

Virtuelles Konstruieren mit Gestik und Sprache

Bernhard Jung, Stefan Kopp, Timo Sowa, Ipke Wachsmuth
Universität Bielefeld, Technische Fakultät, AG WBS,
Postfach 100131, D-33501 Bielefeld, Germany
{jung,skopp,tsowa,ipke}@TechFak.Uni-Bielefeld.DE

1 Einleitung

Im Bielefelder Labor für Künstliche Intelligenz und Virtuelle Realität liegt der Forschungsschwerpunkt auf der Integration von gestischer und sprachlicher Kommunikation in einem Szenario des Virtuellen Konstruierens. Dabei werden hochaufgelöste räumliche Visualisierungen CAD-basierter Bauteilmodelle in realistischer Größe auf einer Großbildleinwand präsentiert und über Eingabegeräte der Virtuellen Realität (Positionssensoren, Datenhandschuhe, Spracherkennungssystem), vermittelt durch wissensbasierte Simulationstechniken, zu komplexen Aggregaten zusammengebaut (siehe Abb. 1). Ein Leitziel der Forschungsarbeiten ist die „Anthropomorphisierung“ von Schnittstellen zu und mit Systemen der virtuellen Realität, d.h. die bessere Anpassung an den Menschen. Anwendungspotential liegt in der komfortablen Erstellung von virtuellen Prototypen, die wichtige Eigenschaften eines Produkts abbilden und die damit schon eine Überprüfung von Entwürfen in frühen Phasen des Entwicklungszyklus ermöglichen [1].



Abbildung 1: Virtuelles Konstruieren mit Gestik und Sprache an einer interaktiven Wand



Abbildung 2: In der Desktop-Version des Virtuellen Konstrukteurs können dreidimensional visualisierte Bauteile u.a. mittels sprachlicher Anweisungen zusammengebaut werden.

Die nachstehend im Überblick beschriebenen Arbeiten bauen auf einem wissensbasierten Simulationssystem auf, dem *Virtuellen Konstrukteur*, das die interaktive Montage komplexer Aggregate aus einfachen Grundbausteinen auf einer bildschirmpräsentierten virtuellen Werkbank ermöglicht [6, 3, 5]. Benutzereingaben erfolgen in der Desktop-Version des Virtuellen Konstrukteurs durch direkte, mausbasierte Manipulationen bzw. mittels einfacher sprachlicher Instruktionen (Abb. 2). Die in Abschnitt 2 dargestellten Arbeiten zielen auf eine gestische und sprachliche Steuerung von Montagesimulationen der an einer interaktiven Wand mit $2.5\text{m} \times 3\text{m}$ Großprojektion ab. In Abschnitt 3 wird ein verallgemeinerter Ansatz zur wissensbasierten Montagesimulation vorgestellt, der den Zusammenbau verschiedenartiger Bauteiltypen in der virtuellen Umgebung ermöglicht.

2 Auswertung von Gestik und Sprache

Die Auswertung der sich ergänzenden natürlichen Modalitäten Gestik und Sprache bietet ein Potential, in Zukunft komfortablere, dem Menschen angepaßte Schnittstellen zu multimedialen Systemen zu schaffen und damit Begrenzungen üblicher Bildschirm-Displays zu überwinden. Als Ziel des SGIM (*Speech and Gesture Interfaces for Multimedia*) Projektes werden Techniken entwickelt, die mittels elektromagnetischer Sensoren Informationen über die Bewegungsrichtung der oberen Extremitäten und die Position eines Benutzers bei der Interaktion mit Großdisplays in Multimedia-Umgebungen erschließen. Dazu gehört die signaltechnische Erfassung sowie die Bedeutungsanalyse von Körpergestik (vor allem Arme und Kopfstellung des Benutzers) und ihre Kopplung in Anwendungssysteme. Die gestische Kommunikation wird durch Spracheingaben unterstützt, mit denen Objekttypen und -positionen spezifiziert werden, um Unschärfen im gestischen Eingabekanal aufzulösen [9].

Für die Gestenerkennung werden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt. In einem stärker applikationsgebundenen Ansatz können Basisinteraktionen definiert werden, (Pointing, Grasp, GraspRelease, Rotation, Translation), die in enger Kopplung zur Anwendung mit direktem visuellem Feedback ausführbar sind [9]. Mit dem Ziel einer weit-

gehend allgemeinen Lösung wird des weiteren ein expliziter (wissensbasierter) Ansatz verwendet, der vollständige Gesten als Zusammenschluß von atomaren Formelementen (*features*) beschreibt [2, 10]. In einer ersten – applikationsunabhängigen – Stufe wird die gestische Äußerung eines Benutzers als reine Formbeschreibung der Körperbewegung analysiert und in expliziter symbolischer Notation verfügbar gemacht. So wird etwa eine Zeigegeste durch „Zeigefinger gestreckt und andere Finger eingerollt“ beschrieben. In einer zweiten – applikationsspezifischen – Stufe wird die Formbeschreibung im aufgabenorientierten Szenario (und z.T. im Kontext sprachlicher Modalität; s.u.) auf verfügbare Handlungsmöglichkeiten des Anwendungssystems abgebildet. Dabei werden auch quantitative Aspekte der Gestik aufgenommen, wie z.B. der Zeigevektor, der zur Bestimmung eines durch Zeigegestik referenzierten Objekts verwendet wird. Zur Rekonstruktion temporaler Beziehungen zwischen den Eingabedaten wird zusätzlich das Zeitverhalten erfaßt.

Von besonderem Interesse sind „koverbale“ Gesten, also Gesten, die sprachliche Äußerungen mehr oder weniger spontan begleiten. Dabei stehen derzeit deiktische Gesten, die häufig im Zusammenhang mit einer Objekt- oder Ortsreferenz geäußert werden („dieses Rad“), sowie mimetische Gesten, mit denen z.B. Objekttransformationen („dreh es so herum“) angedeutet werden, im Fokus der Forschungsarbeiten. In Ergänzung zur diskreten Gesteneingabe ermöglicht die Bindung von numerischen Sensorwerten an Parameter geometrischer Objekttransformationen ein kontinuierliches graphisches Feedback, so daß z.B. nach dem Greifen eines Objekts die Handbewegungen unmittelbar mit den Bewegungen des Objekts in der virtuellen Szene gekoppelt sind.

Daneben werden in kürzlich begonnenen Arbeiten auch allgemeinere Eigenschaften der gestischen Expression betrachtet. Dazu zählt z.B. die Bestimmung von Varianten des „*gesture stroke*“, d.h. der expressiven Phase einer Geste, oder die Erkennung von Symmetrien in den Bewegungen beider Hände, die für bestimmte Gestenarten charakteristisch sind. Mit der Hilfe der Gestenbeschreibung auf dieser – abstrakteren – Ebene, wird eine Flexibilisierung des Interfaces angestrebt, in dem Sinne, daß derselbe Bedeutungsgehalt durch diverse Formvarianten der gestischen Expression ausgedrückt werden kann [12]. Als Beispiel seien hier Zeigegesten genannt, die bei Personen aus verschiedenen Kulturkreisen unterschiedlich ausgeprägt sind (Zeigen mit ausgestreckten Arm vs. Zeigen durch Strecken des Zeigefingers nahe am Körper).

Als spezielles Problem stellt sich die Koordination – insbesondere die zeitliche Koppelung – der beiden Modalitäten Sprache und Gestik. Dabei ist das *Korrespondenzproblem* zu lösen, d.h. die semantisch-pragmatische Zuordnung von sprachlichen zu gestischen Äußerungssegmenten. Unser Lösungsansatz [13] schließt an Forschungsbefunde aus den Humandisziplinen an, die zeigen, daß menschliche Kommunikation durch signifikant „rhythmische“ Muster geprägt ist, die als koordinative Strategie des menschlichen Äußerungs- und Wahrnehmungsapparats gedeutet werden. Muster dieser Art können durch Analyse bestimmter Äußerungsmerkmale, wie z.B. Gesten-Stroke und Betonung, gewonnen und für die Integration von Sprache und Gestik nutzbar gemacht werden.

Im Hinblick auf das Anwendungsszenario des Virtuellen Konstruierens liegt ein weiteres zentrales Problem in der Umsetzung der oft vagen und unterspezifizierten sprachlichen und gestischen Benutzereingaben in Manipulationen der virtuellen Umgebung. Im Vergleich zu allgemeinen Manipulationsaufgaben - wie Translation und Rotation von Bauteilen (z.B. „schiebe <Zeigegeste> dieses Teil nach rechts“) - bestehen jedoch bei den Manipulationsaufgaben des Virtuellen Konstruierens, wie Verbinden oder Trennen von Bauteilen (z.B. „stecke <Zeigegeste> dieses Teil <Zeigegeste> da hinein“), jedoch zusätzliche Randbedingungen, z.B. werden die virtuellen Bauteile i.a. nur an bestimmten

Verbindungsstellen zusammengesetzt. Indem diese Randbedingungen bei der Montagesimulation explizit modelliert werden, können Ungenauigkeiten bei der Gestenerkennung durch systemseitiges Wissen über den Anwendungsbereich ausgeglichen werden, bzw. ungenau erfolgende gestische Benutzerinteraktionen wissensgestützt justiert werden.

3 Wissensbasierte Montagesimulation

Im Projekt CODY (DFG, SFB 360) wurde mit dem *Virtuellen Konstrukteur* ein wissensbasiertes System entwickelt, das eine interaktive Montagesimulation dreidimensional modellierten Grundbausteinen zu komplexen Aggregaten ermöglicht. Die Zielvorstellung ist, daß alle im Realen aus einer gegebenen Menge von Grundbauteilen physikalisch konstruierbaren Aggregate auch in der virtuellen Umgebung herstellbar sind. Dazu sind im Virtuellen Konstrukteur verschiedene primitive Montagehandlungen simulierbar, wie Verbinden von Bauteilen, Trennen von Bauteilen und die Modifikation von Aggregaten durch Relativbewegung (Rotation, Translation) von Bestandteilen [3]. In neueren Arbeiten zum Virtuellen Konstrukteur wurde ein allgemeiner Ansatz zur Modellierung der Verbindungsmöglichkeiten und wissensbasierten Montagesimulation der virtuellen Bauteile entwickelt [7], der im folgenden näher beschrieben wird.

Als Grundlage der virtuellen Montagesimulation ist im Virtuellen Konstrukteur Wissen über die mechanischen Eigenschaften der Bauteile, insbesondere ihre Verbindungsstellen (*Ports*), z.B. der Schaft einer Schraube oder das Gewinde einer Mutter, modelliert. In einer Wissensbasis sind dazu verschiedene Porttypen definiert, die sich in ihrer geometrischen Form sowie den von ihnen induzierten Freiheitsgraden bei Portverbindungen unterscheiden. Top-level Konzepte der Wissensbasis sind *ExtrusionPort* (spezialisiert in *GeberPort* und *NehmerPort*), mit dem z.B. Schraubverbindungen modelliert werden, *PlanePort*, mit dem Objektverbindungen an koplanaren Flächen modelliert werden, sowie *PointPort*, mit dem Punkt-artige Verbindungen ohne translatorische Freiheitsgrade modelliert werden. Neben den Verbindungsports der Bauteile werden im Virtuellen Konstrukteur verschiedene Verbindungsarten modelliert, wie sie auch in der Konstruktionslehre z.B. nach physikalischen Schlußkräften oder verbleibenden Freiheitsgraden unterschieden werden. So kann in der Montagesimulation z.B. weiter zwischen Stecken (Translation und Rotation ungekoppelt), Schrauben (Translation und Rotation gekoppelt) oder Schweißen (keine Freiheitsgrade) unterschieden werden. Abbildung 3 zeigt die bisher modellierte Taxonomie von Verbindungsports.

Zur Spezifikation von Port- und Verbindungsart-bedingten Bewegungseinschränkungen verbundener Objekte wurde das Beschreibungsmittel der *erweiterten Freiheitsmatrizen* entwickelt [7]. Diese basieren auf den logischen Freiheitsmatrizen, die in der Konstruktionslehre als digitale Darstellungen der Berührungen zweier Körper in diskreten Punkten definiert sind [11]. Während die logische 3×4 Freiheitsmatrix zu diesem Zweck für jeden der 12 Freiheitssinne¹ einen binären Eintrag enthält („0“ für Bewegungssperrung, „1“ sonst), ist es für die virtuelle Simulation eines realistischen Konstruktionsprozesses notwendig, den Bewegungsfreiraum eines Objektes quantitativ zu beschreiben, also numerische Werte für die Grenzen einer Relativ-Bewegung anzugeben. Dies ermöglicht der Übergang zu erweiterten Freiheitsmatrizen, die pro Freiheitssinn eine beliebige positive Zahl oder die Bezeichner BLOCKED (für vollständige Bewegungssperrung) und

¹Ein *Freiheitssinn* ist ein gerichteter Freiheitsgrad. Es gibt also zu jedem Freiheitsgrad genau zwei entgegengesetzt gerichtete Freiheitssinne.

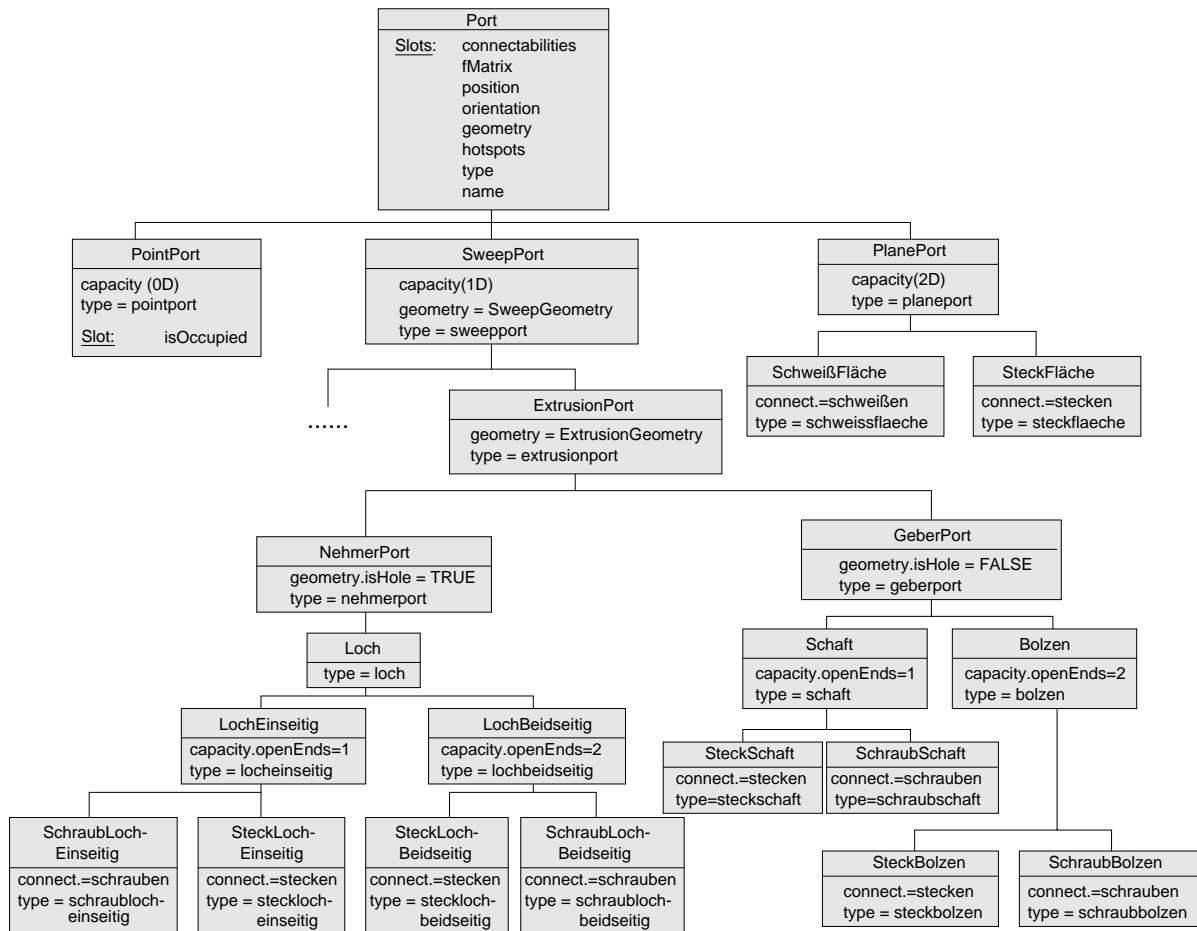


Abbildung 3: Taxonomie der Verbindungsports

FREE (für unbeschränkte Bewegungsfreiheit) enthalten kann. Um die Bewegungscharakteristika verschiedenster Objektverbindungen adäquat beschreiben zu können, lassen sich zusätzlich Kopplungen zwischen je zwei Freiheitssinnen (wie z.B. bei Schraubverbindungen) angeben. Eine Kopplung ist durch die Indizes der beiden Freiheitssinne in der Matrix und einer numerischen Angabe des Kopplungsverhältnisses gegeben. Eine erweiterte Freiheitsmatrix ist also ein 2-Tupel aus einer 3x4-Matrix und einer *Kopplungsliste* (siehe auch Abb.5). Erweiterte Freiheitsmatrizen sind für jeden Porttyp, z.B. **SchraubSchaft**, und für jede Verbindungsart, z.B. **stecken**, modelliert und definieren somit typische Bewegungsmerkmale möglicher Objektverbindungen. Des weiteren werden die erweiterten Freiheitsmatrizen auch, wie unten dargestellt, zur Beschreibung der verbleibenden möglichen Relativbewegungen von in der virtuellen Umgebung verbundenen Bauteilen verwendet.

Montagerelevante Eigenschaften der virtuellen Bauteile werden mit Hilfe der oben eingeführten Beschreibungsmittel modelliert. Für jedes Bauteil werden im Objektkoordinatensystem Typ, Geometrie und relative Lage der Verbindungsports sowie die möglichen Verbindungsarten angegeben. Sog. “Hotspots” definieren präferierte Objektpositionierungen bei der Simulation von Fügeschritten. Dadurch kann z.B. bei Verbindungen einer Schraube mit einer Mutter unterschieden werden, ob als Standardsystemverhalten die Schraube vollständig oder nur bis zu einem vordefinierten Ansatzpunkt in die Mutter geführt werden soll (nachfolgende Modifikationen sind in jedem Fall möglich). Abb. 4

```

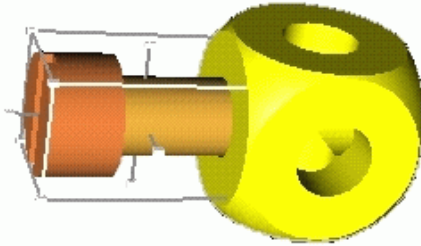
part: LSCH_SCHRAUBE
( (type:          SchraubSchaft)
  (name:          schaft)
  (position:      (0,-16,0))
  (orientation:   (0,0,90))
  (connectabilities: stecken, schrauben)
  (capacity:      (16 -16))
  (hotspots:      (((position: (16,0,0)) (orientation: (0,1,0)))))
  (geometry:      ((type:          cylinder)
                    (name:          PORT1_GEOMETRIE)
                    (position:      (-16,0,0))
                    (orientation:   (0,90,0))
                    (radius:        7)
                    (sweepRange:    32))))

```

Abbildung 4: Modellierung des Ports (Schaft) für eine Schraube.

zeigt die Modellierung einer Schraube, die als einzigen Port einen Schaft besitzt.

Bei der Simulation von Fügehandlungen dient das Wissen über die Verbindungsports und Verbindungsarten zunächst zur Überprüfung der prinzipiellen Verbindbarkeit der Bauteile. Wissen über die geometrischen Eigenschaften der Bauteile und ihrer Verbindungsports sowie aktuell verfügbare Portkapazitäten ermöglicht eine ‘paßgenaue’ Fügung der Bauteile. Um die weitere Modifikation entstandener Aggregate in nachfolgenden Interaktionsschritten zu ermöglichen, wird nach dem Fügen zweier Bauteile eine erweiterte Freiheitsmatrix ermittelt, welche die genauen Grenzen beschreibt, in denen Relativ-Bewegungen beider Verbindungspartner erlaubt sind. Die verbleibenden Bewegungsmöglichkeiten verbundener Objekte hängen dabei von der Art ihrer Verbindung, der Art der verbundenen Ports und deren Belegungszuständen ab. Die gesuchte erweiterte Freiheitsmatrix wird also aus den Freiheitsmatrizen der Verbindungs-Relation und Port-Objekte sowie deren aktuellen Kapazitäten ermittelt. Zu diesem Zweck sind formale Operatoren definiert, die in Anlehnung an die ursprünglichen logischen Freiheitsmatrizen disjunktive und konjunktive Verknüpfungen zwischen zwei erweiterten Freiheitsmatrizen bilden [7]. Beispielsweise können zwei Freiheitsmatrizen „ver-undet“ werden, indem die Schnittmenge der Bewegungsfreiräume gebildet wird, d.h. jeder Eintrag der Ergebnismatrix ist gleich dem kleineren der beiden Einträge der Ausgangsmatrizen; die Kopplungslisten beider Matrizen werden vereinigt. Die konkrete Freiheitsmatrix für einen zu manipulierenden Port P_m , der mit einem anderen raumfesten Port P_f verbunden ist, berechnet sich durch konjunktive Verknüpfung der charakteristischen erweiterten Freiheitsmatrix der Verbindungsart mit den beiden – in ein gemeinsames Bezugssystem transformierten – Freiheitsmatrizen der Port-Objekte, die jeweils die durch ihre Porttypen zugelassenen Freiheitssinne gemäß der aktuellen Kapazitäten begrenzen: $M_f = M_{P_m} \wedge M_{P_f} \wedge M_{Verbindung}$. M_f spezifiziert somit die erlaubten Relativ-Bewegungen, die dem manipulierten Port in seiner direkten Verbindung zu dem festen Port verbleiben. Rechnet man die einzelnen Einträge in Objekt-Koordinaten um, so kann man die Benutzermanipulationen des Szenen-Objekts, bei ortsfestem Verbindungsgegenstück, unmittelbar einschränken. Zusätzlich lassen sich Bewegungen simulieren, die durch bestehende Kopplungen erzwungen werden. Abbildung 5 zeigt die erweiterte Freiheitsmatrix, welche die Randbedingungen für das weitere Hinein- oder Herausdrehen einer Schraube



Erweiterte Freiheitsmatrix Schraube-1:

$$\begin{pmatrix} 3.3696 & 18.6304 & \text{FREE} & \text{FREE} \\ \text{BLOCKED} & \text{BLOCKED} & \text{BLOCKED} & \text{BLOCKED} \\ \text{BLOCKED} & \text{BLOCKED} & \text{BLOCKED} & \text{BLOCKED} \end{pmatrix}$$

$\{(0,0,2,0, 0.8),(1,0,3,0, 0.8)\}$

Abbildung 5: Beschreibung von Relativbewegungen durch erweiterte Freiheitsmatrizen: Die Schraube (Gewinde nicht dargestellt) ist 3.4 Einheiten in den Würfel gedreht, und kann um weitere 18.6 Einheiten eingeführt werden. Eine Rotation um die durch den Schaft gegebene Achse ist in beiden Drehsinnen möglich. Alle anderen Relativbewegungen sind ausgeschlossen. Beim Hinein- und Herausschrauben besteht jeweils ein Kopplungsverhältnis von 0.8 zwischen Translation und Rotation.

beschreibt, die mit einem Gewindeblock durch eine Schraubverbindung verbunden ist.

Bei der Montagesimulation beschreiben die erweiterten Freiheitsmatrizen also die relativen Bewegungsmöglichkeiten paarweise verbundener Objekte und stellen Attribute expliziter Verbindungsrelationen des Verbindungsgraphen der virtuellen Bauteile dar. Der Verbindungsgraph dient bei Montageoperationen mit komplexen, aus mehreren Bauteilen bestehenden Aggregaten u.a. der Ermittlung mitzubewegender Bauteile. Um physikalisch unmögliche Objektüberlagerungen auszuschließen, wird bei sämtlichen simulierten Montageoperationen zusätzlich eine Kollisionsüberprüfung durchgeführt. Der Gesamt Ablauf der Montagesimulation im Virtuellen Konstrukteur ist in [5] genauer beschrieben. Der hier dargestellte Ansatz, der als Teilaspekt die Verarbeitungsbedingungen für das paarweise Verbinden von Objekten bereitstellt, ermöglicht das virtuelle Konstruieren mit verschiedenartigen Bauteiltypen, wie z.B. den Baufix-Teilen des SFB 360-Szenarios (Abb. 2) oder den Grundbausteinen einer mobilen Citymobil-Plattform (Abb. 1).

4 Schluß

In diesem Beitrag wurden aktuelle Forschungsarbeiten im Bielefelder Labor für Künstliche Intelligenz und Virtuelle Realität dargestellt, wobei der Fokus auf den Aspekten der Verarbeitung sprachlich-gestischer Eingaben einerseits und der wissensbasierten Montagesimulation andererseits lag. Weitere Forschungsarbeiten liegen in der dynamischen Konzeptualisierung der virtuellen Montageszene, bei welcher das System durch Abgleich von Struktur- und Formmerkmalen die entstehenden Baugruppen erkennt und dadurch u.a. dem Benutzer deren Benennung in sprachlichen Instruktionen ermöglicht [15, 4]. In anderen derzeitigen Arbeiten wird ein anthropomorpher Agent (“Artikulierter Kommunikator”) entwickelt, der in der Montagesituation die Rolle eines personifizierten Kommunikationspartners annimmt [8].

Hinweis Die hier beschriebenen Arbeiten werden durch die DFG im Sonderforschungsbereich 360 und vom Land NRW im Forschungsverbund “Die virtuelle Wissensfabrik” unterstützt.

Literatur

- [1] F. Dai and M. Göbel. Virtual prototyping – an approach using VR–techniques. In *Proc. of the 14th ASME International Computers in Engineering Conference*, 1994.
- [2] M. Fröhlich and I. Wachsmuth. Gesture recognition of the upper limbs - from signal to symbol. In Wachsmuth and Fröhlich [14], pages 173–184.
- [3] M. Hoffhenke, B. Jung, and S. Kopp. Der CODY Virtuelle Konstrukteur Manual Version 2.0. SFB 360 Report 98/8, Universität Bielefeld, 1998.
- [4] M. Hoffhenke and I. Wachsmuth. Object recognition with shape prototypes in a 3D construction scenario. In *KI-99: Advances in Artificial Intelligence*. Springer, 1999.
- [5] B. Jung, M. Hoffhenke, B. Lenzmann, and I. Wachsmuth. Interaktive Montagesimulation in Virtuellen Umgebungen. In H. Szczerbicka and Th. Uthmann, editors, *Modellierung, Simulation, und Künstliche Intelligenz*. SCS, 1999. Im Druck.
- [6] B. Jung, M. Hoffhenke, and I. Wachsmuth. Virtual assembly with construction kits. In *1998 ASME Design for Manufacturing Symposium – Virtual Design and Prototyping*, 1998.
- [7] S. Kopp. Ein wissensbasierter Ansatz zur Modellierung von Verbindungen für die virtuelle Montage. Diplomarbeit, Technische Fakultät, Universität Bielefeld, März 1998.
- [8] S. Kopp and I. Wachsmuth. Natural timing in coverbal gesture of an articulated figure. In *Working notes, Workshop Communicative Agents, Autonomous Agents '99*, Seattle, 1999.
- [9] M. Latoschik, B. Jung, and I. Wachsmuth. Multimodale Interaktion mit einem System zur Virtuellen Konstruktion. In *Tagungsband Informatik'99. 29. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik*, 1999. Im Druck.
- [10] M. Latoschik and I. Wachsmuth. Exploiting distant pointing gestures for object selection in a virtual environment. In Wachsmuth and Fröhlich [14], pages 185–196.
- [11] K. Roth. *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*, Band I. Springer, 2. Auflage, 1994.
- [12] T. Sowa and I. Wachsmuth. Understanding coverbal dimensional gestures in a virtual design environment. In *Proceedings IDS'99 – Workshop on Interactive Dialogue in Multi-Modal Systems*, pages 117–120. ECS, 1999.
- [13] I. Wachsmuth. Communicative rhythm in gesture and speech. In *GW'99: Third International Gesture Workshop*, 17–19 March 1999, Gif-sur-Yvette, France, 1999. Berlin: Springer-Verlag (LNAI). Im Druck.
- [14] I. Wachsmuth and M. Fröhlich, editors. *Gesture and Sign Language in Human-Computer Interaction: Proceedings of Gesture Workshop '97*. Springer-Verlag, 1998.
- [15] I. Wachsmuth and B. Jung. Dynamic conceptualization in a mechanical-object assembly environment. *Artificial Intelligence Review*, 10(3-4):345–368, 1996.