

## Habilitation Thesis Review

**Title of habilitation thesis:** Recent advanced methods and results in distributed cooperative control

**Author:** Kristian Hengster Movric, Ph.D., FEL, ČVUT, Prague

**Reviewer:** prof. Ing. Ivo Petráš, DrSc.  
Technical University of Košice, FBERG,  
Němcovej 3, 042 00 Košice, Slovak Republic

It is my pleasure to provide my review report of Dr. Kristian Hengster Movric habilitation thesis as I have been requested by the Faculty of Electrical Engineering at the Czech Technical University in Prague. In the following report, I first summarize the thesis and its main contributions and then I conclude it with my overall recommendation.

### Structure:

The habilitation thesis has the form of a collection of selected journal and conference papers as well as one chapter published by the author in the recent few years. The thesis has totally 160 pages. Topics of the papers, which create the thesis' chapters, are the following:

1. Synchronizing Region Approach for Identical Linear Time-invariant Agents
2. Distributed Static Output-feedback Control for State Synchronization in Networks of Identical LTI Systems
3. Cooperative Synchronization Control for Agents with Control Delays: A synchronizing Region Approach
4.  $H_\infty$  Output Regulation of Linear Heterogeneous Multi-agent Systems over Switching Graphs
5. Differential Graphical Games for  $H_\infty$  Control of Linear Heterogeneous Multi-Agent Systems
6. Distributed Observer and Controller Design for Spatially Interconnected Systems
7. Distributed Estimation on Sensor Networks with Measurement Uncertainties
8. Distributed Adaptive Consensus Protocols
  - 8.1 Distributed Adaptive Consensus Protocols with Decaying Gains on Directed Graphs
  - 8.2. Distributed Adaptive Consensus Protocol with Eigenvalue Estimation

At the beginning of the thesis there are also Summary and Introduction sections, and at the end there is a CV with the list of the author's publications. Most of the above listed works have been already published and two of them have been just submitted (#5 and #7) for peer review. Four papers were published in high quality impact journals (Automatica, Journal of the Franklin Institute, International Journal of Robust and Nonlinear Control, IEEE Transactions on Control Systems Technology) with very difficult, several rounds, review process. Chapter #1 is a part of book published by Elsevier, and conference papers #8.1 and #8.2 were presented at the conferences technically supported by IFAC and IEEE, respectively. Hence, all these facts confirm the quality of mentioned papers and also habilitation thesis itself.

## Contributions:

The thesis deals with distributed cooperative control. Collected papers present author's contribution towards the current state-of-the-art. They bring also interesting results and compelling applications, as well as open potential future research. A detailed survey of each paper contribution was described in Introduction section. Moreover, a short summary and introduction is also described in each chapter of the thesis. The content is as follow: The first chapter brings a selection of recent results in the field of identical system cooperative state synchronization. The second chapter studies state synchronization of multi-agent systems with disturbances using distributed static output-feedback control. Chapter 3 investigates multi-agent system synchronization in presence of control signal time-delays. Chapter 4 analyzes  $H_\infty$  output regulation of linear heterogeneous multi-agent systems. The fifth chapter presents a novel concept of differential graphical games is defined for linear heterogeneous agents subject to external unmodelled disturbances, which contain the previously introduced graphical games for homogeneous agents as a special case. Chapter 6 tackles networked distributed observer and controller design problems over directed graph topology for spatially interconnected systems. Chapter 7 brings an innovative estimation scheme for large-scale distributed systems. Chapter 8 is divided to two sections. The first section presents a distributed adaptive consensus protocol that solves the cooperative regulator problem for multi-agent systems with general linear time-invariant dynamics networked on directed, strongly connected communication graphs. The second section addresses distributed consensus problem for multi-agent systems with general linear time invariant dynamics and undirected connected communication graphs.

## Comments and questions:

I have just a few formal comments:

- p. 36: the title of Automatica paper is wrong, it is written as *Distributed Static Output-feedback Control for State Synchronization of Multi-agent System*, however it should be *Distributed Static Output-feedback Control for State Synchronization in Networks of Identical LTI Systems* (see p. 37).
- p. 116: the title of IEEE Trans. On Control Systems Technology paper is also wrong, it is written as *Distributed Observer and Controller Design for Spatially Distributed Systems*, however it should be *Distributed Observer and Controller Design for Spatially Interconnected Systems* (see p. 117).
- What is the recent status of the papers (#5 and #7), which have been only submitted?

## Conclusions:

Based on the author's work presented in habilitation thesis, despite of some formal comments, I would like to recommend the habilitation thesis **Recent advanced methods and results in distributed cooperative control** for further consideration and for its defence, and after eventual successful defence, to award the author **Dr. Kristian Hengster Movric** title **associate professor** (docent) in the field **Technical Cybernetics**.

## **Review of the Habilitation thesis**

### **Kristian Hengster-Movric: Recent Advanced Methods and Results in Distributed Cooperative Control**

The habilitation thesis consists of eight preprints of papers co-authored by the Author of this thesis. Moreover, it contains an Introduction section where a brief description of all the papers covered by this work is presented. At the end, a CV and a list of publications are included.

The papers mostly deal with the problem of leader-following synchronization of multi-agent systems. This is a very hot topic in the today's control theory.

The first paper included into this thesis present a survey of the synchronizing region approach for linear multi-agent systems composed of identical agents. Both cases of continuous-time as well as discrete-time (often neglected) multi-agent systems are covered. The characteristic feature of the second paper is application of the output feedback to the synchronization problem of multi-agent system. A very important topic – agents with delayed controls – are handled in the third paper. The approach adopted here seems to be rather conservative and the required assumption – equal time delay throughout the entire multi-agent system – seem to be rather restrictive. The following two papers describe a solution of a different problem – output synchronization of heterogeneous multi-agent systems. The sixth and seventh papers are devoted to a rather different topic: distributed control and estimation in large-scale physically interconnected systems while the last paper deals with multi-agent systems again, this time in connection with an adaptive mechanism to adjust the coupling gain.

The results are of high quality. All papers mentioned in this thesis were published in leading journals: Automatica, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Journal of the Franklin Institute, International Journal of Robust and Nonlinear Control etc. This clearly proves that achievements of K. Hengster-Movric exceed the usual niveau required for a successful defence of a habilitation thesis.

The thesis is written carefully with almost no typos and misprints in a perfect English.

#### **Question**

Why so few attention was paid to the consensus problem of multi-agent systems (as opposed to the leader-following problem)?

#### **Remarks**

I would expect the impact factors of the journals in the list of all papers at page 159.

Number of citations should also be included.

## **Summary**

This Habilitation thesis proves that its Author is one of leading members of the research team at the Department of Control Engineering of the Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University. It demonstrates his abilities of achieving results publishable in leading journals. Moreover, as several of the papers included here were co-authored by younger members of the aforementioned research team, it is obvious he provides a valuable assistance to PhD students and young researchers at the Department of Control Engineering. Last but not least, since researchers from several different institutions are co-authors of some of papers presented here, one can see the Author established fruitful connections to other groups working in the same or similar fields of the recent control theory.

**I recommend Dr. Kristian Hengster-Movric to be awarded with the title Associate professor (docent).**

Prague, April 12, 2019

.....  
Branislav Rehák, PhD.  
UTIA AV ČR, v.v.i.

# Oponentský posudek na habilitační práci

Název práce: Nové pokročilé metody a výsledky v distribuovaném kooperativním řízení

Autor: assist. prof. Kristian Hengster-Movric, Ph.D., FEL ČVUT v Praze

Oponent: doc. Ing. Ondřej Straka, Ph.D., FAV, ZČU v Plzni

## Téma a obsah práce:

Předložená habilitační práce se zabývá distribuovaným kooperativním řízením, zejména pak problémem synchronizace stavu homogenních agentů prostřednictvím stavové a výstupní zpětné vazby a problémem synchronizace výstupu heterogenních agentů s distribuovanou výstupní zpětnou vazbou. Dále práce popisuje návrh distribuovaných estimátorů slučujících odhady stavu systému pro účely distribuovaného řízení a také použití protokolů adaptivního konsenzu.

Samotný text je pojatý jako soubor vědeckých publikací doplněný komentářem. Komentář v rozsahu pouhých 6 stran je doplněn o 9 vybraných knižních, časopiseckých a konferenčních článků publikovaných v letech 2015 až 2018, přičemž dva z článků jsou v recenzním řízení. Soubor připojených prací je zaměřením jednolity a soustřeďuje se na distribuované kooperativní řízení a odhadování. Téma je v současné době vysoko aktuální, zejména s ohledem na fenomény jako jsou internet věcí, rozlehlé systémy či kyber-fyzikální systémy.

## Hodnocení uvedených publikací:

Publikované práce naznačují snahu autora o zobecnění metod distribuovaného kooperativního řízení a uvolnění jejich některých předpokladů. S výjimkou dvou publikací prošly všechny mezinárodním řízením a zejména časopisecké publikace lze považovat za velice zdařilé.

Neexistenci rozsáhlejšího úvodního komentáře částečně vyvažuje první kapitola publikovaná jako kapitola v knize "Control of Complex System: Theory and Application" vydané nakladatelstvím Elsevier. Tato kapitola vysvětuje teoretické pozadí distribuovaného řízení s homogenními agenty, které slouží především dalším dvěma kapitolám. Kapitola pojednává o metodě synchronizační oblasti založené na klasickém optimálním řízení a Lyapunovově teorii stability aplikované v problémech návrhu distribuovaného kooperativního řízení.

Druhá kapitola obsahuje článek publikovaný v časopise Automatica zabývající se aplikací metody synchronizační oblasti v problému synchronizace stavu homogenních agentů pomocí statické výstupní zpětné vazby. Výhodou navrženého řešení je jednoduchá časově invariantní zpětná vazba, která zajistí distribuovanou synchronizaci stavu a garanteuje konečnou  $H_\infty$  mez v prostředí s nemodelovanými poruchami. Jedná se o rozšíření předchozího řešení se stavovou zpětnou vazbou na výstupní zpětnou vazbu.

Třetí kapitolu tvoří článek publikovaný v časopise Journal of Franklin Institute, který se pojednává o aplikaci metody synchronizačních oblastí v prostředí se zpožděními řídicího signálu. Řešení se soustředí na problém s jednotným zpožděním a vede na synchronizační oblasti, které na tomto zpoždění závisí tak, že se vztuštajícím zpožděním se oblast zmenšuje. Jedná se tedy opět o zobecnění předchozích řešení pro situace, kdy se řízení aplikuje se zpožděním. Vlastnosti

navrženého řešení jsou následně analyzovány, zejména je provedeno srovnání s řešeními, která zpoždění neuvažují. Navíc je zkoumán kompromis mezi robustností vůči zpožděním a rychlou synchronizací.

Obsahem čtvrté kapitoly je článek v časopise International Journal of Robust and Nonlinear Control zaměřující se na problém distribuovaného kooperativního řízení v prostředí heterogenních agentů. Řešení založené na lineárních maticových nerovnicích zajišťuje synchronizaci výstupu a garantuje  $L_2$  mez v prostředí nemodelovaných poruch. Vedle modelovaných poruch tedy zde na heterogenní agenty působí i nemodelované poruchy, které jsou řízením potlačovány a agenti vzájemně komunikují skrze grafy s přepínáním.

Pátá kapitola obsahuje článek zasláný do recenzního řízení časopisu International Journal of Robust and Nonlinear Control, který se na problém distribuovaného kooperativního řízení dívá z odlišné perspektivy, kdy je synchronizace výstupu s potlačením poruch formulována jako grafická hra. Navržený přístup představuje zobecnění grafických her pro heterogenní agenty. Formulace vede na vázané Hamilton-Jacobi-Bellmanovy rovnice řešené kombinací zpětnovazebního učení a algoritmů typu "actor-critic".

Šestou kapitolu tvoří článek publikovaný v časopise IEEE Transactions on Control System Technology, který se zabývá estimačními algoritmy uspořádanými v síti, které fúzují odhad stavu poskytované ostatními estimátory a sloučené odhady se následně využijí v řízení. Tato úloha se zaměřuje na rozlehlé lineární časově invariantní systémy. Pro odhad je pak používána technika kooperativního konsenzu, kdy agent slučuje svůj odhad stavu s odhady stavu poskytnutými sousedními agenty. Ačkoliv princip separace v takovéto formulaci neplatí, navržené estimační a řídicí algoritmy garantují celkovou konvergenci odhadu a stability systému.

Obsahem sedmé kapitoly je článek zasláný do recenzního řízení zabývající se opět distribuovaným odhadováním a řízením. Tentokrát se však při návrhu bere v úvahu omezená přesnost senzorů, která může být napříč senzory odlišná. Navržené řešení vede na časově invariantní zisk s tím, že není požadována výměna kovariančních maticí chyb odhadů tak, jak je to obvyklé při řešení úlohy distribuovaného odhadu stavu pomocí algoritmů založených na Kalmanově filtru. Navržený algoritmus distribuovaného odhadu stavu je pak možné využít v rámci distribuovaného kooperativního řízení.

Osmou kapitolu pak tvoří dva konferenční články prezentované na konferencích IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems a International Conference on Process Control. Kapitola se zaměřuje na použití adaptivních protokolů konsenzu s topologiemi orientovaných grafů. Cílem je vyhnout se nutnosti globálního sdílení vazební konstanty pro návrh synchronizačních oblastí mezi všemi agenty. Navržené řešení je založené na adaptaci vazební konstanty jednotlivých agentů v závislosti okolních agentech.

## Závěr:

Z publikovaných prací, o jejichž kvalitě svědčí vysoké impaktní faktory časopisů, lze usoudit, že autor je vyzrálou vědeckou osobností s mezinárodním přesahem své práce. Předložená habilitační práce přináší nové poznatky a myšlenky zejména v oblasti distribuovaného kooperativního řízení a také v oblasti distribuované estimace a je cenným příspěvkem k dané problematice. Doporučuji proto připustit habilitační práci k obhajobě a po jejím úspěšném vykonání udělit vědecko-pedagogický titul docent.

K posudku připojuji otázky, k nimž se habilitant v průběhu obhajoby vyjádří.

1. Navrhované algoritmy pro distribuovaný odhad stavu využívají jeden zisk pro inovaci založené na měření daného agenta a jeden zisk pro souhrnnou inovaci vztaženou k

okolním agentům. Jaký dopad by mělo uvažování odlišných zisků pro inovace od jednotlivých okolních agentů, přičemž zisky by reflektovaly kvalitu jednotlivých odhadů stavu poskytovaných agenty?

2. Lze u odhadů stavu vypočítaných agenty mluvit o jejich optimalitě, či je pouze zajištěna jejich konvergence?

V Plzni 11.5.2019



doc. Ing. Ondřej Straka, Ph.D.