a modellnek a relaxációs modulusza éppen a Prony-sor.

1. ábra. Az általánosított Maxwell-modell

$$E(t) = E_{\infty} + \sum_{i=i}^{n} E_i \cdot e^{-\frac{t}{\tau_i}},$$
 (1)

A paraméterillesztés folyamata elképzelhető a mért és az illesztett feszültségértékek közötti különbségek összegének minimalizálásaként. Számos, erre a problémára megoldást nyújtó optimalizáló algoritmus érhető el a Python-on belül.

Az illesztés pontosságának növelése érdekében az általánosított Maxwell-modellben minél több sorosan kapcsolt, rugóból és dashpotból álló, úgynevezett Maxwell-testet kell felhasználni. Ez ugyanakkor a megoldó algoritmus számára még bonyolultabb optimalizációs problémához vezet, tehát még nagyobb számítási kapacitást és hosszabb lefutási időt tesz szükségessé az illesztés során.

2. ábra. A paraméterillesztő szoftver felülete

3. Eredmények

A szoftver működőképességét a tanszéki laboratóriumban végzett relaxációs mérések adatsorain teszteltem. Mielőtt azonban megtörtént volna a konkrét mérési adatsorok kiértékelése, a szoftverben található beállítások tesztelésére került sor, mégpedig azzal a céllal, hogy az optimalizáció minél rövidebb idő alatt és a lehető legnagyobb pontossággal fusson le.

3. ábra. A mért adatok és az illesztett görbe lineáris és logaritmikus skálán

Paraméterillesztő szoftver

A dolgozat keretén belül készült egy Python nyelven írott szoftver, amely segíti a paraméterillesztés folyamatának felgyorsítását és az átláthatóság növelését. Ehhez pedig szükség volt egy olyan felhasználói felület (GUI) elkészítésére, amelyen a felhasználó képes különböző beállításokat elvégezni egészen az adatsor beolvasásától a megoldások meghatározásáig: az adatsor szűrését, a kezdeti értékek és a megoldó algoritmus kiválasztását, stb.

4. Összefoglalás

A megfelelő szűrési beállítások, illetve a megoldó algoritmus mellett sikeres illesztéseket hajtottam végre a szoftverben, ahogyan az a 3. ábrán is látható. Összességében elmondható, hogy az optimalizáció során kompromisszumot kell kötni, hiszen az algoritmusok, ha túl sok dimenziós problémába ütköznek, megbízhatatlanul működnek.

Gördülő egyensúlyozó deszka dinamikájának vizsgálata

GALAMBOS DOMINIK

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/20122/I. Témavezető: Molnár Csenge Andrea, doktorandusz, csenge.molnar@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az emberi egyensúlyozás témakörében végzett irodalomkutatás után egy kajakos csapat szárazföldi edzéséi során végzett gyakorlatot vizsgáltam. Az említett gyakorlat során egy gördülő egyensúlyozó deszkát alkalmaznak a vízen végzett edzés szimulációjának céljából. A szakdolgozatomban az egyensúlyi helyzet stabilizálhatóságát vizsgáltam a kritikus időkésésen keresztül. A célom az volt, hogy kiderítsem hogyan befolyásolja a kritikus időkésést a modell kitüntetett paramétereinek változása, és ezáltal következtetéseket vonjak le arról, hogy adott testtömegű és magasságú ember számára milyen deszka geometria mellett lesz nehezebb, vagy könnyebb a gyakorlat elvégzése.

1. ábra. A vizsgált egyensúlyozó deszka egy lehetséges kialakítása

A javaslatok értelmében a deszka kialakítása módosítható a gyakorlat nehézségének növelése, vagy csökkentése érdekében.

Alkalmazott módszerek $\mathbf{2}.$

2. ábra. A vizsgált mechanikai modell ábrája

3. Eredmények

Meghatároztam a deszka hosszának, a gördülő elem külső és belső sugarának, az egyensúlyozó ember magasságának és tömegének, illetve testmagasságából és testtömegéből számított BMI értékének függvényében a kritikus időkésés változását, amit diagramokon ábrázoltam. A diagramok elemzésével következtetéseket vontam le, és javaslatokat tettem olyan egyensúlyozó deszka kialakításokra, melyek esetében könnyebb, vagy nehezebb a gyakorlat elvégzése.

3. ábra. A kritikus időkésés a BMI függvényében, adott testmagasságok esetén

A modellben szereplő emberi test súlypontját és deszka feletti magasságát meghatároztam, majd a mechanikai modell megalkotása után levezettem a linearizált mátrixegyütthatós mozgásegyenletet. A mozgásegyenlet megfelelő átalakításai után meghatároztam a karakterisztikus egyenletet, ami egy kvázi-polinomként írható fel. A domináns gyök multiplicitásának hangolásán alapuló módszer segítségével vizsgáltam az időkésés változását kitüntetett paramétertartományokon.

4. Összefoglalás

A szakdolgozatomban sikerült javaslatokat tenni olyan egyensúlyozó deszka kialakítására, mely hosszának, és gördülő elemének külső és belső sugarának függvényében a kajakos csapat edzésében szereplő gyakorlat nehézsége igény szerint módosítható.

Numerical modelling of an enclosed fluid layer between a glass plate and an elastic membrane

Dominik Gönye

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Bálint Magyar, assistant professor, magyar@mm.bme.hu

1 Introduction

The aim of my thesis was to develop a numerical model of an enclosed fluid layer between a glass plate and an elastic membrane.

Figure 1: The fluid propagation between the elastic membrane and rigid plate

2 Applied methods

Firstly the modelling approaches of the problem were drawn up, which made possible to model the propagation of enclosed fluid layer between a glass plate and an elastic membrane in finite element environment as a structural contact problem. The 2D and 2D axisymmetric numerical models were prepared and theirs solution scripts were created in ANSYS parametric design language. Additionally, the analytical solution of the problem by using a beam model was investigated as well. In order to the results of the 2D axisymmetric numerical model could be compared to experimental results a measurement setup was designed and built. The propagation of the fluid blister was investigated experimentally in case of small and large prestress as well. Finally the developed numerical model was validated experimentally.

Figure 2: The injected fluid volume in function of the fluid blister base area in case of the first prestress

The experimental validation of the numerical model showed that the fluid propagation is very sensitive for a few parameters. The initial pressure sensitivity of the model is presented in Figure 3. The prescribed volume could be achieved many ways depending on the extent of the fluid.

Figure 3: The results of the initial pressure sensitivity analysis

4

Summary

3 Results

Similar tendencies could be observed for both investigated prestresses, thus in this poster only the results of the small preload are represented. The required fluid volumes were achieved properly by the created Ansys APDL solution scripts in case of every numerical simulations. The measurement results is presented in Figure 2 where the base areas of the fluid extension were plotted in function of the injected fluid volume. Based on these results it could be concluded, that the present model needs further development, because the propagation of the viscous fluid beneath an elastic membrane is not modelled properly. The created measurement setup allows to investigate further the viscous spreading of fluid beneath an elastic sheet experimentally, thus the main approaches of my numerical model could be verified by additional measurements.

Az adjoint módszer alkalmazása rúdszerkezetek optimalizálására

Horváth Ádám

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető:* Bodor Bálint, doktorandusz, bodor@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A mérnöki tervezési munkában egy igen fontos feladat az optimalizáció. Egyazon célra sokféle megoldás, konstrukció valósítható meg, azonban hosszú távon érdemes ezek közül azt választani, ami az alkalmazástól függő szempontokat figyelembe véve a lehető legjobb.

Dolgozatomban síkbeli rúdszerkezetek optimalizációs problémájával foglalkoztam. Célom volt egy hatékony optimalizációs eljárás megalkotása, melyhez a szakirodalomban már részletesen feltérképezett adjoint módszert alkalmaztam. Számos algoritmust megvizsgáltam, néhány példán pedig összehasonlítottam a kapott eredményeket.

2. Alkalmazott módszerek

A rúdszerkezetek mechanikai viselkedését végeselemes módszerrel vizsgáltam. Figyelembe vettem mind a normál-, mind a hajlító igénybevételeket, hiszen ezen igénybevételek tekinthetőek karcsú szerkezetek tervezése során mérvadónak. A geometriai csomópontok síkbeli helyzetét, valamint a keresztmetszeti méreteket tekintettem tervezési paramétereknek. A konstrukciók értékelésére megalkottam egy költségfüggvényt, ami a feszültségi állapot és az össztérfogat alapján jellemzi a szerkezetet. Ezen költségfüggvény minimumát kerestem, mint optimális pontot, gradiens módszerek segítségével. Mind első-, mind másodrendű gradiens módszereket megvizsgáltam. E módszerek minden iterációban megkövetelik a deriváltak kiszámítását, aminek módja a számítási igény szempontjából igen fontos. A deriváltak kiszámítása történhet legegyszerűbben numerikusan, ez igen számításigényes lehet a paraméterek számának növelésével. Eme problémára nyújt megoldást az adjoint-módszer.

1. ábra. Felül a kiindulási, alul az optimális szerkezet. Az össztömegek rendre 818.0 kg és 810.5 kg.

2. ábra. Az egyes algoritmusok számítási idői.

A 2. ábrán az egyes algoritmusok számítási idejei láthatóak. A GD, HB algoritmusok elsőrendű módszerek, a GD-NR és HB-NR algoritmusok kombinált első-másodrendű módszerek. Látható, hogy az adjoint módszer alkalmazása minden esetben drasztikusan csökkentette a számítási időt.

3. Eredmények

A következő ábrákon egy alkalmazási példa látható. A kiindulási szerkezetben a maximális feszültség jóval meghaladta az előírt, 500 MPa értékű referencia feszültséget. Az optimalizációval sikerült egy olyan konstrukciót találni, ahol a maximális feszültség már a referencia érték alá esik, mindemellett, az össztömeg is csökkent minimálisan.

4. Összefoglalás

A dolgozatban implementáltam az adjoint módszert síkbeli rúdszerkezetek optimalizációs problémájára, amelynek segítségével hatékony optimalizációs eljárások kerültek kidolgozásra.

Szöveti kontaktus optimalizálása robot-asszisztált rádiófrekvenciás ablációnál

INCZEFFY PÁLMA EMESE

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető*: Zana Roland Reginald, doktorandusz, zana_r@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Jelen dolgozat célja a rádiófrekvenciás katéterablációt vizsgáló, robot asszisztált mérések alatt fellépő mechanikai problémák vizsgálata. Több katéterablációs technika vizsgálatát végeztem, külön kitérve a rádiófrekvenciás ablációra. Az utóbbi történhet pontról-pontra haladva, illetve vonal készítésével, melyet én vizsgáltam. Kísérlet közben az elektróda akadozó mozgása a szív szálas szerkezetéből adódóan, vagy a pontatlan kontakterő problémát okozott. Jelen dolgozatban ezekre a mechanikai problémákra kerestem megoldást, illetve egy tórusz geometriával rendelkező 3D nyomtatható tapintó-

fejet terveztem az akadozás megszüntetése érdekében.

1. ábra. Az elektróda elakadásának bemutatása

2. Alkalmazott módszerek

A funkcióanalízist analitikus és végeselem módszerrel készítettem. Bemutatásra került két hiperelasztikus modell, a Mooney-Rivlin és Odgen anyagmodell. A végeselem szimulációkat Ansys Static Structuralban készítettem, anyagválasztásnál Mooney-Rivlin modellt alkalmaztam. Elsőként a végeselem modell pontosságát vizsgáltam az elektróda benyomódását figyelve, az Ansys és analitikus eredmények összehasonlításával.

A végeselem szimuláció ellenőrzését követően megterveztem a tapintófej koncepciós kialakítását, majd 3D nyomtatással elkészültek a prototípusok.

2. ábra. (Balról jobbra) tervezett tapintófej CAD modellje, FDM 3D nyomtatott tapintófej, SLA 3D nyomtatott tapintófej, SLA 3D nyomtatott nagyobb tóruszú tapintófej

3. Eredmények

Ezt követően a tapintófej funkcióanalízise történt. Megvizsgáltam a bizonyos benyomódási értékekhez szükséges kontakterő változását a geometria módosulásával, illetve az elakadás problémáját.

1. táblázat. Ansys és Matlab eredmények összehasonlítása

Összefoglalás

Az Ansys szimuláció hitelességét a Matlab-ban számolt értékek igazolják, ám utóbbi esetében a nagy benyomódás pontatlanságot okoz, az eltérés ebből származtatható. A végeselem szimuláció által számos hasznos információ, például a megváltozott geometria miatt módosult kontakterő érték is megállapíthatóvá vált, amelyre szükség van a tapintófejjel végzett kísérletek során.

Összecsukható esernyők mechanikája

JÁRÓ NORBERT

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2017/2018/I. *Témavezető*: Dr. Gyebrószki Gergely, tudományos segédmunkatárs, gyebro@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A mindennapi életben sokszor találkozunk azzal a problémával, hogy az esernyő nem bírja az időjárás okozta igénybevételeket, így akár évente többször is új esernyőt kell vásárolni.

A dolgozatomban a klasszikus összecsukható esernyő mechanikai modelljének megalkotása volt a cél, amely segítségével megvizsgálható az esernyő bordájában ébredő erők és feszültségek. Emellett az esernyő gyakori tönkremeneteleinek megvizsgálása az iparban népszerű (D)FMEA módszerrel.

2. Alkalmazott módszerek

A klasszikus összecsukható esernyő bordáinak deformációját különböző módszerekkel is megvizsgáltam. Két különféle modellt alkottam, melyből az elsőt a két analitikus számolásaimnál, a másodikat pedig a végeselem szimulációnál használtam fel. Minden számolás esetén meghatároztam egy deformált alakot. Az analitikus módszerek, amelyeket használtam az egyszerűsített rugalmas szál differenciálegyenlete, illetve a rugalmas szál differenciálegyenlete, melyeket Wolfram Mathematica szoftverrel oldottam meg. A végeselemes szimulációt pedig Ansys szoftveres környezetben végeztem el. A deformált alakokat egy diagrammon ábrázoltam.

1. ábra - Borda deformált alakja különböző módszerekkel

A végeselem modellezés segítségével meghatározott alak felelt meg a legjobban az elvárásoknak, illetve a szimulációs szoftver segítségével alaposabban megvizsgálható a bordában ébredő feszültségek, így azzal folytattam a számolásaimat.

Meghatároztam a bordára ható normál és nyíró erőt, emellett a hajlítónyomatékot is. Ezek felhasználásával ábrázoltam a borda hossza mentén a szerkezetben ébredő normál, nyíró és a hajlítónyomaték okozta igénybevételeket.

3. Eredmények

A testre ható erők segítségével meghatároztam a bordákban ébredő összesített igénybevételt. A LineBody modellezés miatt ez az az igénybevétel csak a normál irányú és a hajlítónyomatéki igénybevétel összegeként kapható meg, így a nyírás okozta igénybevételt nem veszi figyelembe.

2. ábra - Borda szélső száraiban ébredő összesített igénybevétel

A feszültségeken kívül meghatároztam a csuklókban ébredő erőt a nyitási folyamat alatt, amellyel meghatároztam a nyitáshoz szükséges erőt.

A (D)FMEA elemzéssel 11 gyakori tönkremenetelt határoztam meg, melyekhez mind kiszámoltam egy kockázati számot. A két legkockázatosabb tönkremenetelnek így az esernyő kifordulását, illetve a borda-ponyva fix kapcsolatának megszűnését találtam. Ezeket a tönkremeneteli módokat részletesen megvizsgáltam és mindkettőhöz meghatároztam vizsgálati módszereket és lehetséges javítási módokat.

Az esernyő lehetséges tönkremeneteleinek megvizsgálásához az iparban elterjedt (D)FMEA módszert használtam. A módszernél minden tönkremenetelhez meg kell adni az előfordulási valószínűséget, a jelentőségét és az észlelés biztonságát. Ezek felhasználásával kiszámítható egy kockázati szám, így meghatározhatóak a legkockázatosabb tönkremenetelek.

4. Összefoglalás

Az esernyő bordáinak nagy deformációja miatt egyszerűbb a végeselem modellezést alkalmazni, mert pontosabb megoldást nyújtott. A kritikus keresztmetszet a borda és a feszítő találkozásánál van a számításaim alapján. A (D)FMEA elemzésből kapott kockázatok pedig a jövőben javíthatóak.

Interpolation of Measured Mode Shapes

KIS LEVENTE

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Bachrathy Dániel Sándor, associate professor, bachrathy@mm.bme.hu

1 Introduction

The main goal of this thesis is about the development of interpolation methods, which can be used in experimental modal analysis to determine the displacement field in all points of the measured workpiece, in the case of the measured mode shapes. Since we can determine the exact displacements only in the measurement points, we can only visualize these measured mode shapes on a modal mesh, however, in most cases, this visualization is not satisfactory (see Fig. 1). With the help of interpolation methods, the displacement field can be projected onto a CAD model or a FEM mesh of the measured workpiece, providing a better 3D representation of the measured mode shapes.

Figure 1: A typical mode shape of a T-junction visualized on modal mesh

2 Applied methods

Two different interpolation method were examined during

3 Results

Figure 2: Top: Interpolation with Barycentric method; Bottom: Interpolation with structural distance based method

4 Summary

On Fig. 2 the results of the interpolation methods can be seen, this is the same mode shape that was presented on Fig. 1.

In conclusion, both interpolation methods provide a good overall interpolated mode shape in case of lower natural frequencies. While the Barycentric interpolation provides a better overall shape, it fails when it has to extrapolate, which results in discontinuities in the displacement field. With the structural distance based method the extrapolation problem can be eliminated, however it often produces a wavy shape on straight segments. It can be also noted that both methods cannot interpolate correctly if the measurement points are in harmonic modal nodes (when the measured displacements are approximately 0). While the methods are imperfect, they still can provide a better visual representation of the mode shapes than the modal mesh or wire frame representation.

the research. The Barycentric interpolation method, uses barycentric coordinate system, while the introduced structural distance based method uses graph theory. During the work, both interpolation methods were tested in different circumstances: in 2D and 3D measurement simulations and in a real 3D measurement too. These tests helped to explore the benefits and the drawbacks of the methods, and laid out the direction of the future research about this topic.

Further research needed to be done regarding the parameters of the structural distance based method, as well as on the extrapolation problem of the Barycentric method.

Validációs eljárás fejlesztése nyomtatott áramkörök termikus VEM szimulációjához

KOCZIHA BARNABÁS

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. Témavezető: Dr. Berezvai Szabolcs, adjunktus, berezvai@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A szakdolgozat célja egy szimulációs munkafolyamatba beilleszthető validációs eljárás megalkotása volt, amivel Ansys programban végzett termikus szimuláció eredményét hőkamerás méréssel lehet összehasonlítani. Ehhez egymással összeegyeztethető eredményekre van szükség, tehát azokat a hőmérsékletadatokat kell kinyerni a szimulációs eredményből, amit a hőkamera lát. Ezt a végeselem programban grafikusan megjelenített színtérkép eredmény képfeldolgozásával valósítottam meg.

Alkalmazott módszerek 2.

Az eljárás alapja, hogy a kimentett szürkeárnyalatos képen RGB színkód alapján a saját kezűleg írt összehasonlító program visszaszámolja a hőmérsékletértékeket minden pixelre. Az Ansys-ból alapértelmezett beállítások mellett kimentett kép erre alkalmatlan. Ennek fő oka, hogy a végeselem szoftver még színátmenetes megjelenés mellett is sávosan ábrázolja az eredményt. A megoldás a sávok számának növelése volt, amivel a módszer pontossága nagy mértékben javult. Egy próba rúd modell mentén vizsgált, Path segítségével kiolvasott eredménnyel összehasonlítva a különbség elhanyagolható mértékűre csökkent.

A szimulációs képek kimentését Ansys Mechanical Scripttel automatizáltam, hogy az eljárás használatát tovább egyszerűsítsem. A hőkamerás mérés eredményeit FLIR ResearchIR programban dolgoztam fel, ami a kép mellett táblázatos formában is megadja a pixelek helyén lévő hőmérsékletet. A szimulációs eredményt tartalmazó képek feldolgozására és a hőmérsékletek összehasonlítására Python nyelven írt, grafikus kezelői felülettel ellátott programot készítettem. Az összehasonlítás előtt ebben a szoftverben egymásra kell illeszteni a szimulációs és hőkamerás képeket viszonyítási pontok kijelölésével, majd a szoftver a korábban említett módon a szimulációs képekből előállítja a táblázatos hőmérsékleteloszlást, végül pedig összehasonlítja a hőkamerás táblázatos eloszlással.

3. Eredmények

A szimuláció és mérés eredményei közötti eltérés ábrázolása a programban a 2. ábrán látható. Az egyes pixeleket a program az eltérés szerint színezi, ahol a szimuláció volt melegebb, meleg színekkel, ahol pedig hidegebb, hideg színekkel. A kép mellett a színskála jelmagyarázata látható. A szoftverben lehetőség van egy tolerancia sáv megadására, valamint egyedi színskálát is lehet definiálni hőmérséklet eltérésekhez rendelt RGB színkóddal.

2. ábra A különbség megjelenítése

1. ábra. A javított képfeldolgozó eljárás és Path segítségével szerzett megoldás

Az eljárást bemutattam egy egyszerű nyomtatott áramköri lap példáján keresztül. Ehhez elkészítettem a panel végeselemes modelljét és szimulációt futtattam, valamint hőkamerás mérést is végeztem rajta.

4. Összefoglalás

A szakdolgozatban sikerült egy szemléletes és könnyen használható validációs eljárást megalkotni, amivel szimuláció eredménye hőkamerás méréshez hasonlítható. A továbbiakban az eljárás alkalmazhatóságát fogom kiterjeszteni más szimulációs programokra, valamint a felhasználó kollégáim visszajelzései alapján tovább fogom azt fejleszteni és egyéb funkciókkal kiegészíteni.

Mechanikai érintkezés vizsgálata elektromos kontakt ellenállás alapján

KOVÁCS MÁRK

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. Témavezető: Dr. Csernák Gábor, egyetemi docens, csernak@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A gépészmérnöki gyakorlatban nagyon sokszor felmerül az a kérdés, hogy két alkatrész valamilyen módon történő összeillesztése után, hogyan, mennyire jól érintkeznek egymással. Ehhez kapcsolódóan a szakdolgozatomban felületek érintkezési mintázatának meghatározásához használható matematikai modell kidolgozásával foglalkoztam. Ennek alapja két test érintkező csúcsainál fellépő kontakt ellenállások nagyságának a meghatározása volt, elektromos feszültség mérések segítségével. Ezekből az ellenállásokból tudunk majd később következtetéseket levonni az érintkezés jóságára.

Alkalmazott módszerek 2.

A mérendő testekből egy diszkrét ellenálláshálózatból álló modellt lehet létre hozni úgy, hogy kisebb cellákra kell felosztani a testeket, és egy-egy ilyen cellát kell egy-egy csomópontként kezelni.

Ezek alapján végeselemes modellel meghatároztam a testek csomópontjai között lévő belső ellenállásokat kettő ugyanolyan anyagtulajdonágú, egységnyi oldalhosszú kockaként modellezve ezeket. Ezeken a testeken n darab csomópontot hoztam létre, amikből n/2 darab érintkezik a másik testtel (ezek a kontakt csomópontok), a többi nem-kontakt csomópontokon pedig árambevezetést tudtam előírni, illetve feszültségeket mértem. A két test különböző vezetőképességű elemekkel lettek összekapcsolva a kontakt csomópontjaik között.

Ezek után a VEM modellel kapott eredményeket illesztettem be a matematikai modellembe, ami a Kirchhoff-féle csomóponti és hurok törvények mátrixegyenletes formáin alapult.

3. ábra. Egy 4 csomópontos modell áramköri gráfja

Eredmények 3.

Az eredmények kiértékelése során a használt mátrixra nagy kondíciószám jött ki, illetve kevésbé pontos értékek.

1. táblázat. Egy 8 csomópontos modell eredményei				
Kontakt	Mért érték	Valós érték	Hiba	
sorszám	$[\Omega]$	$[\Omega]$	[%]	
1	0,5998	0,6	0,0349	
2	1,0002	1	0,0227	
3	0,4010	0,4	0,2405	
4	1,7985	1,8	0,0816	

A táblázatban látható eredményeket egy 3,6568 10⁵ kondíciószámú mátrix invertálásával kaptam meg.

A matematikai modellt ezek után úgy fejlesztettem tovább, hogy több mérési konfigurációt lehessen beilleszteni, így lehetővé téve későbbiekben ezek hatásainak a vizsgálatát a hibákra és a kondíciószámokra.

2. ábra. Egy nyolc csomópontos végeselem modell

Osszefoglalás

Szakdolgozatomban létrehoztam egy olyan matematikai modellt, amelyben feszültségmérési eredményekből lehet következtetni a kontakt ellenállások nagyságára. A továbbiakban ez alapján lehet majd vizsgálni az így létrehozott modell jóságát, több különböző mérési konfigurációk hatására, valamint az így kapott kontakt-ellenállásokból meghatározni az érintkezési felület mintázatát.

Rúdegyensúlyozás vizsgálata stabilometriai mérőszámokkal

KOVÁCS ZOLTÁN

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. Témavezető: Nagy Dalma, doktorandusz, dalma.nagy@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az emberi agy működése rendkívül összetett, azonban különféle egyensúlyozási feladatok elvégzésével és annak vizsgálatával jobban megérthető. A szakdolgozatomban az ujjhegyen való rúdegyensúlyozás vizsgálatára került sor. A rúdegyensúlyozás egyik lehetséges mechanikai modellje egy megvezetett kocsiból és egy ingából áll. A rendszer instabil, de a megfelelő szabályozó erővel stabillá tehető. A szabályozó erő modellezésére a PD szabályozót választottam. A modellnél fontos figyelembe venni, hogy az emberi idegrendszer sajátosságai miatt minden embernek van reakcióideje. Ezért az egyensúlyozás modellezéséhez a késleltetett differenciálegyenletek alkalmazása szükséges. A modellen végeztem numerikus szimulációkat és ezeket mért időjelekkel vetettem össze. A szimuláció célja az, hogy hasonló időjelekkel azonosítva legyen, mely szabályozó paraméterek illeszthetőek az egyensúlyozó személyekre.

1. ábra. A mechanikai modell

2. Alkalmazott módszerek

A rúdegyensúlyozás mérésére a Műszaki Mechanikai Tanszék laborjában került sor. A mérést az Optitrack mozgásvizsgáló rendszer, az adatok feldolgozását és szűrését pedig a Motive szoftver segítségével végeztem. Összesen 8 ember ujjhegyen való rúdegyensúlyozását vizsgáltam. A mért adatok alapján Matlab segítségével kiszámítottam a szögelfordulásokat és szögsebességeket az emberi testhez viszonyított medio-laterális (ML) és antero-poszterior (AP) irányokban. Meghatároztam továbbá néhány stabilometriai mérőszámot is, például az időjel egyoldali spektrumát, a teljesítményspektrum-sűrűséget (PSD) és az átlagos teljesítményfrekvenciát (MPF). A numerikus szimulációt néhány kitüntetett paraméter függvényében a szemidiszkretizáció módszerével végeztem el. Ezek a paraméterek a PD szabályozóra jellemző arányos tagban és deriváló tagban lévő szorzótényezők (p, d), a kezdeti pozíció és a kezdeti sebesség, valamint az érzékelési holtsáv a szögsebesség

esetén. A mért és a szimuláció során kapott eredmények összehasonlításnál különböző idő-és frekvenciatartományban lévő mennyiségeket vizsgáltam. Ezen mennyiségek a szögkitérés, a szögsebesség és a szabályozó erő szórása, valamint a frekvenciatartományban a frekvenciacsúcs helye és a teljesítmény százalékos eloszlása a 0.2-0.5 Hz közötti sávban. Az összehasonlítást az úgynevezett célfüggvény felírásával végeztem el.

3. Eredmények

A célfüggvény súlyozással vizsgálja a mért értékkel dimenziótlanított, mért és szimuláció során kapott mennyiségek négyzetes eltérését. Tehát a szimulációhoz választott összes paraméter-kombinációval történő számítási eredményt összehasonlítottam a mért értékekkel. Amelyik paraméter-kombinációra a célfüggvény értéke a legkisebb volt, azokat a paramétereket rendeltem a mérőalanyokhoz. A 2. ábra egy mérési és a hozzárendelt paraméterekkel számított szimulációs eredményt mutat a szögelfordulás és a szögsebesség síkján, valamint az ezekből számított teljesítményspektrum-sűrűséget.

2. ábra. Mért és szimluláció során kapott eredmények

4. Összefoglalás

A rúdegyensúlyozás során mért és szimulált eredmények összehasonlítása után megállapítható, hogy az időkésleltetett PD visszacsatolás alkalmazásával és az érzékelési holtsávok figyelembevételével jól lehet modellezni az emberi rúdegyensúlyozást, azonban a valós emberi idegi szabályozás mechanizmusa az általam alkalmazott a modellnél valószínűleg bonyolultabb.

Prediction of dynamical properties based on dexel models

LEVENTE KOZMA-BOGNÁR

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Bachrathy Dániel, associate professor, bachrathy@mm.bme.hu

Introduction 1

The objective of my thesis was to develop a program in Julia language that couples the dexel model of geometry representation with a meshless method in 2D, and to use it to calculate the natural frequencies of a workpiece in a milling operation. The convergence properties and the efficiency of the implemented meshless method was compared to the traditional Finite Element Method.

Figure 1: Simulation of machining in the dexel model

Applied methods $\mathbf{2}$

I have already implemented the dexel model in Julia and coupled it to the Finite Element Method for my BSc thesis in 2019. In this thesis, an improved convergence analysis is performed on this FEM program. I did a research on the meshless methods in the literature, and chosen one of them, the so called (global) Radial Point Interpolation Method for implementation. The global RPIM was coupled with the dexel model, and convergence tests were carried out on the natural frequencies of multiple workpieces: a rectangle, a circle, and the previous rectangle again, but with material cut out from it. The same calculations were carried out with my old FEM program too, and the performance of the two methods were compared. The runtimes were also monitored for both methods and the efficiency was analysed for the rectangle and the circle.

Figure 3: Rectangle workpiece after a 3 step milling process All nodes are used for RPIM simulation

3 Results

The accuracy of the RPIM was comparable to the accuracy of the FEM for the rectangle and circle. The RPIM was also convergent in the first two steps of the milling operation, but the accuracy of the first four natural frequencies were less satisfactory. The method broke down in the last step however. The FEM proved to be more robust, it was convergent for all three steps, although its accuracy was not always the best. The efficiency of both methods was tested on the rectangle and the circle. The rate of convergence was similar for the FEM and the RPIM, but neither values were very good.

Figure 2: Simple FEM model of a circular workpiece

Figure 4: Convergence of natural frequencies, RPIM, circle

Summary 4

All in all, the implementation of the meshless method is a partial success: the program works well for simple shapes, so it is a good first step, but it is not robust and efficient enough for practical applications yet.

Optimal control of lane change maneuvers

MÁTÉ LAJTOS

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/I. Supervisor: Illés Vörös, PhD student, illes.voros@mm.bme.hu

1. Introduction

Nowadays, more and more driving assistant systems are being installed in cars in order to increase the safety of road traffic. The technology which makes the usage of the driver assistant systems possible, could also be used in the future to produce fully autonomous vehicles. One of the most significant problems related to the development of autonomous vehicles is the lateral positioning. In my thesis I was investigating the control process of a lane change maneuver with optimal control methods. These methods are commonly used nowadays to get the best performance from the controller.

2. Applied methods

Optimal controllers are able to drive the system from an initial state to a reference state along an optimal trajectory. We can prescribe a cost function according to our control purposes and it has to be minimised during the optimization. I have implemented 3 main types of optimal controllers and performed several numerical simulations. I simulated 2 types (kinematic and dynamic) of the so-called bicycle model. The dynamic type (which take the tire dynamics into consideration can be seen in Figure 1.)

Figure 1: Dynamic vehicle model

The first implemented controller is a Linear Quadratic **Regulator**. In this case the cost function contains the control input δ , the lateral position y and the angle ψ of the vehicle. After that I applied a **minimum-time approach**: in this case, the controller was able to minimize time t directly by considering it in the cost function. Then I implemented a **Model Predictive Controller** (MPC) in order to take the comfort of the passangers into account: this controller is able to handle constraints, so the quantities (lateral acceleration and its derivative, the so-called "jerk") which have a significant influence on the comfort of the passangers were maximised.

3. Results

Based on the simulations it can be stated that all 3 types of the controllers are able to perform the lane change maneuver optimally in accordance with the current control purpose determined by the cost function. The effect of the different parameter values in the cost function can be captured well based on the simulation results.

In case of the LQR controller, settling time can be decreased by increasing the weights of the state variables in the cost function. A reasonable steering angle can also be ensured by penalizing the control input with a higher weight.

The minimum-time controller is able to successfully decrease the settling time directly by increasing its weight. The simulation results showed that the lane changing process can be performed very fast. In order to do that we need a very strong and sudden input, so the comfort will be lower.

Figure 2 shows a simulation result with constrained MPC. We can see that the maximum value of "jerk" j is staying between the prescribed limits, ensuring the comfort of the passengers. The value of the jerk is maximally utilised but it always remains inside the constraints.

Figure 2: MPC with constrained jerk

4. Summary

Based on the results it can be stated, the main approaches of lane changing can be taken into consideration with the implemented controllers. All of them can perform the maneuver with regard to the current control purpose formulated in the cost function. It is also important to note that in case of a real-time implementation, computational cost has to be taken into consideration because MPC requires a high computational effort from the computer.

Orientation estimation for balance development devices

VIKTOR LANDOR

Mechatronical Engineering BSc, Spacialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2020/2021/I. Supervisor: Dr. László Bencsik, research associate, bencsik@mm.bme.hu

1. Introduction

Nowadays, microelectromechanical systems and inertial measuring units (IMU) have become widely used. Rigid body orientation determined by IMU is applied in navigation, robotics, such as mobile applications. Within the framework of the project, the measurements are made with a measuring device attached to a motion coordination development tool. In this project, the orientation is calculated with data fusion. Data fusion is an excellent technique to integrate different types of data to a single unit to provide a more reliable representation of tracking measurement. Each sensor has its advantages and disadvantages, but sensor fusion can be used very well to minimize measurement error. In evaluating the results, different orientation calculation methods were compared and determine the difference between them as well as the measurement error. After evaluating the results, a measure expressing the ability to balance is formed, which can also be used to describe the development of the subject.

1. Figure The measurement setup

2. Applied methods

First by simply integrating the raw data, and then by integrating the raw data after appropriate noise filtering. In the sec-

2. Figure Description of balancing ability

3. Results

The validity of the solutions obtained in different ways was validated by check-measurement, which provides an excellent basis for comparison and error estimation. The Kalman filterbased method represents an excellent approximation for orientation. In case of calculating from gravity vector, the result is also encouraging.

4. Summary

ond method, the angular position of the body was calculated in a Matlab environment using a Kalman filter. The third method was based on a back-propagation of the gravity force to determine the angle of the body's orientation. Two metrics have also been created to quantify the ability to balance, which are basically a time-based assessment of the subject's ability to balance.

Overall, the calculations are a good estimate of the real situation. Suggestions for improvements can of course be made here, which could further reduce the calculation error. Given the data measured for different types of tasks, the proposed indicators are considered reliable, but further improvements can be made for more accurate results with longer-term studies.

Mechanical Characterization of Though Polymer Hydrogels

Zoltán Langó

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Attila Kossa, associate professor, kossa@mm.bme.hu

1 Introduction

Double-network (DN) hydrogels are innovative materials with lots of potential improvement. They have low surface friction and wear, high water content proper elastic modulus, and high mechanical strength. It can be the near future substitute for human tissue. The DN gels are combination of two independent cross-linked networks. It is a three-dimensional polymer network structure. The first network is a rigid brittle network and the second network is ductile network. Superior mechanical properties can be reached when optimal networks are mixed. In case of cyclic loading condition these materials have a complex energy dissipating behaviour shown in Figure 1. It is called the Mullins effect.

Figure 1: Example tension test of material with Mullins effect

My objective was to develop a constitutive model which can describe the mechanical behaviour of the DN-hydrogels. I use this constitutive model to create a graphical user interface to optimize material parameters.

2 Applied methods

I have obtained measurements data of DN hydrogels during my literature survey. Data were obtained from three types of deformations: uniaxial extension; equibiaxial extension; planar extension. The constitutive model, I have used in my thesis, is a parallel connection of two springs. Both springs are modelled with Yeoh-type incompressible hyperelastic material model, but one of them is extended with the Ogden-Roxburgh model. Resulting constitutive model has 9 material parameters. For parameter fitting I have used three different error function: Sum of Squares Error; Sum of Absolute Error; Coefficient of Determination. The GUI is written in python programming language.

3 Results

With the GUI, shown in Figure 3, the user can perform the following operations: importing the measurement data; select error function option; find initial values for the optimization; optimize the material parameters for selected number of deformation types; plot the fitted curve in top of the measurement data; calculate R^2 ; compare results.

Figure 3: Layout of the GUI

I was able to obtain a parameter combination for which the coefficient of determination was $R^2 = 0.990$. I got this result in case of fitting the model for all three deformation types simultaneously. For an individual measurement fit, I got $R^2 = 0.997$ for all the three deformation types separately. I have done some further investigation of the material parameters. I have investigated the individual effects of the parameters in the final results.

Figure 2: Schematics of several types of deformation: a) uniaxial (U), b) planar (PE), c) equibiaxial extensions (EB)

4 Summary

Overall the GUI is capable of importing measurement data from .csv file format and optimize the material parameters for the constitutive model. I have investigated the effect of more options, which was implemented in the GUI.

Evezős lapát szilárdsági vizsgálata

KOSZTRUB TAMÁS

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. Témavezető: Dr. Kovács Ádám, egyetemi docens, adamo@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az evezős sport bemutatása után a kellékeket vettem sorra, amelyek közül egy lapát felépítését mutattam be részletesen. Ezután sorra vettem a számomra releváns és elérhető szakirodalmakat a témában, amely során szembesültem vele, hogy nagyon kevés evezős kellékhez kapcsolódó szilárdsági elemzés van. A legtöbb evezéssel foglalkozó kutatás a mozgás és a csapásszám hatékonyságát vizsgálja, mérnöki oldalról pedig leginkább a lapáttoll típusokat érintő áramlástani elemzések vannak.

A dolgozatban Concept2 rendkívül népszerű evezős márka lapátjait hasonlítottam össze, egy régebbi "Ultralight" típust, és egy új "Skinny" típust.

1. ábra. Egy evezős egy Concept2 Skinny lapáttal

Célom az volt, hogy szilárdsági elemzéseket végezzek a lapátokon, majd esetlegesen javaslatot tegyek egy új, kedvezőbb geometriára.

Alkalmazott módszerek 2.

Elsőnek egy rúdmodellt csináltam csuklóval és kényszer-

szoftverben. A VEM modellt úgy igazítottam a valósághoz, hogy a Concept2 honlapon elérhető lapát merevségi ellenőrző konfigurációt elkészítettem a szoftverben.

2. ábra Lapát merevség meghatározás

3. Eredmények

Eredményül a Skinny feszültségeloszlásra érthetően egy magasabb átlagértékét kaptam, mint az Ultralight-ra, de még mindig a megengedett szilárdsági határokon belül. Ezen az egyre vékonyabb, de merevebb vonalon tovább haladva, a tömegállandóságot figyelembe véve sikerült egy jelentősen vékonyabb geometriát kialakítanom. Továbbá a lapátnyél utáni kúpos rész hosszabbra vételével elértem, hogy az eddig tapasztalható feszültségugrás megszűnjön. A 3. ábrán látható a Skinny, Ultralight, valamint a Vékony Kúpos lapát feszültségeloszlása.

3. ábra Feszültségeloszlások összehasonlítása

erőkkel, aminek a megoldásakor kijöttek a lapátot érő terhelések. Ezután analitikus becslést végeztem egy konstans keresztmetszettel, majd egyre pontosabb geometriákat alkalmazva meghatároztam a lapátban a hossz menti feszültségeloszlást, amelyet utána megismételtem a Skinny lapátra is. Ezt követően végeselem módszerrel végeztem szimulációkat ANSYS 2021 R2 Workbench

Összefoglalás

A szakdolgozatomban tehát sikerült egy valóságszerű végeselem modellt felállítani, aminek segítségével megkaptam a feszültségeloszlásokat, aminek segítségével tudtam javasolni egy szilárdságilag és áramlástanilag is kedvezőbb geometriát.

Tolató vontatmányok szabályozása

Mihályi Levente

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető:* Dr. Takács Dénes, egyetemi docens, takacs@mm.bme.hu *Konzulens:* Vörös Illés, doktorandusz, illes.voros@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Napjaink járműdinamikai fejlesztéseinek egyik legnépszerűbb témája az önvezető járművek témaköre. Ez a funkció ugyanis alapjaiban változtatná meg a közúti közlekedésről alkotott képünket. Elsőként természetesen a személyautók körében indultak efféle kutatások, azonban az ipar már nagyjából az előző évtized közepe óta önvezető tehergépjárművek fejlesztésével is foglalkozik. A dolgozat fő célja egy összetett járműszerelvény tolatásának vizsgálata és szabályozása, mely szerelvény áll egy vontató járműből és egy vontatmányból; a kettő közti kapcsolatot pedig egy köztes, vonóháromszöges kapcsolóelem létesíti. A vizsgálatot konstans hosszirányú sebességre végezzük el egyenes vonalú-, illetve körpályán történő mozgás esetére.

2. Alkalmazott módszerek

A rendszert kinematikai, merevkerekes modell segítségével vizsgáljuk (1. ábra), melynek alkalmazhatóságát korábbi kutatási eredményekre támaszkodva igazoljuk. Ezt kiegészítjük a kormánymű dinamikájával, valamint külön hangsúlyt fektetünk az időkésés figyelembevételére. A stabilitást egy lineáris, három arányos tagot tartalmazó, visszacsatolásos szabályozóval érjük el, a körpályán haladást pedig egy kezdetleges pályakövető funkcióval valósítjuk meg. A visszacsatolt mennyiségek a vontató jármű Y laterális pozíciója és ψ_1 legyezési szöge, valamint a vontatmány φ_3 relatív legyezési szöge (egyenes mentén haladáskor). Az időkésés okozta végtelen-dimenziós probléma megoldására mind a D-szeparáció, mind a szemidiszkretizáció módszerét alkalmazzuk. Az egyenes vonalú mozgás esetén kapott eredményeket szimulációkkal verifikáljuk, majd kisskálájú kísérleti berendezésen végzett tesztekkel validáljuk.

3. Eredmények

Az egyenes vonalú tolatás esetén a 2. ábrán látható stabilitástérkép a dolgozat végső eredménye, ahol a kísérleti úton kapott eredmények is fel vannak tüntetve. Ezek alapján az elméleti számítások helyesnek tekinthetők, mivel a kísérlet során egy hasonló alakú, kicsinyített stabil tartomány adódott; az eltérésre magyarázat a modell pontatlansága.

2. ábra. Stabilitástérkép a kísérleti eredményekkel, egyenes vonalú mozgás esetén

Körpálya esetében a pálya görbületének stabilitásra vett hatását vizsgáltuk, amit a 3. ábra mutat. Látható, hogy a görbületet növelve eleinte minimálisan eltolódik a stabil tartomány, azonban bizonyos érték felett hirtelen zsugorodni kezd.

3. ábra. Körpálya $\kappa_{\rm C}$ görbületének hatása a stabilitásra

1. ábra. Mechanikai modell

4. Összefoglalás

Az összetett járműszerelvény tolatásának stabilizálására megalkotott szabályozási algoritmus alkalmasnak bizonyult mind egyenes vonalú, mind körpálya menti haladáskor. A mechanikai modell pontosságát nagymértékben javítja a kormánymű dinamikájának-, illetve a szabályozási körben megjelenő időkésésnek a figyelembevétele.

Rugalmas szálak csavarásánál jelentkező felcsavarodási jelenség kísérleti úton történő vizsgálata

MOLNÁR VINCE

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető*: Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A dolgozat témája a rugalmas szálak csavarásánál jelentkező felcsavarodási jelenség kísérleti úton történő vizsgálata. A dolgozat megírásának célja, hogy betekintést nyújtson az idáig elvégzett kutatásokról a témában, hogy áll a tudomány ezzel a kérdéssel, milyen elméletek születtek a jelenségről az elmúlt időben. Ezen kívül elkutatja a vizsgálati módszereket, a létező matematikai modelleket. A kísérlet elvégzésével célom, hogy testközelből tapasztaljam meg, vizsgáljam az összecsavarodási jelenséget, annak körülményeit. Mikor tud megjelenni, milyen tulajdonságai vannak a folyamatnak? Az adott próbatesttel, a készített eszközökkel hogyan kivitelezhető a kísérlet, mik az előnyei, illetve hátrányai?

1. ábra: A plectoneme jelenség (felcsavarodás) ábrája

2. Alkalmazott módszerek

A jelenség vizsgálatához mérést készítettem. A mérés lényege az, hogy a berendezés egyik végén a normálerőt, a másik végén a csavarónyomatékot mérem, miközben a két befogott vég távolságát változtatom. A berendezés fő része az Instron 3345 típusú egyoszlopos mechanikai anyagvizsgáló berendezés. Ehhez készítettem egy adaptert, amin be lehet állítani a csavarást és ennek segítségével lehet mérni a csavarónyomatékot. Ehhez egy precíziós mérleget és damilt használtam.

3. Eredmények

Az ábrázoláskor az erők esetén teljesen jól láthatóak azok a pontok, ahol az önkontakt keletkezett. Itt egy kiugró erőérték jelenik meg minden esetben, ami utána nagy mértékben lecsökken. A mechanikai anyagvizsgálat során kapott eredmény is megjelenik ezen a diagramon. Amikor a keresztfej a 20 mm elmozdulás után megállt, az egyhelyben álló próbatesten mért normálerő nagysága folyamatosan csökkent. Ez a relaxáció jelensége, amit az alapanyag viszkoelasztikus viselkedése okoz. A nyomatékméréskor meg kellene jelennie egy nagyobb esésnek az önkontakt bekövetkezésekor, viszont ez azért nehezen leolvasható, mivel csak adott pontokban állt meg a keresztfej, hogy rögzíteni lehessen a mérleggel mért adatokat. Ráadásul a relaxáció jelensége is megnehezíti a leolvasást.

3. ábra: Az erő-elmozdulás (balra) és a nyomaték-elmozdulás (jobbra) diagram dimenziótlan skálán

4. Összefoglalás

A méréshez készített két alkatrész megfelelően működött, a damillal és a precíziós mérleggel úgy gondolom elég jól meg tudtam oldani a nyomatékmérést. Ezen kívül a szakítógép is nagyon jó választás volt a kísérlet további méréseinek, beállításainak elvégzéséhez. Az erőmérés során teljesen kiolvasható az önkontakt kialakulása a diagramról. A nyomatékmérés során is látható a kapott eredményeken az önkontakt megjelenése, illetve azok a karakterisztikák, amik várhatóak voltak a korábban elvégzett mérések alapján. Összességében a mérést megfelelőnek értékelem, betekintést kaptam a műszaki élet ezen részébe, sokat tanultam tapasztalati úton a jelenségről a kísérletek elvégzése közben.

2. ábra: A mérési berendezés, balra: kezdeti állapot, jobbra: végállapot

Application of the LQR controller to underactuated mechanical systems

PÉTER MOLNÁR

Mechatronic Engineer BSc, Spacialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2021/2022/I. Supervisor: Bálint Bodor, PhD student, bodor@mm.bme.hu

1. Introduction

Controlling underactuated mechanical systems is difficult because we lack the ability to influence all degrees of freedom directly. Figure 1 shows two simple models for approximating robots with flexible arms: a 3 DoF and a 4 DoF underactuated planar manipulator. They have two motors (cross in the circle of the joint) and one or two passive joints (an ordinary joint in conjunction with a torsional spring and damper). The investigated task is trajectory tracking control. The classic inverse dynamics method fails as the manipulator has less motors than degrees of freedom and we cannot invert a non-square matrix.

Figure 1. Underactuated planar manipulator models

2. LQR

There have been attempts at applying an inverse dynamicslike controller to underactuated mechanical systems. However, we are interested in another possible candidate: the linearquadratic regulator (LQR). This is an optimal control method that has its origins in calculus of variations. Of the two main types, we implement the infinite-horizon LQR. This method is guaranteed to provide an optimal and stable solution for certain linear, time-invariant systems. In what sense is this solution optimal? While it has exact mathematical description, it is hard to visualise. The only thing we can say is that we punish control inputs or the error of the states by tuning the controller. The other problem is that mechanical systems such as these manipulators are nonlinear and so there is no mathematical guarantee that the LQR works. Nevertheless, we linearise the equation of motion around the target location in each timestep and analyse the results.

3. Simulation results

The task for the end-effector (the end of the last arm) is to move along a semicircle path defined by the desired location as a function of time. First, we simulate this on the 3 DoF model.

Figure 2. Comparison of the realised paths of the generalised inverse dynamics controller and the LQR

Another interesting case is seeing how the LQR behaves in even more challenging scenarios. We use the 4 DoF model and measure the performance of the LQR with and without gravity taken into account.

Figure 3. The evolution of the end-effector position with and without gravity.

4. Summary

A generalised version of the inverse dynamics controller has the edge over the LQR for the simulation in Figure 2. On the other hand, the LQR is more robust and can handle the flexibility of both arms. An interesting observation is the lag-like effect of the LQR for trajectory control tasks: the realised position lags in time but is relatively accurate in space. In the presence of gravity, LQR can still perform the task. Further points for discussion could be the ways of efficiently tuning the LQR or conducting parametric studies of its performance.

3D hydrodynamic simulation of an acoustically excited gas bubble

DÁNIEL NAGY

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Zoltán DOMBÓVÁRI, Associate professor, dombovari@mm.bme.hu Advisor: Dr. Ferenc HEGEDŰS, Associate professor (BME-HDS), fhegedus@hds.bme.hu

1 Introduction

The objective of sonochemistry is to increase the yield of chemical processes in a fluid with ultrasound excitation. It is based on a special case of cavitation, namely, acoustic cavitation. Because of the ultrasound excitation, several bubbles and bubble-clouds are created and start a radial oscillation. During this oscillation the contraction can be so large, that the internal temperature can reach several thousand Kelvins and induce chemical reactions. For the simulation of sonochemical reactors the description of the non-linear dynamic of a single bubble is necessary.

Figure 1: Layout of a simulation of a single bubble.

2 Applied Methods

A single acoustically excited bubble can be simulated with finite-volume methods (FVM). In a bubble simulation two different phases must be handled. Moreover, the wavelength (10 mm) is around 3 orders of magnitude larger than the diameter of the bubble (few μ m), that also varies in time. Consequently, the FVM software must be capable of simulating compressible multiphase flows, with continuous adaptation of the mesh. The chosen software is the open-source ALPACA, which separates the phases with level-set method and the meshing is automatized with a multiresolution algorithm. The layout used for the simulation in shown in Fig. 1. In the water a standing wave is created and the bubble is placed in the antinode.

3 Results

Bubble simulations were tested in a 2D planar, 2D axisymmetry and 3D setup. The important parameters are the equilibrium bubble radius R_E , the excitation frequency f and the pressure amplitude p_A . The 2D planar case was only employed to investigate the possibility of bubble simulations. The problem with the 3D simulations is that it requires more than a million cells and due to the extremely small timestep the runtime of a short simulation in 3D is more than a day on a supercomputer. Simulations utilizing the 2D axisymmetry produce realistic results. The results were also compared to the prediction of the Keller Miksis equation which describes the oscillations of a *spherical* bubble. Fig. 2 shows that the results of the two methods agree extraordinarily well. Two surface oscillation modes was reproduced in the axisymmetric simulations. Mode 2 is observed in Fig. 3 and mode 4 is observed in Fig. 4. Mode 3 could not be reproduced due to the employed square based mesh. Moreover, the break-up of the bubble was also reproduced in Fig. 5. The bubble breaks up because the amplitude of the 4th oscillation mode becomes large.

Figure 3: Mode 2 ($f = 105 \text{ kHz}, p_A = 0.5 \text{ bar}, R_E = 20 \text{ }\mu\text{m}$)

Figure 4: Mode 4 ($f = 144 \text{ kHz}, p_A = 0.9 \text{ bar}, R_E = 20 \text{ }\mu\text{m}$)

Figure 5: Mode 4 ($f = 130 \text{ kHz}, p_A = 0.9 \text{ bar}, R_E = 36 \text{ \mum}$)

Figure 2: Comparison of the Keller Miksis equation to the ALPACA simulation.

4 Summary

In the thesis it was shown the acoustically excited bubbles can be simulated using CFD. During the simulations the oscillation of the bubble radius was seen. Moreover, surface oscillations of the bubble and the break-up of the bubble was observed. The described method can be used to generate more data in the future, which can be useful for future simplified mathematical models.

Alulaktuált mechanikai rendszerek szabályozása

PÁLI KRISTÓF

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető*: Bodor Bálint, doktorandusz, bodor@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Az iparban a nagy szériájú gyártást sok esetben robotkarokkal végzik, melyeket egyes esetekben vezérléssel, más esetekben szabályozással oldanak meg. Mindkettőben közös, hogy a célunk a robot karjának adott pályán történő mozgatása. Ez a gyakorlatban azonban legtöbbször csak minimális hibával oldható meg, ezért a szabályozást célravezetőbb lehet választani, hiszen ebben az esetben folyamatos visszacsatolás révén információval rendelkezünk az esetleges eltérésről, amire bizonyos módokon beavatkozhatunk. A feladat jellegétől függően célszerű lehet kevésbé merev robotkarok alkalmazása is, például az 1. ábrán látható robot karját rugalmas egy passzív csuklóval modellezzük. Ekkor azonban több szabadsági fokkal fog rendelkezni a robotunk, mint ahány beavatkozót alkalmazunk, így alulaktuált robotról beszélünk.

1. ábra. A vizsgált alulaktuált robot modellja

2. Alkalmazott módszerek

A robotok mozgásegyenletét minden esetben a másodrendű Lagrange egyenletek alkalmazásával írhatjuk le. A szabályozási folyamatok közül pedig lehetőségünk van a PD szabályozásra, vagy a csúszómód (SMC) szabályozásra. A mozgásegyenlet megoldását a 4 lépcsős Runge-Kutta (RK4) módszerrel számítjuk, azonban a megoldhatóság függ a visszacsatoláshoz szükséges adatoktól, így nem mindegy, hogy a robotkarok szögpozícióját, vagy a robot karjának egy adott pontját mérjük, hiszen az u beavatkozó nyomatékok vektorának számításához szükséges, hogy a H(q) együtthatómátrix négyzetes legyen, mivel az invertálás csak ekkor végezhető el.

3. Eredmények

A 2. ábrán láthatjuk a szabályozás hatására kialakuló mozgást, illetve a 3. ábrán a karok szögpozícióit a mozgás során az idő függvényében.

2. ábra A robot mozgása a szabályozás hatására

Megállapíthatjuk, hogy a mozgás során kezdetben a robot pozíciója minimálisan eltér a kívánttól, azonban a mozgás végén a szabályozás hatására a hiba lecsökken, a szabályozott robot alkalmas a kívánt pályán történő mozgatásra.

3. ábra A robot kívánt és megvalósított szögpozíciói az idő függvényében

 $M(q)\ddot{q} + k(q,\dot{q}) + g(q) = c(q,\dot{q}) + H(q)u$

4. Összefoglalás

Összességében elmondható, hogy a diplomaterv példákat szolgáltat a teljesen aktuált és alulaktuált mechanikai rendszerek szabályozására és vezérlésére, amiket a mérnöki gyakorlatban lehet alkalmazni, illetve a példák megértése jó alapot szolgáltat a hasonló problémák megoldásához.

Nyomáshatároló szelep stabilitásának paraméterérzékenysége

PINTÉR BENCE

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető:* Kádár Fanni, PhD hallgató, fanni.kadar@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A szakdolgozat a nyomáshatároló szelepek stabilitásával, azon belül is pedig, annak a paraméterérzékenységével foglalkozik. Ezen típusú szelepek rendkívül elterjedtek a nagy nyomás alatt álló rendszereknél, mivel egyszerű a mechanikai kialakításuk és megbízható a működésük, ezáltal akalkalmazhatóak a túlnyomás elleni védelemre kazánoknál, nagynyomású csővezetékeknél és térfogatkiszorításos elven működő folyadékszivattyúknál is. Ez az úgynevezett védelem annyit jelent, hogy a rendszernyomást egy előre meghatározott érték alatt tartja, így nem fordulhat elő olyan mértékű túlnyomás, amely szélsőséges esetekben akár a rendszer tönkremeneteléhez is vezethet. Viszont a gyakorlati tapasztalatok rámutattak arra, hogy a működésük során felléphetnek különféle rezgések is, amelyek károsíthatják a rendszer elemeit, továbbá előfordulhat az is, hogy kihatással vannak a nyomáshatároló szelep működésére is, ilyenkor nem megfelelő gyorsasággal csökken a rendszerben lévő nyomás, amely rendkívül súlyos következménnyel járhat.

1. ábra. Közvetlen rugóterhelésű biztonsági szelep.

2. Alkalmazott módszerek

A közvetlen rugóterhelésű biztonsági szelep egyensúlyi helyzetének stabilitási határai lineáris stabilitásvizsgálat segítségével lettek megállapítva, a Routh-Hurwitz kritérium alkalmazásával. Az így kapott stabilitási határokat numerikus szimuláció igazolta. Az alkalmazott modellben találhatóak bizonytalanul meghatározható paraméterek, mint a κ dimenziótlan csillapítási tényező, a lineáris effektív felületet leíró függvény α_1 együtthatója és a másodfokú effektív felületet leíró függvény α_2 együtthatója. Ezen paramétereknek a lineárisan stabil tartományokra gyakorolt hatását a Monte Carlo szimuláció mutatta meg.

3. Eredmények

A Routh-Hurwitz kritérium által meghatározott lineárisan stabil tartományokat mind a három effektív feület esetén igazolta a numerikus szimuláció. Vagyis belátható volt, hogy a $\beta_{\text{const},1}$, $\beta_{\text{lin},1}$, $\beta_{\text{quad},1}$ felületek alatt és a $\beta_{\text{const},2}$, $\beta_{\text{lin},2}$, $\beta_{\text{quad},2}$ felületek felett választható olyan paraméterkombináció a κ -q- β térben, amely a közvetlen rugóterhelésű biztonsági szelep egyensúlyi helyzetének stabilitását biztosíthatja.

2. ábra. A lineáris stabilitási határok szemléltetése térben, a lineáris effektív felület α_1 együtthatójának ingadozása esetén.

A Monte Carlo szimulációval végzett vizsgálat megmutatta, hogy a $\beta_{\text{const},1}$, $\beta_{\text{lin},1}$, $\beta_{\text{quad},1}$ felületek alatt található relatíve szűknek montható tartomány még kisebb tartomány lett, a $\beta_{\text{const},2}$, $\beta_{\text{lin},2}$, $\beta_{\text{quad},2}$ felületek felett található biztonsági tartományból nem vesz el jelentősen a paraméterek bizonytalansága.

4. Összefoglalás

Ahhoz, hogy megfelelő paraméter kombinációt lehessen választani a κ -q- β térben nem csupán lineáris stabilitásvizsgálatra van szükség, hanem nemlineráis stabilitásvizsgálatra is, amely kijelöl egy továbbhaladási lehetőséget. A Monte Carlo szimuláció eredményeiről kijelenthető, hogy a felületek nem mutattak mérnöki értelemben számottevő érzékenységet a csillapítás változására, valamint az effektív felület függvényben szereplő együtthatókra, amely mérnöki értelemben kedvező tulajdonság. A számítások eredményei mérnökileg elfogadhatóak, mivel a lineáris stabilitásvizsgálat eredményeit a numerikus szimuláció igazolta.

Kettős inga virtuális egyensúlyozása

Póta László

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető:* Dr. Insperger Tamás Antal, egyetemi tanár, insperger@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A kettős inga virtuális egyensúlyozása még senkinek sem sikerült az adott programkóddal. A fő feladatom ennek a problémának a megértése, a kóddal való egyensúlyozási kísérletek végzése és ideális esetben a megoldás megtalálása volt.

1. ábra. Virtuális egyensúlyozási teszt

2. Mozgásegyenlet

Először levezettem a kiskocsihoz rögzített kettős inverz inga síkbeli mozgásának az egyenletét az Euler-Lagrange egyenlet segítségével. Ez segítette a szabályozási erő, a garvitációs gyorsulás és az ingahosszak közötti kapcsolatok megértését.

3. Kritikus időkésés

Ahhoz, hogy meg tudjam határozni az ingarudak hosszát, amivel a programban gyakorolhatok, elkészítettem egy ingahosszoktól függő kritikus időkésés diagramot a Multiplicitás-Indukált-Dominancia (MID) módszerrel.

3. ábra. Kritikus időkésés az ingahosszak függvényében

Az ábra alapján a kritikus időkéséshez ($\tau_{krit} \simeq 352ms$) meghatározott ingahosszok $l_{krit} = l_1 = l_2 = 8,91m$ -re adódtak.

4. Megoldás

Ilyen hosszúságú kettős ingát nem tudtam egyensúlyozni, mivel a végének már a legkisebb érzékelhető elmozdulása is átlépett egy kritikus értéket a képernyő felbontása miatt. Arra jöttem rá, hogy ez a probléma kiküszöbölhető ha a képernyő magasságánál kisebb ingahosszakat ($l_1 = l_2 = 0, 1m$) választok, ugyanis akkor a program fel fogja nagyítani a szerkezetet, aminek hatására kisebb szögkitérések is érzékelhetővé válnak a képernyőn. Azonban ilyen rövid hosszúságú ingát emberi reakcióidővel lehetetlen egyensúlyozni, ezért szükség volt a program forráskódjának módosítására, a gravitációs gyorsulás értékét $g^* = 0,098 \frac{m}{s^2}$ -ra változtattam. Ezek után a módosított programmal már néhány próbálkozás után is biztosan ment a kettős inga virtuális egyensúlas

2. ábra. A mechanikai modell

A kettős inga mozgását leíró egyenletrendszer:

$$\begin{cases} \frac{m_1 s_1 \left(\frac{1}{3}m_1 + \frac{4}{3}m_2\right)}{m_1 + 2m_2} \ddot{\varphi}_1 + \frac{m_1 m_2 s_2}{m_1 + 2m_2} \ddot{\varphi}_2 - g(m_1 + m_2)\varphi_1 = -F\\ m_1 s_1 \ddot{\varphi}_1 + s_2 \left(\frac{4}{3}m_1 + \frac{1}{3}m_2\right) \ddot{\varphi}_2 - g(m_1 + m_2)\varphi_2 = -F \end{cases}$$
(1)

lyozása.

5. Összefoglalás

A kettős inga egyensúlyozásának megtanulásához a program egy kitünő környezetet biztosít. A programban szereplő paraméterek hatékony megválasztása elősegíti a szerkezet stabilizálásának gyakorlását és megtanulását, így egy kis gyakorlás után elsajátítható ez a képesség.

Dynamic modelling of cables

MÁRTON PRICZ

Mechatronical Engineer BSc, Specialisation in Mechanical Engineering Modelling, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. László BENCSIK, research associate, bencsik@mm.bme.hu

1 Introduction

The dynamic behaviour of cables and cable-like structures is often simplified or neglected in common engineering applications. This thesis aims to provide a possible method for modelling these behaviours which are especially important in transitional states of cable- or belt-coupled machinery, as well as the control of cable-driven robots.

2 Applied Methods

The modelling method developed in this work utilises a twodimensional finite element approach for cables. Cable elements have two nodes, each with two degrees of freedom, namely their x and y coordinates. The mass of the element is concentrated in the two nodes symmetrically.

The linear elasticity of elements are modelled by virtual ideal linear springs while the bending stiffness and energy dissipation of cables are represented by ideal torsional springs and viscous dampers respectively.

Figure 1: Virtual elements of the cable model

The inclusion of one degree of freedom pulleys make the simulation of common mechanical assemblies employing cable-like elements possible. Belt drives are among these common configurations, which were examined in the benchmark problems.

The derived dynamic equations were implemented into Matlab to allow for numerical simulations which use the Runge-Kutta 4 method for numerical integration. The contact and friction forces cannot be included in a closed-form equation of motion, making case separations and subsequent solutions of the EoM necessary at each iteration step. with a slacked belt and the other with a tensioner pulley.

Figure 2: Simulation configuration for the tensioned belt drive

The resulting time evolutions of angular velocities for each of the pulleys can be seen in fig. 3. The sliding friction coefficient was chosen to be low ($\mu = 0.05$) to showcase the difference in the behaviour of the two systems.

Figure 3: Resulting angular velocities over time for a slacked belt and a tensioned belt

The higher friction forces and better contact resulting from the tensioner lead to a more efficient transmission of mechanical power between the input (ω_1) and output (ω_2) pulleys.

3 Results

The modelling method was tested on multiple benchmark examples, two of which were simple belt drive models, one

4 Summary

This method for dynamic cable model creation accounts for the effects of linear and bending elasticity, energy dissipation from the friction between cable strands and the friction forces between cables and pulleys. The simulation results show how these influence the transitional behaviour of some common mechanical assemblies.

Kötélhíd szilárdsági analízise

BODÓ MARCELL

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. Témavezető: Dr. Kovács Ádám, egyetemi docens, adamo@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Szakdolgozatom témája az egyszerű kötélhíd szilárdsági analízise. Ezt a típust rendszerint csak gyalogosforgalom számára tervezik és manapság szépművészeti értéke nagyobb, mint funkcionalitása. Ennek ellenére egészen extrém fesztávolságú, modern építésű hidak léteznek, amelyek közvetlen az egyszerű függőhíd konstrukciójára épülnek. Ezen aktualitás miatt érdemes egy átfogó modell kialakítása, amelyből tudomást szerezhetünk egy kötélhíd terhelés alatt felvett alakjáról és feszültségi állapotáról.

1. ábra: Az egyszerű kötélhíd kialakítása

Alkalmazott módszerek 2.

A kötélhíd feszültséganalízisének elvégzésére két analitikus mechanikai modell kerül bemutatásra, amelyek különböző anyagi viselkedést írnak le. Az egyik modell helyesen kezeli a kötél megnyúlásából származó elmozdulásokat, míg az utóbbi a merev viselkedésre szorítkozik. Fontos megemlíteni, hogy a rugalmas modell is alkalmas a nyúlásmentes eset vizsgálatára, azonban az egyszerűbb számíthatóság kedvéért a merev mechanikai modellel végeztem az analízist. A két módszerrel kapott eredmények nagyon jó közelítéssel egyenértékű eredményt produkálnak. Majd egy választott kötélhídra elvégeztem a feszültséganalízist.

Az analitikus modell ellenőrzésére egy végeselem modellt is kialakítottam, az ANSYS Workbench 2021 R1 ACADEMIC szoftver segítségével. Az eredmények összehasonlítása érdekében a szimulációt a merev eseten kívül rugalmas viselkedésre is elvégeztem. A peremfeltételek teherbírásra kifejtett hatásá-

2. ábra: Feszültségeloszlás a kötél mentén végeselem modellel

3. ábra: A feszültségeloszlás a kötél mentén rugalmas és merev esetre a végeselem modellel

4. Összefoglalás

nak elemzése is a dolgozat része volt.

3. Eredmények

A kötélhídat leíró, ismert kezdeti paraméterek alapján és becsült aktív terhelésekkel kivitelezett analitikus számítás során meghatároztam a láncgörbe alakját, hosszát, valamint annak feszültségi állapotát.

A végeselem szimulációval számolt eredmények jó egyezést mutattak az analitikus modellel, ami alapján a bemutatott analízis helyességére köveztethetünk. Az előfeszítés stabilitásnövelő hatását megállapítottam, azonban ezzel együtt a rendszerbe bevitt járulékos feszültség miatt a teherbírást negatív irányba befolyásolja. Összességében kialakításra került az egyszerű hídszerkezetek vizsgálatára alkalmas modell, amit egy ma is fennálló kötélhídon elvégzett feszültséganalízissel mutattam be.

Suspension Bearing Design of a Formula Student Car

SCHEIDLER BARNABÁS

Mechatronikai mérnöki BSc, Gépészeti modellező Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető*: Dr. Hénap Gábor, Adjunktus, henapg@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Szakdolgozatom témájául az említett versenyautó futómű csapágyazásának tervezését választottam. Ez a tervezési folyamat két fő lépésből állt. Első lépésben a futóműhöz kellet keresnem megfelelő csapágyakat. Minden csapágy esetében számításokat kellet végeznem, hogy a futómű adott pontján átadódó terhelések mellett is üzemképes marad az oda szánt csapágy. A második nagyobb fejezete ennek a tervezésnek a csapágyakat közrefogó alkatrészek megtervezése és véges elemes szimulációja. Ez kéttípusú alkatrészt jelent, mégpedig a váz bracket-eket és a lengőkarok sarok inzertjeit. A tervezési folyamatban a hangsúly a szimulációkon és a véges elemes modellek felállításán volt. A témával való előzetes ismereteimet a dokumentum első fejezetében taglalt koncepciókutatásban szedtem össze. Ez a fejezet mutatja be azokat a gondolatokat, amik később az alkatrészeket meghatározzák. Végezetül a már elkészült alkatrészeket igyekeztem olyan módon bemutatni, hogy a kitűzött célok milyen módon tudtak megvalósulni. Ezt, hogyan tudtuk ellenőrizni. Illetve milyen módszerek állnak rendelkezésünkre a tovább finomításokhoz és optimalizáláshoz.

1. Ábra – Csapágy típusok

2. Ábra – Alkatrész geometria

2. Alkalmazott módszerek

A csapágyszámításoknál a gyártók által biztosított módszerekre hagyatkoztam. Az alkatrészek tervezésénél, végeselemes

3. Ábra Rúd erő mérés és eredményei

4. Ábra – Véges elemes modell és eredmények

3. Eredmények

A tervezési folyamat végén sikerült felállítanom egy tervet, hogy a futómű mely pontján milyen csapágyat fogunk tudni alkalmazni.

5. Ábra – Csapágy kiosztás a futóművön

Illetve a csapágyakat közre fogó alkatrészeket is sikerült statikai szempontból biztonságossá tenni vagy annak minősíteni.

6. Ábra – Első és hátsó sarokinzert von-Mises feszültség eloszlás

4. Összefoglalás

szoftver használatával ellenőriztem az alkatrészeket. Mindkét esetben a terheléseket egy rúderőmérés eredményeiből határoztam meg. Ezeket az erőket vektoriális formában felírva sikerült vagy a csapágyak katalógus által adott méretezési képleteibe vagy a véges elemes szoftverbe implementálnom. Ehhez néhány egyszerűbb algebrai számítást kellett elvégeznem.

Egy autó elengedhetetlen alrendszere a futómű, mely a tapadást igyekszik létrehozni az út és a kerék közt. A fenn bemutatott alkatrészek is ezt a célt szolgálják. Ezért nagy hangsúlyt kell fektetni a számításokba, amik ezek viselkedését igyekeznek bemutatni. Ugyanakkor arra is ügyelni kell, hogy merevségük és tömegük is megfelelő legyen. Ezen komplex feladat megoldása nem egyszerű. Körültekintő, részletekben elmélyülő tervezést igényel.

Control of mechanical systems based on the calculus of variations

András SCHIFFERER

Mechatronics Engineering BSc, Mechanical Engineering Modelling, 2021/2022/I. Supervisor: Bálint BODOR, PhD student, bodor@mm.bme.hu

1 Introduction

Modern industry without precise robotic manipulators would not be possible. Two types of robot arm architectures exist: serial and parallel robots. The former type is known for its flexibility and agility, while the latter has precise and robust movements. However this precision also comes at a cost: parallel robots are harder to model due to them being inherently constrained. Furthermore their workspace contains singularities where classical control algorithms fail, but for example LQR is viable.

2 Calculus of variations

Calculus of variations is used for both the description and control of mechanical systems, such as robotic arms. It deals with finding the stationary points of integral quantities in terms of unknown functions. A functional can be denoted with unknown function x(t) is in $\langle \rangle$ as

$$I\langle x\rangle = \int_{t_0}^{t_1} f(t, x, \dot{x}) \,\mathrm{d}t. \tag{1}$$

An example problem is light always taking the path with the lowest travel time as in Figure 1.

Figure 1: Light refraction using Fermat's principle

The solution to such a problem can be calculated using the Euler-Lagrange equation

$$\frac{\partial f}{\partial t} - \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \frac{\partial f}{\partial t} = 0. \tag{2}$$

for the present thesis we will deal with the latter. In this case the cost function can be written in the form of

$$J \langle \mathbf{x}, \mathbf{u} \rangle = \int_0^\infty \left(\frac{1}{2} \mathbf{x}^{\mathsf{T}}(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}(t) + \frac{1}{2} \mathbf{u}^{\mathsf{T}}(t) \mathbf{R} \mathbf{u}(t) \right) \, \mathrm{d}t. \quad (3)$$

4 Results

Figure 2: Analyzed 5 bar robotic system (left) with specific singular position (right)

The LQR controller is used for controlling a five bar parallel robot in an unstable singular equilibrium. The Cjoint is excited with short force pulses F(t). Thanks to the LQR controller it can maintain its unstable position. See the results in Figure 3.

$\partial x = \mathrm{d}t \,\partial \dot{x}$

3 Linear Quadratic Regulator

The Linear Quadratic Regulator, or LQR, is a popular control method where we assign a penalty (user defined with \mathbf{Q} and \mathbf{R}) to the controlled system's deviation from the ideal state and to the actuating signal's magnitude. This can be done both for finite and infinite time horizon,

5 Summary

The thesis investigates both inverse dynamics and LQR control, laying out their theory for constrained systems. With inverse dynamics trajectories can be followed, while the LQR is only done for position control.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 5. www.mm.bme.hu

Figure 3: Simulation results for 5 bar system with LQR

Nonlinear dynamics of a pressure relief valve

Valér Sümegi

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Gábor Stépán (professor), Fanni Kádár (PhD student), stepan@mm.bme.hu, fanni.kadar@mm.bme.hu

1 Introduction

The pressure relief values are essential parts of the pressurised systems, however during the operation harmful vibrations can occur, which can cause dysfunctionality and serious damage of the safety value.

This thesis is about the investigation of the nonlinear dynamics of the valve, furthermore the stable and unstable regions of the operation are also determined.

Figure 1: Direct spring loaded pressure relief valve and its mechanical sketch

2 Analysis of the system

To derive the system of differential equations of the pressure relief valve, the mass-spring-damper model, the continuity and the Navier-Stokes equations were utilised. The obtained dimensionless model is the following:

$$\dot{y}_1 = y_2, \dot{y}_2 = -2\zeta y_2 - (y_1 + \delta) + \tilde{A}_{\text{eff}}(y_1)y_3, \dot{y}_3 = \beta \left(q - y_1\sqrt{y_3}\right).$$

Three different effective area approaches were taken into consideration; constant, linear and quadratic. The impact of the valve disk and valve seat was taken into account with the following equation: ation diagrams were constructed via the numerical solution. Based on the diagrams, stable, unstable and also bistable regions with hysteresis were identified. The regions are separated by super- and subcritical Hopf bifurcations.

Figure 2: The surface corresponding to the dynamic stability limit and the bifurcation diagram of the system for the quadratic effective area approach

In order to determine the type of the bifurcations, the Poincaré-Lyapunov constant was also calculated. Moreover the emerged limit cycles were determined numerically and also analytically, with the help of the central manifold reduction theory. The shift of the limit cycles in the phase portrait, regarding to the asymmetric nonlinearities, was corrected.

Figure 3: The type of the Hopf bifurcation at the dynamic stability limit, marked on the stability map corresponding to damping ratio $\zeta = 0.25$. Furthermore the obtained unstable limit cycle based on numerical and analytical calculations, and its corrected form (dashed line).

$$y_2^+ = -ry_2^-$$
.

3 Stability analysis

The linear stability analysis of the obtained system of differential equations were performed by means of Routh-Hurwitz criteria. During the nonlinear calculations, bifurc-

4 Summary

The parameter domains of safe valve operation were identified by linear stability analysis, supplemented by numerical and analytical nonlinear calculations. The nonlinear analysis shows the type of the Hopf bifurcation, the amplitudes of the limit cycles and the domains of the hysteresis.

Balancing Motorcycles at Zero Speed

ANDRÁS SZABÓ

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/I. Supervisor: Dénes Takács, associate professor, takacs@mm.bme.hu

Introduction 1

Nowadays engineers face challenging task when designing autonomous vehicles. These tasks are even more complex when the vehicle in question is a bicycle or motorcycle, because the dynamics of these vehicles are cannot be accurately described using in-plane models and the governing equation of the required spatial nonholonomic models cannot be handled analytically. Therefore a simplified mechanical model is presented that allows the design of a linear feedback controller that can stabilize the unstable vertical equilibrium position of the motorcycle at zero longitudinal speed.

The achievements of the automotive industry in the balancing of single-track two-wheeled vehicles are collected. Balancing of stationary two-wheeled vehicles using only the steering system is exclusively done by Honda, but they utilize negative trail. A balancing robot with positive trail that uses only the steering system for balancing is not yet developed according to my knowledge.

Applied methods $\mathbf{2}$

A simplified mechanical model is presented.

The linearised equations of motion of the new simplified model were calculated analytically using the Lagrangian equations of the second kind. The results were compared with that of the Whipple model.

Different control strategies were investigated including balancing using assigned steering angle and balancing with steering torque. The steering torque is obtained using a two-level controller: the higher level controller gives a desired steering angle, and the lower level controller gives the steering torque.

The linear stability of the system was investigated using the Liénard-Chipart stability condition in case of no time delay and by checking the eigenvalues of the system analytically in case of non zero time delay and checking the results using semi-discretisation.

Figure 1: The simplified mechanical model

The vertical equilibrium position can be asymptotically stable in case of the assigned steering angle and the PD controllers with and without time delay. Stability boundaries, stability maps and a critical time delay formula were found analytically. The stable control gains of the lower and higher level controllers were chosen using the parameters of the prototype small-scale vehicle model. A stability map can be seen in Figure 2.

Figure 2: The stability map

Most of the appropriate hardware was chosen, designed and manufactured for the experimental validation but due to time constraints, not all necessary task were completed that would allow for the measurements to be conducted.

Results 3

A simplified mechanical model is constructed that can be seen in Figure 1. The model consist of a two bar linkage system (front wheel and steering assembly, rear wheel and frame assembly) with two degrees of freedom (steering angle and roll angle).

Summary 4

Based on the simplified mechanical model, a linear feedback controller was designed that can stabilise the unstable vertical equilibrium of the vehicle at zero longitudinal speed using only the steering system. The theoretical results still need confirmation.

Aktív irodai szék szerkezetanalízise

SZŰCS ESZTER

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető:* Dr. Hénap Gábpr, adjunktus, henapg@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Dolgozatom tárgyát egy aktív irodai szék képzi, melynek célja, hogy megelőzze a hosszantartó ülés miatt kialakuló lehetséges egészségkárosodásokat. Ennek érdekében a felső része előre beállítható időközönként változatos mozgást végez, hogy megtörje a felhasználót érő statikus terhelést. A mozgatás az ülőlap 3 pontos alátámasztásával valósult meg, melyek közül kettőt függőlegesen lehet mozgatni, így maximum 8 fokos szöggel bármely irányba megdönthető a tornáztatás közben. Célom a szerkezet kritikus igénybevételű és túlméretezett részeinek feltérképezése.

1. ábra. Aktív irodai szék CAD modellje

2. Alkalmazott módszerek

A vizsgálatot mérés és végeselemes számítás segítségével végeztem el. A mérés során a szerkezet valós terheléseinek megismerése volt a cél. A prototípus ülőlapját mozgató aktuátorok áramfelvételét rögzítettem, amiből meghatározható az általuk kifejtett erő. Így a szerkezet és a felhasználó súlyából valamint a mozgás közbeni gyorsulásokból származó erőket is figyelembe vevő adatokat gyűjtöttem.

A végeselem modell felépítése és ellenőrzése után futtattam a szimulációt a kiválasztott pozíciókban. Viszonyításként megvizsgáltam egy statikus helyzetet is, majd a mozgás közbeni igénybevételekre koncentrálva végeztem a további számításokat.

3. Eredmények

Az eredmények kiértékeléséhez a HMH-féle egyenértékű feszültség értékeit és eloszlását elemeztem. A legkritikusabb alkatrésznek az üllőlap bizonyult, emellett jelentős igénybevételek jelentkeztek az alatta elhelyezkedő csatlakozó lemezben. A csukló, az aktuátorokat tartó lemezszerkezet és a csatlakozó csonk a terhelhetőség szempontjából rendelkezik tartalékokkal, ezek újra tervezésével optimalizálható a termék. A vizsgálat során gyűjtött tapasztalatok alapján jelentős fejlesztési lehetőség rejlik még a mozgás vezérlésében. A gyorsulásokból származó erők nagy mértékben csökkenthetők a mozgás szakaszosságának mérséklésével.

3. ábra. Az ülőlapban és az alatta elhelyezkedő alkatrészekben ébredő feszültségek

4. Összefoglalás

2. ábra. Mérés során rögzített áramfelvétel az idő függvényében

A jelenlegi konstrukció fejlesztésére több lehetőség is kínálkozik. Ezekre figyelmet fordítva csökkenthető a termék anyagigénye és költségei. Így alakítható ki a gyártásra alkalmas szerkezet, ami túlméretezések nélkül elbírja a fellépő terheléseket.

Parameter fitting and numerical sensitivity analysis of composite failure model

DONÁT TAKÁCS

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Szabolcs Berezvai, assistant professor, berezvai@mm.bme.hu Advisor: László Kovács (eCon Engineering), sr. simulation eng., laszlo.kovacs@econengineering.com

1 Introduction

Modelling the static failure of fibre-reinforced polymer composite laminates (FRP-s) is a challenging problem. It often requires the use of complex mechanical models with several parameters, which are usually determined from measurements – however both the process of fitting the parameters and the design of experiments can be intricate.

The goal of this thesis was to develop a robust and reliable parameter fitting method for first-ply composite failure models dealing with plane-stress state, and a general numerical method for quantifying the sensitivity of such models to variations and uncertainties present in the measurements.

2 Applied methods

For parameter fitting, an approach based on the Markov chain Monte Carlo (MCMC) algorithm has been developed. This includes a new probabilistic model for the Tsai-Wu failure model, which takes into account the uncertainty of the parameters and of the used measurement results.

The sensitivity of a certain parameter in an investigated model in this context has been defined as the variation of the fitted value of this parameter in a certain measurement stress state, with respect to variations in the material parameters. The steps of the developed sensitivity analysis method are based on the abstract representation of the plane-stress FRP failure models in three-dimensional stress space, where they describe a closed, convex surface.

By dividing the failure surface into sectors, systematically sampling these sectors, perturbing the samples and fitting the model to the resulting virtual measurement sets, the sensitivity value can be estimated numerically for the failure surface. Fig. 1 shows an overview of these steps.

3 Results

The developed MCMC fitting method can estimate the parameters and the variance of the Tsai-Wu model parameters accurately and robustly. It can also be generalized to other, similar composite failure models.

The general sensitivity analysis method has also been applied to the Tsai-Wu failure model. The results of one such sensitivity analysis can be seen in Fig. 2. The analysis has been ran with different settings for the failure parameters' variation (denoted as σ_{ε}), as this variation can influence the sensitivity greatly: a result corresponding to a higher σ_{ε} is shown in Fig. 3.

Figure 2: Sensitivity δ_j of the F_{12}^* Tsai-Wu parameter to different stress states, for $\sigma_{\varepsilon} = 5\%$.

Figure 1: Steps of the numerical sensitivity analysis illustrated.

Figure 3: Sensitivity δ_j of the F_{12}^* Tsai-Wu parameter to different stress states, for $\sigma_{\varepsilon} = 20\%$.

Both the parameter fitting and the sensitivity analysis methods have been implemented as a stand-alone *Python* library that can be used in a practical setting, for the design and evaluation of failure experiments.

Rugalmas robotkar mechanikai modellezése

TATAI ÁLMOS GÁBOR

Gépészmérnöki MSc Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2021/2022/I. Témavezető: Dr. Kovács Ádám, egyetemi docens, adamo@mm.bme.hu

1. Bevezetés

A robotkarok egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy mekkora pontossággal, mennyi idő alatt képesek beállni egy adott pozícióba. A megfelelő pontosság érdekében ki kell küszöbölni a robotkar dinamikus terhelésekből adódó rezgéseit. Az iparban általánosan használt robotkarok esetén ezt azzal oldják meg, hogy a kar nagyon vastag, így merevnek tekinthető. Azonban ez növeli a robotkar tömegét, és nagyobb teljesítményű mozgató motorokat igényel.

Erre a problémára ad megoldást a rugalmas robotkarok használata. A robotkarokat vékonyra és könnyűre építjük. A dolgozat célja, hogy megvizsgáljuk, milyen problémák lépnek fel a rugalmas robotkarok használata során, és áttekintsük, milyen megoldási lehetőségek léteznek.

1. ábra. Rugalmas robotkar modellje [1]

2. Alkalmazott módszerek

Felírjuk a rugalmas robotkar mozgásegyenletét Euler-Bernoulli rúdelmélet használatával. A robotkart rá merőleges erővel terheljük.

$$IE\frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = F(x,t)$$
(1)

3. Eredmények

Megvizsgáljuk a robotkart működtetési környezetében, azaz megpróbálunk vele egy kívánt szögpozícióba beállni. Először L/D = 20 arányú robotkart alkalmazunk. Ebben az esetben a beállás után nem volt megfigyelhető számottevő rezgés.

Később L/D = 100 arányú, nagyon vékony kart szimuláltunk. Ebben az esetben megállás után nagy amplitúdójú rezgéseket figyeltünk meg.

2. ábra. A $D = 10 \ [mm]$ átmérőjű rugalmas robotkar kezdőés végpontjának szöghelyzetei kis időtartamú nyomaték gerjesztés esetén

A 2. *ábrán* megfigyelhető rezgés már számottevően csökkenti a robotkar beállási pontosságát. A pontos beállást szabályozással lehet megvalósítani.

4. Összefoglalás

Rugalmas robotkarok használatával több szempontból is megtakarítást érhetünk el. Kevesebb anyag kell a robot gyártásához, illetve kisebb teljesítményű motorok is elegendők, ezáltal a robot gyártása és üzemeltetése is olcsóbb lesz. Azonban ahhoz, hogy a rugalmas robotkarok az iparban széleskörűen elterjedhessenek, meg kell oldani a kar beállása során keletkező rezgéseket. Ehhez optimális szabályozási eljárást kell használni.

Az erőgerjesztéses esetet meg tudjuk oldani analitikusan és végeselemes módszerrel is. A két módszerrel kapott eredmények közel vannak egymáshoz, ezért a továbbiakban végeselemes módszert alkalmazunk.

Elvégezzük a végeselemes számítást Euler-Bernoulli és Timoshenko rúdelmélet használatával is, és az eredményeket összehasonlítjuk. A két rúdelmélet között csak vastagabb rudak esetén tapasztalunk különbségeket. Mivel a rugalmas robotkarok esetén vékony rudakat vizsgálunk, ezért a használt rúdmodellnek nem lesz hatása az eredményekre.

Hivatkozások

[1] F. Rakhsha, A. Goldenberg, Dynamics modelling of a single-link flexible robot, 1985 IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, MO, USA, pp. 984-989, 1985

The nonlinear dynamics of human balancing with modelling ankle stiffness

RUDOLF TÓTH

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Gábor Stépán, professor, stepan@mm.bme.hu

1. Introduction

Human balancing may be described as the stabilization of the human body around an unstable equilibrium. The reaction time introduces time delay into the equations of motion. The most common and simplest example is quiet standing.

1. Figure Mechanical and neural model of quiet standing

The ankle is the most important joint in this case, so its nonlinear model reveals interesting phenomena. The nonlinear model was created using measurements available in the literature (M. Vlutters et.al. Direct measurement of the intrinsic ankle stiffness during standing).

2. Applied methods

First numerical simulations were done with the fourth order Runge-Kutta method. This revealed stable limit cycles and loss of stability with large initial conditions for different cases.

During loss of stability in human balancing Hopf bifurcation can occur. The time delay was treated as the bifurcation parameter. The periodic solution predicted by the Hopf bifurcation can be investigated using the method of multiple scales.

3. Results

The amplitude of the limit cycles calculated with the method of multiple scales matches the simulations well.

3. Figure Simulated and calcualted limit cycle amplitudes

4. Summary

The dependence of limit cycle amplitudes on balancing parameters P, D reveals that the Hopf bifurcation is supercritical in this case. The nonlinear model explains postural sway and loss of stability due to large perturbations.

The model of ankle stiffness and active torque can be generalized for more complex balancing tasks, such as the balance board model. The simulation of this case also shows similar phenomena.

2. Figure Measured and fitted ankle stiffness model

Előzetes döntéselőkészítési adatbázis létrehozása energiaelnyelő elemek optimális *Lattice* szerkezettel való kitöltésére

VARGOVICS TAMÁS

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető*: Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, kossa@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Napjainkban, a tudomány és a technológia magas szintű fejlettsége mellett is rengetegen vesztik életüket, vagy szenvednek súlyos sérüléseket közúti balesetek során. Véleményem szerint érdemes lenne nagyobb mértékben kihasználni a modern, additív gyártástechnológiák adta előnyöket, amivel tervezhető tulajdonságú alkatrészeket hozhatunk létre. Dolgozatom motivációja tehát a közlekedésbiztonság javítása, méghozzá passzív, *Lattice* szerkezettel kitöltött energiaelnyelő elemek vizsgálatán, fejlesztésén, valamint egy döntéselőkészítési adatbázis létrehozásán keresztül. Ennek segítségével reményeim szerint könnyedén ki lehet majd választani a megfelelő struktúrát egy adott felhasználási területre.

2. Alkalmazott módszerek

Első lépésben az adatbázis kialakításához szükséges végeselem szimulációkat végeztem el, öt különböző, kétdimenziós *Lattice* struktúrára. Az analízis típusa tranziens időfüggő volt, adott deformáció esetén vizsgáltam különféle paramétereket, függvényeket, többek között a Poisson-tényező-elmozdulás, feszültség-fajlagos alakváltozás, valamint az elnyelt energiaelmozdulás függvényt. Kiértékelés után a Rugalmassági modulusz, a Poisson-tényező, valamint a sűrűség segítségével homogén anyagjellemzőkkel helyettesíthetjük a szerkezeteket.

1. ábra: Teljes deformáció Anti-tetra chiral méhsejt esetén

Ezután egy adott geometriához, ami ebben az esetben egy nyílt bukósisak volt, választottam megfelelő *Lattice* szerkezetet, az európai, bukósisakokra vonatkozó szabvány (*ECE 22.05*) alapján.

A második nagyobb feladat egy, a szabványban megadott terheléssel egyenértékű végeselem szimuláció összeállítása volt a választott sisakokra. Ezt az adatbázis, a homogenizáció gondolatmenete alapján kapott anyagjellemzőkkel létrehozott, explicit időfüggő, kétdimenziós, tengelyszimmetrikus vizsgálat keretein belül végeztem el.

3. ábra: A sisakra felállított végeselem szimuláció

3. Eredmények

Alapvetően a gyorsulás csúcsértékére, az időfüggvényének jellegére, valamint az elnyelt energia maximális értékére voltam kíváncsi. Elmondható, hogy a gyorsulás-idő függvény jellegre jó egyezést mutat az ilyenkor megszokott kalapgörbékkel, csúcsértéke nagyban függ az anyagjellemzőktől, leginkább a Rugalmassági modulusztól, csakúgy, mint az elnyelt energia.

4. ábra: Gyorsulás-idő függvény

2. ábra: Lattice szerkezettel kitöltött bukósisak modell

A sisak energiaelnyelő részének kitöltését *nTopology* programban hajtottam végre, felületkövető, automatikusan beillesztett struktúrákkal.

4. Összefoglalás

Összességében elmondható, hogy a létrehozott adatbázis segítségével számos eltérő peremfeltételű szimuláció rövid időn belül, kellően pontos eredménnyel elvégezhető, valamint egy jó alap lehet későbbi, összetettebb döntési mátrixok létrehozásához, további dimenziókat hozzárendelve, például különböző alapanyagok formájában.

A reakcióidő és a kritikus időkésés kapcsolata emberi egyensúlyozás közben

VIGH ZOLTÁN

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. Témavezető: Molnár Csenge Andrea, doktorandusz, csenge.molnar@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Napjainkban egyre fontosabb az emberi egyensúlyozás vizsgálata. Az idősödő társadalom hatására az egyensúlyvesztéshez köthető balesetek számának növekedése figyelhető meg. Különböző egyensúlyozási feladatok vizsgálata során, a mechanikai-matematikai modellből kapott eredményeket kísérleti eredményekkel összevetve jobban meg tudjuk érteni az emberi test központi idegrendszerének működését. Ezen ismereteket később egyensúlyozást segítő, fejlesztő tárgyak és gyakorlatok formájában lehetséges kamatoztatni. Az emberi test állítható geometriájú egyensúlyozó deszkán egyensúlyozása áll a vizsgálatok középpontjában. Felépítjük a feladat kettő (2 dof) és három (3 dof) szabadsági fokú modelljét, ahol az emberi testet inverz, illetve kettős inverz ingaként vesszük figyelembe. A központi idegrendszert késleltetett arányos – deriváló szabályozóval modellezem.

1. ábra. A három szabadsági fokú mechanikai modell

majd az elvégzett kísérletek eredményeivel összhangban megbecsüljük az egyes tesztalanyok reakcióidejét.

2. ábra A kritikus időkésés R-h₂ kombinációk függvényében

3. Eredmények

A mechanikai-matematikai modell és a kísérleti eredmények alapján megbecsültem a mérésben résztvevők reakcióidejét. 5 csoportra osztottam őket a kapott eredmények alapján. A kiszámított reakcióidőket tartalmazza az 1. táblázat. A kíséretek során megállapított átlagos reakcióidő 134 ms, amit jól közelítenek a kapott eredmények két szabadsági fok esetén.

Tesztcsoport	Reakcióidő (2 dof) [ms]	Reakcióidő (3 dof) [ms]	
Első csoport	132	66	
Második csoport	138	68	
Harmadik csoport	145	70	
Negyedik csoport	209	80	
Ötödik csoport	123	63	

1. táblázat: Az egyes tesztcsoportok becsült rakcióideje

4. Összefoglalás

Alkalmazott módszerek 2.

A dolgozat célja az egyes keréksugár (R) – lapmagasság (h₂) kombinációkra megjósolni az emberi test reakcióidejét. A mechanikai modell szabályozott mozgásegyenlete alapján megbecsüljük az egyes kombinációkra a kritikus időkésést,

Az egyensúlyozó deszka 2 szabadsági fokú modellje kicsi hibával állapítja meg a tesztalanyok reakcióidejét. A két paraméter, a keréksugár és a lapmagassággal tudjuk könnyíteni vagy nehezíteni a feladatot. A kapott eredmények összhangban a tapasztalati eredményekkel arra jutott, ha növeljük a kerék sugarát, akkor könnyül a feladat. A lapmagasság esetén a csökkentésével lehetséges egyre könnyebb feladatot beállítani.

INVESTIGATION OF STABILITY OF HIGHLY INTERRUPTED CUTTING OPERATIONS

DOMONKOS VIRÁG

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2021/2022/I. Supervisor: Dr. Dávid Hajdu, assistant professor, hajdu@mm.bme.hu

1. Introduction

This thesis investigates the stability of machining processes such as turning and milling. The modelling and stability analysis of these machining operations require the use of delay differential equations, since the cutting edges pass over the surface of the workpiece generated in the previous revolution of the tool. This way, the wavy surface left behind induces vibrations which reduce the quality of the surface finish. The goal of the stability analysis is to find the optimal parameters which allow for the fastest material removal – least machining time – without undesired vibrations.

2. Applied methods

In the first part the conventional method of generating stability charts is introduced, using the semidiscretization method. This allows for generating stability charts for milling operations with great precision, but with a cost of high calculation times. The results of this are used as benchmark for the main topic of this thesis, the highly interrupted cutting model.

During highly interrupted cutting, the cutting edges of the tool spend much more time in free oscillation than on actual cutting. This can occur if the tool has just a few cutting edges (2-4), and the depth of cut $-a_p$ – is low, for example during finishing operations.

Fig. 1. Mechanical model of highly interrupted cutting m: modal mass, c: damping coefficient, k: stiffness, t: current time instance, τ: past time instance,
T: time of one revolution, τ₁: time of free oscillation, τ₂: cutting time

In this model, the contact of the tool and workpiece is modeled as a collision, which allows for simplifications and results in a much faster calculation process. [1]

3. Results

At first, it was discovered that the highly interrupted model correlates well with the conventional model.

Fig.2. Comparison of the conventional model with semidiscretization (left), and the highly interrupted model (right). Stable regions are gray.

Also, some measurements were made in the laboratory of the *Department of Applied Mechanics*, from which one stability chart with measurement results can be seen in *Figure 3*.

Fig.3. Stability chart with measurement results. Green: stable points, red: unstable points, black: boundary

Fig.4 Vibration at an unstable point

4. Summary

The highly interrupted cutting model proved to be a powerful tool to generate stability charts for milling operations. It correlates well with measurements results, and it is as precise as the conventional model, while the calculation time is more than 50% less per point. The use of the highly interrupted model is highly recommended to consider when generating stability charts with many points if the circumstances allow.

Also, the highly interrupted model is extended to work with irregular tools, which means the cutting edges are placed at arbitrary angles along the circumference of the tool. These irregular tool geometries have a lot of potential to reduce machine tool chatter during milling.

Literature

- [1] R. Szalai és G. Stépán, "Lobes and Lenses in the Stability Chart of Interrupted Turning," Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, vol. 1, no. 3, 2006, p. 205.
- [2] T. Insperger and G. Stépán, Semi-Discretization for Time-Delay Systems, Springer, 2017.

Gyalogos bejáróhíd véges elemes szilárdsági vizsgálata

TRÁSER MIHÁLY

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2021/2022/I. *Témavezető*: Dr. Kovács Ádám, egyetemi docens, adamo@mm.bme.hu

1. Bevezetés

Ebben a szakdolgozatban egy gyalogos bejáróhíd teljes körű szilárdsági ellenőrzését végzem el, az ipari gyakorlatban is használt feltételeknek és szabványonak megfelelően. A bejáróhíd szilárdsági számításait a Matluka Ágoston készítette 2019-ben. Amennyiben szükség van rá javaslatokat teszek a felmerülő problémák kiküszöbölésére. Célom, hogy a témát alaposan körüljárva, a megkívánt szabványokat alkalmazva, ellenőrizzem a bejáróhidat szilárdsági szempontoknak megfelelően.

1. ábra: A modell

2. Alkalmazott módszerek

A szabványok áttekintését és a modell elkészítését követően, meghatároztam a terhelési eseteket, a peremfeltételeket és legeneráltam a véges elemes hálót. Számításaimat ANSYS Workbench 2021/R1 véges elemes szoftverben készítettem. Az értékek pontosításának érdekében konvergenciavizsgálatot is

végeztem. A számítási idő csökkentésének érdekében a hidat hosszirányban megfeleztem és megfelelő peremfeltételekkel láttam el.

3. Eredmények

A szilárdsági számításkor vizsgálom a szerkezetben fellépő HMH-féle egyenértékű feszültségeloszlást, és a szerkezeti deformáció értékeit.

3. ábra: HMH-féle egyenértékű feszültség eloszlás

1. ábra: Szerkezeti deformáció

4. Összefoglalás

Végeredményben hasonló függvényeket és ábrákat kaptam mint a hatóság által elfogadott számításokban. Azonban végeredményeim kissé eltérnek a hatósági adatoktól, ezen eltéréseket indokoltam és javaslatot tettem a felmerülő probléma kiküszöbölésére.

2. ábra: A véges elemes háló

