

Context Management and Personalisation: A Tool Suite for Context- and User-Aware Computing

Von der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Naturwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von
Dipl.-Inform. Andreas Zimmermann
aus Ludwigshafen am Rhein

Berichter:
Prof. Dr. Matthias Jarke
Prof. Dr. Reinhard Oppermann

Tag der mündlichen Prüfung: 23.10.2007

Fraunhofer Series in
Information and Communication Technology

Band 2/2007

Andreas Zimmermann

Context Management and Personalisation:

A Tool Suite for Context- and User-Aware Computing

D 82 (Diss. RWTH Aachen)

Shaker Verlag
Aachen 2007

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6849-7

ISSN 1612-4863

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Die Institute des Fraunhofer-Verbunds Informations- und Kommunikationstechnik (IuK) entwickeln gemeinsame Strategien für die anwendungsorientierte Forschung. In der Reihe „Fraunhofer Series in Information and Communication Technology“ publizieren die IuK-Institute Dissertationen, Habilitationen sowie herausragende Diplomarbeiten, wissenschaftliche Monographien und Forschungsberichte. Diese Publikationen dienen der Fundierung der anwendungsnahen Fraunhofer-spezifischen Forschung und Vorlaufforschung.

Direktorium des IuK-Verbunds

Prof. Dr. Dieter Rombach, Vorsitzender sowie Institutsleiter Fraunhofer IESE
Prof. Dr. Matthias Jarke, Stv. Vorsitzender sowie Institutsleiter Fraunhofer FIT

Prof. Dr. Jürgen Beyerer, Fraunhofer IITB
Prof. Dr. Karlheinz Brandenburg, Fraunhofer IDMT
Prof. Dr. Claudia Eckert, Fraunhofer SIT
Prof. Dr. Dieter W. Fellner, Fraunhofer IGD
Prof. Dr. Stefan Jähnichen, Fraunhofer FIRST
Prof. Dr. Radu Popescu-Zeletin, Fraunhofer FOKUS
Prof. Dr. Dieter Prätzl-Wolters, Fraunhofer ITWM
Prof. Dr. Jakob Rehof, Fraunhofer ISST
Prof. Dr. Dieter Spath, Fraunhofer IAO
Prof. Dr. Ulrich Trottenberg, Fraunhofer SCAI
Prof. Dr. Stefan Wrobel, Fraunhofer AIS

Vorwort des Institutsleiters

Schon seit über fünfzehn Jahren befasst sich das Fraunhofer-Institut für Angewandte Informationstechnik FIT mit Fragen der Anpassung von Informationssystemen an ihre Benutzer und an die Benutzungskontexte. Dies kann zunehmend nicht mehr vollständig in einer anfänglichen Anforderungsanalyse erfasst werden, sondern die Anpassungsnotwendigkeit ergibt sich oftmals erst im laufenden Betrieb. Sowohl die Anpassbarkeit von Systemen durch den menschlichen Benutzer (Adaptierbarkeit) als auch die automatische Anpassung etwa aufgrund der Beobachtung des Benutzerverhaltens (Adaptabilität) sind dabei Untersuchungsgegenstand.

Die Einführung mobiler Kleingeräte – das Mobiltelefon ist ein typisches Beispiel – und moderner Sensorik – wie etwa RFID und WiFi Positionierung – haben diesen Bemühungen im beginnenden 21. Jahrhundert neue Aktualität verliehen und die Herausforderungen wesentlich verbreitert. Stand vorher eine relativ statische Anpassung an eine bestimmte Person oder standardisierte Benutzungssituation im Vordergrund, so werden in mobilen Anwendungen ständig Kontextwechsel vollzogen. Auch die eigene Benutzungshistorie selbst spielt bei der Anpassung eine Rolle – so will der Museumsbesucher vielleicht beim zweiten Besuch eines Exponats nicht noch einmal genau die gleiche Erklärung hören wie beim ersten Mal.

In einer Vielzahl von Projekten hat Fraunhofer FIT mit derartigen Anforderungen Erfahrungen gesammelt und erfolgreiche Einzellösungen gestaltet. Dabei entstand zwangsläufig die Frage, ob es nicht möglich ist, die vielfältigen Dimensionen von Personalisierung und Kontextanpassung in einem einheitlichen Modellierungsrahmen zu erfassen und durch einen einheitlichen Werkzeugkasten zu unterstützen. Eine Lösung für dieses Problem vorzustellen ist Gegenstand des vorliegenden Buches.

Im Gegensatz zu bisherigen Ansätzen für Kontext-Werkzeugkästen, von denen der bekannteste am Georgia Tech entstanden ist, beschränkt sich die Unterstützung nicht auf die Gruppe der Systementwickler, sondern bezieht all diejenigen ein, die an der nachträglichen Anpassung eines Systems ein genuines Interesse haben: die Domänenexperten, welche das Anwendungswissen strukturieren, die Autoren von Informationsinhalten und vor allem auch die Endbenutzer selbst. Zusätzlich zu einer systematisch strukturierten Schichtenarchitektur mit den Hauptebenen Sensorik, Semantik, Kontrolle und Aktuatorik entstehen so spezielle Werkzeugangebote, die dem Bedarf dieser Gruppen jeweils speziell angepasst sind.

Der Werkzeugkasten entstand in einem iterativen Designprozess über mehrere Jahre und wurde immer wieder im Kontext unterschiedlicher Anwendungen validiert und weiter verbessert. Hohe Sichtbarkeit erzielte dabei vor allem die Anwendung im EU-Projekt LISTEN, in dem gemeinsam mit dem Fraunhofer IMK (jetzt Teil des IAIS) beispielsweise eine Ausstellung des Malers August Macke mit einem differenzierten Audioraum ermöglicht wurde. Ebenso fand eine interaktive Plakatwand, die sich automatisch oder benutzergesteuert der Situation etwa in einem Bahnhof anpasst, großes Besucherinteresse auf der CeBIT 2004. Auch bei der multimodalen kontext-adaptiven Unterstützung von Lagerarbeitern im Projekt MICA – Teil des Leitexponats „Future Factory“ der SAP auf der CeBIT 2007 – fand der Werkzeugkasten Anwendung. Der vorgestellte Modellierungsansatz und seine Unterstützung durch den Werkzeugkasten erweist sich damit als außerordentlich erfolgreich und in einer Vielfalt von Kontexten anwendbar.

Das vorliegende Buch entstand im Rahmen des Promotionsvorhabens von Andreas Zimmermann am Lehrstuhl für Informationssysteme der RWTH Aachen; Korreferent war Prof. Dr. Reinhard Oppermann, Universität Koblenz und Fraunhofer FIT. Es bietet dem Leser nicht nur eine genaue Darstellung des eigenen Konzepts, dessen Umsetzung und Validierung, sondern auch einen guten Überblick über die verwandten Problemstellungen und Lösungsansätze der Forschung in diesem weltweit hochaktuellen Bereich.

Aachen und Sankt Augustin, im November 2007

Prof. Dr. Matthias Jarke

Institutsleiter, Fraunhofer FIT

Abstract

Rapidly changing requirements and dynamic environments drive the development of context-aware applications. Research into context-aware computing focuses on programming frameworks and toolkits that support the development of context-aware applications (Chen, 2004; Dey et al., 2001; Efstratiou, 2004; Henricksen and Indulska, 2006). However, current approaches emphasise developers as the main actor in the software development process and lack properties making context-aware computing transparent and applicable for other actors. Developers cannot anticipate all potential situations and all possible ways of application behaviour during the development phase. During runtime, a change in the configuration, structure or content of the developed prototype is difficult.

This work claims that the extension of the spectrum of actors participating in the design, implementation, authoring and configuration of context-aware applications beyond developers substantially tackles the reduction of usability problems introduced by context-aware computing.

Addressing these issues requires this work to accomplish both a conceptual and a software framework. The conceptual framework bases on a comprehensive understanding of the processes involved with context-aware computing in general that can be communicated to the entire spectrum of actors comprising developers, domain experts, authors and end-users. The software framework implements the conceptual framework and supports the actors on diverse implementation skill levels in their roles within the software development cycle for context-aware applications. The core contribution of this work comprises a design view of context-aware applications, which permits the control over the internals of the application during design- and runtime, and a Context Management System, which provides different tools and abstraction levels according to the actors' roles within the software development process.

Two case studies document and evaluate the application of the system for the construction, authoring, maintenance and tailoring of context-aware applications and their behaviour. As operational and adaptable context-aware applications, these case studies prove the validity and general applicability of the tool suite, the software architecture and the concepts behind.

ABSTRACT

Kurzfassung

Sich ständig verändernde Anforderungen und dynamische Umgebungen treiben die Entwicklung von kontextsensitiven Anwendungen voran. Die Aufmerksamkeit des Forschungsgebiets des Context-Aware Computing richtet sich auf Programmierungsumgebungen und Werkzeuge, die eine Unterstützung bei der Entwicklung kontextsensitiver Anwendungen bieten (Chen, 2004; Dey et al., 2001; Efstratiou, 2004; Henricksen and Indulska, 2006). Allerdings stellen derzeitige Ansätze den Entwickler als Hauptakteur im Software-Entwicklungsprozess heraus und verzichten auf Eigenschaften, die Context-Aware Computing für andere Akteure transparent und anwendbar macht. Entwickler können während der Entwicklungsphase nicht alle potentiellen Situationen und alle Möglichkeiten des Verhaltens der Anwendung antizipieren. Zur Laufzeit erweist sich eine Veränderung der Konfiguration, Struktur oder des Inhalts der entwickelten Anwendung als schwierig.

Die vorliegende Arbeit verfolgt den Ansatz, das Spektrum der am Software-Entwicklungsprozess kontextsensitiver Anwendungen beteiligten Akteure über den Entwickler hinaus zu erweitern, um eine substantielle Reduktion der Gebrauchstauglichkeitsprobleme zu erzielen.

Zur Verwirklichung dieses Ansatzes entwickelt diese Arbeit sowohl ein konzeptuelles, als auch ein software-technisches Framework. Das konzeptuelle Framework basiert auf einem weitreichenden Verständnis der Konzepte und Prozesse aus dem Bereich Context-Aware Computing, das sich an das gesamte Spektrum von Akteuren kommunizieren lässt, bestehend aus Entwicklern, Domänenexperten, Autoren und Endbenutzern. Das software-technische Framework implementiert das konzeptuelle Framework und begleitet die Akteure mit ihrer unterschiedlichen Qualifikation als Entwickler durch den Software-Engineering-Prozess kontextsensitiver Anwendungen. Der wesentliche Beitrag dieser Arbeit besteht aus einer Entwurfssicht auf kontext-sensitive Anwendungen, die eine Kontrolle über die Interna der Anwendung zur Design- und Laufzeit ermöglicht, und einem Kontext-Management-System, das aus unterschiedlichen Werkzeugen besteht und verschiedene Abstraktionsebenen bietet, die zu den Rollen der Akteure im Prozess der Softwareentwicklung passen.

Zwei Fallstudien dokumentieren und evaluieren die Anwendung des Systems bezüglich der Konstruktion, Inbetriebnahme, Administration und Anpassung kontextsensitiver Anwendungen und ihres Verhaltens. Als funktionsfähige und anpassbare kontextsensitive Anwendungen zeigen diese Fallstudien die Gültigkeit und die allgemeine Anwendbarkeit der Werkzeuge, der Softwarearchitektur und der zugrundeliegenden Konzepte.

KURZFASSUNG

Acknowledgements

In addition to the physical traces my thesis left on paper, white boards, and hard drives, the entire creation process has influenced friends, colleagues, researchers, family and myself. For the future, I hope that the contents of my thesis is going to leave further traces and impressions on many people's minds.

My employment at the Fraunhofer Institute for Applied Information Technology in Sankt Augustin has provided a space of creativity for me. I took advantage of the situation, arranged my initially quite disordered ideas, and I have compiled the essence of them into a hopefully valuable contribution to this lively research area. However, this work would have never been possible without the help of many people.

I express my gratitude to my advisors, Prof. Matthias Jarke and Prof. Reinhard Oppermann, for giving me the opportunity to complete my Ph.D. Your constructive criticism and collaboration have been enormous drivers to improve my work. Thank you for putting so much faith in me and providing me with direction and temporal constraints.

Three sources of inspiration and energy accompanied the process of working on my Ph.D.: I am grateful to my colleagues, mentors, friends Marcus Specht, Andreas Lorenz and Markus Eisenhauer, who offered a creative atmosphere at the office and helped me form my understanding of context in endless discussions. I received a lot of input and ideas from you in the early phase of my work and your reviews lead to substantial improvements of this work. I have learnt so much from all of you.

Andreas Lorenz deserves special thanks because sharing an office with me has without doubt been quite demanding for you from time to time. You are the confidant I discuss my troubles and complaints with. Nevertheless, you have supported me all the years and have become such a great friend. Laughing and yelling with you kept me alive in hard times, and hopefully, I can clear debts soon.

I have been also very fortunate to work in a great group of colleagues. Thank you, Alexander Schneider, Stefan Apelt, Christian Prause, Marius Scholten, Oliver Kaufmann, Lars Zahl, Barbara Schmidt-Belz and Rossen Rashev for creating such a supportive, creative and friendly research environment. What would I have done without all the chats, laughter and shared lunch experiences?

I would like to apologise to my best friends Bernhard Rausch, Christoph Kiener, Boris Schwerdt, Markus Reinhart, Stefan Nessler, André Cambeis and Barbara Dellen about the

ACKNOWLEDGEMENTS

lack of time during the past year. I especially want to thank Barbara Dellen, who insistently encouraged me to stick to my plans and kept me going further. Each time I finished a chapter I remembered your severe bets on keeping deadlines.

Finally, I dedicate this work to my family, who believed in me throughout my entire life. I am particularly grateful to my parents, Ellen and Heinz, who have given me strength, endless support and love from my childhood on. I would have never made it through the tough times in my life and I would have never come as far as I have without you. I am forever in your debt.

Bonn, June 14th, 2007

Andreas Zimmermann

Table of Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Problem Description	2
1.2	Thesis Statement	3
1.3	Research Methodology	3
1.4	Thesis Outline	5
Chapter 2	Background and Definitions	7
2.1	The Need for Adaptation	7
2.1.1	Example Application Scenario.....	8
2.1.2	Adaptivity and Adaptability	9
2.1.3	Catalysts for Adaptation.....	10
2.2	The Notion of Context	13
2.2.1	Context in Human-Human Dialogue.....	13
2.2.2	Context in Computer Science.....	13
2.2.3	Context in Human-Computer Interaction.....	14
2.3	Definition of Relevant Terms	15
2.3.1	Defining Context-Aware Computing	15
2.3.2	Defining Context	16
2.3.3	Defining Situations.....	19
2.4	Categories of Context Information	20
2.4.1	Previous Categorization Approaches	20
2.4.2	Fundamental Categories of Context Information.....	21
2.5	The Use of Context	29
2.5.1	Characteristics of Context Information	29
2.5.2	Context Transitions	31

TABLE OF CONTENTS

2.5.3	Shared Contexts.....	34
2.6	Usability of Context-Aware Applications	38
2.6.1	Guiding on Usability	38
2.6.2	Usability Goals	39
2.7	Summary and Discussion.....	43
2.7.1	Summary	43
2.7.2	Discussion	44
2.7.3	Adaptable Context-Aware Applications	45
Chapter 3	Research Framework	49
3.1	Research Direction.....	49
3.1.1	The Knowledge Base of Context-Aware Applications	50
3.1.2	The Development of Context-Aware Applications.....	52
3.1.3	The Operation of Context-Aware Applications	56
3.2	State of the Art	59
3.2.1	The Context Toolkit	59
3.2.2	The PACE Middleware	62
3.2.3	The Coordinated Adaptation Platform	65
3.2.4	The Context Service Project.....	67
3.2.5	The Context Broker Architecture	69
3.2.6	The Technology for Enabling Awareness Project.....	71
3.2.7	The Context Fusion Network	73
3.2.8	Other Related Approaches	75
3.3	Key Requirements and Summary	82
3.3.1	Key Requirements	83
3.3.2	Summary	84
Chapter 4	Context-Aware Computing	89
4.1	Context-Aware Applications	89
4.1.1	Classes of Context-Aware Applications	90
4.1.2	Roles of Context in Context-Aware Applications.....	92
4.2	Knowledge Contained in Context-Aware Applications	93
4.2.1	Acquisition Knowledge.....	94

4.2.2	Derivation Knowledge	96
4.2.3	Adaptation Knowledge.....	99
4.2.4	Actuation Knowledge.....	101
4.2.5	Vocabulary	105
4.3	Maintaining Knowledge Containers	107
4.3.1	Filling the Containers	108
4.3.2	Knowledge Improvement of Individual Containers.....	108
4.3.3	Knowledge Shifts	109
4.4	Knowledge Processors: A Layered Architecture.....	111
4.4.1	Sensor Layer.....	112
4.4.2	Semantic Layer.....	115
4.4.3	Control Layer	117
4.4.4	Actuator Layer.....	119
4.5	Actors in the Adaptation Process.....	120
4.6	Summary	122
Chapter 5	The Context Management System	125
5.1	Design of the Context Management System.....	126
5.1.1	Simplicity versus Complexity	127
5.1.2	Toolkit versus Infrastructure	128
5.1.3	Distributed versus Centralised	129
5.1.4	Discrete versus Continuous.....	130
5.1.5	Design- versus Runtime	131
5.2	Context Toolkit.....	132
5.2.1	Sensor Layer.....	132
5.2.2	Semantic Layer.....	134
5.2.3	Control Layer	138
5.2.4	Actuator Layer.....	141
5.3	Using and Configuring the Context Toolkit	143
5.3.1	Discretisation Abstraction.....	143
5.3.2	Reference Abstraction.....	146
5.3.3	Matching.....	147

TABLE OF CONTENTS

5.3.4	Triggering Abstraction	151
5.3.5	Special Purpose Context Attributes.....	154
5.4	The Tool Suite.....	157
5.4.1	The Design Tool.....	158
5.4.2	The Mobile Collector	161
5.4.3	The Content Player.....	162
5.5	Summary	164
Chapter 6	Case Studies	167
6.1	Museum Guide.....	168
6.1.1	The Macke Laboratory	169
6.1.2	The Software Architecture of the Macke Laboratory	172
6.1.3	The Tracking System	174
6.1.4	Modelling the Domain	175
6.1.5	Derivation.....	180
6.1.6	Implementation of the Context-Aware Behaviour	184
6.1.7	Actuation	189
6.1.8	Application of the Tool Suite.....	191
6.1.9	Evaluation.....	192
6.2	Intelligent Advertisement Board.....	197
6.2.1	Software Architecture	198
6.2.2	Context Acquisition.....	199
6.2.3	Domain Model and Derivation.....	199
6.2.4	Adaptation Process.....	202
6.2.5	Actuation	205
6.2.6	Application of the Tool Suite.....	205
6.2.7	Evaluation.....	206
6.3	Summary	207
6.3.1	Satisfaction of Requirements	208
6.3.2	Lessons Learnt.....	210
Chapter 7	Conclusion and Future Work	215
7.1	Summary of Contributions.....	215

7.2	Future Work.....	217
7.2.1	Reflection and Transparency Components	218
7.2.2	Retaining Adaptation.....	218
7.2.3	Shared Initiative	219
References		223
Appendix A EBNF Notation of the Design View		233
Appendix B Curriculum Vitae		239

List of Figures

Figure 1	Five Fundamental Categories of Context Information	22
Figure 2	Groups of Basic User Dimensions (Heckmann, 2005).....	23
Figure 3	Variation of Approximation	32
Figure 4	Change of Focus	33
Figure 5	Shift of Attention	34
Figure 6	Establishing a Relation	35
Figure 7	Adjusting Shared Contexts	36
Figure 8	Three Ways of Exploiting a Relation	37
Figure 9	Components of the Context Toolkit (Dey et al., 2001)	60
Figure 10	Architecture of the Context Management Infrastructure (Henricksen, 2003a) ...	63
Figure 11	Architecture of the Coordinated Adaptation Platform (Efstratiou, 2004)	65
Figure 12	Architecture of the Context Service (Lei et al., 2002).....	68
Figure 13	The Context Broker Architecture (Chen et al., 2004b).....	70
Figure 14	The Technology for Enabling Awareness Architecture (Schmidt, 2002)	72
Figure 15	Knowledge Containers of Context-Aware Applications	93
Figure 16	Continuum of Adaptation Methods	103
Figure 17	Software Architecture for Context-Aware Applications	112
Figure 18	Constituents of the Context Management System.....	126
Figure 19	UML Diagram of the Sensor Package	133
Figure 20	XML Configuration of the Sensors (Excerpt)	134
Figure 21	Context Collection, Context and Context Attribute in UML	136
Figure 22	XML Specification of a Context Collection.....	137
Figure 23	General-Purpose Rule System Displayed in UML.....	139
Figure 24	One Rule Segment Represented in XML	140
Figure 25	UML Description of the Actuator Package	141

LIST OF FIGURES

Figure 26	XML Configuration for the Actuators (Excerpt).....	142
Figure 27	History Cache Configuration in XML.....	145
Figure 28	UML diagram of the Boolean Qualifier Programming Abstraction.....	148
Figure 29	Qualifier Configuration in XML.....	149
Figure 30	Filter Configuration in XML	151
Figure 31	Situation Configuration in XML	152
Figure 32	Two-Level Tree Structure of the Interest Model.....	155
Figure 33	Stereotype Definition in XML.....	156
Figure 34	Space Segmentation as an Overlay Model Specified in XML	157
Figure 35	Time Periods as an Overlay Model Defined in XML.....	157
Figure 36	Screenshot of the Modelling Panel of the Design Tool.....	160
Figure 37	Screenshot of the Mobile Collector Running on a Tablet PC	161
Figure 38	Screenshot of the Content Player Running on a PDA	163
Figure 39	A Visitor of the Macke Laboratory	169
Figure 40	Hardware Architecture of the LISTEN Installation for the Macke Laboratory	172
Figure 41	Instantiation of the Software Architecture for the Macke Laboratory.....	173
Figure 42	Location Model of the Macke Laboratory.....	176
Figure 43	Ontology Used for the August Macke Exhibition	179
Figure 44	Translation of the Location Model into a XML Representation (Excerpt)	181
Figure 45	Three Selected Motion Styles Represented in XML	183
Figure 46	Attracting the Visitor's Attention	187
Figure 47	The Segment "play_bench_sound" of the Rule Set of the Museum Guide.....	189
Figure 48	General Attractiveness of the LISTEN Installation in a Museum.....	196
Figure 49	Evaluation of the Combination of Artwork and Auditory Information.....	196
Figure 50	Software Architecture Instantiation for the Intelligent Advertisement Board...	198
Figure 51	An Eye Catcher and its more Detailed Successor	200
Figure 52	Segment from the Train Schedule Modelled in XML	201
Figure 53	Layout of the Notification Message	205

List of Tables

Table 1	Detailed Assessment of Existing Approaches	87
Table 3	Examples for Knowledge Shifts in Context-Aware Applications.....	110
Table 4	Activities of the Five Actors in the Creation of a Context-Aware Application	121
Table 5	Description of the Context Attributes Used for the Macke Laboratory	181
Table 6	Motion Styles and their Influence on the Selection of Sound Entities	188
Table 7	Description of the Context Attributes of the Intelligent Advertisement Board.	201
Table 8	Semantic Models of the Context Attributes “noise_level” and “motion_level”	202
Table 9	Rules of the Intelligent Advertisement Board Specifying its Behaviour.....	204