3D Menschvermessung im TOPAS-Projekt

(ein von der Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation finanziertes Projekt)

H. Hamfeld, G. Hansen, Prof. Dr. E. v. Puttkamer, Dr. R. Trieb
Universität Kaiserslautern, Fachbereich Informatik
Arbeitsgruppe Robotik & Prozeßrechentechnik
Postfach 3049, 67653 Kaiserslautern
Tel.: 0631/205 3420, Fax.: 0631/205 4409
email: hamfeld@informatik.uni-kl.de

Zusammenfassung

Vorgestellt wird ein System basierend auf einem 3D-Scanner nach dem Lichtschnitt-Prinzip mit dem es möglich ist, einen Menschen innerhalb von 1,5 Sekunden dreidimensional zu erfassen. Mit Hilfe von Evolutionären Algorithmen wird über eine modellbasierte Dateninterpretation die Auswertung der Meßdaten betrieben, so daß beliebige Körpermaße ermittelt werden können. Das Ergebnis ist ein individualisiertes CAD-Modells der Person im Rechner. Ein derartiges Modell kann als virtuelle Kleiderpuppe zur Produktion von Maßbekleidung dienen.

1 Einführung

Der Kostendruck bei einer Vielzahl von Gebrauchs- und Verbrauchsgütern zwingt Hersteller zu einer konsequenten Massenfertigung. Wurden früher viele Produkte noch in Handarbeit individuell auf den Kunden zugeschnitten, so geht durch die Massenfertigung diese Individualität zunehmend verloren. Eine automatische Fertigung von Individualprodukten ist in vielen Fällen produktionstechnisch zwar möglich, aber nicht rentabel, da es keine Möglichkeit gibt in ausreichendem Maße kundenspezifische Daten zu erhalten.

Gerade im Bereich der Bekleidungsindustrie eröffnet die automatisierte Fertigung individueller Kleidung neue Perspektiven auch für Menschen mit nicht normgerechten Körperbau. Die automatische Erfassung menschlicher Körperdaten in Verbindung mit einem CAD-Menschmodell als virtuelle Kleiderpuppe bildet dabei die Grundlage für eine wirtschaftliche Massenproduktion von Individualbekleidung.

Im Rahmen des TOPAS-Projektes (Touchless Perception and Anthropometric Adaption System) wurden in den letzten drei Jahren sowohl ein schneller 3D-Scanner zur Menschvermessung, als auch Software zum Abgleich des CAD-Menschmodells RAMSIS mit den gewonnenen Sensordaten entwickelt.

2 3D-Menschvermessungssystem

Im Bereich der automatischen Menschvermessung sind sehr hohe Anforderungen an ein optisches Vermessungssystem zu stellen. Neben der Berücksichtigung von ergonomischen und wirtschaftlichen Aspekten sind zudem gesundheitliche Risiken zu minimieren. Zwangshaltungen oder eine Vorbehandlung der Meßperson (z.B. Aufbringen von Marken auf die Haut) sind nicht akzeptabel, genauso wie lange Meßzeiten eine unnötige Belastung für die Meßperson darstellen. Weniger relevant ist dagegen die absolute Genauigkeit der 3D-Vermessung. Allein das Ein- oder Ausatmen eines Menschen verursacht Änderungen des Bauchumfangs von einigen Zentimetern, so daß Genauigkeiten des Meßsystems von wenigen Millimetern durchaus ausreichend sind.
Die mögliche Bewegung der Person während der Messung führt im allgemeinen zu Fehlern in den Meßdaten, so daß keine konsistenten Meßdaten mehr erzeugt werden können. Um dieses Problem zu minimieren, muß eine möglichst schnelle Durchführung der Gesamtmessung erreicht werden. Ein im Bereich des Reverse Engineering häufig angewandte Vorgehensweise der Durchführung mehrerer unabhängiger Teilvermessungen mit nachträglicher Zusammenführung der Datensätze kommt nicht in Frage. Das System muß vielmehr so aufgebaut sein, daß es einen Menschen vollständig in einem Meßdurchgang erfassen kann.
Ein Meßprinzip, daß sehr tolerant gegenüber Bewegungen des Meßobjektes ist und zudem die Anforderungen bezüglich Meßgeschwindigkeit und -genauigkeit erfüllt, ist die Lichtschnitttriangulation. Da dieses Meßprinzip im eigentlichen Sinne nur zweidimensional mißt, muß die dritte Dimension mechanisch, zum Beispiel durch eine Linearführung erzielt werden. Der TOPAS-Scanner [Hansen 96] baut auf zwei Meßköpfen auf, die jeweils aus einer Hochgeschwindigkeits-CCD-Kamera und einem Laserlinienpaar bestehen. Die Meßköpfe sind zur Vermessung der Vorder- und Rückseite des Menschen auf zwei gegenüberliegenden Linearführungen angebracht. Durch die feste mechanische Kopplung der beiden Linearführungen miteinander kann garantiert werden, daß sich die Meßköpfe zu jedem Zeitpunkt einer Messung auf gleicher Höhe befinden, so daß eine Vielzahl konsistenter horizontaler Oberflächenkontouren aufgenommen werden kann (Abbildung 1). Die Triangulations-Meßköpfe können separat kalibriert werden. In einem weiteren Kalibrierschritt wird die Lage der Meßköpfe zueinander bestimmt, so daß die Sensordaten bezüglich eines gemeinsamen globalen Koordinatensystem aufgenommen werden.

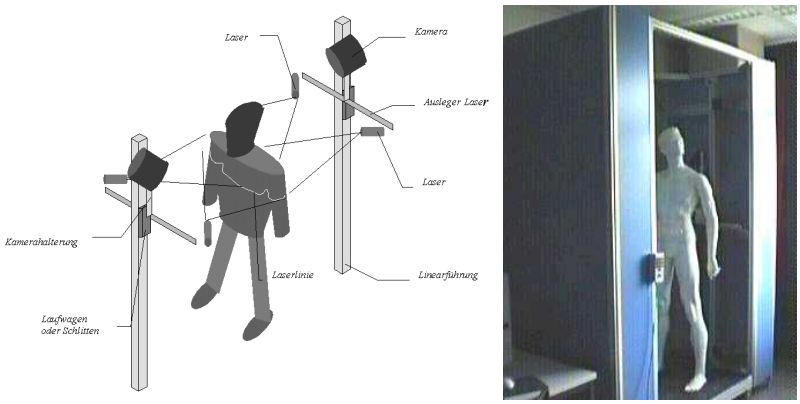

Abbildung 1: TOPAS-Scanner

Das System ist in der Lage, bis zu 400 Lichtschnitten (Vorder- und Rückseite) pro Sekunde in Echtzeit auszuwerten, so daß bei einer Gesamtvermessungszeit von etwa 1,5 Sekunden über eine Meßstrecke von 2 Metern ein Punktabstand von etwa 4 bis 6mm mit einer Auflösung von etwa 3mm erreicht wird. Pro Sekunde können bis zu 100.000 Meßpunkte aufgenommen werden. In Abbildung 2 sind typische Meßergebnisse dargestellt.

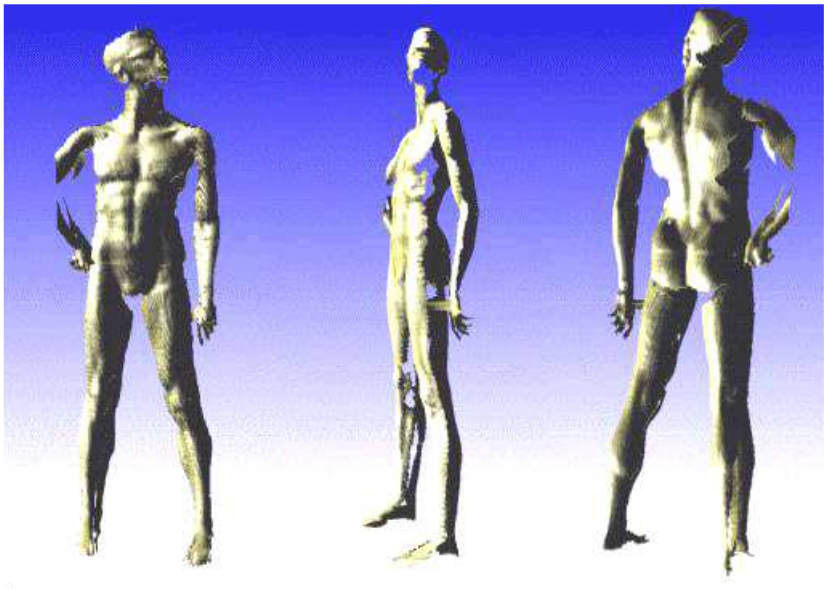

Abbildung 2: Meßergebnisse (Schaufensterpuppe in drei Ansichten)

Um ein möglichst kostengünstiges und damit wirtschaftliches System zu realisieren, wurde auf eine lückenlose Abtastung die den Einsatz vieler Meßköpfe[1] bedingt, verzichtet. Der Einsatz von nur zwei Meßköpfen mit jeweils einer Kamera führt zum einen zu Abschattungen in Bereichen, in denen der Laser gegenüber der Kamera verdeckt ist (z.B. unter dem Kinn). Zum anderen können seitliche Bereiche, die nicht im Sichtfeld der Sensoren liegen nicht erfaßt werden.
Die weitere Auswertung der Meßdaten über eine modellbasierte Dateninterpretation vermag diese Fehlstellen sehr zuverlässig auszugleichen, indem ein CAD-Modell eines Menschen in die Daten eingepaßt wird. Fehlende Sensorinformation kann so durch das Modellwissen vervollständigt und mit Semantik aufgefüllt werden kann. Zur Berechnung des Bauchumfangs ist beispielsweise keine vollständige Sensorinformation notwendig, da eine statistisch korrekte Form des Rumpfes eines Menschen im Modell enthalten ist. Dementsprechend reicht die vorhandene Stützinformation, um auf eine plausible Form des Rumpfes schließen zu können.
Im folgenden wird zunächst das verwendete Menschmodell RAMSIS vorgestellt. Danach wird der eigentliche Inhalt des Forschungsprojektes, die Anpassung des Menschmodells an die Sensordaten, erläutert.

3 Menschmodell RAMSIS

Das Menschmodell RAMSIS wird seit 1989 von der Firma TecMath zu Ergonomieanalysen in der Automobilindustrie entwickelt [Seidl 94]. Basierend auf einer umfangreichen Typologiedatenbank werden Methoden zur Verfügung gestellt, mit denen CAD-Beschreibungen von Fahrzeuginnenräumen bezüglich unterschiedlicher menschlicher Typologien getestet werden können. Typische Aufgabenstellungen sind dabei unter anderem die Analyse von Sichtfeldern, Bequemlichkeiten oder Erreichbarkeiten[2], so daß bereits in frühen Entwurfsstadien die Qualität des Fahrzeugdesigns bewertet und korrigiert werden kann. Über die Struktur des Modells können sowohl die Körperform, als auch unterschiedliche Haltungen und Bewegungen des Menschen modelliert werden. RAMSIS unterscheidet ein inneres Modell, das dem menschlichen Skelett entspricht, sowie ein äußeres Modell, mit dem die Hautoberfläche nachgebildet wird (Abbildung 3).

[1] weitestgehend vollständig messende Mensch-Scanner arbeiten mit wenigstens acht Kameras

[2] z.B. Erreichbarkeit von Instrumenten im Fahrzeug bei normaler Sitzhaltung

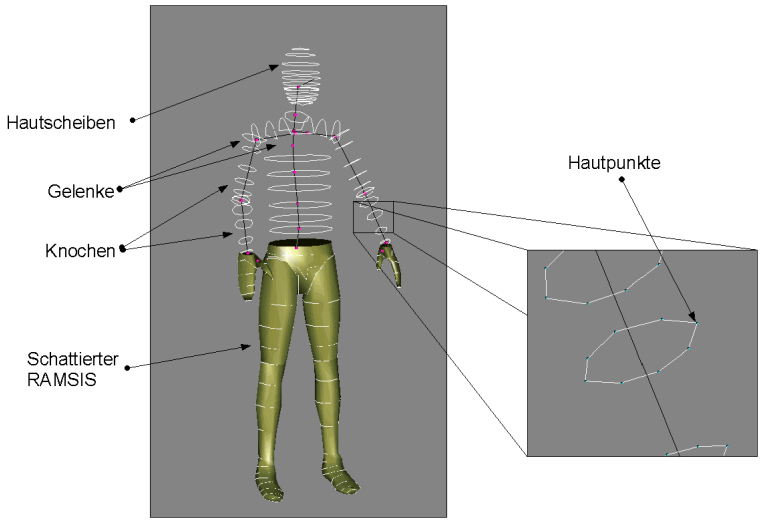

Abbildung 3: Struktur des Menschmodells RAMSIS

Das Skelett des CAD-Modells besteht aus 36 Segmenten (Knochen), die jeweils über Gelenke miteinander verbunden sind, so daß das Modell vollbeweglich ist und jede natürliche Haltung eines Menschen nachbilden kann. Gelenkwinkelbeschränkungen, die die Freiheitsgrade jedes Gelenkes beschreiben, garantieren dabei, daß keine unnatürliche Haltung eingenommen werden kann.
Das äußere Modell besteht aus über 1000 Hautoberflächenpunkten. Sie sind auf Querschnitten durch die Körperteile, sogenannten Hautscheiben, definiert. Über diese Hautscheiben wird eine Beziehung zwischen Haut und Skelett definiert, so daß die Haut bei Haltungsänderungen der neuen Lage des Skeletts nachgeführt wird. Zusätzlich werden über die Ausdehnung der Hautscheiben anthropometrische Größen, wie zum Beispiel die Korpulenz, einer Person nachgebildet. Zur graphischen Visualisierung kann das Modell über ein Dreiecksnetz durch die Hautpunkte schattiert dargestellt werden.
Bislang war es in RAMSIS nur möglich statistisch basierte Modelle zu instantiieren. Die Grundinstanz eines statistischen RAMSIS-Manikins wird über drei Parameter definiert, der Körpergröße, der Rumpflänge und der Korpulenz. Anhand dieser Daten werden aus der statistischen Datenbank die restlichen Parameter zur Generierung eines statistischen Grundtypen bestimmt. Inhalt des TOPAS-Projektes ist die Individualisierung des Menschmodells, so daß nicht nur durchschnittlich große oder kleine Personen zur Verfügung stehen, sondern die mit dem Scanner erfaßte Person selbst als individualisiertes CAD-Modell im Computer vorliegt. Basierend auf einem Grundtyp wird die modellbasierte Dateninterpretation vorgenommen. Mit ihr wird neben der genauen Bestimmung der drei Grundparameter, die Feinabstimmung aller weiteren RAMSIS-Parameter durchgeführt.

4 Modellbasierte Dateninterpretation

Das Ziel der modellbasierten Dateninterpretation besteht in der Bestimmung aller Parameter des CAD-Modells, so daß eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Menschmodell und Meßdaten erzielt wird. Allein die Bestimmung der drei Grundparametern führt zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Vielmehr muß neben allen Gelenkwinkeln und Segmentlängen auch die Proportionen des Körpers, sowie die Form der Haut berechnet werden. Zur Generierung eines individualisierten Modells muß ein Optimierungsproblem mit mehreren hundert Parametern gelöst werden, die zudem hochgradig voneinander abhängig sind.
Klassische Verfahren stoßen schon durch die hohe Dimension des Parameterraums an ihre Grenzen. Eine getrennte Bestimmung der Parameter ist kaum möglich, da zum Beispiel die Form der Haut

erst dann sinnvoll berechnet werden kann, wenn die Haltung des Modells korrekt ist. Die Haltung kann aber erst dann genau bestimmt werden, wenn sich die Haut genau in die Scandaten einpassen läßt. Im TOPAS-Projekt werden daher Evolutionäre Algorithmen zur gleichzeitigen Bestimmung aller Parameter eingesetzt. Im folgenden wird dieser Ansatz genauer erläutert und es wird die Datenstruktur vorgestellt, mit der eine sehr schnelle Berechnung des notwendigen Qualitätsmaßes möglich ist.

4.1 Evolutionäre Algorithmen zur Modelladaption

Zur Lösung von Optimierungsproblemen, die sich nur sehr schwer oder gar nicht mehr mathematisch beschreiben lassen, werden häufig Evolutionäre Algorithmen [Mitchell 96, Nissen 97, Schwefel 96] eingesetzt. Das Prinzip dieser Algorithmen beruht auf der Nachbildung von Vorgängen der natürlichen Evolution. Die nötigen Voraussetzungen sind eine Beschreibung der relevanten Parameter des Problems, sowie die Definition eines Qualitätsmaßes. Sukzessive wird durch die Variation der Parameter versucht, einen Parametersatz zu finden, für den das Qualitätsmaß optimal wird. Dazu wird eine Menge (Population) von sogenannten Individuen aufgebaut. Jedes Individuum ist der Träger eines vollständigen Parametersatzes (Genom). Ein Allel repräsentiert die Ausprägung eines Parameters des Genoms. Innerhalb jedes Iterationsschrittes (Generation) werden alle Individuen der Population bezüglich ihres Qualitätsmaßes bewertet. Die Individuen mit der höchsten Güte werden bevorzugt ausgewählt (Selektion) und dienen zur Bildung der nächsten Generation. Die Individuen einer Generation werden durch Vererbung und Rekombination, sowie Mutation aus den Eltern der vorherigen Generation gebildet. Vererbung bedeutet dabei die einfache Übernahme eines oder mehrerer Allele aus dem Genom eines Elternteils. Rekombination beschreibt die Bildung eines neuen Genom aus den Genomen mehrerer Elternteile, indem die Allele aus unterschiedlichen Genomen gemischt werden. Die zufällige Variation eines Parameters wird als Mutationen bezeichnet.

Da die jeweils besten Individuen einer Generation die Basis der nächsten Generation bilden, wird eine kontinuierliche Steigerung des Qualitätsmaßes erreicht, wobei allerdings auch alternative Suchgebiete im Parameterraum weiterverfolgt werden. Im Gegensatz zu einfachen Gradientenverfahren neigen Evolutionsstrategien deswegen weniger dazu, in lokalen Extremstellen zu konvergieren. Durch Mechanismen wie Rekombination und Mutation wird garantiert, daß immer wieder Individuen in die Population aufgenommen werden, die eine neue Ausgangsposition innerhalb des Parameterraums bilden.

Im Rahmen des TOPAS-Projektes wird das Problem der Modelladaption auf Evolutionäre Algorithmen abgebildet [Hemmer 97]. Jedes Individuum einer Population repräsentiert die Instanz eines RAMSIS-Manikins. Typische Allele beschreiben Gelenkwinkelstellungen, Lage und Orientierung des Manikins, Segmentlängen oder Form und Ausdehnung von Hautscheiben. Eine Population besteht typischerweise aus bis zu 100 Individuen. Das Qualitätsmaß wird für jedes Individuum durch eine Abstandsberechnung zwischen den Hautpunkten und den Scandaten berechnet. Nach wenigen tausend Generation erreicht die Adaption des Modells an die Meßdaten eine ausreichend hohe Qualität, die keine weitere Verbesserung mehr erwarten läßt. Eine besondere Eigenschaft der Modelladaption mit Evolutionären Algorithmen ist, daß kein explizites Wissen über die zugrundeliegende Problemstellung "programmiert" werden muß. Die Modelladaption läßt sich problemlos auf andere Menschmodelle anwenden und ist ebensogut für völlig neue Problemstellungen einsetzbar, sofern ein ausreichend parametrisiertes Modell vorliegt und ein problemspezifisches Qualitätsmaß definiert ist.

Zur Optimierung der Modelladaption werden im TOPAS-Projekt mehrere Evolutionäre Algorith-

men nacheinander ausgeführt. Jeder Algorithmus löst ein spezielles Teilproblem der Adaption und schaltet gegenüber dem vorher durchgeführten Algorithmus weitere Parameter frei. So wird mit einer Grobanpassung begonnen, die im wesentlichen Lage und Orientierung des Manikins, sowie die Haltung der Extremitäten bestimmt. Danach werden zusätzlich Gelenke und Teile der Haut an die Meßdaten angepaßt, bis in den letzten Schritten eine Feinanpassung der Haut durchgeführt werden kann.
Die Berechnung des Qualitätsmaßes wirkt sich besonders kritisch auf die Rechenzeit der Modelladaption aus. Für jedes Individuum muß in jeder Generation das Abstandsmaß zur den Meßdaten berechnet werden. Der schlichte Vergleich jedes Hautpunktes (etwa 1000) des Manikins zu jedem Meßpunkt (bis zu 100.000) der Meßdaten ist nicht in vernünftiger Zeit zu bewältigen. Optimierte Zugriffsstrukturen (Gridfile oder Oct-Tree) können die Berechnung zwar deutlich beschleunigen, verringern aber kaum die Komplexität des Problems. Zur deutlichen Geschwindigkeitssteigerung der Modelladaption wurde daher eine Datenstruktur entwickelt, die einen direkten Zugriff auf Abstandsinformation zuläßt.

4.2 Voxelraum zur optimierten Qualitätsmaßberechnung

Ein Vorteil der Evolutionären Algorithmen, der zur Berechnung des Qualitätsmaßes ausgenutzt werden kann, ist die große Toleranz gegenüber unscharfen Daten. Sowohl eine Diskretisierung der Meßdaten, als auch ein ungenaues Abstandsmaß haben keine nennenswerten Auswirkung auf die Qualität der Modelladaption, solange sichergestellt ist, daß ein ansteigender Gradient in Richtung eines besseren Qualitätsmaß vorliegt.
Eine Möglichkeit, Abstandswerte direkt zu speichern bieten Voxelräume. Dazu werden in einem ersten Verarbeitungsschritt alle Meßpunkte der Scandaten in den Voxelraum eingetragen. Jedes Voxel, in dem ein Meßpunkt liegt wird mit dem Wert Null initialisiert. Über eine einfache Filteroperation werden sukzessiv alle unmittelbaren Nachbarn der belegten Voxel mit einer Eins belegt. Mit jedem weiteren Iterationsschritt werden dann alle nicht belegten Voxel mit einem um eins gegenüber ihrem Nachbarn erhöhten Wert belegt [Kubitschek 98]. In Abbildung 4 ist der Schnitt durch einen Voxelraum nach der Initialisierung und nach der vollständigen Belegung dargestellt.

				0	0			
			0			0		
		0					0	
		0				0	0	
		0			0			
			0	0				

5	4	3	2	1	1	2	3	4
4	3	2	1	0	0	1	2	3
3	2	1	0	1	1	0	1	2
2	1	0	1	2	2	1	0	1
2	1	0	1	2	1	0	0	1
2	1	0	1	1	0	1	1	2
3	2	1	0	0	1	2	2	3
4	3	2	1	1	2	3	3	4
5	4	3	2	2	3	4	4	5

Abbildung 4: Aufbau eines Voxelraums (initiale und vollständige Belegung)

Zur Berechnung des Abstands eines Hautpunktes zu den Scandaten reicht es aus, das entsprechende Voxel im Voxelraum auszulesen. Die Summe der Voxel aller relevanten Hautpunkte ergibt eine Maßzahl, die als Qualitätsmaß dient. Die komplette Belegung eines Voxelraumes (zwei Millionen Einträge) mit Abstandswerten ist typischerweise in etwa zehn Sekunden durchgeführt. Die Qualität der Modelladaption kann durch die Evolutionären Algorithmen soweit gesteigert werden, daß über geometrische Nachberechnungen keine relevanten Verbesserungen mehr erreicht werden können.

5 Ergebnisse

Mit dem vorgestellten Verfahren ist es möglich, eine vollständige Modelladaption innerhalb von wenigen Minuten zu berechnen. Abbildung 5 zeigt ein Ergebnis dieser Modelladaption. Die Scandaten sind einmal mit der Modellstruktur und einmal mit der schattierten Hautdarstellung überlagert. Das Modell beinhaltet nach der Modelladaption sowohl die Körperform der Meßperson, als auch die Haltung, die die Meßperson während des Meßvorgangs eingenommen hatte.

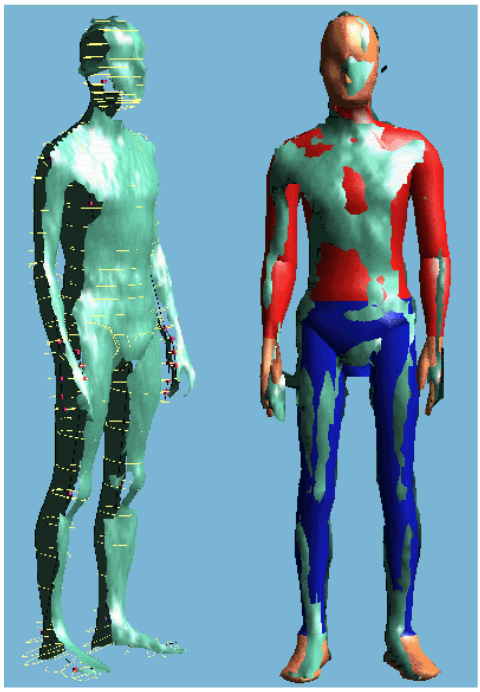

Abbildung 5: individualisiertes Modell mit einem Scan überlagert

Die Übertragung der geometrischen Information der Meßdaten auf das Menschmodell sorgt nicht nur für eine deutliche Datenkompression. Die Kombination der semantischen Information des Menschmodells mit den Scandaten ermöglicht zusätzlich Operationen, die auf den Meßdaten alleine nicht möglich sind. Über das Menschmodell ist implizit klar, wie ein ganz bestimmtes Körpermaß berechnet werden muß. Größen, wie Bauchumfang, Armlänge oder Schulterbreite müssen nicht über aufwendige Algorithmen aus den Scandaten berechnet werden, sondern können direkt dem CAD-Modell entnommen werden. Darüber hinaus ist eine natürliche Definition beliebiger Körpermaße möglich. Eine Berechnungsvorschrift, die auf einer Grundinstanz des Menschmodells definiert wird, kann auf jedem individualisierten Modell direkt angewendet werden.
Die Berechnung des inneren Modells ermöglicht zusätzlich die Analyse der Körperhaltung der Meßperson. Haltungsanomalien, wie zum Beispiel Rundrücken oder Hohlkreuz können durch die Untersuchung der Gelenkwinkel des inneren Modells erkannt werden. Die Kinematik erlaubt es, die Haltung im Rechner zu korrigieren oder auch auf eine für die Vermessungsaufgabe relevante Körperhaltungen einzustellen. Um Maße einer sitzenden Person (z.B. für Motorradbekleidung) zu bestimmen, muß die Person nicht im Sitzen vermessen worden sein.
Somit stellt ein derart individualisiertes CAD-Menschmodell ein wertvolles Hilfsmittel zur kostengünstigen, automatisierten Fertigung von Maßbekleidung dar. Alle notwendigen Maße von Personen können direkt aus dem CAD-Modell entnommen und mit entsprechenden Programmen in Schnittmuster umgesetzt werden. Über Einzellagenzuschneidemaschinen ist bereits heute der automatische Zuschnitt individueller Schnittmuster möglich. Die Automatisierung des Prozesses von der Vermessung bis hin zum fertigen Anzug garantiert eine wirtschaftliche und kostengünstige

Herstellung von Maßbekleidung.
Die Anwendung des individualisierten CAD-Modells geht aber weit über die Anwendung als virtuelle Kleiderpuppe hinaus. Die kinematischen Funktionalitäten des CAD-Modells, sowie das zugrundeliegende ergonomische und anthropometrische Wissen ermöglicht eine Vielzahl weiterer Anwendungen. Neben anthropometrischen Untersuchungen sind Anwendungen im Bereich der Virtual Reality, der Medizin (Orthopädie) und der ergonomischen Arbeitsplatzgestaltung denkbar.

6 Literaturverzeichnis

[Hansen 96] Hansen, G.: *Konzeption und Realisierung eines Sensorsystems zur dreidimensionalen Erfassung anthropometrischer Daten;* Diplomarbeit am Fachbereich Informatik der Universität Kaiserslautern, April 1996.

[Hemmer 97] Hemmer, T.: *Konzeption und Realisierung einer Evolutionsstrategie zum Abgleich eines anthropometrisch-kinematischen Menschmodells mit dreidimensionalen Sensordaten;* Diplomarbeit am Fachbereich Informatik der Universität Kaiserslautern, Oktober 1997.

[Kubitschek 98] Kubitschek, K.-D.: *Implementierung und Visualisierung eines Voxeldatenraumes zur effizienten Generierung der Fitneßfunktion eines evolutionären Algorithmus;* Projektarbeit am Fachbereich Informatik der Universität Kaiserslautern, 1998 (noch nicht fertiggestellt).

[Mitchell 96] Mitchell, M.: *An Introduction to Genetic Algorithms.* Massachusetts Institute of Technology, 1996.

[Nissen 97] Nissen, V.: *Einführung in Evolutionäre Algorithmen;* vieweg Computational Intelligence; ISBN 3-528-05499-9.

[Schwefel 96] Schwefel, H.-P.; Beck, Th.: *Künstliche Evolution - eine intelligente Problemlösungsstrategie?* Universität Dortmund, 1996.

[Seidl 94] Seidl, A.: *Das Menschmodell RAMSIS - Analyse, Synthese und Simulation dreidimensionaler Körperhaltungen des Menschen;* Dissertation am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, 1994.

[Trieb 95] Trieb, R.: *Erfassung, Analyse und Synthese anthropometrischer Körperbaudaten zur Automatisierung von Design- und Fertigungsprozessen bei Individualprodukten;* Forschungsantrag bei der Stiftung Rheinland-Pfalz für Innovation, 1995.