

Oponentský posudek disertační práce Ing. Jana ŠPIČKY

On the development of a virtual human body model based on multibody principle

Předložená disertační práce o rozsahu 130 stran je věnována vývoji matematického modelu člověka sestaveného pomocí soustavy mnoha tuhých těles vázaných kinematickými dvojicemi. Takto navržený model umožňuje vyšetřovat základní dynamické a kinematické charakteristiky jednotlivých těles systému na základě definovaných hmotnostních charakteristik, geometrických rozměrů a počátečních podmínek analyzované soustavy. Prezentovaný model lze efektivně využít pro numerické simulace zohledňující interakci modelu člověka s bariérou.

Práce je členěna do 7 kapitol. V první kapitole autor popisuje prostředky a metody, které následně využívá pro splnění deklarovaného cíle disertační práce, kterým je sestavení počítačového kódu pro analýzu dynamického chování modelu člověka při kontaktu s bariérou. Dle mého názoru by si cíle předkládané práce zasloužily samostatnou kapitolu. Dále by bylo vhodné zvýraznit v čem se předložená práce odlišuje od běžně publikovaných postupů a v čem lze spatřovat její originalitu či novost.

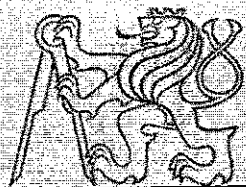
V druhé kapitole disertant zevrubně popisuje v současnosti používané modely člověka sestavených na bázi tuhých i poddajných těles. S ohledem na zvyšující se nároky na bezpečnost dopravy je v odborné komunitě sestavení věrohodného modelu lidské postavy velmi akcentované téma. Je patrné, že předložená disertační práce se zabývá aktuálním tématem a má potenciál být využita pro zvýšení pasivní bezpečnosti v dopravě. Bohužel kvalita některých převzatých obrázků v této kapitole je diskutabilní. Uvítal bych, kdyby k jednotlivým modelům bylo přiřazeno kinematické schéma, nebo alespoň definován počet stupňů volnosti. (např. Obr. 2.29c,b)

Ve třetí kapitole autor uvádí postupy, které použil pro sestavení matematického modelu člověka. K této kapitole mám několik dotazů či připomínek.

- 1) Antisymetrická matice úhlové rychlosti je vyjádřena v jakém souřadnicovém systému?
- 2) Můžete uvést rozdíl mezi Lagrangeovými rovnicemi prvního druhu, druhého druhu a smíšeného typu?
- 3) Za předpokladu že používáte Lagrangeovu funkci, jaké síly jsou obsaženy ve vektoru Q ?
- 4) Je rovnice (3.23) korektní?
- 5) V jakém souřadnicovém systému je definovaná síla F na Obr.3.3?

Dále bych doporučil zavést jiné označení jednotkové matice a sjednotil notaci v rovnici (3.36) a (3.39). Autor dále přehledně sumarizuje postupy použitelné pro zvýšení numerické stability odvozeného matematického modelu složeného z diferenciálních a algebraických rovnic. Uvedené metody následně aplikuje na model prostorového kyvadla. Bohužel nejsou zde uvedeny počáteční podmínky úlohy. Popis v tabulce 3.2 a poznámka v tabulce 3.3 je silně zavádějící. Výsledky uvedené na Obr.3.5 a 3.7 jsou téměř nečitelné. Grafická prezentace výsledků by si zasloužila větší úsilí.

Čtvrtá kapitola je věnována sestavení modelu člověka na úrovni soustavy mnoha tuhých těles. V této kapitole jsou dále definovány fyziologicky možné rozsahy pohybů jednotlivých kloubů lidského těla a způsob implementace těchto rozsahů do příslušné



kinematické dvojice vázající tuhá tělesa. S ohledem na deklarovaný cíl disertační práce, bych však v této kapitole očekával více informací, jak byl příslušný model sestaven. Kapitole by slušela prezentace programového kódu či vývojového algoritmu. Uvedené informace mi neumožňují si udělat názor, jak je model v prostředí jazyka Matlab sestaven. Na str.72 bych doporučil k revizi větu pod rovnicí (4.1). Zavedení proměnné momentové charakteristiky je vhodným postupem, jak ovlivnit rozsahy pohybů jednotlivých kloubů dle fyziologicky přípustných mezí.

- 6) Mohl by autor zaujmout stanovisko jak, a podle čeho byla volena směrnice jednotlivých charakteristik momentů aplikovaných v kinematických dvojicích?

V páté kapitole je uveden přehled postupů, kterými lze v rámci systému tuhých těles modelovat kontaktní síly při vzájemné interakci dvou těles. Proč jsou zde uvedeny metody, které nebyly použity v sestaveném modelu? Obr. (5.5) není v souladu s rovnicí (5.17). Podle jakého vztahu byly počítány kontaktní síly na Obr.5.7? V uvedené rovnici (5.33) jsou Lagrangeovy multiplikátory psány rozdílně oproti rovnici (3.39). Proč?

Šestá kapitola je věnována aplikaci sestaveného výpočtového nástroje na vytypované úlohy. Když už autor v disertační práci uvádí výčet integračních metod komerčního produktu MATLAB, rád bych se optal na jejich integrační schéma. Alespoň na to, které bylo při numerických simulacích reálně použito. Dále bych doporučil úpravu Obr.6.1. Proč byla v práci uvedena kapitola 6.3? Výsledky prezentované na str. 106 až 120 jsou silně diskutabilní. Chybí podrobný popis modelu. Grafická prezentace není na odpovídající úrovni. Proč autor nepoužil grafy znázorňující průběh souřadnic použitých k popisu modelu? Proč nejsou uvedeny průběhy sil? V jakých časových okamžicích byly jednotlivé snímky pořizovány? Dle mého názoru, na rozdíl od disertanta, si myslím, že prezentované obrázky nejsou příliš v souladu s realitou.

Závěrem konstatuji, že v předložené práci doktorand prokázal znalosti v oboru a schopnost samostatné vědecké práce ve smyslu platných pravidel pro hodnocení disertační práce. Mé připomínky nikterak nesnižují přínos předkládané práce. Při obhajobě bych uvítal diskusi zejména k připomínce 2,3 a 6.

Předloženou disertační práci pana Ing. Jana ŠPIČKY doporučuji k obhajobě před komisí pro státní doktorské zkoušky Fakulty aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni a po úspěšném obhájení práce udělení titulu Ph.D.

V Praze dne 12.12. 2020


prof., Dr., Ing. Tomáš Vampola
ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky

Dr. Ing. Pavel Polach
Nové technologie pro informační společnost
Fakulta aplikovaných věd
Západočeská univerzita v Plzni
Univerzitní 8
306 14 Plzeň

O p o n e n t n í p o s u d e k

disertační práce k získání akademického titulu doktor v oboru „Aplikovaná mechanika“

On the development of a virtual human body model based on multibody principle

(Vývoj virtuálního modelu člověka jako multibody systému)

Autor: Ing. Jan Špička

Školitel: doc. Ing. Luděk Hynčík, Ph.D.

Disertační práce se zabývá virtuálními modely lidského těla, které jsou využitelné pro modelování kolizních situací z oblasti rychlých dynamických dějů (např. kolizí s vozidlem). Hlavní náplní práce je aplikace multibody přístupu pro tvorbu modelu lidského těla jako prostorového systému vázaných tuhých těles. Při tvorbě modelu jsou využity koncepty Eulerových úhlů a Eulerových parametrů, v práci jsou uvedeny výhody a nevýhody těchto přístupů. Sestavené pohybové rovnice modelu člověka jsou rozšířeny o algoritmy pro numerickou stabilizaci, detekci kontaktu a výpočet vnitřních tuhostí v kloubech. Model lidského těla je použit na několika kontaktních úlohách, ve kterých je ověřováno jeho chování. Práce je psána v anglickém jazyce, je rozčleněna do sedmi kapitol (včetně úvodu a závěru).

V úvodu disertační práce je stručně uveden význam a metody počítačového modelování lidského těla pro účely použití při simulacích rychlých dynamických dějů, zejména v oblasti „automotive“. Účelem práce je vytvoření uživatelského softwaru pro simulaci globálního chování lidského těla při uvažování různých způsobů „zatěžování“. Hlavním cílem práce bylo odvodit všechny potřebné rovnice, ověřit algoritmy na jednoduchých benchmarkových příkladech a na základě dosažených poznatků vytvořit komplexní model lidského těla.

V kapitole 2 „Modely lidského těla – současný stav poznání“ („Human body models – State of the arts“) autor uvádí přehled používaných mechanických testovacích modelů člověka = figurín („dummy“). Figuríny jsou členěny podle směru nárazů, pro které jsou navrženy (čelní, boční a zadní nárazy). Speciálně je uveden přehled figurín dítěte. Dále jsou popsány rozdíly mezi virtuálními modely figurín a virtuálními modely lidského těla. Je uveden přehled virtuálních numerických modelů, ve kterém jsou modely rozděleny podle použité metody pro jejich modelování: multibody modely, modely založené na metodě konečných prvků a hybridní přístup kombinující obě tyto metody.

Třetí kapitola „MBS model – teorie“ („MBS model – Theory“) se zabývá teorií modelování dynamických systému jako soustav tuhých těles (multibody modelů). Je popsána multibody



metoda a vhodnost jejího použití. Jsou představeny teoretické základy výpočtů posuvu, rychlosti a zrychlení. Autor popisuje využití Eulerových úhlů pro parametrizaci prostorového pohybu. Je odvozena pohybová rovnice pro volné a vázané těleso a pro soustavu vázaných těles. Protože Eulerovy úhly mají své singulární polohy, čímž může nastat nestabilita při řešení úlohy, je uveden přístup založený na zavedení čtyř Eulerových parametrů. Je diskutován rozdíl mezi Eulerovými úhly a Eulerovy parametry, jsou analyzovány klady a zápory obou přístupů. Dále jsou uvedeny metody numerické stabilizace a jejich aplikace na jednoduchých příkladech, na kterých je provedena analýza citlivosti těchto metod a parametrů stabilizace. Účelem této analýzy je určit, která stabilizační metoda je vhodná pro který konkrétní typ úloh.

Ve čtvrté kapitole „MBS model lidského těla“ („Human body model – MBS“) je pomocí Lagrangeových rovnic druhého druhu s multiplikátory odvozena pohybová rovnice celého modelu lidského těla. Prostorový pohyb je popsán pomocí Eulerových parametrů. Model je škálovatelný a na základě zadání váhy a výšky (ostatní mechanické a geometrické veličiny se na základě těchto údajů automaticky dopočítají) umožňuje vytvořit model člověka příslušných „parametrů“. Model je naprogramován v systému MATLAB.

V kapitole 5 „Kontaktní analýza“ („Contact analysis“) je popsána kontaktní analýza v multibody modelování. Je uveden přehled algoritmů pro detekci kontaktu a metod pro výpočet kontaktní síly. V závěru kapitoly je představena metodika použitá ve vytvořeném modelu lidského těla.

Kapitola 6 „Aplikace“ („Application“) obsahuje počáteční výsledky dosažené s využitím konkrétních jednoduchých modelů (jedno volné a vázané těleso, dvojitě kyvadlo s vnitřní tuhostí) a s modelem celého lidského těla. Model lidského těla je tvořen 17 tuhými tělesy vázaných sférickými kinematickými vazbami, zahrnuje vnitřní tuhost a limitní rozsah pohybu kloubů, algoritmus pro detekci kontaktů a několik metod numerické stabilizace výpočtu. S modelem lidského těla není modelován žádný konkrétní dynamický děj ani není simulován žádný konkrétní případ, na několika příkladech je prezentováno jeho korektní a numericky stabilní použití.

Závěr“ (kapitola 7) obsahuje shrnutí disertační práce, dosažené výsledky a jsou v něm navrženy možnosti zdokonalení a možnosti využití vytvořeného modelu lidského těla.

Kapitoly 4 a 6 jsou vhodně zakončeny diskuzí k jejich tématu, která obsahuje velmi užitečné poznatky. Grafické výstupy výsledků výpočtů jsou přehledné.

Celkově je disertační práce Ing. Jan Špičky kvalitní a obsáhlá, je psána systematicky a přehledně. Do vytvoření virtuálního škálovatelného multibody modelu lidského těla bylo vloženo značné množství práce a bylo uplatněno mnoho odborných znalostí autora. Model bude možné, po jeho „správném“ konkrétním „nastavení“, použít pro simulaci konkrétního dynamického děje při konkrétním případě. Hlavním přínosem práce z odborného hlediska je aplikace odvozených či osvojených rovnic na vytvoření komplexního modelu lidského těla. Uživatelsky vytvořený model lidského těla je, na rozdíl od modelů, které jsou součástí některých komerčních softwarů, transparentní (nikoliv „černá skříňka“). Významné je i zahrnutí možnosti škálování modelu.

Výhledy dalších činností v návaznosti na disertační práci (uvedené v závěru), kterými jsou zejména hledání parametrů a validace pro řešení konkrétního dynamického děje při konkrétním případě a doporučení přeprogramování vytvořeného modelu do jiného softwaru než je programový systém MATLAB (z důvodu jeho některých omezení), jsou vhodným námětem k navázání na výsledky dosažené v disertační práci.

Na autora mám několik doplňujících dotazů, resp. poznámek, které nemají za účel zpochybňovat kvalitní práci:

1. V kapitole „Aplikace“ jste volil na základě dostupné literatury simulace určitých kolizních situací, kterým může být lidské tělo vystaveno. Na základě čeho jste volil parametry simulovaných situací? Bylo by možné porovnat Vámi dosažené výsledky s výsledky simulací dosaženými s jinými dynamickými virtuálními modely lidského těla?
2. Pro doplnění přehledu modelů lidského těla založených na multibody přístupu: jedním z modulů softwaru Alaska (vyvíjeném v IfM Chemnitz, Německo) je velice kvalitní škálovatelný model lidského těla pod názvem „Dynamicus“ (<https://www.ifm-chemnitz.de/en/products/human-machine-interaction/alaskadynamicus/>). Model z IfM Chemnitz je v disertační práci zmíněn, ale jeho vývoj pokračoval do formy tohoto nadstavbového modulu softwaru Alaska..
3. V práci se vyskytují některé drobné překlepy (např. místo „quaternion“ je správně „quaternion“), vynechaná písmena v textu, přehozená slova apod.

Publikační činnost autora je na dobré úrovni, kvalitativně i kvantitativně. Autor uvádí v disertační práci celkem 38 publikací souvisejících s tématem práce (2 z nich zatím publikovány nebyly), u devatenácti je hlavním autorem, u ostatních spoluautorem. Osm publikací je časopiseckých, 21 článků je uveřejněno ve sbornících vědeckých konferencí konaných v zahraničí (16) a v České republice (5) a 9 příspěvků na konferencích je uveřejněno ve formě rozšířených abstraktů. Všechny publikace jsou psány v anglickém jazyce.

Závěrem lze konstatovat, že disertační práce splnila všechny stanovené cíle, postup řešení a metody zpracování jsou vhodně voleny (dosažené výsledky a konkrétní přínosy předkladatele pro další rozvoj vědy jsou komentovány výše). Vypracováním disertační práce autor prokázal, že ovládá vědecké metody, má dobré teoretické znalosti a přináší nové poznatky do oboru multibody dynamiky a biomechaniky. Doktorskou disertační práci doporučuji k obhajobě.

V Plzni, dne 4. 12. 2020



