

Reihe 8

Mess-,
Steuerungs- und
Regelungstechnik

Nr. 1248

Dipl.-Ing. Liyong Yu,
Tianjin (China)

A Reference Model for the Integration of Agent Orientation in the Operative Environment of Automation Systems

ACPLT
AACHENER
PROZESSLEITTECHNIK

Lehrstuhl für
Prozessleittechnik
der RWTH Aachen

A Reference Model for the Integration of Agent Orientation in the Operative Environment of Automation Systems

Von der Fakultät für Georessourcen und Materialtechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

genehmigte Dissertation

vorgelegt von **Dipl.-Ing.**

Liyong Yu

aus Tianjin, China

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Epple
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Peter Göhner

Tag der mündlichen Prüfung: 14. Dezember 2015

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs-
und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Liyong Yu,
Tianjin (China)

Nr. 1248

A Reference Model for
the Integration of
Agent Orientation in the
Operative Environment
of Automation Systems



Lehrstuhl für
Prozessleittechnik
der RWTH Aachen

Yu, Liyong

A Reference Model for the Integration of Agent Orientation in the Operative Environment of Automation Systems

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 1248. Düsseldorf: VDI Verlag 2016.

146 Seiten, 60 Bilder, 2 Tabellen.

ISBN 978-3-18-524808-5, ISSN 0178-9546,

€ 57,00/VDI-Mitgliederpreis € 51,30.

Keywords: Agent Systems – Procedure Description – Service Orientation – IEC 61131-3 – Sequential Function Chart – Process Control – Engineering – Agentensysteme, Prozedurbeschreibung, Dienstorientierung

This work introduces a reference model for automation agents that can be seamlessly integrated in existing process control systems. This model combines the advantages of function block technology, service orientation and agent orientation. Concept decisions about modularity, service-oriented interaction and procedure description provide a base for the development of process control- diagnosis-, model management-, project management- and other agents. The model is implemented in a platform-neutral development environment as a proof of concept and tested with an industrial plant.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D82 (Diss. RWTH Aachen University, 2015)

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9546

ISBN 978-3-18-524808-5

Prefacet

The present thesis emerged from my work at the Chair of Process Control Engineering of RWTH Aachen University during the period from 2008 to 2013.

I would like to express my deep and sincere gratitude to Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrich Epple for his mentoring, his encouragement and his support during my work as a doctoral student and research assistant at his chair. I also wish to express my warm and sincere thanks to Univ.-Prof. Dr.-Ing. h. c. Peter Göhner for his kindness in taking on the function of second advisor for this work. Furthermore, I am very grateful to Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt for presiding over my doctoral examination. Finally, I sincerely thank Margarete Milesco for her invaluable assistance.

Many people have contributed to the research that is presented in this thesis with their comments and thoughts. For this I thank Lars Evertz, Dr. Reinhard Fuchs, Sten Grüner, Holger Jeromin, Dr. Reiner Jorewitz, David Kampert, Roland König, Dr. Kai Krüning, Sebastian Maurell-Lopez, Dr. Henning Mersch, Tina Mersch, Dr. Martin Mertens, Dr. Gustavo Quirós, Markus Schlütter, Dr. Stefan Schmitz, Andreas Schüller, Sabrina von Styp, Constantin Wagner. I also thank Ursula Bey, Christopher Fleischacker, Ting Guo, Christopher Hense, Huijing Jie, Xinye Li, Tobias Lietke, Vihn Pham, Gregor Rohbogner, Ilya, Schapovalov, Semjon Spitzglus, Martina Uecker for their collaboration at the Chair of Process Control Engineering.

Finally, I owe my loving thanks to my parents Yizeng and Yuanheng, my parents-in-law Heping and Honghui for their love, understanding and constant support throughout my graduate. My special gratitude is also due to my wife Yifei and my Children Haoting and Langting for their continuous loving support.

Aachen, December 2015

Liyong Yu



(Ge Wu Zhi Zhi)

*To study the phenomena of nature in order to
acquire knowledge; to study the nature of things.*

from “The Book of Rites - The Great Learning”
Zeng Shen (China, 505-434 B.C.)

Contents

Kurzfassung	VIII
Abstract	IX
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 Structure of this Work	2
2 Basics of Process Automation	3
2.1 Process Automation System	3
2.1.1 Overview	3
2.1.2 Hardware and Software Environment	4
2.1.3 Trend toward Integration and Standardization	5
2.2 Modelling	6
2.2.1 Basics	6
2.2.2 Function Block	8
2.2.3 Runtime System Model	9
2.2.4 Time Model of Cyclic Execution Environment	12
2.2.5 Model of Operational Resource and Operational Measure	13
2.2.6 Component Model for Hierarchical Process Control	14
2.3 Service Orientation	17
2.4 Messages	19
2.5 Agent Orientation	20
2.5.1 Introduction	20
2.5.2 Usability in Industrial Automation	23
2.5.3 Concept of a Reference Model	25
3 Specification of a Reference Model for Automation Agents	28
3.1 Engineering Requirements	29
3.1.1 Functional Requirements	29
3.1.2 Non-functional Requirements	30
3.2 Service Model	32
3.3 Message Format	34
3.4 Message Delivery Model	36
3.5 Internal Structure	37

3.6	Service Interfaces	39
3.6.1	Message Input and Message Inbox	40
3.6.2	Message Output	45
3.6.3	Input interface	46
3.7	Knowledge Base	47
3.8	Execution Model	48
3.9	Related Automation Technologies	50
3.9.1	Relationship with Function Block Technology	50
3.9.2	Relationship with Service Orientation	51
3.9.3	Relationship with ACPLT/PF	52
4	Usability Analysis of Existing Procedure Description Methods	54
4.1	Finite State Automaton	55
4.2	Statechart	57
4.3	Petri Net	61
4.4	Sequential Function Chart	64
4.4.1	Syntax	64
4.4.2	Semantics	67
4.4.3	Application in Process Automation	69
4.4.4	Usability Analysis	69
4.5	Grafcet	70
4.6	Procedural Function Chart	72
4.7	Summary	75
5	Specification of a General Procedure Description Method	77
5.1	Execution Frame	78
5.2	State	80
5.3	Transition	81
5.4	Alternative Sequence	82
5.5	Action	83
5.6	Hierarchy	86
5.7	Concurrency	88
5.8	Procedure Progress	90
5.9	Summary	92
6	Prototypical Implementation	95
6.1	ACPLT Technologies	95
6.1.1	Object Management System: ACPLT/OV	95
6.1.2	Basic Libraries	97
6.2	FB-agent Library	99
6.3	SSC Library	102
6.3.1	Class Diagram	102
6.3.2	Instance Model	103

6.3.3	Task Model	104
7	Case Study	107
7.1	Research Plant: Submerged Arc Furnace (SAF)	107
7.2	Process Automation System	108
7.3	Process Control	110
7.3.1	Service Oriented Interaction	110
7.3.2	White-Box Engineering	113
7.4	Knowledge-based Engineering	115
7.4.1	Concept	116
7.4.2	Use Cases	117
7.4.3	Application Effects	123
8	Conclusions and Outlook	124
	Bibliography	127

Kurzfassung

Der zunehmende Funktionsumfang der Automatisierungssysteme sowie die steigende Komplexität der Automatisierungsfunktionen stellen dem Systementwickler die Herausforderung, die Modularität, Flexibilität sowie die Autonomie auch der Prozessleitsysteme fortlaufend zu verbessern. Die agenten-orientierte Automatisierung hat ein großes Potential beleuchtet, diese Herausforderungen zu bewältigen und gleichzeitig den Engineeringaufwand zu reduzieren. Klassische Agentensysteme aus der Informationstechnik isolieren in der Regel die Endanwender vom Engineering der Agenten. Zudem sind die Engineeringumgebung, die Laufzeitumgebung sowie die Beschreibungsmittel für Agenten normalerweise inkompatibel mit den bestehenden Automatisierungssystemen. Die vorliegende Arbeit stellt ein Referenzmodell für Automatisierungsgagenten vor, welches eine nahtlose Integration der Agenten in IEC 61131-3 basierende Prozessleitsysteme und ein anwender-zentriertes Engineering ermöglicht.

Das Referenzmodell dient als ein generisches Muster für die Entwicklung von verschiedenen Agenten, z.B. für Prozessführung, Diagnose, Modellverwaltung, Projektierung usw. Je nach der Aufgabenstellung können die autonomen Agenten miteinander interagieren. Auf diese Weise können die Fähigkeiten einzelner Agenten für die Lösung komplexer Aufgaben kombiniert werden. Das Referenzmodell definiert den Ausführungsrahmen der Agenten, ihre Kommunikationsschnittstelle sowie die Beschreibungsmittel für agenten-interne kontinuierliche Funktionen und Prozeduren anwendungs- und leitsystemneutral. Dadurch wird der Engineeringaufwand gering gehalten, während die Interoperabilität und die Wiederverwendbarkeit der Funktionsmodule (d.h. Agenten) des Automatisierungssystems erhöht werden.

Das Referenzmodell ist in einer plattformneutralen Entwicklungsumgebung umgesetzt. Seine Anwendung in einem industriellen Projekt wird vorgestellt. In dem Projekt sind Agenten u.a. zuständig für die operative Prozessführung sowie die automatische Erstellung der Prozessführung und Anlagensimulation. Da in diesem Modell IEC 61131-3 kompatible Ausführungsemantiken und Beschreibungsmittel verwendet werden, können die Endanwender die Agenten eigenständig projektieren. Diese Tätigkeiten können bei Verwendung klassischer agentenorientierter Methoden nur von Experten mit spezieller Programmierschulung und Erfahrungen im Bereich Software Engineering durchgeführt werden.

Aufgrund der Reduzierung des Engineeringaufwands und der Kompatibilität mit den bestehenden Automatisierungssystemen kann das Referenzmodell als Basis für die Integration von Agentensystemen in Prozessleitsysteme genutzt werden. Konzeptentscheidungen über dienstorientierte Interaktion, modulare Kapselung von Funktionen und generische Beschreibung der Automatisierungsprozeduren können ebenfalls bei der Entwicklung von Funktionen unterstützen, die nicht von Agenten ausgeführt werden sollen. Auch in diesen Fällen wird erwartet, dass die Engineering-Kosten reduziert und die Flexibilität sowie die Interoperabilität der Automatisierungsfunktionen erhöht werden.

Abstract

The increasing functional range of automation systems and the increasing complexity of automation functions challenge system developers to continuously improve the modularity, flexibility and the autonomy of process control systems. The agent-oriented automation has shown great potential in addressing these challenges while reducing the engineering effort at the same time. Classic agent systems in the field of information technology usually isolate the end users from the engineering of agents. In addition, the applied engineering environment, runtime systems and description methods are normally incompatible with the existing automation systems. The present work presents a reference model for automation agents that can be seamlessly integrated in process control systems based on the IEC 61131-3 standard. Moreover, a user-centralized engineering is allowed.

The reference model serves as a generic model for the development of process control-, diagnosis-, model management-, project management-, and other agents. Depending on the automation task, autonomous agents can also interact with each other. By this means, the capabilities of individual agents can be combined for solving complex tasks. The reference model generally defines the execution frame of automation agents, their communication interfaces and the description methods for continuous and procedural functions within the agents. These aspects are application- and system-neutral. Thus, the engineering effort is kept low, while the interoperability and the reusability of functional modules (i.e. agents) within the automation system is increased.

The reference model is implemented in a platform-neutral development environment. Its applications in an industrial project will be presented. In this project, agents are developed i.e. for the operational process control as well as the automatic creation of process control and plant simulation. Because IEC 61131-3 compatible execution semantics and description methods are applied, the end-user can configure the agents by him-/herself. By using classic agent-oriented methodologies, however, these activities can only be carried out by experts with special training and programming experience in software engineering.

Due to the reduction of engineering effort and the compatibility with existing automation systems, the reference model can be used as a base for the integration of agent systems in process control systems. Concept decisions about service-oriented interaction, modular encapsulation of functions and general description of automation procedures can also assist in the development of functions that are not going to be performed by agents. In these cases, the reduction of the engineering cost and the increment of flexibility and interoperability of elementary modules of the automation system are also to be expected.

