POSUDEK VEDOUCÍHO ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

I. IDENTIFIKAČNÍ ÚDAJE

Název práce:	**Fuze senzorických dat polohy pro autonomní vozidla**
Jméno autora:	**Bc. Tomáš Twardzik**
Typ práce:	diplomová
Fakulta/ústav:	Fakulta elektrotechnická (FEL)
Katedra/ústav:	Katedra řídicí techniky
Vedoucí práce:	doc Ing. Tomáš Haniš, Ph.D.
Pracoviště vedoucího práce:	Katedra řídicí techniky, ČVUT FEL

II. HODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH KRITÉRIÍ

Zadání **mimořádně náročné**

Hodnocení náročnosti zadání závěrečné práce.

Diplomová práce řeší velmi komplexní úlohu vývoje senzorické jednotky po stránce celkového konceptu, selekce vhodného hardwarového vybavení včetně senzorů a návrhu algoritmu fúze dat na komponentní úrovni analýzy a zprovoznění jednotlivých senzorů i systémové integrace a testování.

Splnění zadání **splněno**

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.

Student zadáni splnil ve všech bodech v plné míře

Aktivita a samostatnost při zpracování práce **A - výborně**

Posuďte, zda byl student během řešení aktivní, zda dodržoval dohodnuté termíny, jestli své řešení průběžně konzultoval a zda byl na konzultace dostatečně připraven. Posuďte schopnost studenta samostatné tvůrčí práce.

Student byl velmi aktivní, samostatně rozpracovával a předkládal jednotlivá dílčí řešení, na kterých jsme mohli stavět vyvíjený systém. Na dohodnuté termíny chodil velmi dobře připraven.

Odborná úroveň **A - výborně**

Posuďte úroveň odbornosti závěrečné práce, využití znalostí získaných studiem a z odborné literatury, využití podkladů a dat získaných z praxe.

Předložená práce je na skvělé úrovni. Kde student byl schopen přetavit aktuální teoretické výsledky a aplikovat je na reálný problém nebojím se říci průmyslové úrovně.

Formální a jazyková úroveň, rozsah práce **A - výborně**

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

Předložená práce je v anglickem jazyce a plně odpovídá rozsahem a formou.

Výběr zdrojů, korektnost citací **A - výborně**

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.

Student prokázal schopnost pracovat s literaturou, komunikovat s průmyslovými i akademickými partnery.

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.

Student se velmi dobře zorientoval v problematice a dodal řešení využívající poznatky v oblasti senzoriky a kalmanovské filtrace, navázané na relevantní problematiku s reálnými experimenty.

III. CELKOVÉ HODNOCENÍ A NÁVRH KLASIFIKACE

Studen se dokázal ve velmi dobře zorientovat v problematice určování polohy a orientace, nejen autonomních, vozidel. Provedl praktickou implementaci a analýzu řady senzorických systémů, od absolutní D-GNSS jednotky, relativních měření v podobě IMU jednotky až po odometrii a vizuální odometrii. Tomáš naimplementoval EKF algoritmus pro fúzi senzorických dat, který je navržen s ohledem na různorodé vzorkovací periody jednotlivých senzorických dat, případně i senzory s neperiodickým měřením. Dále připravil celkové prostředí pro simulaci a testování výpadků jednotlivých zdrojů informace. V neposlední řadě připravil na základě reálných jízdních testů a jejich analýzy podklady pro automatickou adaptaci EKF procesu vzhledem k proměnlivé kvalitě jednotlivých měření. Prezentovaná práce je klíčový výsledek, který budeme dále používat v rámci dalších projektů v oddělení.

Předloženou závěrečnou práci hodnotím klasifikačním stupněm **A - výborně.**

Datum: 25.8.2022 Podpis:

THESIS REVIEWER'S REPORT

I. IDENTIFICATION DATA

Thesis title:	Autonomous vehicle position data fusion
Author's name:	Bc. Tomáš Twardzik
Type of thesis :	master
Faculty/Institute:	Faculty of Electrical Engineering (FEE)
Department:	Control Engineering
Thesis reviewer:	Ing. Michal Sojka, Ph.D.
Reviewer's department:	ČVUT, CIIRC

II. EVALUATION OF INDIVIDUAL CRITERIA

Assignment **challenging**

How demanding was the assigned project?

The project was challenging because the student has to deal with a physical platform and solve real-world engineering problems. In addition to that, he had to understand several domains (sensors, control theory, ...) and combine the information from them to one coherent work.

Fulfilment of assignment **fulfilled**

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 consider the assignment as fulfilled. Although the student mentions, that some parts of the solutions are limited or exhibit some problems, the amount of work done is extraordinary and the results are convincing.

Methodology **outstanding**

Comment on the correctness of the approach and/or the solution methods.

The student first studied the technologies of the respective sensors and described them in great detail, including interesting facts about which sensors are currently used by key industrial players. Then he described theoretical basis of data fusion algorithms. The practical part builds on the theoretical one and describes how the sensors and algorithms are used on the developed platform. The author derives the mathematical model of the car and designs an Extended Kalman Filter for it. Finally, the implementation is evaluated on the data from the real vehicle.

Technical level **A - excellent.**

Is the thesis technically sound? How well did the student employ expertise in the field of his/her field of study? Does the student explain clearly what he/she has done?

The technical level corresponds to what I would expect in such a kind of work. I do not see significant problems. However, some parts could improved:

- For example, the author describes, that he modified operating system configuration and startup scripts, but there are no any details what was modified and how. People working on the project in the future might benefit from having that documented.
- Additionally, the description of system model in Chapter 8 could be improved. The state vector is first defined in a paragraph text an subsequent sections are slightly harder to follow. For example, it is not clear how the author "injects precise measurement of heading from HM GNSS receiver".
- Finally, at a few places, e.g. Figs. 7.3 and 8.4, the author presents some results, without any conclusion. The reader has to interpret the figures themselves and guess, which method provides better results.

Formal and language level, scope of thesis **B - very good.**

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?

The thesis is written in good English and typeset with LaTeX, thus having good look. Language-wise, sometimes the author uses informal language ("I have tossed the term", "crudely divided", "little to none"). The thesis is longer than is usual (156 pages), but most of the content is interesting. With some effort, the text could be shortened, without loosing any

information; especially the Introduction chapter is unnecessarily wordy. From the typographical perspective, the author should learn the difference between the inch character "..." and quote characters "...".

Selection of sources, citation correctness **A - excellent.**
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?
The thesis references over 90 sources and cites them well.

Additional commentary and evaluation (optional)
Comment on the overall quality of the thesis, its novelty and its impact on the field, its strengths and weaknesses, the utility of the solution that is presented, the theoretical/formal level, the student's skillfulness, etc.
I appreciate that the student has participated in writing two papers published at recognized conferences.

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

Summarize your opinion on the thesis and explain your final grading. Pose questions that should be answered during the presentation and defense of the student's work.

The student conducted huge amount of work, from technology/literature review, over construction of mechanical parts to designing algorithms, implementing and evaluating them. All this is well described in the thesis and the results appear functional. The author acknowledges few limitations, perhaps the most significant is inability to run his algorithm on the vehicle in real-time. However, the thesis will definitely allow other students to continue in this work and complete the missing pieces.

I have the following questions for the student:

- Your GPS antennas are equipped with circular metal plates. Can you quantify how it improves the quality of received signals and quality of localization?
- You mention, that using a Wireguard VPN adds 30 ms of latency to RTCM data. How is the GNSS accuracy influenced by those RTCM communication latencies? Which latencies are acceptable? Is the use of public mobile internet (via 3G/4G/5G) sufficient w.r.t. achieved latencies?
- What do you think is the biggest complication in implementing your EKF for use in real-time on the vehicle platform?

The grade that I award for the thesis is A - excellent.

Date: **26.8.2022** Signature: