

Diplomarbeit

im Rahmen des Forschungsprojekts TOPAS

Konzeption und Realisierung eines Sensorsystems zur dreidimensionalen Erfassung anthropometrischer Daten

Guido Hansen

April 1996

Bearbeitet von: Guido Hansen
Ludwigstr.4
67677 Enkenbach-Alsenborn

Eingereicht am: 19. April 1996

Betreuung der Diplomarbeit: Prof. Dr. rer. nat. E. von Puttkamer
Universität Kaiserslautern, Fachbereich Informatik

Dipl. Inform. Rainer Trieb
Universität Kaiserslautern, Fachbereich Informatik

Dipl. Inform. Helmut Hamfeld
Universität Kaiserslautern, Fachbereich Informatik

Anschrift: Universität Kaiserslautern
Fachbereich Informatik
AG Robotik und Prozessrechentchnik
Prof. Dr. rer. nat. E. von Puttkamer
Postfach 3049
67653 Kaiserslautern



Erklärung

Hiermit erkläre ich, Guido Hansen, die vorliegende Diplomarbeit selbständig verfaßt und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt zu haben.

Kaiserslautern, im April 1996

Guido Hansen

Diese Diplomarbeit wurde im Rahmen des TOPAS Projektes der AG Prozeßrechentechnik und Robotik Prof. Dr. v. Puttkamer an der Universität Kaiserslautern erstellt. Die verantwortlichen Betreuer der Arbeit waren Rainer Trieb und Helmut Hamfeld. Ich möchte mich bei beiden für eine produktive Zusammenarbeit bedanken. Sie haben mir durch die exzellente Teamarbeit eine ideale Arbeitsumgebung geschaffen.

Weiterhin möchte ich mich bei den Diplomanden und Projektarbeitern des TOPAS-Projektes für einige hilfreiche Anregungen und gute Zusammenarbeit bedanken.

Ich möchte diese Arbeit meiner Frau Katja Brück-Hansen und meinem Sohn Kai widmen. Ohne ihre Unterstützung und Geduld wäre diese Arbeit in dieser Zeit nicht möglich gewesen.

1 EINFÜHRUNG UND MOTIVATION	6
1.1 MABANZUG VON DER STANGE	6
1.2 ANTHROPOMETRIE - MEßSYSTEM UND PROJEKTKONZEPTION.....	6
1.2.1 3D Menschmodell RAMSIS	8
1.3 MODELLADAPTION	9
1.4 DAS 3D MENSCH ANTHROPOMETRIE MEßSYSTEM	11
2 OPTISCHE SENSORSYSTEME	14
2.1 ÜBERBLICK OPTISCHE SENSORSYSTEME	14
2.2 PASSIVE OPTISCHE SENSORSYSTEME.....	14
2.2.1 Monokulare Systeme.....	14
2.2.2 Binokulare Systeme.....	16
2.3 AKTIVE OPTISCHE SENSORSYSTEME	17
2.3.1 Koaxiale Systeme	17
2.3.2 Strukturlichtverfahren.....	18
3 3D SCANNER NACH DEM LICHTSCHNITTVERFAHREN	21
3.1 MEßKOPF DES LICHTSCHNITTVERFAHRENS.....	22
3.1.1 2D Sensorik	22
3.1.2 RS 2200 Ranger PC	27
3.1.3 Algorithmus	36
3.2 OPTISCHE KOMPONENTEN DES MEßKOPFES.....	38
3.3 ELEKTROMECHANISCHE KOMPONENTEN DES SCANNERS	41
3.3.1 Mechanische Komponenten	41
3.3.2 Steuerung, Regelung	44
3.3.3 Hauser Steuerung.....	46
3.4 PIN HOLE KAMERAMODELL.....	49
3.5 PARAMETERREDUZIERTER SENSORKALIBRIERUNG	53
3.6 ECHTZEITFÄHIGKEIT VON BETRIEBSSYSTEMEN.....	57
4 RESUMEE UND AUSBLICK	62

ANHANG

I LITERATUR.....	63
II TECHNISCHE ZEICHNUNGEN.....	65
III KABELVERBINUGNEN.....	68
IV SOFTWAREMODULE.....	72
V BEDIENUNGSANLEITUNG.....	74

1

Einführung und Motivation

1 Einführung und Motivation

1.1 Maßanzug von der Stange

In den meisten Bereichen der industriellen Fertigung führte die Notwendigkeit preisgünstiger Produkte zu Einsatz von Massenproduktion. Dies hat zur Konsequenz, daß Produkte nur noch in wenigen Bereichen individuell hergestellt werden können. Dem menschlichen Bedürfnis nach Individualität wird oft nur noch durch die Auswahlmöglichkeit aus einer Produktpalette Rechnung getragen. Moderne Fertigungsanlagen haben durch den Einsatz rechnergesteuerter Produktionsanlagen heute jedoch wiederum häufig die Möglichkeit, jedes Stück individuell zu fertigen, ohne wesentlich höhere Kosten zu verursachen. Der Hauptgrund für die bei der Individualproduktion heute anfallenden Kosten ist also weniger in der Einzelstückfertigung als in der aufwendigen Aquisition kundenspezifischer Daten zu suchen. Deshalb stellt sich die Frage, ob sich nicht wesentliche Anteile der notwendigen Individualdaten automatisch erheben lassen. Einen wichtigen Teilaspekt hierbei stellt die äußere Geometrie des Produktes (z.B. Größe und Zuschnitt eines Bekleidungsstücks, Passform eines Autositzes), also Daten, die sich aus der Körpergeometrie des Kunden ableiten lassen, dar. Deshalb ist es, als erster Schritt zur wirtschaftlichen Herstellung von Individualprodukten notwendig, genau diese Lücke in der Automatisierung zu schließen. Aus dieser Überlegung heraus ist das Forschungsprojekt TOPAS¹ entstanden, dessen Ziel in der Entwicklung und Realisierung eines Systems zu Erfassung, Analyse und Synthese anthropometrischer Körperbaudaten zur Automatisierung von Design- und Fertigungsprozessen liegt.

1.2 Anthropometrie - Meßsystem und Projektkonzeption

Auf dem Markt existieren mehrere Meßsysteme (Cyberware, Vitronic), die sich zur dreidimensionalen Erfassung des Menschen eignen. Diese Systeme verfolgen jedoch verschiedene Zielsetzungen. Der Scanner von Cyberware legt den Schwerpunkt auf die gleichzeitige 3D- und Texturdatenerfassung des Objektes, und ist damit speziell für den Bereich Computergraphik-

¹ TOPAS: Touchless Perception and Anthropometric Adaption System

und Animation gedacht. Das System von Vitronic versucht eine lückenlose, extrem exakte Objektvermessung, wobei 24 Kameras benötigt werden. Dieser Scanner umbaut einen Raum von etwa 75 Kubikmeter bei einem Gesamtgewicht von über einer Tonne. Solche Systeme stellen nur Teillösungen dar, da ihnen ein geschlossenes, übergreifendes Einsatzkonzept fehlt, welches sie an eine spezielle Zielapplikation ausrichten würde. Für den angedachten Einsatz sind diese Systeme sowohl überdimensioniert, als auch zu teuer.

Im Rahmen des TOPAS Projektes steht daher zunächst die Entwicklung und Realisierung eines geeigneten (an der Anwendung ausgerichteten) Meßsystems zur Beschaffung anthropometrischer Information im Vordergrund, was Gegenstand der vorliegenden Arbeit war.

Da die Auslegung eines Sensorsystems an seiner Nutzung im Gesamtzusammenhang des Forschungsprojektes ausgerichtet sein muß, soll im folgenden zunächst das Einsatzkonzept des Projektes vorgestellt werden. Hierfür wird vorausgesetzt, daß die Geometriedaten in ausreichender Qualität vorhanden sind. Die Konzeption eines für die Anwendung geeigneten Meßsystems, wird in Kap. 2 beschreiben.

Sind die Geometriedaten z.B. in Form einer 3D Punktwolke vorhanden, stellt sich die Frage nach der automatischen Interpretierbarkeit dieser Daten. An dieser Stelle ist es zur Unterstützung des Analyseprozesses sinnvoll, sich der Informationen eines Menschmodells zu bedienen.

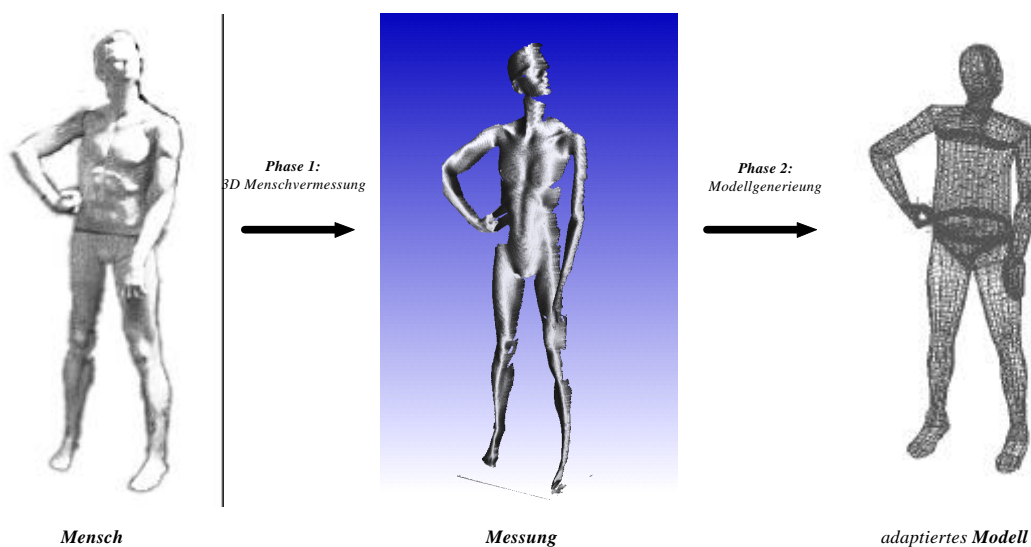


Abb.1.2.1 Arbeitsschritte im TOPAS Projekt

Ein Menschmodell ist eine auf bestimmte Aspekte reduzierte Darstellung des Menschen. Ein *anthropometrisches* Menschmodell beinhaltet also mindestens die statistisch korrekte Darstellung aller wesentlichen menschlichen Gliedmaßen. Dies umfaßt sowohl die innere Struktur (Repräsentation des Skeletts) als auch die äußere Geometrie (Ausprägung einer Haut). Alle

Körperteile tragen in einem Modell neben geometrischen und kinematischen Eigenschaften durch ihre Bezeichnung auch Semantik.

Der grundlegende Vorzug einer modellgestützten Interpretation der Meßdaten besteht darin, durch einen Anpaßprozess des Menschmodells an die Meßdaten, alle zur Ableitung produktspezifischer Merkmale notwendigen semantischen Informationen, automatisch hinzugewinnen zu können. So ist es z.B. nach einer erfolgreichen Anpassung möglich etwa den Bauch- oder Brustumfang zu bestimmen, da im Modell die Bedeutung der Begriffe Bauch oder Brust definiert sind. Darüberhinaus ist es erst am Modell möglich standardisierte Meßvorschriften zu definieren.

Die automatische Interpretation der Meßdaten (und damit die automatische Ableitung produktspezifischer Information) kann also durch den Rückgriff auf die semantischen Informationen eines Modells stark vereinfacht werden. Ist das Modell darüber hinaus noch in seiner konkreten Ausprägung an individuelle Gegebenheiten anpassbar, ist es denkbar, für weitere Arbeitsschritte ganz auf den Rückgriff auf die Meßdaten zu verzichten und nur noch mit dem angepaßten Modell zu arbeiten. Das Modell trägt dann zum einen alle relevanten Individualdaten, zum anderen jedoch auch Semantik. Das modellbasierte Arbeiten ermöglicht es mit unvollständigen oder sogar fehlerbehafteten Meßwerten (z.B. Meßwertrauschen) zu arbeiten, da fehlende Information durch das Modell ergänzt und fehlerhafte Information korrigiert werden kann.

Dem Einsatz von geeigneten Sensorsystemen zur Automatisierung und damit dem Übergang zur Wirtschaftlichkeit kommt eine Schlüsselstellung sowohl in der Individualproduktion, als auch in Bereichen, die sich für die Individualproduktfertigung eignen, zu. Dies betrifft insbesondere die Bereiche Textilindustrie (Maßbekleidung) und medizinische Orthopädie (körpergerechte Sitz-Liegekissen, Prothesen etc.). In der Ergonomieforschung (Automobilindustrie, Arbeitsplatzgestaltung) besteht weiterhin direkter Bedarf nach individualisierten CAD Menschmodellen.

Für den Textilversandhandel könnte eine automatische Menschvermessung interessant sein, da die Vermessung, die bisher durch den Kunden selbst erfolgt, durch eine automatische Erhebung wesentlich weniger fehlerträchtig ist und damit der Versand kostengünstiger wird.

1.2.1 3D Menschmodell RAMSIS

Die Grundlage der Arbeit im TOPAS Projekt bildet das Menschmodell RAMSIS. Hierbei handelt es sich um ein komplexes Softwarepaket, das ursprünglich für Ergonomieaufgabenstellungen der Automobilindustrie entworfen wurde. RAMSIS modelliert anthropometrische Zusammenhänge am Menschen. Körperbau und Gestalt sind in weiten Grenzen vom Benutzer

parametrisierbar. Das geometrisch kinematisches Modell kann restriktionsbasiert, d.h. durch Definition von Relationen zwischen Körperelementen und Umgebungselementen bewegt werden. RAMSIS wurde als Ergonomie- Meßwerkzeug konzipiert, was sich in Analysemöglichkeiten für Erreichbarkeit, Komfort und Sicht widerspiegelt. Die Daten, die bei Generierung einer Modellinstanz benutzt werden, basieren auf einer statistisch erhobenen, anthropometrischen Typologie. Insgesamt lassen sich so 90 verschiedene Grundtypen erzeugen. Neben restriktionsbasiertem Bewegen ist die direkte Einstellung von Gelenkwinkeln im Rahmen der menschlichen Physiologie möglich.

Diese Beschränkungen der Parametrisierbarkeit dienen einem komfortablen Zugang zur Software, können jedoch für eine konkrete Anpassung auch abgeschaltet werden, so daß das Modell den Haltungs- und Gestaltdaten einer konkreten Person ohne Einschränkung angepaßt werden kann. Für einen prototypischen Betrieb ist es möglich den Modellkern ohne graphische Benutzeroberfläche zu starten. Dadurch lassen sich mehrere Modellkerne auf einem Rechner zu betreiben, und verteilt von anderen Rechnern nutzen. Hierzu ist im TOPAS Projekt eine Remote- Kernel und auch eine plattformübergreifende Remoteanbindung [HÜL 96] entstanden, die das Entwickeln und Austesten von Adaptionsoftware erleichtern.

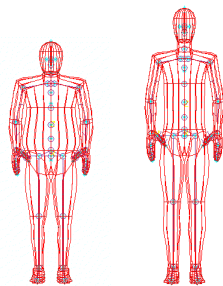


Abb. 1.2.2

Zwei extreme Grundtypen



Abb. 1.2.3

Skelett des Modells

1.3 Modelladaption

Der Abgleich der Meßdaten mit dem Modell läßt sich prinzipiell in zwei unterschiedliche Schritte unterteilen. Dies ist zum einen die Anpassung der Haltung d.h. der Abgleich der Haltung des Modells mit der Haltung der Person zum Messzeitpunkt, zum anderen die Anpassung der Gestalt, also der äußeren Erscheinung. Diese beiden Gesichtspunkte sind deshalb zu trennen, da die Gestalt über große Zeiträume hinweg eine Invariante ist. Im Gegensatz dazu ist die Haltung von der momentanen Stellung der Gelenke bestimmt. Diese strikte Trennung muß sich daher auch bei einer Anpassung des Modells widerspiegeln.

Anwendbare Meßverfahren (vgl. Kap. 1.4.) können den Körper nur von außen erfassen, womit ein direkter Zugriff auf innere Strukturen verborgen bleibt. Eine Anpassung kann sich daher nur auf Merkmale stützen, die sowohl den gemessenen Daten als auch dem Modell gemeinsam sind. Diese Merkmale können direkt beiden Repräsentationen zu eigen sein oder indirekt nachträglich bestimmt werden.

Eine Möglichkeit zur Anpassung besteht im Aufbau einer neuen inneren Struktur für Meßdaten und Modell mit anschließendem Haltungs- und Gestaltabgleich. Hierbei werden im Modell und in den Meßdaten Grundkörper (z.B. Kugeln) oder komplexere Körper hineingelegt. Die Verkettung dieser Grundkörper ergibt dann eine innere virtuelle Struktur, die am Modell und am Meßdatensatz ähnlich ist.

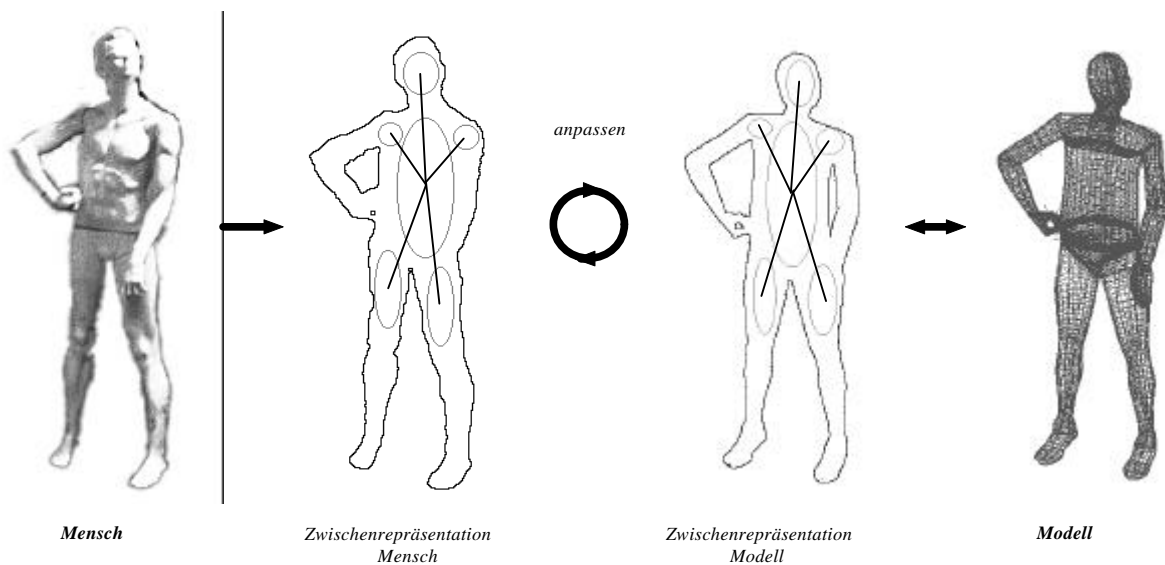


Abb. 1.3.1 Anpassungsprozess über eine gemeinsame innere Struktur

Alternativ zur Generierung einer neuen inneren Struktur kann die Anpassung über gemeinsame äußere Merkmale vollzogen werden. Hierbei werden gemeinsame von außen sichtbare Merkmale (z.B. Krümmung der Oberfläche) des Körpers ermittelt und auf eine Kugelfläche projiziert, die den Körper virtuell umgibt. Diese Darstellung ist örtlich invariant d.h. Krümmungsmerkmale, die auf dem Körper zusammengehören, werden auch in der Projektion zusammenbleiben, und sie läßt sich einfach in ein zweidimensionales Koordinatensystem abbilden. So ergibt sich ein Art Merkmalskarte des Körpers (vgl. Abb. 1.3.2). Der Anpassungsprozess geschieht auch hier wieder auf einer Zwischenrepräsentation, die artgleich vom Modell und von der Meßwolke abgeleitet werden muß.

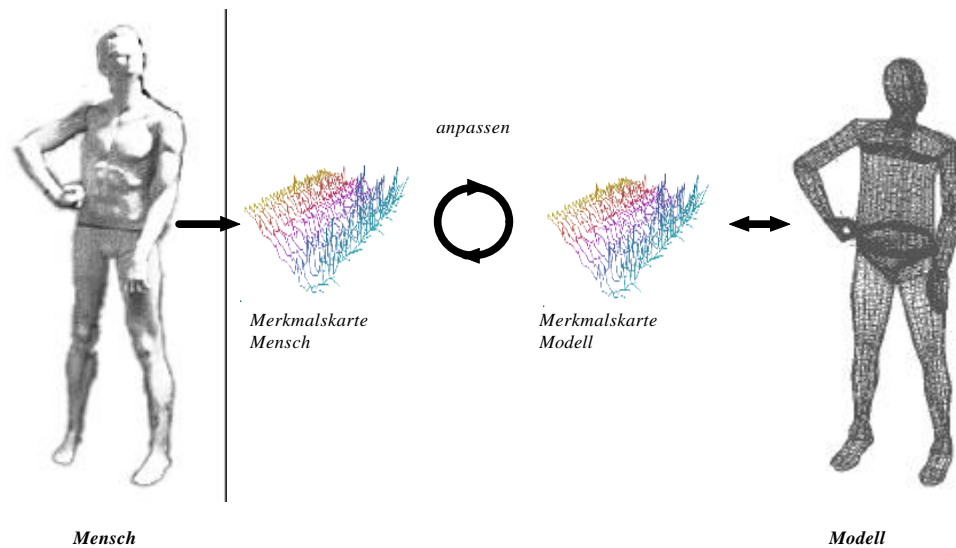


Abb. 1.3.2 Anpassungsprozess über eine gemeinsame äußere Struktur

Die Methode der Anpassung über eine Zwischenrepräsentation bietet den Vorteil, daß in den Anpassungsalgorithmen kein implizites Wissen über das Modell verwendet werden muß. Eine Verallgemeinerung auf die Anpassung anderer (nicht Mensch-) Modelle ist somit prinzipiell möglich.

1.4 Das 3D Mensch Anthropometrie Meßsystem

Beim Vermessen des menschlichen Körpers ergeben sich einige Randbedingungen, die im folgenden erörtert werden. Die meisten Bedingungen folgen direkt aus der Tatsache, daß es sich bei dem zu vermessenden Objekt um einen Menschen handelt. Andere Randbedingungen folgen aus dem Projektkonzept und dem Anwendungsbereich.

Randbedingungen für die Menschvermessung

- *minimale Belastung*: Das Meßprinzip darf die Gesundheit der Person nicht oder nur in zumutbarem Maß belasten. Dies hat zur Konsequenz, daß Verfahren wie z.B. Tomographie, die auch innere Strukturen sichtbar machen, ausscheiden.
- *minimale Meßzeiträume*: Das Meßsystem muß das Vermessen des ganzen Körpers in einem möglichst kurzen Zeitraum bewältigen, um Bewegungsunsicherheiten weitestgehend zu vermeiden da der Mensch nur über sehr kurze Zeiträume annähernd bewegungslos bleiben kann. Die Vermessung unbewegter Gegenstände kennt solche Randbedingungen im Allgemeinen nicht.

- *Intimsphäre:* Um die Intimsphäre der Person zu wahren, muß das System in einer Art Umkleidekabine betrieben werden können, was den Ausmaßen des Gesamtsystems enge Grenzen setzt.

Randbedingungen aus dem Anwendungskonzept:

- *keine Zwangshaltung:* Das Verfahren darf die Person nicht in eine unnatürliche Haltung zwingen. Da u.U. die Haltungsdaten zur Herstellung von Zuschnittsmustern für Bekleidung benötigt werden, muß eine möglichst natürliche Stehhaltung eingenommen werden können. Diese Forderung schließt zugleich Verfahren aus, die nicht berührungslos arbeiten.
- *großzügige Meßtiefe:* Gerade für Menschen mit nicht normgerechtem Körperbau sind individuelle Produkte besonders interessant. Das Meßsystem muß also einen so gearteten Aufbau und Meßtiefe besitzen, um auch diesen Anforderungen zu genügen.
- *Wirtschaftlichkeit:* Die Kosten für den Aufbau eines Systems dürfen eine Schranke, die den wirtschaftlichen Einsatz in Frage stellen würde, nicht überschreiten.
- *Einsetzbarkeit:* Das System soll möglichst auch für den Prototypen aufzeigen, daß eine industrielle Einsetzbarkeit möglich ist. Dies schränkt die Freiheit bei der Eigenentwicklung und den Eigenbau von Teilen und Geräten ein, und begünstigt den Einsatz industriell verfügbarer Komponenten.
- *Datenqualität und Vollständigkeit:* Für die Genauigkeit der Meßdaten genügt eine Erfassung im Millimeterbereich. Durch modellgestützte Dateninterpretation ist es möglich mit teilweise unvollständigen Datensätzen zu arbeiten.

Diese Randbedingungen lassen sich quantitativ folgendermaßen darstellen:

<i>Messzeit</i>	<i>< 2 Sekunden</i>
<i>Messauflösung vertikal</i>	wenige Millimeter
<i>Messauflösung horizontal</i>	weniger Millimeter
<i>Messvolumen</i>	ca. 1 x 1 x 2.2 Meter
<i>Anzahl erfaßter Oberflächen</i>	2 (Vorder- und Rückseite)
<i>Arbeitsprinzip</i>	optisch
<i>Gesamtabmessungen</i>	< 2.5 x 1.5 x 2.8 Meter
<i>Kosten</i>	<< 100 TDM

In Kap. 2 soll ein Überblick über verschiedenen optischen Meßprinzipien gegeben werden. Gleichzeitig wird versucht die prinzipiellen Lösungsmöglichkeiten unter den soeben erörterten Randbedingungen zu bewerten, um die Entscheidung für das ausgewählte Konzept zu begründen.

2 Optische Sensorsysteme

2.1 Überblick Optische Sensorsysteme

Der andauernde technische Fortschritt führt zu immer neuen Entwicklungen auch auf dem Bereich optischer Sensorsysteme. Diese profitieren einerseits von der Weiterentwicklung und Miniaturisierung immer leistungsfähiger Rechnerhardware, zum anderen jedoch auch von den Weiterentwicklungen der Sensorik im Bereich der Halbleiterfertigung zu kleineren leistungsfähigeren Systemen mit immer besserer Auflösung. Stetige Verbesserung optischer und mikro-mechanischer Geräte tragen zusätzlich zu einer Weiterentwicklung optischer Sensorsysteme bei. Die folgende Diskussion grundlegender Meßprinzipien und deren Einsetzbarkeit muß deshalb vor dem Hintergrund des heutigen Stands der Technik gesehen werden.

Aktuell verfügbare, optische Sensorsysteme lassen sich nach ihrem Meßprinzip in aktive und passive Systeme einteilen. Passive optische Sensorsysteme zeichnen sich dadurch aus, daß sie nur Licht aus der Szene aufnehmen, und nicht wie aktive Sensorsysteme die Szene künstlich beleuchten um Informationen zu extrahieren.

2.2 Passive optische Sensorsysteme

Bei passiven optischen Sensorsystemen unterscheidet man zwischen monokularen Systemen und Triangulation (binokular, trinokular), also Triangulationsystemen mit ein, zwei oder drei Bildaufnehmern. In [AYA-91] wird gezeigt, daß Verfahren, die auf mehr als drei Kameras beruhen, keinen zusätzlichen qualitativen Nutzen bringen.

2.2.1 Monokulare Systeme

Bestehende Ansätze, aus nur einem bildgebenden Sensor 3D-Informationen zu ermitteln, arbeiten meist nach dem *Fokus Verfahren*. Hierbei wird über einen Aufnahmezeitraum der Kamerafokus kontinuierlich über einen bestimmten Bereich verstellt. Durch eine anschließende Analyse der Schärfe bestimmter Bildbereiche der Bildfolge und dem Vergleich mit dem jeweils eingestellten Fokus kann auf die Entfernung des Bildbereichs geschlossen werden. Zum Gelin-

gen dieses Vorgehens ist ein möglichst gut strukturiertes Objekt (gute Ausleuchtung) mit idealerweise vielen Kanten notwendig.

Es ist prinzipiell unmöglich aus lediglich *einem* monokularen Kamerabild ohne Wissen über die Szene Entfernungsinformationen zu gewinnen. Unter bestimmten Randbedingungen (Wissen über die Lage der Objekte in der Szene) ist es jedoch möglich, aus einem 2D Bild Informationen zu extrahieren, die für die gegebene Problematik Anthropometrievermessung am Menschen geeignet sein können.

Im TOPAS Projekt werden zeitgleich mit der Entwicklung eines 3D Scanners die Möglichkeiten eines monokularen $2\frac{1}{2}D$ Sensorsystems untersucht, das typischerweise nur aus einer Kamera (und einem Zollstock) besteht [HEI 96] und somit ideal für einen preiswerten mobilen Vermessungseinsatz geeignet ist.

Zunächst werden hierbei von der Person unter geeigneten Beleuchtungsbedingungen mit einer einfachen Videokamera Bilder aufgenommen. Anschließend wird aus den 2D Grauwertbildern mit Low-Level Bildverarbeitungsmechanismen das Konturmerkmal (des Schattenrisses in Front- und Seitenansicht oder beides gleichzeitig über Spiegel) ermittelt.

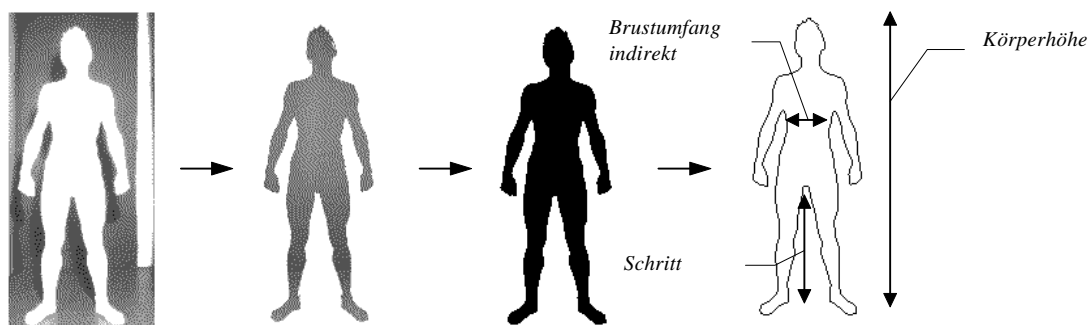


Abb. 2.2.1.1 Ableitung von Merkmalen am Schattenriß

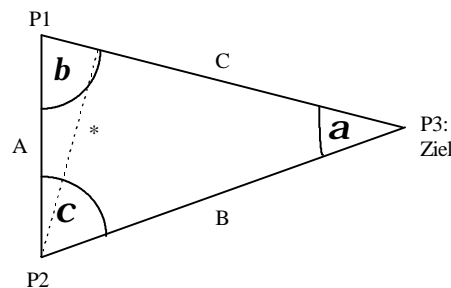
Nimmt man die Person modellhaft als zweidimensional innerhalb einer virtuellen Meßebeane an, besteht ein berechenbarer Zusammenhang zwischen Weltkoordinaten (der flächenhaft angenommenen Person) und den Pixelkoordinaten des Grauwertbildes und man kann bestimmte Längenmerkmale quantitativ (z.B. Körpergröße und Schritthöhe etc.) bestimmen. Durch das Zusammenführen der Daten verschiedener Ansichten lassen sich zum Teil auch Umfangsmerkmale annähern. Für diese Maße (z.B. Brustumfang) muß untersucht werden, ob sie mit ausreichender Genauigkeit durch z.B. Kreise oder Ellipsen angenähert werden können.

Die Bestimmung von Längen verschiedener Extremitäten (z.B. Unterarmlänge) kann durch die Einhaltung einer bestimmten Meßhaltung (z.B. Pharaonenhaltung) erleichtert werden.

2.2.2 Binokulare Systeme

Dieses auch als Stereoskopie bezeichnete Verfahren arbeitet nach dem *Triangulationsprinzip*.

Das Triangulationsprinzip beruht auf der Ausnutzung einfacher trigonometrischer Beziehungen (vgl. Abb.2.2.2.1 für den zweidimensionalen Fall)². Hierbei markieren P1 und P2 jeweils eine Kamera. Vom Zielpunkt P3 gehen jeweils 2 Lichtstrahlen unter den Winkeln β und χ ein. Durch die einfache mathematische Beziehung lassen sich die Abstände B und C bei bekanntem Basisabstand³ A bestimmen.



$$B \sin a = A \sin b \quad \text{bei (*)}$$

$$B = A \frac{\sin b}{\sin a}$$

$$|B| = A \frac{\sin b}{\sin(b+c)}$$

$$|C| = A \frac{\sin c}{\sin(b+c)} \quad \text{analog}$$

Abb. 2.2..2..1 Triangulation

Wird ein Objekt aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen, kann seine dreidimensionale Position durch Suche nach korrespondierende Bildpunkten in beiden Bildern ermittelt werden. Zum Gelingen einer 3D-Positionsbestimmung ist eine rechenintensive Korrespondenzsuche auf beiden Bildern notwendig um sicherzustellen, daß jeweils ein Pixel in beiden Bildern vom gleichen Zielpunkt herrührt. Ist dies sichergestellt, können der Winkel β und χ bestimmt und die Entfernung gemäß Abb. 2.2.2.1 errechnet werden. Die plausible Korrespondenzsuche stellt das größte Problem der Stereoskopie dar. Ist das zu untersuchende Objekt nicht genügend strukturiert, mißlingt ein plausibler Match und es kann kein sinnvoller Entfernungswert ermittelt werden. Kritischer als das Fehlen von Meßinformation ist das Bestimmen einer falschen Position, wenn aus nicht korrespondierenden Bildpunkten eine 3D-Position ermittelt wird.

² In Kap. 3.4 werden die Beziehungen für den dreidimensionalen Fall hergeleitet.

³ Als Basisabstand (B) sei hier der Abstand der beiden Objektivbrennpunkte verstanden.

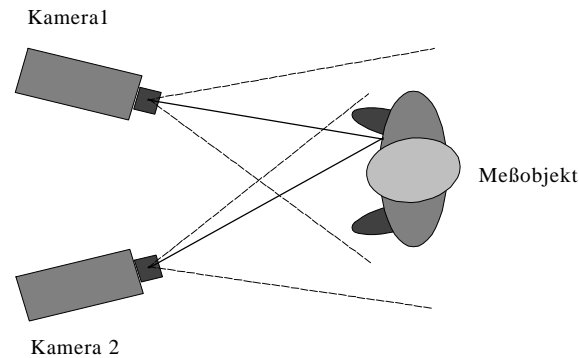


Abb.2.2..2.1 Menschvermessung mit Stereoskopie

2.3 Aktive optische Sensorsysteme

Bei aktiven optischen Sensorsystemen unterscheidet man zwischen Strukturlichtverfahren, Laufzeitverfahren und dem Phasenvergleichsverfahren. Allen gemeinsam ist, daß das Meßsystem aktiv wird, indem die Szene mit einer speziellen Lichtquelle beleuchtet wird.

2.3.1 Koaxiale Systeme

Laufzeitverfahren und Phasenverschiebung arbeiten als koaxiales System, d.h. Lichtquelle und Lichtsensor liegen auf einer Achse. Der Vorteil dieser Systeme besteht in der Vermeidung der bei Triangulationssystemen typischen Abschattungseffekte.

Beim *Laufzeitverfahren* wird die Zeit ermittelt, die zwischen Emission eines Lichtpunkts, der Reflexion am Objekt und Detektion am Empfänger vergeht. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes als konstant angesehen werden kann, ist die Signallaufzeit direkt proportional zur Entfernung. Die Meßrate ist bedingt durch die hohe Signallaufzeit (Lichtgeschwindigkeit) bei diesen Systemen sehr hoch. Jedoch ist für die Vermessung eines 3D Objektes das Ablenken des emittierten und reflektierten Lichtes über Spiegel in zwei Richtungen vorzusehen, was wenn es sehr schnell und präzise geschehen soll, den Aufbau teuer macht.

Ein prinzipbedingtes Problem besteht in der Bestimmung des exakten Rückkehrzeitpunktes, da Licht von verschiedenen Oberflächen (verschiedene Reflexionsgrad der Messoberfläche bzw. unterschiedlicher Orientierung bei diffus reflektierenden Flächen) unterschiedlich stark zurückreflektiert wird. Unterschiedliche Reflexionsverhalten wirken sich als Meßfehler aus, da bei vergleichbar schwacher Reflexion mehr Zeit bis zum Erreichen, einer für die sichere Detektion notwendigen Signalstärke, vergeht. Schwach reflektierende Objektflächen täuschen also eine zu große Entfernung vor. Das Verfahren läßt technische sinnvolle Messungen nur für relativ große Entfernungen zu, da bedingt durch die große Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht extrem kurze Zeiten gemessen werden müssen. Die Auflösung solcher Systeme liegt typi-

scherweise im Bereich weniger Zentimeter, wobei die Reproduzierbarkeit im Bereich eines Zentimeters liegt.

Das *Phasenvergleichsverfahren* betrachtet die Phasenverschiebung zwischen einem abgesendeten hochfrequent periodisch amplitudenmodulierten Signal und dem empfangenen Signal. Hierbei ist der Meßbereich auf eine Wellenlänge beschränkt. Der maximale Meßbereich kann erheblich vergrößert werden, wenn das Signal mit zwei unterschiedlichen Frequenzen moduliert wird. Da dieses Verfahren sehr präzise die Phasenverschiebung ermitteln muß, werden sehr große Empfangseinheiten benötigt. Dies bedingt für eine dreidimensionale Messung großflächige und dadurch schwere Spiegel, die das zurückreflektierte Signal auf einen Sensor umlenken. Die bei der Beschleunigung eines großflächigen Spiegels auftretenden Kräfte und Vibrationen verhindern ein Ablenken mit einer geeigneten Frequenz.

2.3.2 Strukturlichtverfahren

Strukturlichtverfahren zeichnen sich durch ein Arbeitsprinzip aus, das dem der Stereoskopie ähnelt. Eine Kamera wird durch eine Lichtquelle ersetzt, die auf das Meßobjekt ein strukturiertes Lichtmuster projiziert. Dabei handelt es sich typischerweise um einen Lichtpunkt, eine Lichtlinie oder um ein komplexer strukturiertes Lichtmuster (Textur). Das bei der binokularen Stereoskopie auftretende Korrespondenzproblem wird durch die gezielte Einwirkung auf das Bild der Szene entschärft, da es auf die einfachere Aufgabe der Suche nach dem entsprechenden Lichtmuster in *einem* Bild reduziert werden kann.

Lichtschnittverfahren

Beim Lichtschnittverfahren wird im Vergleich zur Stereoskopie eine Kamera durch eine Lichtquelle (z.B. durch einen zeilenartig aufgeweiteten Laser) ersetzt und somit der Arbeitsraum räumlich kodiert. Die so entstehende Triangulationsanordnung reduziert das bestehende Korrespondenzproblem auf das Wiederfinden der Laserkontur im Kamerabild. Da die Art der möglichen Konturen einfach ist, kann dieses Problem wiederum auf das Wiederfinden der Laserlinie in einer Bildzeile oder Spalte reduziert werden. Dieses Meßprinzip liefert nur 2D Daten (flächenhafter Sensor und Lichtlinie) oder nur 1D Abstandsdaten (Liniensensor z.B. Zeilenkamera und Punktlaser). Zur flächenhaften 3D Abtastung müssen also zusätzliche Abtastmechaniken eingesetzt werden, die den Sensor bewegen oder die Richtung des Lichtes ablenken (Spiegel, Prismen).

Abb. 2.3.2.1 zeigt an einem Beispiel die Lichtschnittabtastung eines Kopfes. Die Linien repräsentieren jeweils einzelne Lichtschnitte im Bereich der Augen des Probanden treten Verzerrungen auf, da durch die Optik der Brille hindurchgemessen wurde.



Abb.2.3.2.1 Abtastung eines Kopfes

Abb. 2.3.2.2 verdeutlicht das Meßprinzip anhand einer Triangulationsanordnung. Man erkennt, wie sich die dreidimensionale Struktur des Profils auf dem Sensor abbildet.

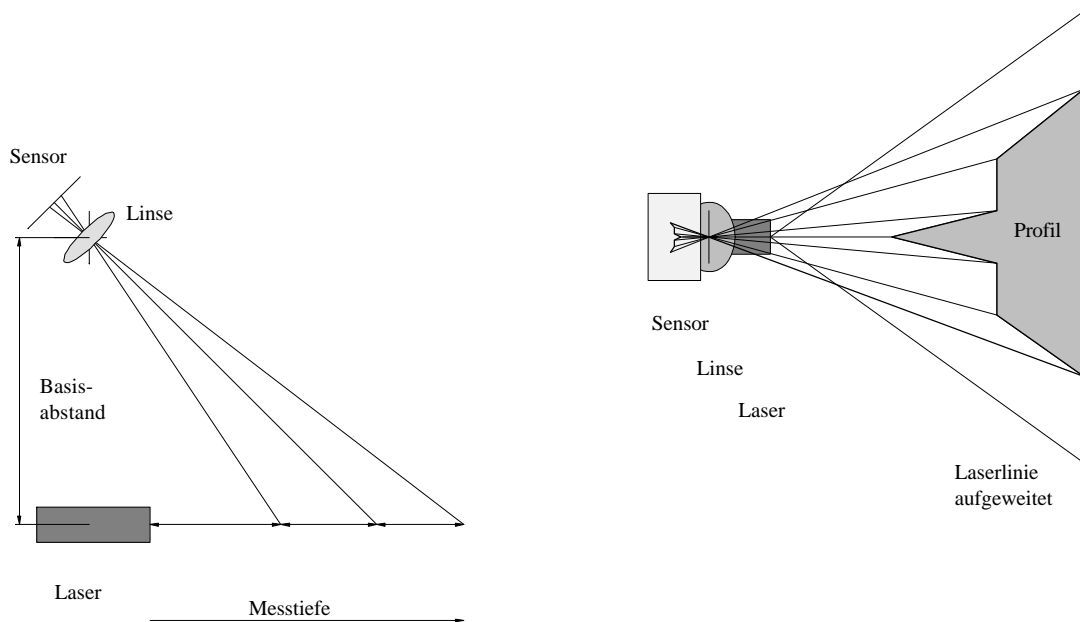


Abb. 2.3.2.2 Meßprinzip Lichtschnittverfahren

Coded Light Verfahren

Das wesentliche Merkmal des Coded Light Verfahrens im Vergleich zu einfachen Lichtschnittverfahren besteht in der raum-zeitlichen Kodierung des zu vermessenden Arbeitsraumes. Dies wird durch sequentielle Projektion von n Gray-kodierten Streifenmustern in den Projektraum realisiert. Durch die Untersuchung der so aufgenommenen Bildfolge ist jeder Bildpunkt eindeutig identifizierbar. Die raum-zeitliche Kodierung des Objekttraums stellt also die Methode dar, mit der das Coded Light Verfahren das Korrespondenzproblem löst. Ist der Bildpunkt eindeutig zugeordnet wird die Triangulationsmethode angewendet, um die dreidimensionale Position eines Rasterpunktes zu berechnen.

Nachteile des Coded Light Verfahrens bestehen vor allem im Preis verfügbarer präziser und schneller Musterprojektoren. Ferner wirken sich Bewegungen des Objektes während der Messung negativ auf die Berechnung einer exakten 3D Position aus.

Andere Strukturlichtverfahren

Das Prinzip der räumlichen Kodierung des Objektraumes mittels eines Laserpunktes oder einer Laserlinie geben nur die einfachsten Ansätze wieder, Triangulation mit strukturiertem Licht zu betreiben. So ist es als erste Verallgemeinerung möglich, mit mehreren Lichtlinien gleichzeitig zu arbeiten. Selbst das Kodieren der Information durch schachbrettartige oder komplexere Beleuchtungsmuster ist denkbar. Jedoch steigt zum einen mit der Komplexität des Musters die Rechenzeit stark an, zum anderen treten u.U. wieder Zuordnungsprobleme auf.

3 3D Scanner nach dem Lichtschnittverfahren

Für einen ersten prinzipiellen Überblick über die Funktionsweise und den Aufbau des 3D-Scanners dient Abb. 3.1. Die beiden Linearführungen werden durch Motore angetrieben und sind so in der Lage die beiden Meßköpfe in vertikaler Richtung zu verfahren. Die Kameras bilden zusammen mit den Lasern jeweils einen Meßkopf, der eine Triangulationsanordnung realisiert. Über Kameraausleger wird ein Basisabstand zwischen Laser und Kamera herbeigeführt. Der Einsatz von zwei Laser innerhalb eines Meßkopfes dient lediglich der Herbeiführung optimierter Reflektionsbedingungen am Meßobjekt (vgl. Kap.3.2). Beide Laser sind derart justiert, daß sie zusammen eine Lichtebene ausbilden.

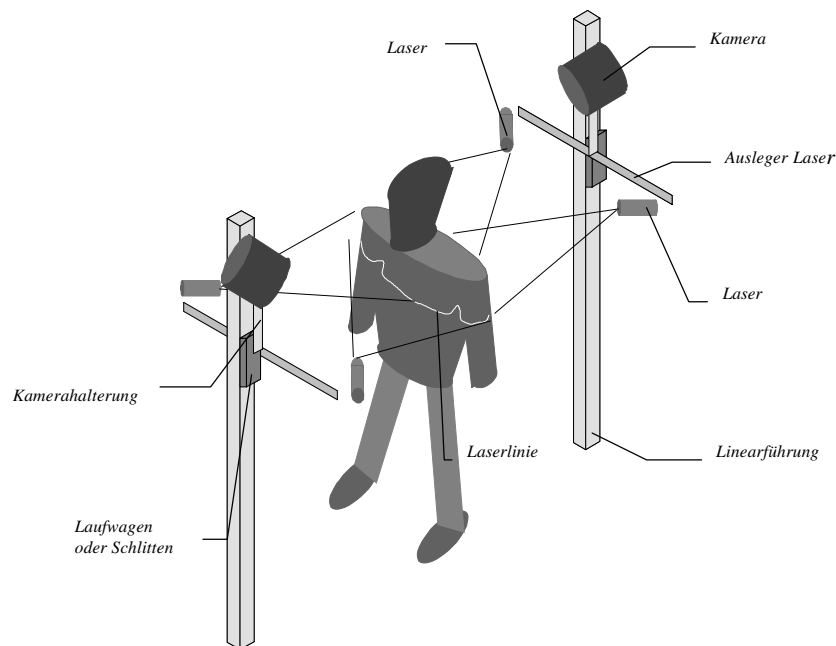


Abb.3.1 Prinzipieller Aufbau des Scanners

Durch die zweiseitige Oberflächenabtastung sind Scans möglich, die bis auf extreme Randbereiche und die Abschattungseffekte des Lichtschnittverfahrens, den Menschen vollständig dreidimensional erfassen.

Abb. 3.2 zeigt den Scan einer Meßpuppe, die mit dem realisierten System generiert wurde.

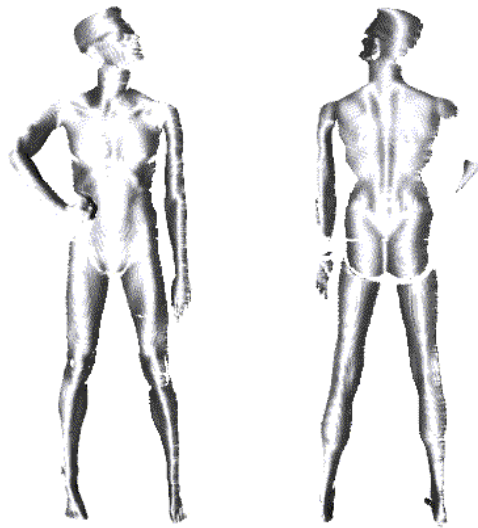


Abb. 3.2 Zweiseitiger Scan

3.1 Meßkopf des Lichtschnittverfahrens

Unter den Komponenten des Messkopf werden alle Komponenten verstanden, die zur Erzielung des 2D Meßprinzips Lichtschnitt benötigt werden.

3.1.1 2D Sensorik

Aus den in Kap. 1.4. aufgezeigten Anforderungen an ein 3D Meßsystem ergeben sich konkrete Randbedingungen für den Meßkopf des 3D Scanners. Teilweise resultieren diese Restriktionen auch aus den verfügbaren, zum Scannen notwendigen, mechanischen Komponenten.

- Anzahl der Lichtschnitte $\gg 100$: Dies wird durch die angestrebte Gesamtmeßzeit von unter zwei Sekunde bedingt. Bei einer Meßzeit von 2 Sekunden und einer Verfahrenhöhe von 2 Meter ergibt sich so eine vertikale Meßauflösung von etwa einem Zentimeter. Eine Meßrate von mehr als 200 Hz ist anzustreben. Dadurch kann die Gesamtmeßzeit auf etwa eine Sekunde gedrückt werden, um Bewegungsunsicherheiten weitestgehend zu vermeiden.
- geringes Gewicht des Meßkopfes < 5 kg : Jede zusätzliche Masse muß vom Antrieb beschleunigt werden und verteuert somit das Gesamtsystem. Zu beschleunigen sind dabei der gesamte Meßkopf zusammen mit den nötigen Kabeln und Kabelführungen. Da zur Befestigung von Kamera und Laser (vgl. Anhang II) auch relativ große Komponenten mitverfahren werden, sollte die Kamera als Einzelkomponente nicht mehr als etwa 2 kg wiegen.
- Auflösung des Bildsensors $\geq 256 \times 256$ Pixel : Dies ermöglicht für die erforderliche Meßtiefe eine Tiefenauflösung im Millimeterbereich.

- Verfügbarkeit der Komponenten : Wie in Kap.1.4. besprochen ist die Verfügbarkeit ein wesentliches Kriterium, um die anzustrebende Zeitplan des Projektes nicht durch die Eigenentwicklung einer speziellen Hardware zu verzögern.

Im folgenden sollen zunächst die möglichen Varianten bezüglich der bildgebenden Sensorik diskutiert werden, und abgewägt werden, ob mit ihnen die notwendigen Randbedingungen einzuhalten sind. Dabei erweist sich die geforderte Meßrate als besonders kritisch. Den anschließend gemachten Überlegungen soll nochmals das Ziel des Kamerasystems vorangestellt werden. Das ausschließliche Interesse gilt der Generierung des 3D Volumens. Grundlage hierzu bildet die Ermittlung der Kontur des Lasers auf dem Sensorbild, um aus ihr die Einfallswinkel des Lichts in die Kamera zu berechnen.

3.1.1.1 Standardkamera⁴ mit PC - Framegrabber

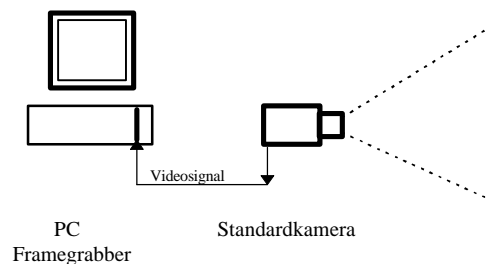


Abb.3.1.1.1 Ankopplung Standardkamera - PC

Vorteile: Framegrabber und Kamera sind Standardkomponenten und deshalb gut verfügbar und preiswert.

⁴ Grundsätzlich werden zwei verschiedene Typen von Bildsensoren gefertigt: Full-Frame- (FF-CCD) und Frame-Transfer-CCDs (FT-CCD). Bei einem FF-CCD ist die gesamte Chipfläche lichtempfindlich, während bei einem FT-CCD eine Hälfte des CCD mit einer Metallschicht abgedeckt wird. Bei FF-CCDs wird die Ladung auf dem CCD während des Auslesevorgangs zeilenweise von oben nach unten geschoben, und weiterhin belichtet. Dies führt bei einem BAS videonormgerechtem Auslesen zum Problem, denn während 40 % der Belichtungszeit wird das Bild am falschen Ort des CCDs aufgenommen! Bei Bewegtbildern kommt es deshalb zu verwaschenen und streifigen Bildern. Ein FT-CCD ist also trotz der vergleichbar höheren Auflösung nicht für das Meßsystem geeignet. FT-CCDs können üblicherweise in 1/10000 s die gesamte Ladung des CCD in den durch die Metallschicht abgedunkelten Bereich transferieren. Sie kennen somit diese Probleme nicht. [FEI-92]

Da die gesamte Bildinformation (auch die Bildfolge) bei einer Nachbearbeitung zur Verfügung steht, sind komplexe Bildanalyseverfahren denkbar, die u.U. sehr robust extreme Subpixelauflösungen liefern.

Nachteile: Die Bildrate beträgt bei preiswerten Kameras nur 50 Hz. (mit speziellen Kameras sind bis 100 Hz erreichbar [Pul-95]. Sie sind jedoch zusammen mit einem speziellen Framegrabber relativ teuer)

Bei einer für solche Kameras typischen Auflösung von 768x512 fällt (bei 100 Hz) bei einer Messung (Messzeit 1 Sek., 8 Bit Grauwerte) ein Datenstrom von 39 MByte nach der Digitalisierung an. Ließe sich die Speichermenge noch beschaffen, so ist dann die erforderliche Busübertragungsleistung von 39 MByte/s ein Engpaß. Die typische PCI Busperformance moderner Boards liegt zwischen 35 und 54 MByte/s für den Zugriff PCI-CPU. Zusätzlich müssen die Bilder noch in den Hauptspeicher transferiert werden, was üblicherweise mit 29 bis 67 MByte/s geschieht. Der Betrieb mit einer Kamera mag deshalb noch möglich sein. (vgl. auch Echtzeitfähigkeit v. Betriebssystemen in Kap 3.7). Zwei Kamerasysteme beanspruchen entsprechend überall die doppelte Bandbreite.

3.1.1.2 Kamera mit integriertem Mikrocontroller und Framegrabber

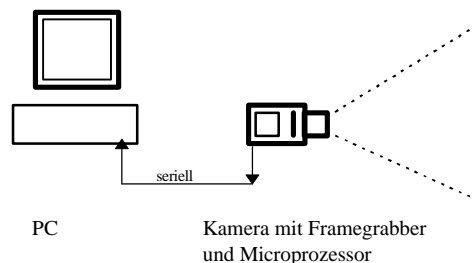


Abb.3.1.1.2 Ankopplung einer mC-Kamera an den Rechner

Vorteile: Völlige Entlastung des PCs während der Messung, daher garantierte Echtzeitfähigkeit des Meßsystems.

Durch die serielle Anbindung entsteht keine rechner-spezifische Lösung

Nachteile: Es ist unbeantwortet, ob die Leistungsfähigkeit eines einfachen Mikrocontrollers oder Mikroprozessors ausreicht, um mit geeigneten Algorithmen den Datenstrom vom CCD Chip in Echtzeit auf die relevante Entfernungsinformation zu

reduzieren. Preisgünstige Lösungen mit integriertem DSP-Prozessor sind mit Rechenleistungen von 40 MIPS erhältlich [PHY-95]⁵.

Die Bildraten bleiben durch den Einsatz von Standard-CCDs auf max. 100 Hz beschränkt.

3.1.1.3 Direkte Analyse des Videosignals

Die grundlegende Idee dieses Lösungsansatzes ist, die Position des Lasers durch die direkte Untersuchung des Standardvideosignals zu bestimmen. Dabei startet ein extrem schneller Zähler zu Beginn einer Bildzeile (Syncsignal) und zählt, bis das Videosignal einen Grenzwert übersteigt. Der dann erreichte Zählerstand ist proportional zur Lage des Lasers in der Zeile. Der Zähler wird anschließend vom Microcontroller ausgelesen und im Speicher abgelegt. Nach der Messung kann dieser Speicher über die serielle Schnittstelle zum PC transferiert und weiterverarbeitet werden.

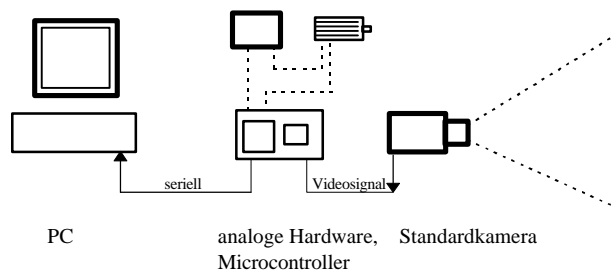


Abb. 3.1.1.3 Direkte Videosignalauswertung

Die Untersuchung und der Aufbau dieser Variante ist zur Zeit Gegenstand einer Diplomarbeit im Rahmen des TOPAS-Projekts.

Vorteile: Das Verfahren ist von einem speziellen Kamertyp oder einer speziellen Bildauflösung unabhängig.

Rechnerisch sind extreme Subpixelaufösungen möglich, da die einzige Begrenzung die Geschwindigkeit des Zählers darstellt.

Diese Lösung könnte potentiell eine völlig autonome Variante darstellen. Voraussetzung hierzu ist, daß der Mikrocontroller zusätzlich die Leistungselektronik des Motors ansteuert und die Positionsrückkopplung des Motors übernimmt.

Nachteile: Die Meßrate ist auch hier durch die Verwendung einer Standardkamera auf

⁵ Besonders interessant erscheinen hier die integrierten Lösungen smartEye-1 mit 25 MHz INTEL 386 oder mit 80 MHz TMS 320 Signalprozessor bei CCD Auflösungen von bis zu 512x512 Pixeln.

max. 100 Hz beschränkt.

Relativ langsame Übertragung der Meßdaten zum PC.⁶

Der Anteil an Eigenentwicklung von Hardware ist relativ hoch.

3.1.1.4 Direkte CCD Ansteuerung

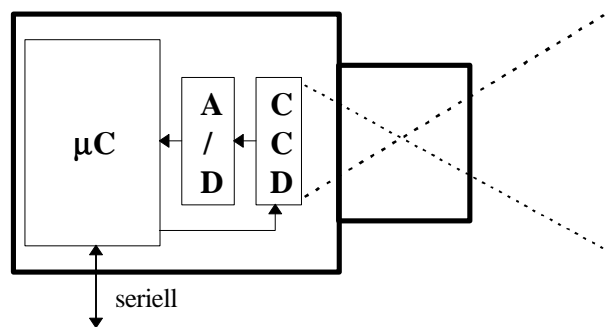


Abb. 3.1.1.4 Direkte CCD Ansteuerung

Bei dieser Lösungsvariante steuert der Mikrocontoller den CCD- Chip direkt an. Die vom CCD zurückgelieferten analogen Bilddaten werden anschließend gewandelt (im einfachsten Fall über einen Komparator binarisiert). Da der Microcontoller den CCD Takt vorgibt, ist die Lage des Lasers leicht zu ermitteln. Sie ist durch den Zählerstand eines mit dem CCD Takt laufenden Zählers gegeben, wenn der Wert des A/D Wandlers über einem Schwellwert liegt (der Komparator logisch Eins anzeigt).

Vorteile:

Durch die direkte CCD Ansteuerung muß nicht der komplette Sensor ausgelesen werden⁷.

Durch die direkte Ansteuerung des Chips ist die Erkennung eines Fremdsignals (Sync) zur Zeilenerkennung nicht notwendig. Das Umgehen jeglicher Verstärker- oder anderer Elektronik vermeidet Verzerrungen oder ungewollte Veränderungen

⁶ 100Hz * 512 Zeilen * 2 Byte Entfernungsinformation bedeuten (über die dann mindestens 2 Sekunden Messzeit) 200 KByte Daten, die bei 100 Kbaud seriell übertragen etwa 30 Sekunden Übertragungszeit zum Rechner benötigen. Für mehrere Kameras vervielfacht sich diese Zeit entsprechend. Das Problem der relativ langsamen Datenübertragung besitzen alle seriell angebunden Systeme gleichermaßen.

⁷ Bedingt durch die Tiefe des Meßbereichs und die gewählte Kameraoptik kann die Laserkontur in bestimmten Bereichen des Kamerabildes nicht vorkommen. Hier läßt sich dieser Sachverhalt ausnutzen, um die Verarbeitungsgeschwindigkeit der Bildanalyse zu erhöhen.

des Signals (durch AGC- Elektronik oder automatische Belichtungszeiteinstellung der Kameraelektronik).

Die Auslesegeschwindigkeit des CCDs ist in weiten Grenzen variierbar, da die Elektronik den Auslesetak selbst generiert. So sind Auslese- und damit Meßraten bis an die technischen Grenzen des CCD- Chips möglich.

Nachteile:

Die Hardware ist vom verwendeten CCD Typ abhängig.

Der Anteil an Eigenentwicklung ist sehr hoch. (Low Level Hardware)

3.1.2 RS 2200 Ranger PC

Die eingesetzte Kamera ist der Kategorie „Kamera mit Mikroprozessor und Framegrabber“ (vgl. Kap. 3.1.3) zuzuordnen. Sie vermeidet jedoch alle dort aufgezählten Nachteile, da durch eine parallele SIMD Prozessorarchitektur eine extrem hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit erreicht wird, die es ermöglicht, den Datenstrom in Echtzeit auf Entfernungsvorinformation zu reduzieren. Durch eine schnelle parallele Datenübertragung stehen diese Meßwerte sofort im PC zur Verfügung. Zusätzlich sind die Daten auf die wesentliche Vorinformation reduziert. Die Kombination mit einem extrem schnellen CCD Chip (Ausleserate bis zu 2000 Hz) zusammen mit der Vorverarbeitung machen eine Meßrate mit 300 Hz möglich. Die geforderte Rate von mindestens 100 Hz ist also leicht zu realisieren.

Technische Daten:

- CCD - Auflösung : 256x256 Pixel
- Arbeitsbereich : 400-1050 nm mit besonderer Empfindlichkeit im Bereich um 650 nm (Laser)
- Integrationszeit : 1 μ s - 100 ms
- Prozessorarray : 256 bitslice Prozessoren⁸, Instruktionssatz: 70 Instruktionen
- I/O Leistung⁹: 600 KByte/s (16 Bit ISA Bus, 8 MHz) unter Windows 95
10 MByte/s (32 Bit PCI Bus, 33 MHz), Prospektangabe

⁸ Ein bitslice Multiprozessor ist ein Mehrprozessorsystem mit einem Datenwort der Breite ein Bit.

⁹ Die I/O Leistung ist der wesentliche Einflußfaktor auf die Performance des Gesamtsystems. Zum einen hängt die Geschwindigkeit mit der Resultate übertragen werden können von der Übertragungsleistung des Kanals ab. Da der Befehlsstrom die Kamera triggert ist also auch die Geschwindigkeit der auf dem Rangersystem ablaufenden Algorithmen direkt von der I/O Leistung abhängig.

Die Anbindung an den PC geschieht per PC Einsteckkarte wie in Abb. 3.1.2.1 skizziert.

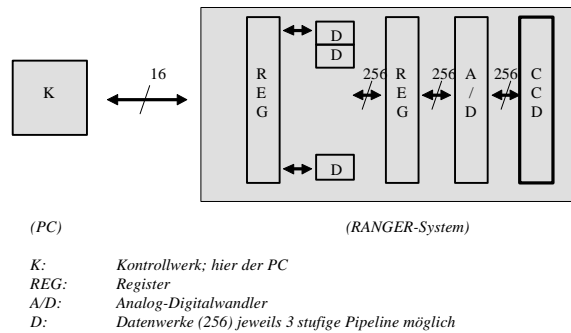


Abb.3.1.2.1 Ankopplung der RS 2200 und Grobarchitektur

Der PC fungiert als Kontrollwerk der SIMD Prozessorarchitektur. Er kann 16 Bit Befehls- worte an die Kamera absetzen und das 16 Bit Statusregister der Kamera, sowie die Register A0-A7 auslesen (8 Bit) (vgl. Abb. 3.1.2.1). Durch den kleinen Befehlssatz¹⁰ des Chips ist es einfach möglich ohne weitere Software (Compiler o.ä.) die Architektur in ihrer Maschinensprache anzusprechen.

3.1.2.1 Systemarchitektur

Der gesamte Sensor ist mit allen Prozessorelementen, Registern und Wandlern auf einem Chip integriert (Mapp 2200 Smart Optical Sensor) [IVP-95]. Das Bild kann einzeln zeilenweise parallel ausgelesen werden. Dadurch sind Bildanalysen möglich, die sich nur auf Teile des CCDs beschränken (z.B. 'Emulation' einer Zeilenkamera). Aus dieser Technik resultiert jedoch auch die Möglichkeit, Teile des Bildsensors häufiger, andere seltener auszulesen. Die Bildanalyse kann sich so auf interessante Bildbereiche konzentrieren. Dieses Feature ermöglicht es ferner für spezielle Aufgaben bestimmte Bildbereiche unterschiedlich lange zu belichten.

¹⁰ Im Vergleich zu eine 'normalen' Rechnerarchitektur fehlen im Instruktionssatz alle Sprungbefehle, da hier ein externer Controller eingesetzt wird. (Es gibt auch keinen Programmspeicher.) Da es abgesehen von den Registern keinen Hauptspeicher gibt fehlen die bei CISC Architekturen übliche Unzahl von Adressierungarten. Der Befehlssatz bleibt so leicht verständlich.

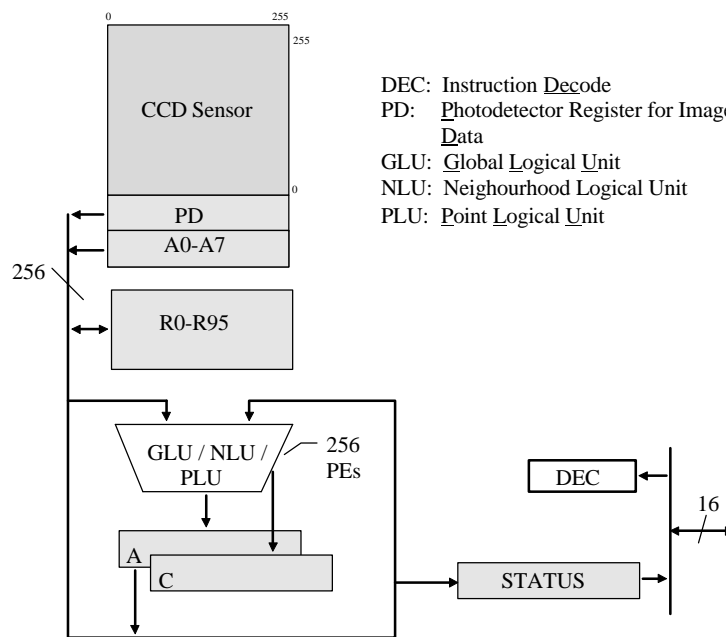


Abb. 3.1.2.1. Die Mapp 2200 Systemarchitektur

Funktionsweise:

Nach dem Auslesen der CCD Zeile stehen die analogen Werte einer ausgewählten Zeile im analogen PD Register zur Verfügung. Die zur Weiterverarbeitung notwendige Digitalisierung kann in weiten Grenzen gesteuert werden. Es sind bis zu 256 Graustufen mit jeweils einstellbarem Schwellwert möglich. Der Zugriff auf das PD Register wirkt sich nicht zerstörend aus, daher kann darauf mehrfach zurückgegriffen werden.

Alle Register der Architektur sind 256 Bit breit. Die Register A0 bis A7 sind als Speicherplatz für eine digitalisierte Bildzeile gedacht (A7 speichert alle high Bits, A0 die low Bits) und sind als Schieberegister ausgeführt.

Die Register R0 bis R95 sind General Purpose Register und damit für die Ablage von Zwischenergebnissen geeignet.

Das Statusregister enthält neben typischen Statusbits ein acht Bit breites Wort (COUNT), in dem zu jeder Zeit die Anzahl der im Accu gesetzten Bits angezeigt werden. Neben den Registern A0 bis A7 ist das Statuswort die einzige Möglichkeit von außen lesend auf Berechnungsergebnisse zuzugreifen.

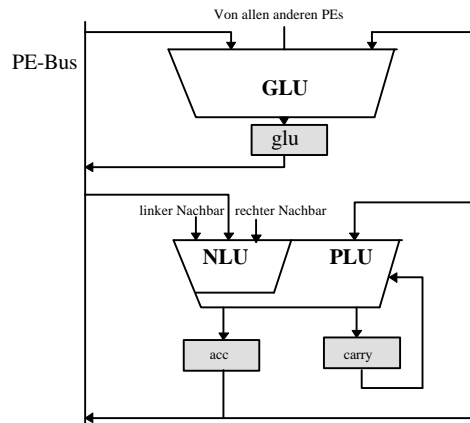


Abb.3.1.2.2 Ein Prozessorelement

Jedes der 256 Prozessorelemente (vgl. Abb 3.1.2.2) ist in 3 Funktionseinheiten unterteilt.

Das GLU (Global Logical Unit) verarbeitet alle Pixel einer Zeile gleichzeitig. Im NLU (Neighbourhood Logical Unit) können dreistellige Operationen ausgeführt werden, indem jeweils das links, das aktuelle und das rechte Bit des Wortes an jedem Prozessor anliegen (Matching von Bitpattern). Das PLU (Point Logical Unit) ist schließlich für die Berechnung von arithmetischen und logischen Operationen zuständig. Die Datenwerke können als Pipeline betrieben werden und so einen sehr guten Durchsatz erreichen.

Jede Berechnung der Prozessorelemente wird im Accu (A) zwischengespeichert¹¹. Anfallende Überträge landen im Carryregister (C).

Beispiele für typische Operationen der verschiedenen Funktionseinheiten sind:

GLU: (LFILL); Markiert ab dem ersten in Source gesetzten Bit alle Bits im Accu

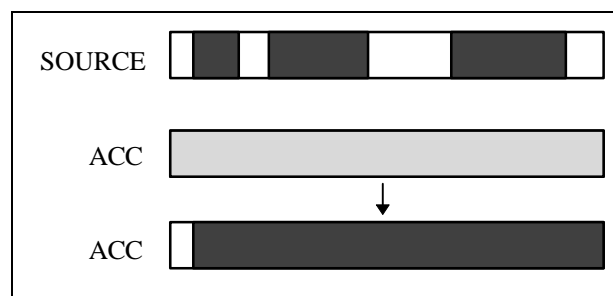


Abb. 3.1.2..3 Beispiel für GLU Operation

¹¹ Ausnahme bilden GLU Operationen. Sie landen im glu- Register und müssen explizit für einen Zugriff in den Accu geladen werden. (vgl. Algorithmus in Kap. 3.1.3)

NLU: (LEDGE); Markiert alle linken Kanten von Source

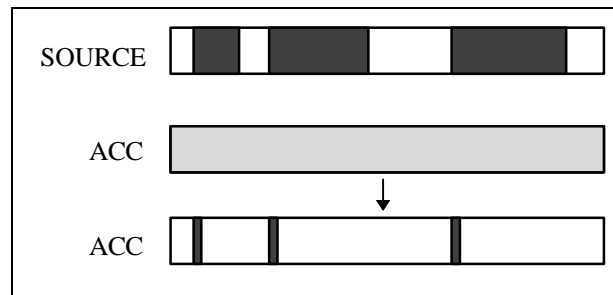


Abb. 3.1.2.4 Beispiel NLU Operation

PLU: (XOR); Xor von Source und Accu

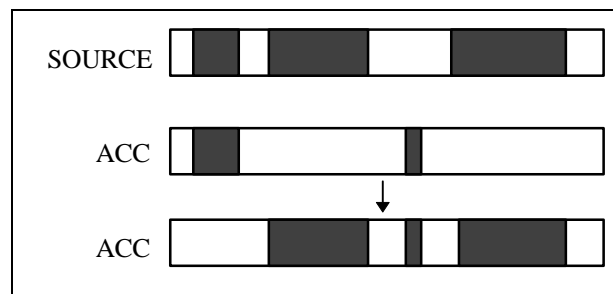


Abb. 3.1.2.5 Beispiel PLU Operation

3.1.2.2 Einsetzbare Algorithmen

Mit diesem Baustein gibt es zur Positionsbestimmung des Lasers im Bild prinzipiell 3 Möglichkeiten. Allen gemeinsam ist, daß es die parallele Architektur erlaubt innerhalb einer Zeile alle Punkte gleichzeitig zu bearbeiten, und so zeilenweise die Daten des Bildsensors komplett abzarbeiten.

Bestimmung des Intensitätsmaximums

Bei diesem Verfahren wird die Position des Lasers (bzw. die Mitte der Laserlinie innerhalb einer Zeile) durch die Lage des Intensitätsmaximum identifiziert. Das Maximum kann durch binäre Suche mit variablen Schwellwert der Digitalisierung geschehen, bis im Accu genau ein Bit gesetzt ist oder nur ein zusammenhängender Bereich gefunden wurde.

Die Nachteile dieser Vorgehensweise sind:

- keine Ausnutzung von Subpixelgenauigkeiten
- Konzeptionelle Probleme bei einer breiten Laserlinie

- Relativ langsamer Algorithmus

Schwerpunktbildung über die Grauwerte einer Zeile

Die Positionsschätzung der Lasermitte wird hierbei durch den Schwerpunkt der Intensitätswerte einer Sensorzeile berechnet.

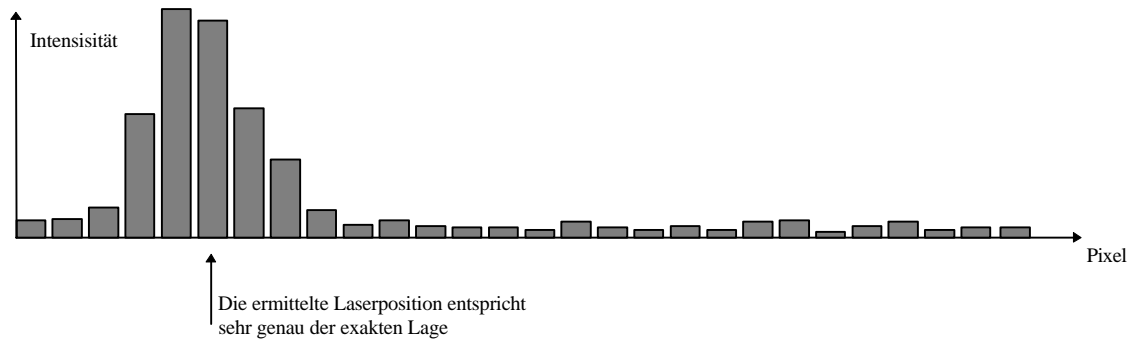


Abb.3.1.2.6 Lageschätzung durch Schwerpunktbildung

Vorteile:

- rechnerisch extreme Subpixelgenauigkeiten erreichbar (1/2000 lt. Prospektangaben)

Nachteile:

- bei sehr kurzer Integrationszeit liefert der Algorithmus falsche Ergebnisse. Dazu im folgenden mehr.
- Der Algorithmus ist relativ langsam (in der ISA Bus Version 70 Hz. Meßrate lt. Prospektangaben)

Aus einer möglichst hohen vertikalen Meßauflösung (hohe Meßfrequenz) folgt direkt eine sehr kurze Belichtungszeit des Sensors. Da nur wenig Integrationszeit vorhanden ist, wird der Peak der Laserintensität kaum über dem Grundrauschen¹² der Kamera liegen. Abb. 3.1.2.7 verdeutlicht die Problematik für den Fall, daß die emittierte Lichtintensität durch Laser nahe am Grundrauschen liegt.

¹²Abhängig von der CCD Technologie wird in der CCD-Zelle eine Ladung (im Bereich von einigen Mikrovolt pro Photon) durch einfallendes Licht erzeugt oder aber eine Ladung zerstört (discharge principle). Durch Toleranzen in der Fertigung bedingt kommt es zu Zellen, die unterschiedlich empfindlich auf Lichteinfall reagieren, was zu einem Signalrauschen führt. Zusätzlich täuschen Zellen auch bei abgedunkelter Optik einen durch thermisches Rauschen und Leckströme bedingten Lichteinfall vor. Bei CCDs die nach dem 'Entladeprinzip' arbeiten, können fehlerhafte Zellen nicht vollständig aufgeladen werden. Diese Zellen täuschen einen Lichteinfall vor. Bei CCDs, die nach dem umgekehrten Prinzip arbeiten wirken sich solche Zellen als vergleichsweise zu dunkle Pixel.

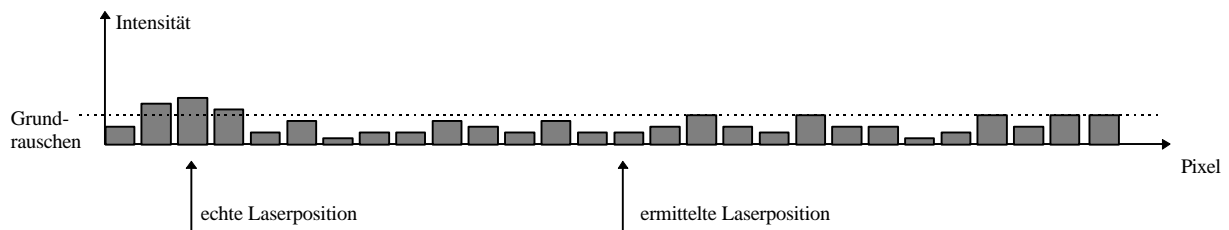


Abb.3.1.2.7

Dieser Algorithmus ist ohne Modifikation ungeeignet mit einer hohen Meßrate zu arbeiten, da er für kurze Integrationszeiten falsche Ergebnisse liefern kann (vgl. Abb. 3.1.2.7). Dieses Fehlverhalten könnte man durch eine Erweiterung des Algorithmus um einen Filter beseitigen. Alle Intensitäten unter einer Schwelle (Rauschintensität) werden ausgeblendet. Zusammen mit einem Filter sind allerdings keine hohen Subpixelgenauigkeiten mehr zu erreichen, da die entstehende Fläche nur einige wenige Pixel breit sein wird.

Der Algorithmus eignet sich also um so mehr, als keine hohen Anforderungen an die Meßfrequenz gestellt werden (unbewegtes Objekt). Dann kann der gesamte Scanvorgang wesentlich mehr Zeit in Anspruch nehmen, so daß für tatsächlich beleuchteten Zellen genügend Integrationszeit vorhanden ist. Der Laser hebt sich dann stark im Grauwert histogramm einer Zeile ab (vgl. Abb.3.1.2.6). Für relativ lange Integrationszeiten oder hohe Laserintensitäten sind sehr gute Ergebnisse zu erwarten. Auf die hier möglichen Einflüsse und Randbedingungen der optischen Komponenten, die den Lichteinfall auf den Sensor beeinflussen, wird in Kap. 3.1.7 eingegangen.

Für kurze Belichtungszeiten geht die Schwerpunktbildung in die im folgenden aufgezeigte Mittelbildung zwischen linker und rechter Signalflanke über.¹³

Mittenbildung der binarisierten Zeile

Hierbei wird die Laserlinie im Binärbild einer Zeile durch die Mitte der rechten bzw. linken Kante bestimmt. Abb. 3.1.3.2 verdeutlicht die Vorgehensweise.

Vorteile:

- arbeitet mit doppelter Pixelgenauigkeit

¹³ Man bedenke, daß es sehr wahrscheinlich ist, daß der Schwerpunkt der Fläche des tatsächlichen Signals über einem Schwellwert, exakt in der Mitte der Fläche zu finden sein wird. Eine Verschiebung des Schwerpunktes wird vielmehr durch das Rauschen des Sensors beeinflusst, da, wenn die Fläche sehr schmal ist, schon geringes Signalrauschen zu einer zufälligen Verschiebung führt.

- Feinjustierung über dem Kamerarauschen durch einstellbaren Schwellwert bei der Binarisierung möglich.
- arbeitet vergleichsweise schnell (ca. 300 Hz bei ISA Schnittstelle; Bei PCI- Anbindung der Kamera sind weit über 500 Hz zu erwarten)

Nachteile:

- Da die Digitalisierung binär arbeitet, sind die Ergebnisse stark von der Einstellung des Schwellwertes der Digitalisierung abhängig.

Einfluß des Schwellwertes auf die Meßergebnisse

Bei einem zu hohen Schwellwert kann der Laser u.U. in einer Zeile nicht mehr gefunden werden. Ein zu niedrigen Schwellwert wird Rauschen der Messwerte verursachen (vgl. Abb. 3.1.2.8). Der gewählte Schwellwert stellt also immer einen Kompromiß zwischen Anzahl der Meßwerte und Qualität der Messung dar. In der Praxis erweist sich jedoch ein manuell einzustellender Wert als gut geeignet über große Zeiträume hinweg sinnvoll zu messen. Bei konstanten Meßbedingungen braucht er nicht verändert zu werden.

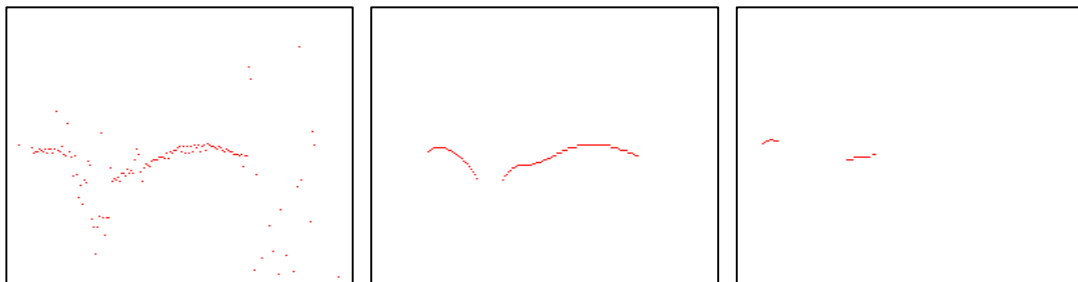


Abb. 3.1.2.8 Vergleich des Einfluß verschiedener Schwellwerte auf die Qualität und Quantität der Meßergebnisse; Rechts: zu hoher Schwellwert; es fehlen Meßwerte. Links: zu niedriger Schwellwert führt zu Rauschen. Mitte: gut eingestellter Schwellwert.

Optimale automatische Schwellwertermittlung

Die eingesetzte Meßsoftware versucht den optimalen Schwellwert automatisch zu bestimmen. Für eine automatische Bestimmung des Schwellwertes wird zunächst eine Gütefunktion definiert.

$$G(sw) = G(MW(sw), VAR_MW_1(sw), VAR_MW_2(sw)) \quad (sw = \text{Schwellwert})$$

Die Anzahl der Meßwerte eines Scans für einen Schwellwert bezeichne $MW(sw)$:

$$MW(sw) = \sum_{i=0}^n \begin{cases} 1; & x_i \neq 0 \\ 0; & x_i = 0 \end{cases}$$

(x_i ist die Position des Lasers in der Spalte i . Der Wert 0 wird angenommen wenn keine Position ermittelt werden konnte)

Varianz der Messwerte eines Scans bezogen auf den Mittelwert:

$$VAR_MW_1(sw) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{und} \quad \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Varianz der Messwerte bezogen auf die vorhergehende Messung:

$$VAR_MW_2(sw) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i(t) - x_i(t-1))^2$$

Diese Funktionen werden, mit bestimmten Gewichten versehen, zur Gewichtsfunktion:

$$G(sw) = \mathbf{a} MW(sw) + \mathbf{b} VAR_MW_1(sw) + \mathbf{g} VAR_MW_2(sw), \quad \text{für } \mathbf{a} > 0 \text{ und } \mathbf{b}, \mathbf{g} < 0$$

Da die Anzahl möglicher Schwellwerte relativ gering ist, kann die Gütefunktion vollständig auf ihr Maximum durchsucht werden. Die Qualität des so gefundenen Wertes hängt maßgeblich von der Definition und damit von der Wahl der Parameter α, β, γ ab.

3.1.3 Algorithmus

Der Algorithmus ist sehr einfach auf die parallele Prozessorstruktur abzubilden. Abb. 3.1.3.1 zeigt den Algorithmus. Wie man leicht erkennt müssen nicht alle Pixel sequentiell bearbeitet werden. Zunächst wird die Breite des Signals bestimmt, dann der Anfang des Signals innerhalb einer Zeile. Aus diesen Informationen wird anschließend subpixelgenau die Position des Lasers innerhalb einer Zeile bestimmt.

```

SETR0 ; beginne Verarbeitung am linken Bildrand
Schleife über alle Bildzeilen
BEGIN
  INTEG // die Zeile ins analoge PD Register laden
  LDIPD // Zeile binarisieren (mit dem eingestellten Schwellwert) und
  LFILL // markiere alle Bits vom ersten linken Bit an (2)
           // Achtung! Die Bearbeitung dieses Befehls benötigt mehr als
           // einen Takt es können daher Befehle (nicht GLU)
           // dazwischengeschoben werden
  width=COUNT // ermittelt die Anzahl besetzter Bits im Akku (3)
  RESETI // rücksetzen des PD Analogregisters und Zeilenincrement
  LDGLU // Lädt den bei (2) berechneten Wert aus dem glu Register in
           // den Accu
  value=(COUNT*2)-width // Auslesen der Anzahl gesetzter Bits im Accu und Lagebe
           // rechnung des Lasers im Bild (Subpixel) (4)
           // (vgl. Abb. 3.1.3.1)
END

```

Abb. 3.1.3.1 Der Kern des Algorithmus

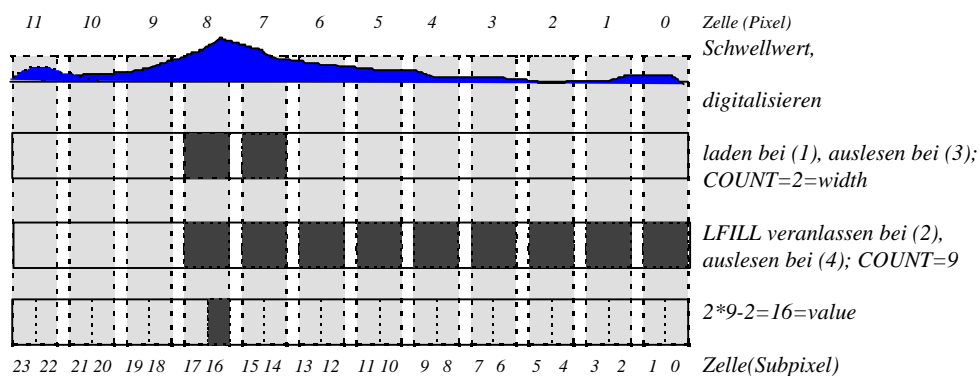


Abb. 3.1.3.2 Funktionsweise des Algorithmus

Die theoretische Prozessorleistung liegt bei 4 Millionen Instruktionen pro Sekunde. Bei sieben Befehlen pro Meßwert ergibt sich daraus eine prinzipielle maximale Meßrate von etwa 570 kHz. Für diese Meßraten sind allerdings extrem hohe Lichtintensitäten zur Belichtung des CCDs notwendig.

3.1.3.1 Verbesserte vertikale Auflösung durch verschachtelten Sensorzugriff

Durch das momentane Bottleneck PC- ISA Bus mit ca. 600 KB/s ist eine Abänderung des Algorithmus immer mit einer Verminderung der vertikalen Auflösung verbunden. Schon das Hinzufügen eines einzigen Kommandos in der Hauptschleife vermindert die Auflösung um etwa 12 %. Mögliche Änderungen können somit erst mit der Verfügbarkeit der neuen PCI Karte ausgetestet werden.

Eine einfache Abänderung des oben skizzierten Algorithmus besteht darin, die CCD-Zeilen nicht mehr mit Schrittweite 1, sondern verschachtelt mit Schrittweite 2 (oder mehr) auszulesen. Die sich so ergebende Auslesereihenfolge der Sensorzeilen ist zunächst Spalte 0,2,4.. 254 dann 1,3,5.. 255.

Abb. 3.1.3.1.1 verdeutlicht den möglichen Gewinn. Ein horizontales Merkmal wird im Mittel früher erkannt.

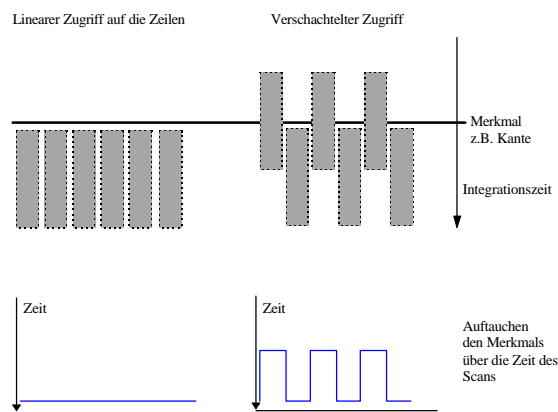


Abb. 3.1.3.1 Verschachtelter Sensorzugriff

Diese verschachtelte Auslesereihenfolge kann als Veränderung des Abtastmusters des 3D Körpers betrachtet werden. Alternativ dazu kann der verschränkte Sensorzugriff auch als Verdopplung der vertikalen Meßauflösung verstanden werden. Ist die Integrationszeit jeder Zelle sehr kurz, ergibt sich bei einem Auslesevorgang mit Schrittweite 1 die in Abb. 3.1.3.2 links gezeigte Abtastung eines Körpers. Bei verschachteltem Zugriff wird der Körper schachbrettartig gescant (rechts). In der Realität werden die beiden Abtastmuster lediglich durch den Scanvorgang leicht verzerrt (unten).

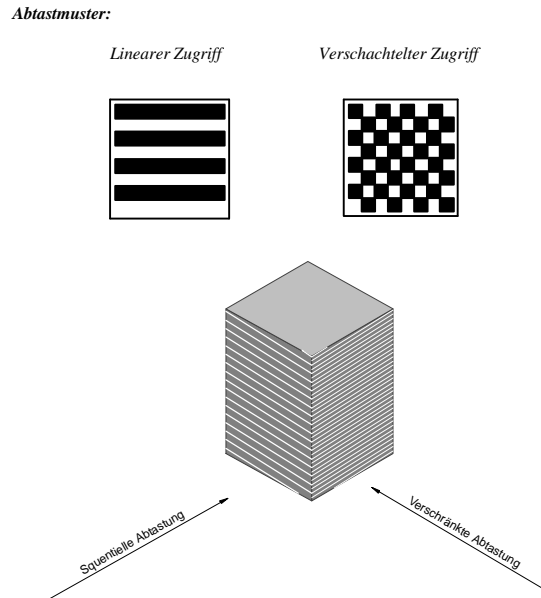


Abb. 3.1.3.2 Objektabtastung im Vergleich: Sequentieller- Verschränkter Sensorzugriff

3.2 Optische Komponenten des Meßkopfes

Aus den im Kap. 3.1.5 gemachten Überlegungen geht hervor, daß zur sicheren Detektion von Meßwerten auch für kurze Belichtungszeiten, eine ausreichende Intensität des Nutzsignals (Laserlicht) auf den Sensor auftreffen muß. Mit den in Zukunft möglichen höheren Abtastraten wird diese Problematik immer stärker auftreten. Deshalb sollen hier einige Überlegungen gemacht werden, welche Optimierungen durch optische Komponenten möglich sind.

Unterdrückung von Fremdlichteinflüssen

Der Einfall von Fremdlicht, kann die Qualität der Messung stark beeinflussen. Beim eingesetzten Algorithmus läßt eine gegebene Grundhelligkeit im Raum es nicht zu, den Schwellwert niedrig zu wählen. Es werden weniger Meßwerte generiert als wünschenswert wären. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten den Einfluß von Fremdlicht zu verringern.

Die Meßkabine kann durch bauliche Maßnahmen abgedunkelt werden. Dies vermeidet das Vorhandensein von Fremdlicht in der Meßszene. Alternativ und in Kombination hierzu kommt der Einsatz von Farb- oder Interferenzfiltern in Frage. Ein Farbfilter kann ausschließlich von Licht einer gewünschten Wellenlänge oder von langwelligerem Licht passiert werden. Ein Interferenzfilter läßt nur Licht eines bestimmten Ausschnitts des Lichtspektrums auf den Sensor auftreffen (vgl. Abb. 3.2.1).

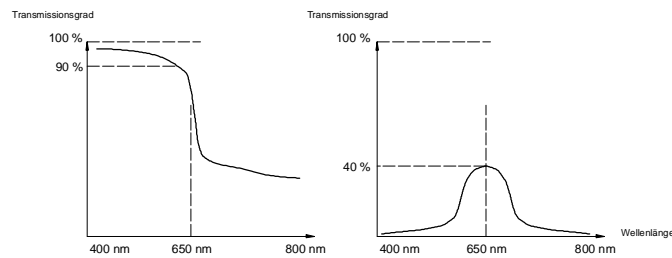


Abb.3.2.1 Charakteristik von Farb-oder Kantenfilter (links) und Interferenzfilter (rechts) im Vergleich

Der Einsatz eines Interferenzfilters erscheint ideal, da er das Licht fast ausschließlich auf das Nutzsignal reduziert. Leider haben diese Art von optischen Filtern jedoch zwei wesentliche Nachteile. Sie schwächen das Nutzsignal um etwa 40 %. Der Einsatz eines Interferenzfilters ist also eher kontraproduktiv, da das Signal wieder im Rauschen des Sensors zu verschwinden droht. Ein weiterer Nachteil dieser Filter ist, daß ihre Charakteristik stark von der Richtung des einfallenden Lichtes abhängt. Bei dem im Scanner eingesetzten Weitwinkelobjektiv treten unerwünschte Dämpfungseffekte des Laserlichtes auf je mehr sich das Laserprofil dem Bildrand nähert¹⁴.

Im Gegensatz zu Interferenzfiltern beträgt die Dämpfung des Nutzsignals bei einem einfachen Farbfilter (Kantenfilter) nur etwa 10 %. Er läßt jedoch auch die langwelligen Lichtanteile (Infrarot) zum CCD passieren.

Verstärkung des Laserlichtes

Das emittierten Laserlicht muß in seiner Leistung auf unter $5 \cdot 10^{-7} \text{ W/cm}^2$ beschränkt bleiben, um eine schädliche biologische Wirkung auf das menschliche Auge auszuschließen. Für den augensicheren Einsatz können Zeilenlaser bei einer Aufweitung von 60° bis etwa 30 mW eingesetzt werden. Im Moment befinden sich 5mW Laser im Einsatz.

Wahl der Aufweitungsoptik

Zum Erzielen der Aufweitung eines punktförmigen Lasers zu einer Laserlinie werden verschiedene Optiken eingesetzt. Bei einer einfachen (preisgünstigen) zylinderförmigen Optik entsteht eine Verteilung der Intensität auf die Zeile gemäß Abb.3.2.2. Die Charakteristik ist über die Länge der Linie in etwa normalverteilt mit einer starken Konzentration in der Mitte. Ein so aufgeweiteter Punktlaser ist, da sich die Intensität sehr ungleichmäßig über die Zeile verteilt,

¹⁴ Der Einfluß der Interferenzrate vom Einfallswinkel kann durch das Anbringen des Filters im Kamerarinneren weitgehend vermieden werden. Hierzu sind dann jedoch bauliche Veränderungen an der Kamera notwendig um den Filter zu befestigen.

unter den kritischen Belichtungsbedingungen nicht gut geeignet. Darüberhinaus muß bei solchen Optiken die Augensicherheit des Laser kritisch betrachtet werden, da sich der Hauptanteil des Punktlasers immer noch fast punktförmig in der Mitte der Laserlinie konzentriert. Teure prismatische Aufweitungsoptiken kennen diese Probleme nicht. Sie weiten das Licht annähernd gleichverteilt auf, sind damit vergleichsweise unkritisch bezüglich der Einschätzung der Augensicherheit, und für die technischen Anforderungen in der Meßmaschine geeignet.

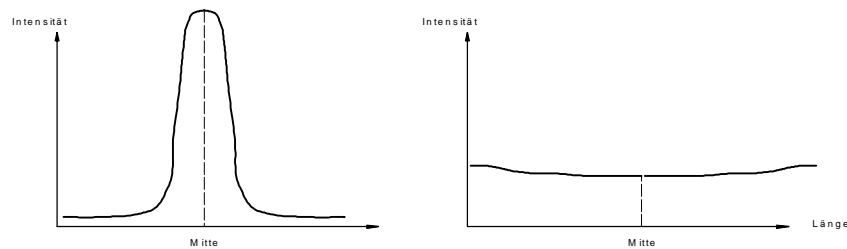


Abb. 3.2.2 Charakteristik von Zylinderoptik im Vergleich zur Prismaoptik.

Günstige Anordnung der Laser

Abb. 3.2.3 verdeutlicht die Idee: Durch den Einsatz von 2 Lasern für einen Meßkopf kann die vom Objekt zur Kamera zurückreflektierte Energiedichte gerade für kritische Bereiche am Objektrand positiv beeinflusst werden.

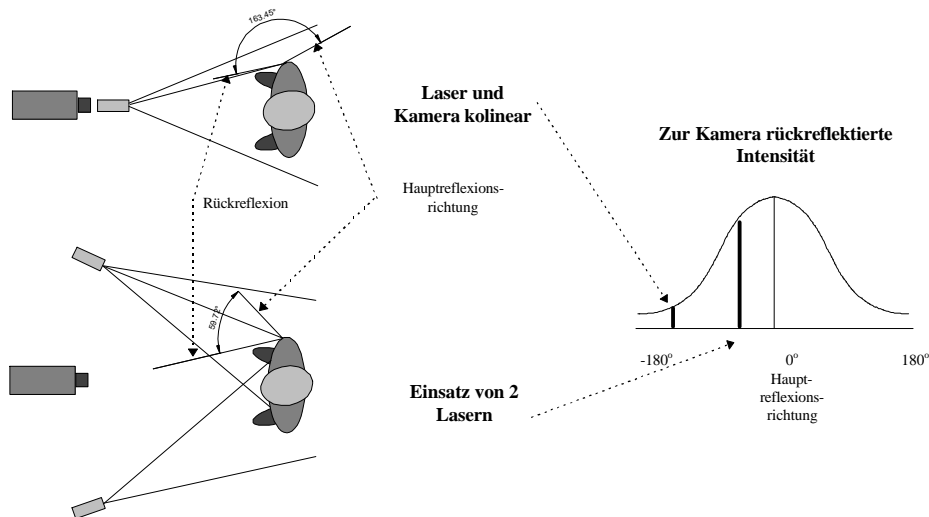


Abb.3.2.3 Mittige und beidseitige Laseranordnung

Wahl der Kameraoptik

Grundsätzlich erfolgt die Wahl der Brennweite der Kamera nach den äußeren Abmaßen des Scanners und der einzuhaltenden Meßtiefe unter einer Triangulationsanordnung. Da Weitwinkelobjektive relativ einfach und preisgünstig lichtstark zu fertigen sind, kommt ein 8mm Objektiv mit maximaler Blende von 1.2 zum Einsatz. Die Blendenzahl von Objektiven (1.0, 1.8,

2.0 ,4.0 5.6..) ist ein Maß für den Transmissionsgrad von Licht bei maximal geöffneter Blende. Mit jeder Abstufung (1.0, 1.8..) vermindert sich der Transmissionsgrad um 50 %. Es scheint also günstig ein Objektiv mit besonders hoher Lichtdurchlässigkeit einzusetzen. Aber auch hier ist ein Kompromiß notwendig, da sich mit der Öffnung der Blende auch die Tiefenschärfe verringert. Das unscharfe Bild des Lasers bildet sich auf einer größeren Fläche des CCDs ab, und kompensiert so den Effekt einer lichtstarken Optik dadurch, daß die gleiche Lichtmenge auf eine größere Fläche verteilt wird.

Verringern des Kamerarauschens

Das Rauschen des CCD Chips ist zum größten Teil thermisch bedingt. In der Astronomiephotografie werden zur Vermeidung der temperaturbedingten Rauschanteile die CCD Chips von speziellen Bausteinen gekühlt.

3.3 Elektromechanische Komponenten des Scanners

Unter den elektromechanischen Komponenten werden alle mechanischen Komponenten und elektrischen Apparate verstanden, die dem Scanvorgang, also dem Erweitern der 2D Abtasteneigenschaft des Meßkopfes auf 3D dienen.

3.3.1 Mechanische Komponenten

Linearführung: Funktionsprinzip, Varianten

Zur Erzielung eines schnellen linearen Bewegungsvorganges bieten sich die von verschiedenen Herstellern angebotenen Linearführungen an. Sie bestehen aus einem biegesteifen Aluminiumträgerprofil, auf dem ein Laufwagen durch Kegelrollen oder Linearumlaufbuchsen gelagert wird und in Längsrichtungen verschoben werden kann. Für den Antrieb dieses Schlittens gibt es bei den anfallenden Lasten die Möglichkeit des Gewindeantriebs oder des Zahnriemenantriebs. Gewindetriebe sind selbst bei maximalen technisch machbaren Gewindesteigung (Flankenwinkel) nicht für die benötigten Geschwindigkeiten einsetzbar, da die Spindel nur an den Ende gelagert werden kann, was bei den notwendigen Drehzahlen zu unkontrollierten Schwingungen der Spindel führen würde.

Bei der eingesetzten INA Linearführung wird der Schlitten über einen vorgespannten Riemenlauf angetrieben. Mit dieser Technik sind Maximalgeschwindigkeiten des Schlittens bis 5 m/s möglich.

Abschätzung der benötigten Motor- und Getriebeauslegung

Die Abschätzung der benötigten Motor- und Getriebeauslegung ist im wesentlichen von 4 Komponenten abhängig:

- maximal beschleunigte Massen
- maximal auftretende Beschleunigungen
- maximal Geschwindigkeiten
- anfallende Reibkräfte

Da die am Laufwagen zwischen Kegelrollen und Träger anfallenden Reibkräfte unbekannt sind, werden sie durch einen 20 % Aufschlag auf die translatorisch bewegten Massen berücksichtigt. Analog werden alle rotierende Massen durch einen Aufschlag von 10 % auf die sonstigen Massen berücksichtigt.

Abschätzung der Massen

- translatorisch:

	<i>Anzahl</i>	<i>Gewicht (kg)</i>
<i>Laufwagen</i>	2	1.0
<i>Laser</i>	4	0.1
<i>Kamera</i>	2	2.0
<i>Laserausleger mit Tisch</i>	2	0.8
<i>Kamerahalterung</i>	2	0.3
<i>Umlenkeinheit</i>	2	2.0
<i>Energieführungen, Kabel</i>	2	1.0

Gesamtmasse: $14.6 \text{ Kg} + 0.3 * 14.6 \text{ Kg (Zuschlag)} = 18 \text{ kg}$

Abschätzung der Momente

Für die Abschätzung der notwendigen Antriebsmomente ist zunächst zu bedenken, daß es un wesentlich ist, ob die Masse von oben nach unten, oder umgekehrt beschleunigt wird. Bei einer Fahrt von oben nach unten 'hilft' die Erdanziehung zunächst bei der Beschleunigung der Massen, muß jedoch beim Abbremsen überwunden werden. Bei umgekehrten Fahrt ist sie beim Abbremsvorgang hilfreich, muß jedoch beim Beschleunigen zusätzlich überwunden werden.

Für den Bewegungsvorgang wird eine gleichmäßig beschleunigte, geradlinige Bewegung unterstellt¹⁵, wobei der Meßkopf in 0.1 Sekunde von 0 auf 2 m/s beschleunigt wird.

Mit $\ddot{x} = a = \text{const}$

$$\dot{x} = v(t) = at + v_0$$

$$x = s(t) = \frac{at^2}{2} + v_0 * t + s_0$$

Mit gleicher Beschleunigung beim Abbremsen und zwischenzeitlicher gleichförmiger Bewegung dauert so eine Fahrt über 2 Meter bei Beschleunigungen von 20 m/s^2 1.1 Sekunde. Für diese Beschleunigung ist bei einem Zahnritzdurchmesser von 4 cm ein Drehmoment von 7.2 Nm bereitzustellen.

$$M = m * a * r = 18 \text{ kg} * 20 \text{ m/s}^2 * 0.02 \text{ m} = 7.2 \text{ Nm}$$

Abschätzung der Drehzahl am Zahnriemenritzel

Hierbei ist die gewünschte maximale Verfahrgeschwindigkeit von 2 m/s (=120 m/min) ausschlaggebend. Der Zahnriemen der benutzen Linearführung besitzt einen Durchmesser von 4 cm. Damit hat der Zahnriemen einen Umfang von etwa 12.5 cm. Zur Erreichung einer Vorschubgeschwindigkeit von 2 m/s ist also eine Antriebsdrehzahl von 960 U/min notwendig.

Der verwendete Motor leistet ein Stillstandsrehmoment von etwa 2 Nm und eine Maximaldrehzahl von 3000 U/min. Das Drehmoment wird durch ein Getriebe der Untersetzung 1-3 auf 6 Nm gesteigert und die Drehzahl am Wellenausgang auf maximal 1000 U/min begrenzt. Der Motor ist für die hier überschlagenen Lasten leicht unterdimensioniert d.h. die Gesamtverfahrzeit dürfte gering über 1.1 Sekunde liegen. Messungen am Scanner bestätigen die hier überschlagsmäßig durchgeführte Rechnung (vgl Abb. 3.3.3.1 links). Die beiden Meßköpfe des Scanners können in etwa 1.2 Sekunden über einen Weg von 2 Meter transportiert werden.

¹⁵ Bei Elektromotoren kann man von einer logarithmisch mit der Drehzahl abnehmenden Drehmomentverlauf ausgehen (anders als bei Verbrennungsmotoren). Bei der Maximaldrehzahl steht kein Drehmoment mehr zu Verfügung! Aus diesem Grund kann ein Elektromotor, nur für kleine Drehzahlen annähernd gleichmäßig beschleunigen.

3.3.2 Steuerung, Regelung

Eine Regelung, die für die gegebene Aufgabe geeignet sein soll, muß eine exakte Positionierung besitzen, da der Abbremsvorgang von einer Verfahrgeschwindigkeit von über 2 m/s besonders kritisch ist. Hier droht wegen des endlichen Verfahrbereichs des Laufwagens der Meßkopf am Ende der Linearführung anzuschlagen. Alle Massen müssen sowohl optimal beschleunigt, als auch optimal abgebremst werden, um einen möglichst großen Zeitraum mit gleicher Geschwindigkeit zu verfahren.

Sowohl aus Sicherheitsgründen, wie auch aus technischen Gründen, muß die Regelung ihre Aufgabe ohne jegliche Belastung des PCs während der Meßaufgabe (etwa durch Interrupts vgl. Kap. 3.6) ausführen. Aus diesem Grund kommt nur eine externe oder PC interne, autonome Hardwarelösung in Frage.

3.3.2.1 Prinzipielle Antriebsvarianten

Für die zu erreichenden Beschleunigungen ist bei den notwendigen Momenten keine andere Antriebsform als die eines Elektromotors geeignet. Bei der Erörterung der Eignung ist die Kombination mit einer Regelung oder Steuerung zu bedenken, da der Typ des Motors und der Typ der Leistungselektronik prinzipbedingt zusammengehören.

Hierbei sind die folgenden Alternativen denkbar:

- Schrittmotore

Vorteile: Einfache und preisgünstige Elektronik (keine Regelung)

Keine Motor- Steuerungsrückkopplung notwendig

Nachteile: Geringe Verfügbarkeit für die geforderten Lasten (Momente, Spitzendrehzahlen)

Bei den geforderten Drehzahlen können Schritte verlorengehen was die Positionsbestimmung des Meßkopfes kritisch macht.

- Synchronmotore

Vorteile: Verfügbarkeit im geforderten Lastbereich, sowie auch noch weit darüber.

Nachteile: Aufwendige, relativ teure Elektronik (Regelung) mit Lagerückkopplung des Motorrotors. (über die Getriebeuntersetzung auch Positionsrückkopplung der Laufwagenposition)

3.3.2.2 Kombination Steuerungen, Regelungen und Motore

1.) Regelung als PC Steckkarte (Motorcontroller) mit externer Leistungselektronik

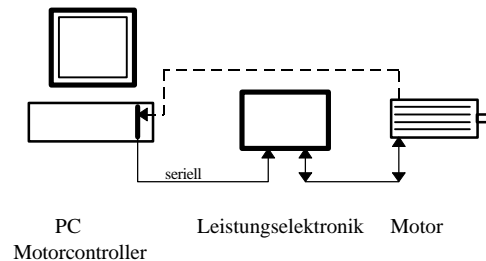


Abb. 3.2.2.1 Motorcontroller und Leistungselektronik

Die PC Motorcontrollerkarte¹⁶ steuert über einen genormten pulsweitenmodulierten (PWM) Ausgang (+10V, -10V) über eine Regelelektronik eine Leistungselektronik an, die das PWM-Signal geeignet verstärken kann. Die Rückkopplung geschieht meist über ein Encodersignal, welches von einem Drehgeber an der Motorachse (z.B. Encoderscheibe) generiert wird.

Vorteile: Die Ist- Position ist im PC schnell über Portzugriffe auf die Motorcontrollerkarte zugänglich.

Nachteile: Motore der geforderten Leistungskategorie liefern meist keine Encoderwerte. Motore dieser Kategorie koppeln die Rotorlage typischerweise über Resolver-signale¹⁷ zurück.

2.) Externe Lösung

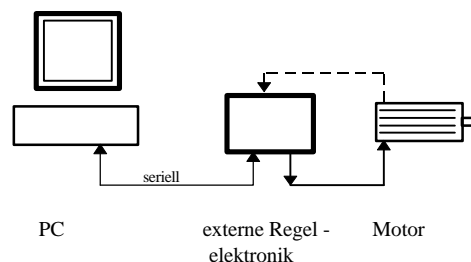


Abb. 3.2.2.2 Externe Regelelektronik

¹⁶ [MCS-95]

¹⁷ Ein Resolver ist eine spezielle nur für die Positionsbestimmung angebaute Motorwicklung. An ihr kann ein sinusförmige Spannung gemessen werden die zur Erkennung der Lage des Rotors dient. Resolverrückkopplungen sind besonders für den industriellen Einsatz gedacht, da sie extrem störunempfindlich sind.

Die externe Regelung ist PC-seitig durch Positionierkommandos über die serielle Schnittstelle anzusteuern. Sie erscheint logisch als Steuerung.

Vorteile: Rechnerunabhängig, da RS 232 durchgehend auf allen Plattformen verfügbar ist.

Meist als „Near Ready to Use“ Komponente ausgeführt, d.h. der benutzerseitige Eingriff auf Regelungsparameter ist auf ein abstraktes Niveau angehoben.

Gute Verfügbarkeit.

Nachteile: Für die gegebene meßtechnische Aufgabe ist eine serielle Rückkopplung der Rotorlage und damit der Laufwagen Ist-Position zu langsam.

3.3.3 Hauser Steuerung

Die eingesetzte Einachssteuerung Compax S [HAU-95] entspricht dem letzten in Kap. 3.2.2.2 skizzierten Steuerungstyp. Sie benötigt keine externe Einspeisung von Starkstrom und ist deshalb mit 230 V AC Versorgungsspannung uneingeschränkt einsetzbar. Für das Betreiben des Gerätes sind lediglich noch 24V Gleichspannung extern für die digitalen Komponenten zur Verfügung zu stellen.

Die Steuerung bietet eine Reihe Mechanismen, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

- manueller Notaus
- thermische Absicherung (Temperatur der Leistungsendstufe)
- Strombegrenzung und damit auch Momentenbegrenzung
- Plausibilitätsprüfung der Eingabe (Positionierkommandos nur im Verfahrbereich etc.)
- automatische Nullpunktbestimmung über Initiatoren

Alle Fehlerzustände führen zum Abbruch des momentanen Vorgangs oder zum Abschalten des Motorstroms. Sie werden direkt am Gerät angezeigt, gleichzeitig aber auch über die serielle Schnittstelle der Anwendung übermittelt.

Nach dem Einstellen diverser Regelparameter, die sich aus der Lastsituation und dem gewünschten Regelverhalten ergeben, ist das Gerät einsatzbereit und kann über die RS232 Schnittstelle angesprochen werden. Über binäre 24V Eingänge ist zusätzlich ein eingeschränkter manueller Betrieb möglich.

Folgende Funktionen können über die binären Eingänge ausgelöst werden:

- Hand+, Hand- (Manuelles Verfahren von Hand mit Default Geschwindigkeit)
- Start, Stop, Break (Starten und Anhalten vorprogrammierter Abläufe)
- Maschinennull suchen (Eine Initialisierungsfahrt, die vor jeder Inbetriebnahme von Hand ausgelöst werden muß!)

Über die RS232 Schnittstelle hat der Anwender den Zugriff auf alle nachfolgenden Funktionen:

- Statuswertabfragen (Istwerte, Diagnosewerte etc.)
- Parametereinstellungen (Konfiguration, Optimierung etc.)
- direkte Positionierbefehle (Beispiele siehe weiter unten)
- Satz Programmierung (Schreiben, Ausführen von Programmen in einer BASIC ähnlichen Sprache)

Einige der kritischen Parameter sind passwortgeschützt, um ein ungewolltes Verändern und damit unerwünschtes Verhalten zu vermeiden.

Die wichtigsten Parameter, die die Regelung beeinflussen sind:

<i>Parameter</i>	<i>Parameternummer</i>	<i>momentaner Wert</i>
minimale translatorisch bewegte Masse	92	0.42
maximale translatorisch bewegte Masse	88	0,60
Trägheitsmoment von Getriebe und Kupplung	84	1.32
Steifigkeit der Regelung	23	150
Dämpfung der Regelung	24	160
Vorsteuerfaktor Drehzahl	25	80
Vorsteuerfaktor Beschleunigung	26	90
Vorsteuerfaktor Strom	70	90

Experimentieren mit den Parametern sollte jedoch unter größter Vorsicht geschehen, da es sehr leicht zu unkontrollierten Regelungsschwingungen kommen kann. Durch den endlichen Verfahrbereich der Linearführung können so Schäden am System, speziell an den Meßköpfen ent-

stehen! Gegebenenfalls muß der Scanner ohne Messköpfe oder mit substituierten Lasten betrieben werden.

Die wichtigsten Befehle, die zum Betrieb des Scanners benötigt werden sind:

POSA X [mm]: Der Schlitten wird auf X mm über Maschinennull positioniert.

SPEED X [%]: Die maximale Verfahrgeschwindigkeit beträgt X% der Maximalgeschwindigkeit (100%).

ACCEL X [ms]: Die Anstiegszeit aus dem Stand bis zum Erreichen der Verfahrgeschwindigkeit bzw. die Abbremszeit bis zum Stand in Millisekunden.

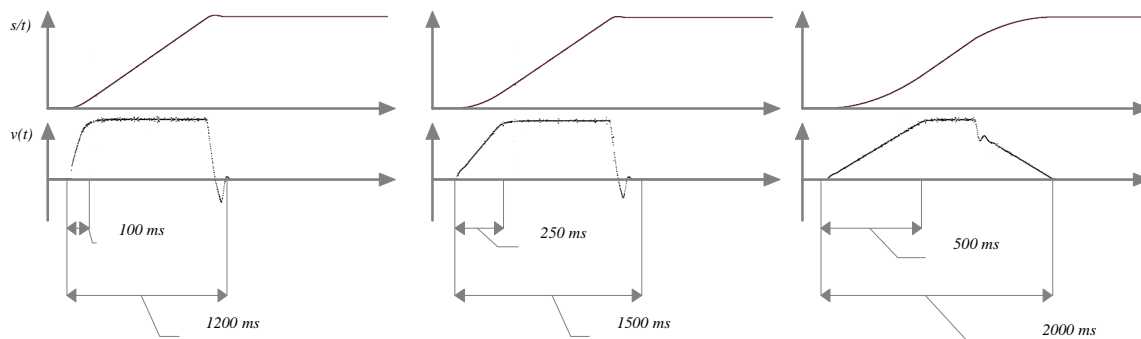


Abb. 3.3.3.1 Versuchsfahrten mit verschiedenen Einstellungen der Beschleunigungszeit

In Abb. 3.3.3.1 sind Weg-Zeit- und Geschwindigkeit-Zeitdiagramme für mehrere Versuchsfahrten mit unterschiedlichen Einstellungen von ACCEL (Beschleunigungszeit) zu erkennen. In allen Fällen wurde von 2000 mm auf 0 mm Meter mit den Einstellungen SPEED = 100 % (Maximalgeschwindigkeit) mit gleichen Lasten (etwa 6 kg), jedoch unterschiedlichen Einstellungen des Parameters ACCEL, verfahren.

Die für einen Positioniervorgang benötigte Gesamtzeit ist damit eine Funktion des Verfahrweges, der Maximalgeschwindigkeit und der Beschleunigungszeit. Die Parameter müssen experimentell ermittelt werden um eine bestimmte Verfahrszeit zu erreichen. Ein Positioniervorgang von 2000 mm auf 0 mm ist in etwa einer Sekunde möglich. Die Streuung der Gesamtverfahrzeit liegt üblicherweise unter 10 ms und ist somit recht gering.

3.3.3.1 Quadraturzählerkarte

Für die Funktionsweise des Scanners ist es unerlässlich, daß während des Verfahrvorgangs zu jedem Zeitpunkt die exakte Ist-Position des Schlitten und damit des Meßkopfes bekannt ist.

Zwar kann dies prinzipiell über RS232 abgefragt werden, da dies jedoch sehr langsam ist verbietet sich die Positionsrückkopplung über diesen Weg. (Die Position muß innerhalb einer Sekunde mindestens 256 mal abgefragt werden können). Da der PC während des Scanvorgangs ausschließlich mit der Ansteuerung und Entgegennahme von Daten der Kamera beschäftigt ist, ist es nötig, die Position auf schnellstmöglichem Weg in den PC rückzukoppeln. So kann zumindest die Zeit, die für die Positionsbestimmung benötigt wird, minimiert werden.

Hierzu bietet sich die Encodernachbildung der Compax-Steuerung an. Entsprechende Logik in der Steuerung wandelt dabei das Resolver-signal des Motors in ein TTL Encodersignal mit einer Auflösung von 1024 oder 512 Pulsen pro Motorumdrehung um.

Im PC wird eine Quadraturzählerkarte [QUA-94] mit 24 Bit Auflösung eingesetzt, die das Encodersignal auswertet und die Absolutposition dem PC auf direktem Weg zur Verfügung stellt. Die Auflösung dieser Positionsbestimmung liegt bei etwa 0.01 mm.

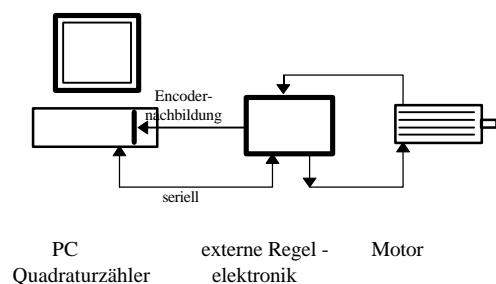


Abb. 3.3.3.1

Die Quadraturzählerkarte stellt neben den Encodereingängen auch drei programmierbare TTL-Ausgänge bereit, die zum Triggern der Laser benutzt werden.

3.4 Pin Hole Kameramodell

Die Berechnung von 3D Punkten aus einer bestehenden Triangulationsanordnung erfordert zunächst die Bestimmung der Eintrittswinkel des Lichtstrahles der Szene in die Kamera. Bei den folgenden Berechnungen wird die Kamera als ideale Lochkamera (Pin-Hole Camera) modelliert. Abb 3.4.1 veranschaulicht den Eintritt eines Lichtstrahls. Alles in die Kamera eintretende Licht geht in diesem Modell durch den Brennpunkt des Objektivs. Der Brennpunkt liegt in einem bestimmten Abstand (Brennweite) auf der Lotrechten vor der Bildebene.

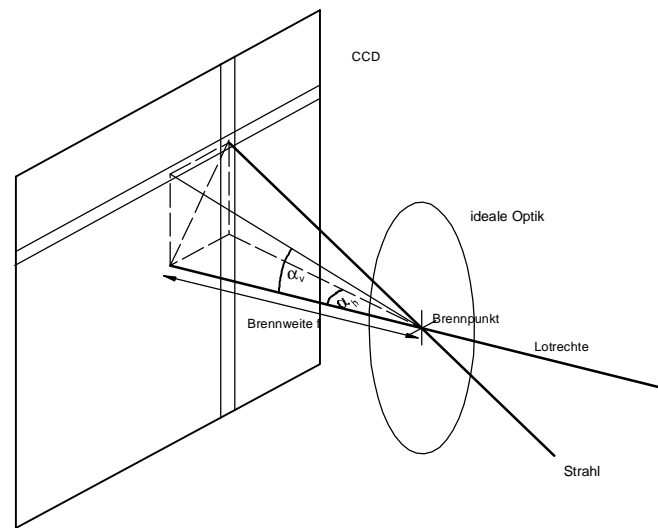


Abb. 3..4.1 Bestimmung von horizontalem und vertikalem Einfallswinkel

Der Eintrittswinkel kann in eine horizontale α_h und vertikale Komponente α_v zerlegt werden. Abbildung 3.4.2 dient zur Erläuterung der Berechnung der einzelnen Winkelanteile.

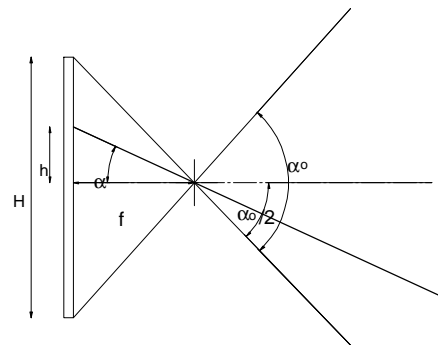


Abb. 3..4.2 Berechnung der Eintrittswinkel

Für den Winkel α gilt:

$$h = f \tan \alpha, \text{ also } \alpha = \arctan\left(\frac{h}{f}\right)$$

Für die Verwendung der Beziehung muß diese diskretisiert werden. Gleichzeitig wird die Brennweite f durch den Kameragesamtöffnungswinkel ausgedrückt. Dieser Öffnungswinkel kann im Gegensatz zur Brennweite relativ leicht bestimmt werden. Für die Brennweite gilt:

$$\frac{H}{2} = f \tan \frac{\alpha_o}{2} \Rightarrow f = \arctan\left(\frac{2h \tan \frac{\alpha_o}{2}}{H}\right)$$

Diskretisierung dieser Darstellung:

Es gelte:

$$\tilde{h} = \tilde{K} - \frac{\tilde{H}}{2}$$

Hierbei bezeichne \tilde{K} die diskrete Koordinate und \tilde{H} die Auflösung des Chips entlang der betreffenden Achse.

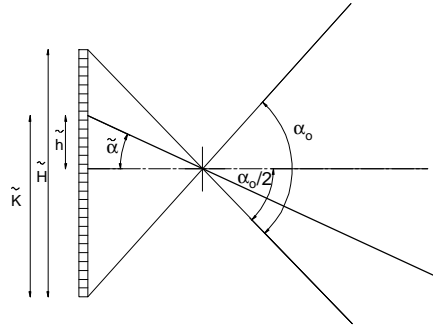


Abb. 3.4.3 Berechnung der Eintrittswinkel im diskreten Fall

Somit gilt für den Winkel (jeweils für vertikale(v) und horizontale(h)):

$$\tilde{\alpha}_{v,h} = \arctan\left(\frac{2\tilde{h}_{v,h} \tan\left(\frac{\alpha_{ov,h}}{2}\right)}{\tilde{H}_{v,h}}\right) \Rightarrow \tilde{\alpha}_{v,h} = \arctan\left(\frac{2\left(\tilde{K}_{v,h} - \frac{\tilde{H}_{v,h}}{2}\right) \tan\left(\frac{\alpha_{ov,h}}{2}\right)}{\tilde{H}_{v,h}}\right)$$

Die Berechnung der 3D Information aus den Eintrittswinkeln verdeutlicht Abb. 3.4.4.

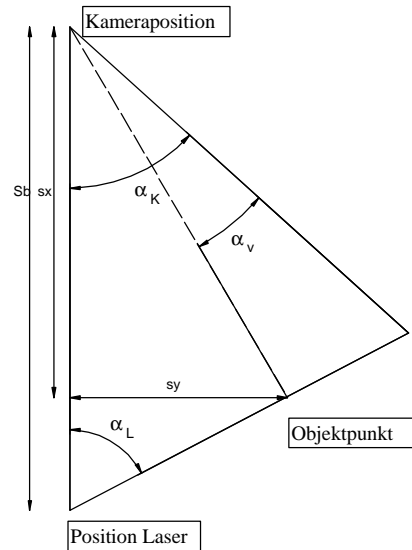


Abb. 3.4.4 Bestimmung der Koordinaten aus Eintrittswinkel und Basisabstand

$$sx \tan\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha_K - \alpha_V)\right) + sx \tan\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_L\right) = Sb \Rightarrow$$

$$sx = \frac{Sb}{\tan\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha_K - \alpha_V)\right) + \tan\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_L\right)}$$

$$sy = \tan\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha_K - \alpha_V)\right) sx$$

$$sz = \sqrt{sx^2 + sy^2} \sin \alpha_H$$

mit $\alpha_V = \tilde{\alpha}_V$ und $\alpha_H = \tilde{\alpha}_H$.

Der Meßpunkt $(sx, sy, sz)^T$ ist relativ zur Triangulationsanordnung definiert. Durch Transformation des Punktes in das Koordinatensystem der Meßmaschine erhält man schließlich die absoluten Koordinaten.

3.5 Parameterreduzierte Sensorkalibrierung

Erweist sich die mit dem einfachen mathematischen Modell erreichbare Genauigkeit als zu gering, oder die manuelle Bestimmung der Parameter als zu mühsam, so kann sowohl die Genauigkeit als auch der manuelle Aufwand durch die Kalibrierung des Meßkopfes verbessert werden. Im Rahmen der Arbeit wurde ein Konzept erarbeitet, mit dem die parameterreduzierte Kalibration eines Lichtschnittsensors durchgeführt werden kann. Die Realisierung eines auf diesem Ansatz beruhenden Kalibrierverfahrens wird eine der nächsten Arbeitsschritte im TOPAS Projekt darstellen.

Traditionell wird man so vorgehen, daß man zunächst versucht, die Kalibrierung der internen Kameraparameter vorzunehmen, indem z.B. Parameter des Lenz'schen Kameramodells [LENZ-87] durch eine Kalibrationsmessung identifiziert werden. Der dort verwendete Term modelliert mathematisch die Radialverzerrung, welche insbesondere bei Kameraobjektiven mit kurzer Brennweite zu beobachten ist. So würde man zunächst den Hauptanteil des nicht idealen Kameraverhaltens ausschließen. Bei der eingesetzten Kamera zeigte sich jedoch ein weiterer, eher noch stärkerer Verkippungseffekt. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, ist das mathematische Modell zu erweitern. Es sind wiederum entsprechende Parameter aus einer Kalibrierungsmessung zu bestimmen und den rotationssymmetrischen Effekten zu überlagern. Am Ende steht ein mathematisches Werkzeug, daß die inneren Kameraparameter bestimmt und so die Kamera in eine ideale Lochkamera überführt. Allerdings fehlt für exakte Berechnungen noch die Bestimmung externer Kameraparameter (hier zumindest die Verkippung der Kamera). Desweiteren bleibt bei einem Lichtschnittsensor auch die exakte Lage der Laserebene (Linie) und die Länge des Basisabstands zu bestimmen.

Insgesamt scheint die modellbasierte Vorgehensweise zu aufwendig, da sie indirekt vorgeht. Es ist nicht das Ziel des Systems entzerrte Grauwertbilder zu liefern, sondern exakte 3D Vermessung zu gewährleisten.

Die parameterreduzierte Lichtschnittsensorkalibrierung kalibriert die Komponenten Kamera (intern, extern) und Laser (extern) nicht mehr einzeln, sondern kalibriert das System Meßkopf als Gesamtheit. Einzige Ausnahme hierbei bildet der Verkippwinkel des Lasers. Er muß manuell justiert werden¹⁸.

¹⁸ Das manuelle Einstellen des Lasers auf ein vorgegebenen Winkelmaß, (alternativ: Bestimmung dieses Winkels) an einer bestehenden Konfiguration ist im Allgemeinen sehr exakt möglich. Dies geschieht durch Abmessen der Laserlinie auf entfernten Wänden. Die Winkel folgen mittels einfacher trigonometrischer Beziehungen.

Die grundlegende Idee besteht darin, ein bekanntes Objekt derart im Meßbereich zu plazieren, daß zu jedem detektierten Laserpunkt in der Kamera die Lage der Laserlinie auf dem Kalibrierkörper bekannt ist und somit eine direkte Abbildung $(x_{CCD}, y_{CCD}) \rightarrow (x_{Welt}, y_{Welt}, z_{Welt})$ gefunden wird. Dies ist deshalb möglich, da unter einer Triangulationsanordnung eine eindeutige Abbildung von CCD-Pixel in 3D-Weltkoordinaten existiert. Deckt der Kalibrationskörper die gesamte Meßtiefe beider Meßköpfe ab, ist es dabei nicht nötig den Kalibrierkörper exakt zu plazieren. Die Mitte des Körpers markiert die Lage des Ursprungs, die Ausdehnung des Körpers bestimmt die Richtung der Achsen des Weltkoordinatensystems.

Die Kalibrierung verzichtet dabei auf die einzelne Bestimmung der Parameter

- Objektivbrennweite
- Basisabstand
- Kameraverkipfung
- Objektiv Verzerrungsparameter

Alle diese Komponenten können im Prinzip beliebig gewählt und verändert werden. Die Kalibrierung berücksichtigt zudem automatisch alle nicht einfachen (nicht symmetrischen) Verzeichnungen des Objektivs, die durch Herstellungstoleranzen entstehen. Für sie ist teilweise auch keine analytische Modellierung möglich.

Diese Randbedingungen einer parameterreduzierten Kalibrierung erfordern eine spezielle Struktur des Kalibrationskörpers.

Da dieser Parameter der einzig manuell zu bestimmende ist, erscheint es nicht lohnenswert den Laserverkipfungswinkel mittels Kalibration zu bestimmen.

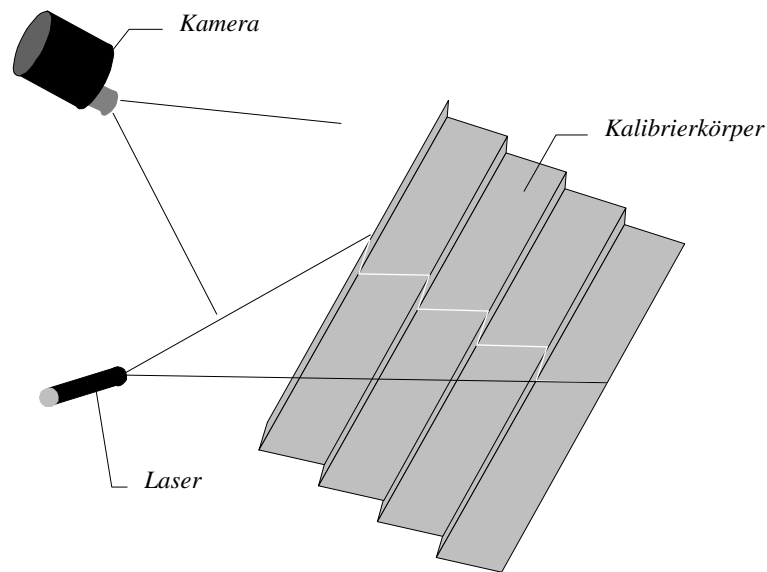


Abb. 3.5.1 Vorschlag für einen Kalibrierkörper

In Abb. 3.5.1 ist eine Kalibrationszene skizziert, die einen möglichen Kalibrierkörper beinhaltet. Die einzige vom Benutzer manuell zu bestimmende Unbekannte ist die Verkippung des Lasers zur Waagerechten. Da dieser Parameter leicht zu bestimmen ist, kann er vom Benutzer vorgegeben werden und muß nicht durch Kalibration ermittelt werden. Das manuelle Bestimmen des Verkippwinkels verspricht hier wesentlich bessere Resultate, als dies durch Kalibration an dieser Stelle möglich wäre.

Die Lage des Lasers auf dem Körper ist somit als 3D Information (mehrere Geradengleichungen) abhängig von der Verfahrenhöhe des Meßkopfes bekannt. Der Kalibrationskörper muß, da seine Flächen relativ zu einem im Kalibrierkörper liegenden Ursprung definiert wurden, nicht exakt in der Meßmaschine positioniert werden. Er kann also leicht gedreht oder zur exakten Mitte der Meßmaschine verschoben plaziert werden. Die Berechnungsergebnisse werden sich auf das durch den Kalibrierkörper erzeugte virtuelle Weltkoordinatensystem beziehen. Die Geradenstücke die sich durch das Scannen als Schnitt der Laserebene mit dem Körper ergeben, sind durch das Lösen von Gleichungssystemen zu bestimmen. Zu diesem Geradenzug korrespondiert nun zu jeder Zeit eine in der Kamera detektierte Folge von Pixeln (Abb. 3.4.2).

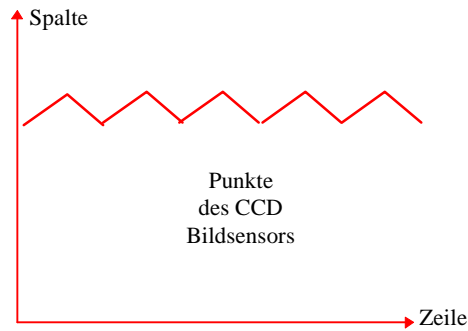


Abb.3.5.2 'Abbild' des Eichkörpers

Hätte der Kalibrierkörper keine markanten oder zu wenige Merkmale (z.B. bei einer Ebene oder Pyramide) bestände prinzipiell wieder ein Korrespondenzproblem zwischen Pixelkoordinaten und Kalibrierkörperkoordinaten. Für den Fall einer Ebene ist das Problem nicht zu lösen. An einem ebenen Kalibrierkörper würde sich die projizierte Laserlinie auf dem Sensor als Gerade abbilden. Es ist zwar von jedem Pixel bekannt, daß zu einem Punkt auf der Geraden korrespondiert die sich auf dem Körper abbildet, es ist jedoch nicht zu ermitteln zu welchem Punkt er korrespondiert. Der Kalibrierkörper muß also genügend strukturiert sein und genügend Merkmale tragen, um diese Korrespondenz zumindest exakt schätzen zu können.

Auf dem gewählten faltenbalgförmigen Körper korrespondieren die Ecken der Flächen zu lokalen Maxima und Minima im Kamerabild¹⁹. Somit ist für die Extremwerte direkt eine Abbildung von Pixelkoordinaten in Weltkoordinaten gefunden. Alle dazwischen liegenden Pixel verteilt man linear auf das korrespondierende Geradenstück des Kalibrierkörpers.

Prinzipiell könnte der Körper auch aus rechteckigen Kammflächen bestehen. Das Merkmal (Ecke) könnte im Kamerabild sicher detektiert werden. Der faltenbalgartige Kalibrierkörper hat jedoch den Vorteil, daß bei einem günstigen Winkel der Flächen zueinander keine Abschattungen auftreten. Somit steht die gesamte Information der Gerade für eine präzise (Subpixel-) Lageschätzung des Maximums oder Minimums zur Verfügung.

Verfährt nun der Meßkopf über einen Kalibrierkörper, der das gesamten Meßvolumen abdeckt, wird jeder Bildpunkt (Subpixelpunkt) einer Raumkoordinate eindeutig zugeordnet. Speichert man diese Zuordnung in einer Look-Up Tabelle kann der entsprechende Raumpunkt bei anschließenden Messungen nachgeschlagen werden kann. Zur Meßzeit wird also nichts mehr gerechnet.

Zur Reduzierung des baulichen Aufwands ist es möglich den Kalibrierkörper nur zum Teil aufzubauen, und zeitversetzt an den entsprechenden Teilen zu kalibrieren. Bei der zeitversetzen

¹⁹ Bei Nichteindeutigkeit oder zur Verbesserung der Genauigkeit des Verfahrens kann zur Lageschätzung der Extremwerte auch über die Steigung der Pixel auf dem Geradenstück extrapoliert werden, wobei der Schnitt zweier Geraden die Lage bestimmt. Somit muß auch schon für die Extremwerte interpoliert werden.

Kalibrierung am Teilkörper muß garantiert sein, daß die Teilkörper virtuell über die Zeit sehr exakt den Gesamtkalibrierkörper ergeben. Trennt man also den Körper in mehrere Abschnitte auf muß jeweils für eine sehr exakte Positionierung des Teilkörper gesorgt werden. Am einfachsten ist dies durch einen Kalibrationsrahmen möglich an dem das Teilstück exakt positioniert werden kann. (vgl. Abb. 3.5.3). Der hier vorgeschlagene Teilkörper ist viermal kleiner als der Originalkörper.

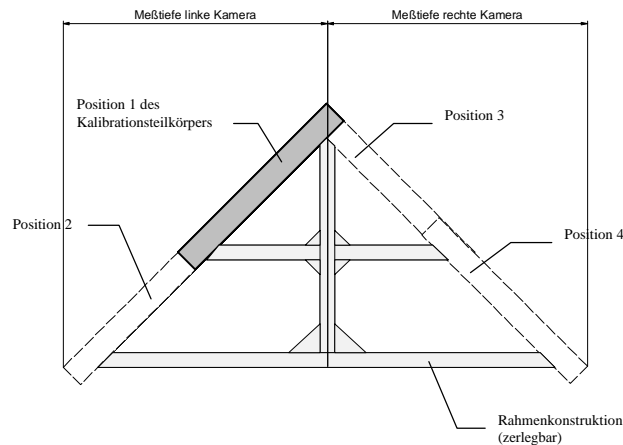


Abb. 3.5.3 Vorschlag einer Rahmenkonstruktion zur Platzierung von Kalibrationssteilkörpern

Für den Kalibrierkörper sind auch kammförmige Ausprägungen denkbar, welche die nachteilige Eigenschaft haben, daß durch Abschattungseffekte viele Punkte des Körpers von der Kamera nicht gesehen werden, und damit auch keine Information mehr tragen.

Neben meßtechnischen Überlegungen sind bei der Konzeption auch die Wahl eines geeigneten Steuerrechner und Betriebssystems zu bedenken. Da das am Markt befindliche Angebot an Hardware für Meß- und Regeltechnik fast ausschließlich auf die PC die Hardware abzielt, fiel die Wahl auf einen PC mit ausreichender Speichermenge und der Windows Oberfläche.

3.6 Echtzeitfähigkeit von Betriebssystemen

Um zu verstehen, wie sich die Wahl eines Betriebssystems auf die Meßaufgabe auswirkt muß zunächst noch einmal kurz die Funktionsweise des eingesetzten Kamerasystems wiederholt werden. Der PC triggert die Befehlsausführung der Kamera und holt anschließend die 3D Vorinformation von der Kamera ab. Wenn die zeitliche Abfolge der Befehle durch später noch zu

beschreibende Einflüsse des Betriebssystems gestört wird, kommt es zu unerwünschten Effekten da der Meßkopf nach einem festen Zeitschema verfährt²⁰.

Der immer noch anhaltende Preisverfall im Hardwarebereich hat Betriebssysteme mit graphischen Oberflächen im Endanwendermarkt möglich gemacht, die noch vor wenigen Jahren leistungsfähigen Workstations vorbehalten waren. Waren vor einigen Jahren noch Single User Singletask Betriebssysteme ohne graphischer Benutzerschnittstelle installiert, sind es heute schon ausgereifte Multiuser Multitasking Systeme. Abb. 3.6.1 illustriert die Einschätzung solcher Systeme im Bezug auf ihre Eignung zur Echtzeitfähigkeit.

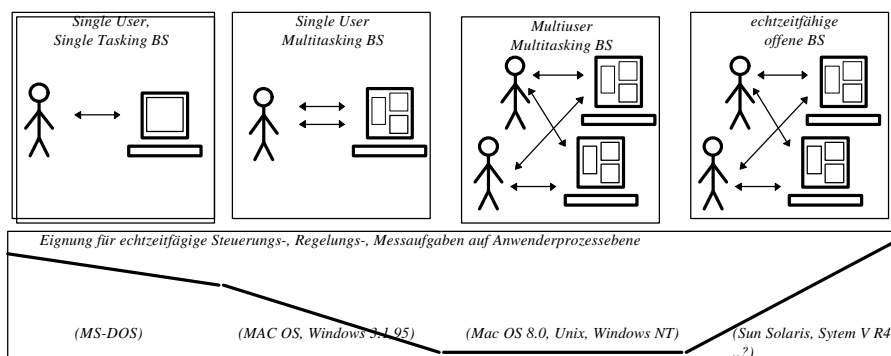


Abb. 3.6.1 Entwicklung von Betriebssystemen

Als Rückschritte im Bezug auf echtzeitfähige Mess-, Steuerungs- und Regelungsaufgaben auf Anwenderprozessebene sind insbesondere die folgenden Punkte im Multiuser- Multitaskingbetrieb zu nennen.

- Virtualisierung des Betriebsmittels Prozessor (Schedulingmechanismen)
- Virtualisierung des Betriebsmittels Speicher (Seitenverdrängungs-, Einlagerungsmechanismen)
- Virtualisierung anderer Rechnerhardware (z.B. Interruptverarbeitung) und
- Schutzmechanismen die den direkten Hardwarezugang verhindern

Betriebssysteme wie etwa UNIX oder Windows NT lassen auf Anwendererebene durch geeignete Schutzmechanismen (Rechteverwaltung bzgl. E/A) keinen direkten Zugriff mehr auf die Hardware zu. Hier ist es die Aufgabe des Herstellers für seine Hardware geeignete Systemtrei-

²⁰ Die im weiteren diskutierte Problematik tritt bei allen denkbaren Varianten (vgl. Kap 3.1) auf bei denen der Rechner während der Messung echtzeitfähige Aufgaben erledigt. Sie ist also kein spezifischer Nachteil des Ranger Systems.

ber bereitzustellen. Mit dem Zugang zu dieser Hardware wäre dann allerdings nur ein Teil der oben angesprochenen Probleme gelöst²¹.

Die Entwicklung zeichnet sich ab, daß zukünftige Betriebssysteme dem Anwender wieder mehr Mitspracherecht zur Erzielung eines geeigneten Betriebssystemverhalten lassen. Dies wird zum einen durch zur Laufzeit zum Kern linkbaren Treiber unterstützt, zum anderen wird die Einflußnahme auf die Vergabe von Rechenzeit (weiche bzw. harte Echtzeitfähigkeit) ermöglicht [ZIM-96].

Windows 3.1

Die erste softwareseitige Realisierung der Meßmaschine fand unter Windows 3.1 statt. Ähnlich wie bei den verfügbaren Macintosh Betriebssystemen ist hier die Virtualisierung des Prozessors benutzergesteuert (kooperatives Multitasking). Implizit wird durch die für das ereignisgesteuerte Programmierparadigma notwendige Eventloop ein Scheduler angestoßen und ggf. der Kontrollfluß zwischen Prozessen umgeschaltet. Dem Prozess wird also der Prozessor solange nicht entzogen, wie er keine Events abfragt oder explizit den Scheduler anstößt.

Zur komplexen Thematik der Virtualisierung des Arbeitsspeichers dieses Betriebssystems sind eine Reihe Publikationen erschienen [ALB-92],[SCHR-94],[SIER-94]. Es ist möglich, bestimmte Speicherbereiche im Speicher zu verankern und vor dem Zugriff des Betriebssystems zu verbergen. Daher kann das zeitkritische Nachladen von verdrängten Speicherbereichen für die betroffenen Datenstrukturen vermieden werden. Der direkte Hardwarezugriff ist in Windows 3.1 per E/A Befehl prinzipiell möglich, wird jedoch vom BS überwacht. Dadurch führt jeder Portzugriff im Anwendungsprozess letztendlich zur Ausführung einer Ausnahmeroutine des Betriebssystems. Für E/A Adressen, die den Betrieb des Systems nicht beeinträchtigen können, darf das Kommando ausgeführt werden. Erschien es vor wenigen Jahren noch lohnenswert aus Performancegründen für die Ansteuerung eines Gerätes spezielle Gerätetreiber zu programmieren (VXD- Treiber laufen in Schutzring 0 des 386), so stellt der minimale Betriebssystemoverhead auf heutigen leistungsfähigen Systemen keine Einschränkung mehr dar.

²¹ Zur Einschätzung der Problematik der Treiberprogrammierung am Beispiel UNIX eignen sich [WEI-96] und [KÖH-96]

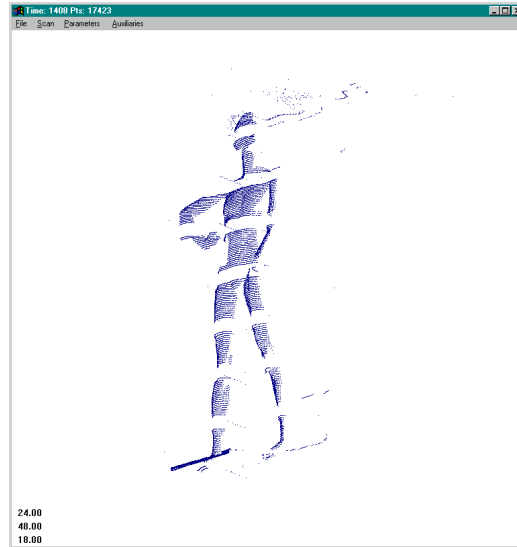


Abb. 3.6.2 Illustriert ein unbefriedigendes Meßergebnis durch Einfluß des Betriebssystems (in Windows vermeidbar)

Windows 95

Die neue Betriebssystemarchitektur von Windows 95 macht in einigen Bereichen im Vergleich zu Windows 3.1 große Schritte in Richtung eines echten Multiusersystems, wie etwa Windows NT. Vor allem reizt die nun vorhandene entspannte Speichersituation zum Umstieg auf dieses Betriebssystem, was die Programmierung erheblich erleichtert (keine 64k Segmentbegrenzungen), und gleichzeitig die Portabilität des Codes stark verbessert.

Das Prozeßscheduling wird nun in regelmäßigen Zeitabschnitten automatisch durch einen Timerinterrupt angetrieben (preemptives Multitasking). Wäre dies nicht durch einen Trick zu beeinflussen, wäre kein vernünftiges Messen mehr möglich (vgl. Abb. 3.6.2.1). Microsoft hat jedoch aus Kostengründen²² von einer Virtualisierung der Interrupts abgesehen [BÖG-95]. Dies ermöglicht es der Meßapplikation für den Zeitraum der Meßwertaufnahme die Interrupts zu sperren und somit für den Zeitraum einer Sekunde das preemptive Multitasking zu unterlaufen (Monopolisierung des Prozessors). Ein solches Vorgehen ist in traditionellen Multiuserbetriebssystemen nicht möglich.

Auf der Ebene des Arbeitsspeichers kann die Virtualisierung dieses Betriebsmittels zu ähnlichen Ausfällen in der Messwolke führen, da es vorkommen kann, daß Arbeitsspeicherbereiche für die Ablagen der Meßwerte erst während der Messung zeitraubend vom Sekundärspeicher eingelagert werden müssen. Dies läßt sich analog zu der Vorgehensweise in Windows 3.1 durch Verankern der betroffenen Seiten lösen. Auch dies mißlingt in traditionellen multiuserfä-

²² Die Virtualisierung aller Interrupts führt bei jeder Interruptbehandlung zu einem nicht zu vernachlässigendem Betriebssystemoverhead.

higen UNIX ähnlichen Betriebssystemen, da es einem Anwenderprozess verboten werden muß, sich des physikalischen Speichers zu bemächtigen.

Eine echtzeitfähige Einbeziehung von Hardware, die gewisse Zustände der Anwendung über Interrupts meldet, ist auf Anwendungsebene weder mit Windows 3.1 noch mit Windows 95 möglich. Die typische Interruptlatenzzeit beträgt bei Windows 3.1 bis zu einigen hundert Millisekunden, was für harte Steuerungs- oder Regelungsaufgaben nicht genügt.

4 Resümee und Ausblick

Die grundlegende Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit bestand in der Konzeption und Realisierung eines Systems zur Erfassung individueller Körpergeometrie. Besonders stand hierbei die Minimierung von Bewegungsunsicherheiten seitens des Meßsystems im Vordergrund, was durch eine Aufnahmezeit von etwa einer Sekunde erreicht wurde. Als geeignetes Meßprinzip hat sich die Lichtschnitttriangulation herausgestellt.

Die Anforderungen bezüglich der Gesamtmeßzeit und der Meßfrequenz machten den Einsatz eines speziellen Kamerasystems zur Bildauswertung notwendig. Das ausgewählte Konzept erlaubt durch eine integrierte Multiprozessorarchitektur Bildvorverarbeitung direkt in der Kamera und ermöglicht dadurch minimale Aufnahmezeiten mit hohen Meßraten.

Das realisierte Meßsystem erlaubt die Abtastung eines Menschen mit einer Auflösung von weniger als einem Kubikzentimeter in annähernd einer Sekunde. Die horizontale Meßauflösung liegt je nach Triangulationsanordnung und Entfernung zwischen einem Millimeter bis etwa sieben Millimetern. Mit dem prototypischen Aufbau des Systems konnte gezeigt werden, daß alle in Kap. 1.4 genannten Randbedingungen erfüllt werden können. Das System ist damit grundsätzlich geeignet im Bereich Anthropometrievermessung für die Individualproduktion eingesetzt zu werden.

Mit dem geplanten Übergang auf PCI-Version des Kamerasystems sind wesentlich höhere Meßraten möglich. Mit dem geschwindigkeitsoptimierten System sind gleichzeitig Algorithmen denkbar, die mit hoher Subpixelgenauigkeit die Auflösung sowohl vertikal als auch horizontal weiter gesteigern. Die parameterreduzierte Kalibrierung der Meßköpfe läßt weitere Verbesserungen in der Genauigkeit erwarten.

Parallel dazu kann durch die Verfügbarkeit von Meßdaten die Arbeit im TOPAS Projekt verstärkt im Bereich Modellanpassung stattfinden. Zur Validierung der vom angepaßten Modell abgeleiteten Daten müssen Reihenuntersuchungen durchgeführt werden, bei denen maschinell generierte Individualdaten mit tatsächlichen Personendaten verglichen werden.

Am vorliegenden System stand der Aspekt Anthropometrievermessung im Vordergrund. Aufgrund der hierdurch gewonnenen Körperdaten sind als fortgeschrittene Aufgabenstellungen die automatische Haltungs- und Bewegungsanalyse des Menschen denkbar, da die Adaption der Haltungsparameter nun entkoppelt von der Anthropometrievermessung betrachtet werden kann.

I. Literatur

- [ALB-92] Albrecht, Harald: Konzept und Realisierung des protected mode der Intel-CPU's, c't 8/92, S. 202
- [AYA-91] Nicholas Ayache: Artificial Vision for Mobile Robos, The MIT Press 1991
- [BÖG-95] Harald Bögeholz, Peter Siering; Interna von OS/2 Warp 3 und Windows 95, c't 9/95 S. 192
- [FEI-92] Werner Feith, Aufbau und Funktionsprinzip von CCD-Bildsensoren, c't 1/92 S.158
- [HAU-95] Compax Produkthandbuch, Kompakte Servosteuerung, Hauser Elektronik GmbH D-77656 Offenburg
- [HEI-96] Boris Heiduk: Generierung kalibrierter Konturinformation aus Schattenriß-aufnahmen, AG v. Puttkamer April 1996
- [HÜL-96] Stefan Hülbrock: Konzeption und Realisierung einer RPC-Schnittstelle zur Remote-Kopplung des CAD-Menschmodells RAMSIS an einen objektorientierten Menschmodell-Kern, AG v. Puttkamer April 1966
- [INA-95] INA Produktkatalog, INA Lineartechnik Zweibrücken
- [IVP-95] Mapp 2200 Technical Description Ver. 4.1, IVP, Integrated Vision Products AB, Teknikringen 2C, S-583 30 Linköping, Sweden
- [KÖH-96] Peter Köhler; Erstellung eines Blockgerätetreibers, iX 4/96 S. 184
- [LAS-95] Produktbeschreibung Laser, LASIRIS INC. Kanada
- [LENZ-87] R. Lenz, Linsenfehlerkorrigierte Eichung von Halbleiterkameras mit Standardobjektiven für hochgenaue 3D Messungen in Echtzeit. In Mustererkennung, Informatik-Fachberichte 149, S 212-216. DAGM, 1987
- [MCS-95] MCS Motion Control System für PC's, Conitec Datensysteme 64807 Dieburg
- [SCHR-94] Dr. Schramm, Mathias: Hardwareinterrupts unter Windows, c't 2/94, S. 188

- [SIER-94] Siering, Peter: Systemnahe Programmierung für und unter Windows c't 8/94 S. 202
- [TRI-95] Rainer Trieb: Erfassung, Analyse und Synthese anthropometrischer Körperbaudaten zur Automatisierung von Design- und Individualprodukten (Forschungsantrag)
- [PHY-95] Bildverarbeitung 95/96; Hard & Software für die industrielle Bildverarbeitung, Phytec Meßtechnik GmbH, D-55129 Mainz
- [PUL-95] Vollbild Shutter Kamera TM-6701AN; Fa. PULNiX 63755 Alzenau
- [QUA-94] Manual 3x24 Bit Counter-Karte Quadraturzähler; Quancom Elektronik D-50321 Brühl
- [WEI-96] Martin Weitzel; Treiberprogrammierung unter PC-Unix, iX 4/96 S.178
- [ZIM-96] Zimmermann, Christoph; Universität Dublin: Methoden und Realisierung flexibler Systemkerne, iX 3/96 S.143



II. Technische Zeichnungen

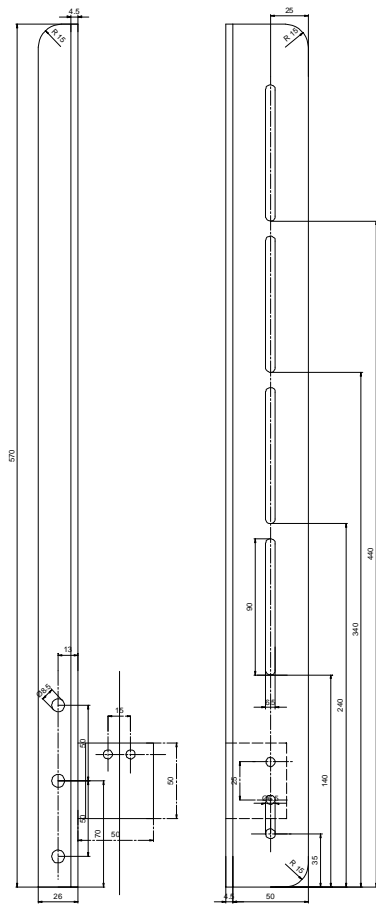


Abb.II.1

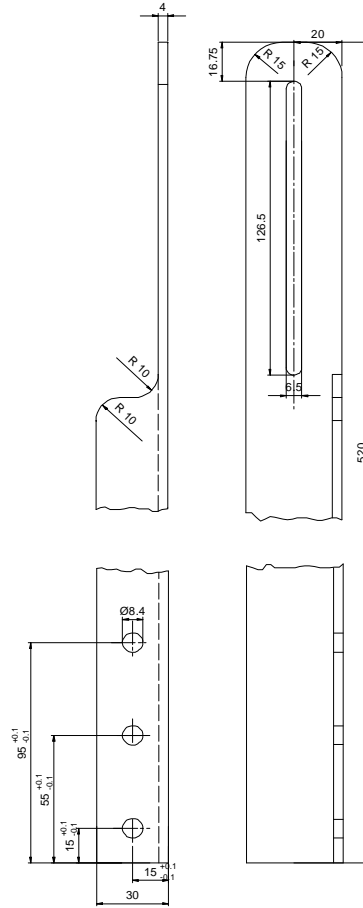


Abb.II.2

1	1	Aluminium Winkel 40x20x4	3.3206.71
Pos.	Menge	Benennung	Werkstoffnummer-DIN
Kamerahalterung Antriebsseite			
Name		Informatik	Norm und Prüfverfahren
Fachlehrer		AG	
Datum		12.03.96	89/459
		Teilgen	Konstruktion

Abb.II.1: Halterung für Kamera und Laser (alte Ausführung 1 Laser)

Abb.II.2: Kamerahalterung links (rechts symmetrisch hierzu)

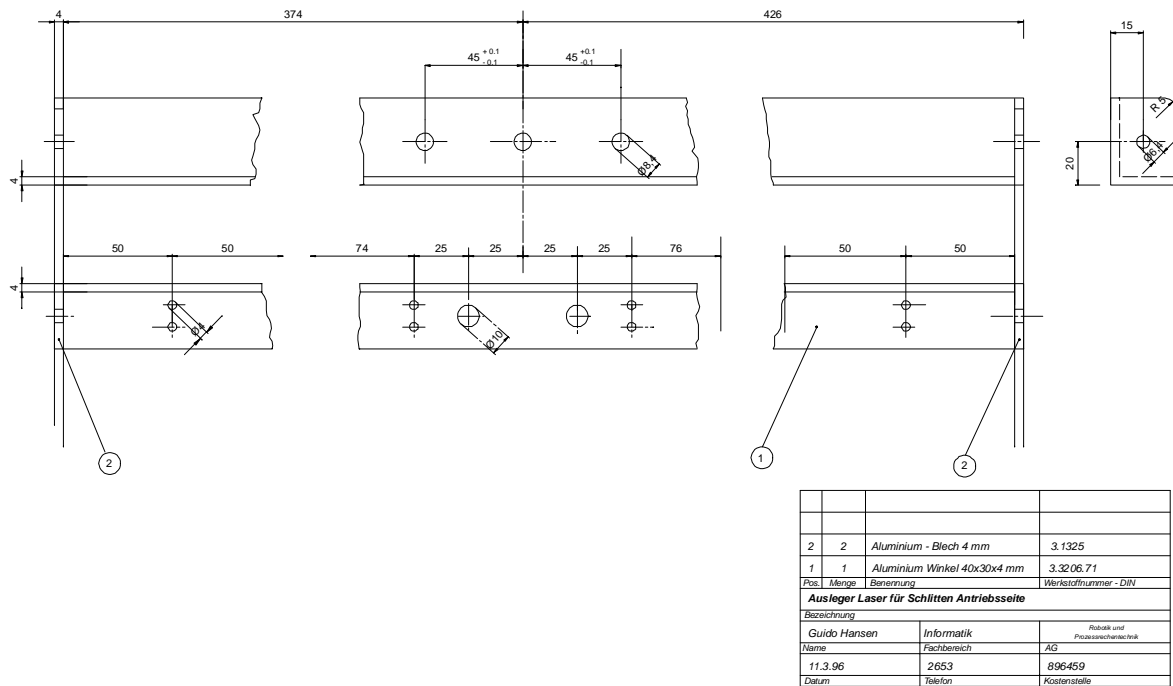
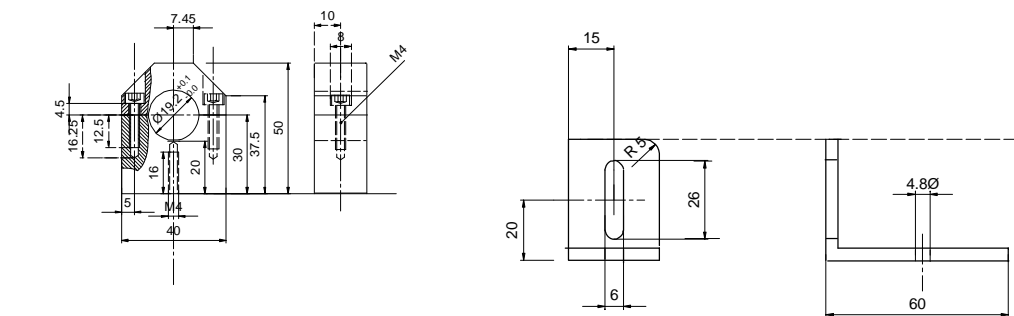


Abb. II.3

Abb.II.3: Ausleger für 2 Laser. (links und rechts ähnlich)



AbbII.4

AbbII.4: Laserhalterung zur Befestigung der Lasers (4x)

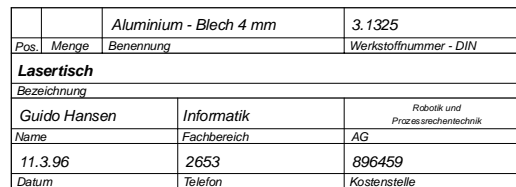


Abb.II.5

Abb.II.5: Lasertisch zur Befestigung der Laserhalterung am Laserausleger (Abb.II.3)

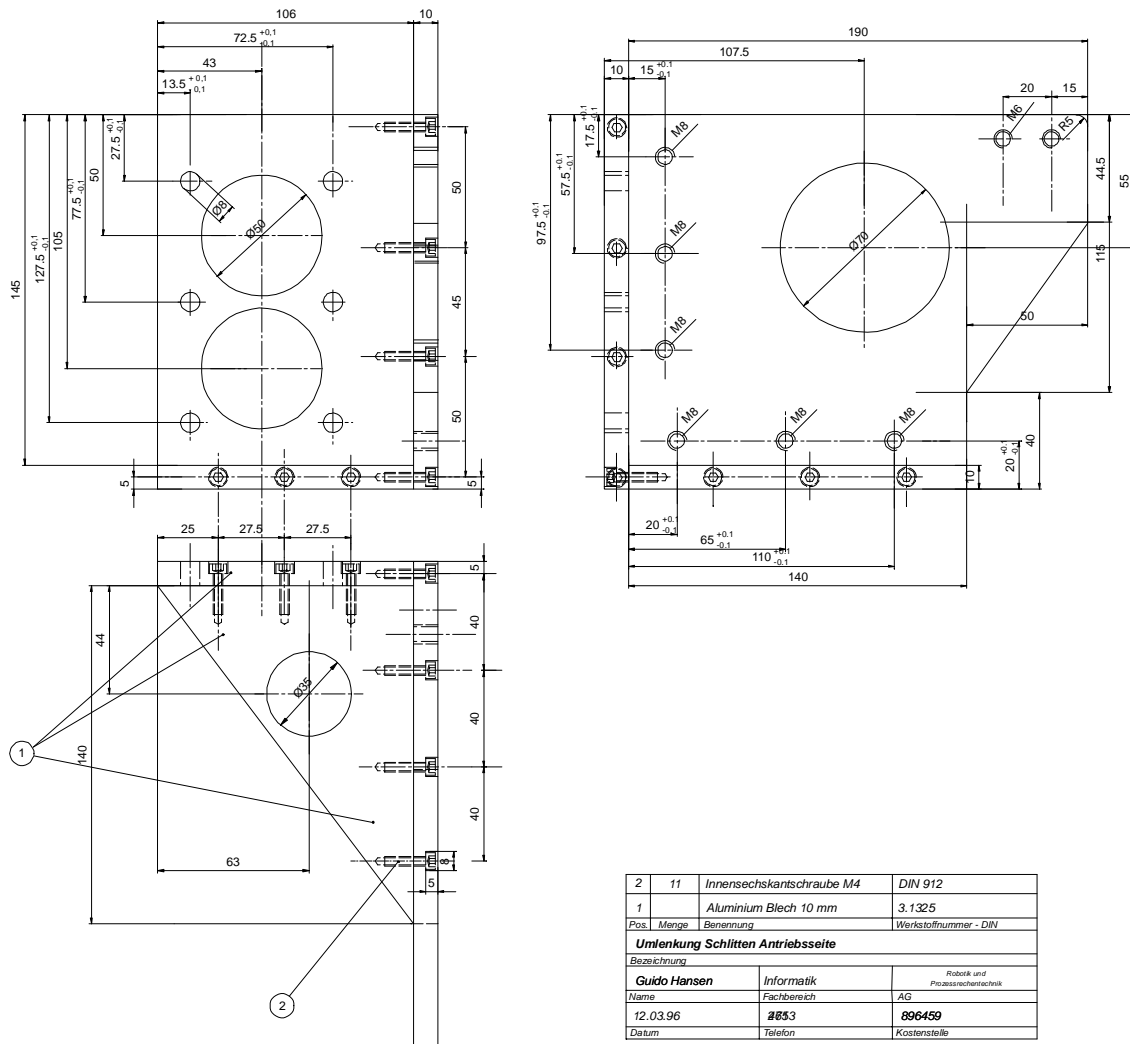


Abb.II.6: Umlenkkörper zur Befestigung der Kamerahalterung und des Laserauslegers am Schlitten der Linearführung

Abb. II.6



III. Kabelverbindungen

Kamerakabel:

Die folgende Beschreibung bezieht sich auf die momentan eingesetzte ISA-Version der Ranger 2200 Kamera. Die Bedeutung der einzelnen Pins ist unbekannt.

Kameraseite: 26 poliger SUB-D Stecker (3 reihig)

Rechnerseite: 25 poliger SUB-D Stecker (2 reihig)

Verdrahtung: Pin $i_{\text{Rechnerseite}}$ an Pin $i_{\text{Kameraseite}}$; Pin 26 der Kameraseite ist nicht angeschlossen.

Serielles Kabel:

Zur Verbindung der seriellen Schnittstelle des PC mit der HAUSER Steuerung.

Steuerungsseite: 9 poliger SUB-D Stecker (2 reihig)

Rechnerseite: 25 poliger SUB-D Stecker (2 reihig)

<i>Rechnerseite PinNr.</i>	<i>Steuerungsseite PinNr.</i>	<i>Funktion</i>
2	2	RxD-TxD
3	3	TxD-RxD
4	8	RTS-CTS
5	7	CTS-RTS
6	4	DSR-DTR
7	5	GND-GND
20	6	DTR-DSR

Encodernachbildung:

Zur Positionsrückkopplung der Rotorlage in den PC (Ecoderkarte Buchse 1). Achtung! Dieses Kabel muß zur Vermeidung von Störeinflüssen so kurz wie möglich ($\ll 2$ m) und abgeschirmt sein.

Steuerungsseite: 15 poliger SUB-D Stecker (2 reihig) an Buchse X13 Encoder (Unterseite) mit Kanal 2 (Kanal 1 ist ein Eingang)

Rechnerseite: 9 poliger SUB-D Stecker (2 reihig)

Zählerkarte PinNr.	Funktion	Steuerungsseite PinNr.	Funktion
		1	(Schirm)
4	90 Grad Phi	3	Kanal 2 Spur B
5	0 Grad Phi	4	Kanal 2 Spur A
7	GND/Masse	15	GND/Bezugspunkt
7-6-3 (Brücke)	GND=0V=Reset (activ high)		

Initiatorkabel

Verbindung des Maschinen-Null Initialtors mit der Steuerung

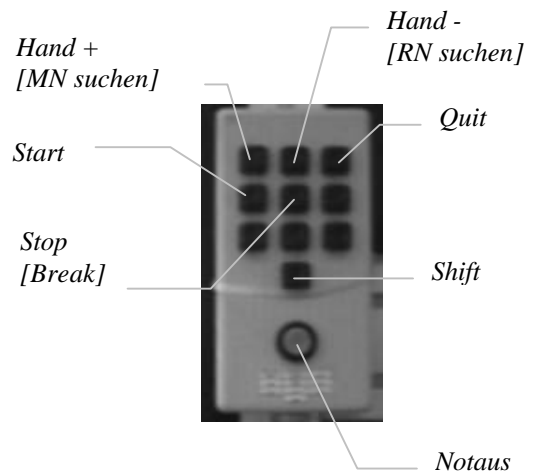
Steuerungsseite: 9 polig SUB-D Stecker

Initiatorkabel (Farbe)	Initiatordose Eingang
braun	X2/6
swarz	X2/5
blau	X2/4

<i>Initiatorendose Aus- gang</i>	<i>Suteuerungsseite PinNr.</i>
<i>X4/12 (+24V)</i>	<i>5</i>
<i>X4/15 Sig.E1</i>	<i>9</i>
<i>X4/14 Sig.MN</i>	<i>7</i>
<i>X4/13 Sig.E2</i>	<i>8</i>
<i>X4/10 GND</i>	<i>4</i>

Handsteuerung / Notaus

Damit ein manueller Notbetrieb des Scanners gefahren werden kann, und um die Maschineninitialisierung durchzuführen wurde eine Handsteuerung gebaut. Sie wird direkt an die digitalen Eingänge und Ausgänge X8 und den Ein- und Ausgängen der Sicherheitskette Notstop angeschlossen.



X8:

<i>Digitale Ein/Ausgänge X8</i>	<i>Pin</i>	<i>Farbe Handsteuerung Ausgang</i>	<i>Funktion [mit Shift]</i>
<i>E1</i>	<i>1</i>	<i>schwarz</i>	<i>SHIFT</i>
<i>E2</i>	<i>2</i>	<i>grau</i>	<i>Hand+, [MN suchen]</i>
<i>E3</i>	<i>3</i>	<i>lila</i>	<i>Hand-, [RN suchen]</i>
<i>E4</i>	<i>4</i>	<i>gelb</i>	<i>Quit, [Teach Zero]</i>
<i>E5</i>	<i>5</i>	<i>blau</i>	<i>Start</i>
<i>E6</i>	<i>6</i>	<i>braun</i>	<i>Stop, [Break]</i>

X9:

<i>Pin X9</i>	<i>Funktion</i>	<i>Farbe Handsteuerung Ausgang</i>
<i>1</i>	<i>+24 V</i>	<i>rot</i>
<i>6</i>	<i>NotStop Eingang</i>	<i>grün</i>

Laseransteuerung

Die Laser können durch mittels eines TTL-Signals an einem BNC Stecker an- und abgeschaltet werden. Das entsprechende Signal liefert ein Digitalausgang der Zählerkarte.

<i>Zählerkarte Ausgang 3</i>	<i>Funktion</i>	<i>BNC</i>
<i>7</i>	<i>GND/Masse</i>	<i>Abschrimung</i>
<i>8</i>	Melde Ausgang (5V)	innenliegender Anschluß



IV. Softwaremodule

Die Software gliedert sich im wesentlichen in die folgenden Module.

Geräteansteuerung

- Compax: Realisiert eine abstrakte Schnittstelle zur Motorelektronik
- Enccount: Kapselt die von der Encodernachbildung gelieferten Positionsdaten
- SerialIO: Implementierung einer allgemeinen Schnittstelle für den Zugang zur RS 232 des PC.
- LLCamera: Kapselt die Mapp 2200 Kamera

Fehlerbehandlung

- StdErr: Standardisierte Fehlermeldungen

Zeitverhalten

- Timer: macht Zeitmessungen mit einer Auflösung im Millisekundenbereich möglich.

Mathematische Funktionen

- VecMath: Funktionen für 3D Vektorverarbeitung und Auswertung der Triangulation

Dateioperationen

- Fileops: Schreibt alle Ausgabeformate YAODL (SGI), TGA (Grauwertbild) und ein selbstdefiniertes Austauschformat für 3D Punktdaten.

3D Ausgabe

- View3D: Zeigt die Punktwolke am Bildschirm an. (Rotation, Translation, Skalierung sind interaktiv möglich)

Schnelle skalierbare Bildausgabe

GLBitmap: Erlaubt die frei skalierbare Darstellung der Kamerabilder.

Messen

M3D: Softwarekern, Routinen zur Meßwertaufnahme beim Scanvorgang

Windows Funktionen

Versucht alle benutzen Funktionen des Betriebssystems zu kapseln, so daß bei der Portierung auf eine andere Plattform nur noch diese Routinen neu implementiert werden müssen.

MainEventLoop: Eventbehandlung

MainWindow: Eigentliches Hauptprogramm mit spezieller Eventverarbeitung

Rwindow: Alle wichtigen Windows BS-Aufrufe

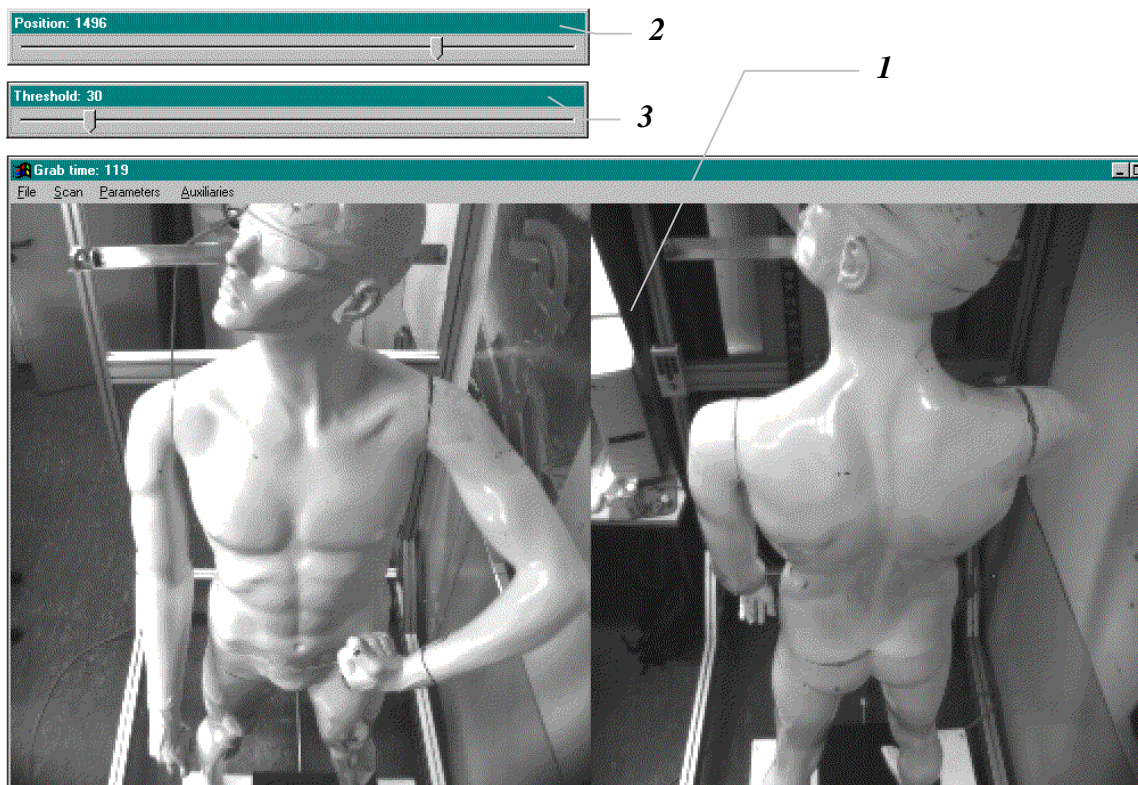
WindowAux: Relativ unwichtige Funktionen des Windows Betriebssystems

V

Bedienungsanleitung

V. Bedienungsanleitung

1. Überblick



1: Hauptfenster

Im Hauptfenster werden je nach Betriebszustand unterschiedliche Inhalte angezeigt. Defaultmäßig sind das die Grauwertbilder beider Kameras.

2: Position

Zeigt die momentane Höhe der Meßköpfe in Millimeter über Maschinenull an. Die Anzeige wird auch dann aktualisiert wenn der Scanner von Hand betrieben wird. Am Trackbar können die Meßköpfe analog der Bedienung von z.B. Textschiebebalken positioniert werden.

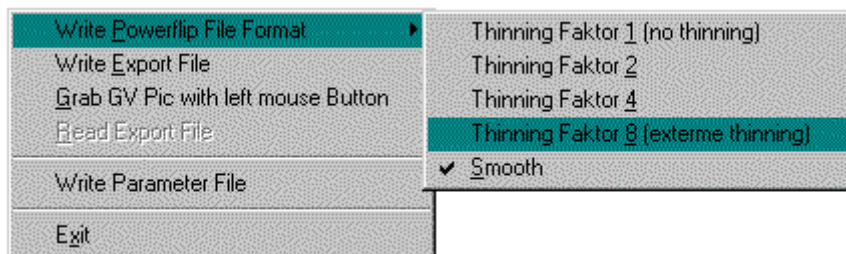
3. Threshold

An diesem Trackbar kann der momentan eingestellte Schwellwert der Binarisierung abgelesen und interaktiv verstellt werden.

2. Die Menüs

2.1 File Menu

Das Menu stellt die Verbindung der Meßmaschine zur Außenwelt her. Es können mehrere Fileformate mit unterschiedlichen Parametern geschrieben werden.



Powerflip File Format:

Hier kann zu Visualisierungszwecken das YAODL (Yet Another Object Definition Language) der Powerflip Software zur SGI übertragen werden. Hierbei kann der Datensatz in unveränderter Größe (Thinning Faktor 1) oder bis zu achtfach ausgedünnt geschrieben werden. Typischerweise werden etwa 70000 - 150000 Polygone erzeugt. Der Parameter Smooth glättet die Meßwerte bevor sie übertragen werden.

Export File:

Ein selbstdefiniertes 3D Datenaustauschformat kann als ASCII Datei abgelegt werden.

Grab Grayvalue Picture ...:

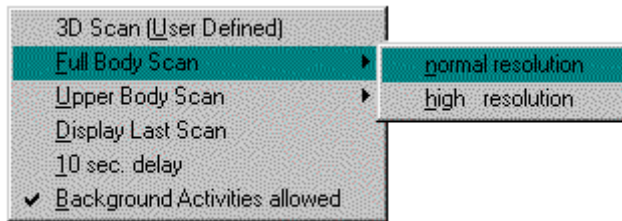
Im Hauptfenster wird das Grauwertbild angezeigt. Ein Druck auf die linke Maustaste grabbt das momentane Bild und speichert es im TGA Bildformat ab.

Write Parameter File:

Schreibt die kompletten Parameter der Hauser-Steuerung als ASCII Datei auf Platte.

2.2 Scan Menu

Hier kann ein 3D Scan mit verschiedenen Parametern ausgelöst werden.



User Defined:

Das im Motion Dialog gemachte Profil wird gefahren

Full Body, Upper Body Scan:

Vordefinierter Gesamtscan oder Körperoberteilsscan mit der normaler Auflösung (256 Scanlines) oder mit hoher Auflösung (512 Scanlines)

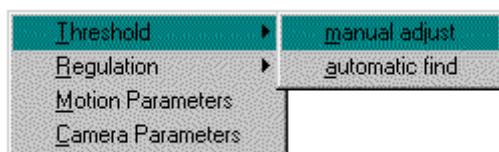
10 Sec. Delay:

Dieser Menüpunkt ist nur während Entwicklung notwendig, damit der Entwickler etwas Zeit bekommt um einen Scan von sich selbst zu machen.

Background Activities Allowed:

Ist dieser Punkt nicht selektiert sind die Mechanismen des preemptiven Multitaskings während der Messung abgeschaltet (vgl. Kap.3.6)

2.3 Parameter Menu



Threshold:

Manual Adjust: Es wird ein Bild gemäß Abb. V.1 angezeigt. Hier können die Entfernungsrhdaten und einige statistische Daten visualisiert werden.

Die Balkendiagramme (jeweils unten im Bild) visualisieren statistisches Werte (wie in Kap. 3.1.2 besprochen) für die Einstellung des Thresholds.

1. Anzahl der Meßwerte
2. Varianz bezüglich des Mittelwertes
3. Varianz bezüglich der Vormessung

Die Köpfe des Scanners werden mit dem Positionierbalken in eine günstige Position gebracht an der die Einstellung eines neuen Schwellwertes vorgenommen werden soll. Die Einstellung dieses Wertes kann über den Schiebepalken 'Threshold' erfolgen. Die Auswirkungen auf die Meßergebnisse werden in Echtzeit visualisiert.

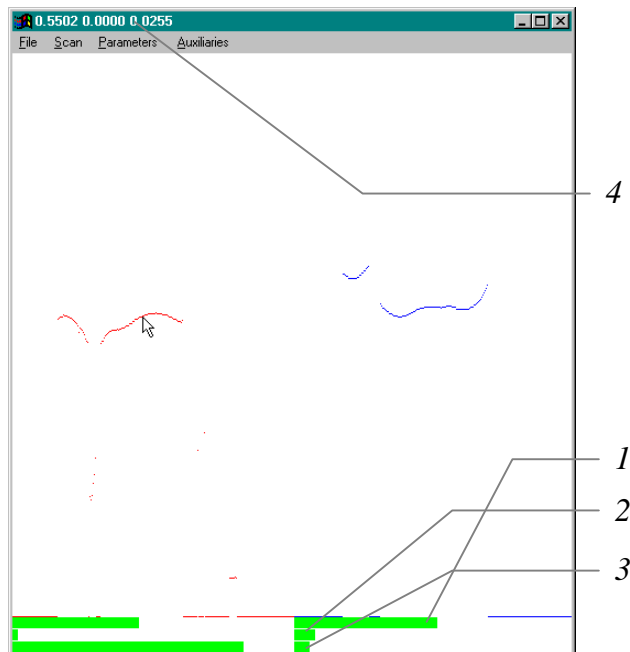


Abb. V.1 Interaktive Schwellwertparameter Bestimmung

Mit der Maus kann jederzeit in das Bild einer der beiden Kameras geklickt werden. Im Fensterkopf (4) wird dann die Weltkoordinate dieses Punktes angezeigt. Dies ist für eine grobe Validierung z.B. neuer Kameraparameter hilfreich.

Motion Parameter Dialog

In diesem Dialog können alle Parameter, die den Bewegungsablauf der Meßköpfe angehen, für eine gewünschte Meßauflösung eingetragen werden. Im Scan Menu kann dieses Profil mit 'User Defined' abgefahren werden.

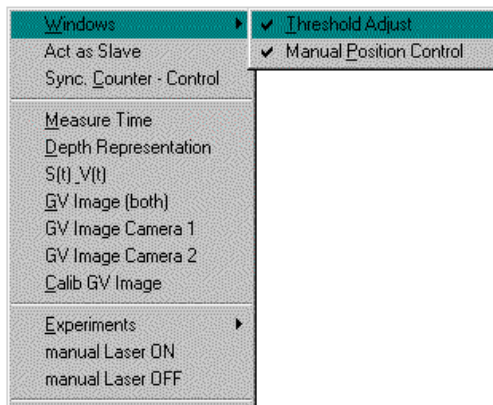
Motion Parameters	
Begin Height:	1.980 (m)
End Height:	0.000 (m)
Max. Speed:	17 (%)
Min. Speed:	15 (%)
Accel. Time:	400 (ms)
No. of Scans:	512
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Abbruch"/>	

Camera Parameter Dialog

Hier können alle Parameter des mathematischen Kameramodells (Pin- Hole Kameramodell) gemäß Kap. 3.4 eingestellt werden. Der Camera Distance Eintrag markiert den Abstand beider Kameraobjektivbrennpunkte in Metern.

Camera Parameters	
Alpha Camera:	40.0000 (°)
Alpha Laser:	90.0000 (°)
Basis Distance:	0.4350 (m)
Alpha Objective:	50.0000 (°)
Camera Distance:	1.3000 (m)
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Abbruch"/>	

2.4 Auxiliaries Menu



Windows

Hier können die Fenster Threshold und Position ausgeblendet und wieder sichtbar gemacht werden.

Measure Time

Der benutzerdefinierte Scan (Motion Dialog) wird als Bewegung vom Scanner abgefahren und die Zeit ermittelt, die das Durchfahren bis zum Stillstand benötigt.

Depth Representation

Anzeige der Daten als Tiefenbild. Je dunkler ein Bildpunkt, um so weiter ist er von der Kamera entfernt.

S(t)-V(t)

Zeigt graphisch das benutzerdefinierte Bewegungsprofil an. (Weg und Geschwindigkeit) Die Auflösung beträgt eine Millisekunde.

GV_Image

Anzeige der Grauwertbilder von Kamera 1 oder 2 oder beiden (both).

Manual Laser ON/OFF:

Manuelles An- oder Abschalten der Laser zu Wartungs oder Justierzwecken.

