

Advances in Engineering Social-Cyber-Physical Systems

- HABILITATION THESIS-

Constantin-Bălă ZAMFIRESCU

April, 2015

Summary

From the computer science view, the thesis is a synopsis of the research results obtained in the complex and broad area of social-cyber-physical systems. Moreover it is intended to give a map of my current vision relative to this topic on which my past contributions are placed. Even if this habilitation covers the research performed after my PhD defence (Sept. 2006), the results are strongly connected with my work during almost 20 years. This due the fact that not my entire research until 2006 was completely focused on my PhD topic (i.e. social-cyber systems), but I jointly pursued a three years research stage in a completely different field (i.e. cyber-physical systems) at KU Leuven.

The general research topic of my entire work is nowadays coagulated under the **social-cyber-physical systems** (SCPS) concept, an extension that integrates the human factor into the modern research topic of **cyber-physical systems** (CPS). The SCPS concept was, in my knowledge, firstly coined in 2010 by Zhuge¹, but is almost pervasive in many others research topics as will be shown in this thesis. Therefore, the *1st chapter* presents the context and motivation for the SCPS research topic (section 1.1), summarizes the scientific contributions to this topic (section 1.2) and their scientific/didactic impact (section 1.3).

The *2nd chapter* synthesise my contributions to engineer SCPS-based large-scale systems. This chapter firstly provides the theoretical arguments in respect to state-of-the-art in the field for an integrated view of a SCPS (*section 2.1*). These arguments are deeply-rooted in some of the research domains where the mutual relationship between the SCPS components is irreducible. The chapter subsequently adds the key features or properties of a SCPS (*section 2.2*) and the **Anthropocentric Cyber-Physical System** (ACPS) reference model as a basic, first-class, decomposition unit for a large-scale SCPS-based system (*section 2.3*). The proposed *ACPS reference model* goes beyond the classical architecture of a CPS that simply embeds the human-machine interface in a mechatronic device. In large-scale SCPS, where the human factor will increasingly play a significant role, there is a clear need to consider humans as endogenous interacting components within a CPS. Some key emerging technologies that in my view are essential to deploy a concrete SCPS-based architecture are reviewed in the last part of this chapter (*section 2.4*).

¹ Zhuge H. (2010). Interactive semantics. *Artificial Intelligence*, **174**, p. 190–204.

The *next chapter* reviews my contributions in respect to cyber-physical integration. It summarizes the proposed **anthropocentric cyber-physical reference architecture for smart factories** (ACPA4SF) as a composition of four ACPS types that are self-sufficient to describe and engineer any manufacturing control system (*section 3.1*). It is based on the *ACPS reference model* and extends the basic reference architecture (i.e. PROSA) with which I have previously worked at KU Leuven. Subsequently, the ACPA4SF is instantiated at the factory level for a concrete production system (*section 3.2*). It is further detailed for a concrete workstation as an instantiation of the *ACPA reference model* (*section 3.3*). These instantiations proof that the key characteristics of a SCPS are true only if the SCPS integrates the human into the control loop. Furthermore, in respect to SCPS interoperability, the human factor is playing the essential role to facilitate the communication between heterogeneous intelligent artifacts in ACPA4SF. In this respect is presented the mediator approach to engineer this interoperability at the semantic level (*section 3.4*). The work reported in this chapter has been done in collaboration with the German Center for Artificial Intelligence (DFKI) and the Bremen Institut für Produktion und Logistik (BIBA) aiming at developing a reference architecture for Industry 4.0.

The *4th chapter* summarizes my research results in respect to cyber-social integration, specifically in the field of (collaborative) decision support systems. In terms of SCPS, the classical decision support system is redefined as an engineered system that is built from and depends upon the synergy of human and cyber/computational devices (*section 4.1.1*). Nevertheless, the continuous trend to adopt service-oriented architectures for decision support systems is driven by the real need of many application domains to integrate the physical environment as well. Firstly, the chapter describes two model-based decision support systems demonstrating the continuous adaptation loops that exist among the physical, cyber, and social worlds (*section 4.1.2*). This issue is further proved for two heuristic optimization methods, namely genetic algorithms and ant-colony optimization (*section 4.1.3*). This second part of this chapter synthesizes my contributions to collaboration engineering, from the theoretical investigation, to the practical implementation (*section 4.2*). The research results show that besides the “domain ontology”, the SCPS interoperability should always add an “ontology of human experiences” to support any real-life decision process.

The *last chapter* details the basic principles (*section 5.1*) that will lead the transformation of my development plans for research (*section 5.2*) and education (*section 5.3*) into tangible recipes. The chapter outlines, along the main chapters of this thesis, some further scientific developments in the field of SCPS. They are part of either ongoing or under evaluation projects, therefore I consider them to be short-term, committed developments. Finally, I truly believe that the SCPS research topic: 1) will be an active and priority research area at national and EU level to have a real perspective for funding; 2) is in resonance with the immediate interest of the local industrial environment; 3) maximizes the personal RDI knowledge and experiences.

Contribuții la ingineria sistemelor socio-fizico-cibernetice

- Teză de abilitare -

Constantin-Bălă ZAMFIRESCU

Rezumat

Din perspectiva științei calculatoarelor, teza sintetizează rezultatele propriilor cercetări din domeniul complex și vast al sistemelor socio-fizico-cibernetice. În plus, intenția este de a contura și harta viziunii mele asupra acestui subiect extrem de actual în care sunt plasate contribuțiile anterioare. Chiar dacă conținutul tezei de abilitare rezumă cercetările efectuată după susținerea tezei de doctorat (septembrie, 2006), rezultatele sunt inevitabil legate de efortul depus în cei aproape 20 de ani de cercetare. Acest lucru se datorează faptului că activitatea mea de cercetare de până în anul 2006 nu a fost complet axată pe subiectul tezei de doctorat, în speță al sistemelor socio-cibernetice, însă timp de trei ani am urmat în paralel un stagiu de cercetare la Univ. din Leuven într-un domeniu complementar, acela al sistemelor fizico-cibernetice.

Domeniul de cercetare general al întregului meu demers academic este în prezent coagulat în jurul conceptului de **sistem socio-fizico-cibernetice** (SSFC), o extensie care integrează factorul uman în domeniul de cercetare actual al **sistemelor fizico-cibernetice** (SFC). După cunoștințele mele conceptul de SSFC a fost menționat pentru prima oară în 2010 de Zhuge², însă se poate regăsi în multe alte domenii de cercetare după cum se va arăta în această teză. *Capitolul 1* prezintă contextul și motivația pentru domeniul de cercetare al SSFC (secțiunea 1.1), sintetizează contribuțiile științifice pe această temă (secțiunea 1.2) și impactul acestora din perspectivă științifică/didactică (secțiunea 1.3).

Capitolul 2 rezumă contribuțiile la ingineria sistemelor distribuite pe scară largă bazate pe SSFC. În primul rând de aduc argumentele teoretice pentru o perspectivă integrată asupra SSFC în raport cu abordările actuale (*secțiunea 2.1*). Aceste argumente sunt profund înrădăcinate în domenii de cercetare conexe, unde relația reciprocă dintre componentele unui SSFC este implicită. Ulterior sunt identificate trăsăturile fundamentale ce definesc un SSFC (*secțiunea 2.2*) și este definit un *model de referință* pentru analiza unui sistem distribuit pe scară largă bazat pe SSFC (*secțiunea 2.3*). Modelul de referință propus extinde arhitectura clasică a unui SFC prin integrarea factorului uman în bucla de control și nu doar o interfațarea simplistă cu un dispozitiv mecatronic. În sistemele distribuite pe scară largă, unde factorul uman va juca un rol din ce în ce mai important, există nevoia acută de a considera omul ca un interactant endogen SFC. În ultima parte a acestui capitol sunt analizate unele evoluții tehnologice care, în opinia mea, vor intensifica și mai mult necesitatea unei abordări integrative în

² Zhuge H. (2010). Interactive semantics. *Artificial Intelligence*, **174**, p. 190–204.

ingineria unui SSFC (*secțiunea 2.4*).

Următorul capitol sintetizează contribuțiile în ceea ce privește integrarea fizico-cibernetică. Acesta descrie succint arhitectura de referință propusă pentru sistemele de fabricație inteligente (i.e. ACPA4SF) - o compoziție de patru tipuri de SSFC auto-suficiente pentru ingineria oricărui sistem de control a proceselor de fabricație (*secțiunea 3.1*). Arhitectura este fundamentată pe *modelul de referință* al SSFC descris în capitolul anterior și extinde arhitectura de referință (i.e. PROSA) cu care am lucrat anterior la Univ. din Leuven. Ulterior ACPA4SF este instanțiată pentru un sistem de producție real, i.e. *SmartFactory*^{KL} (*secțiunea 3.2*). În plus este detaliată pentru o stație de lucru instanțierea modelului de referință propus (*secțiunea 3.3*). Aceste instanțieri demonstrează că trăsăturile esențiale ale unui SSFC sunt adevărate numai în situația în care SSFC integrează omul în bucla de control. În plus, legat de interoperabilitatea SSFC, factorul uman joacă un rol esențial în comunicarea dintre artefacte inteligente eterogene. În acest sens este prezentată medierea ca paradigmă de inginerie a interoperabilității din punct de vedere semantic (*secțiunea 3.4*). Contribuțiile sintetizate în acest capitol au fost realizate în colaborare cu Centrului German pentru Inteligență Artificială (i.e. DFKI) și cu Institutul pentru Producție și Logistică din Bremen (i.e. BIBA) având ca obiectiv dezvoltarea unei arhitecturi de referință pentru a 4-a revoluție tehnologică (i.e. Industry 4.0).

Capitolul 4 rezumă contribuțiile în ceea ce privește integrarea socio-cibernetică, în speță cercetările din domeniul sistemelor (colaborative) de asistare a deciziilor. În terminologia SSFC, un sistem suport pentru decizii presupune ingineria unui sistem ce depinde de sinergia om-sistem de calcul (*secțiunea 4.1.1*). Cu toate acestea, tendința continuă de a adopta arhitecturi orientate pe servicii în sistemele suport pentru decizie actuale este determinată de necesitatea reală, în multe domenii de aplicabilitate, de a integra deopotrivă și mediul fizic. Inițial capitolul prezintă două sisteme suport pentru decizii bazate pe modele ce demonstrează existența buclelor de adaptare continuă în spațiul socio-fizico-cibernetice (*secțiunea 4.1.2*). Acest aspect este demonstrat în continuare pentru două metode de optimizare euristice, și anume algoritmi genetici și cei de inspirație biologică (*secțiunea 4.1.3*). Ulterior, capitolul sintetizează contribuțiile din domeniul ingineriei colaborării, de la investigația de natură teoretică, la implementarea practică (*secțiunea 4.2*). Rezultatele acestor cercetări demonstrează că, pe lângă o "ontologie de domeniu", interoperabilitatea SSFC necesită o "ontologie a experiențelor umane" pentru a sprijini un proces decizional real.

Ultimul capitol descrie principiile de bază (*secțiunea 5.1*) ce vor transforma planul de dezvoltare a carierei academice, atât din perspectiva cercetării (*secțiunea 5.1*) cât și cea didactică (*secțiunea 5.3*), în rețete tangibile. De asemenea, capitolul prezintă unele dezvoltări ulterioare din domeniul SSFC în raport cu structura principalelor capitole ale tezei. Acestea sunt parte integrantă a unor proiecte aflate în derulare sau în curs de evaluare. În fine, consider că domeniul SSFC : **1**) este și va rămâne un domeniu de cercetare activ și prioritar la nivel național și european pentru a avea o perspectivă reală de finanțare; **2**) este în rezonanță cu interesul imediat al mediului industrial local; și **3**) maximizează cunoștințele și experiența personală în CDI.