

## Evaluation of Daniel Brandtner's Diploma Thesis

### Satellite formation flight: optimal and cooperative control approaches

Writing as a **supervisor** I would state that mr. Brandtner started work on his Diploma Thesis in February 2018 under my supervision, studying the topic of satellite formation flight. In the course of his studies and research he successfully mastered the prerequisite elements of classical mechanics, orbital mechanics, and control theory; especially the advanced optimal and cooperative control methods. In those efforts mr. Btradtner reached a level of competence and independence that enabled him to thoroughly investigate the various considered cases or orbital dynamics and to devise control designs to achieve the specified tasks.

The Diploma Thesis itself begins with modelling the orbital motion in Chapter 1, drawing from a rich body of literature on celestial mechanics. Mr. Brandtner systematically used Lagrangian models of uncontrolled and controlled orbital motion to describe the orbital dynamics around a single spherical body in different coordinate systems, appropriate to subsequent consideration of satellite formations. Those were then extended to include effects of the central-body oblateness as well as the presence of the second principal body. Mostly a circular Hill's model was considered for the latter purpose, but a more general elliptical Hill's model is also mentioned, which can be treated in a similar way.

Later chapters build on the models given in Chapter 1 to design first open-loop optimal control schemes in Chapter 2, and then the closed-loop cooperative controls in Chapter 3. Mr. Brandtner independently devised a numerical procedure for solving complicated, nonlinear, the two-point boundary value optimal control design problems, yielding a plethora of optimal controls effecting single-satellite orbit placement and orbit transfers between various uncontrolled orbits studied in Chapter 1. Those maneuvers take the least amount of fuel (control effort), in the  $L_2$  norm sense. The orbits to which the transfers are achieved are, in fact, of some practical interest, either being the targets of past satellite missions, e.g. SOHO, or of missions planned in the near future. Those single-satellite transfers are applicable to formation flying by actuating each satellite independently. Optimal control methods are also applied to the entire formation, actuating all satellites together, effecting formation reconfigurations. Two special formations of particular importance were closer studied: the trailing formation and LISA triangular formation. The control problems solved utilizing the developed methods are indeed the ones recently identified as some of the key control challenges in deployment of satellite formations.

However, optimal controls, as designed in this Thesis, are open-loop protocols, hence they are sensitive to disturbances and possibly unmodelled dynamics. Such controls are usually precomputed so no easy on-the-flight corrections are possible later-on. For this reason, Chapter 3 brings the closed-loop cooperative controls, depending on distributed directed communications between individual satellites. These developments build on the state-of-the-art results in cooperative control and bring autonomous distributed algorithms that achieve the same, or similar, practically important goals as those achieved through the optimal control approach. The added benefits of the cooperative control are that it can run autonomously, avoiding the need for costly communication with the ground station, and that their feedback character imparts a degree of robustness to unavoidable perturbations and uncertainties; a feature helpful in the long-term formation keeping.

In summary; starting from rigorous classical mechanical modelling, through applying the advanced modern control theoretic methods, this Diploma Thesis brings intriguing solutions to challenging problems of current and future interest for satellite formation deployment. In addition to all presented results, mr. Brandtner independently drew correct conclusion on the, sometimes counterintuitive, nature of orbital maneuvers and systematically compared the performance of the devised control protocols.

For all these reason, I would propose the grade of Excellent, A, to be assigned for this Diploma Thesis.

dipl. Ing. Kristian Hengster Močrić, PhD  
Assistant Professor  
Department of Control Engineering  
FEL, CVUT

In Prague, 6.8. 2018

**I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE**

Název práce:	Let formací družic: optimální a kooperativní metody řízení
Jméno autora:	Bc. Daniel Brandtner
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra řídicí techniky
Oponent práce:	Ing. Tomáš Báča
Pracoviště oponenta práce:	Katedra kybernetiky

**II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ**

<b>Zadání</b>	náročnější
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i> Předložená diplomová práce vyžaduje hluboké znalosti teoretické fyziky a teorie řízení. Z tohoto hlediska ji hodnotím jako náročnější.	

<b>Splnění zadání</b>	splněno
<i>Posudte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uvedte body zadání, které nebyly zcela splněny, nebo zda je práce oproti zadání rozšířena. Nebylo-li zadání zcela splněno, pokuste se posoudit závažnost, dopady a případně i příčiny jednotlivých nedostatků.</i> Student splnil všechny body zadání.	

<b>Zvolený postup řešení</b>	částečně vhodný
<i>Posudte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i> Studentův přístup k řízení jednoho satelitu v rámci problému tří těles hodnotím jako částečně vhodný. Student formuloval problém optimálního řízení s kritériem pro minimalizaci spotřeby paliva za podmínek dynamických rovnic pro pohyb částice gravitačním působením dvou hmotných těles. Samotné řešení navržené optimalizace pomocí Lagangeových multiplikátorů a metody gradientního sestupu je však diskutabilní. Student se neurčitě a vágně vyjadřuje o optimalitě nalezeného řešení a v jednom případě si i protiřečí:  „... converge to handful of locally optimal solutions...“, „Gradient descent algorithm to find an optimal set of initial costates“.  Varianty dosažených řešení jsou dle autora charakterizovány jako „... differing in general in the number of times the particle revolves around he body before reaching its target state...“ což dle mého názoru zdáleka neindikuje optimalitu nalezeného řešení a dle mého soudu může být i nežádoucí v případě skutečných orbitálních letů. Důsledky tohoto jevu však nejsou diskutovány. Využití jiných či vhodnějších metod spojité optimalizace, či jen forma ladění velikosti kroku gradientního sestupu nejsou diskutovány.  Postup zvolený pro řízení formace satelitů hodnotím také jako částečně vhodný, zvláště jeho experimentální verifikaci. Teoretická část řízení formace je psaná v duchu řízení velkých formací, autor se mimo jiné zmíňuje, cituj: „... every satellite is generally assigned only a handful of neighbours...“. Avšak experimentální verifikace se omezuje pouze na situace s max. 3 satelity. Popis experimentů s formacemi a výsledky dosažené při řízení jsou relativně krátké, zvláště v kontextu toho, že autor věnoval 55 stran přípravě a simulacím dynamiky jednoho, neřízeného satelitu.	

<b>Odborná úroveň</b>	A - výborně
<i>Posudte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i> Student dozajistě prokázal znalosti fyziky, dynamických systémů a řízení, které jsou nad rámec absolventa oboru kybernetiky	

a v části fyzikální se dotýkají úrovně doktorské. Po této stránce je práce na velmi dobré odborné úrovni. Z textu je zřejmé, že autor porozuměl problematice Newtonovské orbitální mechaniky, je schopen pracovat s produkty fyzikálních modelů a na ně aplikovat principy teorie řízení. Zpracování a prezentace simulovaných experimentů, které prakticky ve všech částech práce podporují dosažené mezivýsledky, je na velmi dobré úrovni.

**Formální a jazyková úroveň, rozsah práce**
**E - dostatečně**

*Posudte správnost používání formálních zápisů obsažených v práci. Posudte typografickou a jazykovou stránku.*

Předložená práce je psaná v anglickém jazyce, čitelnou a srozumitelnou formou, pouze s občasnými překlepy či hrubkami.

Práce je svým obsahem velmi nevyvážená, zvláště uvádíme-li rozsah 120 stran (40 stran nad doporučeným rozsahem). Mé připomínky v tomto bodu mají společný jmenovatel s připomínkami k výběru zdrojů a jejich citování. Autor provedl nedostatečnou rešerší jak z oblasti tématu práce, tedy řízení formací satelitů, tak i v případě předpokladů, jakými je fyzikální podstata orbitální mechaniky. Od strany 13 (3. strana samotného obsahu) do strany 37 se autor zabývá odvozováním dynamických rovnic pro pohyb částice v okolí dvou hmotných těles. Odborná literatura se typicky omezuje pouze na převzetí rovnic z dostupných zdrojů. Samotné odvození, které autor prezentuje, je diskutabilní. Autor nejdříve odvozuje Lagrangeovskou mechaniku, což je samo o sobě nadbytečné. Odvození Lagrangeových rovnic je však neúplné, spíše se podobá zkráceným zápisům z lekce fyziky. Autor nezmiňuje důležité předpoklady u dílčích kroků, díky čemuž mohou být kroky neznalému čtenáři nejasné či nekorektní (např. zamplacená integrace per partes v (1.12), nebo předpoklad nezávislosti zobecněných souřadnic  $q$  pro krok k (1.14)). Čtenář znalý však postup vidí pouze jako výtah z úplného odvození a pokládá si otázku, zdali student skutečně umí provést kompletní odvození a pouze neuvedl celý postup vč. předpokladů, či zdali postup převzal, avšak necitoval, z učebnice či literatury. V podobném duchu je veden celý teoretický úvod a také většina práce.

Práce obsahuje velké množství nepodložených a neobhájených tvrzení zvláště v oblasti kosmonautiky, orbitální mechaniky a principů satelitní navigace. Taktéž části s odvozením modelů často postrádají kompletní argumentaci. Mnoho těchto tvrzení nepovažuji za „všeobecně známé“. Např.:

„Formation installation manoeuvres, where the bodies are put on the formation orbits from the launch site, or large reconfigurations are costly and usually require only the end state to form a coordinated configuration.“, či

„Most applications for the Hill's system involve either the Earth-Moon or Sun-Earth systems. In those cases the eccentricity of the bodies orbit is low, and dynamics derived in the circular Hill's system are usually a sufficient approximation. When dealing with bodies orbiting on more pronouncedly elliptic orbits a more general formulation of the equations of motion is required.“

Po formální stránce nejsem spokojen se sazbou matematických výrazů. Umístění výrazů v rámci vět a odstavců je velmi nekonzistentní a zmatené v celém rozsahu práce. Výrazy jsou často zcela umístěny mimo větu. V případě umístění ve větě autor opomíjí použití interpunkce jak pro ukončení věty, tak pro oddělení další podvět uvozených např. slovem „where“. Práce dále obsahuje velké množství jednořádkových odstavců, zvláště v sekcích s větším množstvím matematických výrazů.

**Výběr zdrojů, korektnost citací**
**F - nedostatečně**

Vyhádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posudte, zda student využil všechny relevantní zdroje. Ověřte, zda jsou všechny převzaté prvky řádně odlišeny od vlastních výsledků a úvah, zda nedošlo k porušení citační etiky a zda jsou bibliografické citace úplné a v souladu s citačními zvyklostmi a normami.

Autor neprovedl řešerší dosavadních přístupů k řešení zadaných problémů, neuvedl svou práci do kontextu dosavadních výsledků v oboru. Práce obsahuje pouze 13 referencí, z nichž polovinu tvoří monografie. Autorův zvolený postup není žádným způsobem uveden do kontextu dosavadního vědění a výsledků v oboru, čtenář tedy neví zdali autor pouze kopíruje dosavadní známé techniky, zdali je rozšiřuje, či zdali přichází s něčím novým. Po rychlém hledání jsem nalezl velké množství relevatních vědeckých publikací na téma jak optimálního řízení a plánování pohybu pro satelity tak i pro formace satelitů, tedy hodnotím autorův výběr zdrojů a vymezení se vůči nim jako nedostatečné.

Vzhledem k povaze úvodních kapitol ve kterých se nachází, dle mého soudu převzaté, ale necitované odvození dynamických rovnic satelitu, jsem na pochybách, které z pozdějších částí jsou vlastní práce autora, které jsou inspirované literaturou a

které jsou převzaté.

**Další komentáře a hodnocení**

Vyjádřete se k úrovni dosažených hlavních výsledků závěrečné práce, např. k úrovni teoretických výsledků, nebo k úrovni a funkčnosti technického nebo programového vytvořeného řešení, publikním výstupům, experimentální zručnosti apod.

Navzdory mým připomínkám k referencím a originalitě textu se domnívám, že autor má hluboké porozumění problematiky a že práci skutečně napsal. Text jeví známky jednotného celku a je strukturován korektně.

**III. CELKOVÉ HODNOCENÍ, OTÁZKY K OBHAJOBĚ, NÁVRH KLASIFIKACE**

Shrňte aspekty závěrečné práce, které nejvíce ovlivnily Vaše celkové hodnocení. Uveďte případné otázky, které by měl student zodpovědět při obhajobě závěrečné práce před komisí.

Domnívám se že autor je schopný pracovat s pokročilými matematickými modely a nástroji pro řešení komplexních problémů, jakými je plánování a řízení formací satelitů. S textem práce však nejsem spokojeným, vysoce přesahuje doporučený limit stran, nekorektně pracuje s dostupnými zdroji a není zřejmé, které části jsou převzaté a které jsou vlastní prací autora. Výsledek práce není srovnán s hojně publikovaným výsledky v oboru, tedy bez vlastní rešerše nemohu říci, zdali je přínos nový, inkrementální či žádný. Nevím kolik a jakou zpětnou vazbu k textu dostal student od vedoucího práce, ale domnívám se, že tomuto mohlo být předejito již v začátku jeho tvorby.

Na autora mám následující otázky:

- Na straně 56 a 57, ve formulaci úlohy optimálního řízení, není použit vektor referenční trajektorií\*. Jak se reference v úloze projeví?
- Jaký byste odhadl počet lokálních minim ve Vaší úloze optimálního řízení?
- V textu naznačujete formaci o velkém počtu jednotek. Proč jste neprováděl simulace s více než 3 satelity?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **D - uspokojivě.**

Datum: 15/06/2018

Podpis:

