

Evaluation der virtuellen Absicherung hybrider Montagesysteme mittels Kinematik- und Ergonomiesimulationswerkzeugen

Evaluation of the Virtual Validation of Hybrid Assembly Systems through Industrial Simulation Tools

Maximilian Metzner, Pascal Heinlein, Benedict Wytopil,
Toni Donhauser, Jörg Franke
FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl FAPS, Deutschland (Germany),
maximilian.metzner@faps.fau.de, pascal.heinlein@fau.de,
benedict.wytopil@fau.de, toni.donhauser@faps.fau.de, joerg.franke@faps.fau.de

Abstract: Hybrid assembly systems, especially systems incorporating direct human-robot interaction, can help to solve the conflict between flexibility and productivity in industrial assembly. A comprehensive simulation of such systems could enable a more widespread application. In this contribution, a review of proposed methods for the simulation of these systems is conducted. Based on identified shortcomings, a new multi-stage approach is derived. The methodology is implemented on simulation studies for the major forms of human-robot interaction in an assembly scenario. Suitable alternatives for the simulation method and the modelling for human and robot behaviour as well as their applicability with regard to the simulation goals are discussed.

1 Motivation

Die industrielle Montage ist von einem Spannungsfeld aus Flexibilitäts- und Produktivitäts- bzw. Wirtschaftlichkeitsanforderungen geprägt. Weder manuelle, noch vollautomatisierte Montagesysteme vermögen diesen Zielkonflikt ausreichend aufzulösen. (Lotter und Wiendahl, 2012) Hybride Montagesysteme, insbesondere im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), eröffnen hier ein Lösungspotenzial. Aufgrund des hohen Implementierungsaufwands werden derartige Systeme derzeit trotz ihres hohen Potentials nur selten eingesetzt. (Metzner, 2018)

Mittels Simulationen kann die Beherrschbarkeit solcher komplexen Systeme verbessert werden. Allerdings stoßen etablierte Planungstools gerade im Hinblick auf die meist kritische Sicherheitsbetrachtung an ihre Grenzen (Metzner et al., 2018).

Gegenstand dieser Evaluation ist das Vorgehen zur virtuellen Absicherung (VA) von MRK-Systemen unter Zuhilfenahme von deterministischer Verhaltensmodellierung

sowie Motion Capturing (MC) zur Bewegungsgenerierung des digitalen Menschmodells (DMM). Zunächst wird ein Überblick zum Stand der Technik gegeben, aus dem bestehende Handlungsbedarfe abgeleitet werden. Diese werden mittels einer Methodik zur VA von MRK-Systemen adressiert, welche zwei alternative Vorgehensweisen der menschlichen Verhaltensmodellierung einschließt. Beide Ansätze werden schließlich im Kontext der VA von hybriden Montagesystemen gegenübergestellt und geeignete Anwendungsfelder aufgezeigt. Zuletzt wird ein Ausblick auf den künftigen Forschungsbedarf gegeben.

2 Stand der Technik

Im folgenden Kapitel werden zuerst grundlegende, den Forschungsbedarf definierende Eigenschaften hybrider Montagesysteme, insbesondere im Bereich der MRK, dargestellt. Anschließend wird auf den Stand der Forschung und Technik in der Simulation solcher Systeme eingegangen.

2.1 Hybride Montagesysteme und Mensch-Roboter-Zusammenarbeit

Hybride Montagesysteme sind, gerade in der variantenreichen Produktion, etabliert. Klassisch werden hierbei manuelle und automatisierte Systeme in einer Prozesskette kombiniert, ohne hierbei jedoch eine Zusammenarbeit der Systemarten zu implementieren (Lotter und Wiendahl, 2012). Der Bereich der MRK zielt darauf ab, eine Zusammenarbeit zwischen dem Werker und einer Roboterapplikation zu ermöglichen.

Der Begriff MRK wird oftmals synonym für vier Arten der direkten Mensch-Roboter-Zusammenarbeit verwendet: Koexistenz, synchrone Kooperation, parallele Kooperation und Kollaboration. Bei der Koexistenz überschneiden sich die Arbeitsräume nicht. Bei der synchronen Kooperation überschneidet sich der Arbeitsraum zwar, jedoch arbeitet zeitgleich immer nur einer der Partner in diesem. Die parallele Kooperation sieht ein gleichzeitiges Arbeiten von Mensch und Roboter im selben Arbeitsraum vor, jedoch nicht am selben Teil. Die Kollaboration stellt die engste Form der Zusammenarbeit dar. Hier wird gleichzeitig im selben Arbeitsraum am selben Teil gearbeitet. (Bender et al., 2016)

Die direkte Zusammenarbeit erfordert einen Verzicht auf trennende Schutzeinrichtungen, weshalb die Absicherung von MRK-Systemen als kritisch anzusehen ist. Normativ werden die Kollaborationsarten *sicherheitsbewerteter überwachter Halt, Handführung, Geschwindigkeits- und Abstandüberwachung* sowie *Leistungs- und Kraftbegrenzung* definiert. Die entsprechenden Regelungen, einschließlich der zulässigen Kraft- und Flächenpressungswerten für den physischen Kontakt, sind in (DIN ISO/TS 15066) sowie (DIN EN ISO 10218 - 1) festgehalten. Hierbei ist nicht nur die vorschriftsmäßige Nutzung, sondern auch vorhersehbares Fehlverhalten des Menschen explizit Teil der Betrachtung.

2.2 Simulation und virtuelle Absicherung hybrider Montagesysteme

In der Planung und Entwicklung von Produktionssystemen spielt die VA eine signifikante Rolle, da Anforderungen ohne einen physischen Prototyp überprüft werden können. Erfolgte Entwicklungsschritte werden virtuell validiert, um Fehler frühzeitig erkennen und beheben zu können (Domingo, 2010).

Ein bedeutendes Werkzeug zur virtuellen Absicherung von manuellen Montagesystemen stellt die Ergonomieanalyse nach VDI 4499 Blatt 4 dar. Diese umfasst sowohl die anthropometrische Gestaltung von Mensch- und Arbeitsplatzmodell, als auch die statische und dynamische Bewertung der Arbeitsaufgaben. Zusätzlich werden Analysen bezüglich Kollisionen und des Greifraums durchgeführt, um die Sicherheit für den Werker zu gewährleisten (Schönherr, 2014). Bei komplexen Prozessen werden oftmals MC-Systeme zur Bewegungsgenerierung eingesetzt (Bönig et al., 2013).

Bei automatisierten Montagezellen mit Robotereinsatz liegen die Hauptaspekte der VA mit Hilfe der 3D-Kinematiksimulation nach VDI 3633 Blatt 8 in der Bahnoptimierung, Kollisionserkennung sowie Layoutoptimierung. Weiterhin kann im Hinblick auf die Inbetriebnahme der Zelle eine Simulation der Steuerungssoftware durchgeführt werden. (VDI 3633 Blatt 8)

Zur VA hybrider Systeme und insbesondere MRK-Systemen müssen die Aspekte manueller und automatisierter Systeme integriert betrachtet werden. Hierfür sind neue Ansätze zur VA erforderlich, mit denen sich die Forschung derzeit intensiv beschäftigt. So wurde im Projekt *rorarob* das Anlagenkonzept einer Schweißaufgabe virtuell abgebildet und ein DMM in die Offline-Programmierungsumgebung FAMOS implementiert, um die Roboterbahnen auf die geplanten Bewegungen des Menschen während des Fertigungsvorgangs abzustimmen (Busch; Deuse, 2014; Busch et al., 2013). Das Projekt *INDIVA* zielt ebenfalls auf die Absicherung eines MRK-Systems mit der Software *FAMOS* ab, doch im Gegensatz zu *rorarob* basiert die Erfassung und Verarbeitung der menschlichen Bewegung für das DMM auf einem MC-System (Bonin et al., 2016).

Ore et al. beschreiben im Rahmen des Forschungsprojekts *ToMM* einen mehrstufigen Ansatz zur Evaluation eines MRK-Systems und ermöglichen die frühzeitige Optimierung mit dem Fokus auf Reichweite, Belastung des Mitarbeiters sowie der Zykluszeit (Ore et al., 2014; Ore, 2015).

Das Projekt *MANUSERV* stellt eine Entscheidungshilfe für die Auswahl mehrerer Lösungen für die Umrüstung von manuellen Arbeitsplätzen zu MRK-Arbeitsplätzen dar, nutzt ein simulationsbasiertes Validierungswerkzeug und stellt eine Datenbank für Roboter- und Werkzeugauswahl zur Verfügung (Heinze et al., 2016).

Glogowski et al. präsentieren ein Konzept für die MRK-Simulation, das die Aufgaben von Mensch und Roboter klar aufteilt und die Analyse der Aspekte Ergonomie, Sicherheit und Ökonomie strikt von der Automatisierung trennt (Glogowski et al., 2018). Zur Simulation des hybriden Systems wird im Rahmen des Projekts *KOMPI* das Robot Operating System (ROS) in das Humansimulationswerkzeug „*ema – Editor menschlicher Arbeit*“ integriert (Lemmerz et al., 2018). Die Einbindung eines realistischen Robotercontrollers sowie die ereignisgesteuerte Simulation von

Sicherheitseinrichtungen im Sinne einer virtuellen Inbetriebnahme ist nicht umgesetzt.

Metzner et al. schlagen ein immersives System unter Nutzung von Virtual-Reality-Technologien in Kombination mit MC vor, um eine realitätsnahe Interaktion mit dem ereignisgesteuerten Simulationsmodell umzusetzen (Metzner et al., 2018).

Trotz positiver Resultate ist bei den beschriebenen Lösungen aufgrund der jeweiligen Systemarchitektur Optimierungsbedarf hinsichtlich der Flexibilität der Abbildung des menschlichen Verhaltens sowie des resultierenden Absicherungsaufwands vorhanden (Abb. 1). Busch et al. weisen die unzureichende Darstellung der menschlichen Variabilität sogar explizit als problematisch aus (Busch et al., 2013). Zwar können mit bestehenden Lösungsansätzen Standardvorgänge und deterministisches Verhalten abgesichert werden, doch ist die Absicherung vorhersehbarer Fehlgebrauch nur bedingt möglich. Fertigungsmitarbeiter werden nur eingeschränkt in den Planungs- und Absicherungsprozess einbezogen. Außerdem wurden in diesen Projekten spezielle, auf den Anwendungstypen zugeschnittene Programme für die Simulation der MRK entwickelt, womit diese nicht für den breiten Anwendungsbereich der MRK geeignet oder für Anwender im Unternehmen wirtschaftlich einzusetzen sind.

Legende

- Nicht zutreffend
- Vollständig zutreffend

	MRK-Fähigkeit	Vorhersehbarer Fehlgebrauch	Menschliches Variabilität	Mitarbeiterintegration	Mitarbeitertraining	Online-System
Kinematiksimulation	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Ergonomiesimulation mit Offline-Menschmodell	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Kinematiksimulation mit Offline-Menschmodell	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
rorarob (Standardbewegungen (Bibliothek) & inverse Kinematiktransformation)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
ToMM (Standardbewegungen (Bibliothek) & inverse Kinematiktransformation)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
INDIVA (MC-System ⇒ Transformation in CSV-Werte ⇒ Import in Simulation)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
Manuserv (MC-System ⇒ Transformation in BVH-Format ⇒ Import in Simulation)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
KOMPI (Standardbewegungen (ema) & ROS-Integration)	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>

Abbildung 1: Übersicht und Bewertung des Stands der Forschung zur Simulation hybrider Montagesysteme

3 Methode für die virtuelle Absicherung hybrider Montagesysteme

Aus den in Kapitel 2.2 aufgezeigten Forschungsprojekten ergeben sich Anforderungen an eine neue Methode für die VA von hybriden Systemen:

- MRK-Fähigkeit: Integration direkter Zusammenarbeit in die VA einschließlich normrelevantem menschlichen Verhalten
- Allgemeingültigkeit: Abdeckung breiter Anwendungsszenarien der MRK mit etablierter Industriesoftware
- Durchgängigkeit: Verwendung über den gesamten Lebenszyklus des Produktionssystems
- Effizienz: Wirtschaftliches Kosten-Nutzen-Verhältnis der Absicherung

3.1 Methodenübersicht

Die entwickelte Methodik umfasst, wie in Abb. 2 dargestellt, mehrere Phasen. In einem ersten Schritt werden die durch die Simulation zu erreichenden Ziele definiert und benötigte Daten im richtigen Format gesammelt. Diese werden zuerst für einen statischen Aufbau des Modells genutzt.

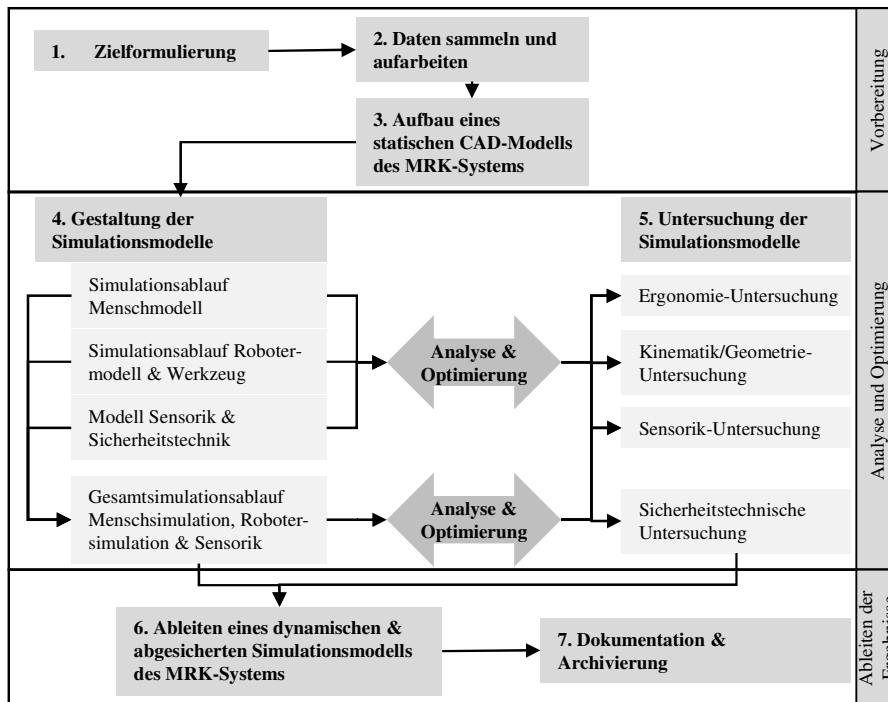


Abbildung 2: Vorgehensmodell zur virtuellen Absicherung von hybriden Montagesystemen

Anschließend folgt die Ausgestaltung der Simulationsmodelle. Diese werden iterativ untersucht und optimiert. Zuerst findet dabei eine reine Simulation des Menschen statt, um mittels Ergonomieanalysen das bestmögliche Arbeitsplatzlayout zu

ermitteln. Anschließend werden darauf basierend die roboterspezifischen Arbeitsinhalte simuliert und damit Endeffektoren, Platzierung und weitere relevante Aspekte optimiert. Nachdem Mensch und Roboter separat modelliert wurden, erfolgt im nächsten Schritt die vorläufige Definition von Sicherheitstechnik und Sensorik. In einem letzten Schritt wird ein Gesamtsimulationslauf durchgeführt, der die erwähnten Subsimulationsläufe der einzelnen Disziplinen integriert. Durch diese Simulation wird das Systemverhalten evaluiert und gegebenenfalls weiter optimiert. Die interdisziplinäre Co-Simulation setzt hierbei ein Simulationswerkzeug – oder eine Kombination mehrerer ebendieser – voraus, welche sowohl für Kinematik- und Robotercontrollersimulation, als auch Ergonomiesimulation sowie virtuelle Inbetriebnahme geeignet sind.

Nachdem eine anforderungsgerechte Funktionserfüllung erzielt ist, wird das simulierte Gesamtsystem für eine eventuelle Weiterverwendung oder Optimierung gesichert. Ergebnisse der Simulation können auch zu Dokumentationszwecken, beispielsweise im Rahmen einer Risikobeurteilung, genutzt werden.

3.2 Umsetzung

Zur Evaluierung der Simulationsmethoden für MRK-Anwendungen werden einzelne Studien der vier unterschiedlichen Arten der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter in der Simulationsumgebung Tecnomatix Process Simulate® durchgeführt und bewertet (vgl. Abb. 3). Das Simulationswerkzeug erlaubt dabei sowohl eine Abbildung des Roboterhaltens durch eine emulierte Steuerung als auch die Integration von Modulen zur Robotercontrollersimulation (RCS). Die Integration von DMM ist mittels deterministischer Programmierung oder MC möglich. Der Simulationslauf kann zeitbasiert oder ereignisgesteuert stattfinden, auch unter Verwendung realer Sicherheitssteuerelemente. Es werden Studien sowohl mit deterministisch programmiertem Menschverhalten als auch unter Verwendung eines MC-Systems durchgeführt. Als MC-System wird eine Microsoft Kinect v1 Tiefenkamera mit dem DMM Tecnomatix Jack® verknüpft.

Eine einfache Montageaufgabe, die aus der Verbindung zweier Einzelteile besteht, wird abgebildet. Der Roboter führt dabei grundsätzlich die Handhabung des schweren Basisteils aus, während der Mensch für das Fügen der zweiten Komponente verantwortlich ist.

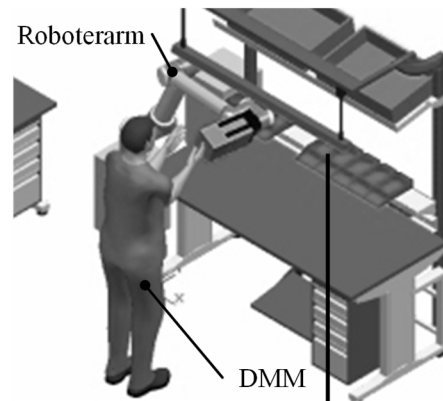


Abbildung 3: Simulative Abbildung einer kollaborativen Montage

4 Ergebnisse und Diskussion

Die umgesetzten Simulationsstudien unterscheiden sich anhand des notwendigen Modellierungsaufwands sowie des erzielbaren Informationsgehalts. Die Bewertung ist grundsätzlich für die vier Arten der Zusammenarbeit nach Bender et al. (2016) möglich. Die erzielbaren Erkenntnisse für die Ausprägung der Handführung nach DIN EN ISO 10218 - 1 sind jedoch massiv beschränkt, da in Ermangelung einer realistischen Abbildung der auftretenden Kräfte zwischen Mensch und Roboter weder eine sinnvolle Ergonomiebewertung noch eine Evaluation der Steuerungsfunktionalität möglich ist.

Für die Darstellung des menschlichen Verhaltens ergeben sich zwei Alternativen. Der beobachtete Unterschied beider Verfahren der Verhaltensmodellierung liegt in der Realitätstreue der virtuellen Abbildung menschlicher Bewegung. Die deterministische Programmierung stellt ein ideales Verhalten dar, weswegen die Abbildung von Abweichungen vom Soll-Vorgang nur unzureichend möglich ist. Die Ergebnisse der idealen Simulation sind für die prinzipielle Plausibilisierung sowie die Arbeitsplanung des Systems von Nutzen. Die so ermittelte ideale Taktzeit des hybriden Systems kann als Basis für Kapazitätskalkulationen sowie als Zielvorgabe für Optimierungsvorhaben dienen.

Die erwähnte Variabilität im menschlichen Verhalten lässt sich mittels MC-Integration virtuell abbilden und liefert weitere Erkenntnisse über den MRK-Vorgang. Durch Aussetzer im Tracking und Fehlinterpretationen der menschlichen Pose durch das verwendete System ist im vorliegenden Fall nur eine sehr eingeschränkte Evaluation möglich. Die Robustheit der Erkennung des Systems ist verbesserungsfähig, was jedoch in höherem Hardwareaufwand und somit Kosten resultiert. Neben einer Erhöhung der Realitätstreue der Ergonomiesimulation ist jedoch gerade hinsichtlich der kritischen Sicherheitsbetrachtung von MRK-Systemen eine Verbesserung möglich. Wesentlicher Bestandteil dieser Betrachtung ist die Durchführung einer Risikobeurteilung (DIN EN ISO12100:2011-03). Es gilt sowohl die „bestimmungsgemäße Verwendung“ als auch die „vorhersehbare Fehlanwendung“ zu berücksichtigen. Ersteres entspricht dem idealen Vorgang. Für die Darstellung von letzterem ist der Rückgriff auf MC-Systeme nötig.

Auch bezüglich der Integration von Fertigungspersonal in den Planungsprozess sowie zu Schulungszwecken unterscheiden sich beide Ansätze. Der Einsatz des MC-Systems ermöglicht eine direkte Einbindung der Werker in den Planungsprozess sowie eine Nutzung des Modells für virtuelle Schulungen.

Ein ähnlicher Zusammenhang lässt sich auch hinsichtlich des Einsatzes einer zeit- oder ereignisbasierten Simulation sowie der Robotersteuerung feststellen. Während die zeitbasierte Simulation für eine Taktzeitermittlung, Ergonomiebewertung und die Ermittlung von Kollisionszonen ausreicht, ist hierdurch eine Funktionsanalyse sicherheitsrelevanter Steuerungselemente nicht möglich. Dies wird durch den Einsatz von ereignisbasierter Simulation im Bereich der virtuellen Inbetriebnahme erreicht. Jedoch erfordert diese aufgrund der nötigen Verhaltensnachbildung aller beteiligten Komponenten einen höheren Modellierungsaufwand.

Auch die Modellierung des Roboterhaltens ist für eine realitätsnahe Absicherung als kritisch anzusehen. Vereinfachte Robotersimulationen imitieren das reale Verhalten ausreichend genau für die Beurteilung von Handhabungszeiten oder der Sicherstellung einer Erreichbarkeit. Die genaue Trajektorie des echten Roboters, gerade in extremen Situationen wie die Fahrt nahe einer Singularität, ist damit jedoch nicht abbildbar. Hierfür ist die Integration von RCS-Modulen möglich, resultiert jedoch zeitgleich in höheren Aufwänden.

Unter Beachtung der ausgeführten Erkenntnisse ergibt sich eine Einteilung der Absicherungsarten von MRK-Systemen in zwei Kategorien mit unterschiedlichen Anforderungen an die Simulation. Ist eine reine Planung des Systems zur Zeitermittlung, Ergonomiebewertung und Layoutoptimierung durchzuführen, ist eine zeitbasierte Simulation mit programmiertem menschlichen Verhalten und vereinfachter Robotersteuerung ausreichend und hinsichtlich des Aufwands empfehlenswert. Soll eine Risikoanalyse oder eine virtuelle Inbetriebnahme des Systems durchgeführt werden, sind die approximierten Abbildungen von Mensch und Roboter nicht mehr ausreichend. Hier wird eine ereignisbasierte Simulation unter Nutzung von MC-Systemen und RCS-Modulen sinnvoll. Da dies eine Erweiterung des einfachen Modells darstellt, ist eine iterative Verfeinerung des Modells entsprechend der vorgestellten Methodik naheliegend.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Simulation von MRK-Systemen bietet das Potenzial einer detaillierten Planung und schnellen Umsetzung dieser Systeme. Im Stand der Forschung und Technik herrschen vor allem Verfahren der deterministisch programmierten Simulation von Mensch und Roboter vor.

Ein methodisches Konzept zur Simulation von MRK-Anwendungen mittels Ergonomie- und Robotersimulationstools wird vorgestellt. Die iterative Simulation der Einzelbestandteile Mensch, Roboter und Steuerung wird dabei durch eine multidisziplinäre Gesamtsimulation integriert. Hierbei ist sowohl eine Abbildung des menschlichen Verhaltens durch deterministische Programmierung für die ergonomische Optimierung sowie die Arbeitsplanung, als auch eine Integration eines MC-Systems für eine realistische Verhaltensabbildung, beispielsweise für Risikoanalysen vorgesehen. Mit der Steigerung der Realitätstreue der Simulation

kann eine Erhöhung des Modellierungsaufwands beobachtet werden. Daher wird eine schrittweise Modellanreicherung je nach Absicherungsziel vorgeschlagen.

Gerade für die Einbindung des menschlichen Verhaltens fällt ein hoher Aufwand für den Aufbau eines robusten MC-Systems an. Technologien aus der Spieleindustrie bieten hier die Möglichkeit einer kostengünstigen Alternative, die in diesem Zusammenhang evaluiert werden sollte. Der hohe Modellierungsaufwand einer ereignisgesteuerten Simulation resultiert aus der Verhaltensmodellierung der beteiligten Sensoren und Aktoren. Eine massive Aufwandsreduzierung der Simulation ist möglich, wenn zu etablierten Komponenten für die MRK bereits derartig spezifische Modelle bereitgestellt würden. Letztlich ist auch eine höhere Akzeptanz simulierter Ergebnisse bei der Risikobeurteilung notwendig, um den Simulationsaufwand letztlich zu rechtfertigen. Die Durchführung realer Feldstudien stellt hierzu einen wichtigen Schritt dar.

Literatur

- Bender, M.; Braun, M.; Rally, P.; Scholtz, O.; Bauer, W. (Hrsg.): Leichtbauroboter in der manuellen Montage - einfach anfangen: Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen. Stuttgart: Fraunhofer IAO 2016.
- Bönig, J.; Fischer, C.; Brossog, M.; Bittner, M.; Fuchs, M.; Weckend, H.; Franke, J.: Virtual Validation of the Manual Assembly of a Power Electronic Unit via Motion Capturing Connected with a Simulation Tool Using a Human Model. In: Abramovici, M.; Stark, R. (Hrsg.): Smart Product Engineering: Proceedings of the 23rd CIRP Design Conference, Bochum, Germany, 11 - 13 March 2013. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 463–472.
- Bonin, D.; Stankiewicz, L.; Thomas, C.; Deuse, J.; Kuhlenkötter, B.; Wischniewski, S.: Digital Assessment of Anthropometric and Kinematic Parameters for the Individualization of Direct Human-Robot Collaborations. In: D'Apuzzo, N. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on 3D Body Scanning Technologies, Lugano (Switzerland), 30 Nov. - 1 Dec. 2016, S. 171–181.
- Busch, F.; Deuse, J.: rorarob - Schweißaufgabenassistenz für Rohr- und Rahmenkonstruktionen durch ein Robotersystem - Teilvorhaben: Ergonomische, arbeitsorganisatorische und sicherheitstechnische Gestaltung der Fertigungs- und Anlagenkonzepte. Unter Mitarbeit von Technische Universität Dortmund. Projektschlussbericht Technische Universität Dortmund, Institut für Produktionssysteme, 2014.
- Busch, F.; Wischniewski, S.; Deuse, J.: Application of a character animation SDK to design ergonomic human-robot-collaboration. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Digital Human Modeling (DHM), Ann Arbor (USA), 11-13 June 2013, S. 1–7.
- Deutsches Institut für Normung; EN; International Standardization Organization DIN EN ISO 12100:2011-03, Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsgrundsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung; Deutsche Fassung EN_ISO_12100:2010. Berlin: Beuth 2011.
- Deutsches Institut für Normung; EN; International Standardization Organization DIN EN ISO 10218 - 1: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter. Berlin: Beuth 2012.

- Deutsches Institut für Normung; International Standardization Organization
DIN ISO/TS 15066: Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter.
Berlin: Beuth 2017.
- Domingo, R.F.: Virtuelle Absicherung manueller Fahrzeugmontagevorgänge mittels
digitalem 3-D-Menschmodell-Optimierung der Mensch-Computer-Interaktion,
Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation,
2010.
- Glogowski, P.; Lemmerz, K.; Schulte, L.; Barthelmey, A.; Hypki, A.; Kuhlenkötter,
B.; Deuse, J.: Task-Based Simulation Tool for Human-Robot Collaboration within
Assembly Systems. In: Schüppstuhl, T.; Tracht, K.; Franke, J. (Hrsg.):
Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter. Berlin;
Springer Vieweg 2018, S. 151–159.
- Heinze, F.; Klöckner, M.; Wantia, N.; Rossmann, J.; Kuhlenkötter, B.; Deuse, J.:
Combining Planning and Simulation to Create Human Robot Cooperative
Processes with Industrial Service Robots. *Applied Mechanics and Materials* 840
2016, S. 91–98.
- Lemmerz, K.; Glogowski, P.; Hypki, A.; Kuhlenkötter, B., 2018: Functional
Integration of a Robotics Software Framework into a Human Simulation System.
50th International Symposium on Robotics (ISR), 19 - 22 June 2018.
- Lotter, B.; Wiendahl, H.-P.: Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch
für die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer 2012.
- Metzner, M.: Flexible Automatisierung in der Elektronikmontage mithilfe von MRK-
Systemen. In: Franke (Hrsg.): Handbuch Mensch-Roboter-Kollaboration.
München: Hanser 2018, S. 377–385.
- Metzner, M.; Bönig, J.; Blank, A.; Schäffer, E.; Franke, J.: “Human-In-The-Loop”-
Virtual Commissioning of Human-Robot Collaboration Systems. In: Schüppstuhl,
T.; Tracht, K.; Franke, J. (Hrsg.): Tagungsband des 3. Kongresses Montage
Handhabung Industrieroboter. Berlin; Springer Vieweg 2018, S. 131–138.
- Ore, F.: Human- industrial robot collaboration: Simulation, visualisation and
optimisation of future assembly workstations, Mälardalen University,
Dissertation, 2015.
- Ore, F.; Hanson, L.; Delfs, N.; Wiktorsson, M.: Virtual evaluation of industrial
human-robot cooperation: An automotive case study. In: 3rd International Digital
Human Modeling Symposium (DHM2014), May 20-22, Odaiba (Japan), 2014,
- Schönherr, R.: Simulationsbasierte Absicherung der Ergonomie mit Hilfe digital
beschriebener menschlicher Bewegungen, Technische Universität Chemnitz,
Dissertation, 2014.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V. VDI 3633 Blatt 8: Simulation von Logistik-,
Materialfluss- und Produktionssystemen - Maschinennahe Simulation. Berlin:
Beuth 2007.