

Simulations- und VR-basierte Steuerungsverifikation zellularer Intralogistiksysteme

Simulation and VR based verification
of control architectures for cellular facility logistics systems.

Juergen Rossmann¹
Michael ten Hompel²
Kevin Eilers³

¹Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI), RWTH Aachen

²Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Dortmund

³RIF Institut für Forschung und Transfer e.V., Dortmund

Kurzbeschreibung: Die hohe Komplexität zellularer Intralogistischer Systeme und deren Steuerungsarchitektur legt die Verwendung moderner Simulations- und Visualisierungstechniken nahe, um schon im Vorfeld Aussagen über die Leistungsfähigkeit und Zukunftssicherheit eines geplanten Systems treffen zu können. In dieser Arbeit wird ein Konzept für ein Simulationssystem zur VR-basierten Steuerungsverifikation zellularer Intralogistiksysteme vorgestellt. Beschrieben wird die Erstellung eines Simulationsmodells für eine real existierende Anlage und es wird ein Überblick über die Bestandteile der Simulation, insbesondere die Anbindung der Steuerung des realen agentenbasierten Systems, gegeben.

[Schlüsselwörter: Intralogistik, Simulation, VR, Steuerungsverifikation, Steuerungsanbindung]

Abstract: The complexity of cellular facility logistics systems and their control architectures suggests the usage of modern simulation and VR-techniques to evaluate a system's performance and its guaranteed future beforehand. In this paper, we present a concept for a simulation system for the VR-based verification of control architectures of cellular facility logistics systems. We describe the creation of a simulation model and give an overview over the constituents of the simulation, especially the coupling of the real control architecture of the agent based system to the simulation.

[Keywords: Facility Logistics, Simulation, VR, Verification of control architectures, Coupling of control architectures]

1 EINLEITUNG

Die wachsende Bedeutung zellularer Fördertechnik mit autonomen Fahrzeugen und agentenbasierten Steuerungen erfordert neue Methoden und Hilfsmittel zur Planung und zum Entwurf derartiger intralogistischer Systeme.

Dies gilt für den gesamten Lebenszeitzyklus, von der ersten Inbetriebnahme bis zur antizipativen Veränderungsplanung. Dabei spielen nicht nur das physische Layout und die Dimensionierung der Anlage eine Rolle, sondern auch die Wahl einer geeigneten Steuerungsstrategie und die resultierende Interaktion zwischen den autonomen Steuerungsentitäten und ihrer Umgebung.

In dieser Arbeit wird ein Konzept vorgestellt, intralogistische Systeme mit Hilfe moderner Simulationstechnik nachzubilden, deren Steuerungssystem zu verifizieren und mit interaktiven VR-Techniken zu visualisieren.

Das Referenzmodell der Simulation entspricht einer existierenden Anlage, deren virtuelles Abbild auf Basis von Laserscan-Daten der realen Umgebung erstellt wurde. Die Steuerung wird über die vorhandenen Schnittstellen an das Simulationssystem angeschlossen. Das Verhalten des Zellularen Transportsystems wird so emuliert.

2 STAND DER TECHNIK

Es existieren einige Arbeiten, die sich mit Teilaspekten dieses Papers beschäftigen, aber keine, die den Bogen von der Steuerungsanbindung über die echtzeitfähige Simulation bis hin zur virtuellen Realität spannen. Die im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1083 „Intelligente Softwareagenten und betriebswirtschaftliche Anwendungsszenarien“ entstandenen Publikationen befassen sich mit dem Thema Modellierung und Simulation, lassen aber den Aspekt der Virtuellen Realität außer Acht [GLR01, Raf05, RW01, RF07].

[GtHt10, GT11 und GtHt12] beschreiben eine dynamisch-kinematische Simulation von Fahrzeugen inklusive ihrer Sensoren. Die Simulation ist allerdings nicht auf Echtzeitfähigkeit zur Verwendung mit VR-Techniken ausgelegt.

[CMB07] beschreibt eine Reihe kommerziell verfügbarer Systeme, deren Schwerpunkt aber ebenfalls nicht auf der Echtzeitfähigkeit oder einer VR-Anbindung liegt, sondern einer dynamischen Simulation der Fahrzeuge, die aufgrund ihrer Rechenintensität nicht für diese Anwendungszwecke geeignet ist.

Im Schnittbereich VR und Intralogistik finden sich die Arbeiten [PBW98] und [SRH04], die sich mit Interaktionstechniken und Metaphern befassen. Veröffentlichungen, deren Fokus auf speziell für den Bereich Leistungsverfügbarkeit [VDI12] entwickelten Metaphern liegt, existieren nicht.

3 DAS REALE REFERENZSYSTEM

Als reales Referenzsystem wurde ein zellulares intralogistisches System des Fraunhofer-Instituts für Materialfluss und Logistik (IML) in Dortmund ausgewählt. Die 17 x 58 m lange Halle beinhaltet ein fünf Ebenen hohes Regallager mit einer Kapazität von 520 Behältern, welches von autonom agierenden Fahrzeugen bedient wird. Das Regal verfügt über drei Ein- bzw. Ausgänge. Zwei Fahrzeugheber an den beiden Enden transportieren die Fahrzeuge auf die verschiedenen Ebenen. Gegenüber dem Regal befinden sich sieben Kommissionierstationen und eine Roboterzelle mit einem Depalettierroboter. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen einen Übersichtsplan der Halle und eine Innenaufnahme.

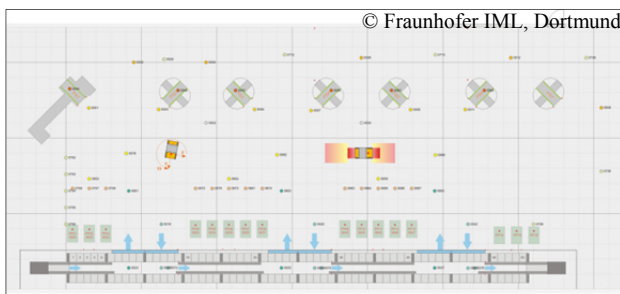


Abbildung 1. Layout des realen Referenzsystems.

Die Fahrzeuge sind mit Differentialantrieben ausgestattet. Zwei Laserscanner mit einem Blickfeld von jeweils 180° an den beiden Enden der Fahrzeuge sind Bestandteil des Lokalisierungssystems und der Kollisionsvermeidung und bilden zudem das letzte Glied im Sicherheitssystem, indem sie einen Nothalt des Fahrzeugs auslösen, sollte sich ein Hindernis zu nah in ihrem Sichtfeld befinden [KSNT11].

Die Positionsbestimmung erfolgt mit einer Kombination von Odometrie und den von den Lasersensoren ermittelten Daten. Insbesondere Regaleinfahrten und Kommissionierstationen können aufgrund ihrer Markierung mit speziellen Reflektoren erkannt werden und die Genauigkeit der per Odometrie ermittelten Position erhöhen.

Die Fahrzeuge transportieren jeweils einen Behälter, der mit Hilfe des Lastaufnahmemittels auf der rechten oder linken Seite aufgenommen bzw. abgelegt werden kann.



Abbildung 2. Foto des realen Referenzsystems.

Softwareseitig ist das System in drei Ebenen aufgeteilt: An oberster Stelle steht ein Warehouse-Management-System, welches Aufträge generiert. Diese Aufträge werden an das darunter liegende Agentensystem weitergereicht. Die einzelnen Fahrzeugagenten bieten mit ihren Ressourcen auf diese Aufträge. Nach erfolgter Auftragszuteilung werden Zielpositionen generiert und an die dritte Ebene – die Fahrzeuge selber – übermittelt. Die Fahrzeuge bewegen sich dann autonom auf dem Hallenboden und im Regal zu den jeweiligen Zielpositionen. Die Kollisionsvermeidung wird dabei durch eine Kombination aus vorausschauender Planung und den Daten der Laserscanner realisiert.

Die Kommunikation zwischen den Ebenen wird über TCP/IP-basierte Protokolle abgewickelt.

4 DAS SIMULATIONSSYSTEM

Für die Simulation des Referenzsystems wurde eine eigenentwickelte Simulationssoftware ausgewählt. Die Simulationssoftware ist ein zeitdiskretes Simulations- und Visualisierungswerkzeug, das bereits in zahlreichen Forschungsprojekten verwendet wurde und wird.

Aufgrund seiner modulbasierten Architektur ist es vielseitig einsetzbar und kann an unterschiedliche Szenarien angepasst werden. Verbindungen zu anderen Systemen können über verschiedene Schnittstellen, unter anderem auch TCP/IP [RRJG11], realisiert werden. Somit ist es möglich, eine vorhandene Steuerung an das Simulationssystem anzukoppeln und reale Komponenten durch ihre virtuellen Repräsentationen zu ersetzen.

Die interne Skriptsprache, die es ermöglicht, einzelne Komponenten mit Funktionalität auszustatten, basiert auf Petri-Netzen und ist daher geeignet, nebenläufige Prozes-

se abzubilden [Schl02]. Durch Kombination dieser Petri-Netze untereinander und über simulierte elektrische Verbindungen mit Hilfe des integrierten E/A-Frameworks [RSSER12] lassen sich komplexe Systeme und Abläufe übersichtlich und intuitiv modellieren.

Des Weiteren existieren Schnittstellen zu diversen Eingabegeräten, die eine Interaktion mit der Simulation erlauben. Kombiniert mit der Möglichkeit, die Simulation in einer VR-Umgebung auszuführen, ergeben sich zahlreiche Möglichkeiten, Simulationsergebnisse intuitiv zu visualisieren, innere, gewöhnlich nicht sichtbare Zustände des simulierten Systems mit Hilfe von Metaphern sichtbar zu machen und interaktiv in das Geschehen einzugreifen.

5 BESTANDTEILE DES SIMULATIONSMODELLS

Das Simulationsmodell des Logistiksystems setzt sich aus drei Teilen zusammen:

1. Der Geometrie zur Abbildung der physikalischen Ausmaße der Halle, der Fahrzeuge und aller anderen Komponenten.
2. Der Funktionalität der einzelnen Komponenten, in diesem Fall bestehend aus den Antrieben der Fahrzeuge und der Fahrzeugheber, dem Lastaufnahmemittel der Fahrzeuge, der Roboterzelle und den Sensoren sowie deren Kommunikation untereinander.
3. Einer Schnittstelle nach Außen, über welche die reale Steuerung angekoppelt werden kann.

Um ein möglichst genaues und realistisches geometrisches Modell erstellen zu können, wurde die Halle mittels eines Laserscanners vermessen. Abbildung 3 zeigt exemplarisch eine resultierende Punktwolke aus einem der Scans. Auf Basis dieser Daten wurden detaillierte Polygonmodelle erstellt (Abbildung 4), welche sich, genauso wie die aus dem Laserscan entstandenen Punktwolken, in dem Simulationssystem darstellen lassen (vgl. Abbildung 6).



Abbildung 3. Punktwolke aus dem Laserscan.

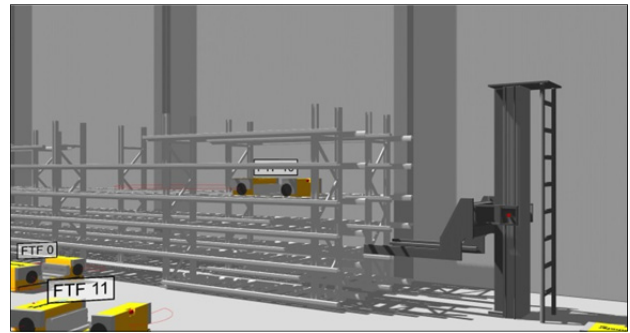


Abbildung 4. Aus Laserscan-Daten erstelltes Polygonmodell.

Im Weiteren wurden die Freiheitsgrade der beweglichen Bestandteile des Systems modelliert und in die erstellten Polygonmodelle integriert. Sowohl der Differentialantrieb der Fahrzeuge als auch der Antrieb für die Fahrt im Hochregal wurden kinematisch modelliert und mit den realen Parametern (Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigung, Radstand etc.) versehen. Die Antriebe selbst werden über PID-Regler gesteuert. Sämtliche beweglichen Komponenten des Fahrzeugs sind in Abbildung 5 zu sehen. Die vier Räder an den Außenseiten des Fahrzeugs sind für die Fahrt im Regal bestimmt, über zwei weitere Räder an der Unterseite des Fahrzeugs (linke Bildhälfte) erfolgt die Bewegung am Boden. Das mittig unter dem Heck angebrachte Rad (rechte Bildhälfte) ist passiv und wird je nach Fahrtrichtung und Geschwindigkeit gedreht. Das Lastaufnahmemittel in seinem ausgefahrenen Zustand ist in der oberen Bildhälfte zu sehen.

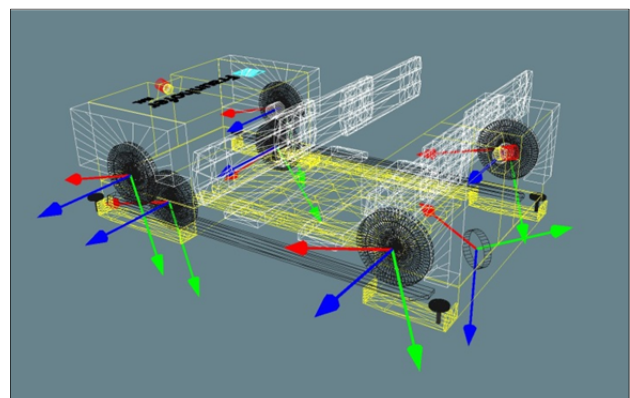


Abbildung 5. Bewegliche Komponenten der Fahrzeuge.

Die Steuerung ist für das Anfahren von Positionen, das Durchführen von Aktionen (Behälter greifen, Kommunikation mit den Fahrzeughebern) und die Reaktion auf die Daten der Laserscanner zuständig. Sie wurde, genauso wie die Antriebe selbst, mit Hilfe der im vorigen Abschnitt vorgestellten Petri-Netz-basierten Skriptsprache realisiert. Die Kommunikation zwischen Steuerung, PID-Regler und Antrieb wird mittels E/A-Netzwerken modelliert.

Parallel zu den Petri-Netzen für die Steuerung und die Antriebe wurde ein weiteres Netz konzipiert, welches

permanent die Laserscanner überwacht und bei der Detektion eines Objekts im Scanbereich die Fahrgeschwindigkeit reduziert und ggf. einen Nothalt auslöst. Da dieses Netz parallel zu den anderen Netzen ausgeführt wird, kann es nicht durch einen Fehler in einem der anderen Teile der Steuerungsarchitektur abgeschaltet oder außer Kraft gesetzt werden und garantiert somit eine hohe Ausfallsicherheit.

Für die Positionsbestimmung wird momentan noch die dem Simulationssystem bekannte, exakte Position verwendet. Als Modellerweiterung ist auch denkbar, diese Position über ein geeignetes, statistisches Fehlermodell der realen, fehlerbehafteten Positionsbestimmung anzupassen oder aber ein auf den Lasersensoren basierendes System ähnlich dem realen zu verwirklichen.

Ein Großteil der Objekte innerhalb der Simulation ist zudem mit einer eigenen Intelligenz ausgestattet und in der Lage, Daten über den eigenen Zustand zu erheben. In den Kommissionierstationen wird registriert, wie stark ihre Auslastung ist und wie lange sie auf neue Aufträge in Form von angelieferten Behältern warten müssen. Behälter selbst ermitteln ihre Umlaufzeit und die Zeit, die von der Erstellung eines Transportauftrags bis zur Ausführung vergeht. Die Fahrzeuge akkumulieren ebenfalls die Wartezeiten, die durch die Kollisionsvermeidung, Staus an neuralgischen Punkten des Verkehrsnetzes, leere Batterien und technische Probleme entstehen. Am Ende eines Simulationsdurchgangs steht somit eine ganze Reihe von Daten zur Verfügung, mittels derer sich Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Systems treffen lassen.

Um die Flexibilität des Systems zu testen, ist es möglich, an beliebigen Stellen in das Simulationsgeschehen einzugreifen. So können z.B. Fehlermodelle auf die Lasersensoren aufgeschaltet werden, statistische Fehler bei der Positionsbestimmung mit einbezogen werden oder technische Defekte von einer Schwankung der Beschleunigung bis hin zum Totalausfall einzelner Komponenten erzwungen werden.

6 VIRTUELLE REALITÄT

Die Präsentation eines Intralogistiksystems in der VR bietet zahlreiche Vorteile. Zum einen können Aufbau und Funktionsweise des Systems intuitiv erfasst werden, wodurch die Kommunikation zwischen beteiligten Personen und Geschäftspartnern erheblich erleichtert wird. Zum anderen ist es möglich, interne, nicht offen einsehbare Zustände, sichtbar zu machen, was insbesondere die Planung eines komplexen Systems vereinfacht. Hierzu gehören die Sichtfelder der Laserscanner, der Batterieladestand der Fahrzeuge, Wartezeiten der einzelnen Komponenten oder auch physikalische Daten wie die aktuelle Geschwindigkeit der Fahrzeuge, der Füllstand oder das Gewicht einzelner Behälter etc.

Des Weiteren bietet die Echtzeitdarstellung des Simulationsgeschehens in der virtuellen Realität dem Benutzer die Möglichkeit, mit der Simulation zu interagieren und somit bestimmte Bestandteile der Steuerung auf ihre Praxistauglichkeit zu überprüfen. So ist es möglich, die Reaktionen der Fahrzeuge auf plötzlich auftauchende Hindernisse zu kontrollieren, oder die Motorparameter zu verändern, um die Reaktion der Steuerung darauf zu testen.

Damit eine solche Präsentation in der VR möglichst intuitiv erfahrbar ist, kommen sogenannte Metaphern zum Einsatz, um nicht sichtbare Daten zu visualisieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden spezielle Metaphern entwickelt, von denen einige in Abbildung 6 zu sehen sind. So wird die nächste Zielposition eines FTF zusammen mit zugehörigen Informationen visualisiert. Zu diesen Informationen zählt die am Zielort auszuführende Aktion, wie z.B. das Aufnehmen oder Ablegen eines Behälters oder das Absenden eines Bewegungsbefehls an den Fahrzeugheber im Lager. Ferner wird am Zielort visualisiert, in welchem Umkreis die Position als erreicht gilt. Weitere Metaphern sind die Darstellung der Sichtfelder der Laserscanner und der Silhouette detektierter Objekte.

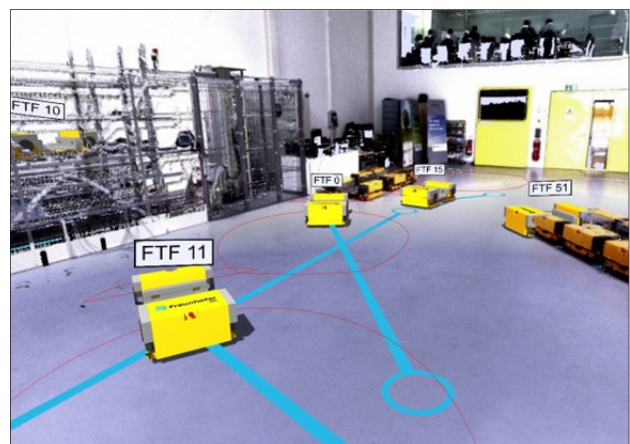


Abbildung 6. Metaphern zur Visualisierung nicht sichtbarer Daten und Zustände.

Daten, die einen Einfluss auf die technische Verfügbarkeit haben, wie die aktuelle Motorenleistung oder Batteriekapazität, können mit beliebigem Detaillierungsgrad – in Form von Symbolen, die eine Störung repräsentieren, bis hin zu den tatsächlichen Zahlen – eingeblendet werden.

Auch Daten, die einen Einfluss auf die Leistungsverfügbarkeit des Gesamtsystems haben, wie die Umlauf- und Wartezeiten der Behälter, können detailliert direkt in der VR-Umgebung dargestellt werden.

7 STEUERUNGSANBINDUNG

Damit einerseits eine möglichst realitätsnahe Simulation durchgeführt werden kann und andererseits Aussagen über die gewählte Steuerungsarchitektur und -strategie getroffen werden können, ist es sinnvoll, die reale Steuerung an das Simulationssystem anzukoppeln.

Das Simulationssystem bietet bereits eine TCP/IP-Schnittstelle an, die für diesen Zweck genutzt werden kann. Das reale System stellt ebenfalls zwischen den verschiedenen Ebenen der Steuerungsarchitektur auf dem gleichen Netzwerkprotokoll basierende Schnittstellen bereit. Eine Verbindung der beiden Systeme kann über eine der Schnittstellen erfolgen.

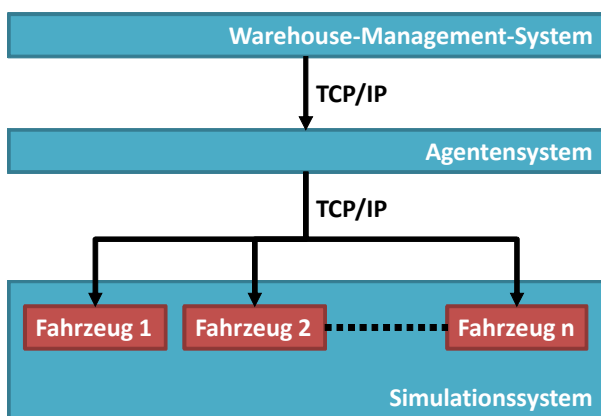


Abbildung 7. Die verschiedenen Ebenen des vollständigen Systems.

Würde man das Simulationssystem an die Schnittstelle zwischen Warehouse-Management-System und Agentensystem anbinden, wäre es notwendig, im Simulationssystem das gesamte Agentensystem nachzubilden. Vom Ressourcenaufwand für die Reimplementierung eines vorhandenen Systems abgesehen, ist es unwahrscheinlich, dass somit eine exakte Nachbildung der realen Funktionalität erreicht werden könnte. Mit der Simulation könnten bei dieser Anbindung also nur Aussagen über das Warehouse-Management-System und sämtliche im Simulationssystem erstellten Komponenten getroffen werden, jedoch nicht über das reale Agentensystem. Von daher erscheint es sinnvoller, das Simulationssystem an die niedrigste verfügbare Schnittstelle des realen Systems anzukoppeln, was in diesem Fall die Schnittstelle zwischen dem Agentensystem und den einzelnen Fahrzeugen ist.

Das Agentensystem kommuniziert über eine bidirektionale TCP/IP-Verbindung mit den einzelnen Fahrzeugen. Dabei hat jedes Fahrzeug seine eigene Hardware und somit seine eigene IP-Adresse. Da das Simulationssystem den gesamten Fahrzeugpark auf einer Maschine simuliert, werden der vorhandenen Netzwerkkarte mehrere IP-Adressen zugewiesen. Jedem virtuellen Fahrzeug wird wiederum eine dieser IP-Adressen zugeordnet, die ausschließlich von einer auf jedem Fahrzeug ausgeführten

Clientanwendung verwendet wird. Dieser Client baut eine Verbindung zu dem Agentensystem auf.

Damit eine sinnvolle Kommunikation zwischen dem Agentensystem und den virtuellen Fahrzeugen stattfinden kann, wird die fahrzeugseitige Schnittstelle des realen Systems exakt nachgebildet. Nach einem erfolgreichen Handshake zwischen den beiden Systemen stellen sich die virtuellen Fahrzeuge für das Agentensystem dar, als wären sie real.

Die Nachrichten und Kommandos, die vom Agentensystem über diese Schnittstelle an das (virtuelle) Fahrzeug gesendet werden lassen sich in folgende Klassen gliedern:

1. Initialisierungsnachrichten, die beim Start des Systems oder dem Aktivieren eines Fahrzeugs gesendet werden.
2. Statusanfragen, die alle 200 ms den aktuellen Zustand und die aktuelle Position der Fahrzeuge anfordern.
3. Fahrbefehle, die Ziele in der Ebene oder dem Regal inklusive Parametern wie Anfahrgeschwindigkeit, Toleranzbereich, durchzuführen-ende Aktion etc. in die Warteschlangen der Fahrzeuge schreiben, sowie Kommandos, einen aktuellen Fahrbefehl abzubrechen.
4. Befehle zum Ändern des Fahrzeugverhaltens (Höchstgeschwindigkeit, Ausweichverhalten).
5. Befehle zum Aktivieren und Ändern der Fahrzeugbeleuchtung.
6. Weitere Befehle zu Debugging- und Servicezwecken.

Das Fahrzeug kann über folgende Nachrichten Kontakt zum Agentensystem aufnehmen:

1. Nachrichten zum Anmelden am System.
2. Antwort auf die regelmäßigen Statusanfragen vom System.
3. Fehlermeldungen.

Die Nachrichten werden zusammen mit den relevanten Parametern über ein String-basiertes Protokoll über die TCP/IP-Schnittstelle versandt. Im Simulationssystem werden, wie bei den realen Fahrzeugen auch, diese Strings bei Empfang ausgewertet und in eine interne Repräsentation übersetzt, die über das integrierte E/A-Netzwerk an die einzelnen Fahrzeug-Agenten übermittelt wird. Dort wird entsprechend der empfangenen Befehle das Fahrzeugverhalten angepasst.

Die Kommunikation vom Simulationssystem zum Agentensystem funktioniert analog: Die Fahrzeuge bereiten eine Nachricht vor, die über E/A-Verbindungen an die Clientanwendung übermittelt wird, wo eine String-

Repräsentation der Nachricht erstellt und über die Netzwerkschnittstelle an das Agentensystem versendet wird.

8 ERGEBNISSE UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde ein Konzept zur Simulation zellulärer Intralogistiksysteme vorgestellt, welches die Ankopplung realer Steuerungskomponenten und die Verwendung mit VR-Techniken erlaubt. Die Implementierung des Konzepts ist noch nicht vollständig abgeschlossen. Die Antriebe der Fahrzeuge sowie deren Steuerung und ein Kollisionsvermeidungs- und Ausweichverhalten sind realisiert. Eine Teilmenge der präsentierten Metaphern sowie Interaktionsmöglichkeiten mit der Simulation, wie die manuelle Steuerung einzelner Fahrzeuge, wurden integriert. Der Entwurf weiterer geeigneter Visualisierungs- und Interaktionsmetaphern ist geplant.

Wie schon in Abschnitt 5 erwähnt, sind die Verwendung eines geeigneten Fehlermodells und die Integration der Lasersensoren zum Zwecke der Positionsbestimmung wünschenswert. Die dafür notwendigen Algorithmen und Schnittstellen sind im Simulationssystem schon vorhanden [RSES10] und müssen noch an den neuen Einsatzzweck angepasst werden.

Nach Fertigstellung der Schnittstelle zum Agentensystem kann mit der Integration der beiden Systeme begonnen werden, um erste Simulationsläufe durchzuführen und mit dem realen System zu vergleichen.

Später können auf Basis des entwickelten Systems im Rahmen der antizipativen Veränderungsplanung Simulationsläufe mit veränderten Parametern oder gar anderen Hallenlayouts durchgespielt werden, um Engpässe und Optimierungspotenziale zu ermitteln.

9 DANKSAGUNG

Teile dieser Veröffentlichung entstanden im Rahmen des Forschungsvorhabens „Simulation zellulärer Intralogistiksysteme zur Analyse der Leistungsverfügbarkeit in der Virtuellen Realität“, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter dem Geschäftszeichen RO 4064/1-1 gefördert wird.

LITERATUR

- [GLR01] Günther, H.-O.; Lehmann, M.; Raffel, W.-U.; Wagner, G.: *Modellierung und Simulation von Fahrerlosen Transportsystemen als Multiagentensysteme*. 4. Kolloquium „SPP Agenten“, FU Berlin, Oktober 2001.
- [Raf05] Raffel, W.-U.: *Agentenbasierte Simulation als Verfeinerung der Diskreten Ereignis-Simulation unter besonderer Berücksichtigung des Beispiels Fahrerloser Transportsysteme*. Dissertation, FU Berlin, Institut für Informatik, März 2005.
- [RW01] Raffel, W.-U.; Wagner, G.: *Agentenorientierte Modellierung von Fahrerlosen Transportsystemen*. Technical Report B 01 05, FU Berlin, Institut für Informatik, Juli 2001.
- [RF07] Roidl, M.; Follert, G.: *Simulation von multiagentenbasierten Materialflusssteuerungen*. Informatik 2007 – Informatik trifft Logistik. Beiträge der 37. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), Proceedings 109, Band 1, Bremen, 24.-27. September 2007.
- [GtHt10] Günthner, W. A.; ten Hompel, M.; Tenerowicz, P.; Büchter, H.: *Auf dem Weg zur zellularen Fördertechnik – Fördern im Schwarm*. Hebezeuge und Fördermittel, S. 78-79, Ausgabe 3, 2010.
- [GT11] Günthner, W. A.; Tenerowicz, P.: *Modularisierung und Dezentralisierung in der Intralogistik – Auf dem Weg zur zellularen Fördertechnik*. Industrie Management, S. 25-29, Ausgabe 1/2011.
- [CMB07] Craighead J.; Murphy R.; Burke J.; Goldiez, B.: *A Survey of Commercial & Open Source Unmanned Vehicle Simulators*. Proceedings of the Int. Conf. On Robotics and Automation (ICRA); S. 852-857, Rom, Italien, April 2007.
- [PBW98] Poupyrev, I.; Billinghurst, M.; Weghorst, S.; Ischikawa, T.: *Egocentric object manipulation in virtual environments: Empirical evaluation of interaction techniques*. Computer Graphics Forum, Jahrgang 17, Band 3, S. 41-52, 1998.

- [SRH04] Steinicke, F.; Ropinski, T.; Hinrichs, K. H.: *Selektion von Objekten in Virtuellen Umgebungen mit der Improved Virtual Pointer Metapher*. Tagungsband zum 1. Workshop Virtuelle und Erweiterte Realität der GI-Fachgruppe VR/AR, S. 59-67, Chemnitz, 27.-28. September 2004.
- [VDI12] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI): *Zuverlässigkeit in der Intralogistik – Leistungsverfügbarkeit*. VDI-Richtlinie 4486, März 2012.
- [GtHt12] Günthner, W. A.; ten Hompel, M.; Tenerowicz-Wirth, P.; Büchter, H.; Schippl, M.: *Forschungsbericht - Algorithmen und Kommunikationssysteme für die Zellulare Fördertechnik*. München, Dortmund, 2012.
- [KSNtH11] Kamagaew, A.; Stenzel, J.; Nettsträter, A.; ten Hompel, M.: *Concept of cellular transport systems in facility logistics*. Proceedings of ICARA 2011, 5th IEEE Int. Conf. on Automation, Robotics and Applications, S. 40-45. Wellington, Neuseeland, 6.-8. Dez. 2011.
- [Schl02] Schluse, M.: *Zustandsorientierte Modellierung in Virtueller Realität und Kollisionsvermeidung*. Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 968, 2002.
- [RRJG11] Roßmann, J.; Rast, M.; Jung, T.; Guiffo Kaigom, E.: *Modellierung und Synchronisation von Simulationsaufgaben für Virtuelle Testbeds*. In: Gausemeier, Grafe, Meyer auf der Heide (Hrsg.): *Wissenschaftsforum Intelligente Technische Systeme*, 10. Paderborner Workshop Augmented & Virtual Reality in der Produktentstehung, Heinz Nixdorf Institut, Universität Paderborn, Bd. 295, pp. 145-156, 19.-20. Mai 2011.
- [RSSER12] Roßmann, J.; Schluse, M.; Sondermann, B.; Emde, M.; Rast, M.: *Advanced Mobile Robot Engineering with Virtual Testbeds*. Proceedings of the ROBOTIK 2012, 7th German Conf. on Robotics, München, S. 331-336, VDE Verlag Berlin, 21.-22. Mai 2012.
- [RSES10] Roßmann, J.; Schlette, C.; Emde, M.; Sondermann, B.: *Discussion of a Self-Localization and Navigation Unit for Mobile Robots in Extraterrestrial Environments*, Proc. of 10th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (iSAIRAS), Sapporo, Japan, 2010.
-
- Prof. Dr.-Ing. Jürgen Roßmann** leitet den Lehrstuhl und das Institut für Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) der RWTH Aachen. Der Schwerpunkt seiner Arbeit liegt in der Verknüpfung von Forschungsergebnissen aus den Bereichen Robotik, Simulationstechnik und Virtuelle Realität zur Entwicklung neuer Konzepte der Mensch-Maschine-Kommunikation.
- Adresse: Institut für Mensch-Maschine-Interaktion, RWTH Aachen, Ahornstr. 55, 52074 Aachen, Tel.: +49 241 80-26101, E-Mail: rossmann@mmi.rwth-aachen.de
- Prof. Dr. Michael ten Hompel** ist Inhaber des Lehrstuhls für Förder- und Lagerwesen an der Universität Dortmund und geschäftsführender Institutsleiter am Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML. Er studierte Elektrotechnik an der RWTH Aachen und promovierte an der Universität Witten/Herdecke.
- Adresse: Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4, 44227 Dortmund, Tel.: +49 231 97 43-600, E-Mail: michael.ten.hompel@iml.fraunhofer.de
- Dipl.-Inf. Kevin Eilers** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Forschung und Transfer (RIF e.V.). Er studierte Informatik an der Technischen Universität Braunschweig.
- Adresse: Institut für Forschung und Transfer (RIF e.V.), Joseph-von-Fraunhofer-Str. 20, 44227 Dortmund, Tel.: +49 231 9700-776, E-Mail: kevin.eilers@rt.rif-ev.de