

Handlungsadaptive Produktionsassistenz

Michael Lipaczewski, Frank Ortmeier

Computer Systems in Engineering,
Otto-von-Guericke University of Magdeburg, Germany
michael.lipaczewski@ovgu.de, frank.ortmeier@ovgu.de

Abstract: In fast allen Industrienationen stellt der demographische Wandel und die erhöhte Lebenserwartung die Gesellschaftssysteme vor große Herausforderungen. Die Verlängerung des durchschnittlichen Lebensalters führt dazu, dass auch die Arbeitsfähigkeit länger und gesundheitsverträglicher gewährleistet werden muss.

Im Besonderen Tätigkeiten in der industriellen Produktion sind hiervon betroffen. Sowohl physisch als auch psychisch sind über lange Zeiträume ausgeführte, monotone Handlungen, wie sie beispielsweise in der Fließbandproduktion üblich sind, extrem belastend. In Zukunft werden die steigende Automatisierung sowie die fortschreitende Mensch-Maschine-Kooperation die wenigen Flexibilitäten und Freiräume der Werker weiter reduzieren. Dies liegt in erster Linie daran, dass heutige Automatisierungssysteme nur äußerst starre Abläufe beherrschen.

In diesem Papier diskutieren wir Ansätze und Herausforderungen, wie im Kontext industrieller Produktion einerseits Handlungsflexibilität erhöht werden kann und gleichzeitig Produktivitätssteigerungen durch Automatisierung weiter möglich sind.

1 Motivation

Feste Arbeitsabläufe sind ein wichtiger Bestandteil in der Massenfertigung. Sie sind wesentlich für eine effiziente und arbeitsteilige Produktion. Nur durch eine durchdachte und abgestimmte Aufteilung ist die heutige Produktionseffizienz erreichbar [Wil72]. In den letzten Jahrzehnten konnte eine weitere Steigerung der Effizienz vor Allem durch Vollautomatisierung einzelner Teilprozesse – wie beispielsweise Schweißen und Lackieren in der Automobilproduktion – erreicht werden [Gro07]. Im Bereich der vollautomatisierbaren Prozesse sind aber inzwischen die größten Potentiale ausgeschöpft. Dies liegt daran, dass viele komplexe Tätigkeiten sehr fundiertes, haptisches Feedback und adaptives Handeln erfordern [KETJ07]. Beispiele hierfür sind etwa das präzise Fügen von Bauteilen, der “Griff-in-die-Kiste” oder auch die Endmontage im Automobilbereich¹.

Viele aktuelle Arbeiten versuchen deshalb durch Mensch-Roboter-Kooperation eine Teilautomatisierung zur Steigerung der Produktionseffizienz zu erreichen [BBG⁺11, Bro07]. In praktisch allen Ansätzen wird dabei aber der vorhandene Prozess analysiert, die automatisierbaren Teilschritte identifiziert und dann ein entsprechendes Kontrollprogramm für den verwendeten Roboter erzeugt. Erst im letzten Schritt wird festgelegt, wie sich der

¹Hier erschwert das Pendeln der Karosserien die Automatisierung erheblich.

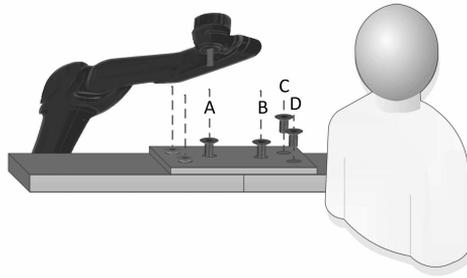


Abbildung 1: Beispiel paralleler Prozesse

Mensch exakt verhalten muss. Man könnte also sagen, der menschliche Werker assistiert dem Roboter. Dies führt dazu, dass der entsprechende Werker einer wesentlich höheren physischen und psychischen Arbeitsbelastung ausgesetzt ist. Alle einzelnen Arbeitsschritte müssen nach einem präzise vorgegebenen Schema abgearbeitet werden.

Beispiel: Das Fügen und Greifen lose liegender Werkstücke ist für Robotersysteme – trotz vieler Fortschritte in den letzten Jahren – immer noch eine große Herausforderung. Deshalb sind vollautomatisierte Lösungen in der Regel nicht kosteneffizient umsetzbar.

Wenn beispielsweise zwei Werkstücke über eine Reihe von Schrauben verbunden werden sollen, so könnte eine kosteneffiziente Lösung ein teilautomatisierter Ansatz sein. Nahe liegend wäre den Roboter mit der Platzierung der Werkstücke und dem Festziehen der Schrauben zu beauftragen. Der Mensch würde hier nur noch das Einsetzen der Schrauben sowie das Greifen und Orientieren der Schrauben verantworten. Durch diese Aufteilung sinken Anforderungen (und damit auch Realisierungskosten) für den Automatisierungsteil immens. Gleichzeitig werden die eher physisch belastenden Tätigkeiten dem Menschen abgenommen. Damit steigt die langfristige Arbeitsfähigkeit.

Interessant ist aber den zugehörigen Prozess ein wenig detaillierter zu betrachten. Als Prozess sind mehrere Varianten denkbar. Relativ problemlos könnte man den Prozess gestalten, indem man die Aktivitäten von Mensch und Roboter strikt zeitlich trennt. Im Beispiel würde erst der Roboter die Werkstücke platzieren, dann würde der Mensch die Schrauben einsetzen (und der Roboter warten) und im letzten Schritt würde der Roboter dann die Schrauben festziehen. Dieses Vorgehen ist möglich, allerdings ist hier nur eine minimale (oder sogar negative) Veränderung der Produktionseffizienz zu erwarten. Größeres Potential steckt in arbeitsteiligen, parallelen Prozessen. Als Beispiel würde der Roboter zunächst die Werkstücke platzieren, woraufhin der Mensch damit beginnt, die Schrauben zu platzieren. Der Roboter folgt dann mit einer Verzögerung und zieht die Schrauben an.

Diese Arten der Mensch-Roboter-Kooperation sind ein aktueller Forschungsgegenstand und es existieren auch schon erste zugelassene Prototypen. Allerdings wird hier praktisch immer ein eindeutiges Prozessmuster vorgegeben. Also beispielsweise in welcher Reihenfolge der Mensch welche Schrauben einzusetzen hat bzw. wie und wo er sich bewegen muss. Die einzige "echte" Interaktion mit dem Roboter findet hier über Sicherheitsmechanismen statt, welche verhindern, dass der Mensch und der Roboter kollidieren. In diesen

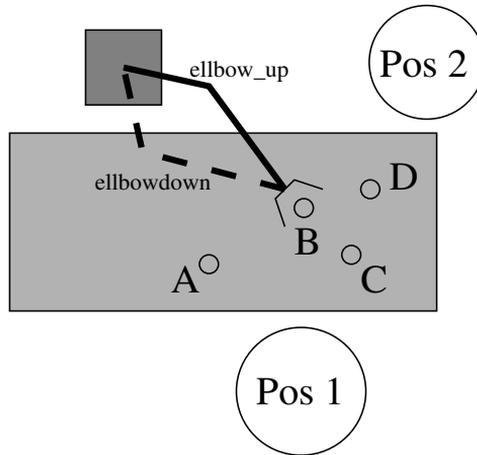


Abbildung 2: Mögliche Handlungsvarianten

Fällen wartet der Roboter meist, bis die Gefahrensituation behoben wurde, bevor er mit seiner Tätigkeit fortfährt. Es ist also selbst in diesen Ansätzen gerechtfertigt, den Mensch (und nicht den Roboter) als assistives Glied zu bezeichnen.

Eine echte Assistenz an dieser Stelle würde bedeuten, dass der Roboter Aufgaben erkennt, Arbeitsabläufe vorausahnt und hilfreich dem Werker zur Seite steht, ohne ihn zu behindern oder einzuschränken. Im Beispiel würde also der Roboter abhängig von der Vorgehensweise des Werkers diesem folgen und die vom Werker definierte Reihenfolge beim Schrauben realisieren. Also beispielsweise die Reihenfolge **A-B-C-D** oder **B-C-D-A** in Abbildung 2.

Hier stellt sich jetzt aber ein besonderes Problem in der Art der vom Assistenzsystem auszuführenden Aktionen. Selbst wenn die entsprechende Sequenz und damit die nächste Handlung (z.B. Festziehen der Schraube C) bekannt sind, ist die Aktion selbst normalerweise stark unterspezifiziert. In der Regel existieren unendlich viele Pfade für einen Industrieroboter, die Position der Schraube C zu erreichen. Zusätzlich gibt es im Allgemeinen noch acht mögliche Achskombinationen mit denen die Schraube C erreicht werden kann (z.B. ellbow_up und ellbow_down in Abbildung 2). Da sich der Arbeitsraum von Mensch und Maschine überlappen, führt das nicht nur zur Sicherheitsproblematik, sondern auch dazu, dass antizipiert werden muss, ob die Ausführung der Tätigkeit an Position C (durch den Roboter) den Menschen bei der Ausführung seiner nächsten Tätigkeit beeinflusst. Noch schwieriger wird die Planung durch Wechselwirkung mit menschlichen Aktivitäten, die *nicht* Bestandteil des Prozesses sind. So blockiert in Abbildung 2 die Roboteraktion an Schraube B den Menschen beim Ansetzen von Schraube A nur, wenn dieser sich an Position 2 befindet. Befindet er sich an Position 1, existiert keine Blockierung.

Ein anderes Problem sind Abweichungen vom Prozess. Etwa, dass vor dem Schrauben durch den Werker eines der Werkstücke beispielsweise aufgrund eines Fertigungsfehlers entfernt wird. Bei einem adaptiven Assistenzroboter wäre in diesem Fall das Heranführen eines neues Werkstücks wünschenswert.

2 Herausforderungen für adaptive Assistenz

Um diese Szenarien zu lösen, sind eine ganze Reihe von modernen Technologien notwendig. Ein Bereich ist offensichtlich die Sensorik und Wahrnehmung. Hier existieren in den verschiedensten Bereichen bereits sehr ausgereifte Systeme [DG04, WLA05]. Speziell im Produktionsumfeld können neben der Umgebung [AAYA09, HTWM04] auch Roboter [FND03, HS90, Rus01], Kleidung des Menschen [FMT⁺99, ASG⁺05, KASS04] und Werkstücke [BB03, JH99] instrumentiert werden. Dadurch ist dieses Problem einfacher zu lösen als beispielsweise im Bereich des Ambient Assisted Living [CCN⁺09, KBR⁺07, Ort10, NOSR08] oder der mobilen Assistenz [PBC⁺02]. Offen ist allerdings die Frage, wie man entscheidet, ob und wann mit einer Kooperation begonnen werden muss bzw. diese beendet werden soll.

Anders verhält es sich bei den möglichen Prozessen. Diese scheinen auf den ersten Blick wesentlich eingeschränkter. Auch spielen in der Regel nicht-beobachtbare, kognitive Zustände [RC01, CDCT⁺01] kaum eine Rolle. Trotzdem muss die Maschine mit einer Vielzahl von möglichen Arbeitsabläufen oder Handlungsinformationen ausgestattet sein, so dass sie situationsabhängig reagieren kann [GOR06, GNO⁺08, NOS⁺09, KKS]. Auf der anderen Seite ist aber das *Wie* – also die auszulösende Aktion selbst – wesentlich schwieriger zu bestimmen. Schon alleine für das Anfahren eines einzigen, festdefinierten Punktes im Raum existieren in der Regel unendlich viele Pfade und sogar acht mögliche Endkonfigurationen des Roboters.

Eine weitere, wesentliche Herausforderung liegt natürlich in der Arbeitssicherheit. Industrieroboter bringen oft ein großes Gefährdungspotential mit sich. Dies liegt an der hohen Leistung, dem großen 3D-Arbeitsraum sowie den potentiell scharfkantigen und/oder gefährlichen Werkzeugen. Dieser Punkt bringt bereits bei herkömmlicher Mensch-Roboter-Kooperation signifikante Herausforderungen mit sich. Mit assistiven Robotern sind hier allerdings vollkommen neue Komplexitäten zu bewältigen. Wo bei einer starren Kooperation davon ausgegangen werden kann, dass der Mensch die Bewegungsmuster des Roboters kennt und damit auch antizipieren kann, gilt bei einem assistiven, adaptiven System dies nicht mehr. Zudem sind bei einer starren Kooperation auch die Bewegungsmuster des Menschen a priori bekannt und können daher bei der Programmierung berücksichtigt werden.

In diesem Papier fokussieren wir uns im Folgenden auf die Bereiche Modellierung und Entwurf assistiver Systeme. Es ist aber unbestritten, dass auch in den technischen Bereichen Sensorik, Aktuatorik und Echtzeitsysteme signifikante Herausforderungen liegen. In diesen technischen Bereichen existieren jedoch bereits Vorarbeiten, die beispielsweise Arbeitsraumüberwachung [AAYA09, HTWM04], kollisionsfreie Bahnplanung [LaV06, Ata07, FAEG12, AGO12] oder Online-Monitoring [GMBB04, Cha06, SR10] behandeln. Im Bereich der Modellierung und des Designs adaptiver Assistenzfunktionalitäten in der Industrierobotik bestehen hingegen sehr wenige Vorarbeiten. In diesem Bereich sehen wir mindestens fünf große Fragestellungen:

Wie beschreibt man flexible, teil-automatisierbare Fertigungsprozesse? Hier müssen Möglichkeiten geschaffen werden, Schritte in einem Fertigungsprozess zu

identifizieren, welche automatisierbar sind und welche unweigerlich von einem Menschen übernommen werden müssen. Dabei ist zu beachten, dass einzelne Schritte trotz der Möglichkeit der Automatisierung manuell ausgeführt werden können. Genauso sind natürlich inhaltlich (Teil-)Ordnungen zu berücksichtigen. Ein geeignetes Hilfsmittel könnten Prozessmodellierungssprachen sein.

Wie beschreibt man unsichtbare Interaktionspunkte? Daran anschließend ergibt sich die Frage, ob und welche Arbeitsschritte beobachtbar sind. Dies ist wichtig, um manuelle Arbeitsprozesse als erledigt zu markieren. Das stellt die Voraussetzung für die Planung der weiteren Assistenz dar. Es kann passieren, dass durch Verdeckung von Sensoren, Prozessen außerhalb des Sensorbereiches oder nicht beobachtbaren Aktivitäten (zum Beispiel durch ein Überdenken des gegenwärtigen Prozesses) ein ungenügendes Bild des gegenwärtigen Fertigungsstandes an das System übermittelt wird.

Wie beschreibt man Interaktions-/Assistenzstrategien? In der Regel existiert für praktisch jede Aktion eines Industrieroboters eine Vielzahl an möglichen Realisierungen. Um eine effiziente (und sichere) Kooperation zu ermöglichen, muss einerseits die notwendige Flexibilität gewährleistet und andererseits für den Menschen eine Antizipierbarkeit vorhanden sein. Es müssen also – auch für Menschen verständliche – Regeln definiert werden, an die sich der Roboter bei der Planung seiner Aktionen halten soll.

Wie charakterisiert man vorgegebenes Handlungswissen effizient? Zentrales Ziel der Teilautomatisierung ist die Steigerung der Produktionseffizienz. Deshalb muss in der Praxis immer zwischen Adaptivität, Kosten und Effizienz des Prozesses abgewogen werden. Eine Möglichkeit wäre, durch Handlungsanweisungen/-regeln den Spielraum von Mensch und Roboter einzuschränken. Constraint-basierte Sprachen [SdLA93] sind hier ggf. möglich, allerdings müssen auch temporale (Teil-)Ordnungen ausdrückbar sein (ohne die volle Komplexität temporaler Logik zu erlauben).

Wie bewertet man a priori das Potential einer adaptiven Produktionsassistenz? Beim Entwurf eines solchen Systems gibt es eine sehr große Bandbreite an möglichen Flexibilisierungen. Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, dass man bei der Planung abschätzen kann, welcher potentielle Nutzen durch die Teilautomatisierung erreicht wird. Als Lösung kommen beispielsweise Markov-basierte Modelle [JW95] in Frage.

Wie gewährleistet man Zuverlässigkeit? Arbeitssicherheit wird die zentrale Herausforderung für eine adaptive Assistenz sein. Hier können natürlich eine ganze Reihe vorhandener Technologien verwendet werden. Allerdings sind auch viele herkömmliche Ansätze wie getrennte Arbeitsräume nicht mehr direkt einsetzbar. Eine Idee könnte die Definition zeitlich veränderlicher, kontext-sensitiver Arbeitsräume sein.

3 Verwandte Arbeiten

Im Bereich der robotergestützten Assistenz wurden bereits verschiedene Forschungsvorhaben realisiert. Besonders im Medizinbereich werden Roboter zur Unterstützung von Prozessen eingesetzt. Interessant für unser Forschungsvorhaben sind hierbei Ansätze, welche auch die Modellierung solcher Systeme explizit betrachten.

Der Sonderforschungsbereich Transregio 62² beschäftigt sich intensiv mit der Mensch-Maschine Interaktion. Besonders hervorzuheben sind hier das Arbeitspaket A1, welches sich mit der adaptiven Planung von individuellen und situationsgerechten Nutzerunterstützungen beschäftigt [BBG⁺11] sowie im Bereich Situationserkennung das Arbeitspaket C1 [BTKN11]. Ein weiteres interessantes Projekt ist TAPED (Task Assistance for Persons with Cognitive Disabilities³). Hier liegt der Schwerpunkt allerdings auf Assistenz für behinderte Personen.

Innerhalb des Graduiertenkollegs MuSAMA⁴ wird unter anderem an einer Modellierungssprache für Assistenzleistungen ohne vorher spezifizierte Kenntnis der vorhandenen Akteure gearbeitet [PBM⁺09, Ris09]. Die Sprache muss demzufolge sehr allgemeingültig Aufgaben und Reaktionen beschreiben. Anregungen hieraus könnten für unser Projekt sehr interessant sein (z.B. als domänenspezifische Anpassung).

Der Sonderforschungsbereich Nexus⁵ arbeitet gegenwärtig unter anderem an einer Modellrepräsentation von Assistenzleistungen sowie die Verwendung formaler Methoden zur Beurteilung der Güte sowie der Sicherheit dieser Leistung [HGNM09, MHS⁺10]. Auch diese Arbeiten können wertvolle Anregungen liefern. Allen Verfahren gemein ist die Tatsache, dass sich die Assistenz vor allem im privaten oder Pflege-Bereich ansiedelt. Dabei geht es größtenteils um die Betreuung erkrankter oder behinderter Personen. Das Hauptaugenmerk liegt entsprechend auf der Erkennung von kognitiven Elementen und Intentionen. Im industriellen Sektor sind diese Aspekte zwar auch relevant, jedoch nicht zentral.

Zur Beurteilung von Assistenzleistungen wurde im Zuge des DFG Projektes mmEVAL “Qualitätsmessung multimodaler Mensch-Maschine-Interaktion”⁶ Forschung zur Identifikation von Qualitätsaspekten multimodaler Interaktion betrieben. Zu diesem Zweck wurden Beurteilungsverfahren entworfen und experimentell getestet [WMWK10, MEK⁺10]. Diese Arbeiten können unter Umständen helfen, die Kooperation weiter zu verbessern, indem der Mensch beispielsweise durch intuitive Aktionen direkt oder indirekt den Roboter gezielter beeinflussen kann.

Im Bereich von Situations-/Aktivitätserkennung und Modellierung gibt es bereits diverse Vorarbeiten. Eine gute Übersicht wurde von B. Gottfried et al. erstellt [GA09]. Vorhersagestrategien für Aktivitäten basierend auf Beobachtungen werden von D. Patterson et al. behandelt [PFKPO5]. Diese Arbeiten sind für die Realisierung eines Prototypen natürlich

²<http://www.sfb-trr-62.de/>

³<http://www.cit-ec.de/research/TAPED>

⁴www.musama.de

⁵www.nexus.uni-stuttgart.de

⁶http://www.qu.tu-berlin.de/menue/forschung/abgeschlossene_projekte/mmeval_df/

extrem wichtig, für die Kernfragestellung des gezielten Entwurfs adaptiver Assistenzsysteme in der industriellen Produktion nicht direkt relevant.

Forschungen zum Thema Werkerassistenz fanden bisher hauptsächlich im Bereich anleitende Systeme statt. Diese nehmen dem Werker jedoch keine Tätigkeiten ab, sondern geben lediglich Ratschläge zur effizienteren Durchführung der Tätigkeiten. Dabei werden dem Werker Prozesse in verschiedener Weise visualisiert, um die Arbeit zu erleichtern oder zusätzliche Informationen bereitzustellen. Als Beispiele sind an dieser Stelle das Projekt OptoInspect⁷ des Fraunhoferinstituts IFF oder der Ansatz von Tegtmeier [Teg07] genannt. Gemeinsam ist, dass die Arbeit des Werkers durch zusätzliche Life-Information (hier in Form von AR-Einblendung) erleichtert werden soll. Die Arbeiten sind trotzdem relevant, da dort bereits einige (grobe) Klassifikationen der Arbeitsprozesse verwendet wurden.

Ein weiteres Projekt im Bereich Werkerassistenz, welches sich mit der Integration von Robotern und Menschen im Fertigungsprozess beschäftigt, ist das ROSETTA Projekt⁸. Übergeordnetes Ziel ist die “human centric [...] cooperation of robots and workers”. Dabei werden Autonomie, Lerneffekte und Wissensdatenbanken untersucht und eingebunden. Trotz des Leitmotivs ist der assistive Gedanke, wie wir ihn hier fokussieren, nicht sehr stark ausgebildet. Roboter absolvieren an dieser Stelle weiterhin festgelegte Tasks und werden nicht dafür ausgelegt, adaptiv auf den (Arbeitsprozess des individuellen) Menschen zu reagieren. Trotzdem sind natürlich viele dort entwickelte Konzepte, im Besonderen zur sicheren Kooperation, hoch relevant und nützlich für die Realisierung eines adaptiven Produktionsassistenten.

Eines der größten Probleme bei Entwurf komplexer Szenarien in der Industrierobotik ist das Fehlen geeigneter Programmier- und Eingabesprachen [Bro07]. Verschiedene Projekte beschäftigen sich daher mit unterschiedlichen Möglichkeiten, der Maschine Anweisungen zu geben. Neben reinen textuellen Eingaben geht der Trend hin zu verbalen Anweisungen [TCS93]. Dabei werden jedoch keine komplexen Abläufe mehr beschrieben, sondern einfache Aufgaben erteilt. Um aus diesen Anweisungen Prozesse zu abstrahieren, ist es notwendig, den Roboter trainierbar zu machen. Erste Ansätze hierzu wurden etwa im Morpha Projekt [DZER02] als auch durch ProVar [VdLWS⁺99] behandelt. Diese Arbeiten könnten vor allem dann interessant sein, wenn auch direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter notwendig wird. Aus Sicht der Assistenz ist zwar immer die indirekte Anpassung wünschenswerter, aber aus Sicht des Nutzers/Werkers steigt das gefühlte Vertrauen durch direkte Interaktionsmöglichkeiten.

4 Zusammenfassung

Assistenzsysteme begegnen uns heute in den verschiedensten Lebenssituationen. Leider ist nur ein geringer Teil dieser Systeme tatsächlich in dem Sinne assistiv, dass sie uns flexibel unterstützen. In den meisten Fällen muss der Nutzer seine Handlungsmuster den

⁷<http://www.vision.fraunhofer.de/de/projekte/562.html>

⁸<http://www.fp7rosetta.org/>

Vorgaben des Assistenzsystems zumindest teilweise anpassen, um einen Nutzen aus dem System ziehen zu können. Im Bereich des Ambient Assisted Living existieren bereits einige Ansätze, die versuchen, diese rigide Kopplung aufzuheben. Im Bereich der industriellen Anwendungen existieren bisher praktisch keine Arbeiten mit diesem Ziel.

Gerade vor dem Hintergrund einer Verlängerung der Lebensarbeitszeit und gleichzeitiger Steigerung der Produktivität durch Teilautomatisierung ist die Entwicklung assistiver Systeme in der industriellen Produktionskette aber interessant und notwendig. In diesem Bereich existieren besondere Herausforderungen, die sich in (relativ) präzise beschreibbaren Handlungsstrukturen aber stark unterspezifizierten Assistenzaktionen niederschlagen. Sowohl systematische Modellierung als auch Entwurf sind bisher noch ungenügend erforscht. Eine mittelfristige Umsetzbarkeit der Systeme scheint aber unter Einbindung interdisziplinäre Experten und der Vorarbeiten aus dem privaten Bereich möglich.

Literatur

- [AAYA09] Bisma R. Abidi, Nash R. Aragam, Yi Yao und Mongi A. Abidi. Survey and analysis of multimodal sensor planning and integration for wide area surveillance. *ACM Comput. Surv.*, 41(1):7:1–7:36, Januar 2009.
- [AGO12] Sergey Alartartsev, Matthias Güdemann und Frank Ortmeier. Trajectory Description Conception for Industrial robots. In *Proceedings of the 7th German Conference on Robotics (Robotik 2012)*, 2012. in review.
- [ASG⁺05] Fabrice Axisa, P.M. Schmitt, C. Gehin, G. Delhomme, E. McAdams und A. Dittmar. Flexible technologies and smart clothing for citizen medicine, home healthcare, and disease prevention. *Information Technology in Biomedicine, IEEE Transactions on*, 9(3):325–336, sept. 2005.
- [Ata07] A.A. Ata. Optimal trajectory planning of manipulators: a review. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2(1):32–54, 2007.
- [BB03] Dr. Wolfgang Bloehs und Toni Brandl. Process for geometry recognition and tracking during thermal treatment of elements by means of laser beam, June 2003.
- [BBG⁺11] S. Biundo, P. Bercher, T. Geier, F. Müller und B. Schattenberg. Advanced user assistance based on AI planning. *Cognitive Systems Research*, 12(3):219–236, 2011.
- [Bro07] Torgny Brogrdh. Present and future robot control developmentAn industrial perspective. *Annual Reviews in Control*, 31(1):69–79, 2007.
- [BTKN11] J.D. Bouecke, E. Tlapale, P. Kornprobst und H. Neumann. Neural mechanisms of motion detection, integration, and segregation: From biology to artificial image processing systems. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2011:6, 2011.
- [CCN⁺09] Ricardo Costa, Davide Carneiro, Paulo Novais, Luís Lima, José Machado, Alberto Marques und José Neves. Ambient Assisted Living. In Juan Corchado, Dante Tapia und José Bravo, Hrsg., *3rd Symposium of Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence 2008*, Jgg. 51 of *Advances in Soft Computing*, Seiten 86–94. Springer Berlin / Heidelberg, 2009. 10.1007/978-3-540-85867-6_10.

- [CDCT⁺01] R. Cowie, E. Douglas-Cowie, N. Tsapatsoulis, G. Votsis, S. Kollias, W. Fellenz und J.G. Taylor. Emotion recognition in human-computer interaction. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 18(1):32–80, jan 2001.
- [Cha06] R.A. Chadwick. Operating multiple semi-autonomous robots: Monitoring, responding, detecting. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Jgg. 50, Seiten 329–333. SAGE Publications, 2006.
- [DG04] K. Delac und M. Grgic. A survey of biometric recognition methods. In *Electronics in Marine, 2004. Proceedings Elmar 2004. 46th International Symposium*, Seiten 184–193, june 2004.
- [DZER02] R. Dillmann, R. Zöllner, M. Ehrenmann und O. Rogalla. Interactive natural programming of robots: Introductory overview. In *IARP Workshop on Technical Challenge for Dependable Robots in Human Environments, Toulouse, France, 2002*.
- [FAEG12] C. Fragkopoulos, K. Abbas, A. Eldeep und A. Graeser. Comparison of sampling based motion planning algorithms specialized for robot manipulators. *ROBOTIK 2012*, 2012.
- [FMT⁺99] J. Farringdon, A.J. Moore, N. Tilbury, J. Church und P.D. Biemond. Wearable sensor badge and sensor jacket for context awareness. In *Wearable Computers, 1999. Digest of Papers. The Third International Symposium on*, Seiten 107–113, oct. 1999.
- [FND03] Terrence Fong, Illah Nourbakhsh und Kerstin Dautenhahn. A survey of socially interactive robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 42(34):143 – 166, 2003. ;ce:title;Socially Interactive Robots;/ce:title;.
- [GA09] B. Gottfried und H. Aghajan. *Behaviour Monitoring and Interpretation-Bmi: Smart Environments*, Jgg. 3. Ios PressInc, 2009.
- [GMBB04] J. Guiochet, G. Motet, C. Baron und G. Boy. Toward a Human-Centered Uml for Risk Analysis. *Human Error, Safety and Systems Development*, Seiten 177–191, 2004.
- [GNO⁺08] M. Gudemann, F. Nafz, F. Ortmeier, H. Seebach und W. Reif. A specification and construction paradigm for Organic Computing systems. In Sven Brueckner, Paul Robertson und Umesh Bellur, Hrsg., *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems (SASO 2008)*, Seiten 233–242. IEEE Computer Society Press (2008), 2008.
- [GOR06] M. Gudemann, F. Ortmeier und W. Reif. Formal Modeling and Verification of Systems with Self-x Properties. In Laurence T. Yang, Hai Jin, Jianhua Ma und Theo Ungerer, Hrsg., *Proceedings of the Third International Conference on Autonomic and Trusted Computing (ATC 2006)*, LNCS, Seiten 38–47. Springer, September 2006.
- [Gro07] M.P. Groover. *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*. Prentice Hall Press, 2007.
- [HGNM09] Nicola Hönle, Matthias Grossmann, Daniela Nicklas und Bernhard Mitschang. Design and implementation of a domain-aware data model for pervasive context information. *Computer Science Research + Development*, 24(1-2):69–83, September 2009.
- [HS90] J.K. Hackett und M. Shah. Multi-sensor fusion: a perspective. In *Robotics and Automation, 1990. Proceedings., 1990 IEEE International Conference on*, Seiten 1324–1330 vol.2, may 1990.

- [HTWM04] Weiming Hu, Tieniu Tan, Liang Wang und S. Maybank. A survey on visual surveillance of object motion and behaviors. *Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, IEEE Transactions on*, 34(3):334–352, aug. 2004.
- [JH99] Seul Jung und T.C. Hsia. Adaptive force tracking impedance control of robot for cutting nonhomogeneous workpiece. In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, Jgg. 3, Seiten 1800–1805 vol.3, 1999.
- [JW95] Bukowski J.V. und Goble W.M. Using Markov models for safety analysis of programmable electronic systems. *ISA Transactions*, 34:193–198(6), June 1995.
- [KASS04] N. Kern, S. Antifakos, B. Schiele und A. Schwaninger. A model for human interruptability: experimental evaluation and automatic estimation from wearable sensors. In *Wearable Computers, 2004. ISWC 2004. Eighth International Symposium on*, Jgg. 1, Seiten 158 – 165, oct.-3 nov. 2004.
- [KBR⁺07] Thomas Kleinberger, Martin Becker, Eric Ras, Andreas Holzinger und Paul Müller. Ambient Intelligence in Assisted Living: Enable Elderly People to Handle Future Interfaces. In Constantine Stephanidis, Hrsg., *Universal Access in Human-Computer Interaction. Ambient Interaction*, Jgg. 4555 of *Lecture Notes in Computer Science*, Seiten 103–112. Springer Berlin / Heidelberg, 2007. 10.1007/978-3-540-73281-5_11.
- [KETJ07] C.C. Kemp, A. Edsinger und E. Torres-Jara. Challenges for robot manipulation in human environments [grand challenges of robotics]. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 14(1):20–29, 2007.
- [KKS] V. Köppen, T. Kirste und G. Saake. Challenges in an Assistance World.
- [LaV06] S.M. LaValle. *Planning algorithms*. Cambridge Univ Pr, 2006.
- [MEK⁺10] Sebastian Möller, Klaus-Peter Engelbrecht, Christine Kühnel, Ina Wechsung und Benjamin Weiss. *Evaluation of Multimodal Interfaces for Ambient Intelligence*, Seiten 347–370. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2010.
- [MHS⁺10] Julia Möhrmann, Gunter Heidemann, Oliver Siemoneit, Christoph Hubig, Uwe-Philipp Käppler und Paul Levi. Context Generation with Image Based Sensors: An Interdisciplinary Enquiry on Technical and Social Issues and their Implications for System Design. In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, Seiten 262–268, Capetown, Januar 2010. WASET.
- [NOS⁺09] F. Nafz, F. Ortmeier, H. Seebach, J.-P. Steghöfer und W. Reif. A universal self-organization mechanism for role-based Organic Computing systems. In *Proceedings of the Sixth International Conference on Autonomic and Trusted Computing (ATC 2009)*, 2009.
- [NOSR08] Florian Nafz, Frank Ortmeier, Hella Seebach und Wolfgang Reif. Organic Computing for Health Care Systems - Possible Benefits and Challenges. In *HEALTHINF (2)*, Seiten 286–290, 2008.
- [Ort10] Frank Ortmeier. Dependability in Pervasive Computing. In Apostolos Malatras, Hrsg., *Pervasive Computing and Communications Design and Deployment: Technologies, Trends, and Applications*, Seiten 230–246. IGI Global, 12 2010.
- [PBC⁺02] M.E. Pollack, L. Brown, D. Colbry, C. Orosz, B. Peintner, S. Ramakrishnan, S. Engberg, J.T. Matthews, J. Dunbar-Jacob, C.E. McCarthy et al. Pearl: A mobile robotic assistant for the elderly. In *AAAI workshop on automation as Eldercare*, Jgg. 2002, Seiten 85–91. AAAI Press, 2002.

- [PBM⁺09] C. Plociennik, C. Burghardt, F. Marquardt, T. Kirste und A. Uhrmacher. Modelling Device Actions in Smart Environments. *Intelligent Interactive Assistance and Mobile Multimedia Computing*, Seiten 213–224, 2009.
- [PFKP05] D.J. Patterson, D. Fox, H. Kautz und M. Philipose. Fine-grained activity recognition by aggregating abstract object usage. In *Wearable Computers, 2005. Proceedings. Ninth IEEE International Symposium on*, Seiten 44–51. IEEE, 2005.
- [RC01] S.S. Rakover und B. Cahlon. *Face Recognition: Cognitive and Computational Processes*. Studies in Bilingualism. John Benjamins Publishing Company, 2001.
- [Ris09] H. Ristau. Challenges in Content Based, Semantically Decoupled Communication on Neighbor-Relations. *Intelligent Interactive Assistance and Mobile Multimedia Computing*, Seiten 189–200, 2009.
- [Rus01] R. Andrew Russell. Survey of Robotic Applications for Odor-Sensing Technology. *The International Journal of Robotics Research*, 20(2):144–162, 2001.
- [SdLA93] A. Saeed, R. de Lemos und T. Anderson. Robust Requirements Specifications for Safety-Critical Systems. In J. Górski, Hrsg., *SafeComp'93: 12th International Conference on Computer Safety, Reliability, and Security*, Seiten 219–229. Springer-Verlag, Oct 1993.
- [SR10] S.L. Smith und D. Rus. Multi-robot monitoring in dynamic environments with guaranteed currency of observations. In *Decision and Control (CDC), 2010 49th IEEE Conference on*, Seiten 514–521. IEEE, 2010.
- [TCS93] Barry Taylor, Mary E. Cupo und Saleem J. Sheredos. Workstation Robotics: A Pilot Study of a Desktop Vocational Assistant Robot. *The American Journal of Occupational Therapy*, 47(11):1009–1013, 1993.
- [Teg07] A. Tegtmeier. *Augmented Reality als Anwendungstechnologie in der Automobilindustrie*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Universitätsbibliothek, 2007.
- [VdLWS⁺99] H.F.M. Van der Loos, J.J. Wagner, N. Smaby, K. Chang, O. Madrigal, L.J. Leifer und O. Khatib. ProVAR assistive robot system architecture. In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, Jgg. 1, Seiten 741–746 vol.1, 1999.
- [Wil72] R. Wild. *Mass-production management: The design and operation of production flow-line systems*. John Wiley & Sons, 1972.
- [WLA05] Daniel H. Wilson, Anna C. Long und Chris Atkeson. A context-aware recognition survey for data collection using ubiquitous sensors in the home. In *CHI '05 extended abstracts on Human factors in computing systems*, CHI EA '05, Seiten 1865–1868, New York, NY, USA, 2005. ACM.
- [WMWK10] Benjamin Weiss, Sebastian Möller, Ina Wechsung und Christine Kühnel. Quality of Experiencing Multi-modal Interaction. In Wolfgang Minker, Gary Geunbae Lee, Satoshi Nakamura und Jan Odjik Joseph Mariani, Hrsg., *Spoken Dialogue Systems Technology and Design*, Seiten 213–230. Springer, Boston, 2010.