

Information Processing in Distributed Sensor Systems

March 28, 2019

Abstract

Recent advances in the design of complex networked sensing systems bring challenges for managing the flow of information over hierarchical levels of data processing. With direct impact on large scale monitoring and automation systems, the development of new algorithms for sensor data processing represents a timely issue that can improve the performance of the control loops by means of high level data-driven abstraction layers. Distributed sensing by wireless sensor and actuator nodes provides the opportunity of fine grained actions in both temporal and spatial domains. The underlying information system architecture that supports the transformation of data from the sensor measurements of the physical world is an important component, especially while accounting for new paradigms such as fog computing to serve as middleware within a flat automation hierarchy composed of only field level/intelligent periphery devices, and cloud/decision level. Key applications of distributed sensor systems, critical and non-critical, are currently focused on the built environment, smart cities and industry.

The habilitation thesis structure has been divided into three main parts. The first part, in Chapter 1, covers my professional background with emphasis on the seven-year period between 2013 and 2019, reflecting the activity within the Department of Automatic Control and Industrial Informatics at the University Politehnica of Bucharest after the defence of my PhD thesis. This has been carried out mainly within the Industrial Information Systems group while also enjoying fruitful collaboration with several other department colleagues and external collaborators. Research projects where I have served as principal investigator have been funded by the European Commission through the human resources development program, the US Department of State through the US-Romania Fulbright Commission, the Austrian Academy of Sciences, the Ministry of Research and Innovation and the University "Politehnica" of Bucharest, as well as private companies. During this time, the teaching activity consisted of delivering course and practical activities in information processing, intelligent measurement systems and control engineering. Engagement with the scientific community at large has been a guiding factor of my career so far through the involvement in the organisation of important scientific events, journal editorial boards and conference program committees, volunteering activities within professional organisations and as external expert for public and private entities.

The second part of the thesis, covered by Chapters 2 through 4, includes an extensive survey of the main scientific achievements illustrated by recent publications. This has been roughly divided into the following areas of original contributions. The first area has been concerned with new **consensus algorithms for distributed agreement in sensor networks**. In this case work has been done to study and optimise network and communication topologies, in conjunction with the physical system being monitored,

that helps these distributed sensor agents to reach agreement on values or actions of joint interest. On top of this data aggregation and eventually sensor fusion primitives have been applied and provide inputs to higher level decision layers. **Smart building automation**, including model predictive control and black-box modelling of building energy dynamics, has been a second key area of research. Using computational intelligence techniques on pre-processed data streams collected from the building, including new developments such as deep neural networks for sequence modelling, mitigates several challenges in the identification of building dynamics through time consuming and costly approaches. This has been applied both to thermal energy as well as electrical energy consumption of large commercial buildings. Finally, the design of industrial **information system architectures** that support higher level developments using open-software and hardware modules has been a further area of activity. The availability and dissemination of such design patterns is a key enabling factor of reproducible research by means of open datasets, code libraries and other types of artefacts. It is important to note that many of the original contributions have been realised in teams that already include PhD students and postdoctoral researchers.

The final chapter of the thesis elaborates upon the research perspectives that are supported by previous and current ongoing work. The main interests are foreseen to lay with building robust distributed sensor systems with efficient management of computing, communication and control resources under the Cyber-Physical Systems (CPS) and the industrial Internet of Things (IIoT) paradigms. This will account also for the emergence of statistical learning algorithms and contributing to their implementation and experimental validation for *in situ* detection, forecasting and performance optimisation in automation. The current research plans offer good potential to improve and develop new teaching activities with emphasis on PhD and master study programs and international cooperation frameworks. Future key objectives are thus summarised as follows:

- strengthening of a research team in the field of distributed sensor data processing and learning algorithms for control applications, with out-reaching economic and social benefits;
- enabling new PhD students to independently and critically pursue and develop up-to-date research questions, supported by experimental engineering achievements;
- assuring the means and infrastructure to drive good quality research, impact and visibility of the results at an international level, thereby contributing to the consolidation the scientific prestige currently enjoyed by the University Politehnica of Bucharest.

Grigore Stamatescu
Vienna, March 2019

Abstract

Noile dezvoltări din domeniul proiectării sistemelor complexe de senzori interconectați generează provocări semnificative pentru gestionarea fluxurilor de informații între niveluri ierarhice de prelucrare a datelor. Dezvoltarea unor noi algoritmi de prelucrare a datelor provenite de la senzori distribuiți reprezintă o problemă actuală, cu impact direct asupra sistemelor de monitorizare și automatizare de mari dimensiuni, care poate conduce la îmbunătățirea performanțelor buclelor de reglare prin niveluri de abstractizare bazate pe date. Nodurile senzoriale și de acționare fără fir permit implementarea unor acțiuni la scară temporală și spațială foarte redusă. Arhitectura sistemelor informatice suport care asigură operarea rutinelor de transformare a datelor din măsurătorile fizice este o componentă importantă, în special prin noi paradigme de tipul *fog computing* cu rolul de nivel intermediar de legătură în arhitecturi de automatizare comprimate, compuse din nivel de câmp/periferie inteligentă și nivel cloud/de decizie. Direcții de aplicații de referință pentru sistemele distribuite de senzori, se regăsesc în mediul construit, orașe inteligente și în industrie.

Structura tezei de abilitare este împărțită în trei secțiuni principale. Prima secțiune, Capitolul 1, prezintă experiența mea profesională recentă, acoperind o perioadă de șapte ani între 2013 și 2019, în cadrul Departamentului de Automatică și Informatică Industrială al Universității Politehnica din București, după obținerea titlului de doctor inginer. Activitatea s-a desfășurat în grupul de Sisteme Informatice Industriale dar a inclus în același timp și alte colaborări productive, interne și externe. Proiectele de cercetare pe care le-am desfășurat ca responsabil de proiect fost finanțate de către Comisia Europeană prin programul de dezvoltare a resurselor umane, Departamentul de Stat al SUA prin Comisia Fulbright Româno-Americană, Academia de Științe a Austriei, Ministerul Cercetării și Inovării și Universitatea Politehnica din București, precum și de către companii private. În această perioadă activitatea didactică a constat în cursuri și laboratoare în domeniile prelucrării informației, al sistemelor moderne de măsurare și ingineria reglării automate. Implicarea în comunitatea științifică reprezintă de asemenea un reper important al carierei mele prin organizarea unor evenimente științifice, participarea în comitete editoriale și comitete tehnice de program, activități de voluntariat în cadrul unor organizații profesionale și ca expert extern pentru entități publice și private.

Cea de-a doua parte a tezei, constând în Capitolele 2 până la 4, include un rezumat extins al principalelor realizări științifice, probate prin publicațiile recente și grupate pe trei direcții de contribuții originale. Prima direcție este reprezentată de proiectarea unor noi **algoritmi de consens dinamic pentru acord distribuit în rețelele de senzori**. În acest caz realizările constau în studiul și optimizarea topologiilor de rețea și de comunicație, raportate la sistemul fizic monitorizat, care ajută la coor-

donarea agenților senzoriali distribuiți pentru raportarea unor valori sau realizarea unor acțiuni de interes comun. Prin primitive superioare de agregare și de fuziune a datelor, sunt oferite semnale de intrare unor niveluri de decizie ierarhizate. **Automatizarea clădirilor inteligente**, inclusiv scheme de control predictiv și modelarea *black-box* a dinamicii clădirilor, reprezintă a doua direcție de cercetare. Utilizarea tehnicilor de inteligență computațională pe seturi de date pre-procesate colectate din clădiri, inclusiv a noilor dezvoltări cum sunt rețelele neuronale adânci pentru modelarea secvențelor de date, permite identificarea eficientă a dinamicii sistemelor. Sunt prezentate aplicații pentru energia termică și pentru consumul de energie electrică în clădiri comerciale mari. În final, proiectarea unor arhitecturi de sisteme informatice industriale ca suport pentru dezvoltări de nivel înalt folosind module software și hardware deschise, reprezintă o a treia direcție de contribuții. Diseminarea unor astfel de tipare de proiectare alături de seturi de date deschise, biblioteci de cod și alte resurse, reprezintă un factor de progres către o cercetare reproductibilă. Este important de menționat că multe dintre contribuțiile originale expuse au fost realizate în echipe care includ deja studenți doctoranzi și cercetători postdoctorali.

Capitolul final al tezei prezintă perspectivele de cercetare susținute de activitățile anterioare și de cele în curs de implementare. Principala direcție este anticipată a fi proiectarea unor sisteme de senzori distribuiți robuste care să gestioneze eficient resursele disponibile de calcul, comunicație și control, în cadrul paradigmatelor actuale pentru sisteme ciber-fizice (CPS) și *Industrial Internet of Things* (IIoT). Aceasta va considera și rolul în creșterea al algoritmilor de învățare statistică prin implementarea și validarea experimentală a acestora pentru detecția, predicția și optimizarea performanțelor *in situ* în automatică. Planurile actuale de cercetare oferă un potențial bun de a se reflecta și în inițierea unor noi activități didactice, cu accentul pe programe de studii doctorale și de masterat și cooperare internațională. Principalele obiective urmărite sunt rezumate după cum urmează:

- întărirea unei echipe de cercetare în domeniul prelucrării datelor de la senzori distribuiți și a algoritmilor de învățare pentru aplicații de control, cu beneficii externe economice și sociale;
- sprijinirea noilor studenți doctoranzi pentru urmărirea independentă și critică a unor teme de cercetare actuale și a unor realizări ingineresti experimentale;
- asigurarea mijloacelor și a infrastructurii necesare, ca precondiții pentru cercetări de bună calitate, impact și vizibilitate la nivel internațional și o contribuție la consolidarea prestigiului academic de care se bucură în prezent Universitatea Politehnica din București.

*Grigore Stamatescu
Viena, Martie 2019*