

prof. Ing. Vladimír Bobál, CSc.

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta aplikované informatiky

Ústav řízení procesů

Nad Stráněmi 4511, 760 05 Zlín 5

Tel.: 777 231 942

E-mail: v.bobal@seznam.cz

Oponentní posudek doktorské disertační práce

Disertant: **Ing. Tomáš Vogeltanz**
Pracoviště: **Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky**
Název disertační práce: **Návrh modelu bezpilotního mini-letounu**

Náplní předložené disertační práce je návrh modelu bezpilotního mini-letounu. Je zde vytvořen a popsán softwarový systém pro jeho návrh, analýzu a simulaci. Dizertační práce je velmi rozsáhlá, má 266 stran a 209 odkazů na použitou literaturu. Je standardně strukturovaná do jedenácti kapitol včetně Úvodu a Závěru. Za závěrečnou kapitolou je uveden Seznam použité literatury, Seznam použitých symbolů a zkratk, Seznam obrázků, Seznam tabulek, Seznam příloh, Publikační činnost autora a Profesní životopis.

Aktuálnost disertační práce

Je zřejmé, že v současnosti jsou používány bezpilotní letouny v mnoha aplikacích a odvětvích. Např. pro účely průzkumu, zemědělství, v kartografii, archeologii a jsou velmi důležité pro záchranu lidských životů v mnoha krizových situacích. Na druhé straně mají použití i pro nehumánní bojové účely. Pro návrh bezpilotních letounů jsou důležité metody matematického modelování a simulačního ověřování před vlastní konstrukcí těchto typů letounů. Z tohoto důvodu považuji téma předložené disertační práce z hlediska současného stavu vědy za vysoce aktuální jak z hlediska teoretického, tak i aplikačního (vytvoření vhodného prostředí). Obsah disertační práce svým zaměřením plně odpovídá studijnímu oboru Inženýrská informatika.

Splnění cílů stanovených v disertační práci

Cíle disertační práce byly upraveny podle doporučení komise pro státní doktorskou zkoušku. Pro návrh modelu bezpilotního byla zvolena konfigurace mini-letounu dosedajícího na ocas a jeho aerodynamická analýza. Dalším hlavním cílem bylo vytvoření vhodného softwarového systému pro návrh, analýzu, modelování a simulaci tohoto systému. Tento model byl využit pro testování vlastností návrhu řídicího systému (pro vertikální vzlet. Operační režim letounu a vertikální přistání). Stanovené cíle byly splněny.

Postup řešení problému, výsledky disertační práce a přínos doktoranda

Jak už jsem napsal v úvodním odstavci, disertační práce je velmi rozsáhlá. Ve druhé kapitole je (Teoretické části) je stručně pojednáno o základních pojmech a metodách použitých v disertační práci. Poněvadž diplomant si zvolil (rozumně) pro řešení programátorských prací použití bezplatného software, je obsah třetí kapitoly věnován vhodným softwarovým prostředkům. Náplní čtvrté kapitoly je ověření (validace) CFD (Computation Fluid Dynamics - výpočetní dynamika tekutin) software. V páté kapitole je řešena problematika návrhu bezpilotního mini-letounu dosedajícího na ocas. Je předpokládán malý letoun se dvěma vrtulemi. Náplní šesté kapitoly je optimalizace profilu vybraného křídla. Bylo použita optimalizační metoda s volbou různých typů účelové funkce. V kapitole osmé je definován model bezpilotního mini-letounu V-TS. Návrh spočíval v definici parametrů mini-letounu a jeho systémů, které jsou poté dosazeny do nelineárních matematických modelů. Obsáhlá devátá kapitola se zabývá návrhem řídicího systému letounu. Doktorand se zabýval hlavně použitím jednoduchých PID regulátorů založených na principu Zieglerova – Nicholsova nastavení. Jedná se o

velmi jednoduchý regulátor, který bych pro tato účely nedoporučoval. Náplní desáté kapitoly je simulační testování bezpilotního mini-letounu. Jedenáctá kapitola se zabývá závěrem a přínosem práce pro vědu a praxi.

Význam pro praxi a rozvoj vědního oboru

Podle mého názoru doktorand vykonal velké množství práce, která má značný význam pro praxi, jak konkrétně uvedl na str. 208 své disertační práce, proto se této problematice nebudu dále věnovat. S tím rovněž souvisí fakt, že práce má také nesporný vědecký přínos pro návrh těchto typů letounů, které mají velkou perspektivu pro použití v řadě odvětví. Z velkého množství citované literatury, částečně své vlastní, je zřejmá rutina využívání příslušné vědecké a odborné literatury.

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

Disertační práce má velmi dobrou jazykovou úroveň, včetně grafické úpravy. Podrobně ji prostudovat a zcela jí porozumět předpokládá znalosti některých částí matematiky (hlavně optimalizace), aeronautiky, příslušných programových prostředků, simulace a základů teorie řízení. Jedná se o komplexní znalosti z teoretické i aplikační oblasti. Z dosažených výsledků disertační práce je zřejmé, že doktorand prokázal znalosti z těchto oblastí a dovedl je ve své práci použít. Práce je napsána přehledně (až na jednu výjimku – zkratky by mohly být obsaženy v textu, ne pouze v závěru.), ke stylistice a gramatice nemám připomínky.

Publikační činnost doktoranda

Ve své publikační činnosti uvádí doktorand 5 článků v časopisech, z nich lze za kvalitní považovat první 2 příspěvky v zahraničních časopisech a 16 příspěvků vesměs na mezinárodních konferencích. Rovněž byl hlavním řešitelem nebo spoluřešitelem deseti projektů. K publikační činnosti doktoranda nemám připomínky.

Připomínky a dotazy k disertační práci

1. Jak už jsem uvedl výše, disertační práce je zbytečně velmi rozsáhlá, zaměřuje se na více problémů a předpokládá znalosti z dosti vědních oborů.
2. Jelikož nejsem odborník v aeronautice, termín „letoun dosedající na ocas“ mne trochu mate. Doufám, že v zadní části letounu je podvozek s nápravou a koly, na které letoun v na začátku přistání dosedá.
3. Jsem si vědom skutečnosti, že doktorand na FAI neabsolvoval předměty pokročilých metod řízení a proto v práci použil triviální návrh řízení použitím metody Zieglera – Nicholse (Z-N). Tato heuristická experimentální metoda je z hlediska kmitavosti nevhodná pro vertikální i horizontální letovou dráhu letounu. I když některé modifikace Z–N metody potlačují kmitavost. Proto by bylo vhodné použít sofistikovanější metody (např. přiřazení pólů, metodu založenou na minimalizaci kvadratického kritéria, prediktivní metody řízení).
4. Vysvětlíte princip regulátoru PID (Pessenovo integrální pravidlo).
5. V práci jsou navázeny spojitě modifikace regulátorů. Nebyly by vhodnější diskrétní modifikace (číslicové řízení)?

Závěr

Ve své disertační práci prokázal disertant schopnost samostatné tvůrčí vědecké práce. Předložená disertační práce obsahuje původní a částečně autorem publikované výsledky. Disertační práce splňuje veškeré potřebné náležitosti stanovené v § 47, odst. 4 zákona č. 111/98 Sb. Předloženou disertační práci Ing. Tomáše Vogeltanze proto doporučuji k obhajobě pro udělení akademického titulu Ph.D.

Ve Zlíně 26. května 2021

prof. Ing. Vladimír Bobál, CSc.

**Vysoké učení technické v Brně
Fakulta informačních technologií**

doc. Ing. Peter Chudý, Ph.D., MBA

Božetěchova 2, 612 66 Brno
Česká Republika

chudyp@fit.vutbr.cz

Tel: +420 5 4114 1286

Fax: +420 5 4114 1290

Posudek disertační práce

Návrh modelu bezpilotního mini-letounu
Doktorand: Ing. Tomáš Vogeltanz

Aktuálnost tématu disertační práce

Současné dění v segmentu bezpilotních systémů představuje období třetí revoluce v letectví. Bepilotní letouny, drony, našli v posledním desetiletí své významné společenské uplatnění v širokém spektru odvětví a aplikací, jako nákladově zajímavá alternativa k pilotovaným platformám, případně jako unikátní řešení pro specifické provozní podmínky, ve kterých jsou pilotované platformy apriorně diskvalifikovány z množiny možných řešení. Samotné téma je svým zaměřením velmi vhodné pro výzkum v rámci doktorské práce. Adresované výzkumné otázky patří do portfolia prakticky relevantních výzev s významným aplikačním potenciálem. V uvedeném kontextu představuje disertační práce celkový náhled na komplexní návrhový rámec pro bezpilotní letouny.

Splnění cílů stanovených v disertační práci

Deklarovaným cílem disertační práce bylo vytvoření návrhového rámce pro drony, který obsáhne validované nástroje pro konfigurační aerodynamickou analýzu, návrh řídicího systému a ověření celkového návrhu v adekvátním simulačním prostředí. Autorem vytvořený rámec byl následně aplikován při návrhu hybridního dronu schopného vertikálního vzletu a přistání. Pro dosažení stanovených cílů implementoval autor sadu softwarových nástrojů zaměřených na řešení dílčích problémů z oblastí aerodynamiky nízkých rychlostí, stability a řízení.

Postup řešení problému a výsledky disertační práce s uvedením konkrétního přístupu

Jak již bylo zmíněno, práce pana Ing. Vogeltanze pokrývá celé funkční návrhové portfolio:

- Aerodynamika profilů
- Nástroj pro konfigurační návrh
- CFD nástroje pro analýzu proudového pole
- Prototypovací nástroj pro návrh a ladění řídicích systémů
- Simulátor letové dynamiky
- Příprava simulačních scénářů

Takto rozsáhlý záběr je pozoruhodný - a pan Ing. Vogeltanz jej zvládl. Hlavním přínosem práce je určitě poskytnutí konzistentního vývojového rámce, podpořeného diskusí a argumentací nad jednotlivými nástroji, a vytvoření vývojového procesu založeného na modelu, kde různé aspekty do sebe organicky zapadají. Různé zajímavé dílčí přínosy mohou být vidět také v jednotlivých kapitolách práce.

S využitím rámce navrhl ing. Vogeltanz cílovou konfiguraci dronu, jehož dynamický model zaintegroval do preferovaného simulačního prostředí. Samotné tvorbě modelu předcházela fáze optimalizace vhodných profilů nosných ploch. Následně svou pozornost autor zaměřil na prototypování řídicího systému dronu tak, aby byly uváženy charakteristické provozní módy navržené

bezpilotní hybridní platformy (kombinace letounu s pevným křídlem a duokoptéry) - kombinace systémů pro řízení konvenčního horizontálního a vertikálního letu.

Význam pro praxi

Práce představuje návrhový rámec kombinující licencované a volně šiřitelné aplikace umožňující návrh dronů různých určení a konfigurací, při zohlednění návrhových omezení plynoucích z podstaty aplikovaných fyzikálních modelů. Rámec vytváří transparentní návrhový řetězec, podporující adresnou realizaci bezpilotního letounu.

Formální úprava disertační práce a její jazyková úroveň

Práce má logickou strukturu a jednotlivé kapitoly na sebe navazují. Práce je pro čtenáře pochopitelná. Práce po jazykové stránce obsahuje několik chyb z nepozornosti, případně terminologické nejednoznačnosti, které nesnižují celkovou hodnotu představených výstupů. Typograficky je práce jen na několik výjimek v pořádku. Výběr zdrojů je vzhledem k řešené problematice relevantní.

Publikační činnost doktoranda

Ing. Tomáš Vogeltanz je autorem, případně spoluautorem pěti článků v periodikách a dvanácti článků ve sbornících. Doktorand je také autorem čtyř softwarových produktů, které tvoří součást předložené disertační práce.

Otázky

- Prosím popište způsob získání relevantních hmotově setrvačných charakteristik navržené konfigurace.
- Jak ovlivní nastavení aktuátorů jednotlivých kormidel stabilní zásobu řídicího systému?
- Jakým způsobem byly použity linearizované modely? Jaké podmínky linearizace jste použil?
- Prosím vysvětlíte původ oscilací podélného sklonu na obrázku 10.9 na str. 199 v úvodní a závěrečné části experimentu.
- Co způsobilo oscilace kurzu v čase 200-300 sekund na obrázku 10.11 na str. 200?

Předloženou disertační práci doporučuji k obhajobě.

V Brně 04.06.2021

doc. Ing. Peter Chudý, Ph.D., MBA

Oponentní posudek disertační práce Ing. Tomáše Vogeltanze „Návrh modelu bezpilotního mini-letounu“

Ing. Tomáš Vogelanz se ve své disertační práci zabývá realizací softwarového systému pro návrh, analýzu a modelování bezpilotního mini-letounu a simulaci jeho letu v horizontálním i vertikálním režimu.

Bezpilotní letouny se staly užitečným pomocníkem v mnoha oblastech průmyslu, ale i zábavy. Slouží v energetice, zemědělství, využívají je záchranáři, umožňují nahrávání videí a fotografování z ptáčích perspektiv a s vojenskou výzbrojí jsou nasazovány i ve vojenských operacích, protože umožňují let v malých výškách a vzhledem k malým rozměrům jsou také hůře zachytitelné radary.

Vzhledem k tomu, že simulace se převážně zaměřují na reálně zkonstruované letouny, autor volí postup, který i vlastní návrh letounu řeší softwarově, což umožní odhalit slabá místa a konstrukci vhodně upravit ještě předtím, než dojde k jejímu sestavení ve výrobě.

Dalším přínosem je zaměření autora na konstrukci letounu, která umožňuje dosednutí na ocas, a tedy výrazně snižuje nároky na velikost místa k přistání. U letounů s lidskou posádkou by tento způsob přistávání byl krajně nevhodný, ale u bezpilotního stroje je výrazným vylepšením.

Text disertační práce je velmi obsáhlý (má 266 stran) a místy připomíná učebnici, všechny informace jsou z hlediska problematiky podstatné a jak autor na str. 32 poznamenává u rozboru výběru profilu křídla, že *neexistuje unikátní profil křídla, který by měl všechny parametry optimální, a je nutné hledat kompromis s přihlédnutím na hlavní potřeby letounu*, je zřejmé, že jde o složitý multikriteriální problém. Navíc fyzikální popis dynamiky letounu představuje nelineární diferenciální rovnice, které je nutné řešit numericky, a i při určitých zjednodušeních to klade značné nároky na získání výsledků, které budou v přípustné toleranci odpovídat realitě a současně zajišťovat nezbytnou bezpečnost navrženého stroje.

Vzhledem k náročnosti problematiky stanovené cíle, zahrnující (mimo jiné) vytvoření softwarového systému pro návrh, analýzu, modelování a simulaci bezpilotního mini-letounu, návrh modelu letounu s přistáváním na ocas, jeho aerodynamickou analýzu a provedení simulací vzletu, letu a přistání, odpovídají požadavkům kladeným na disertační práce a při zvládnutí cíle je práce **disertabilní**.

I když se autor zaměřuje na využití volně dostupného softwaru s otevřeným zdrojovým kódem (open source sw), který poskytuje možnost jeho funkci přizpůsobit, poukazuje také na problémy konverze různorodých formátů souborů (XML, AC3D, VRML1, DXF, CSV...), aplikace jsou navíc napsány často v odlišných programových prostředích (C++, C#, ...) a formát NML dokonce vychází z aplikace napsané ve FORTRANu, programovacím jazyku ze 60. let minulého století. Fundovaný a svou šíří velmi přínosný přehled autor podává v 3. kapitole.

Vlastní vklad autora je naznačen v blokovém diagramu vývoje modelu letounu na Obr. 3.2 na str. 44, který rozšířil o 4 softwarové aplikace. Všechny funkční bloky následně podrobně rozebírá i s patřičnými odkazy na použité zdroje a názornými grafickými vyjádřeními profilů křídel pomocí „meshování“.

Výběru vhodné aplikace pro aerodynamickou analýzu letounu je věnována 4. kapitola. Je zde ukázáno, že výsledky z volně dostupných CFD (Computational Fluid Dynamics) aplikací se přibližují naměřeným hodnotám z aerodynamického tunelu. Z několika možností autor volí aplikaci SU² s volně šiřitelným kódem, který je spravován vývojáři z prestižní Stanfordovy univerzity v Kalifornii.

Stěžejní částí práce s vlastním řešením disertanta uvozuje 5. kapitola, věnovaná návrhu bezpilotního mini-letounu s přistáváním na ocas typu Y s úhlem ploch na ose x 120° , dále odkazovaného označením V-TS. Letoun je vybaven dvěma vrtulemi se synchronizovaným protisměrným otáčením a jeho parametry jsou: let do výšky 1 km, rychlost 35-110 km/hod, hmotnost 1,5 kg. Na to navazuje optimalizace profilu křídla, popsána v 6. kapitole a názorně demonstrována grafy vypočtených hodnot pro vzlak, odpor, poláry, aerodynamickou jemnost profilů křídel a součinitel klopného momentu. Tytéž parametry jsou pak zkoumány při aerodynamické analýze v 7. kapitole. Vypočtená aerodynamická data jsou dosazena do nelineárních matematických modelů, naprogramovaných v aplikaci JSBsim, jak je popsáno v 8. kapitole.

Kapitola 9 přináší návrh řídicího systému s ohledem na odlišné režimy letu (horizontální/vertikální), podle nichž jsou režimy řízení přepínány. Kvalitu režimů řízení je opět pro názornost vyjádřena grafy regulačních pochodů.

Disertační práci završují 10. kapitola, popisující simulace letů, a 11. kapitola, shrnující softwarové prostředky, metody a přístupy, které doktorand v práci při řešení cílů použil, a co je vlastním přínosem pro vědu a praxi, což bylo patrné i z přechozího popisu. Pro případné následovníky jsou inspirativní poznámky na konci, kde doktorand mimo jiné zmiňuje kooperaci většího počtu letounů.

Co se týká formální a jazykové úrovně práce, je velmi dobrá, drobné nepřesnosti přes značný rozsah textu jsou výjimečné:

- Typografie psaní matematických vztahů by měla zachovávat konvence i ve volném textu, např. na str. 24 L_{be} by mělo mít podobu L_{be} , závorky se píší normálním stylem a ne kurzívou (jako je tomu v textu pod vztahem (2.15) na str. 25), matice a vektory se označují tučně psanými symboly (není dodrženo ve vztazích (2.14) a (2.15)), ...
- Str. 10: „popsán koncepční návrh ... komerčních nástrojů jako je ...“ – chybí čárka před „jako je“ (nebyla by tam v případě bez slovesa „je“, takto jde o vedlejší větu).
- Str. 12: „více komplexní“ – lépe asi „komplexnější“ (několikrát dále v podobných situacích, např. na str. 103: „více efektivní“ – „efektivnější“).
- Str. 42: „za použití samostatných aplikací jako je“ – chybí čárka před „jako je“.
- Str. 58: Věta začínající slovy „Příčemž je možné na novou hodnotu“ porušuje zásadu, že souvětí v češtině musí obsahovat hlavní větu.

Dotazy na doktoranda:

1. V práci se zabýváte mini-letouny, můžete kategorii „mini“ blíže vymezit?
2. K návrhu řídicího systému je využita Ziegler-Nicholsova metoda a zvolena konfigurace PID. Je však tato volba u letounu na místě, když víme, že D složka má sice kladný vliv na dynamiku regulačního pochodu, ale na druhé straně způsobuje kmitavou odezvu a pro parametry PID regulátoru podle tabulky Ziegler-Nicholse (v závislosti na kritickém zesílení proporcionálního regulátoru a periodě kmitů na mezi stability) velikost 1. překmitu je až 60 %? (potvrzují to i obrázky odezev, počínaje Obr. 9.20 a 9.21).
3. K návrhu řídicího systému Z-N metodou je třeba znát přenos řízené soustavy, ten zde však nebyl uveden. Jakým vztahem je dán?

Závěr:

Disertační práce Ing. Tomáše Vogeltanze prokázala tvůrčí schopnosti autora navrhnout a implementovat program k řízení bezpilotního letounu. Ve svém návrhu se přitom zaměřil na

bezplatné programové nástroje a ukázal, že k potřebným výpočtům při vhodném rozšíření plně dostačují. Doktorand výsledky svého výzkumu publikoval v 17 člancích (velmi často sám bez přispění spoluautorů), z toho v 5 časopiseckých, a realizoval 4 softwarová díla. S velkou rezervou splnil požadovaná kritéria k úspěšnému ukončení doktorského studia. Práce je významná z hlediska uceleného přehledu problematiky, která se v současnosti prudce rozvíjí, teoretického přínosu k rozvoji oboru a současně i ve využitelnosti v praxi.

Disertační práci Ing. Tomáše Vogeltanze

doporučuji k obhajobě

před komisí doktorského studijního oboru Inženýrská informatika

V Brně dne 4. června 2021

Prof. RNDr. Ing. Miloš Šeda, Ph.D.
Ústav automatizace a informatiky
Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně