

2D/3D Sensorsimulation (PMD-Sim)



Prof. Dr.-Ing. habil.
Otmar Loffeld

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)

Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing.
Andreas Kolb

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)

und
Lehrstuhl für
Computergraphik und
Multimediasysteme

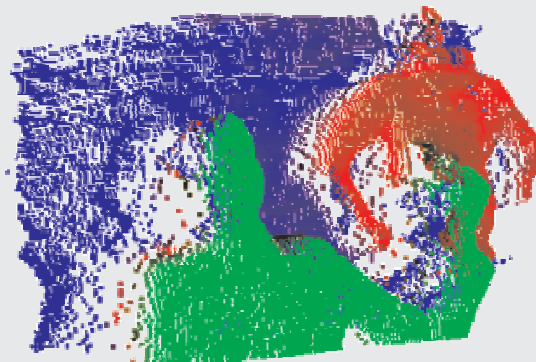
Universität Siegen
Hölderlinstr. 3
57068 Siegen

Antragspaket *Dynamisches 3D Sehen*

Prof. Dr.-Ing.
Andreas Kolb

Zentrum für
Sensorsysteme
(ZESS)

Universität Siegen
Hölderlinstr. 3
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing. habil.
Otmar Loffeld

Zentrum für
Sensorsysteme
(ZESS)

Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen

Inhaltsverzeichnis

1	ALLGEMEINE ANGABEN	1
1.1	Antragsteller	1
1.2	Thema	1
1.3	Kennwort	1
1.4	Fachgebiet und Ausrichtung	1
1.5	Gesamtdauer	2
1.6	Antragszeitraum	2
1.7	Gewünschter Beginn der Förderung	2
1.8	Zusammenfassung	2
2	STAND DER FORSCHUNG, EIGENE VORARBEITEN	3
2.1	Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten zur PMD-Technologie	3
2.2	Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten zum Thema 2D/3D-Bildsensorik und -Verarbeitung	4
2.3	Literatur zum Stand der Forschung und eigenen Vorarbeiten	10
3	ZIELE UND ARBEITSPROGRAMM	14
3.1	Systemtheoretische Betrachtung, Modellierung und Simulation eines CMOS/CCD-Sensors	14
3.2	Entwicklung und Implementierung eines softwarebasierten CMOS/CCD-Simulators / PMD-Simulators	14
3.3	Reale Verzerrungs- und Störeffekte	15
3.4	Entwicklung und Implementierung eines Objekteditors	16
3.5	Entwicklung und technische Umsetzung einer Objektbibliothek	16
3.6	Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche	17
3.7	Optimierung der Algorithmen hinsichtlich der Rechenzeit	18
3.8	Arbeitsplan	18
3.9	Untersuchungen an Menschen	19
3.10	Tierversuche	19
3.11	Gentechnologische Experimente	19

4	BEANTRAGTE MITTEL	19
4.1	Personalbedarf	19
4.2	Wissenschaftliche Geräte	20
4.3	Verbrauchsmaterial	22
4.4	Reisen	22
4.5	Publikationskosten	22
4.6	Sonstige Kosten	22
5	VORAUSSETZUNGEN FÜR DIE DURCHFÜHRUNG DES VORHABENS	23
5.1	Zusammensetzung der Arbeitsgruppe	23
5.2	Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern	24
5.3	Arbeiten im Ausland und Kooperationen mit ausländischen Partnern	24
5.4	Apparative Ausstattung	24
5.5	Laufende Mittel für Sachausgaben	24
6	ERKLÄRUNGEN	24
7	UNTERSCHRIFTEN	25
8	VERZEICHNIS DER ANLAGEN	25

Allgemeine Angaben

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe
Neuantrag

1.1 Antragsteller

<p>Otmar Loffeld, Dr.-Ing. habil. Universitätsprofessor, Projektbereichsleiter Zentrum für Sensorsysteme (ZESS), Projektbereich 2, und Institut für Nachrichtenverarbeitung Loffeld@zess.uni-siegen.de www.zess.uni-siegen.de www.nv.et-inf.uni-siegen.de/pb2/ Tel.: 0271 / 740 3125 Privat: Nassauer Straße 21 57234 Wilnsdorf Tel.: 02737 2299936 0179 202 999 6</p>	<p>Andreas Kolb, Dr.-Ing. Universitätsprofessor Zentrum für Sensorsysteme und Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme kolb@informatik.uni-siegen.de www.zess.uni-siegen.de www.cg.informatik.uni-siegen.de/ Tel. 0271 / 740 2404</p>
<p>Universität Siegen Paul-Bonatz-Str. 9-11 57068 Siegen Tel. : 0271-740-3400 Fax: 0271-740-33 96</p>	

1.2 Thema

2D/3D-Sensorsimulation

1.3 Kennwort

PMD-Sim

1.4 Fachgebiet und Ausrichtung

Elektrotechnik/Informatik, System- und Signaltheorie, Modellbildung und Simulation:
Systemsoftware, Multidimensionale Sensorik, Visualisierung

Arbeitsgebiete der Antragsteller und ihrer Arbeitsgruppen:

Prof. Loffeld: Optimale Signalverarbeitung, Multi-Sensordatenfusion- Remote Sensing, Synthetic Aperture Radar (SAR), Modellbildung und SAR-Simulation

Prof. Kolb: Computergraphik, Bildverarbeitung, Geometrische Modellierung, Modelloptimierung, Visualisierung, Virtual Environments

1.5 Gesamtdauer

4 Jahre

1.6 Antragszeitraum

24 Monate

1.7 Gewünschter Beginn der Förderung

01.01.2006

1.8 Zusammenfassung

Eines der zentralen Probleme der Automatisierungs-, Kontroll- und Sicherheitstechnik stellt die schnelle und präzise Erfassung von bewegten dreidimensionalen Objekten und ihrer räumlichen Orientierung dar. Herkömmliche optische Bildsensoren, die lediglich 2D-Aufnahmen mit Farb-Informationen liefern, stoßen hierbei schnell an ihre Grenzen.

PMD-Sensoren liefern vektorielle dreidimensionale Messwerte eines 3D-Raums und ermöglichen somit direkt die 3D-Darstellung und Lokalisierung von Objekten. PMD-Sensoren sind selbstbeleuchtend im Infrarotbereich und können daher auch bei schlechteren Sichtverhältnissen (Nebel, Regen, Dunkelheit) im Gegensatz zu optischen Systemen weitgehend zuverlässig arbeiten. Dank dieser Eigenschaften bieten PMD-Bildsensoren einen wesentlichen Vorteil gegenüber 2D-Bildsensoren. Die Kombination eines PMD-Sensors mit einem lateral hochauflösenden CMOS-Sensor bietet den Vorteil der Kombination von hochaufgelösten Helligkeitsbildern mit 3D-Helligkeits- und Entfernungsbildern des PMD-Sensors.

Das Ziel dieses Projektes besteht darin, einen Simulator für eine 2D/3D-Kamera, basierend auf einer Kombination eines 3D-PMD-Sensors und eines hochauflösenden 2D-CMOS-Sensors zu entwickeln. Der Simulator soll dabei unterschiedliche Sensorgeometrien und konstruktive Designs berücksichtigen können, flexibel parametrierbar sein, alle physikalischen Effekte und auftretenden Störphänomene realitätsgetreu darstellen, sowie Test- und Referenzdaten für die nachfolgende Verarbeitung liefern können. Die mechanischen, optischen und alle anwendungsrelevanten Eigenschaften der verwendeten Sensoren müssen dazu im Simulator systemtheoretisch präzise beschrieben und realisiert werden.

Computergestützte 3D-Sensor-Simulation bietet nicht nur eine kostengünstige Alternative zur realen Aufnahmen, sondern erweisen sich als sehr hilfreich bei der Dimensionierung und Parametrierung von 3D-Sensoren. Ein solcher Simulator stellt damit eine leistungsfähige Umgebung dar, mit der für alle Anwender, Algorithmenentwickler und Systemplaner, innerhalb und außerhalb des gesamten Antragspaketes, unabhängig vom Entwicklungsstand und -fortschritt der PMD-Sensorhardware realitätsnahe Testdaten zur Verfügung gestellt werden können. Mit diesen Testdaten können Algorithmen

schnell auf ihre Funktionstüchtigkeit untersucht, Systemkonfigurationen auf ihre Eignung für eine spezielle Anwendung überprüft und Anwendern der PMD-Technologie vor dem realen Einsatz bereits ein Bild von der Leistungsfähigkeit, bzw. den Leistungsgrenzen einer bestimmten PMD-Konfiguration vermittelt werden.

2 Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

Die Entwicklung und Herstellung verschiedener Typen pixelbasierter, bildgebender 2D-Bildsensoren nach vorgegebenen Spezifikationen gehört heute in vielen Anwendungsgebieten zum Stand der Technik. Abhängig von der konkreten Anwendung können Arrays mit vorgegebener Bildauflösung, Empfindlichkeit und Dynamik hergestellt werden. Konventionelle Bildsensoren erzeugen über die einfallende Lichtintensität ein 2D-Bild der Umgebung.

Die schnelle, berührungslose und präzise 3D-Bilderfassung ermöglicht über die 2D-Umfeldwahrnehmung hinaus neue technische Lösungen sowie die Verbesserung von bestehenden Produkten in vielen Industriezweigen, beispielsweise in der Automobilindustrie, wo mit einer 3D-Sensorik neuartige Fahrerassistenzsysteme entwickelt werden können, um der Vision des unfallfreien Fahrens ein wesentliches Stück näher zu kommen. Besondere Fortschritte in der technischen Leistungsfähigkeit von Anlagen und Produkten können auch in der Automatisierungs- und Sicherheitstechnik und in der Robotik erzielt werden, da hier die räumliche Orientierung von entscheidender Bedeutung ist.

Im Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und im Institut für Nachrichtenverarbeitung (INV, Prof. Schwarte) ist in den letzten Jahren einer neuer Typ eines optoelektronischen Halbleiterchips entstanden, der in der Lage ist, das von einer aktiven Beleuchtungsquelle ausgesendete modulierte und von einem Objekt reflektierte Lichtsignal parallel aufzunehmen und noch direkt in der Halbleiterstruktur eine räumliche Information zu gewinnen. So kann mit diesen optoelektronischen Sensoren eine 3D-Information in Echtzeit ermittelt werden. Das Verfahren wird als sogenannte Photonen-Mischung bezeichnet, die dazugehörigen Sensoren als PMD - Photonic-Mixer-Device (Photo-Misch-Detektor).

Von besonderer Bedeutung ist die deutliche Verringerung des technischen Aufwands und der damit verbundenen Kosten. Zusätzlich kann das Bauvolumen mittels PMD-Array gegenüber konventionellen Systemen (mechanischer Aufbau mit Scanner) um etwa 1:1.000.000 reduziert werden. Die Integration von PMD-Detektoren in kompakte Gehäusebauformen wurde für eine 3D-Kamera mit 64x16 und 120x160 Empfangspixeln bereits erfolgreich demonstriert. Die Fertigung dieser Sensoren ist zudem einfach und basiert auf standardisierten CMOS Halbleiter-Fertigungsprozessen.

Damit wird grundsätzlich auch die Herstellung hybrider Pixelarrays möglich, bei denen Sensoren unterschiedlicher Funktionsprinzipien gemischt werden. Neuere Untersuchungen zeigen sogar, dass das Fernziel einer mobil einsetzbaren dreidimensionalen Bildsensorik am ehesten durch die Kombination verschiedener Sensoren erreicht werden kann. Dabei liefern Standardsensoren ein hochauflösendes zweidimensionales Bild, das durch punktuelle Tiefeninformation ergänzt wird. Diese Tiefeninformation kann alternativ auch durch Radarsensoren bereitgestellt werden, deren Daten mit den Bilddaten zu fusionieren sind.

2.1 Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten zur PMD-Technologie

Der Stand der Forschung auf dem Gebiet der PMD-Technologie ist sehr stark von den Arbeiten und Veröffentlichungen aus dem Institut für Nachrichtenverarbeitung (INV) und

dem Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) der Universität Siegen geprägt. Aus diesem Grunde kann hier nicht zwischen dem allgemeinen Stand der Technik und den eigenen Vorarbeiten der Antragsteller unterschieden werden. Auf Basis von Eigenmitteln und von Kooperationen mit der DFG (1997-2001), dem BMBF (2001-2004), der Industrie und mit den Spin-off-Firmen S-TEC (ab 1997) und PMD Technologies GmbH (ab 2002) konnte in Siegen die grundsätzliche Eignung der PMD-Technologie als Schlüsseltechnologie für das schnelle 3D-Sehen verifiziert werden. Der eigentliche Durchbruch erfolgte erst im Herbst 2003 mit einem hochempfindlichen und rauscharmen Layout für 64×16- und in 2004 für 120×160-PMD-Pixel 3D-Sensoren.

Folgende von der DFG geförderte Vorhaben haben maßgeblich zur Entwicklung der PMD-Technologie beigetragen:

Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-1, 1995-1996 Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte
Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-2/3, 1996-1998 Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte
Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Schw455/4-2/3, 1998-2000 Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte

Das Grundprinzip und Funktionsweise von PMD-Sensoren kann hier somit als bekannt vorausgesetzt werden.

2.2 Stand der Forschung und eigene Vorarbeiten zum Thema 2D/3D-Bildsensorik und -Verarbeitung

Stand der Forschung allgemein

Bisherige Ansätze hybrider Sensoren sind empirischer Art. Basierend auf einer gegebenen Problemstellung wurde in der Regel ein 2D-bildgebendes Sensorelement verwendet, welches punktuell, zeilen-, scanlinienorientiert oder in seltenen Fällen bildorientiert mit Entfernungsinformation ergänzt wurde. Verwendet wurden hierzu in der Regel Scannereinrichtungen, mit deren Hilfe ein punktförmig abtastender Entfernungssensor (Laser Distance Range Finder) zu einem Zeilen- oder Flächensensor erweitert wurde. Die Kalibrierung derartiger hybrider Systeme ist nicht trivial, aber weitgehend gelöst (u.a. auch durch Vorarbeiten der Antragsteller). Wahlweise wird der verwendete 2D-Sensor mit Hilfe von Lichtschnittverfahren oder projizierten Mustern (projected fringe techniques) zu einem 3D-Sensor erweitert. Die nachfolgend aufgeführten Literaturstellen vermitteln einen Überblick zum Stand der Technik auf diesem Gebiet. Referenzen zu „Shape from Shading“- Ansätzen wurden hierbei nicht berücksichtigt.

Eigene Vorarbeiten

Laserabstandsmesstechnik

Hier zu nennen ist die System- und Anwendungsentwicklung hinsichtlich der Puls- und der Phasenlaufzeitmessung sowie der Triangulationsmesstechnik ([1] - [9]). Die Erkenntnisse und Verfahren der Abstandsmesstechnik wurden z. T. auch bei der 3D-Bildverarbeitung verwendet.

Stereo-Bildverarbeitung und Triangulation

In Zusammenarbeit mit der Firma Bosch wurden ausführliche Untersuchungen hinsichtlich der Teileerkennung/Vollständigkeitsprüfung von Vergaserteilen durchgeführt ([135]). Weitere Vorarbeiten von Seiten der Antragsteller auf dem Gebieten der Triangulation und Farbtriangulation sind in z.B. in [127] - [130] veröffentlicht.

Bildfolgenanalyse

Für die Problematik der Objektvermessung bei der Fertigung von nahtlos gewalzten Rohren während des Walzprozesses wurde ein System auf Basis der 2D/3D-Echtzeitbildverarbeitung entwickelt. Aus der Bildfolgenanalyse wurden Bewegungs- und Geometriedaten in Videoechtzeit ermittelt ([143], [144]).

Strukturierte Beleuchtung

Hier wurde ein Verfahren der strukturierten Beleuchtung entwickelt, mit dem es möglich ist, aus einem 2D-Bild eine eindeutige 3D-Information bei gleichzeitig hoher Messauflösung zu gewinnen. Dies wird erreicht durch den farbcodierten Lichtansatz, der Verwendung des Phasen-Shift-Verfahrens in den einzelnen R-, G-, B-Bildern sowie der Eindeutigkeit bei mehreren Perioden durch eine linear ansteigende Farbsättigung. Man erhält die 3D-Information somit in Video-Bildraten. Ein Problem ist hierbei das unterschiedliche Rückstreuverhalten der Objekte in den verschiedenen Spektralbereichen ([121], [138] - [141]).

3D-Lasermesstechnik

Mit einem im ZEISS entwickelten Multisensorkonzept bietet sich eine Möglichkeit, 3D-Objekte flexibel auf eine Entfernung bis ca. 10 m zu vermessen. Hierbei wird ein Laser-radar-Entfernungsmesssystem verwendet, das mit Hilfe eines 2D-Spiegelscanners zu einem 3D-Messsystem erweitert wird ([142]). Als zweite Komponente des Multisensor-



Abbildung 2-1: Grauwertbild einer CCD Kamera



Abbildung 2-2: Entfernungsbild aus Scannerdaten

systems kam eine CCD-Kamera mit nachgeschaltetem Bildverarbeitungssystem zum Einsatz, mit der die zu vermessende Szene visuell erfasst und analysiert wird. Durch die visuelle Information kann der 3D-Messvorgang optimiert werden, so dass nur noch relevante Bildbereiche vermessen werden müssen. Die neben stehenden Abbildungen zeigen Ergebnisse dieses Ansatzes.

Neben der Erzeugung von 3D-Bildern mit Hilfe der Laserabstandsmessung, eines

2D-Scanners und der Objektvermessung insbesondere bei großen Abständen (1m-15m) wurde die Problematik der Fusionierung von 2D-Intensitätsbildern mit den Daten des 3D-Laserscannersystems bearbeitet ([131], [132]). Mit der Fusionierung konnte eine adaptive Laserstrahlführung realisiert werden, um nur die relevanten Teile des „field of view“s abzutasten (BMFT Verbundprojekt „3D-Objektvermessung auf größere Entfernungen“, Fördkz. 13N5882 und DFG Schwerpunktprogramm Automatische Sichtprü-

fung technischer Objekte, Thema: Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse, Lo455/4-1, 1995-1996, Lo455/4-2/3/4, 1996-1998, SCHW 630/12000).

PMD-Sensorik und PMD-Signalverarbeitung

Die PMD-Technologie für die berührungslose 3D-Erfassung unbekannter Szenarien stellt ein gewisses Alleinstellungsmerkmal der Siegener Antragstellergruppe dar. Die Technologie wurde an der Universität Siegen, bzw. im ZESS erfunden (Prof. Dr. R. Schwarte), die Systemtechnik zur Ansteuerung des bildgebenden Chips und die Verarbeitungsalgorithmik im ZESS entwickelt und in ein erfolgreiches Spin-Off-Unternehmen (PMDTechnologies) transferiert, zu dem intensive Kooperationskontakte bestehen (u.a. [17] - [58]).

Weitere direkt bildgebende 3D-Erfassungssysteme

Hierzu sind die etwa gleichzeitig veröffentlichten Ansätze des CSEM¹, [12], [48], [49] zu zählen. Auch die von der Firma Canesta (<http://www.canesta.com/>) in den Vereinigten Staaten patentierten Ansätze und Produkte sind hier zu nennen. Die Unterschiede zwischen den Ansätzen sind den Verfassern bekannt, es soll hier auch keine Leistungsfähigkeitsbewertung vorgenommen werden, zumal diese für eine systemtheoretische Simulation irrelevant sind, bei der ein Simulator die wesentlichen Effekte eines Sensor's system-/bzw. signaltheoretisch darstellt.

Eigene Vorarbeiten zur PMD-Simulation

Im Auftrag eines großen deutschen Automobilherstellers (Volkswagen AG) hat das ZESS einen Simulatoransatz zum Einsatz des PMD in einer Bewegobjektsituation im Hinblick auf ein Fahrerassistenzsystem entwickelt. Für den Zeitraum dieser Studie, die Mitte des Jahres 2004 abgeschlossen wurde, wurde ein Nondisclosure-Agreement (NDA) unterzeichnet, welches sich auf Details der Anwendung, der simulierten Geometrien und des Auftraggebers, jedoch nicht auf Verfahrensweisen und wissenschaftliche Ergebnisse erstreckt. Aufgrund des NDA gibt es keine einschlägigen Veröffentlichungen der Antragsteller zu diesen Vorarbeiten, es können lediglich einige Referenzen zum mit der Problemstellung verwandten Thema der SAR-Simulation auf Seiten der Antragsteller angeführt werden (z.B. [103] - [114]), welche einschlägige Expertise auf diesem Gebiet belegen. Aufgrund des Fehlens direkter einschlägiger Referenzen werden die Vorarbeiten zu diesem Thema detaillierter als sonst üblich ausgeführt:

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein Verfahren entwickelt, welches aus einer in absolut referenzierten 3D-Szene, repräsentiert als eine Ansammlung von 3D-Punkten ein in relativen Sensorkoordinaten beschriebenes 3D-Bild generiert, welches ein PMD-Sensor, installiert auf einer innerhalb dieser Szene bewegten Plattform, von dieser Szene liefern würde. Systemtheoretisches Ziel war damit die Ermittlung und simulative Darstellung der PMD-Systemantwort auf eine 3D-Anregung. Es wurde besonderen Wert darauf gelegt, die Realisierung der Algorithmen weitgehend unabhängig von der Parametrisierung des Sensors (Auflösung, Pixelgröße, Optikeigenschaften usw.) umzusetzen.

Als Eingangsdaten für den Simulator dienten von der Firma Volkswagen zur Verfügung gestellte Datensätze eines aufgenommenen Crashes. Zu Testzwecken und für Leistungsfähigkeitsanalysen des Simulators wurden außerdem weitere Datensätze gene-

¹ Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA

riert. Es ist weiterhin möglich, die einzelnen Datensätze zu kombinieren und gemeinsam zu nutzen (z.B. mehrere Objekte im Sichtfeld des Sensors).

Es wurde ein Programm entwickelt, welches sowohl die 3D-Datensätze von Objekten einlesen oder als auch Objekte generieren kann. Anhand der realen Randbedingungen kann dann ein virtueller PMD-Sensor parametrierbar werden, der in einem weiteren Schritt aus den gegebenen 3D-Daten PMD-Messdaten erzeugt. Dazu sind verschiedene Einzelschritte nötig, die im Folgenden zusammenfassend beschrieben werden.

Folgende Einzelaspekte wurden bearbeitet:

Sensordefinition und -parametrierung

Abbildung 2-3 zeigt das Prinzip der Abbildungsgeometrie zur Simulation eines PMD-Sensors.

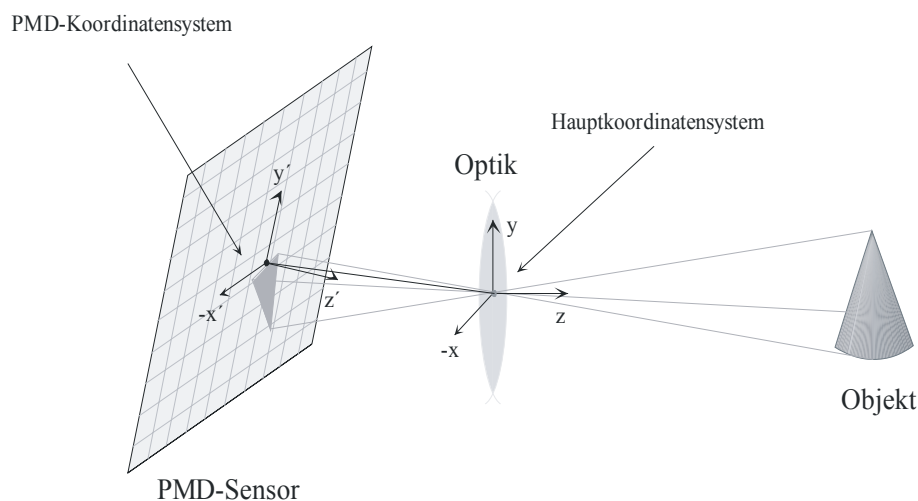


Abbildung 2-3: Prinzip des PMD-Simulators

Der PMD-Sensor wird idealisiert als eine rechteckförmige Pixelmatrix der Größe $n \times m$ angenommen. Die PMD-Sensormatrix ist konstruktiv in das optische Subsystem integriert und kann beispielsweise gegenüber den Hauptachsen des Systems verkippt und verdreht sein.

Das Grundprinzip des PMD-Simulators in Stichworten:

- Realisierung der Pixel des PMD-Chips durch Eckpunkte eines Gitters der Größe $(n+1) \times (m+1)$
- Realisierung des aktiven Bereichs des Sensors (man spricht in diesem Zusammenhang vom sog. Füllfaktor) durch variierbare Begrenzung der aktiven Pixelfläche
- Realisierung der Empfangsoptik (bikonvexe Sammellinse) durch Simulation des Brennpunktes der Linse
- Realisierung der Verschiebung und/oder Verdrehung der Sensor-Chipfläche gegenüber der Empfangsoptik mit Hilfe eines weiteren PMD-Koordinatensystems
- Freie Festlegung der Sensorparameter wie Auflösung, Chipgröße, Pixelgröße, Füllfaktor, Brennweite, Neigung, Modulationsfrequenz usw.

Der Simulator gestattet eine freie Anordnung des Sensors, kann die wesentlichen inneren Parameter eines optischen Messsystems darstellen und gestattet somit auch die Entwicklung von Parametrierungs- und Kalibrierungsverfahren.

Einlesen bzw. Generieren der Datensätze

Zum Einlesen einer referenzierten 3D-Szene wurde eine Schnittstelle konzipiert und realisiert, die je nach eingestelltem Modus (Simulation eines Frames oder einer ganzen Szene), eine oder mehrere ASCII-Dateien mit 3D-Objekten und Koordinaten einliest. Die dadurch gewonnenen Koordinaten (x-, y- und z- Koordinaten) der 3D Objekte dienen in der Folge als Eingangsdaten des Simulators.

Koordinatensysteme

Um eine eventuelle Verschiebung und/oder Verdrehung der Sensor-Chipfläche gegenüber der Empfangsoptik realisieren und simulieren zu können, wurden zwei Koordinatensysteme eingeführt – das Hauptkoordinatensystem, in dem alle Berechnungen letztendlich durchgeführt werden, und das PMD-Koordinatensystem, in dem der Sensor definiert wird.

Theoretische Antwort des PMD-Sensors

Das Prinzip aller optischen Entfernungsmesssysteme beruht auf der Messung der Signallaufzeit τ_L des gesendeten Signals. Aus dieser lässt sich der Abstand, unter der Annahme, dass die Lichtquelle sich am selben Ort wie der Empfänger befindet, wie folgt bestimmen.

$$R = \frac{c \cdot \tau_L}{2}$$

Hierbei kennzeichnet R den skalaren Abstand, τ_L die Lichtlaufzeit und c die Lichtgeschwindigkeit. Unter der Voraussetzung einer kontinuierlichen sinus- oder rechteckförmigen Modulation (cw -Modulation) wird die Gleichung vereinfacht, so ergibt sich mit der Modulationsfrequenz f_{mod} für den Abstand R eines Messobjektes folgender Zusammenhang:

$$R = \frac{c \cdot \Delta\varphi}{4 \cdot \pi \cdot f_{\text{mod}}}$$

Der Phasenunterschied $\Delta\varphi$ ergibt sich aus der Laufzeit des Lichtsignals zum Objekt und zurück zum Empfänger und hat folgenden mathematischen Zusammenhang:

$$\Delta\varphi = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{mod}} \cdot \tau_L$$

Zusammengefasst lässt sich die Antwort eines PMD-Pixels wie folgt berechnen:

$$\vec{r}_c = \sum_{i=1}^N B_i \cdot e^{j4\pi \frac{r_i}{\lambda}}$$

wobei $\vec{r}_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$ mit $i=1\dots N$ die Abstandsvektoren zu allen 3D-Objektpunkten sind, die von dem PMD-Pixel „gesehen“ (erfasst) werden. r_i gibt die Länge des Vektors an.

$\lambda = \frac{c}{f_{\text{mod}}}$ ist die Wellenlänge des modulierten Signals, B_i – Rückstreuoeffizient des 3D-

Objektpunktes. Der PMD-Sensor ist nicht in der Lage, die einzelnen 3D-Objektpunkte, die auf den gleichen Pixel abgebildet werden, zu unterscheiden: Pro Pixel sieht der PMD-Sensor nur einen Objektpunkt mit der Helligkeit (Amplitude) $A_m = |\vec{r}_c|$, und einer Phase $\varphi = \arg(\vec{r}_c)$, aus der sich die Entfernung dieses Objektpunktes ergibt. Die Antwort eines Pixels ist demnach ein Vektor, aus dessen Betrag sich die scheinbare Helligkeit

und aus dessen Phase über die Signallaufzeit die Entfernung R berechnet wird. Die Position dieses Objektpunktes im 3D-Raum ergibt sich dann aus dem Abstand R und der Richtung des Vektors vom Ursprung des Hauptkoordinatensystems zum Mittelpunkt des Öffnungswinkels der Pixelfacette (Abbildung 2-4).

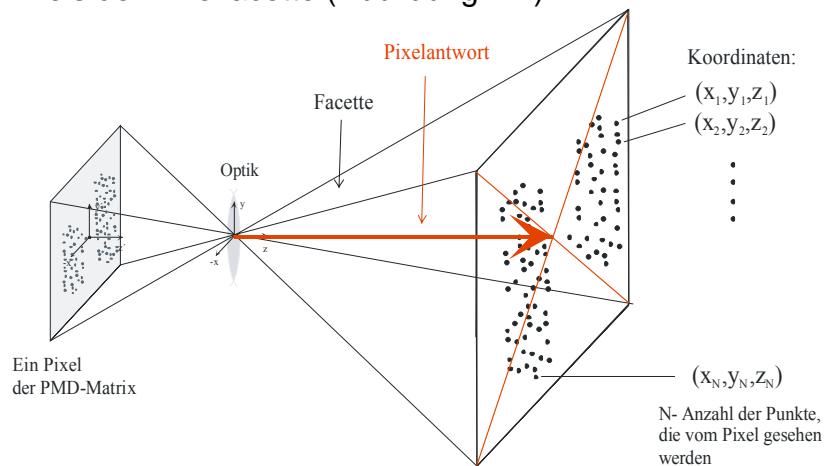


Abbildung 2-4: Generierung der Antwort eines PMD-Pixels

Die gesamte Antwort des Sensors setzt sich aus den Antworten der einzelnen Pixel der Pixelmatrix zusammen. Man erhält auf diese Weise zwei Matrizen mit Amplituden- und Entfernungswerten. Um die Antwort des Sensors exakt berechnen zu können, bedarf es einerseits der Information, welche Punkte eines Objektes vom Pixel (m,n) „gesehen“ werden, d.h. die ganze 3D-Szene muss pixelweise sortiert werden, und andererseits der Aussortierung der für den Sensor unsichtbaren Bereiche, da sonst in die Berechnung Objektpunkte hineinfließen, die die Antwort des Sensors stark verfälschen können.

2.3 Literatur zum Stand der Forschung und eigenen Vorarbeiten

PMD-Sensorik und Abstandsmesstechnik

- [1] INV Siegen 'Industrielle Füllstandsmessung nach dem Laserpuls-Laufzeitverfahren', Abschlußbericht des Forschungsprojektes im Auftrag der Firma Krohne, Duisburg unter Förderung durch das AIF (F.u.E.-Projekt 2610), Siegen, Juli 1986.
- [2] INV, MBB 'Laser Diode Rangefinder Demonstration Model', Final Report, ESTEC Contract Number 5159/82/NL/HP, March 1985.
- [3] BMFT-Verbundprojekt 'Intelligente Sensorsysteme für die Handhabungstechnik (FT 2.420) ', Protokoll- und Ergebnisberichte der Verbundteilnehmer, halbjährlich bis März 1988.
- [4] Schwarte, R., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Graf, W., Hartmann, K., Heuten, F., Loffeld, O., 'Implementation of an Advanced Laser Ranging Sensor Concept', Proc. IAF Conference, Stockholm, 1985.
- [5] Schwarte, R., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Dänel, R., Graf, W., Hartmann, K., Heuten, F., and Loffeld, O., 'A New Concept for a Precise and Versatile Laser Range Finder and Optical Radar', Proc. of the Laser 87 Conf., München, 1987.
- [6] Schwarte, R., Aller, I., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Graf, W., Hartmann, K., Loffeld, O., 'Neuartige Sensorsysteme, Laserradar mit Impulslaufzeitmessung', in 'Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik', Fachberichte Messen - Steuern - Regeln, Springer Verlag, Berlin, 1989.
- [7] Tran Duc, L., Loffeld, O., 'Theoretische und experimentelle Untersuchung und Verifikation neuer Messwertverarbeitungsalgorithmen für die schnelle, dreidimensionale Objekterfassung', Forschungsbericht für die Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung, Essen, 1987.
- [8] DFG-Arbeitsstreffen „Technisches 3D-Sehen auf der Basis der PMD-Technologie“ am 07.10.2004 an der Universität Siegen, www.3d-view.org
- [9] Schwarte, R.; Aller, I.; Baumgarten, V.; Bundschuh, B.; Graf, W.; Hartmann, K.; Loffeld, O.: Laserradar mit Impulslaufzeitmessung. In: J. Rogos (Hrsg.): „Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik“. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo Hong Kong, 1989.
- [10] Ley, D.; Bundschuh, B.: Methoden der industriellen Bildverarbeitung. Vortrag beim Workshop: „Laseroptische und bildgebende Sensorsysteme für die industrielle Messtechnik“ im Zentrum für Sensorsysteme der Universität Siegen, Dezember 1992.
- [11] Lange, Robert: 3D time-of-flight distance measurement with custom solid-state image sensors in CMOS, CCD technology. Siegen, Univ., Diss., 2000.
- [12] Fa. CSEM, Zürich, www.csem.ch/fs/vision.htm
- [13] Hartmut Surmann, Kai Lingemann, Andreas Nüchter, Joachim Hertzberg: Aufbau eines 3D-Laserscanners für autonome mobile Roboter. GMD Report 126, GMD - Forschungszentrum Informationstechnik GmbH, 2001.
- [14] Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik: Telematik 2003. Tagung Siegen, 17. und 18. Juni 2003 / VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. - VDI-Verl., Düsseldorf, 2003. - 235 S.: Ill., graph. Darst. - ISBN: 3-18-091785-7 A. - (VDI-Berichte ; 1785)
- [15] Girard, A.R.; de Sousa, J.B.; Hedrick, J.K.: An overview of emerging results in networked multi-vehicle systems. Decision and Control, 2001. Proceedings of the 40th IEEE Conference on, Volume: 2, 4-7 Dec. 2001, Page(s): 1485 -1490 vol.2
- [16] Ashokaraj, I.; Silson, P.; Tsoordos, A.: Application of an extended Kalman filter to multiple low cost navigation sensors in wheeled mobile robots. Proceedings of IEEE Sensors 2002.
- [17] Schwarte, R., Buxbaum, B., Mikrosensoriklösungen durch inhärent mischenden Photodetektor (Photonic Mixer Device-PMD), 11. Workshop – Mikrotechniken und Mikrosensoren für Umwelt, Biologie und Medizin, Jena 1999. Schwarte, R., 'Optoelektronische 3D-Messtechnik nach dem Laufzeitverfahren für industrielle Anwendungen', Proc. OPTO '94, ACS Organisations GmbH, Leipzig Mai. 1994
- [18] Schwarte, R., 'Neue Konzepte für die industrielle 3D-Objektvermessung nach dem Laufzeitverfahren', VDI/VDE GMA-Aussprachetag, GMA-Bericht 23, S.93-106, Düsseldorf Okt. 1994
- [19] Schwarte, R., Klein, R., 'A novel scheme for minimizing the error of delay time in a distance sensor', SPIE Proc. Sensors and Control for Automation, Volume 2247, p. 188-193, Europto '94, Frankfurt, June 1994
- [20] R.Schwarte; "Verfahren und Vorrichtung zur Bestimmung der Phasenumd/ oder Amplitudeninformation einer elektromagnetischen Welle"; Patentschrift; Schwarte Rudolf Prof. Dr. Ing. (DE); 1996
- [21] R.Schwarte; "Eine neuartige 3D-Kamera auf Basis eines 2DGegentaktkorrelator-Arrays"; Tagungsband Symposium 'Aktuelle Entwicklungen und industrieller Einsatz der Bildverarbeitung'; MIT GmbH; Seite 273-278; Aachen; 1996
- [22] R.Schwarte; "Überblick und Vergleich aktueller Verfahren der optischen Formerfassung"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGFfP-VDI/VDEGMA; GMA-Bericht 30; Seite 1-12; 1997
- [23] R.Schwarte, H.Heinol, Z.Xu, J.Olk, W.Tai; "Schnelle und einfache optische Formerfassung mit einem neuartigen Korrelations-Photodetektor-Array"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGFfP-VDI/VDE-GMA; GMABericht 30; Seite 199-209; 1997
- [24] R.Schwarte, H.Heinol, B.Buxbaum, Z.Xu, T.Ringbeck; "Neuartige 3D Visionsysteme auf der Basis Layout-optimierter PMD-Strukturen"; tm-Technisches Messen 65 (1998); H. 7-8; Seite 264-271; 1998
- [25] R.Schwarte; "3D-Bildsensorik"; Tagungsband '10. Heidelberger Bildbearbeitungsforum' Schwerpunktthema: 3D-Bildaufnahme und -verarbeitung; Siegen; 1999;
- [26] R.Schwarte; "Ein Jahrzehnt 3D-Bilderfassung- Zielsetzungen, Fortschritte, Zukunftsperspektiven"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGFfPVDI/ VDE-GMA; GMA-Bericht 70; Beiheft; 1999
- [27] Schwarte, R., Heinol, H., Buxbaum, B., Ringbeck, T., Xu, Z., Hartmann, K., Principles of 3-D Imaging Techniques, Computer Vision and Applications, Volume 1, Sensors and Imaging, Academic Press, S. 374-393, Boston 1999.
- [28] Schwarte, R., Heinol, H., Buxbaum, B., Xu, Z., Ringbeck, T., Zhang, Z., Tai, W. . Hartmann, K., Kleuver, W. , Luan, X., Neuartige 3D-Visionssysteme auf der Basis Layout-optimierter PMD-Strukturen, TM - Technisches Messen, 7-8/98, R. Oldenbourg Verlag, S. 264-271, München 1998.
- [29] Schwarte, R., Buxbaum, B., Heinol, H., Xu, Z., Ringbeck, T., Zhang, Z., Novel 3D-vision systems based on Layout Optimized PMD-Structures, Kongreßband OPTO '98-Optische Sensorik Messtechnik Elektronik, AMA Fachverband für Sensorik, S.197-202, Erfurt 1998.

- [30] R. Schwarte, B. Buxbaum, Th. Ringbeck, Z. Xu, T. Gollewski: 3-D-Kamera für Mobile Telerobotik und Telemanipulation. In: Telematik 2003, VDI-Berichte 1785, Fachtagung, Juni 2003, Siegen, ISBN 3-18-091785-7, S. 105 - 114.
- [31] Schwarte, R., Heinol, H., Xu, Z., Buxbaum, B., Schulte, J., A New powerful sensory tool in Automotive Safety Systems Based on Photodetector Inherent Mixing by PMD, AMAA 2000,
- [32] Buxbaum, B., Schwarte, R., Ringbeck, T., Heinol, H., Xu, Z., Olk, J., Tai W., Zhang, Z., Luan, X., A new approach in optical broadband communication systems: A high integrated optical phase locked loop based on a mixing and correlating sensor, the Photonic Mixer Device (PMD), Kongreßband OPTO'98-Optische Sensorik Messtechnik Elektronik, AMA Fachverband für Sensorik, S. 59-64, Erfurt 1998.
- [33] Buxbaum, B., Schwarte, R., Charakterisierung eines neuartigen OE-Mikrosensors (PMD) mit breitem Anwendungspotential, 11. Workshop – Mikrotechniken und Mikrosensoren für Umwelt, Biologie und Medizin, Jena 1999.
- [34] Buxbaum, B., Schwarte, R., Konzept einer hochparallelen optischen Schnittstelle auf Basis der PMD (Photonic Mixer Device)-Technologie, 4. Workshop – Optik in der Rechentechnik, Jena 1999.
- [35] Buxbaum, B., Schwarte, R., Ringbeck, T., PMD-PLL Receiver Structure for Incoherent Communication and Ranging Systems, SPIE, Photonic East – Optical Wireless Communications II, Boston, 1999.
- [36] Buxbaum, B., Schwarte, R., Xu, Z., Heinol, H., Ringbeck, T., Schulte, J., Tai, W., Charge Transfer Simulation in PMD-Structures, Sensor 99 Proceedings, S. 427-432, Nürnberg 1999.
- [37] B. Buxbaum, R. Schwarte, B. Schneider, H. Heß, T. Ringbeck, W. Tai, M. Grothof, 'Optisches CDMA auf Basis der PMD-Technologie - Ein für unkorrelierte Datensignale blinder Empfänger', ORT 2000, Hagen 2000.
- [38] B. Buxbaum, R. Schwarte, 'Photonic Mixer Devices for sensing and computing', Eingeladener Vortrag auf der Jahrestagung der Optical Society of America (OSA 2001), Long Beach 2001.
- [39] B. Buxbaum, R. Schwarte, T. Ringbeck, M. Grothof, 'MSM-PMD as correlation receiver in an new multidimensional ranging system', SPIE- Laser Radar Techniques, Remote Sensing 2001, Toulouse 2001.
- [40] B. Buxbaum, R. Schwarte, K. David, M. Hildebrand, T. Ringbeck, M. Grothof, 'Wireless infrared LAN based on optical CDMA using a new high speed correlation receiver (MSM-PMD)', SPIE- Optical Wireless Communication IV, ITCOM 2001, Denver 2001.
- [41] B. Buxbaum, H. Hess, T. Ringbeck, R. Schwarte, 'The Photonic Mixer Device: New perspectives in optical wireless communication', Workshop "Optical MEMS and Integrated Optics", Dortmund 2001.
- [42] Ringbeck, T., Buxbaum, B., Layoutoptimierte PMD-Strukturen für die schnelle 3D-Erfassung, Tagungsband DGZfP/GMA – Optische Formerfassung, VDI/VDE-GMA, Stuttgart 1999.
- [43] Ringbeck, T., Schwarte, R., Buxbaum, B., Introduction of a new electrooptical phase locked loop in CMOS-technology, the PMD-PLL, SPIE, Photonic East – Optical Wireless Communications II, Boston, 1999.
- [44] T. Ringbeck, R. Schwarte, B. Buxbaum, X. Luan, T. Tai, Z. Zhang, 'A new Opto-electrical Phase Locked Loop for Phase / Frequency Detection in Rotation and Range Measurement Application', Proceedings Sensor 2001, Nürnberg 2001.
- [45] T. Ringbeck, R. Schwarte, B. Buxbaum, H. Heß, 'An Optical GMSK modem for Infrared Wireless Communication Based on a New Receiver Principle in CMOS-Technology', Photonic West - Optical Interconnects, San Jose 2001.
- [46] Heinol, H., Z. Xu, J. Schulte, Laufzeitbasierte 3D-Kamerasysteme - Smart - Pixel - Lösungen; Tagungsband DGZfP/GMA – Optische Formerfassung, VDI/VDE-GMA, Stuttgart 1999.
- [47] Heinol, H.G., Schwarte, R.; „Photomischdetektor erfasst 3D-Bilder“; Elektronik 12/99; WEKA Fachzeitschriften Verlag, S. 80-90, München 1999.
- [48] Lange, R., Seitz, P., Schwarte, R., Time-of-flight-Entfernungskamera in CMOS/CCD-Technik mit pixelintegrierten Lock-in-Verstärkern; Tagungsband DGZfP/GMA – Optische Formerfassung, VDI/VDE-GMA, Stuttgart 1999.
- [49] Lange R., Seitz, P., Schwarte, R., Time-of-flight range imaging with a custom solid-state image sensor, SPIE-EOS: Sensors, Sensor Systems, and Sensor Data Processing, München 1999.
- [50] X. Luan, R. Schwarte, Z. Zhang, B. Buxbaum, T. Ringbeck, H. Hess, '3D intelligent sensing based on PMD technology', SPIE- Laser Radar Techniques, Remote Sensing 2001, Toulouse 2001.
- [51] M. Hildebrand, K. David, B. Buxbaum, M. Grothof, R. Schwarte, 'A New Approach for Indoor Wireless Internet based on Diffuse Infrared', Proceedings of the IASTED "Wireless and Optical Communications 2001" Conference, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zürich, 2001, ISBN 0-88986-287-7.
- [52] H. Heß, M. Albrecht, R. Schwarte, 'PMD - New Detector for Fluorescence Lifetime Measurement', Kongreßband OPTO'2002, AMA Fachverband für Sensorik, Erfurt 2002.
- [53] M. Grothof, R. Schwarte, B. Buxbaum, T. Ringbeck, J. Frey, 'Product Monitoring with MSM-PMD-Array', Kongreßband OPTO'2002, AMA Fachverband für Sensorik, Erfurt 2002.
- [54] Xu, Z., Schwarte, R., Heinol, H., Buxbaum, B., Ringbeck, T., Smart pixel - photonic mixer device (PMD), New system concept of a 3D-imaging camera-on-a-chip, 5th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, S. 259-264, Nanjing 1998.
- [55] Z. Xu: Investigation of 3D-Imaging Systems based on Modulated Light and Optical RF-Interferometrie (ORFI). Dissertation, INV, Universität Siegen, 1999.
- [56] Z. Zhang, H. Heß, T. Ringbeck, R. Schwarte, 'Phase-Lock techniques using new correlation receivers for TOF-laser ranging', SPIE- Aero Sense 2002, Orlando 2002.
- [57] Janabi-Sharifi, F.: Collision: modelling, simulation and identification of robotic manipulators interacting with environments. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1995.
- [58] H. Roth, R. Schwarte, N. Ruangpayoongsak, J. Kuhle, M. Albrecht, M. Grothof, H. Heß: 3D Vision Based on PMD-Technology for Mobile Robots. Proceedings SPIE Aerosense conference 2003, Volume "Unmanned Ground Vehicle Technology", Paper 5083-66, Orlando, Florida, 2003.

2D/3D-Bildverarbeitung allgemein

- [59] J.K.Aggarwal, C.C.Chu; "The Issues, Analysis, and Interpretation of Multi-Sensor Images"; Multisensor Fusion for Computer Vision; Springer Verlag; Page 37-62; 1989;
- [60] S.Christie; S.L.Hill, B.Bury, J.O.Gray, K.M.Booth; "Design and Development of a Multi-Detecting Two-Dimensional Ranging Sensor"; Meas. Sci. Technol.; Vol. 6; IOP Publishing Ltd; Page 1301-1308; 1995
- [61] C.C.Chu, N.Nandhakumar, J.K.Aggarwal; "Image Segmentation using Laser Radar Data"; Pattern Recognition; PR(23); No. 6; Page 569-581; 1990
- [62] J.E.Cryer, P.S.Tsai, M.Shah; "Combining Shape from Shading and Stereo Using Human Vision Model"; Department of Computer Science; Technical Report; CS-TR-92-25; 1992

- [63] J.E.Cryer, P.S.Tsai, M.Shah; "Integration of Shape from Shading and Stereo"; Pattern Recognition; PR(28); No. 7; Page 1033-1043; 1995
- [64] R.O.Duda, D.Nitzan, P.Barret; "Use of Range and Reflectance Data to Find Planar Surface Regions"; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence; PAMI(1); No. 3; Page 259-271; 1979;
- [65] O.D.Faugeras; "Three-Dimensional Computer Vision / A Geometric Viewpoint"; MIT Press; Seite 663 ff.; 1993
- [66] K.H.Franke, F.Gaßmann, D.Kollhoff, T.Machleidt; "Verfahren zur Bearbeitung von 3D-Daten"; Symposium 'Aktuelle Entwicklungen und industrieller Einsatz der Bildverarbeitung'; Aachen; MIT GmbH; 5/6.9.1996
- [67] B.Gil, A.Mitiche, J.K.Aggarwal; "Experiments in Combining Intensity and Range Edge Maps"; Computer Vision, Graphics, and Image Processing; CVGIP(21); No. 3; Page 395-411; 1983
- [68] S.Ghosal, R.Mehrotra; "Detection of Composite Edges"; IEEE Trans. Image Processing; IP(3); No. 1; Page 14-25; 1994
- [69] G.D.Godin, M.D.Levine; "Structured Edge Map of Curved Objects in a Range Image"; IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition; CVPR-89; Page 276-281; 1989
- [70] S.Gupta, R.Krishnapruam; "Morphologic Edge Detection in Range Images"; SPIE; Image Algebra and Morphological Image Processing II; Vol. 1568; Page 335-346; 1991
- [71] D.L.Hall; "Mathematical Techniques in Multi-Sensor Data Fusion"; Artech House Inc; 1992
- [72] A.Hanczak; "Fusion of Range and Intensity Data in a Scanning Sensor"; SPIE; Optics, Illumination and Image Sensing for Machine Vision VI; Vol. 1614; Page 231-239; 1992
- [73] R.Hoffman, A.K.Jain; "Segmentation and Classification of Range Images"; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence; PAMI(9); No. 5; Page 608-620; 1987
- [74] R.A.Jarvis; "A Perspective on Range Finding Techniques for Computer Vision"; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence; PAMI(5); No. 2; Page 122-139; 1983
- [75] Jarvis; "Range Sensing for Computer Vision"; 3D Object Recognition Systems, Advances in Communication 1; Elsevier Science Publishers B.V.; 1993
- [76] X.Y.Jiang, H.Bunke; "Range Data Acquisition by Coded Structured Light: Error Characteristics of Binary and Gray Projection Code"; SPIE; Optical 3D Measurement techniques II; Vol. 2252; Page 386-393; 1993
- [77] X.Jiang, H.Bunke; "Dreidimensionales Computersehen / Gewinnung und Analyse von Tiefenbildern"; Springer Verlag; 1997
- [78] R.Kimmel, A.M.Bruckstein; "Global Shape from Shading"; Computer Vision and Image Understanding; CVIU(62); No. 3; Page 360-369; 1995
- [79] R.Klette, A.Koschan; "Surface Reconstruction based on Visual Information"; Technical Report 95/6; Computer Vision Group FR 3-11; Department of Computer Science; 1995
- [80] R.Klette, A.Koschan; "Computer Vision / Räumliche Information aus digitalen Bildern"; Vieweg Technik; 1996
- [81] R.Lenz; "Grundlagen der Videometrie, angewandt auf eine ultrahochauflösende CCD-Farbkamera"; Technisches Messen; Nr. 57; Oldenbourg Verlag; 1990
- [82] J.Lu; "Ein dreidimensionales Bildverarbeitungssystem für die Automatisierung visueller Prüfvorgänge"; IPA-IAO, Forschung und Praxis' Band 180; Springer Verlag; 1993
- [83] J.Malik; "Interpreting Line Drawings of Curved Objects"; International Journal of Computer Vision; IJCV(1); No. 1; Page 73-103; 1987
- [84] M.J.Magee, J.K.Aggarwal; "Using Multisensory Images to Derive the Structure of Three-Dimensional Objects: A Review"; Computer Vision, Graphics, and Image Processing; CVGIP(32); No. 2; Page 145-157; 1985
- [85] M.J.Magee, B.A.Boyter, C.H.Chien, J.K.Aggarwal; "Experiments in Intensity Guided Range Sensing Recognition of Three-Dimensional Objects"; IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intelligence; PAMI(7); No. 6; Page 629-637; 1985
- [86] L.Matthies, R.Szeliski, T.Kanade; "Kalman Filter-based Algorithms for Estimating Depth from Image Sequences"; Multisensor Fusion for Computer Vision; Springer Verlag; Page 87-125; 1991
- [87] T.A.Mancini, L.B.Wolff; "3D-Shape and Source Location from Depth and Reflectance"; SPIE; Optics, Illumination, and Image Sensing for Machine Vision VI; Vol. 1614; Page 87-98; 1991
- [88] S.G.Nadabar, A.K.Jain; "Edge Detection and Labeling by Fusion of Intensity and Range Images"; SPIE; Applications of Artificial Intelligence X; Vol. 1708; Page 108-119; 1992
- [89] D.Nitzan, A.E.Brain, R.O.Duda; "The Measurement and Use of Registered Reflectance and Range Data in Scene Analysis"; Proceedings of the IEEE; PIEEE(65); No. 2; Page 206-220; 1977
- [90] H.H.Pien, J.M.Gauch; "A Variational Approach to Multisensor Fusion of Images"; Applied Intelligence; ApplIntel(5); No. 3; Page 217-235; 1995
- [91] R.Robmann, H.Bunke; "Ein kantenorientierter Ansatz zur Integration von Grauwert und Tiefenbildern"; Technical Report; IAM 93-016; 1993
- [92] R.Robmann; "Interpretation von Schatten- und Intensitätskanten in integrierten Grauwert- und Tiefenbildern"; Technical Report; IAM 94-007; 1994
- [93] J.Shah, H.H.Pien, J.M.Gauch; "Recovery of Surfaces with Discontinuities by Fusing Shading and Range Data within a Variational Framework"; IEEE Trans. Image Processing; IP(5); No. 8; Page 1243-1251; 1996
- [94] B.Straub; "Ein Verfahren zur Rekonstruktion von dreidimensionalen Objektmodellen aus digitalen Bildern"; Dissertation; Deutsche Geodätische Kommission; Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Kommission bei der C.H.Beckschen Verlagsbuchhandlung München; 1991
- [95] C.H.Teh, R.T.Chin; "On the Detection of Dominant Points on Digital Curve"; IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence; PAMI(11); No. 8; Page 859-872; 1989
- [96] J.Wei; "Modellgesteuerte Szenen-Interpretation durch Fusion von Intensitäts- und Abstands-bildern"; Dissertation von J.Wei; Universität Karlsruhe; Fakultät für Informatik; 1989
- [97] J.Wei, P.Levi, U.Rembold; "Fusion of Range and Intensity Image Data for Recognition of 3D object surfaces"; Multisensor Fusion for Computer Vision; Springer Verlag; Page 171-194; 1989
- [98] J.Wei, P.Levi; "Entwicklung dreidimensionaler Fusionstechniken für Abstands- und Intensitätsbilder auf Basis eines doppelt synchronisierten Laser-Scanners"; Mustererkennung 1990; 12. DAGM-Symposium; Seite 316-323; 1990
- [99] N.Wilt; "Object-Oriented Ray Tracing in C++"; Wiley Professional Computing; 1994
- [100] R.J.Woodham; "Photometric Method for Determining Surface Orientation from Multiple Images"; Optical Engineering; OptEng(19); No. 1; Page 139-144; 1980
- [101] G.Zhang, W.J.Austin, A.M.Wallace; "Combining Depth and Intensity Processing for Scene Description and Object Recognition"; SPIE; Sensor Fusion V; Vol. 1828; Page 49-59; 1992
- [102] X.Zhang, D.Zhao; "Range Image Segmentation via Edges and Critical Points"; Spie; Visual Communications and Image Processing '95; Vol. 2501; Page 1626-1637; 1995

Modellbildung und Simulation

- [103] Klaus, F., Loffeld, O., 'A Concept for the Simulation of SAR Data', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
- [104] Li, A., Loffeld, O., 'Two Dimensional SAR Processing in the Frequency Domain', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
- [105] Klaus, F., Loffeld, O., 'Simulation of Planetary Surfaces for a SAR Data Simulator', Proc. IGARSS'92, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Houston, 1992.
- [106] Klaus, F., Blewonska, U., Loffeld, O., 'Simulation of Shuttle Trajectory and Attitude for a SAR-Simulator', Proc. IGARSS'93, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo 1993.
- [107] Klaus, F., Simulation von Radar-Sensoren mit synthetischer Apertur, VDI Fortschrittsberichte, Reihe 8, Mess- Steuerungs- und Regelungstechnik, Nr. 447, 1995.
- [108] Nies, H., Loffeld, O., Gebhardt, U., Peters, V., Orbit Estimation of the Interferometric Cartwheel Using an Extended Linearized Kalman Filter, Proc. IGARSS'03, Toulouse 2003
- [109] Gebhardt, U., Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., Orbit Modeling Related to Cartwheel Geometry", Proc. IGARSS'03, Toulouse 2003
- [110] Knedlik, S., Loffeld, O., Nies, H., Gebhardt, U., On the Advantage of Intersatellite Ranging Systems for Orbit Estimation in Bistatic SAR, Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
- [111] Nies, H., Loffeld, O., Knedlik, S., A new Concept in Orbit Modeling Using a Decentralized Estimation Algorithm, Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
- [112] Gebhardt, U., Loffeld, O., Kalkuhl, M., Nies, H., Knedlik, S., "Orbit Tracking and Interpolation Using a Realistic Gravitation Model", Conf. Proc. IGARSS'04, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, Alaska, 2004,
- [113] Nies, H., Loffeld, O., Knedlik, S., Gebhardt, U., Wiechert, W., A Data Fusion Approach for Distributed Orbit Estimation, Proc. IGARSS'04, Anchorage, Alaska, 2004,
- [114] Gebhardt, U., Loffeld, O., Kalkuhl, M., Knedlik, S., Wiechert, W., (2004). Orbit Modeling for Calibration in Interferometric SAR, EUSAR 2004, Ulm/Germany

Bildsensorik und Bildverarbeitung – eigene Vorarbeiten

- [115] Freisleben, B., D. Hartmann, et al. (1997). Parallel Raytracing: A Case Study in Partitioning and Scheduling on Workstation Clusters. Proceedings of the 30th Hawaii International Conference on System Sciences, IEEE Press.
- [116] M. Becker, 'Signal Processing for Reduction of Speckle-Noise in light-stripe-systems', SPIE Proc., Videometrics IV, Vol. 2598, Philadelphia Okt. 1996.
- [117] Bundschuh, B., 'Modellierung und systemtheoretische Beschreibung eines laseroptischen 3D-Konturerfassungsystems', Dissertation Universität-GH Siegen, FB12, Institut für Nachrichtenverarbeitung, 1991
- [118] D. D'Aria, A.M. Guarnieri, F. Rocca, „Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out“, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 42, pp. 1362-1376, July 2004
- [119] R.Gerdes; "Dreidimensionales Messen mit einer Videokamera unter Ausnutzung geometrischer Randbedingungen"; Dissertation Universität-GH Siegen; VDI Verlag; Reihe 8; Nr 435; 1994
- [120] Hartmann, K., Ley, D., 'Erfassung von Bewegungszuständen mit Hilfe der Echtzeitbildfolgenanalyse', Proc., W. Ameling (Hrsg.) 7. Aachener Symposium für Signaltheorie ASST '90, Springer-Verlag, Berlin 1990
- [121] Hartmann, K., Weber, J., 'Multivision System for 3-D Measurement within Camera Vision', SPIE Proc., Sensor Fusion V, Vol. 1828, Boston, Nov. 1992
- [122] Heinol H., Xu Z., Schwarte, R., 'New optical 2D modulator jacked in rotational plastic optics', SPIE Proc., Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics, Vol. 2600, Philadelphia Okt. 1995.
- [123] H.Heinol, Z.Xu, J.Schulte; "Laufzeitbasierende 3D-Kamerasysteme – Smart-Pixel-Lösungen"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGfFP-VDI/VDEGMA;GMA-Bericht 70; Beiheft; 1999
- [124] D.Justen, K.Hartmann; "3D-Image Processing through Grayscale Images and Distance Data Related to Individual Pixels"; SPIE; Visual Information Processing VIII; Vol. 3716; 1999
- [125] D.Justen, K.Hartmann, R.Schwarte; "3D-Bildverarbeitung auf Basis eines Grauwertbildes mit vereinzelt Entfernungsdaten"; Tagungsband 'Optische Formerfassung'; DGfFP-VDI/VDE-GMA; GMA-Bericht 70; Seite 249-258; 1999
- [126] D. Justen, „Untersuchung eines neuartigen 2D-gestützten 3D-PMD-Bildverarbeitungssystems“ Dissertation Universität-GH Siegen, 2001.
- [127] Kleuver, W., Fuß, M., 'Automatische Qualitätskontrolle von Rotgußteilen - Triangulationstechnik und Sichtkontrolle', Proc. OPTO '94, ACS Organisations GmbH, Leipzig ,Mai, 1994
- [128] Klicker, J., 'Ein zweidimensionales Triangulationsmesssystem mit Online-Messwertverarbeitung bei hoher Bildrate', Dissertation im Zentrum für Sensorsysteme der Universität-GH-Siegen, Juli 1992.
- [129] Klicker, J., Weller, U., 'Interactive Image Processing Tool for Experimental evaluation of Algorithms for Real-Time Video Signal Preprocessing'
- [130] Klicker, J., 'Triangulation als Basis für die 1D, 2D, 3D-Objektvermessung', VDI/VDE GMA-Aussprachetag, GMA-Bericht 23, S.185-194, Düsseldorf Okt. 1994
- [131] Ley, D., 'Intelligent Multisensor System for High-Speed and High-Precision 3D metrology', SPIE Proc., Sensors and Controls for Automated Manufacturing Systems, Vol. , Boston, Nov. 1993
- [132] Ley, Dietmar, 'Ein intelligentes Multisensorsystem zur berührungslosen Erfassung dreidimensionaler Konturen', Dissertation im Zentrum für Sensorsysteme der Universität-GH-Siegen, Juli 1992.
- [133] Loffeld, O., "Multisensorielle Signalverarbeitung / Data-Fusion und Kalman-Filter"; Hochschulinterne Veröffentlichung Universität-GH-Siegen; 1990
- [134] Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., Knedlik, S., „Models and Useful Relations for Bistatic SAR Processing“, IEEE, Vol. 42, No. 10, Oktober 2004
- [135] Löcherbach, Edwin, '3D-Vision mittels Stereobildauswertung bei Videobildraten', Dissertation Universität-GH Siegen, FB12, Institut für Nachrichtenverarbeitung/Institut für Technische Elektronik, 1986
- [136] J.Olk; "Untersuchung von Laufzeitentfernungsmesssystemen unter besonderer Berücksichtigung des Referenzproblems"; Shaker Verlag; ZESS-Forschungsberichte; Bd. 5; 1997

- [137] R.Otterbach; "Robuste 3D-Objekterkennung und Lagebestimmung durch Auswertung von 2D-Bildfolgen"; Dissertation Universität-GH Siegen; VDI Verlag; Reihe 8; Nr. 481; 1995
- [138] E.Schubert; "Mehrfach farbcodierte Triangulationsverfahren zur topometrischen Erfassung und Vermessung von 3D-Objekten"; Dissertation Universität-GH Siegen; Shaker Verlag; ZESS-Forschungsberichte; Bd. 1; 1996
- [139] Schubert, E., 'Farbtriangulation-Einsatz von farbcodierter Beleuchtung zur 3D-Objekterfassung', Sensor '93 Kongreß, Band III, S 131-138, ACS Organisations GmbH, Nürnberg Okt. 1993
- [140] Schubert, E., Rath, H., Klicker, J., 'Fast 3D object recognition using a combination of color-coded phase-shift principle and color-coded triangulation', SPIE Proc. Sensors and Control for Automation, Volume 2247, p. 202-215, Europto '94, Frankfurt, June 1994
- [141] Schubert, E. Klicker, J., Schröder, A., 'Vision System for empty PET-bottle classification inside the box', SPIE Proc., Videometrics III, Vol. 2350, Boston, Nov. 1994
- [142] J.Weber; "Ein visuell unterstütztes, laseroptisches Multisensorsystem zur automatisierten Erfassung dreidimensionaler Objekte"; Dissertation Universität-GH Siegen; Shaker Verlag; ZESS-Forschungsberichte; Bd. 13; 1998
- [143] U.Weller, 'Non-tactile registration of process parameters in a continuous rolling process', SPIE Proc., Machine Vision Application, Architectures, and systems Integration II, Vol. 2140, Boston, Sep. 1993
- [144] U.Weller, St. Reinschmidt, 'Method for contactless measurement of process parameters in a continuous rolling process', Machine Vision Applications in Industrial Inspection III, San Jose, Feb. 1995.
- [145] Xu, Z., Bundschuh, B., Klaus, F., 'Simulation and optimization of aspheric lenses for advanced small sensor heads of large numerical aperture', SPIE Proc. Sensors and Control for Automation, Volume 2247, p 119-125, Europto '94, Frankfurt, June 1994
- [146] Xu Z., Heinol H., Schwarte, R., 'Enhanced multi-probing recovering algorithm based on color mixed nonlinear modulation and its application in a 3D vision system', SPIE Proc., Intelligent Robots and Computer Vision XIV, Vol. 2588, Philadelphia Okt. 1995.

3 Ziele und Arbeitsprogramm

Gegenstand der Arbeiten dieses Projektes ist die Entwicklung der system- und signaltheoretischen Grundlagen eines Simulations- und Referenzsystems einer 2D/3D-Kamera, bestehend aus PMD-Sensorik und CMOS/CCD-Sensorik.

3.1 Systemtheoretische Betrachtung, Modellierung und Simulation eines CMOS/CCD-Sensors

Basierend auf den geleisteten Vorarbeiten auf dem Gebiet 2D/3D-Bildsensorik soll ein Simulationskonzept entwickelt werden, das es ermöglicht, aus einer in 3D gegebenen Szene eine 2D-Antwort zu simulieren, welche ein CMOS/CCD-Sensor, installiert auf einer innerhalb dieser Szene bewegten Plattform, von dieser Szene liefern würde. Die Analyse umfasst:

- a. Systemtheoretische Beschreibung eines CMOS/CCD-Sensors unter Berücksichtigung dessen mechanischer sowie optischer Eigenschaften
- b. Simulation von Helligkeits- (Farb-)daten

3.2 Entwicklung und Implementierung eines softwarebasierten CMOS/CCD-Simulators / PMD-Simulators

Basierend auf den Modellierungsergebnissen von U.P. 3.1 und dem vorhandenen (idealisierten) Simulator (siehe U.P. 2.2.3) soll eine Erweiterung entwickelt und implementiert werden, die es ermöglicht, dass der Simulator sowohl Helligkeitsinformationen einer hochauflösenden CCD/CMOS-Kamera als auch Tiefeninformationen einer PMD-Kamera einer gegebenen Umgebung liefert. Beide Teilsensoren sollen flexibel in einem Gesamtsensorsystem positioniert und parametrisiert werden können. Der CMOS/CCD-Simulator sowie der PMD-Simulator sollen die mechanischen, optischen und alle anwendungsrelevanten Eigenschaften der jeweiligen Sensoren realitätsgetreu und präzise nachbilden. Gleichzeitig muss das Simulationssystem Referenzdaten erzeugen können, mit denen es möglich wird, dass die in einem weiteren Teilprojekt des Antragspakets entwickelten 2D/3D-Bildverarbeitungs- und Koregistrierungsansätze auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht werden. Dieses Projekt schließt folgende Einzelschritte ein:

- a. Umsetzung aller wichtigen optischen und geometrischen Eigenschaften des CMOS/CCD- und PMD-Sensors im Simulator
- b. Realisierung einer freien Parametrisierung direkt im Simulator (Auflösung, Neigung, Füllfaktor usw.) oder durch externe Quellen (z.B. Parameter-Dateien)

c. Simulation und Analyse von Helligkeits- und Tiefeninformationen

3.3 Reale Verzerrungs- und Störeffekte

In diesem Teilprojekt soll auf die spezielle Problematik des Messaufbaus aufgrund getrennter Beleuchtungs- und Empfangseinheiten (*bistatische Anordnung*) sowie auf spezifische Datenfehler, die sich bedingt durch Rauschen, Optik- und Laufzeitverzerrungen ergeben, erforscht, analysiert und simuliert werden.

Bistatische Effekte

Aufgrund des konstruktiv bedingten Abstandes zwischen dem Beleuchter und dem PMD-Sensor (bistatischer Aufbau) ergibt sich bei der Laufzeitmessung eine Verzerrung durch unterschiedliche Hin- und Rückwege des Lichtsignals. Die Formel zur Bestimmung des Abstandes R aus der Laufzeit t_{Lauf}

$$R = \frac{c \cdot t_{Lauf}}{2}$$

gilt in diesem Zusammenhang nur näherungsweise für sehr große Abstände zum Zielobjekt bezüglich des Beleuchter-Sensor-Abstandes und verliert im allgemeinen bistatischen Fall ihre Gültigkeit. Hier setzt sich die gesamte vom Sendesignal zurückgelegte Strecke aus den Entfernungen Beleuchter – Objekt und Objekt – Sensor zusammen. Gemessen wird die Gesamtentfernung

$$\overline{BP} + \overline{PE} = \sqrt{P_x^2 + (B_y - P_y)^2 + (B_z - P_z)^2} + \sqrt{P_x^2 + (P_y - E_y)^2 + (P_z - E_z)^2},$$

gesucht sind die einzelnen Abstände zum Punktziel.

$P = (P_x, P_y, P_z)^T$ - Koordinaten des Punktziels ; $B = (B_x, B_y, B_z)^T$ - Koordinaten des Beleuchters ; $E = (E_x, E_y, E_z)^T$ - Koordinaten des Sensors;

$\overline{BP} + \overline{PE}$ – Abstände Beleuchter-Punktziel und Sensor-Punktziel

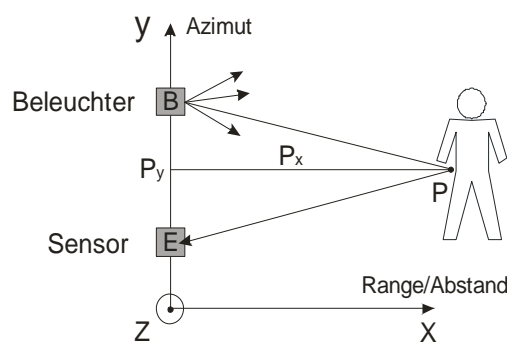


Abbildung 3-1: Bistatische Anordnung (E - Empfänger/Sensor, B- Beleuchter/Sender, P - Punktziel)

Um die Lage des Zielobjekts präzise bestimmen zu können, bedarf es der Lösung der bistatischen Gleichung. Ein viel versprechender Lösungsansatz dieses bisher ungelösten Problems wurde in [134] von Prof. Loffeld vorgestellt. Im Fall, dass der Sensor und die Beleuchtung auf der gleichen Plattform fest montiert sind und somit ihre Geschwindigkeitsvektoren gleiche Richtung und Betrag aufweisen, handelt es sich bei der Korrektur der bistatischen Deformation um den sog. *Rocca's Smile Operator* [118]. Nach [134] bleibt der bistatische Deformationsterm in die Azimut-Richtung konstant und muss nur

in die Range Richtung kompensiert werden. Ziel der Arbeiten ist die Untersuchung und die kritische Analyse der veröffentlichten Ansätze auf ihre Tauglichkeit sowie die Entwicklung neuer der Problemstellung angepasster Entzerrungsalgorithmen zur Korrektur der bistatischen Deformation.

Störsimulationen

In der Realität erzeugen alle CCD/CMOS- und PMD-Sensoren ein so genanntes thermisches Eigenrauschen, das bei verschiedenen Chips durchaus signifikant unterschiedliche Messwerte zur Folge hat. Die von einem realen Sensor gelieferten Messwerte können als permanente Überlagerung von tatsächlichen (idealisierten) Messwerten und durch thermisches Rauschen verursachte Störungen angesehen werden.

Ein weiteres Problem ist die Pixel-nonuniformity. Trotz modernster Technik und hoher Qualität im Herstellungsprozess können die einzelnen Pixel eines optischen Sensors nicht exakt gleich groß hergestellt werden. Dies führt dazu, dass auch unter absolut gleichen Vorraussetzungen (z.B. Temperatur, Intensität des einfallenden Lichtes) benachbarte Pixel unterschiedliche Messwerte liefern. Dies wird noch mehr durch die eingesetzte Optik verstärkt, dessen Herstellung ebenfalls störungsbehaftet sein kann.

Um realitätsnahe Simulationen zu erhalten, müssen diese Effekte im Simulator ebenfalls nachgebildet werden.

Störsimulationen:

- a. Entfernungsrauschen
- b. PMD-Pixelnonuniformity
- c. PMD-Helligkeitsrauschen
- d. CMOS Störsimulation

3.4 Entwicklung und Implementierung eines Objekteditors

Bei Modellierung und Simulation komplexer 3D-Szenen werden diese in der Regel als Überlagerung von einfacheren 3D-Szenen realisiert, die auch in Form einer Objektbibliothek ausgeführt sein können (Kapitel 3.5). Besonders in der Anfangsphase der Entwicklung und zur Verifizierung der Daten bedarf es u.a. einfacher geometrischer Figuren, die man in der Antwort des PMD-Sensors wieder finden würde. Um dem Benutzer des Simulators diese Aufgabe zu erleichtern, ist es sinnvoll, im Simulator selbst oder als Hilfsprogramm einen 3D-Objekteditor zu entwickeln. Die Aufgabe des Objekteditors besteht darin, auf eine einfache Art und Weise Arbeitsgegenstände und Arbeitsmittel als Objekte in einem Objektmodell zu erstellen, z.B. mit Hilfe einer grafischen Oberfläche, in der man die wichtigsten Parameter des Objektes eingeben kann, und dieses „simulatorgerecht“ zu machen. Diese Umformung beinhaltet eine Ausgabe der erstellten Objekte in Form von Punkten also als ein Vektor der Größe $3 \times N$ (mit N-Anzahl der Punkte eines Objektes) ausgegeben werden müssen. Des Weiteren muss es möglich sein, ein Objekt zu skalieren und zu verschieben. Es ist ebenfalls denkbar, den Objekteditor mit einer Schnittstelle zum PMD-Simulator auszustatten. Dies hätte den Vorteil, dass eine eventuelle Verschiebung/Rotation der PMD-Kamera (des Sichtfeldes der Kamera) im Objekteditor berücksichtigt werden könnte und den Benutzer vor Eingabe falscher Parameter oder Koordinaten warnen würde.

3.5 Entwicklung und technische Umsetzung einer Objektbibliothek

Erzeugung, Darstellung und Visualisierung von 3D-Szenen stellt einen wichtigen Teil der Simulation dar. Oftmals muss ein Versuch mit einer Szene oder auch Teilszenen mit unterschiedlichen Sensorparametern wiederholt durchgeführt werden. Besonders

zur Verifizierung und beim Vergleich der Ergebnisse ist es wichtig, ähnliche oder teilweise sogar exakte Testumgebungen zu schaffen. Aus diesem Grund ist die Erstellung einer Objektbibliothek von großem Vorteil. Bereits erstellte und in der Bibliothek vorhandene Objekte ließen sich in kürzester Zeit im Simulator einbinden. Die Abbildung 3-2 verdeutlicht die Realisierung der Objektbibliothek. Über eine gemeinsame Schnittstelle lassen sich 3D-Objekte oder auch ganze Szenen abrufen bzw. abspeichern. Die Bibliothek soll dynamisch aufgebaut werden, d.h. sie wird erst beim jeweiligen Aufruf des Programms diesem hinzugefügt und zeigt stetig den aktuellen Stand der Data Base an. Auf diese Weise wird gewährleistet, dass der Anwender nach einem etwaigen Update den Simulator nicht neu starten muss. Über eine grafische Ausgabe wird der Anwender beim Aufrufen über die in der Bibliothek bereits vorhandene Objekte informiert und kann diese in einer Liste auswählen.

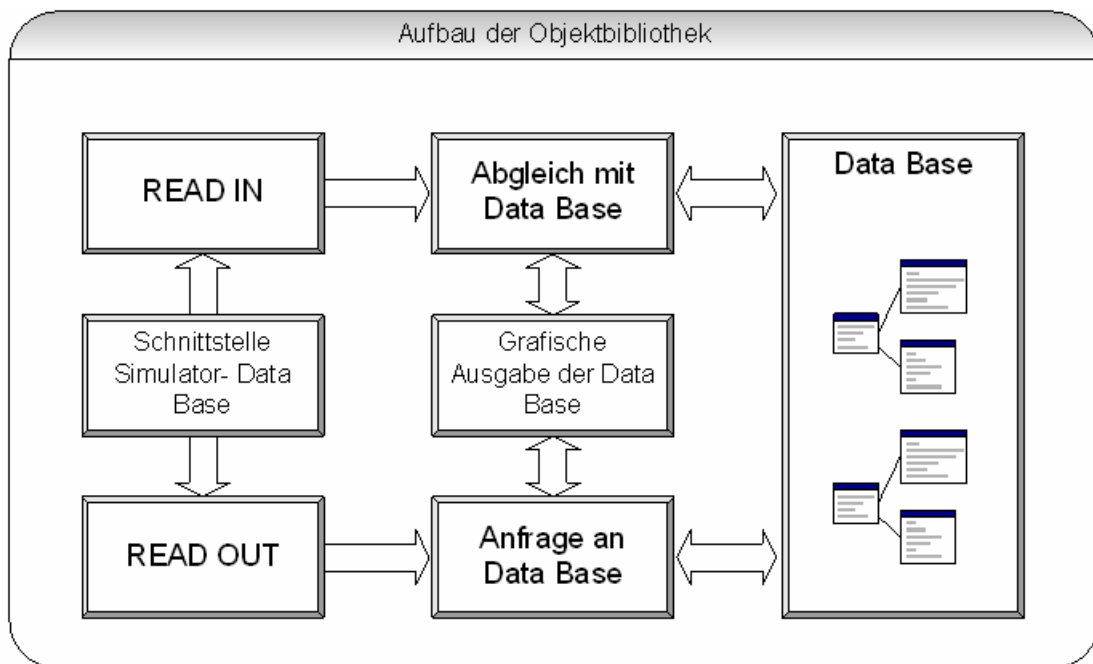


Abbildung 3-2: Prinzipieller Aufbau der Objektbibliothek

Des Weiteren bleibt zu untersuchen, in wieweit für diese Aufgabe hervorragend geeignete und im Internet zahlreich vorhandene Open Source 3D-Objekte bzw. Modelle (z.B. VRML-Modelle) mit teilweise kompletten 3D-Szenen in die Bibliothek einbinden lassen. Dies wäre ein großer Schritt in die Richtung realitätsnaher Simulationen.

3.6 Entwicklung einer grafischen Benutzeroberfläche

Im Rahmen dieser Arbeit soll eine grafische Benutzeroberfläche (GUI) für den Simulator entwickelt werden, die die Parametrierung, die Dateneingabe und -ausgabe erheblich erleichtern soll. Es soll für den Benutzer möglich sein, zwischen zu generierenden und vorhandenen Datensätzen zu wählen. Die Parameter des Sensors (wie Art des Sensors, Auflösung, aktiver Bereich, Rotation und Verschiebung des Sensors gegenüber der Optik, Modulationsfrequenz) sollen entweder vom Benutzer direkt eingegeben oder auch aus einer Parameter-Datei (z.B. eine Initialisierungsdatei) eingelesen werden können. Die grafische Ausgabe der Ergebnisse soll in der GUI ebenfalls implementiert werden.

Ein wichtiger Teil dieser Arbeit besteht in der Realisierung anwendungsspezifischer Schnittstellen zum Datenaustausch zwischen den einzelnen Routinen, Programmen und Bibliotheken.

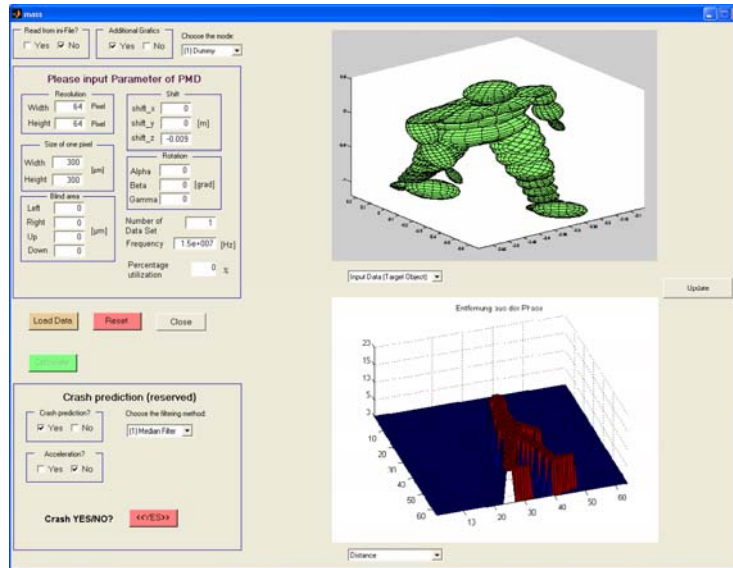


Abbildung 3-3: Beispiel einer Benutzeroberfläche zum Simulator

Die einzelnen Schritte umfassen:

- a. Entwurf und Realisierung eines benutzerfreundlichen graphischen Interfaces
- b. Implementierung der Schnittstellen
- c. Implementierung des CMOS/CCD-Simulators und des PMD-Simulators
- d. Realisierung grafischer Ausgaben

3.7 Optimierung der Algorithmen hinsichtlich der Rechenzeit

Mit steigender Komplexität der zu simulierenden Daten steigt nicht nur die Komplexität des Algorithmus, sondern auch das Volumen zu verarbeitenden Daten. Dies führt unabwendbar zu steigenden Rechenzeiten und Speicherbedarf. Während für Standardprobleme der Optimierung eine Vielzahl von Algorithmen zur Verfügung stehen, müssen bei komplex strukturierten Optimierungsproblemen anwendungsspezifische Algorithmen neu entwickelt, implementiert und auf ihre Effizienz getestet werden.

3.8 Arbeitsplan

Der Arbeitsplan folgt den in 3.1 bis 3.7 genannten Arbeitsschritten. Nachstehende Tabelle zeigt die zeitliche Anordnung der Einzelaufgaben in die verschiedenen Quartale im Laufe der Projektbearbeitung.

Nr. Arbeitsschritt	2006				2007				2008				2009			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Modellierung eines CMOS/CCD-Sensors	X	X	X	X	X	X	X									
Entwicklung des CMOS/CCD- und des PMD-Simulators		X	X	X	X	X	X	X	X	X						
Bistatische Effekte und Störsimulationen					X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Objekteditor					X	X	X	X	X	X	X	X				
Objektbibliothek					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Benutzeroberfläche									X	X	X	X	X	X	X	X
Codeoptimierung								X	X	X				X	X	X
Dokumentation				X			X	X				X			X	X

3.9 Untersuchungen an Menschen

finden nicht statt.

3.10 Tierversuche

finden nicht statt.

3.11 Gentechnologische Experimente

finden nicht statt.

4 Beantragte Mittel

Zur Abschätzung des Gesamtvolumens wird auch eine ungefähre Kostenabschätzung für das 3. und 4. Förderungsjahr aufgeführt.

4.1 Personalbedarf

a) Anzahl und Dauer der wissenschaftlichen Mitarbeiterstellen

- 1,5 BAT IIa für die Dauer von zunächst 2 Jahren

Begründung: Für die Durchführung der Arbeiten sind gute Kenntnisse im Bereich von computergestützten Simulationen, Programmierung und Software-Technik (Objektmodellierung, Koordinatensysteme, Signalverarbeitung, Optimierung) erforderlich. Zudem muss ein intensiver Kommunikationsprozess mit den Projektpartnern in Gang gehalten werden und die Koordination der voneinander abhängigen Projekte gewährleistet werden. Vorzugsweise sollte das Projekt daher von einem Ingenieur betreut werden. Deutschsprachige Mitarbeiter aus dem Ingenieurbereich können bei diesen hohen Anforderungen allerdings nur mit einer vollen Stelle (BAT IIa) gewonnen werden. Konkret ist für diese Position Herr Dipl.-Ing. Valerij Peters vorgesehen, der seit Oktober 2002 als wissenschaftlicher Mitarbeiter im ZESS beschäftigt ist und unter anderem einen Simulatoransatz zum Einsatz des PMD in einer Bewegobjektsituation im Hinblick auf ein Fahrerassistenzsystem entwickelt hat. Ein zweiter wissenschaftlicher Mitarbeiter wird sich im Umfang von einer halben Stelle mit der signaltheoretischen Modellierung der realen Störphänomene in enger Zusammenarbeit mit der Firma PMDTec und dem Teilprojekt „Multi-Kamera“ beschäftigen. Die theoretische Modellbildung bistatischer Effekte und insbesondere von Mehrfachbeleuchtungen soll dabei in enger Kooperation mit der SAR-Gruppe des International Postgraduate Programmes Multi Sensorics erfolgen.

b) Anzahl und Dauer der studentischen Hilfskraftstellen

2 studentische Hilfskräfte mit je 40h/Monat für die Dauer von 2 Jahren

Begründung: Viele periphere Komponenten des zu entwickelnden Simulationssystems (Visualisierung, Datenschnittstellen, Datenauswertung) sowie die Erstellung konkreter Szenarien und Seriensimulationen können auch von Hilfskräften ausgeführt werden. Dafür sollen nach Möglichkeit ein Informatik- und ein Ingenieur-Student gewonnen werden. Zur Unterstützung der Doktoranden werden daher entsprechende Hilfskraftmittel beantragt.

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr

a) Anzahl und Dauer der wissenschaftlichen Mitarbeiterstellen

- 1,5 BAT IIa für 2 Jahre

b) Anzahl und Umfang der studentischen Hilfskräfte

2 studentische Hilfskräfte mit je 40h/Monat für die Dauer von 2 Jahren

4.2 Wissenschaftliche Geräte

a) Geräte über 10.000,- EUR

Es kann die gesamte vorhandene Infrastruktur des ZESS und des FOMAAS² genutzt werden. Zusätzlich ist aber für die Aufgabenstellung realitätsnaher Simulationen die Beschaffung einer sehr leistungsfähigen Spezialworkstation notwendig, z.B.:

HP ProLiant DL580 (PC3200)

- Zwei AMD 852 Opteron 2,6GHz/1MB 64Bit Prozessoren
- 8GB PC3200 Arbeitsspeicher
- 10/100/1000 Mbit Ethernet Anschluss
- CD-ROM Laufwerk
- deutsche Tastatur
- PS/2-Maus
- HP 72.8GB Pluggable Ultra320 SCSI Festplatte, 15.000 rpm
- 4 Jahre Garantie

Summe inkl. Versand **ohne** MwSt.: lt. Angebot, siehe Anlage

16.867 €

Begründung des Bedarfs:

Der Schwerpunkt des beantragten Forschungsvorhabens ist die simulative, rechenaufwändige Erzeugung von PMD-Entfernungs/Helligkeitsdaten und 2D-Helligkeitsdaten einer bewegten Szene. Die hohe räumliche Auflösung eines CMOS-Sensors in Verbindung mit der Simulation bewegter Szenen mit entsprechender Tiefendynamik, Tiefenauflösung und Bildrate bedingt dabei einen extrem hohen Berechnungsaufwand und zum anderen extreme Datenmengen, die sowohl im Arbeitsspeicher des Rechners verwaltet werden, als auch im Hintergrund abgespeichert werden müssen.

Die Programmentwicklung erfolgt aufgrund der Komplexität des Problems zunächst nur in einer leistungsfähigen Programmier- und Visualisierungsumgebung, wie Matlab. Dies entspricht dem international immer mehr praktizierten Standard, dass Prozessierungskonzepte erst nach Abschluss der eigentlichen Forschung und Entwicklung in eine lauffeieroptimale Hochsprache portiert werden³. Setzt man den durch die Verwendung von Programmier- und Visualisierungsumgebungen entstehenden Laufzeit-Overhead vorsichtig mit 50% an, wird unmittelbar deutlich, dass zur Implementierung und Verifikation der zu entwickelnden Modellierung und Verarbeitung eine Workstation mit hoher Rechenleistung, schneller Speicherperipherie und großem Massenspeicher unverzichtbar ist. Rechnersysteme mit einer durch das Betriebssystem unterstützten 64bit Architektur sind hier unbedingt notwendig. Aus Gründen der benötigten 64bit Hardware und Betriebssystemumgebung (TrueUnix64), aufgrund der Verfügbarkeit der Matlab-Software-

² FOMAAS= Forschungszentrum für Multidisziplinäre Analysen und Systemoptimierung

³ Diese Portierung wird aber nicht als zentral für das beantragte Vorhaben angesehen.

Umgebung (mit Mehrprozessorunterstützung) als echte 64bit Umgebung für TrueUnix64 und aus Kompatibilitätsgründen mit der schon verwendeten Systemumgebung mit ca. 1 TByte Hintergrundspeicher kommt als unbedingt notwendige Erweiterung der Rechnerleistung nur die beantragte Konfiguration in Frage. Die Ankopplung an die Workstations der Benutzer zur Visualisierung erfolgt über Cygwin X-Window Clients, so dass die beantragte Konfiguration keine besonderen Grafikfähigkeiten besitzen muss. Die dadurch mögliche räumliche Trennung gestattet zudem die Ausstattung des beantragten Systems mit sehr schnellen (aber lauten) Festplatten.

b) Geräte unter 10.000,- €

3 MATLAB-Lizenzen (je 600 €)	1800 €
------------------------------	--------

Begründung: Am Lehrstuhl für Simulationstechnik (Prof. Wiechert) sind zwar 25 Ausbildungslizenzen für MATLAB vorhanden, diese dürfen aber nicht für Forschungszwecke eingesetzt werden. Für die Ausstattung der beiden Mitarbeiter und die Bereitstellung des Simulators bei den Projektpartnern (hier genügt eine Floating Lizenz) sind daher 3 MATLAB-Lizenzen erforderlich.

2 Mathworks-Simulink (je 450 €)	900 €
---------------------------------	-------

Begründung: Simulink ist eine Plattform für Simulation und modellbasierte Entwicklung dynamischer Systeme und wird bei der Entwicklung des Simulators benötigt.

Matlab Distributed Computing Engine (1 bis 8 Worker)	1250 €
--	--------

Begründung: Die Matlab Distributed Computing Engine ist eine Matlab Erweiterung, die es ermöglicht, auf einem Cluster oder Mehrprozessorsystem gleichzeitig voneinander unabhängige Matlab-Operationen auszuführen, um die Abarbeitung größerer Jobs zu beschleunigen.

2 Distributed Computing Toolbox (je 300 €)	600 €
--	-------

Begründung: Die Distributed Computing Toolbox ist eine Erweiterung zur Matlab Distributed Computing Engine (DCE). Diese kommuniziert als Client mit dem jeweiligen Jobmanager der DCE, der die parallele Verteilung der Programme über die Prozessoren erlaubt.

Summe 4.2.	<u>4550 €</u>
-------------------	----------------------

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr

a) Geräte über 10.000,- €

keine

b) Geräte unter 10.000,- €

Update der MATLAB-Lizenzen	500 €
----------------------------	-------

Summe 4.2.1. pro Jahr	<u>500 €</u>
------------------------------	---------------------

4.3 Verbrauchsmaterial

Datenträger für Speicherung und Transfer von Daten	pro Jahr	200 €
Hochw. Druckerpapier und Toner für einen vorh. Farbdrucker	pro Jahr	300 €
Summe 4.3.	pro Jahr	<u>500 €</u>

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr

Datenträger für Speicherung und Transfer von Daten	pro Jahr	200 €
Hochw. Druckerpapier und Toner für einen vorh. Farbdrucker	pro Jahr	300 €
Summe 4.3.1	pro Jahr	<u>500 €</u>

4.4 Reisen

Austausch zwischen den Projektpartnern	pro Jahr	500 €
Präsentation von Forschungsergebnissen auf Tagungen	pro Jahr	4.000 €
Summe 4.4	pro Jahr	<u>4.500 €</u>

Begründung: Die Ergebnisse des Teilvorhabens sollen regelmäßig auf internationalen themenbezogenen Workshops und in reviewed journals veröffentlicht werden. Geplant ist konkret an die Teilnahme an den Tagungsreihen ASIM-Symposium (2006), European Simulation Multiconference (2006), EUROSIM (2007), EUSAR (2006), IGARSS (2007).

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr

Austausch zwischen den Projektpartnern	pro Jahr	500 €
Präsentation von Forschungsergebnissen auf Tagungen	pro Jahr	4.000 €
Summe 4.4.1	pro Jahr	<u>4.500 €</u>

4.5 Publikationskosten

Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden im Bereich Simulation und Virtualisierung (farbig)	pro Jahr	500 €
Summe 4.5	pro Jahr	<u>500 €</u>

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr

Veröffentlichungen in Zeitschriften und Tagungsbänden im Bereich Simulation und Virtualisierung (farbig)	pro Jahr	500 €
Summe 4.5.1	pro Jahr	<u>500 €</u>

4.6 Sonstige Kosten

Keine

5 Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens

Das thematische Zusammenwirken von **PMD-Sim** und den anderen Teilvorhaben des Antragspakets wird in Abbildung 5-1 veranschaulicht. Teilanträge des Pakets sind mit Rechtecken dargestellt und gelb hinterlegt. Die Interaktionen zwischen den einzelnen Teilprojekten sind durch schwarze oder blaue Pfeile gekennzeichnet. Schwarze Pfeile kennzeichnen einen Datenfluss oder Austausch von Daten und Verarbeitungsergebnissen, blaue Pfeile kennzeichnen gemeinsam bearbeitete Fragestellung und einen thematischen Erkenntnisgewinn.

- Simulierte Sensordaten und die entsprechenden (idealen fehlerfreien) Referenzdaten bilden eine frei parametrierbare Entwicklungs- und Testumgebung für die Algorithmenentwicklung im Teilprojekt **2D 3D Proc**. Die Modellbildung und Analyse des Bildgebungsprozesses erfolgt gemeinsam.
- Die in **MultiCam** entwickelten Kamerakonfiguration können in **PMD-Sim** simuliert werden. Simulierte Rohdaten können zu Testzwecken wieder in die Entwicklungsumgebung von **MultiCAM** zurückgespeist werden (Simulation in the loop). Umgekehrt ist die Einspeisung realer 2D/3D-Daten in die Simulationsumgebung möglich (Hardware in the loop). Die Erkenntnisse aus der Verarbeitung der simulierten Daten können in die Hardware-Optimierung einfließen. Der Erkenntnisfortschritt im Teilprojekt **MultiCAM** wird die Modellbildung für die Simulation wesentlich beeinflussen.
- Der in **PMD-Sim** entwickelte Simulator soll bei der Entwicklung von real nutzbaren THz-Systemen von **3D THz** Unterstützung mit Simulationen bieten.
- Die in **PMD-Sim** erzeugten 2D/3D Simulations- und Referenzdaten können darüberhinaus jedem Verarbeitungsteilprojekt anstelle realer Sensordaten zur Verfügung gestellt werden.

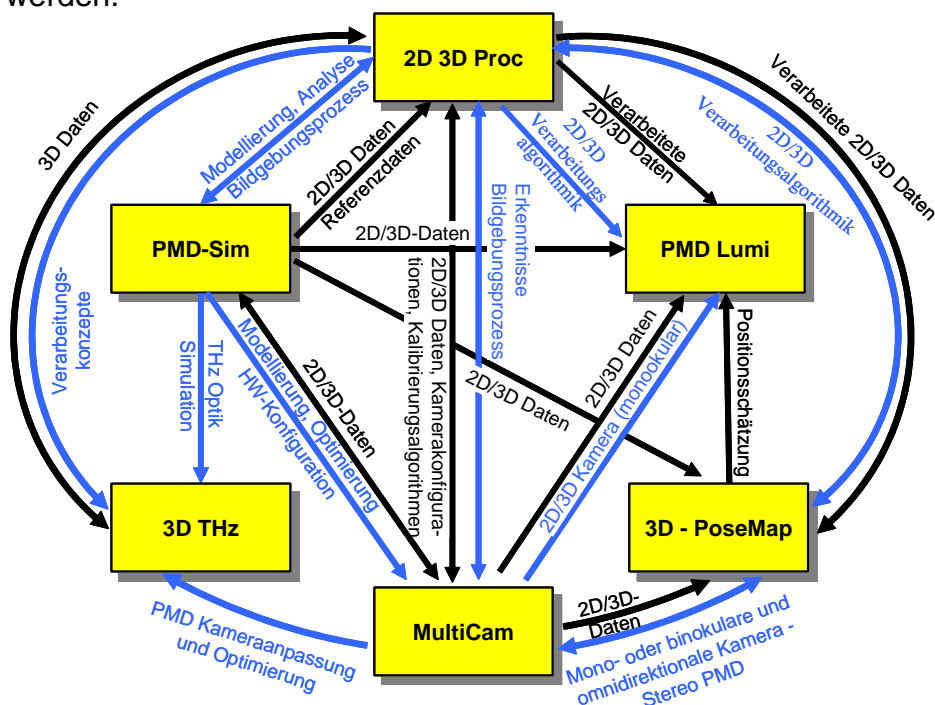


Abbildung 5-1: Funktionales und thematisches Zusammenwirken der Teilanträge

5.1 Zusammensetzung der Arbeitsgruppe

1. Prof. Dr.-Ing. habil. O. Loffeld, Stellvertretender Vorsitzender des ZESS, Sprecher des IPP Multi Sensorics, Projektbereichsleiter PB2 im ZESS

2. Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb, Universitätsprofessor, Zentrum für Sensorsysteme, Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme
3. Dipl.-Ing. Valerij Peters, PB2, ZESS (beantragt)
4. NN (50%, beantragt)
5. M. Sc. Anthony Amankwah, IPP Multi Sensorics, ZESS (Koregistrierung, SAR)
6. Dipl.-Ing. Marc Kalkuhl, IPP Multi Sensorics (Simulationstechnik)
7. M.Sc. Seyed Ghobadi, IPP Multi Sensorics (PMD/CMOS Systemtechnik)
8. M.Sc. T.D. Arun Prasad, IPP Multi Sensorics (PMD/CMOS Systemtechnik)
9. Dipl.-Ing. Omar Löprrich, IPP Multi Sensorics (Distributed 2D/3D Processing)
10. M.Sc. Koba Natroshvili, IPP Multi Sensorics (Bistatic SAR)

5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern

- Prof. Dr. Wolfgang Wiechert, Forschungszentrum für Multidisziplinäre Analysen und Angewandte Systemoptimierung (FOMAAS), Siegen
- Dr. Thorsten Ringbeck, PMDTechnologies, Siegen
- Dr. Robert Lange, PMDTechnologies, Siegen
- Dr. Wolfgang Weihs, Zentrum für Sensorsysteme
- Dr. Klaus Hartmann, Zentrum für Sensorsysteme

5.3 Arbeiten im Ausland und Kooperationen mit ausländischen Partnern

Center for Sensor Signal and Information Processing, Adelaide, Australien, Prof. Douglas Gray, Guest Lecturer im IPP Oktober 2006

5.4 Apparative Ausstattung

Der Projektbereich 2 des ZESS und das IPP bringen neben den räumlichen Voraussetzungen, die für ein solches Projekt erforderlich sind, auch seine gesamte Rechnerausrüstung, die allerdings auch in anderen Vorhaben benötigt wird, in das Vorhaben ein:

- 2 DEC alpha Professional Workstations XP1000 (667 MHz, 1,5 GByte RAM) mit TrueUnix64, ca. 1 TByte Hintergrundspeicher, Zugang über Cygwin X-Window Clients
- Diverse PCs (> 40) im heterogenen Netzwerk (Windows XP, Novel Netware), z.B. Dell Workstation PWS 530, 2*Intel Xeon Prozessoren 2,2 GHz, 2,0 GByte RAM.
- 2 Novel Network Server (Dell 1,7 GHz)
- Kopplungen durch NFS (Unix) und SAMBA-Server (Unix↔Windows)
- Verschiedene Compiler u. Softwarepakete als Programmier- Datenanalyse- und -Visualisierungsumgebung (z.B. IDL, C++)

5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben

ZESS wird die laufenden Mittel mit je 5.000 €/Jahr unterstützen.

6 Erklärungen

6.1 „Es bestehen keine thematischen Zusammenhänge zwischen dem Vorhaben und Arbeiten eines am Ort befindlichen Sonderforschungsbereiches.“

6 Erklärungen

6.1 „Es bestehen keine thematischen Zusammenhänge zwischen dem Vorhaben und Arbeiten eines am Ort befindlichen Sonderforschungsbereiches.“

6.2 „Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn wir einen solchen Antrag stellen, werden wir die Deutsche Forschungsgemeinschaft unverzüglich benachrichtigen.“

7 Unterschriften



- Prof. Dr.-Ing. habil. O. Loffeld -



- Prof. Dr.-Ing. A. Kolb -

8 Verzeichnis der Anlagen

- Kurzprofile der Antragsteller Prof. Loffeld und Prof. Kolb
- Personalfragebogen für wissenschaftliche Mitarbeiter
- Einführender Artikel zum Photonic Mixer Device, PMD: H. Kraft, J. Frey, T. Moeller, M. Albrecht, M. Grothof, B. Schink, H. Hess and B. Buxbaum: "3D-Camera of High 3D-Frame Rate, Depth-Resolution and Background Light Elimination Based on Improved PMD (Photonic Mixer Device)-Technologies", OPTO, Nürnberg, Mai 2004.
- Kurzprofil des Zentrums für Sensorsysteme (ZESS) als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Siegen
- IPP-Broschüre des DAAD
- Zwei Angebote vom 7.09.2005 für wissenschaftliche Geräte über 10.000,- €