## Delaminált kompozit körhengerhéj horpadás analízise

#### **ANGERMAN FERENC**

Gépészmérnöki MSc, Alkalmazott Mechanika Specializáció, 2018/2019/II. *Témavezető*: Dr. Kossa Attila, egyetemi docens, <u>kossa@mm.bme.hu</u> *Konzulens*: Juhász Zoltán, óraadó tanársegéd, <u>juhasz@mm.bme.hu</u>

#### 1. Bevezetés

A múlt évszázad korai évtizedeiben, a repülőgépipar fellendülésével megnőtt az igény a vékonyfalú héjszerkezetek mechanikájának pontosabb megismerésére. Viselkedésük leírására széleskörű analitikus és numerikus módszerek állnak rendelkezésre. Vékonyfalúnak azt a héjat nevezhetjük, melynek görbületi sugara hússzor nagyobb, mint a falvastagsága. Ennek speciális esete a vékonyfalú hengeres héj, melynek egyik irányban a görbületi sugara végtelenül nagy. Az ilyen szerkezetek egyik veszélyes tönkremeneteli módja a szerkezeti stabilitásvesztés, horpadás: a kritikus terhelés elérésekor a henger már több egyensúlyi helyzetet felvehet, instabillá válik a viselkedése. A dolgozatom célja egy végeselemes algoritmus létrehozása, mely képes horpadásanalízist végrehajtani egy vékonyfalú, delaminációt tartalmazó kompozit hengeren.



1. ábra. Vékonyfalú henger végeselem modellje

#### 2. Alkalmazott módszerek

A mechanikai modellt a klasszikus laminált lemezelmélet (*CLPT*) héjakra való kiterjesztésével írtam le. Az alakváltozásmező és az élterhelések meghatározása után felírtam az alakváltozási energiát és a külső erők munkáját. Az elemi merev-

#### 3. Eredmények

Először a laminált algoritmus validálását tűztem ki célul, a szakirodalomban található analitikus eredmények, illetve kereskedelmi végeselemes szoftver felhasználásával. Ezután következhetett a delaminációt leíró algoritmus validálása, ahol a delaminációs hosszparamétert zérusként kezelve sikerült viszszaadnom a laminált eredményeket. Végül a szerkezet érzékenységét vizsgáltam a különböző paramétereinek változására.



2. ábra. A delamináció hosszának hatása



3. ábra. A különböző rétegrendek hatása a relatív falvastagság fényében

### 4. Összefoglalás

ségi mátrixokat ezek diszkretizácójából származtattam.

Ezekből a négycsomópontos lineáris elemek létrehozása után összeállítottam a globális anyagi- és geometriai merevségi mátrixot. Ezután megoldottam az alábbi sajátérték-sajátvektor problémát. Külön algoritmussal kezeltem a laminált ("ép") és a delaminációt tartalmazó hengert.

 $(\mathbf{K} + N_{crit}\mathbf{K}_{G})\mathbf{U} = 0$ 

#### .

Összegezve az eredményeket elmondható, hogy a laminált hengert leíró végeselemes algoritmus megfelelően modellezi a valóságot, azonban a delamináció kezelés szélső peremértéken problémás a kód jelenlegi formájában. Pontosításhoz további feltételek applikálása szükséges. Ezen kívül nagy fejlesztési potenciál van a modellben funkcióbővítések szempontjából.



## Szökdelő mechanizmusok periodikus mozgása és lépésenkénti szabályozása

#### BÁLINT GÁBOR

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2018/2019/II. *Témavezető:* Dr. Zelei Ambrus, tudományos munkatárs, zelei@mm.bme.hu

#### 1. Bevezetés

A bipedális mozgás dinamikájának megértése kiemelten fontos a humanoid robotok tervezésénél, az emberi egyensúlyozás vizsgálatánál és a talaj-láb kontaktus okozta sérülések elkerülése érdekében. Szakdolgozatomban a bipedális mozgás egy egszerűbb modelljén, a két tömegből álló pattogó modellen vizsgáltam a szakirodalomban kevésbé felderített szabályozást és a periodikus pályák keresését.



1. ábra. A vizsgált modell

Az 1. ábrán látható modell alsó  $m_2$  tömege minden földetéréskor teljes mozgási energiáját elveszíti a rugalmatlan ütközés miatt. Ezt az energiaveszteséget a szabályozott negatív  $d_{\rm G}$  csillapítás tölti vissza a rendszerbe, így az periodikus ugráló mozgást végez. A mozgás során a talaj kontaktus miatt szakaszosan fellépő kényszer miatt a rendszer szakaszosan holonom, hibrid rendszer, melyben a folytonos leíró függvényekben a földetérés pillanatában diszkrét leképezés van.

#### Alkalmazott módszerek $\mathbf{2}.$

Az ugrási magasságok szabályozása érdekében egy PD kontrollert alkalmaztam, ami az előző ugrások értékei alapján szabályozta a  $d_{\rm G}$  csillapítás értékét.

#### 3. Eredmények

Az alkalmazott PD szabályozó a stabilitás térkép alapján választott megfelelő  $P_{\rm gain}$  és  $D_{\rm gain}$  értéke mellett stabil és gyors működést tett lehetővé változó magasságú ugráló mozgás esetén is.



2. ábra. A modell szabályozott mozgása

A belövéses módszerhez használt Newton-Raphson iteráció és a szimplex kereső algoritmus minden esetben helyes és azonos eredményt adott a periodikus pályák kezdeti feltételeire.



3. ábra. A modell periodikus pályáinak fázisképe

#### Összefoglalás

A periodikus pályák keresésére a numerikus anlízisben gyakran alkalmazott belövéses módszert (shooting method) használtam. Ennek lényege, hogy a fázistér azon pontjait keresi, melyekből a megoldást indítva a rendszer állapotváltozói egy periódus után ugyanezeket az értékeket veszik fel. Ehhez a periódus kezdeti és végpontja közötti távolságfüggvény zérushelyét kerestem Newton-Raphson iterációval, illetve egy beépített MATLAB függvénnyel.

Az alkalmazott PD szabályozás a stabilitási térkép alapján kapott tartományon belül stabil, gyors és pontos működést biztosított, a belövéses módszer pedig megbízhatóan működött és minden esetben megtalálta a periodikus pályát. Az ebben a szakdolgozatban vizsgált modell alapvető tulajdonságai megegyeznek a bipedális mozgás bonyolultabb modelljeiével, így a bemutatott módszerek később az emberi járás más modelljeire is alkalmazhatóak lesznek.



## Nonsmooth dynamics of towed wheels

### **ÁGOSTON BARTOS**

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2018/2019/II. Supervisor: Dr. Máté Antali, research fellow, antali@mm.bme.hu

#### 1. Introduction

The study of wheel dynamics is crucial in mechanical engineering life in order to be able to decide whether objects are rolling or slipping. In this document I investigated a wheel, which was towed with a constant velocity. The system was given an initial position and slipping velocity after it was left alone without any excitation. Due to friction, the slipping velocity was decreased, and after a time it dropped to zero.



1. Figure: Model of the towed wheel

#### 2. Applied methods

Based on the second order Lagrange equations and the Newton equations, the following equation of motion will apply for slipping case (where  $m_x$  and  $m_y$  are constants):

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_{x} \\ \dot{u}_{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{j} \sin(\Psi) \frac{v_{j} \sin(\Psi) + u_{y}}{l} + F_{sx} m_{x} \\ v_{j} \cos(\Psi) \frac{v_{j} \sin(\Psi) + u_{y}}{l} + F_{sy} m_{y} \\ -\frac{v_{j} \sin(\Psi) + u_{y}}{l} \end{bmatrix}$$

I used two different methods, to solve the differential equations: the explicit first order Euler, and the explicit fourth order Runge-Kutta methods. I tested the equations with two different friction force models. The first method I used was the well-known Coulomb model, and afterwards I investigated the effect of friction force calculated from the creeping model's equations.

#### 3. Results

To begin with I examined some limitations of the applied differential equations solver methods. After it, I observed the behaviour the two friction force model, and I compared these with different parameters.



2. Figure: The phase portrait of the system, with the attracting and repelling directions, at a given state

Finally, I checked if the system is able to roll permanently, or if this is just a temporary unstable state, when the slipping velocity decreases to zero. The simulations were performed with several different physical parameters, to find the typical stability states of the wheel.

#### 4. Summary

Based on the developed codes, with given parameters, the motion of an ideal towed wheel is predictable. If the physical parameters are defined, it is also predictable, that at which angle of the rod can the wheel stick permanently. By locating the attracting directions, the angle of the velocity vector on the phase plane before rolling can also be determined. The dynamics of wheels is a rather complex, and important (for example at vehicle dynamics) topic, so the paper is an introduction of it. However, I have investigated the problem, from many different aspects, thus this study is an adequate base for further inspections of the topic.

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



## Physical models of slip detection in tactile robotics

Dániel Gángó

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2018/2019/II. Supervisors: Dr Robert Szalai, senior lecturer, University of Bristol, r.szalai@bristol.ac.uk Dr Ambrus Zelei, research associate, zelei@mm.bme.hu

### 1 Introduction

#### The sense of touch, or tactile sensing, is essential for physical interaction with our environment. In robotics, some form of tactile sensing is therefore indispensable to achieve dexterous manipulation of physical objects or safe human-robot interaction.

The objective of this thesis was to develop a working mechanical model of the TacTip sensor (Figure 1), which is a biologically inspired (biomimetic) sensor developed at Bristol Robotics Laboratory. This constituted of the construction of a static and a dynamic model. The focus of the dynamic model was on modelling the frictional slip of the sensor, more precisely, the onset of frictional slip.



Figure 1: The TacTip sensor

The TacTip was built based on previous research showing that the Merkel cell complex of sensory receptors work together with the structure of the intermediate ridges in the skin to provide edge encoding of the contacted surface. The sensor mimics this working mechanism by substituting the intermediate ridges with internal pins on the underside of a thin, flexible, 3D-printed skin-like rubber membrane. This membrane forms a half-sphere shape which is filled with a clear, highly compliant polymer blend that has similar mechanical properties to the tissues under the human skin. The pins deform when an object is contacted and their movement is tracked by a camera.

#### 2 Approach

The mechanical model of the sensor consists of a 2D semicircle, connected to a rigid base at its two endpoints. The shape of the semicircle is approximated with rigid line elements, which are connected by rotary joints, with torsional springs and dampers at the connections, as show in Figure 2.

The investigation of the slip of the sensor was carried out with two different friction models. One friction model was the simple Coulomb friction law, and the other was the generalised spinodal law, which is one of the many rate-andstate friction laws. In general, rate-and-state friction models are the ones that use the normal force, the sliding velocity and one or more additional state variables to determine the friction force. These state variables have their own internal dynamics in the form of first order differential equations.

#### 3 Results

The detection of the onset of the slip was successfully carried out with the use of the generalised spinodal law. The model setup for the simulation is shown in Figure 3, the simulation result is shown in Figure 4.



Figure 3: The model setup with the sensor pushed against a body with mass m = 0.1 kg, and with an external force  $F_{\text{ext}} = 2t$  N acting on the body in the horizontal direction.





Figure 2: The modelling approach

Figure 4: The net force acting on the body, with the dashed line indicating the detected onset of slip.



## A KERESZTIRÁNYÚ MEGNYÚLÁS KÍSÉRLETI ÉS NUMERIKUS VIZSGÁLATA POLIMER HABOK HIPERELASZTIKUS MODELLEZÉSE ESETÉN

INOKAI BENCE

Gépészmérnöki BSc, Gépészeti Fejlesztő Specializáció, 2018/2019/II. *Témavezető:* Berezvai Szabolcs, doktorjelölt, berezvai@mm.bme.hu

#### 1. Bevezetés

A polimer habok felhasználhatósága igen sokrétű. Kiváló energiaelnyelési képességük és rugalmasságuk miatt széles körben elterjedtek a csomagolástechnikában, valamint matracok, illetve ülések alapanyagaként szolgálnak. Ezenkívül, mivel a hab nagy része valamilyen gáz ezért jól használható szigetelésként, illetve könnyű szendvics szerkezetek maganyagának is kiváló, alacsony sűrűsége és kis tömege miatt. Tömeges alkalmazásuk miatt egyre fontosabbá válik a mechanikai viselkedésüket jól leíró anyagmodellek alkotása, illetve a meglévők finomítása. Ez a dolgozat azt vizsgálja, hogy milyen pontossággal képes leírni az alkalmazott hiperelasztikus modell, egy a kereskedelemben kapható, matracokhoz használt, poliuretán hab anyagi viselkedését abban az esetben mikor a keresztirányú nyúlását elhanyagoljuk, illetve ha azt figyelembe vesszük. Nyitott cellás habok modellezése során ugyanis a Poisson-tényezőt sok esetben zérussal közelítik, tehát a keresztirányú nyúlást elhanyagolják, ami ronthatja a hiperelasztikus modell pontosságát.

#### 2. Alkalmazott módszerek

Az anyagmodell illesztéshez a habmintákon egytengelyű nyomó, az illesztés további vizsgálatához pedig öt különböző geometriájú 3D nyomtatott nyomófejekkel benyomódási teszteket végeztünk, melyek eredményeit a végeselemes szimulációk eredményeivel vetettünk össze. A dolgozat fontosabb lépéseit 1. ábra szemlélteti.



#### 3. Eredmények

A 2. ábra a végeselemes szimulációk és a mérések eredményeit veti össze. Jól látszik, hogy a henger geometriájú nyomófejet leszámítva a keresztirányú nyúlást figyelembe vevő  $(\nu \neq 0)$  anyagmodellel készített szimulációk eredményei jobban közelítik a mérések során kapott erő-benyomódás (F-h) görbéket, mint a  $\nu = 0$  közelítéssel kapottak.



2. ábra. Mérési és VEM eredmények összehasonlítása

## 4. Összefoglalás

Összességében megállapítható, hogy bár a hiperelasztikus anyagmodellt egytengelyű mérési eredményekre illesztettük a végeselemes szimulációk jól közelítették a kéttengelyű benyomódási mérések eredményeit. Az is megfigyelhető, hogy a keresztirányú nyúlás figyelembevétele jelentősen növelheti a melimen heleminte meghamilesi sigellendősén elemésék ere

ti a polimer habminta mechanikai viselkedésének leírásához használt hiperelasztikus modell pontosságát.

1. ábra. A dolgozat főbb lépései



## Application of cohesive zone modeling for peeltest simulation

### NÓRA MÁRIA NAGY

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2018/2019/II. Supervisor: Dr. László Szabó, professor, <u>szabo@mm.bme.hu</u>

#### 1. Introduction

Modeling crack propagation became important in the last few decades. Most investigations are based on a theory called Cohesive Zone Modeling. The principle of this model is that the traction near the crack interface can be prescribed as a function of separation. There are already commercial FEM softwares, that have implemented a special type of element (called CZ element) to model crack propagation. The biggest problem with these simulations is that it is not so easy to define the properties of the cohesive element. One way to find the parameters to simulate with is to perform peel tests and run simulations repetitively with different set of cohesive zone parameters until the simulation gives the same force-displacement curve as the peel test. This method is rather time consuming. Therefore, the aim of this thesis is to give an alternative of FEM peel test simulation in different levels, to find the right parameters of the cohesive zone.



1. Figure: Peeltest setup

#### 2. Applied methods

The cohesive zone can be modeled as a Winkler foundation, and the equations for the bending of the Bernoulli beam established for each segment of the traction-separation curve. This model assumes small deformation, therefore it is not widely applicable.

The second method uses the minimum potential energy method to establish the equations of Peeling. Different potentials are implemented to characterize the traction -separation relation at the crack tip. The derived boundary value problem is solved using shooting method in matlab.

#### 3. Results

The peeling force is plotted in the function of the end displacement of the peeled film (See Figure 2.). in case of a 90° peeling. The results of the FEM simulations and the numerical calculations agree well with each other.



## 2. Figure: Force-displacement relation obtained by FEM and solving the euqations of peeling.

The difference can be caused by the different shapes of the traction separation curves, and the fact, that the equation obtained by the theory of energy minimum neglects mode II peeling (separation caused by shear force).

#### 4. Summary

The calculations described in the thesis can be used as a starting point to match the simulation parameters to a measurement. However, the obtained values should only be used as an estimation, smaller modifications need to be done with the help of FEM to find the exact simulation parameters.

In order to make the presented model more accurate, further improvements can be done in three main aspects. First, by taking the plastic deformation of the peeled film into account. Second, by implementing an interaction potential function that takes mixed mode lamination into account. The model can also be extended to suit hyperelastic materials using Neo-Hookean material model.

The peel test is also modeled using 2 different FEM software (Comsol and Leguan). The results of the calculations are compared to the FEM simulations.

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



## Human excitation of a spherical pendulum

## BENCE MÁTÉ SZAKSZ

Mechanical Engineering Modelling MSc, Major in Solid Mechanics, 2018/2019/II. Supervisor: Dr. Gábor Stépán, Professor, stepan@mm.bme.hu

#### 1. Introduction

A known folk game is the pendulum prediction when the motion of a ring, which is hanging on a thread, is observed while the end of the thread is held by the diviner for a long time. After a while, the pendulum starts swinging, and it either moves as a planar pendulum or it moves along a circular path as a conical pendulum. It seems to be random which motion stabilizes. This phenomenon gave us the idea of creating a mathematical model that can describe the human position control while the operator is holding a pendulum at a given point.

#### 2. Applied methods

The problem is approached from two directions: first the parametric excitation of the pendulum is examined, when the feedback from the pendulum to the movement of the hand is neglected (Fig. 1), and after that the hand-pendulum system is investigated as a fully coupled system (Fig. 2).



# 1. Figure The model of the parametrically excited pendulum

In the first part of the thesis, the human position control is examined in the presence of weight compensation, and the stability charts in the plane of control gains are constructed. The linear model of human control is extended with the delay of human reaction time and with the nonlinearities related to the threshold of the sensitivity of human sensors. After that, the human control model is connected to the constraint of the spherical pendulum and the motion of the parametrically excited pendulum is examined. In the second part of the paper, the stability of the coupled hand-pendulum system is examined considering different controllers. First, using an in-plane model, the different types of controls are compared and then the two simplest ones are selected, where the effect of the human reaction time is taken into account as well. Finally, the model is extended to describe spatial motion and numerical simulations are run.



2. Figure The model of the coupled hand-pendulum system considering human control  $(F_x, F_y, F_z)$ 

#### 3. Results

In the case of the parametrically excited pendulum, we could not identify any clear evidence for the existence of either a stable planar oscillation or a stable oscillation leading to a circular path. However, considering collocated PD control in the case of the coupled hand-pendulum system, the critical delay time was found in the range of the human reaction time. Furthermore, the stability boundary is supercritical. When the control parameters were inside the stable region (point A in Fig. 3) in one direction and outside (point B) in the other direction then planar motion emerged, while setting the control parameters of both directions to unstable combinations (point B) resulted out-of plane motion along a circular path.



3. Figure Examined points at the Hopf bifurcation

boundary. Numbers: number of unstable characteristic roots

#### 4. Summary

Therefore, the possible physical explanation of the ring game is that the diviner will predict a girl or a boy when the used control is unstable in both horizontal directions or only in one direction, respectively.

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

