



Doctoral Thesis

Modeling, compiling, and efficiently executing business processes on resource-constrained wireless sensor networks

Author(s):

Caracaş, Alexandru Mircea

Publication Date:

2012

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-007210998> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 20220

**MODELING, COMPILING, AND EFFICIENTLY EXECUTING
BUSINESS PROCESSES ON RESOURCE-CONSTRAINED
WIRELESS SENSOR NETWORKS**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

ALEXANDRU MIRCEA CARACAŞ

M.Sc. in Computer Science, International University in Germany

born 14.12.1981

citizen of Romania

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Friedemann Mattern, examiner

Prof. Dr. Gustavo Alonso, co-examiner

Dr. Thorsten Kramp, co-examiner

Dr. Jan Beutel, co-examiner

2012

Abstract

A process describes a transformation which advances a system from an initial starting point to a final state. The processes that govern the production of goods and delivery of services in today's economy are called business processes. These processes add economic value to both the company and the respective customers. Such a business process specifies the sequence of activities, events, and interactions between humans, information technology systems and the physical environment in order to fulfill a specific business goal. Over the past two decades, several standard languages have evolved which allow business processes to be described using graphical models.

In parallel to these developments, the performance of information technology systems increased following Moore's law. Embedded devices are continuously being miniaturized to the point where they become ubiquitous. Consequently, the technology offered by *wireless sensor networks* (WSN) allows business processes to be embedded even more deeply into the physical environment. In this way, business processes can better monitor and interact in real time with the entities they control, thus decreasing operational costs and improving responsiveness. To reduce investment costs and energy consumption, WSN are built using the low-end spectrum of embedded devices. The limited set of resources of such devices poses a significant challenge for the integration of WSN into business processes. As a consequence, classical implementations of business processes on embedded WSN are specific, one-of-a-kind solutions, an approach that is inflexible and expensive with respect to changing business requirements.

To align the implementation of a WSN application with the respective business processes, this thesis proposes a model-driven approach. Business domain experts can specify process models which describe the business-relevant behavior of WSN applications. These process models can then be further refined using different abstraction levels. The building blocks for models on the lowest abstraction level provide basic functionality and drivers. These artifacts are implemented using traditional software development methods. Using code generation techniques, the high-level business process models and the software artifacts are compiled into executable WSN applications. Thus, organizations can use WSN technology to adapt to a dynamic competition situation faster and can meet the demands of a diverse customer base more quickly. The business-relevant behavior of remote sensors and actuators becomes visible in models and is fully aligned with the corresponding implementation. Furthermore, graphical models foster communication among the different business participants and technology implementers using the same lingua franca.

The proposed model-driven approach for WSN applications requires a set of tools which includes a model editor, a compiler, and a simulation and testing environment. To fully benefit from the modeling abstraction, the tools must allow the testing of the behavior of a business process prior to deployment. To minimize energy consumption and memory usage, the compiler must generate efficient code which takes advantage of specific power management features of the underlying run-time platform. The proposed modeling approach and run-time optimizations are applicable to other graphical modeling languages and to different WSN execution platforms. As a concrete example, this thesis focuses on the *business process model and notation* (BPMN) standard as the modeling language. To address a large business audience and leverage the extensive set

of tools, the proposed methodology allows WSN applications to be described without changing either the syntax or the execution semantics of the modeling language.

The evaluation of the proposed methodology focuses on expressability and efficiency. These aspects are assessed using our implementation of the required tools. To show the expressability of the approach, we selected a set of archetype WSN applications, which we modeled using our tools. We then analyzed the efficiency of the automatically generated application in terms of energy and memory consumption when compared with the corresponding manually written implementation. The benefits of our approach, such as the graphical overview over processes, a business-aligned implementation, and the flexibility to adapt to new business requirements, come at the price of 10% more RAM and 44% more flash space consumption on average. However, the evaluation results also show that the generated code can be executed on resource-constrained sensor nodes consuming only 1% more energy than the manually written equivalents.

Zusammenfassung

Ein Prozess beschreibt eine Transformation, die ein System von einem Ausgangszustand in einen Endzustand überführt. Die Prozesse, die die Güterproduktion und Dienstleistungen in der heutigen Wirtschaft regeln, sind sogenannte Geschäftsprozesse (Business Processes). Diese steigern den wirtschaftlichen Wert des Unternehmens und für die jeweiligen Kunden. Ein Geschäftsprozess beschreibt wie ein bestimmtes Geschäftsziel zu erfüllen ist, nämlich durch Abfolgen von Aktivitäten, Ereignissen sowie Interaktionen zwischen Menschen, Informationstechnik-Systemen und der physischen Umwelt. Mehrere Standard-Sprachen, die in den letzten zwei Jahrzehnten entwickelt wurden, erlauben die Beschreibung von Geschäftsprozessen mittels grafischer Modelle.

Parallel zu diesen Entwicklungen stieg die Leistung der Informationstechnik gemäss dem Moorschen Gesetz. Eingebettete Geräte wurden kontinuierlich miniaturisiert bis zu dem Punkt, an dem sie allgegenwärtig geworden sind. Folglich ermöglichen *drahtlose Sensornetze* (WSN), Geschäftsprozesse noch tiefer in die physische Umwelt einzubetten. Auf diese Weise können Geschäftsprozesse besser und in Echtzeit die von ihnen kontrollierten Objekte überwachen und mit ihnen interagieren. Dadurch werden die Betriebskosten gesenkt und die Reaktionsfähigkeit verbessert. Um Investitionskosten und Energieverbrauch zu reduzieren, bestehen WSN typischerweise aus Systemen, die bezüglich der benötigten Ressourcen am unteren Ende der Skala zu finden sind, sogenannte “low-end” Systeme. Die beschränkte Ressourcen solcher Systeme stellen eine erhebliche Herausforderung für die Integration von Sensornetzen in Geschäftsprozesse dar. Folglich sind klassische Implementierungen von Geschäftsprozessen auf WSN sehr spezifische Lösungen, ein Ansatz der teuer und inflexibel ist, speziell wenn wechselnde Unternehmensanforderungen in Betracht gezogen werden.

Um die Implementierung einer WSN-Anwendung mit den jeweiligen Geschäftsprozessen in Übereinstimmung zu bringen, schlägt die vorliegende Arbeit einen modellbasierten Ansatz vor. Domänen-Experten können Prozessmodelle erstellen, die geschäftsrelevante Verhaltensweisen von WSN-Anwendungen beschreiben. Diese Prozessmodelle können auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen weiter verfeinert werden. Die Bausteine für die Modelle bieten auf der untersten Abstraktionsebene grundlegende Funktionen und Treiber an, die mit traditionellen Methoden der Softwareentwicklung implementiert werden. Mithilfe Code-generierender Methoden werden Geschäftsprozessmodelle und Software-Artefakte zu einer ausführbaren WSN-Anwendung kompiliert. Auf diese Weise können Organisationen WSN-Technologien verwenden, um sich schneller an ein dynamisches Wettbewerbsumfeld anzupassen und sie können damit schneller den Anforderungen eines vielfältigen Kundenstammes gerecht werden. Das geschäftsrelevante Verhalten von Sensoren und Aktoren wird dadurch in Modellen sichtbar und stimmt damit vollständig mit der entsprechenden Umsetzung überein. Darüber hinaus fördern grafische Modelle die Kommunikation zwischen den verschiedenen Akteuren in unterschiedlichen Geschäftsbereichen und den technischen Entwicklern.

Der vorgeschlagene Modellbasierte Ansatz für WSN-Anwendungen erfordert eine Reihe von Werkzeugen. Konkret einen Modell-Editor, einen Compiler und eine Simulations- und Testumgebung. Um vollständig von der Modellierungsabstraktion zu profitieren, sollen die Werkzeuge es ermöglichen, das Verhalten

eines Geschäftsprozesses vor dessen Einsatz zu testen. Zur Minimierung des Energieverbrauchs und der Speichernutzung muss der Compiler effizienten Code generieren, der wiederum die spezielle Energieverwaltungs-Funktionalität der zugrunde liegenden Laufzeit-Plattform nutzt. Die vorgeschlagene Modellierung und die Laufzeit-Optimierungen sind für verschiedene grafische Modellierungssprachen und für verschiedene WSN-Ausführungsplattformen anwendbar. Als konkretes Beispiel konzentriert sich diese Arbeit auf den *Geschäftsprozessmodell und Notation* (Business Process Model and Notation — BPMN) Standard als Modellierungssprache. Um ein grosses Geschäftspublikum, das bereits die umfangreiche Sammlung von Werkzeugen kennt, anzusprechen, erlaubt die vorgeschlagene Methodik WSN-Anwendungen zu beschreiben, ohne dass an der Syntax oder an der Ausführungs-Semantik der Modellierungssprache Änderungen vorgenommen werden müssten.

Die Auswertung der vorgeschlagenen Methodik konzentriert sich auf Ausdrucksfähigkeit und Effizienz. Diese Aspekte werden anhand unserer Implementierung der erforderlichen Werkzeuge evaluiert. Um die Ausdrucksfähigkeit des Ansatzes zu zeigen, benutzen wir eine Reihe von typischen Anwendungen für WSN, die wir dann mit unseren Werkzeugen modellieren. Danach analysieren wir die Effizienz der automatisch generierten Anwendungen in Bezug auf die Energie- und Speicher-Ressourcen im Vergleich mit dem jeweiligen entsprechenden manuell implementierten Äquivalent. Die Vorteile unseres Ansatzes, wie die grafische Übersicht über die Prozesse, eine mit dem wirklichen Geschäftsablauf übereinstimmende Implementierung und die Flexibilität, schnell auf neue Geschäftsanforderungen umzustellen, erfordern jedoch einen durchschnittlich 10% grösseren RAM-Bedarf und 44% mehr Flash-Speicherplatzbedarf. Hingegen zeigen die Ergebnisse der Evaluation auch, dass die Ausführung des generierten Quellcodes auf Sensorknoten mit beschränkten Ressourcen nur 1% mehr Energie verbraucht als Anwendungen, die manuell implementiert wurden.