

I. IDENTIFICATION DATA

Thesis title:	Nonlinear Predictive Control of Unmanned Aerial Vehicle in Environments with Obstacles
Author's name:	Jan Hřebec
Type of thesis:	bachelor
Faculty/Institute:	Faculty of Electrical Engineering (FEE)
Department:	Department of Cybernetics
Thesis reviewer:	Robert Pěnička
Reviewer's department:	Department of Cybernetics

II. EVALUATION OF INDIVIDUAL CRITERIA

Assignment	challenging
<i>How demanding was the assigned project?</i>	
I consider the assignment challenging given its target of using new solver of Nonlinear Model Predictive Control with additionally modeled obstacles on simulated and optionally also real quadrotor aerial vehicle.	

Fulfilment of assignment	fulfilled
<i>How well does the thesis fulfil the assigned task? Have the primary goals been achieved? Which assigned tasks have been incompletely covered, and which parts of the thesis are overextended? Justify your answer.</i>	
To the best of my knowledge the thesis assignment is fulfilled.	

Activity and independence when creating final thesis	C - good.
<i>Assess whether the student had a positive approach, whether the time limits were met, whether the conception was regularly consulted and whether the student was well prepared for the consultations. Assess the student's ability to work independently.</i>	
While the student is theoretically excellent, he had last-minute approach to majority of the work. The student regularly consulted his work, yet several negotiated time limits (mostly the text-writing and experiment evaluation) were not met. This had impact on the final thesis as no time was left to not only answer how good the proposed methodology works but why it works as it works, e.g., compared to other methods. On the other hand, the student had quite positive approach to the implementation part of the thesis.	

Technical level	A - excellent.
<i>Is the thesis technically sound? How well did the student employ expertise in his/her field of study? Does the student explain clearly what he/she has done?</i>	
I consider the thesis to be technically correct with clear explanation of the work.	

Formal level and language level, scope of thesis	B - very good.
<i>Are formalisms and notations used properly? Is the thesis organized in a logical way? Is the thesis sufficiently extensive? Is the thesis well-presented? Is the language clear and understandable? Is the English satisfactory?</i>	
The thesis is formally correct and written in readable English language. The only limitations towards its scope is the limited explanation and discussion of the achieved results due to the last-minute approach to experimental evaluation.	

Selection of sources, citation correctness	A - excellent.
<i>Does the thesis make adequate reference to earlier work on the topic? Was the selection of sources adequate? Is the student's original work clearly distinguished from earlier work in the field? Do the bibliographic citations meet the standards?</i>	
The work cites adequate references to its topic with correct bibliographic standards.	



III. OVERALL EVALUATION, QUESTIONS FOR THE PRESENTATION AND DEFENSE OF THE THESIS, SUGGESTED GRADE

In overall, I consider the thesis to be a valuable contribution that shows possibility of modeling obstacles in selected Nonlinear Model Predictive Control solver while keeping computational time within control period of the employed aerial vehicle. Moreover, the implemented NMPC was integrated into the drone system of the MRS group and even tested on a real quadrotor. On the other hand, the student's last-minute approach to the thesis writing and experiment evaluation impacted the final thesis that could have had otherwise bigger impact with better fine-tuning and reasoning about the achieved experimental results. **Therefore, the grade that I award for the thesis is B - very good.**

Date: **1.6.2023**

Signature:

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	Nonlinear Predictive Control of Unmanned Aerial Vehicle in Environments with Obstacles
Jméno autora:	Jan Hřebec
Typ práce:	bakalářská
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra řídicí techniky
Oponent práce:	doc. Ing. Tomáš Haniš, Ph.D.
Pracoviště oponenta práce:	ČVUT, FEL, Katedra řídicí techniky

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání	mimořádně náročné
<i>Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.</i>	
Předložená práce se zabývá návrhem NMPC pro UAV prostředky s možností zahrnout překážky v prostředí a omezení samotného systému. Toto zadání hodnotím jako velmi náročné z důvodu komplexnosti NMPC a samotné aplikace.	

Splnění zadání	splněno s menšími výhradami
<i>Posuďte, zda předložená závěrečná práce splňuje zadání. V komentáři případně uveďte 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 formálně splnil všechny body zadání. Výhrady mám pouze k bodu zadání“	
<ol style="list-style-type: none"> 1) (Study the state of the art methods of MPC), kde stránka a čtvrt mi nepřipadá jako důkladná rešerše existujících řešení MPC pro UAV. Navíc aspekty „time-optimal objective“ a „collision-free flight constraints“ jsou diskutovány jen velmi vágně. 4) (Compare the implemented NMPC controller with the existing control algorithms) kde porovnání je opět spíše formální. Hlubší diskuse a vyhodnocení zcela chybí. 	

Zvolený postup řešení	správný
<i>Posuďte, zda student zvolil správný postup nebo metody řešení.</i>	
Student zvolil správný postup řešení problému, ale ze samotné práce není jasné, jestli tato volba byla na základě jednotlivých bodů zadání a doporučení vedoucího, nebo na základě porozumění problematice.	

Odborná úroveň	E - dostatečně
<i>Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.</i>	
Toto je asi nejslabší stránka celé práce. Práce působí velmi uspěchaným až odbitým dojmem.	
Architektura celého řídicího systému není z práce zcela jasná. Autor uvádí, že UAV obsahuje nízko-úrovňové regulační smyčky v jednotce PixHawk, které řeší kolektivní tah a jednotlivé úhlové rychlosti UAV. Nicméně samotné NMPC používá přímo tah jednotlivých vrtulí. Jelikož toto je klíčová část pro návrh jakéhokoliv řídicího systému bylo by dobré důkladně definovat architekturu řídicího systému a z ní pramenící omezení.	
Sekce 3.2 popisující algoritmus generování referenční trajektorie je velmi vágní. Jelikož referenční trajektorie je klíčová část pro návrh algoritmů vedení po této trajektorii, je důležité tento algoritmus, přinejmenším jeho rozhraní, dobře definovat a popsat.	
Práce se opírá o NMPC implementaci Acados (v práci referencovanou [14]), nicméně kapitola 3 a zejména sekce 3.3, kde je definován NMPC problém, obsahuje hrubé formální chyby. Obdobně sekce 3.4, kde jsou představeny lineární omezení reprezentující překážky, což je hlavním cílem této práce, je napsána velmi zavádějícím stylem.	

Dále sekce 4.1 kde jsou představeny verifikační metody navrhovaného algoritmu je velmi stručná a nejsou jasné omezení jednotlivých verifikačních nástrojů, zejména „simple environment“. Tabulka 4.2 prezentující parametrizaci NMPC naznačuje, že slackové proměnné reprezentující zmíněná omezení jsou nastavena na nulu. Tím pádem jsou omezení zcela ignorována?

Sekce 4.2.1 kde jsou diskutovány časové požadavky algoritmu, mimochodem požadavek na fungování v reálném čase je jeden z bodu zadání, jsou diskutován vzhledem k výkonu na PC, ale není jasné, jaký výpočetní výkon je instalován na jednotlivých UAV platformách a tím pádem jakých výsledků lze dosáhnout. Navíc není specifikován maximální možný čas pro RT výpočet. Dále se v této sekci diskutuje počet shooting nodů ve spojitosti s délkou predikčního horizontu. Jinými slovy vzorkovací perioda a horizont predikce. Nicméně se zde vůbec nediskutují minimální a maximální časové konstanty řízeného systému.

Sekce 4.2.2 autor zmiňuje „slight systematic error“, který vysvětluje nemodelovanou dynamikou, nicméně vyhodnocení této kapitoly je založeno pouze na polohovém vektoru, což je pro analýzu řídicího systému hrubě nedostatečné. Navíc autor tuto problematiku dále nediskutuje, případně neřeší. Jelikož je cílem NMPC využití nelineárního modelu dynamiky UAV a již v této fázi dochází ke značným oscilacím systému, předpokládám bych hlubší analýzu problému. Obdobně v sekcích 4.2.3 a 4.2.4 bych očekával důkladnější diskusi dosažených výsledků a odůvodnění proč jsou zde prezentovány jen výsledky z „my simple environment“.

Sekce 4.3, zde je prezentováno porovnání s dalšími řídicími architekturami používanými v MRS skupině. Jistě by této sekci prospěl detailnější popis jednotlivých architektur, přinejmenším jejich hlavní rozdíly. Je zde poprvé představeno pomalé NMPC, které není diskutováno. Porovnání je opět založeno pouze na polohovém vektoru UAV prostředku. Navíc referenční signál není vždy shodný, což dělá porovnání značně složité. Navíc celé porovnání není diskutováno.

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce

C - dobře

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

Práce je psána v anglickém jazyce na dobré úrovni s minimem překlepů, nejkurióznější je „Kunge-Kutta“ nad rovnicí (3.6). Nicméně formální chyby v zápisech, například rovnice 3.7 a hlavně 3.10, naprosto zbytečně snižují formální úroveň předložené práce.

Výběr zdrojů, korektnost citací

B - velmi dobře

Vyjádřete se k aktivitě studenta při získávání a využívání studijních materiálů k řešení závěrečné práce. Charakterizujte výběr pramenů. Posuďte, 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.

Veškeré zdroje jsou korektně citovány. Rešerše v oblasti současných řídicích strategií v oblasti UAV by měla být rozsáhlejší.

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, publikačním výstupům, experimentální zručnosti apod.

Vložte komentář (nepovinné hodnocení).

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.

Předložená práce se zabývá velmi aktuálním a zajímavým tématem využití NMPC formulace pro agilní manévry UAV prostředků s respektováním překážek v prostředí a omezení samotného prostředku. Na základě předložené práce, student bohužel nedokázal vytěžit toto téma. Samotná práce působí velmi uspěchaným až nedokončeným dojmem, který značně snižuje hodnotu a množství práce, které student jistě této práci musel věnovat.

K této práci mám následující dotazy:

- 1) Jaká je architektura řídicího systému UAV zahrnující navrhované NMPC a PixHawk jednotku? Jak je PixHawk jednotka a její algoritmy řízení zahrnuta do NMPC algoritmu?
- 2) Jaké signály zahrnuje vektor $y_{ref}(t)$? Jaká je formulace NMPC pro sledování této reference? Výstupní, nebo stavová?
- 3) Jak si vysvětľujete, že v obrázku 3.2 je bod 3 mimo poly-hedron A a jaké to má možné důsledky?
- 4) Proč jsou v tabulce 4.2 proměnné Z a z nastaveny na nulovou hodnotu? Co to znamená z pohledu formulace MPC? Jak si vysvětľujete řádově jiné hodnoty elementů Q matice v tabulce 4.1 a 4.2? Navíc proč jsou hodnoty matice Q pro jiné než polohové stavy nulové? Jaký je význam/důsledek nulové matice R ?
- 5) Jaká je nejrychlejší a nejpomalejší uvažovaná dynamika řízeného systému a jaký mají vliv na volbu počtu shooting nodes a horizontu predikce?
- 6) Okomentujte prosím srovnání jednotlivých regulátorů MRS skupiny. Zejména co myslíte pod pojmem „the first point of the reference trajectory“?

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **C - dobře**.

Datum: 6.6.2023

Podpis: