

## **Přístup ke snížení výpočetní náročnosti systémů rozpoznávajících prostředí mobilního robota**

This thesis is concerned with a Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) of a robot movement and position. This is a very complex problem with a wide variety of boundary conditions and an active research theme. The thesis is centered around the problem of detection of environment changes, it focuses on using one-dimensional non-visual sensors to reduce computation cost, and the image analysis based approaches are proposed as well. The main contribution of the thesis is a new system for the detection and classification of the robot environment based on data from the camera and non-visual sensors. The increasing importance and deployment of robots in the applications of everyday life justify the choice of the topic. The requirement to reduce the computational time is justified because the robot navigation must run in real-time.

The thesis consists of two blocks, Chapters 1-4 and 5-7, the first is devoted to the theoretical introduction and the second deals with individual methods and experiments. The first block is oriented mainly on SLAM methodology, with the extension in the direction of Environment Change Detection and Classification. The two latter topics turned out to be the main research themes of the thesis. In the second block (Chapters 5-7) the experiments with the one-dimensional sensors and image-based scene classification are described. The main contribution is described in Chapter 6 - Experiments, but it is somehow hidden under layers of application details.

The topic of Environment Change Detection and Classification connected not only to SLAM algorithms but as well as to the general scene classification is definitely an important topic in the literature because understanding the background information of the image data is crucial. Introduced 1D sensors in SLAM have not been mentioned in SLAM literature very often in the environment change detection scheme (there are several barometric approaches to the floor identification or ultrasonic distance sensors replacing LIDAR data), which fact is mentioned by the author.

The problem definition (an application of 1D sensors and/or image-based classification in the environment change detection) is well described, however, it is questionable if the problem description does not omit the context that can be known but is not used. The goal seems to be very general, not using any a priori information, which can be available. The fulfillment of the planned goals is described in Chapter 6, there are graphs and tables shown, but I am missing thorough information about the results. There is a list of various datasets (weather, part of the day, etc.) acquired but the results seem to be capturing just particular cases.

The goal fulfillment info is provided in Chapter 7. The suitability of individual one-dimensional non-visual sensors to detect the transition between environments is provided with two ways how to detect changes. An analysis of robot environment classification methods based on image description was introduced and individual approaches were compared. The goal here shifted from the SLAM platform methodology to the scene classification. The computational requirements and average accuracy have been analyzed and the conclusions made. It has to be mentioned that the student designed the robot itself and he has chosen the type of sensors used for the experiments. The proposed sensors have various levels of usability for given tasks. Some of my comments are in the "Questions" paragraph. I see the main contribution in the developed and assembled robot system together with corresponding software, when various implementation aspects were taken into account. The novelty of the proposed methodology is either incremental or it is an implementation of the SoA methods. The choice of the 1D sensors is not well justified in all cases (i.e. humidity sensor). The dataset for scene classification, which was claimed as an issue, can be extended for example by SUN database.

The SLAM state of the art is covered in the theoretical part as well as scene classification methods and environment change detection methods. The depth of the theoretical introduction is sometimes varying. Due to the wide range of covered topics the level of detail is shallow (for example page 75). The ratio of the review section and the student contribution should be changed in favor of the latter. I would recommend dedicating one solo chapter to describe which steps have been proposed and chosen and not fuse this part with the description of the experiments themselves. It is difficult to assess the student's contribution in a defined way. So the structure and the organization of the thesis are improvable. The language and comprehensibility of the text are good. The citations are appropriate, just sometimes can be added, for example for Mobile Robot Programming Toolkit, NVIDIA Isaac, and individual methods in 4.1.1., sometimes there are details missing (no. 117). The figure captions can be more descriptive (Fig. 2.3).

The student has (according to ORCID) 1 journal paper and 14 papers from conferences in conference proceedings, often published as books. These attracted 27 citations in total (Google Scholar, with self-citations). The topic of the thesis is not covered by a paper.

Questions:

1. The limitation to *per frame* approach in the case of scene classification (without any history, just classification of one image) seems to me crucial. Why this approach was chosen?
2. The delay in the temperature measurements is processed without exploiting the known physical nature of this phenomenon. Do you see any ways how this could be incorporated into the trigger function design?
3. The dataset for the scene classification seems to be too heterogeneous. Would not be better to limit the evaluation to more focused set?

I can see both positive and negative aspects of the thesis. The student shows that he is familiar with many aspects of SLAM and robot navigation in general. He shows, that he has a strong robotics background and knows how to apply it in order to solve practical problems. On the other hand, in the thesis the amount of new research and the scientific contribution is limited and the number of journal papers could be higher. To summarize, the author of the thesis proved to have the ability to perform scientific research and the positive aspects prevailed.

Therefore, I recommend the thesis of Petr Neduchal for the defense.

doc. RNDr. Barbara Zitová, PhD

Institute of Information Theory and Automation  
The Academy of Sciences of the Czech Republic

# Oponentní posudek dizertační práce Ing. Petra Neduchala

Ing. Karel Horák, Ph.D., Vysoké učení technické v Brně

Při sestavení oponentního posudku se přidržuji následující struktury navržené studijním a zkušebním řádem ZČU.

## a) zhodnocení významu disertační práce pro obor

Téma disertační práce samotné je aktuální. V mobilní robotice dosud panuje poměrně silná specifičnost účelu a podmínek použití každého robota, přičemž zobecňování jak účelu, tak pracovního prostředí není vzhledem k řadě jiných obtížných úloh mobilní robotiky obvyklé. Schopnost sensorické části mobilního robota rozpoznat typ prostředí je však v některých úlohách kritická – typicky např. záchranářské či průzkumné roboty typu Orpheus vyvíjené na našem pracovišti, pro něž je změna prostředí obecně nepředvídatelná, pakliže nejde o teleprezenční řízení nebo obecně transportní roboty v medicíně či průmyslu, skladová automatizace apod. Samotné technické řešení rozpoznání typu prostředí v real-time navržené jako kombinace analýzy jednoduchých snímačů (UZ snímač výšky stropu, snímač teploty a vlhkosti prostředí) následované komplexní analýzou obrazu prostředí může být pro tyto typy úloh přínosné především z pohledu nízkého počtu takto ucelených prací ověřených na konkrétní robotické platformě, byť jednotlivé fáze procesu nepředstavují samy o sobě zcela nové vědecké poznatky (typicky např. obecná úloha rozpoznání prostředí z obrazu pomocí konvolučních neuronových sítí). Přínosný pro další rozvoj oblasti klasifikace prostředí mobilního robota je také pořízený specifický dataset, je-li dostupný.

## b) vyjádření k postupu řešení problému, použitým metodám a splnění určeného cíle

Doktorand v kapitole 3 definoval jádro disertace jako využití nevizuálních jedno-modových snímačů mobilního robota pro odhad změny jeho prostředí a následnou analýzu aktuálního prostředí z rozměrnějších kamerových dat. Tento koncept má zajistit spolehlivost detekce typu prostředí a současně výpočetní realizovatelnost v praktických úlohách mobilní robotiky v reálném čase. Téma disertace je v podstatě aplikační, čehož se doktorand při své práci přidržel. Vyzdvihnout lze především pečlivé zpracování rešerše metod SLAM doplněné o přehled základní snímačové techniky využívané v mobilní robotice. Rovněž tak je důležité poznamenat, že doktorand dle popisu v dokumentu odvedl kus práce jednak na implementaci navrženého konceptu, jednak ale také na samotné platformě mobilního robota a pořízení do značné míry unikátního datasetu obsahující synchronizovaná data jak z nevizuálních, tak vizuálních snímačů při změně prostředí mobilního robota. Celý koncept rozpoznání prostředí robota je navržen pro real-time užití na platformě Jetson Xavier, čili významným rysem práce je konkrétní sekvence zpracování různých typů signálů v závislosti na výpočetní náročnosti. Z popsanych výsledků práce lze usoudit, že doktorand v kapitole 3 vytyčených cílů v praktické rovině dosáhl.

## c) stanovisko k výsledkům disertační práce a k původnímu konkrétnímu přínosu předkladatele disertační práce

Z kapitol 4, 5 a 6, v nichž doktorand popisuje návrh, implementaci a vyhodnocení tří experimentů systému pro rozpoznání prostředí mobilního robota v binárním smyslu vnitřní-vnější vyplývá, že popsaný systém reaguje na reálnou změnu prostředí statisticky správně. Teoretický koncept rozpoznávacího systému tak lze považovat za ověřený. Je však nutné poznamenat, že z výsledků obou uvažovaných přístupů (tj. tradiční a využívající NN) tabelovaných na str. 125 lze navržený systém v praxi považovat za spíše podpůrný, zejména v kritických medicínských či průmyslových aplikacích. Samotný teoretický přínos práce pak spočívá ve vhodné kombinaci jinak známých řešení z jiných oblastí, což však ve výsledku pro posun vědění v oblasti mobilní robotiky přínosné je. Současně je vhodné zmínit, že dané téma stále obsahuje velký prostor pro výzkum metod fúze dat jednotlivých snímačů, a to především v oblasti strojového učení, zde zjevně s učitelem.

d) vyjádření k systematice, přehlednosti, formální úpravě a jazykové úrovni disertační práce

Předložený dokument dizertační práce má cca 130 stran a je psán v anglickém jazyce. Text samotný je odborně i jazykově na dobré úrovni, terminologické a gramatické chyby se vyskytují jen výjimečně. Výtku k formální stránce práce mám k rozvržení a obsahu kapitol. Kapitole 3 o cílech disertace předchází kromě úvodu pouze kapitola popisující SLAM algoritmy a robotické platformy (HW i SW), nikoli však současný state-of-the-art týkající se přímo tématu práce, tj. metody pro rozpoznání prostředí mobilního robota, popř. algoritmy řešící výpočetní náročnost těchto metod. Bývá dobrým zvykem, vycházejícím přirozeně ze sekvence činností vědecké práce, uvést současný stav řešené problematiky jakožto stav výchozí právě před deklarací cílů disertace, aby bylo zřejmé, na jaký stav doktorand navazuje. První zmínka o různorodosti prostředí, v nichž mobilní robot operuje, se vyskytuje až na str. 55 v kap. 2.9.2 bezprostředně před cíli disertace, nadto pouze jako odstavec seznamu několika dalších otevřených problémů SLAM a mobilní robotiky obecně. Konkrétní reference state-of-the-art v oblasti rozpoznání prostředí (vnitřní a vnější) mobilního robota doktorand uvádí v kapitole 3 cíle disertace. Za snad jedinou typografickou chybu lze považovat nevyznačení typu prostředí (tj. ground-truth) v grafech měřených veličin od str. 96.

e) vyjádření k publikacím studenta

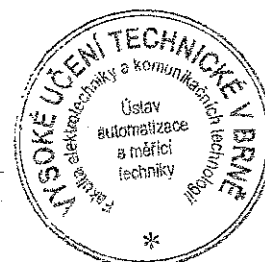
Na konci dokumentu doktorand uvádí po relativně dlouhém výčtu studovaných referencí (čítající celkem 234 položek) také vlastní práce. Těch je ve výčtu celkem 25 především z oblasti zpracování signálu, obrazu a mobilní robotiky, přičemž 6 z nich se týká přímo tématu disertace a u nichž je doktorand rovněž hlavním autorem. Publikáční aktivita je objemově obecně dostačující, nicméně nelze nezmínit, že z hlediska kvalitních výstupů zde chybí především publikace samotného jádra disertace v nějakém impaktovaném či i jinak oborově prestižním časopisu. Z uvedených zpravidla konferenčních publikací tak nelze příliš jasně vyvodit citační dopad, tj. uznání výsledků disertace vědeckou komunitou v oboru mobilní robotiky.

f) jednoznačné vyjádření oponenta, zda doporučuje či nedoporučuje disertační práci k obhajobě  
Vzhledem k výše uvedenému uzavírám, že doktorand předložil práci, ke které mám dílčí výtky, zpravidla však formálního charakteru, a kterou tak lze doporučit k obhajobě před komisí.

**Otázky:**

1. Bylo by možné využít pro rozpoznání vnitřního a vnějšího prostředí také spektrometr zaznamenávající charakteristický tvar spektra viditelného záření (slunce-atmosféra vs. umělé osvětlení) a s jakými omezeními či výhodami?
2. Jaká konkrétní struktura CNN využívající jaké transformace vstupních obrazových dat (feature extractor) je v současné době vrcholem v oblasti rozpoznání prostředí a proč?
3. Co je to čtyřpolní tabulka a jak ji lze využít pro evaluaci algoritmů strojového učení?
4. Z jakého důvodu je u experimentu označeného jako Record 02 záměrně zavedena systematická chyba ve formě černého drátu viditelného v zorném poli kamery?
5. Pokuste se sám kvalifikovaně, tj. např. na základě odezev, odvodit dopad vašeho řešení rozpoznání prostředí mobilního robota na vědeckou komunitu realizující odpovídající úlohy mobilní robotiky. Máte takové odezvy?

ING. KAREL HORÁK, PH.D.  
PEKT VUT V BRNĚ  
TECHNICKÁ 12, 61600 BRNO  
☎ 541146417, em@it.  
HORAK@VUT.CZ



V Brně dne 18.10.2022

Ing. Karel Horák, Ph.D., v.r.