

3D-Poseschätzung und 3D-Mapping mittels PMD-Kamera (3DPoseMap)



Prof. Dr.-Ing.
Reinhard Koch

Multimediale Systeme
zur Informationsverarbeitung (MIP),
Institut für Informatik

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Olshausenstr. 40
24098 Kiel



Prof. Dr.-Ing.
Hubert Roth

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)
und
Institut für Regelungs-
und Steuerungstechnik
(RST)

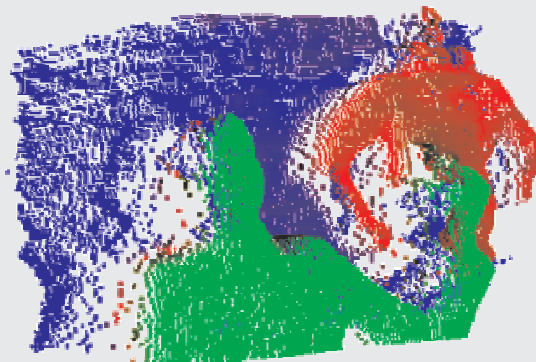
Universität Siegen
Hölderlinstr. 3
57068 Siegen

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 Arbeitsrichtung	2
1.5	Voraussichtliche 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	3
2.1.1	Poseschätzung, Umgebungsmodellierung und SLAM	4
2.1.2	Poseschätzung und Umgebungsmodellierung mittels SfM	4
2.1.3	Binokular-Stereo	5
2.2	Eigene Vorarbeiten	7
2.2.1	Antragsteller 1: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Koch, Universität Kiel	7
2.2.2	Antragsteller 2: Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth, Universität Siegen	9
3	Ziele und Arbeitsprogramm	13
3.1	Ziele	13
3.2	Arbeitsprogramm	14
3.2.1	PI1: Transfer von SfM auf die AMR-Testplattform MOSRO.	14
3.2.2	PR1: Erweiterung der AMR-Testplattform MOSRO zur Einbindung von SfM.	15
3.2.3	PK1: SfM unter Einbeziehung von 3D-Daten aus einer PMD-Kamera.	16
3.2.4	PK2: Vergleich von 3D-Daten der PMD-Kamera mit 3D-Daten eines Stereokopfes und Einbeziehung in SfM.	17
3.2.5	PI2: Nutzung des 3D-Umgebungsmodells zur Kartengenerierung.	17
3.2.6	PR2: Erstellung einer 3D-Umgebungskarte mithilfe des SfM-Verfahrens und einer 2D/3D-Kamera.	18
3.2.7	PK3: Detektion und Verfolgung starrer bewegter Objekte.	18
3.2.8	PR3: Registrierung der aktuellen Position und Orientierung eines Fahrzeugs anhand der generierten 3D-Umgebungskarte.	19
3.2.9	PI3: Nutzung der erkannten Bewegungen für Kartierung und Navigation.	19
3.2.10	PK4: Detektion und Verfolgung sich deformierender bewegter Objekte.	19
3.2.11	PR4: Navigation eines teilautonomen Fahrzeugs anhand der generierten 3D-Umgebungskarte.	20
3.2.12	PR5: Einbeziehung und Klassifizierung von bewegten Objekten bei der 3D-Umgebungsmodellierung und der Hindernisvermeidung	21
3.2.13	PK5: Nutzung der Objektverfolgung zum Tracken von menschlichen Körpern mit Anwendungen in der Medizin.	21
3.2.14	Zeitliche Einordnung der Aufgaben	21

3.3	Untersuchungen am Menschen	22
3.4	Tierversuche	22
3.5	Gentechnologische Experimente	22
4	Beantragte Mittel	23
4.1	Personalkosten	23
4.2	Wissenschaftliche Geräte	23
4.2.1	Begründung des Bedarfs	23
4.3	Verbrauchsmaterial	24
4.4	Reisen	24
4.5	Publikationskosten	25
4.6	Sonstige Kosten	25
5	Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens	25
5.1	Zusammensetzung der Arbeitsgruppen	27
5.2	Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern	27
5.3	Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern	28
5.4	Apparative Ausstattung	28
5.5	Laufende Mittel für Sachausgaben	29
5.6	Sonstige Voraussetzungen	29
6	Erklärungen	29
6.1	Max-Planck-Institut	29
7	Unterschriften	30
8	Verzeichnis der Anlagen	30

1 Allgemeine Angaben

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe
Neuantrag

1.1 Antragsteller

Antragsteller 1:

Reinhard Koch, Dr.-Ing., Universitätsprofessor (C3)
Arbeitsgruppe Multimediale Systeme zur Informationsverarbeitung (MIP)
(www.mip.informatik.uni-kiel.de),
Institut für Informatik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
geb. 22.9.1958, Deutscher

Dienstadresse:

Olshausenstr. 40

D-24098 Kiel

Tel.: 0431/880-4484

rk@mip.informatik.uni-kiel.de

Privatadresse:

Domänenweg 3

D-24119 Kronshagen

Tel.: 0431/3053736

Antragsteller 2:

Hubert Roth, Dr.-Ing., Universitätsprofessor (C4)
Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik (RST) (www.uni-siegen.de/rst),
Universität Siegen
geb. 21.03.1954, Deutscher

Dienstadresse:

Hölderlinstr. 3

D-57068 Siegen

Tel. : 0271/740-4439

hubert.roth@uni-siegen.de

Privatadresse:

Meretsreute 5

D-88273 Fronhofen

Tel.: 07505/9191

1.2 Thema

3D-Poseschätzung und 3D-Mapping mittels PMD-Kamera

1.3 Kennwort

3D-PoseMap

1.4 Fachgebiet und Arbeitsrichtung

Informatik, 3D-Bildverarbeitung

1.5 Voraussichtliche Gesamtdauer

4 Jahre

1.6 Antragszeitraum

24 Monate

1.7 Gewünschter Beginn der Förderung

01.01.2006

1.8 Zusammenfassung

In Echtzeit durchgeführte Positions- und Orientierungsschätzung (=Poseschätzung) einer 2D-Kamera ist Basis für zahlreiche Anwendungen im Bereich der Computer Vision. Für dieses Problem existieren bereits diverse Lösungen, die aber in Genauigkeit und Stabilität der Schätzung für viele Anwendungen nicht ausreichend sind. Zur Stabilisierung des Poseschätzproblems soll hier zusätzlich zu der 2D-Kamera eine neu entwickelte PMD-Kamera eingesetzt werden (s. Abbildung 1). Sie liefert gleichzeitig 2D-Grauwertbilddaten und 3D-Tiefendaten der Umgebung. Die auf diese Weise erzeugten Posedaten sollen genutzt werden, um die eigenständige Registrierung und Navigation eines Fahrzeuges in einer unbekanntem Umgebung zu realisieren. Die Posedaten werden dazu mit den Daten weiterer Sensoren (z.B. Odometer, Inclinometer) fusioniert und es wird eine 3D-Umgebungskarte erstellt, die eine konkrete Pfadplanung ermöglicht.

Simultan soll eine Detektion und Verfolgung sowohl starrer als auch sich deformierender bewegter Objekte realisiert werden. Diese Informationen sollen zur Navigation und Kollisionsvermeidung und im weiteren Verlauf des Projektes zum Motion-Capture, dem Tracken der Gestik von Menschen, genutzt werden.

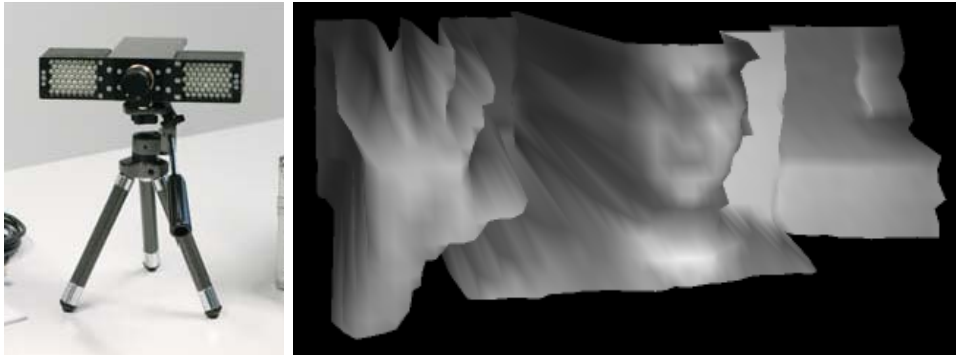


Abbildung 1: Die PMD-Kamera mit zwei symmetrisch angeordneten LED-Matrizen zur modulierten Beleuchtung (links) und deren 3D-Tiefenbild mit 64x16 Pixel (rechts).

2 Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

2.1 Stand der Forschung

Die Anwendungen in Echtzeit durchgeführter Positions- und Orientierungsschätzung (=Poseschätzung) und Umgebungsmodellierung sind vielfältig. Im Automotiv-Bereich stellt sie die Grundlage für autonom arbeitende Sicherheitssysteme eines Fahrzeugs dar. In der Augmented Reality (erweiterten Realität) wird sie genutzt, um Bilddaten mit rechnergenerierten 3D-Modellen passgenau zu überlagern. In der industriellen Handhabungsrobotik und mobilen Robotik ist sie Voraussetzung, um Handlungen und Dienstleistungen autonom ausführen zu können.

Umgebungsmodellierung setzt die Kenntnis der eigenen Pose voraus, auch wenn diese sich stetig durch die Eigenbewegung ändert. Bei der Poseschätzung z.B. eines frei bewegten Fahrzeuges, auch Lokalisierung bzw. Selbstlokalisierung genannt, gilt es, kontinuierlich dessen eigene Pose innerhalb der zu modellierenden Umgebung zu bestimmen.

Die Schätzung der 3D-Pose einer frei bewegten oder auf einem Fahrzeug fixierten Videokamera in 6 statischen $(x, y, z, \phi_x, \phi_y, \phi_z)$ oder dynamischen $(v_x, v_y, v_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$ Freiheitsgraden (6 DoF) bei gleichzeitiger Umgebungsmodellierung wurde in den letzten Jahren eingehend untersucht und erforscht. Die aktuellen Systeme erzielen eine gute Schätzung der Kamerabewegung über einen längeren Zeitraum, oft sogar in Echtzeit mit bis zu 30 Bildern pro Sekunde [2][3][11].

In der Robotik hat sich hierzu der Begriff SLAM (Simultaneous Localization and Map Building) etabliert, dort wird Poseschätzung mit verschiedenen Sensoren, wie z.B. Odometrie, Ultraschall, 2D-Laserscanner, usw. durchgeführt [21][9][20]. Dieser Ansatz wurde kürzlich auch durch visuelles Tracking erweitert [2]. In der Computer Vision firmiert die Positions-, Orientierungsschätzung und Umgebungsmodellierung aus 2D-Bilddaten seit einigen Jahren unter der Bezeichnung Structure from Motion (SfM)[10]. Auch dieser Ansatz wurde schon früh für die Fahrzeugnavigation und Pfadplanung eingesetzt [1]. Beide Ansätze haben große Gemeinsamkeiten.

2.1.1 Poseschätzung, Umgebungsmodellierung und SLAM

Der Prozess der fortlaufenden Pose- bzw. Positions- und Orientierungsschätzung bei gleichzeitiger Generierung einer Umgebungskarte beschreibt den sog. SLAM Vorgang. Im SLAM-Verfahren wurden bisher eine Vielzahl von Sensoren in Kombination eingesetzt, so z.B. Odometer, Inklinometer, Gyroskop, Inertial-Sensoren, Kompass, 2D-, 3D-Laserscanner, Ultraschall, Radio- und Mikrowellen und nicht zuletzt die 2D-Kamera.

Viele Lösungsansätze arbeiten mit einem 2D-Laserscanner [6][7][5][4] in Verbindung mit Odometrie innerhalb eines 2D-Areals [13][19]. Dieser Laserscanner kann jedoch die zu modellierende Umgebung lediglich in einer einzelnen Ebene erfassen, d.h. es liegen damit nur 2D-Distanzdaten einer bestimmten Ebene der Umgebung vor. Aus der Folge der jeweiligen 2D-Einzelaufnahmen können kontinuierlich die Laserscannerposition und -orientierung errechnet werden. Gleichzeitig wird die jeweilige 2D-Einzelaufnahme datenreduziert und kontinuierlich in eine 2D-Karte eingepasst.

Beim 2D-Laserscanner wird ein einzelner Laserstrahl über einen mechanisch bewegten Spiegel periodisch abgelenkt. Durch zusätzliche mechanische Schwenk- bzw. Nickbewegungen des gesamten Laserscannersystems können mehrere Ebenen der Umgebung erfasst werden, so dass diese nun in 3D-Distanzdaten vorliegt [18]. Aufgrund der mechanischen Ablenkbewegungen benötigt jedoch die Erfassung eines einzelnen 3D-Bildes bei z.B. einem Scanwinkelbereich von $150^\circ \times 90^\circ$ und je nach Auflösung zwischen 4 und 12 Sekunden.

Dennoch konnte mit dieser relativ langsamen Technik erste Ansätze eines sog. 6D-SLAM unter Einbeziehung der o.g. 6 Freiheitsgraden realisiert werden. Auf der Basis des sog. HAYAI(Highspeed And Yet Accurate Indoor/Outdoor-tracking)-Algorithmus [14] wurden die jeweiligen Aufnahmen des 3D-Laserscanners zu einer 3D-Umgebungskarte zusammengesetzt. 6D-SLAM bezeichnet also die Berechnung der 6D-Poseänderung bei gleichzeitiger Generierung eines 3D-Umgebungsmodells.

2.1.2 Poseschätzung und Umgebungsmodellierung mittels SfM

Der aus der Computer-Vision stammende Structure-from-Motion-Ansatz (SfM) beschränkt sich bei der Schätzung der 6 DoF-Pose und der Umgebungsmodellierung auf die Auswertung des Bildstroms einer bewegten 2D-Kamera innerhalb einer starren Szene.

Die Poseschätzung im SfM-Ansatz lässt sich in zwei Schritte unterteilen: das Verfolgen von 2D-Merkmalen im untersuchten Bildstrom sowie die 3D-Geometrieschätzung aus den Informationen über korrespondierende Merkmale in aufeinander folgenden Bildern. Im Folgenden soll in einem kurzen Überblick die Funktionsweise von SfM dargestellt werden, reale Implementierungen gehen oft darüber hinaus, um die benötigte Robustheit und Genauigkeit erzielen zu können.

- **2D-Merkmalverfolgung:** In den Bildern einer Kamera werden gut identifizierbare 3D-Merkmale gesucht und ihre Positionsänderung wird von Bild zu Bild verfolgt, z.B.

mit dem KLT-Operator [16]. Hierbei ist es wichtig, die Merkmale möglichst genau zu lokalisieren, damit die zugrunde liegende Geometrie korrekt geschätzt werden kann.

- **3D-Initialisierung:** In den ersten beiden Bildern werden die 2D-Merkmalsskorrespondenzen dazu genutzt, die relative Pose der aufnehmenden Kamera aus der 2-Bild-Epipolargeometrie zu schätzen. Relativ heißt hier, dass die Orientierungsänderung und die Bewegungsrichtung der Kamera korrekt ermittelt werden und die Entfernung der Kamerazentren die Einheitsentfernung im Koordinatensystem definiert. Alle weiteren Kameraposen können nur relativ zu dem so definierten Koordinatensystem geschätzt werden. Die geschätzten Kameraposen werden genutzt, um 3D-Punkte aus den 2D-Korrespondenzen zu triangulieren.
- **3D-Merkmalschätzung und Positionsbestimmung:** Für alle weiteren Bilder können nun Korrespondenzen aus 2D-Punkten in den Bildern und bekannten 3D-Punkten genutzt werden, um die aktuelle Kamerapose zu bestimmen. Dabei werden die 3D-Punktpositionen immer weiter verbessert. Für verlorene Tracks werden kontinuierlich neue etabliert und neue 3D-Punkte erzeugt. Robustheit wird z.B. durch eine robuste statistische Evaluierung der geschätzten Pose aus den Positionen der verfolgten Merkmale mittels RANdom SAMpling Consensus (RANSAC)[10] erreicht.
- **Einschränkungen und Probleme:** Bei Beschränkung auf rein visuelle Sensorik ist die Referenzierung der Pose in einem absoluten metrischen Koordinatensystem bisher ungelöst, alle Kamerapositionen können ausschließlich mit einer unbekanntem relativen Skalierung bestimmt werden (Maßstabsproblem).

Problematisch ist auch eine auftretende Drift des geschätzten Kamerapfades gegenüber der tatsächlichen Kamerabewegung. Ein wesentlicher Grund für diese Drift ist eine ungenaue Schätzung der Objektkoordinaten in Kamerablickrichtung. Aufgrund der zunächst geringen Kamerabewegung liefert die Punkttriangulierung in dieser Richtung oft große Fehler.

Ein weiterer Grund für diese Drift ist die Annahme, dass alle verfolgten 3D-Raumpunkte „planare Features“ darstellen, d.h. auf einer Ebene liegen und aus allen auftretenden Blickwinkeln eine lediglich affin verzerrte Geometrie aufweisen. Dreidimensionale Ecken können eine ungenaue Positionsschätzung erzeugen, da aus unterschiedlichen Ansichten oft ein leicht verschobener 3D-Raumpunkt verfolgt wird.

Zudem gehen alle diese Systeme von statischen Szenen aus und erzeugen Schätzfehler, sobald sich Teile der Szene bewegen. Die Messungen bewegter Objekte können zwar durch oben erwähnte robuste statistische Verfahren aufwändig als Fehlmessungen klassifiziert werden, Bewegung in größeren Bildregionen beeinträchtigen die Messgenauigkeit aber stark.

2.1.3 Binokular-Stereo

Einige der in Abschnitt 2.1.2 angesprochenen Einschränkungen und Probleme lassen sich lösen, indem 3D-Daten einer Stereotiefenschätzung hinzugezogen werden, um die Poseschätzung zu verbessern. Die stereoskopische Tiefenschätzung versucht, aus den Bildern

zweier zueinander kalibrierter 2D-Kameras eine dichte Tiefenkarte, d.h. für jeden Punkt der Bilder die Tiefe, zu schätzen. Dazu wird i.A. versucht, Korrespondenzen in den Bildern zu finden und diese zur Schätzung zu nutzen. Durch die Kalibrierung wird das Skalierungsproblem gelöst, und die zeitlich synchrone Bildaufnahme erlaubt die Auswertung von nicht starren Szenen.

Da die Algorithmen auf 2D-Bildern arbeiten, haben die Tiefenkarten eine hohe Winkelauflösung und liefern besonders an Helligkeitssprüngen Daten, die im Nahbereich mit nur geringen Fehlern behaftet sind [12].

Problematisch ist aber, dass die stereoskopische Tiefenschätzung nur auf inhomogenen visuellen Strukturen gute Ergebnisse liefert. Homogene oder periodische Strukturen liefern keine oder falsche Korrespondenzen und führen damit zu Fehlern in den Tiefenkarten [8]. Zudem reicht die Geschwindigkeit existierender Algorithmen nur bedingt an die für die Navigation benötigte Echtzeitfähigkeit heran [15] und die von den momentan verfügbaren Echtzeit-Stereosystemen [17] erzeugten Tiefenkarten sind oft nicht dicht genug für eine exakte Umgebungsmodellierung.

Literatur zum Stand der Forschung

- [1] P.A. Beardsley, A. Zisserman, and D.W. Murray. Sequential updating of projective and affine structure from motion. In *International Journal of Computer Vision*, vol. 23, pages 235–259, 1997.
- [2] A. J. Davison. Real-time simultaneous localisation and mapping with a single camera. In *Proceedings International Conference Computer Vision, Nice*, 2003.
- [3] A. J. Davison, Y. González Cid, and N. Kita. Real-time 3D SLAM with wide-angle vision. In *Proc. IFAC Symp. on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisbon*, July 2004.
- [4] Laserscanner der Fa. IBEO Automobile Sensor GmbH. Hamburg. www.ibeo-as.de.
- [5] Laserscanner der Fa. Schmersal Holding KG. Wuppertal. www.schmersal.de.
- [6] Laserscanner der Fa. Sick AG. Waldkirch. www.sick.de.
- [7] Laserscanner der Fa. Zoller + Fröhlich GmbH. Wangen. www.zf-laser.com.
- [8] L. Falkenhagen. Depth estimation from stereoscopic image pairs assuming piecewise continuous surfaces. In *Proc. of European Workshop on combined Real and Synthetic Image Processing for Broadcast and Video Production*, Hamburg, Germany, November 1994.
- [9] B. Graf, R. Schraft, and J. Neugebauer. A mobile robot platform for assistance and entertainment. In *Proceedings of ISR*, pages 252–253, 2000.
- [10] R. I. Hartley and A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, ISBN: 0521540518, second edition, 2004.
- [11] R. Koch, K. Koeser, B. Streckel, and J.-F. Evers-Senne. Markerless image-based 3d tracking for real-time augmented reality applications. In *Proc. WIAMIS*, Montreux, Switzerland, Apr. 2005.
- [12] R. Koch, M. Pollefeys, and L. Van Gool. Multi viewpoint stereo from uncalibrated video sequences. In *Proc. ECCV'98*, volume 1 of LNCS, pages 55 – 71, Freiburg, 1998. Springer-Verlag.
- [13] J. Kollmann and T. Röfer. Kartenaufbau mit einem 180°-laser-entfernungssensor. In *Autonome Mobile Systeme*, pages 121–128. Springer, 2000.
- [14] A. Nüchter, K. Lingemann, J. Hertzberg, H. Surmann, K. Pervözl, M. Hennig, K. R. Tiruchinapalli, R. Worst, and T. Christaller. Mapping of rescue environments with kurt3d. In *Proceedings of the International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR '05)*, Kobe, Japan, 2005.
- [15] D. Scharstein, R. Szeliski, and R. Zabih. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. In *Proceedings of IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision*, Kauai, HI, December 2001.

- [16] J. Shi and C. Tomasi. Good features to track. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 593–600, Seattle, June 1994. IEEE.
- [17] Fridtjof Stein. Efficient computation of optical flow using the census transform. In *DAGM-Symposium*, pages 79–86, 2004.
- [18] H. Surmann, K. Lingemann, A. Nüchter, and J. Hertzberg. Aufbau eines 3d-laserscanners für autonome mobile roboter. *GMD Report 126*, 2001.
- [19] H. Surmann, A. Nüchter, and J. Hertzberg. An autonomous mobile robot with a 3d laser range finder for 3d exploration and digitalization of indoor environments. *Robotics and Autonomous Systems*, 45:181–198, 2003.
- [20] T. Rupp T and P. Levi. Globale lokalisation mobiler roboter mit natürlichen landmarken in dynamischen umgebungen. In *Autonome Mobile Systeme*, pages 128–137. Springer, 1999.
- [21] S. Thrun. Robotic mapping: A survey. *Carnegie Mellon University, Technical Report CMU-CS-02-111*, Feb. 2002.

2.2 Eigene Vorarbeiten

2.2.1 Antragsteller 1: Prof. Dr.-Ing. Reinhard Koch, Universität Kiel

Der Antragsteller ist seit 16 Jahren auf dem Gebiet der computerbasierten Bildverarbeitung, 3D-Rekonstruktion und Visualisierung von 3D-Modellen tätig. Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt ist dabei die Echtzeit-Poseschätzung einer frei bewegten Videokamera durch Bestimmung der Kamerabewegung in allen 6 Freiheitsgraden [15][19][18]. Dabei wird gleichzeitig eine grobe Kartierung der Umgebung durch Speicherung und Wiedererkennung markanter Umgebungsmerkmale vorgenommen. Auf diesem Themengebiet wurden umfangreiche Vorarbeiten geleistet, auch im Rahmen von Drittmittelprojekten, die erfolgreich bearbeitet wurden und werden:

- Im EU-Projekt ORIGAMI (IST-2000-28436, 2000-2004) wurden Multikamera-Systeme zum 3D-Tracking und zur 3D-Hintergrundmodellierung mittels SfM und Mehrbild-Stereo entwickelt [1].
- Im EU-Projekt VANGUARD (AC074, 1995-1999) wurden sehr erfolgreich die SfM-Verfahren zur 3D-Umgebungsmodellierung aus frei bewegten, unkalibrierten Kamerabildern entwickelt [19].
- Das EU-Projekt MATRIS (IST-FP6, 2004-2007) entwickelt eine bildbasierte Echtzeit-Kameraverfolgung zur 3D-Überlagerung virtueller Objekte in TV-Studioanwendungen (Augmented Reality) [6].
- Im BMBF-Projekt ARTESAS (2004-2006) wird als Weiterentwicklung des Leitprojektes ARVIKA ein Prototyp zur markerlosen bildbasierten Echtzeitverfolgung für Augmented Reality im industriellen Umfeld entwickelt [2].

In den genannten Projekten wurde der Antragsteller als Spezialist für das Tracking von Kamerabewegungen und der Erstellung von 3D-Umgebungsbeschreibungen herangezogen. Speziell untersuchte Themen sind die Einbeziehung von Inertial-Sensoren, Kameraarrays [12]

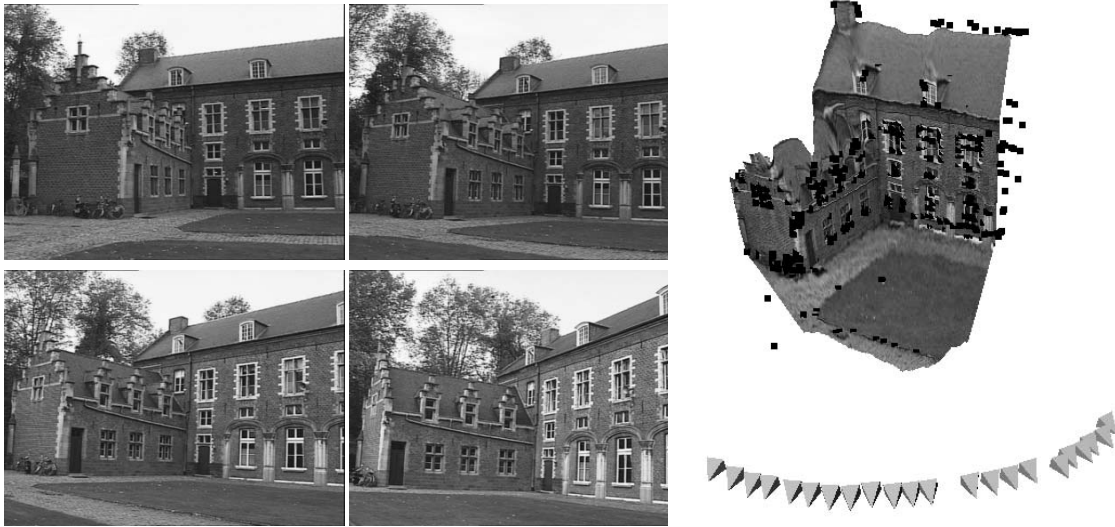


Abbildung 2: Links: 4 von 22 zur Rekonstruktion verwendeten Bildern. Rechts: Das rekonstruierte 3D-Modell mit 3D-Punkten (schwarz) und geschätztem Kamerapfad (Pyramiden).

oder Weitwinkel- bzw. sphärische Kameraobjektive [26][25] zur Stabilisierung des Kameratrackings. Im Rahmen der Projekte wurde von der Arbeitsgruppe eine Anwendung zur Kameraposeschätzung mittels 2D-Kamera und Inertialsensor in Echtzeit (30 Bilder pro Sekunde auf einem 3GHz PC) entwickelt [14]. Sie erzielt bereits eine gute Robustheit und kann Kamerabewegungen über einige Minuten verfolgen und schätzen, allerdings nur relativ zu einer unbekanntem Skalierung (vgl. Abschnitt 2.1).

Weiterhin existieren Vorarbeiten auf dem Gebiet der Stereo-Tiefenschätzung. So werden mittels Stereobildverarbeitung dichte Tiefenkarten generiert. Hierbei wurde besonderes die Echtzeitverarbeitung erforscht, 3D-Tiefenkarten können mittlerweile mit 5 Frames pro Sekunde in einem guten Detaillierungsgrad erzeugt werden [32][31]. Zur Steigerung der Geschwindigkeit und der Qualität der Tiefenkarten werden die 3D-Punkte aus dem Kameratracking als Zusatzinformation genutzt [13][24]. Abbildung 2 zeigt ein aus einer 22 Einzelbildern rekonstruiertes 3D-Modell, dargestellt sind auch die 3D-Punkte und der geschätzte Kamerapfad.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Detektion unabhängig bewegter Objekte aus dem Bildstrom einer bewegten Kamera, mit dem Ziel der Kollisionsvermeidung. Hierzu wurde im BMBF-Projekt INVENT [3] (als Subcontractor für DaimlerChrysler, 2002-2004) ein System zur automatischen bildbasierten Detektion bewegter Objekte im Kreuzungsbereich entwickelt [29][30][28].

Ebenso wird die Objekt- und Poseerkennung sich bewegender Objekte untersucht. Gegenstand ist sowohl die Bewegung kinematischer Objekte, die in sich starr sind und sich in der Szene bewegen, als auch die Bewegung von Objekten, die sich an ein Modell aus kinematischen Ketten anpassen lassen und sich im Rahmen des Modells deformieren und bewegen. Derzeit wird ein unbewegtes Stereokamerasetup verwendet, um die Tiefe zu schätzen. An die gewonnene Tiefeninformation wird das bekannte Modell eines Menschen angepasst [11][10].

Poseschätzung von Menschen wird oft auch als „Motion Capture“ bezeichnet, Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der Anpassung.

Es ist ein Simulator vorhanden, der es ermöglicht, 2D-3D-Kameradaten zu generieren. Damit können zu Beginn des Projektes einige 2D-3D-Testsequenzen erstellt werden, die ein kalibriertes synchrones Video-PMD-Kamera paar simulieren und für die exakte Posedaten bekannt sind. Diese Sequenzen sollen auch zur Untersuchung der erreichten Qualität der Poseschätzung genutzt werden.

Zudem ist ein Labor vorhanden, in dem großflächige 3D-Projektionen mit 4 Projektoren möglich sind. Hier kann eine dreidimensionale Visualisierung von fusionierten 2D/3D-Daten erfolgen, oder es kann ein beliebiges 3D-Modell interaktiv betrachtet werden [8][9]. Gleichzeitig kann im Labor die Pose der betrachteten Person erfasst werden.

2.2.2 Antragsteller 2: Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth, Universität Siegen

Auf dem Gebiet der computerbasierten Bildverarbeitung wird am Institut RST in verschiedenen Bereichen der Robotik gearbeitet.

Medizin-Robotik: Im Rahmen des DFG-Projekts MODICAS [4] dient ein Handhabungsroboter zur Unterstützung bei der Hüftprothesen-Implantation. Mittels Stereo-Kamerasystem und geeigneter Bildverarbeitung gilt es, die genaue Position und Lage eines Patienten in Echtzeit zu bestimmen. Diese Daten werden zur schnellen Nachführungsregelung des Handhabungsroboters entsprechend der Lage des Patienten genutzt.

Autonome Mobile Robotik (AMR): Hierzu wurden verschiedene Roboter aufgebaut bzw. eingekauft, die sowohl im strukturierten 2D- und unstrukturierten 3D-Indoor-Areal,

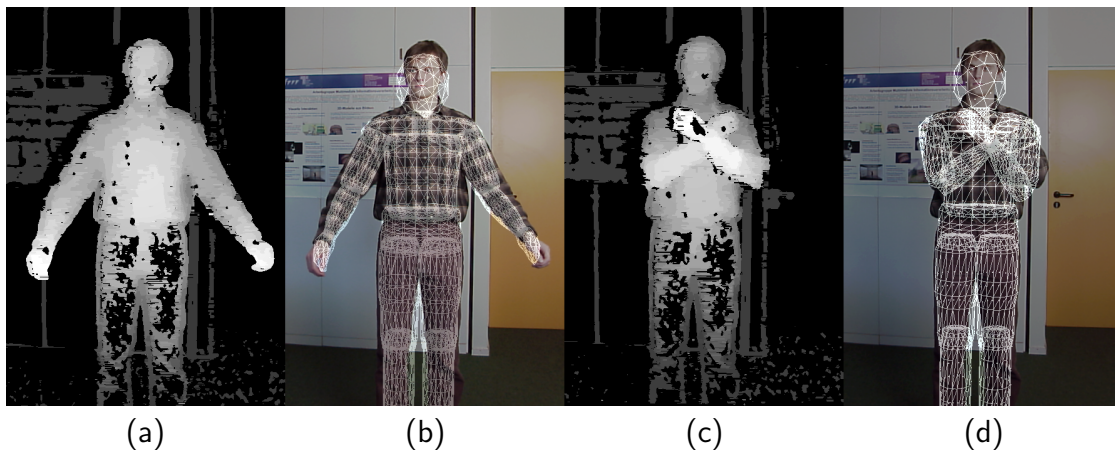


Abbildung 3: Motion Capture in der Arbeitsgruppe Koch. (a)+(c): Stereoskopische Tiefendaten, (b)+(d) Eingabebilder und überlagertes Menschmodell als Drahtgitter.

sowie im ungeordnetem 3D-Outdoor-Areal navigieren können. Mithilfe der Telemetrie sollen AMR ferngesteuert, teilautonom bis vollautonom agieren können.

Im Rahmen des jüngsten EU-Projekt PeLoTe [7][27] wurde ein Rettungssystem entwickelt, dass ein gemeinsames Team von Einsatzkräften und Rettungsrobotern unter der Leitung des Einsatzleiters bei der Suche nach Verletzten unterstützt. Kernthemen des Projekts waren Lokalisierungsmethoden für Mensch und Roboter, teilautonome mobile Roboter, kooperatives Planen, innovative Benutzerschnittstellen und Datenaustausch und -fusion. Im diesem Projekt wurde größten Wert auf die Zusammenarbeit mit potentiellen Nutzern gelegt, wie beispielsweise mit Feuerwehren und anderen Rettungsorganisationen.

AMR-Plattform MOSRO: Am Institut RST wird u. a. der mobile Roboter MOSRO eingesetzt, der von der Fa. Robowatch [16] als Bewachungsroboter konzipiert wurde (s. Abbildung 4(a)). MOSRO wurde als dreirädriges Fahrzeug aufgebaut, mit zwei Antriebsrädern und einem losen Nachlauftrad, und kann damit einfach und beliebig manövriert werden und sich z.B. auf der Stelle drehen. Ausgestattet mit zwei Rad-Encodern, mehreren akustischen und optischen Distanzsensoren, einem Microcontroller C167, einem Mini-Computer PC104, Wireless-LAN, u.v.m. verfügt der MOSRO über ausreichend geeignete Ausstattung, um in diesem Vorhaben als AMR-Plattform für ggf. mehrere PMD- und 2D-Kameras zu dienen. Darüber hinaus steht mit dem MOSRO und seiner Hardware-Architektur auch eine der weltweit größten Bibliotheken für Roboter-Software [20] zur Verfügung, deren Verwendung für dieses Vorhaben geprüft wird. Die Datenkommunikation ausgehend vom Microcontroller C167 vollzieht sich via RS232 zum Mini-Computer PC104 [22] innerhalb des mobilen Roboters. Über den PC104 und Wireless-LAN erhält der mobile Roboter eine LAN-Verbindung zum Internet. Der Benutzer bekommt mit einer Internet-Benutzerschnittstelle die Kontrolle über den mobilen Roboter.

Im frühen Stadium dieses Vorhabens soll zunächst die AMR-Plattform MOSRO zum Einsatz kommen. Später jedoch soll das sich noch im Aufbau befindliches mobiles Fahrzeug MERLIN eingesetzt werden, welches für den Einsatz innerhalb einer 3D-Umgebung besser geeignet ist (s. Abbildung 4(b)).

Standortbestimmung, Hinderniserkennung und -vermeidung mithilfe konventioneller Sensoren: In den am Institut RST aufgebauten und getesteten AMR kommen zahlreiche konventionelle Sensoren zur Standortbestimmung, Hinderniserkennung und -vermeidung zum Einsatz. Es werden Rad-Encoder als Odometer, Gyroskop, Inklinometer und magnetischer Kompass mithilfe von Extended Kalman Filtern (EKF) für die Standortbestimmung verwendet. Des Weiteren werden akustische und optische Distanzsensoren sowie mechanische haptische Berührungssensoren für die Hinderniserkennung verwendet. Für die Auswertung aller Sensordaten und Ansteuerung der Aktorik (zwei Antriebsmotoren) dient der Microcontroller C167. Zur Hindernisvermeidung wurde die Fahrregelung auf der Basis eines Fuzzy-Logik-Reglers realisiert [5][17].

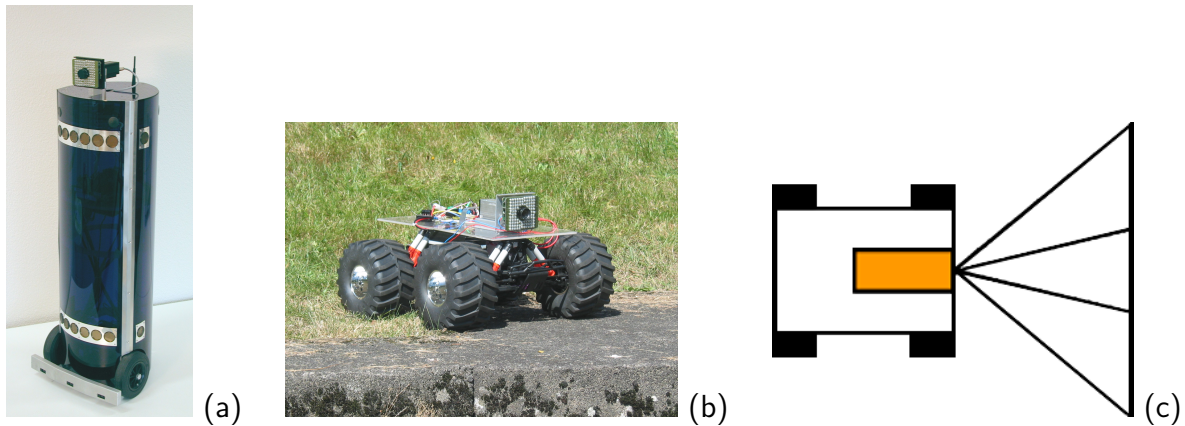


Abbildung 4: (a) AMR-Testplattform MOSRO mit 16×16 PMD-Kamera. (b) AMR-Testplattform MERLIN (Mobile Experimental Robot for Locomotion and Intelligent Navigation) mit 16×16 PMD-Kamera. (c) Mit MERLIN werden Hindernisse im linken, mittleren und rechten Sektor detektiert.

Visuelles 2D-Odometer auf der Basis einer 2D-Kamera: Zur Realisierung dieses Odometers wurde eine am Test-Roboter montierte 2D-Kamera senkrecht auf dessen Fahrweg gerichtet. Innerhalb eines ebenen 2D-Areals konnte mit entsprechender 2D-Bildverarbeitung der Bewegungsvektor des mobilen Roboters kontinuierlich in Echtzeit (20 fps) errechnet werden.

Hinderniserkennung und -vermeidung mithilfe der 16×16 PMD-Kamera: Eine PMD-Kamera wurde in Hauptfahrtrichtung eines Test-Roboters integriert. Mit einer 16×16 Pixel Auflösung liefert diese Kamera ein entsprechendes 16×16 Pixel Abstandprofilbild. Wegen der relativ geringen Auflösung bot sich an, die PMD-Kamera lediglich für die Hinderniserkennung zu benutzen. Daher wurde der Frontbereich des mobilen Roboters bzw. der Sichtbereich in drei Sektoren unterteilt, in 16×6 , 16×4 und 16×6 Pixel für den linken, mittleren und rechten Sektor (s. Abbildung 4(c)). In jedem Sektor wurde stets der jeweils kleinste Distanzwert ermittelt. Die so ermittelten drei Distanzwerte über den gesamten Sichtbereich wurden einer Fuzzy-Logic-Regelung zugeführt, zwecks Realisierung einer Hindernisvermeidung bzw. -umfahrung [23].

Standortbestimmung mithilfe der 16×16 PMD-Kamera anhand definierter Objekte (künstliche Landmarken): Innerhalb einer Roboterumgebung wurden künstliche Landmarken aufgestellt, d.h. bezüglich Geometrie, Position und Ausrichtung definierte Objekte. Mithilfe der auf dem Test-Roboter fixierten PMD-Kamera konnte die jeweilige Landmarke als solche erkannt, die Distanz zwischen Kamera und Objekt und deren perspektivische Ansicht ermittelt werden. Aus diesen Daten ließ sich nun der Standort des mobilen Roboters bestimmen [21].

Literatur zu den eigenen Vorarbeiten

- [1] G. Bazzoni, E. Bianchi, O. Grau, A. Knox, R. Koch, F. Lavagetto, A. Parkinson, F. Pedersini, A. Sarti, G. Thomas, and S. Tubaro. The ORIGAMI Project – advanced tools and techniques for high-end mixing and interaction between real and virtual conten. In *IEEE Proceedings of 1st International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission (3DPVT'02)*, 2002.
- [2] BMBF-Project. Artesas. www.artesas.de.
- [3] BMBF-Project. Invent. www.invent-online.de.
- [4] DFG-Projekt. Modicas (modular interactive computer assisted surgery). www.modicas.de.
- [5] D. Driankov, H. Hellendoorn, and M. Reinfrank. *An Introduction to Fuzzy Control*. Springer-Verlag, 1993.
- [6] EU-Project. Matris (ist-002013). www.ist-matris.org.
- [7] EU-Projekt. Pelote (building presence through localization for hybrid telematic systems). <http://www7.informatik.uni-wuerzburg.de/pelote>.
- [8] Jan-Friso Evers-Senne, Jan-Michael Frahm, Jan Woetzel, Felix Woelk, and Reinhard Koch. Distributed realtime interaction and visualisation system. In *Proc. of 7th International Workshop on Vision, Modeling and Visualization (VMV)*, Erlangen, Germany, Nov. 2002.
- [9] Jan-Michael Frahm, Jan-Friso Evers-Senne, and Reinhard Koch. Distributed interaction processing and visualization of 3d scenes in realtime. In *Proc. of 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis*, Rome, Italy, 2003.
- [10] B. Grest, J.M. Frahm, and R. Koch. A color similarity measure for robust shadow removal in real-time. In *Proc. VMV (to appear)*, Erlangen, Germany, Nov. 2005.
- [11] B. Grest, J. Woetzel, and R. Koch. Nonlinear body pose estimation from depth images. In *Proc. DAGM (to appear)*, Vienna, Austria, Aug. 2005.
- [12] R. Koch, J.M. Frahm, J.-F. Evers-Senne, and J. Woetzel. Pose estimation for multi-camera systems. In *Proc. DAGM*, Tübingen, Germany, Aug. 2004.
- [13] R. Koch, J.M. Frahm, J.F. Evers-Senne, and J. Woetzel. Plenoptic modeling of 3d scenes with a sensor-augmented multi-camera rig. In *Tyrrhenian International Workshop on Digital Communication (IWDC): proceedings*, Sept. 2002.
- [14] R. Koch, K. Koeser, B. Streckel, and J.-F. Evers-Senne. Markerless image-based 3d tracking for real-time augmented reality applications. In *Proc. WIAMIS*, Montreux, Switzerland, Apr. 2005.
- [15] Reinhard Koch and Jan-Michael Frahm. Tutorial: Visual-geometric 3d-scene reconstruction from uncalibrated image sequences. In *DAGM*, Munich, Germany, 2001.
- [16] Roboter MOSRO. Fa. robowatch technologies gmbh. www.robowatch.de.
- [17] Mini-Computer PC104. www.pc104.de.
- [18] M. Pollefeys, L. Van Gool, M. Vergauwen, F. Verbiest, K. Cornelis, J. Tops, and R. Koch. Visual modeling with a hand-held camera. *International Journal of Computer Vision*, 59(3):207–232, 2004.
- [19] Marc Pollefeys, Reinhard Koch, and Luc J. Van Gool. Self-calibration and metric reconstruction in spite of varying and unknown internal camera parameters. *International Journal of Computer Vision*, 32(1):7–25, 1999.
- [20] ActivMedia Robotics. Software, documentation and technical support. <http://robots.activmedia.com>.

- [21] H. Roth, R. Schwarte, N. Ruangpayoongsak, J. Kuhle, M. Albrecht, M. Grothof, and H. Heß. 3d vision based on pmd-technology for mobile robots. In *Proceedings SPIE Aerosense conference, Volume „Unmanned Ground Vehicle Technology“*, Orlando, Florida, Jul. 2003.
- [22] O. Rösch and C. Spilca. Autonomous guided vehicle with multiple sensors for virtual laboratory experiments. In *Proc. Smart Systems and Devices*, Hammamet, Tunisia, Mar. 2001.
- [23] Niramom Ruangpayoongsak, Hubert Roth, and Rudolf Schwarte. Position calibration of a mobile robot based on 3d vision. In *Proc. 16th IFAC World Congress*, Prague, Czech Republic, Jul. 2005.
- [24] Jan-Friso Evers Senne, Jan Woetzel, and Reinhard Koch. Modelling and rendering of complex scenes with a multi-camera rig. In *1st European Conference on Visual Media Production (CVMP 2004)*, London, United Kingdom, March 2004.
- [25] B. Streckel, J.-F. Evers-Senne, and R. Koch. Lens model selection for a markerless ar tracking system. In *Proc. ISMAR (to appear)*, Vienna, Austria, Oct. 2005.
- [26] B. Streckel and R. Koch. Lens model selection for visual tracking. In *Proc. DAGM (to appear)*, Vienna, Austria, Aug. 2005.
- [27] Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth und Prof. Dr. Klaus Schilling. Fa. ars (angewandte rechner- und softwaretechnologie), steinbeis-transferzentrum. <http://www.stw.de/k060/60030/162.htm>.
- [28] F. Woelk, S. Gehrig, and R. Koch. A monocular collision warning system. In *Proc. CRV*, Victoria, Canada, May 2005.
- [29] F. Woelk and R. Koch. Fast monocular bayesian detection of independently moving objects by a moving observer. In *Proc. DAGM*, Tübingen, Germany, Aug. 2004.
- [30] F. Woelk and R. Koch. Robust monocular detection of independent motion by a moving observer. In *Proc. IWCM*, Günzburg, Germany, Oct. 2004.
- [31] Jan Woetzel and Reinhard Koch. Multi-camera real-time depth estimation with discontinuity handling on pc graphics hardware. In *17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2004)*, Cambridge, United Kingdom, August 2004.
- [32] Jan Woetzel and Reinhard Koch. Real-time multi-stereo depth estimation on gpu with approximative discontinuity handling. In *1st European Conference on Visual Media Production (CVMP 2004)*, London, United Kingdom, March 2004.

3 Ziele und Arbeitsprogramm

Im Zusammenwirken der verschiedenen Teilprojekte setzt der Teilantrag *3D-PoseMap* die Schätzung der Kamerapose in 6 Freiheitsgraden bei gleichzeitiger Generierung einer Umgebungskarte zur Fahrzeugnavigation um.

3.1 Ziele

Im Rahmen der beantragten Forschungen soll untersucht werden, wie sich durch Einsatz einer 3D-Tiefenkarte die Genauigkeit einer 6DoF-Poseschätzung verbessern lässt und wie sich diese genauere Pose dazu nutzen lässt, exakte 3D-Umgebungsbeschreibungen zu generieren, die als Basis für die Navigation eines Fahrzeugs dienen. Die 3D-Tiefenkarte stammt von einer PMD-Kamera [2] oder den Tiefeninformationen eines Stereokamerakopfes, hier

soll ein Vergleich der Datenqualität stattfinden. In der erstellten 3D-Umgebungskarte soll sich ein Fahrzeug autonom registrieren und navigieren, die Pfadplanung soll interaktiv mit dem Benutzer erfolgen.

Desweiteren sollen simultan mit der Kameraposeschätzung bewegte Objekte detektiert und verfolgt werden. Dies sind zunächst starre, später auch sich deformierende Objekte. Die generierten Objekttrajektorien sollen bei der Umgebungskartierung und zur Navigation genutzt werden, um Kollisionen zu vermeiden. In einem letzten Schritt sollen die Bewegungen von menschlichen Körpern verfolgt werden, mit Anwendungen beim Motion-Capture und in der Medizin.

Erreicht werden sollen diese Ziele durch die enge Zusammenarbeit der Lehrstühle Koch und Roth. Die Erfahrungen der Gruppe Koch in der Poseschätzung ergänzen sich direkt mit denen der Gruppe Roth bei der Datenfusion und der Fahrzeugnavigation auf Basis von Umgebungskarten. Geplant ist, dass die Gruppe Koch Kameraposen und 3D-Umgebungsinformationen und später Trajektorien von Objektbewegungen als Rohdaten generiert. Diese werden von der Gruppe Roth verarbeitet, d.h. sie werden mit den Daten anderer Sensoren geeignet fusioniert und es wird ihnen eine Semantik aufgeprägt, um Umgebungsinformationen in Form einer 3D-Karte zu erhalten, die sich zur autonomen Fahrzeugnavigation eignet.

Im folgenden Abschnitt 3.2 werden die einzelnen Ziele in Form von konkreten Arbeitspaketen detaillierter ausgeführt.

3.2 Arbeitsprogramm

Abbildung 5 stellt den zeitlichen Ablauf und die Interdependenzen der sich aus den Zielen ergebenden Arbeitspakete dar. Die Arbeitspakete PK1-5 und PR1-5 sind jeweils einer der beteiligten Arbeitsgruppen direkt zugewiesen, die Schnittstellenmodule PI1-3 werden von beiden Gruppen gemeinsam erbracht. Viele Arbeitspakete sind noch in einzelne Aktivitäten unterteilt, die gesondert aufgeschlüsselt werden.

3.2.1 PI1: Transfer von SfM auf die AMR-Testplattform MOSRO.

Um die Erfahrung der Arbeitsgruppen Koch auf dem Gebiet der Poseschätzung für die Fahrzeugnavigation zu nutzen, ist es zunächst nötig, die AMR-Plattform MOSRO der Arbeitsgruppe Roth mit der SfM-Software der Arbeitsgruppe Koch auszurüsten, so dass eine stabile Poseschätzung in Echtzeit auf einem mobilen Fahrzeug möglich ist. Um Copyright-Verletzungen beim Gebrauch der SfM-Software zu vermeiden soll diese von Mitarbeitern von Prof. Koch via Netzwerk(WAN, LAN), auf dem mobilen Fahrzeug installiert, konfiguriert, getestet und gewartet werden können.

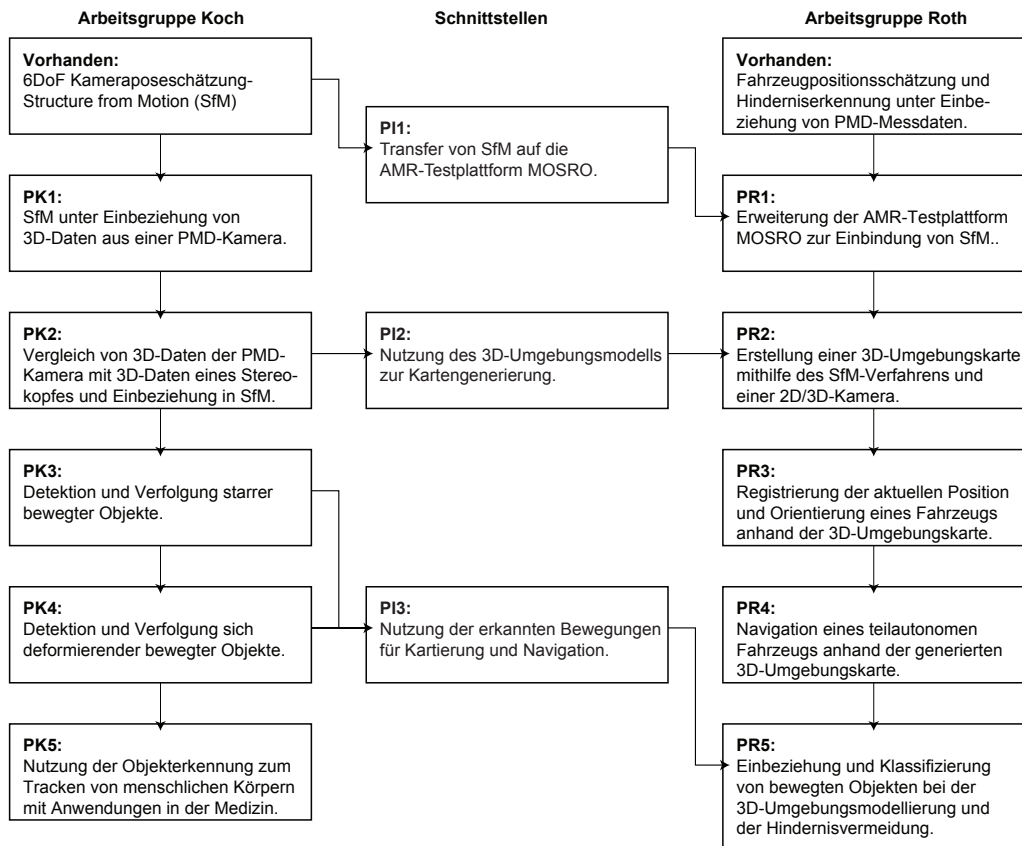


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen den einzelnen Arbeitspaketen

3.2.2 PR1: Erweiterung der AMR-Testplattform MOSRO zur Einbindung von SfM.

Das SfM-Verfahren arbeitet in seiner jetzigen Form mit einer einzelnen 2D-Firewire-Kamera und soll in Arbeitspaket PK1 um eine PMD-Kamera und in PK2 um einen Stereokamerakopf, bestehend aus zwei 2D-Firewire-Kameras, erweitert werden. Für die Implementierung des SfM-Verfahrens ist eine ausreichende Anzahl an Firewire-Schnittstellen innerhalb der AMR-Plattform MOSRO vorzusehen. Des Weiteren soll der Zugriff auf die AMR-Plattform MOSRO via Internet, LAN und Wireless-LAN gegeben sein. Für Wireless-LAN wird eine PCMCIA- oder ebenfalls eine USB-Schnittstelle benötigt.

- **PR1.1: Erweiterung der AMR-Plattform MOSRO:** Eine ausreichende Anzahl geeigneter Schnittstellen kann mit einem sog. Mini-PC (z.B. Barebone- oder Embedded-PC mit Pentium 4) kostengünstig bereitgestellt werden, der passend zum mobilen Fahrzeug kleine geometrische Abmessungen besitzt. Ausgestattet mit dem Betriebssystem SUSE-Linux soll dieser Rechner in die AMR-Plattform eingebaut werden.
- **PR1.2: 2D/3D-Videobildserver als Alternative:** Statt der Vorort-Installation der SfM-Software auf dem mobilen Fahrzeug soll auch folgende Alternative getestet wer-

den: Auf dem mobilen Fahrzeug wird ein 2D/3D-Videobildserver installiert, der die Videobilder als Data-Stream anbietet. Damit ist die Möglichkeit gegeben, diesen Videodatenstrom via Wireless-LAN auch auf externe Rechner innerhalb des LAN oder Internet zu leiten. Die Videobilddaten können jetzt ausgehend von der AMR-Plattform auf Rechner der Arbeitsgruppe von Prof. Koch, übertragen und dort mittels SfM-Verfahren ausgewertet werden. Ergebnisse, wie Positions- und Orientierungsdaten, können auf umgekehrtem Weg wieder zurück zum mobilen Fahrzeug zwecks Navigation transferiert werden.

- **PR1.3: Datenfusion:** Die durch das SfM-Verfahren kontinuierlich ermittelten Positions- und Orientierungsdaten sollen nun mit den Daten der bisher verwendeten konventionellen Sensoren mittels der EKF fusioniert werden. Die so errechneten Schätzwerte werden schließlich der bereits bestehenden Fahrregelung zugeführt.

3.2.3 PK1: SfM unter Einbeziehung von 3D-Daten aus einer PMD-Kamera.

Ziel dieses Arbeitspaketes ist es, eine Poseschätzung durch Einbeziehung von 3D-Daten zu erzielen. Ausgegangen wird dabei von dem in der Arbeitsgruppe Koch existierenden Verfahren (s. Abschnitt 2.2.1) zur Schätzung der Kamerapose aus dem Bildstrom einer 2D-Kamera, die 3D-Daten kommen zunächst von der PMD-Kamera. Durch die Einbeziehung der 3D-Daten können folgende Probleme des Standard-SfM-Verfahrens untersucht und verbessert werden:

- **PK1.1: Metrische Skalierung** Durch Hinzunahme von 3D-Daten mit bekannter Skalierung kann die Kameraposeschätzung in einem absoluten metrischen Koordinatensystem durchgeführt werden. Ziel dieser Aktivität ist eine Untersuchung, inwieweit die Fusion von 2D-Video- und 3D-PMD-Daten eine maßstabsgetreue Poseschätzung ermöglicht.
- **PK1.2: Tiefeninformation zur Stabilisierung der 3D-Punkte** Die Genauigkeit der Poseschätzung hängt von den Fehlern der triangulierten 3D-Punkte ab, diese sind in Kamerablickrichtung im Allgemeinen recht groß. Durch Einbeziehung der 3D-PMD-Daten sollen die Punkte in dieser Richtung stabilisiert werden.
- **PK1.3: Oberflächenstruktur der verfolgten Merkmale** Bei der Verfolgung von Merkmalen in der Bildsequenz werden von Bild zu Bild ähnliche Regionen gesucht. Dabei wird davon ausgegangen, dass diese lokal planar und ausschließlich affin verzerrt sind. Ist dies nicht der Fall, kann es zu einer Drift der erkannten Merkmalspunkte kommen. Durch eine lokale Oberflächenmodellierung nahe den Merkmalen kann die Verzerrung geeigneter modelliert werden, dadurch wird eine genauere Lokalisierung der Merkmale möglich.
- **PK1.4: Initialisierung ohne Bewegung der Kamera** Da SfM auf einer Triangulierung vom 3D-Punkten aus unterschiedlichen Kamerabildern basiert, ist immer eine ausreichend große Bewegung zur Initialisierung der Poseschätzung notwendig. Durch Einbeziehung von 3D-Daten kann die Initialisierung ohne jede Bewegung stattfinden.

- **PK1.5: Auswertung und Einordnung der erzielten Verbesserungen** An dieser Stelle ist eine detaillierte Auswertung der erzielten Verbesserungen hinsichtlich der Qualität der geschätzten Pose sowie eine Kovarianzanalyse geplant.

3.2.4 PK2: Vergleich von 3D-Daten der PMD-Kamera mit 3D-Daten eines Stereokopfes und Einbeziehung in SfM.

Im Arbeitspaket PK1 wurde die PMD-Kamera genutzt, um die benötigten 3D-Daten zu generieren. Ebenso kann auch die Stereobildverarbeitung 2.1.3 gute Tiefeninformationen generieren und steht damit in Konkurrenz zur Verarbeitung von PMD-Daten. Daraus ergeben sich folgende Aktivitäten:

- **PK2.1: Vergleich der 3D-Daten aus Stereo und PMD** Hier soll ein Vergleich von 3D-Daten aus Stereobildverarbeitung und PMD-Sensor stattfinden. Die Daten sollen qualitativ verglichen werden und es soll erarbeitet werden, für welche Szenarien sich welches Verfahren eignet. Es wird erwartet, dass die Verfahren sich ergänzen. Während die Stereoalgorithmen hoch aufgelöste Tiefeninformationen in strukturierten Umgebungen liefern, erzeugt die PMD-Kamera besonders zuverlässige aber niedriger aufgelöste Daten in einer homogenen Szene. Unterschiede sind auch bei der Geschwindigkeit der Datengenerierung zu erwarten. Während es möglich ist, auf PMD-Daten in Echtzeit zu rechnen, ist die Stereobildverarbeitung nur eingeschränkt in Echtzeit möglich.
- **PK2.2: Nutzung der Tiefendaten aus der Stereoschätzung für SfM** Um einen Vergleich der 3D-Daten aus PMD und Stereo in ihrer Anwendbarkeit für SfM zu untersuchen, ist eine Einbindung der Stereobildverarbeitung in die Poseschätzung aus PK1 nötig. Es soll damit untersucht werden, in welchen Situationen welche der beiden Tiefenkarten die besseren Ergebnisse für die Poseschätzung liefert.
- **PK2.3: Nutzung der 3D-Informationen aus der Poseschätzung zur Verbesserung der Stereo-Tiefendaten** Während der Poseschätzung werden bekannte 3D-Punkte verfolgt und deren Positionen bei jeder erneuten Sichtung korrigiert. Dadurch kann die 3D-Position von Merkmalen, die über eine längere Zeit stabil erkannt wurden, sehr genau geschätzt werden. Diese 3D-Punkte liefern wertvolle Informationen zur Verbesserung der Stereo-Tiefenkarte.

3.2.5 PI2: Nutzung des 3D-Umgebungsmodells zur Kartengenerierung.

Bei der Schätzung der Kamerapose wird implizit eine 3D-Umgebungsbeschreibung aus einzelnen Raumpunkten ohne jede semantische Information generiert. Diese Umgebungsbeschreibung soll als Grundlage für die Generierung einer Umgebungskarte sowie das Registrieren der Fahrzeugposition in einer bekannten Umgebung herangezogen werden.

3.2.6 PR2: Erstellung einer 3D-Umgebungskarte mithilfe des SfM-Verfahrens und einer 2D/3D-Kamera.

Ein unbekanntes Areal soll als 3D-Umgebungsmodell erfasst werden. Dies ist durch die Nutzung des SfM-Verfahrens unter Verwendung einer PMD-Kamera und einer 2D-Kamera zu realisieren, die fest kombiniert werden. Die Einbeziehung eines Stereokamerakopfes zur Detaillierung der 3D-Daten kann bei Bedarf in schwierigen Situationen erfolgen. Dies hat eine langsamere Datengenerierung zur Folge.

- **PR2.1: 6D-Poseänderung** Die 3D-Umgebungsmodellierung erfolgt durch Bewegung der kombinierten 2D/3D-Kamera und der Stereokamera. Die erste Aufnahme und die momentane Pose der Kameras bilden den Startpunkt. Ab diesem Punkt werden die Kameras in das unbekannte Areal bewegt. Parallel dazu werden kontinuierlich und in definierten Zeitabständen die jeweiligen 2D/3D-Aufnahmen zusammen mit den dazugehörigen Posen in das 3D-Umgebungsmodell überführt. In komplexen Situationen, wenn eine erhöhte Genauigkeit erforderlich ist, kann diese durch Einbeziehung der Stereokamera bei Reduktion der Bewegungsgeschwindigkeit erreicht werden.
- **PR2.2: 6D-SLAM mit einem teilautonomen AMR** Die Bewegung der 2D/3D-Kamera ist Voraussetzung für 6D-SLAM. Die 6D-Kamera- bzw. 6D-Fahrzeugbewegung wird hierbei durch die Selbstmanövrierfähigkeiten des mobilen Fahrzeugs bestimmt. Beispielsweise müssen befahrbare Wege selbständig gefunden, Abgründe und Steigungen selbständig gemieden werden usw. Für diese Fähigkeiten sind Funktionalitäten, wie Hinderniserkennung und -vermeidung, notwendig. In diesem Vorhaben soll die 6D-Kamerabewegung und das 6D-SLAM mithilfe der teilautonomen AMR-Plattform realisiert werden, d.h. das mobile Fahrzeug soll auf einem vom Operator vorgegebenen Pfad entlang fahren. Beim Auftreten von Hindernissen muss das Fahrzeug stets diesen autonom ausweichen und anschließend auf den definierten Pfad zurückkehren und fortfahren. Parallel dazu wird das 6D-SLAM durchgeführt.

3.2.7 PK3: Detektion und Verfolgung starrer bewegter Objekte.

Der nächste Schritt ist die Erkennung von in sich starren, bewegten Objekten und eine Schätzung ihrer Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit.

- **PK3.1: Detektion eines bewegten Objektes** In diesem Arbeitsschritt soll für Szenenteile untersucht werden, ob sie ein bewegtes Objekt darstellen. Hierzu bieten sich die 3D-PMD-Daten zur Klassifikation an, da sie für jeden Zeitpunkt eine 3D-Umgebungsbeschreibung liefern. Durch Kompensation der Eigenbewegung kann die Objektbewegung segmentiert werden [1]. Damit ist auch eine Klassifikation der verfolgten Merkmale in bewegte und unbewegte Merkmale möglich, und die Poseschätzung kann weiter stabilisiert werden.
- **PK3.2: Verfolgung eines bewegten Objektes** Nachdem ein bewegtes Objekt segmentiert und die Objektbewegung geschätzt wurde, kann es von Bild zu Bild verfolgt

werden und es kann eine Bewegungsschätzung über einen längeren Zeitraum erfolgen. Daraus soll eine 3D-Bewegungstrajektorie des Objektes erstellt werden.

- **PK3.3: Fehleranalyse** Durchzuführen ist an dieser Stelle wiederum eine detaillierte Kovarianzanalyse, die Information über Fehler in der Objektlokalisierung und -bewegung liefert.

3.2.8 PR3: Registrierung der aktuellen Position und Orientierung eines Fahrzeugs anhand der generierten 3D-Umgebungskarte.

Als Ergebnis des 6D-SLAM aus PR2 erhält man eine 3D-Umgebungskarte des ehemals unbekanntes Areals. Diese Karte soll nun dafür benutzt werden, um die eigene Position und Orientierung einer Person oder eines mobilen Fahrzeugs innerhalb dieses Areals zu bestimmen.

- **PR3.1: 3D-Teilkarte:** Dafür soll wiederum die 2D/3D-Kamera zur Anwendung kommen. Ein zu entwickelnder Algorithmus soll innerhalb der Momentaufnahme dieser Kamera Merkmale und Objekte als natürliche 3D-Land- bzw. Ortsmarken extrahieren. Nach einer Datenreduktion und einer Datentransformation, in ein der 3D-Umgebungskarte entsprechendes Format, wird daraus zunächst eine 3D-Teilkarte dieser Momentaufnahme erzeugt.
- **PR3.2: 3D-Matching-Verfahren:** Anhand der natürlichen Landmarken soll ein geeignetes 3D-Matching-Verfahren einwickelt werden, das die 3D-Teilkarte innerhalb der gesamten 3D-Umgebungskarte findet. Bei erfolgreicher Suche kann nun die Position und Orientierung der 2D/3D-Kamera bzw. der Person oder des mobilen Fahrzeugs errechnet werden. Dieser Prozess soll kontinuierlich und in regelmäßigen Zeitabständen erfolgen.

3.2.9 PI3: Nutzung der erkannten Bewegungen für Kartierung und Navigation.

Die in PK3 segmentierten Bildbereiche, in denen sich bewegte Objekte befinden, und die Trajektorien dieser Objekte sollen für die Kartengenerierung verfügbar gemacht werden.

3.2.10 PK4: Detektion und Verfolgung sich deformierender bewegter Objekte.

Aufbauend auf PK3 sollen in diesem Arbeitspaket auch Bewegungen von Objekten detektiert werden, die sich frei oder nach bestimmten Regeln (kinematischen Ketten) deformieren können. Dabei sollen zunächst Bewegungstrajektorien dieser Objekte bestimmt werden. In einem weiteren Schritt soll auch die Deformation erfasst und auf ein kinematisches Kettenmodell abgebildet werden. Dies alles soll bei gleichzeitiger Kamerabewegung und Kameraposeschätzung stattfinden.

3.2.11 PR4: Navigation eines teilautonomen Fahrzeugs anhand der generierten 3D-Umgebungskarte.

Die o.g. AMR-Plattform ist bereits in eine Netzstruktur eingebunden. Diese verfügt über eine Wireless-LAN- und Internetanbindung. Auf dem Host-Rechner des mobilen Fahrzeugs, über dessen WWW-Server, kann bereits eine internetbasierte Benutzerschnittstelle (s. Abbildung 6) angeboten werden, die ein Operator in seinen Internet-Browser als Java-Applet laden und darin einen virtuellen Pfad zeichnen kann.

Der virtuelle Pfad besteht aus Start-, Endpunkt und vielen Zwischenpunkten, die als gesamtes Datenpaket an das mobile Fahrzeug übergeben werden. Jeder dieser Punkte wird jeweils als Sollposition interpretiert, die der mobile Roboter nacheinander einnehmen soll. Durch den permanenten Vergleich zwischen Ist- und Sollposition sorgt ein bereits entwickelter Regelalgorithmus dafür, dass die AMR-Plattform alle diese Sollpositionen nacheinander abfährt. Das mobile Fahrzeug wird dabei in seiner Geschwindigkeit und Richtung bzw. Orientierung korrigiert, und zwar durch Drehzahlregelung der beiden Antriebsmotoren (Pfadkontrolle, Roboterkontrolle).

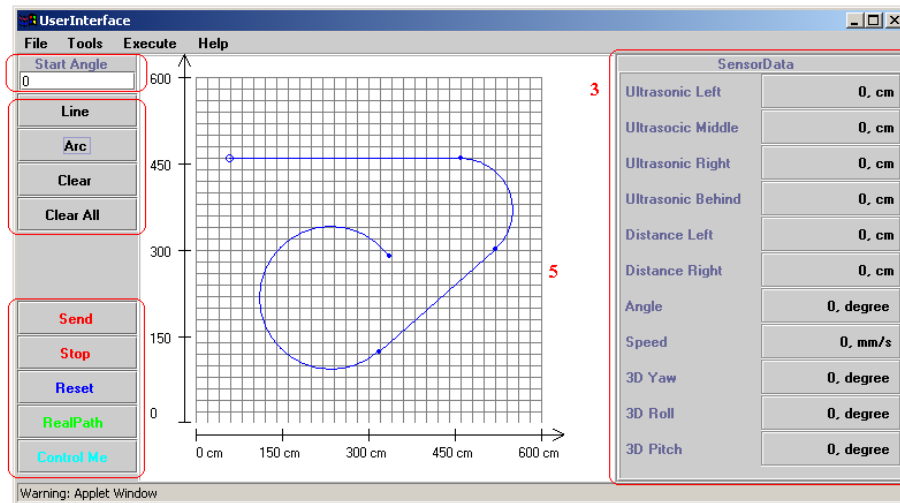


Abbildung 6: Internetbasierte grafische Benutzerschnittstelle.

- PR4.1: Hinderniserkennung und -vermeidung mit der 2D/3D-Kamera:** Beim Auftreten eines mit der kombinierten 2D/3D-Kamera erfassten festen Hindernisses soll die AMR-Plattform den Pfad verlassen, die Behinderung umrunden und schließlich wieder auf dem gegebenen Pfad fortgefahren (Hinderniserkennung).
- PR4.2: Pfadplanung:** In diesem Vorhaben soll die o.g. Benutzerschnittstelle dahingehend erweitert werden, dass der Operator die Möglichkeit bekommen, innerhalb dieser Benutzerschnittstelle die zuvor generierte 3D-Umgebungskarte zu laden. Anhand dieser 3D-Umgebungskarte kann der Operator einen beliebigen virtuellen Pfad zeichnen, den das mobile Fahrzeug innerhalb der realen 3D-Umgebung abfahren soll.

3.2.12 PR5: Einbeziehung und Klassifizierung von bewegten Objekten bei der 3D-Umgebungsmodellierung und der Hindernisvermeidung

Bisher wurde die zu modellierende Umgebung als starre Szene angenommen. Dies ist nur für den Indoor-Bereich leicht realisierbar, wenn während der Modellierungsphase keine sich bewegende Objekte, wie z.B. Personen oder Haustiere, innerhalb der Szene auftauchen.

Im Outdoor-Bereich sind diese idealen Bedingungen einer starren Umgebung kaum einzuhalten. Hier muss unterschieden werden zwischen:

- stehenden, jedoch sich verformenden Objekten,
- sich bewegenden, jedoch festen Objekten,
- sich bewegenden und sich verformenden Objekten.

Während stehende und sich verformende Objekte mit in das 3D-Umgebungsmodell Eingang finden sollen, müssen alle bewegte Objekte unberücksichtigt bleiben.

Bei der Pfadplanung können somit stehende und sich verformende Objekte mit berücksichtigt werden. Bei der Navigation eines mobilen Fahrzeugs, also das Fahren entlang des zuvor geplanten Pfads, muss mittels der Hinderniserkennung diese sich bewegenden Objekte auffindig gemacht werden. Die Hindernisvermeidung soll nun dahingehend reagieren, dass beim Entdecken eines solchen Objekts das mobile Fahrzeug seine Fahrt zunächst unterbricht, solange wartet, bis sich das Objekt außerhalb dessen Fahrbahn befindet und dann wieder die Fahrt fortsetzt.

3.2.13 PK5: Nutzung der Objektverfolgung zum Tracken von menschlichen Körpern mit Anwendungen in der Medizin.

In diesem Arbeitspaket soll die in PK4 entwickelte Verfolgung von sich deformierenden bewegten Objekten auf einem realen Anwendungsszenario getestet werden. Dazu soll die Registrierung und Verfolgung von menschlichen Körpern und deren Bewegungen untersucht werden (s. Abbildung 3 Abschnitt 2.2.1). Die Anwendungen einer solchen Verfolgung von menschlichen Bewegungen sind vielfältig. Sie reichen von Motion Capture in der Filmindustrie zur zahlreichen Anwendungen in der Medizin. So wird z.B. mittels Ganganalyse die Diagnose von Krankheiten wie Parkinson oder Schädel-Hirn-Traumata unterstützt, oder der Erfolg von Rehabilitationsmaßnahmen ausgewertet. Eine exakte Erkennung von Menschen wird auch in der Chirurgie zur Registrierung von Körpern benötigt, um Operationsroboter anzusteuern (s. Abschnitt 2.2.2).

3.2.14 Zeitliche Einordnung der Aufgaben

Die Abhängigkeiten der oben genannten Arbeitspakete sind in Abbildung 5 dargestellt. Tabelle 1 zeigt die zeitliche Einordnung der Einzelaufgaben in die verschiedenen Quartale im

Arbeitspakete	2006				2007				2008				2009			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
P-I1 Transfer SfM nach MOSRO	x	x														
P-K1 SfM mit PMD-Kamera	x	x	x													
P-R1 Erweiterung AMR für SfM	x	x	x													
P-K2 Vergleich PMD mit Stereo				x	x	x										
P-I2 Transfer von Umgebungsdaten					x	x										
P-R2 Erstellung der Umgebungskarte				x	x	x										
P-K3 SfM mit bewegten Objekten							x	x	x	x						
P-R3 Fahrzeugregistrierung in Karte							x	x	x							
P-K4 SfM mit deformierbaren bewegten Objekten									x	x	x	x				
P-R4 Fahrzeugnavigaion in Karte									x	x	x					
P-I3 Datentransfer bewegte Objekte									x	x						
P-K5 Motion Capture													x	x	x	x
P-R5 Navigation mit bewegten Objekten													x	x	x	x

Tabelle 1: Zeitliche Einordnung der Arbeitspakete nach Quartalen.

Laufe der Projektbearbeitung.

Literatur zu Zielen und Arbeitsprogramm

- [1] Stefan Heinrich. Real time fusion of motion and stereo using flow/depth constraint for fast obstacle detection. In *Proceedings of the 24th DAGM Symposium on Pattern Recognition*, pages 75–82, London, UK, 2002. Springer-Verlag.
- [2] 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. In *OPTO*, Nürnberg, Germany, May 2004.

3.3 Untersuchungen am Menschen

finden nicht statt.

3.4 Tierversuche

finden nicht statt.

3.5 Gentechnologische Experimente

finden nicht statt.

4 Beantragte Mittel

4.1 Personalkosten

1. Zwei wissenschaftliche Mitarbeiterstellen BAT IIa, zunächst für die Dauer von 2 Jahren.
2. Zwei studentische Hilfskräfte mit jeweils 65h/Monat, zunächst für die Dauer von 2 Jahren.

Jeweils ein Doktorand und eine Hilfskraft werden in der Arbeitsgruppe „Multimediale Informationsverarbeitung“ (Prof. Koch) und am Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik (Prof. Roth) über die gesamte Projektlaufzeit angestellt. Die Doktoranden werden mit hoher Wahrscheinlichkeit aus den Reihen der Absolventen gewonnen, so dass fundierte praktische Kenntnisse im Arbeitsgebiet bereits zum Zeitpunkt der Anstellung vorhanden sind.

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

1. Zwei wissenschaftliche Mitarbeiterstellen BAT IIa, für die Dauer von 2 Jahren.
2. Zwei studentische Hilfskräfte mit jeweils 65h/Monat, für die Dauer von 2 Jahren.

4.2 Wissenschaftliche Geräte

Im Rahmen des beantragten Projektes kann die vorhandene Infrastruktur der Arbeitsgruppen Koch und Roth genutzt werden, diese ist in Abschnitt 5.4 detailliert aufgeführt. Über diese Grundausstattung beider Gruppen hinaus sind Mittel für folgende Geräte nötig:

1.	1 PMD-Kamera mit der Auflösung 64x48 und Fremdlichtunterdrückung	6.949 EUR
2.	1 PMD-Kamera mit der Auflösung 160x120 ohne Fremdlichtunterdrückung	5.789 EUR
3.	2 Stereo-Kameraköpfe z.B. Bumblebee der Fa. Point Grey	4.000 EUR
3.	1 Firewire-Kamera z.B. Dragonfly der Fa. Point Grey	1.000 EUR
4.	Mini-PC (z.B. Barebone- oder Embedded-PC) und Sonstiges	1.000 EUR
	Summe (inkl. MwSt)	18.738 EUR

4.2.1 Begründung des Bedarfs

1. PMD-Kameras mit ausreichender Auflösung sind in den Arbeitsgruppen Koch und Roth nicht vorhanden und zur Durchführung des Projektes im beantragten Rahmen unerlässlich.

2. Für den Vergleich der PMD-Daten mit Tiefendaten aus der Stereobildverarbeitung ist ein kalibrierter Stereokamerakopf mit fester Kamerakonfiguration an jedem der beiden Lehrstühle nötig. Ein Kamerakopf soll im Verlauf des Projektes auf der mobilen Plattform der Gruppe Roth eingesetzt werden, ein weiterer ist als Referenzgerät für die Arbeitsgruppe Koch nötig. Eine reibungslose Integration von frei beweglichen, zu kalibrierenden Stereokameras auf einer mobilen Plattform ist sehr aufwändig und nicht Untersuchungsgegenstand dieses Projektes.
3. Um das SfM-Verfahren auf der AMR-Plattform der Gruppe Roth zu installieren, ist eine hochwertige CCD-Videokamera nötig. Eine solche ist dort nicht vorhanden.
4. Der Mini-PC wird zur Bereitstellung der Schnittstellen zum Anschluss der Kameras auf der AMR-Plattform MOSRO der Gruppe Roth benötigt.

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

fallen voraussichtlich nicht an.

4.3 Verbrauchsmaterial

Es werden in geringem Umfang Druckkosten pro Jahr anfallen.

1.	Druckaufträge für Poster u.ä.	200 EUR
Summe pro Jahr		200 EUR

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

2.	Druckaufträge für Poster u.ä.	200 EUR
Summe pro Jahr		200 EUR

4.4 Reisen

Als jährlichen Reisekosten werden in den ersten beiden Jahren veranschlagt:

1.	Präsentation von Ergebnissen auf nationalen und internationalen Tagungen	
1.1	ICCV oder ECCV (Internationale Computer Vision Tagungen) ¹	4.000 EUR
1.2	DAGM (Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Mustererkennung)	2.000 EUR
1.3	IFAC (International Federation of Automatic Control)	2.000 EUR
2.	Arbeitstreffen der Projektpartner	2.000 EUR
Summe pro Jahr		10.000 EUR

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

1.	Präsentation von Ergebnissen auf nationalen und internationalen Tagungen	
1.1	ICCV oder ECCV	4.000 EUR
1.2	DAGM	2.000 EUR
1.3	IFAC (International Federation of Automatic Control)	2.000 EUR
2.	Arbeitstreffen der Projektpartner	2.000 EUR
	Summe pro Jahr	10.000 EUR

4.5 Publikationskosten

Für Publikationen werden für die ersten beiden Jahre veranschlagt:

1.	Kosten für Farbseiten in Journalen oder Tagungsbänden	750 EUR
	Summe pro Jahr	750 EUR

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

1.	Kosten für Farbseiten in Journalen oder Tagungsbänden	750 EUR
	Summe pro Jahr	750 EUR

4.6 Sonstige Kosten

fallen voraussichtlich nicht an.

5 Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens

Abbildung 7 stellt die wesentlichen Verknüpfungen zwischen dem vorliegenden Projektantrag *3D-PoseMap* und den anderen Teilprojekten des Antragspaktes „Dynamisches 3D-Sehen“ dar. Die Vernetzungen wurden so gestaltet, dass durch direkte Kooperation Synergien zwischen den Teilprojekten genutzt werden können, aber das vorliegende Teilprojekt dennoch unabhängig ist vom Fortschritt in den anderen Teilprojekten. So wird zunächst auf selbst entwickelten 2D/3D-Testsequenzen sowie einer kombinierten 2D/3D-Kamera, bestehend aus einer 2D-Kamera und einer PMD-Kamera, gearbeitet. Damit können 2D/3D-Daten generiert werden, allerdings ohne eine explizite Fehlermodellierung in den Testsequenzen oder eine aufwändige Vorverarbeitung der 2D/3D-Daten.

Durch engen Austausch mit dem Teilprojekten *PMD-Sim*, *MultiCam* und *2D3DProc* wird sichergestellt, dass Ergebnisse aus diesen Teilprojekten genutzt werden können, sobald sie vorliegen. Das heißt, die kombinierte 2D/3D-Kamera wird durch Eingabedaten und Kamerabilder aus diesen Teilprojekten ersetzt bzw. ergänzt. Die Datengenietierung in *MultiCam* und

¹Mittlere Kosten für eine der Konferenzen für zwei Teilnehmer

2D3DProc verbessert direkt die Ergebnisse des vorliegenden Paketes, da die Poseschätzungsalgorithmen von der exakten 2D/3D-Kalibrierung profitieren und eine Datenvorverarbeitung die Qualität der Eingabedaten deutlich steigern kann. Die Daten von *PMD-Sim* versprechen eine erheblich realistischere Modellierung einer PMD-Kamera, als sie eine einfache 2D/3D-Testsequenz erbringen kann. Auch die in *MultiCam* zu entwickelnde omnidirektionale PMD-Kamera soll zur Poseschätzung genutzt werden. Durch eine Erweiterung des Blickwinkels wird die Genauigkeit der errechneten Pose deutlich gesteigert, Erfahrungen mit sphärischen Kameraobjektiven sind in der Arbeitsgruppe Koch bereits vorhanden (s. Abschnitt 2.2.1).

Eine erweiterte Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt *MultiCam* ist im Bereich Stereobildverarbeitung und PMD-Kamera vorgesehen. In *MultiCam* wird eine binokulare Kamera zur Stereoschätzung mit einer PMD-Kamera kombiniert, und es ist eine Datenfusion zwischen 3D-Daten aus den Stereobildern mit denen der PMD-Kamera geplant. Hier kann die Arbeitsgruppe Koch Unterstützung leisten, da viel Erfahrung auf dem Gebiet der Stereoschätzung vorhanden ist. Die Ergebnisse des in *3D-PoseMap* durchgeführten Vergleiches sollen zur Optimierung der in *MultiCam* geplanten Datenfusion herangezogen werden. Geplant sind unter anderem Austausch von Know-How, Vergleiche der implementierten Verfahren und Unterstützung bei einer Echtzeitimplementierung. Die fusionierten 3D-Daten sind zudem exzellent als Eingabe für *3D-PoseMap* geeignet.

Die in *3D-PoseMap* errechnete Poseschätzung soll als Eingabe in das Teilprojekt *PMD Lumi* dienen. Zur Erkennung der Lage eines Objektes im Raum wird die Kamerapose und

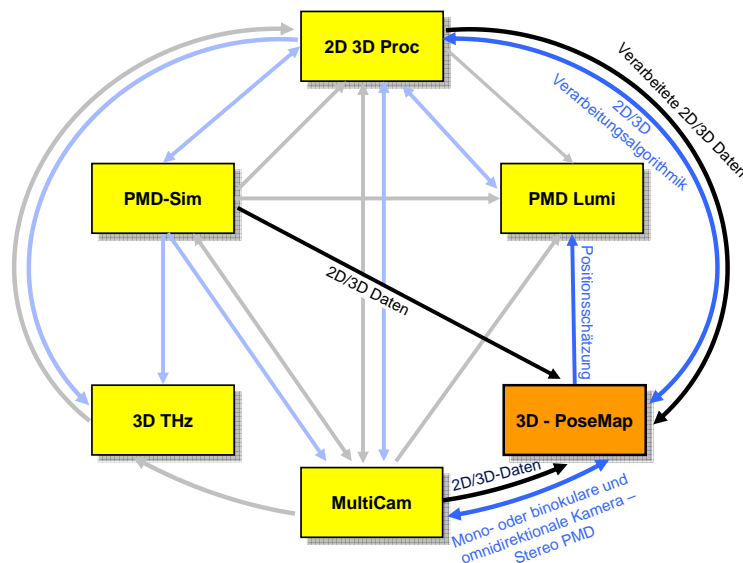


Abbildung 7: Zusammenhänge zwischen dem Teilprojekt *3D-PoseMap* und anderen Teilprojekten des Antragspaketes „Dynamisches 3D-Sehen“. Schwarze Pfeile weisen auf den Austausch von Daten hin, blaue Pfeile stellen den Austausch von Know-How oder anderer Informationen dar.

-bewegung benötigt. Ziel ist es, die in *PMD Lumi* bereits vorhandene markerbasierte Poseschätzung durch das im vorliegenden Antrag zu entwickelnde markerlose Verfahren zu ersetzen.

5.1 Zusammensetzung der Arbeitsgruppen

Die Arbeitsgruppe von Prof. Koch umfasst acht wissenschaftliche Mitarbeiter, diejenige von Prof. Roth besteht aus zwölf wissenschaftlichen Mitarbeitern. Zusätzlich zu den aus den beantragten Mitteln zu finanzierenden Mitarbeitern werden folgende Personen zur Bearbeitung des Projektes beitragen:

1. Reinhard Koch (MIP), Prof. Dr.-Ing., Universitätsprofessor
2. Hubert Roth (ZESS, RST), Prof. Dr.-Ing., Universitätsprofessor, Leiter des Instituts RST und ZESS Projektbereichsleiter des Projektbereichs 4 (PB 4)
3. Bogumil Bartczak (MIP), Dipl.-Ing., Arbeitsgebiet: Stereo-Rekonstruktion
4. Jan-Friso Evers-Senne (MIP), Dipl.-Ing., Arbeitsgebiet: Schnittstellen und Hardwareanbindung
5. Daniel Grest, Dipl.-Ing. (MIP), Arbeitsgebiet: Motion Capture
6. Solomon Kolawole Ige (ZESS), MSc., Arbeitsgebiet: Navigation and Lokalisation
7. Asif Iqbal (ZESS), MSc., Arbeitsgebiet: Telerobotic systems
8. Kevin Koeser, Dipl.-Ing. (MIP), Arbeitsgebiet: Structure from Motion
9. Jörg Kuhle (RST), Dipl.-Ing., Arbeitsgebiet: Autonome mobile Robotik
10. Alexander Prusak (RST), Dipl.-Ing., Arbeitsgebiet: Bildverarbeitung in der Robotik, Servicerobotik
11. Pinyo Puangmali (ZESS), MSc., Arbeitsgebiet: Automatic Control and Estimation Theory
12. Niramom Ruangpayoongsak (RST), MSc., Arbeitsgebiet: Bildverarbeitung in der Robotik, Autonome mobile Robotik
13. Birger Streckel, Dipl.-Inf. (MIP), Arbeitsgebiet: Structure from Motion mit sphärischen Kameras

5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern

Es wird mit den anderen Arbeitsgruppen im Rahmen dieses Paketantrages in enger Abstimmung kooperiert (siehe Präambel „Bistatic Exploration“).

Darüber hinaus bestehen weitere Kooperationen mit Wissenschaftlern dieser Arbeitsgruppen zu anderen Themenbereichen:

Dr.-Ing. Bernd Buxbaum: Fa. PMD Technologies GmbH, Siegen

Prof. Dr. rer. nat. Klaus Schilling: Lehrstuhl für Informatik VII, Robotik und Telematik, Universität Würzburg

Priv. Doz. Dr. med. Henning Stolze: Klinik für Neurologie, Universitätsklinikum Schleswig-Holstein, Campus Kiel, Leitung des Ganglors. Im Ganglor der Klinik für Neurologie wird zur Ganganalyse von Probanden markerbasiertes Tracking eingesetzt. Hier soll im Arbeitspaket PK5 getestet werden, inwieweit das Tracking unter Laborbedingungen auf das entwickelte markerlose Verfahren umgestellt werden kann.

5.3 Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern

Kooperationen besteht mit folgenden ausländischen wissenschaftlichen Einrichtungen:

University of North Carolina, Chapel Hill: Prof. Dr. Marc Pollefeys und Dr. Jan-Michael Frahm.

Microsoft Research, Redmond: Dr. Richard Szeliski („Interactive Visual Media Group“).

Siemens Corporate Research, Princeton: Felix Woelk.

BBC Research, London: Dr. Graham Thomas, Dr. Oliver Grau.

King's College London: Prof. Dr. Althöfer.

National Institute of Standards and Technology (NIST): Prof. Dr. Maris Juberts.

Carnegie Mellon University: Prof. Dr. Melvin Siegel.

5.4 Apparative Ausstattung

Die Arbeitsgruppen Koch und Roth besitzen die räumliche und apparative Ausstattung zur Durchführung des beantragten Projektes. In der Arbeitsgruppe Koch sind insbesondere folgende Geräte vorhanden:

- Arbeitsplatzrechner für Mitarbeiter mit leistungsfähiger Graphik-Hardware.
- Serverrechner mit Dual-Prozessoren.
- Ein Labor mit einer großflächigen 3D-Projektionsleinwand mit 4 Projektoren.
- Mehrere 2D-Videokameras mit perspektivischen und sphärischen Kameraobjektiven.
- Pan-Tilt-Units für die automatische Kameranachführung.
- Inertial-Sensoren zur Bestimmung von 3D-Rotationen.

- PCs für die Studentenausbildung.

Auch das Institut RST kann auf bereits verfügbare Ausstattung zurückgreifen:

- Telematik- und Roboterlabor mit Wireless-LAN.
- Roboter MOSRO und weitere.
- Microcontroller C166, C167 und entsprechendes Programmierwerkzeug „ μ Vision“.
- 16 \times 16 PMD-Kamera, diverse 2D-Kamerasysteme und internetfähige Video-Server.
- Software „MATLAB“ und „Simulink“ für Regelungstechnik und für Bildverarbeitung.
- CAD-Software „EAGLE“, Schaltungs- und Platinenentwicklung.
- Software „World Tool Kit“, Erstellung dynamischer virtueller Welten innerhalb der Telematik.
- Software „ADAMS“, Modellbildung und Simulation mechanischer Systeme.

5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben

Weitere Mittel für Sachausgaben, die über die speziellen Verbrauchsmaterialien unter 4.3 hinausgehen, werden vom jeweiligen Lehrstuhl getragen.

5.6 Sonstige Voraussetzungen

keine

6 Erklärungen

1. Es bestehen keine thematischen Zusammenhänge zwischen dem Vorhaben und Arbeiten eines am Ort befindlichen Sonderforschungsbereiches.
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.
3. Der Vertrauensdozent der Hochschule wird unverzüglich von dieser Antragstellung unterrichtet.

6.1 Max-Planck-Institut

Nicht anwendbar.

7 Unterschriften

7 Unterschriften



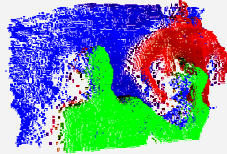
(Prof. Dr. Reinhard Koch)



(Prof. Dr. Hubert Roth)

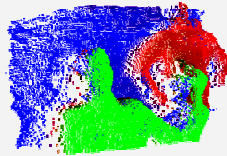
8 Verzeichnis der Anlagen

1. Tabellarischer Lebenslauf Prof. Dr. Reinhard Koch
2. Tabellarischer Lebenslauf Prof. Dr. Hubert Roth



Kurzprofil Prof. Dr.-Ing. Reinhard Koch

Geburtsdatum	22. 09. 1958
Abitur 1977	Gymnasium Carolinum, Osnabrück
Studium 1977-1985	Dipl.-Ing. Elektrotechnik, Universität Hannover, 1977-1981, 1982-1985 Master of Science, Physical Science, Fort Hays State University, Hays, KS., USA, 1981-1982
Prüfungen	Master of Science, Mai 1982, Fort Hays State University, (GPA 3.84) Diplomingenieur Elektrotechnik, Sept. 1985, Universität Hannover Doktoringenieur, Fakultät für Maschinenwesen, Sept. 1996, Universität Hannover (mit Auszeichnung bestanden)
Promotion, 1996	Thema: Automatische Oberflächenmodellierung starrer 3D-Objekte aus stereoskopischen Rundum-Ansichten (bei Prof. Dr.-Ing. C.-E. Liedtke, Hannover)
1985-1988	Entwicklungsingenieur im Bereich Prozesskommunikation bei der Fa. VDO Mess- und Regeltechnik, Hannover
1988-1996	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung der Universität Hannover
1996-1999	wissenschaftlicher Assistent und Leiter der Arbeitsgruppe <i>Reconstruction and Recognition</i> am Zentrum für Sprach- und Bildverarbeitung der Katholieke Universiteit Leuven, Belgien
Seit Oktober 1999	Professur (C3) für Multimediale Informationsverarbeitung im Institut für Informatik der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Lehrgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Multimedia-Technologie• Computer Vision und 3D-Bildverarbeitung• 3D-Computergraphik• Augmented und Mixed Reality (AR/MR)
Forschungs- u. Arbeitsgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Rekonstruktion von 3D-Szenen aus Bildfolgen• Echtzeit-Bildverarbeitung, Kamerakalibrierung, Poseschätzung• 3D-Objektverfolgung, Mensch-Computer-Interaktion
Aktuelle Vorhaben:	<ul style="list-style-type: none">• Markerlose Trackingverfahren für Mixed und Augmented Reality• 3D-Umgebungsmodellierung aus unkalibrierten Kamerabildfolgen• Schätzung menschlicher Bewegungen über Bildverarbeitung• Detektion und Verfolgung bewegter Objekte aus Bildfolgen• Schnelle Stereoschätzung auf GPU-Hardware zur Echtzeit-Qualitätssicherung
Weiteres:	<ul style="list-style-type: none">• Mitglied im Technischen Komitee der DAGM seit 2004• Mitglied in Programm-Komitees: DAGM (seit 2000), VMV (seit 02), SSIAI (seit 02), CVMP (seit 04), CAIP 2005, ICIP 2005• Gutachter für: IEEE PAMI, IEEE TCSVT, IEEE IE, IJSP, SIGGRAPH 2000, 2005, ECCV 1998, ICCV 1997, JMIV, JJVC, JIG, IEE VISP, Springer LNCS, Buchbegutachtungen
Weitere Informationen	http://www.mip.informatik.uni-kiel.de/



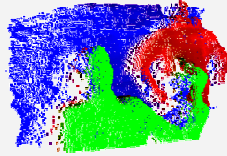
Schriftenverzeichnis Prof. Dr.-Ing. Reinhard Koch

Zeitschriften und Buchbeiträge

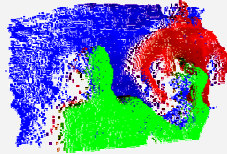
1. R. Koch and J.-F. Evers-Senne : View Synthesis and Rendering Methods. In : Schreer, Kauff, Sikora (Eds.) : 3D Video Communication. Wiley 2005.
2. J.-F. Evers-Senne, R. Koch: Image-based Rendering of Complex Scenes from a Multi-Camera Rig. IEE Proceedings VIS Special Issue 2005, London 2005.
3. O. Grau, R. Koch, F. Lavagetto, A. Sarti, S. Tubaro, J. Woetzel: The ORIGAMI Project: Advanced Tools for Creating and Mixing Real and Virtual Content in TV and Film Production. IEE Proceedings VIS Special Issue 2005, London 2005.
4. M. Pollefeys, L. Van Gool, M. Vergauwen, F. Verbiest, K. Cornelis, J. Tops, R. Koch: Visual Modeling with a Hand-held Camera. Int. Journal Computer vision (IJCV) 59(3), 207-232, Kluwer 2004.
5. R. Koch, M. Pollefeys, L. Van Gool: Realistic surface reconstruction of 3D scenes from uncalibrated image sequences. Journal of Visualisation and Computer Animation 11: 115-127, Wiley, 2000.
6. M. Pollefeys, R. Koch and L. Van Gool: Self-Calibration and Metric Reconstruction in spite of Varying and Unknown Internal Camera Parameters. International Journal Computer Vision, Special Marr Price Issue 32(1), 7-25 (1999).
7. R. Koch: 3-D Modeling of Objects from Image Sequences. in: B. Jaehne, H. Haussecker, P. Geissler(eds.): Handbook of Computer Vision and Applications. Academic Press, 1999.
8. R. Koch, L. Van Gool (eds.): 3D Structure from Multiple Images of Large-Scale Environments. Proceedings of the SMILE workshop, Freiburg, Germany. LNCS 1506, Springer, June 1998.
9. R. Koch: Automatische Oberflächenmodellierung starrer, dreidimensionaler Objekte aus stereoskopischen Rundum-Ansichten. (Ph.-D. Thesis, Universität Hannover, Sept. 1996). In: Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 10, Nr. 499, VDI-Verlag Düsseldorf, 1997.
10. R. Koch: Model-based 3-D scene analysis from stereoscopic image sequences, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 49 (5), pp. 23-30, Elsevier Science Publishers B.V., 1994.
11. Liedtke, C.-E., Koch, R.: Modelling of 3D Scenes from the Analysis of Stereoscopic Image Sequences. International Journal on Pattern Recognition and Image Analysis (Advances in Mathematical Theory and Applications), Vol 3 (3), pp. 346-351, July -Sept. 1993.
12. R. Koch: Dynamic 3D Scene Analysis through Synthesis Feedback Control. IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell., Special issue on analysis and synthesis, Vol. 15 (6), pp. 556-568, June 1993.

Begutachtete Konferenzen und Workshops

1. J.-M. Frahm, K. Köser, D. Grest, R. Koch: Markerless Augmented Reality with Light Source Estimation for Direct Illumination. Proceedings IEE CVMP Conference, London, 2005.
2. D. Grest, R. Koch; Multi-Camera Person Tracking in a Cluttered Interaction Environment. Proceedings CAIP'05, Paris, 2005.
3. D. Grest, J. Woetzel and R. Koch: Nonlinear Body Pose Estimation from Depth Images. Proc. of DAGM 2005, Springer LNCS 2005.
4. D. Grest, D. Herzog and R. Koch: Human Model Fitting from Monocular Posture Images. Proc. of VMV 2005, Nov. 2005, Erlangen, Germany.
5. B. Streckel, R. Koch: Lens Model Selection for Visual Tracking. Proceedings DAGM Symposium, Vienna, Sept. 2005, Springer LNCS, 2005.
6. B. Streckel, R. Koch: Lens Model Selection for a Markerless AR Tracking System. Proceedings ISMAR, Vienna 2005.
7. R. Koch, J.-F. Evers-Senne, J.-M. Frahm, and K. Köser: 3D Reconstruction and Rendering from Image Sequences, Proceedings WIAMIS Workshop 2005, Montreux, Switzerland, April 13-15, 2005.
8. F. Woelk, I. Schiller, R. Koch: An Airborne Bayesian Color Tracking System. IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV05, Las Vegas, USA, June 5-7, (2005).
9. F. Woelk, S. Gehrig, R. Koch: A Monocular Collision Warning System. 2nd Canadian Conference on Computer and Robot Vision CRV05, Victoria, Canada, May 9-11 (2005).
10. R. Koch, K. Köser, B. Streckel, J.-F. Evers-Senne: Markerless Image-based 3D Tracking for Real-Time Augmented Reality. Special Session on Augmented Reality, 5th International Workshop on Image Analysis for Multimedia Interactive Services WIAMIS 2005, Montreux, Switzerland, April 13-15, (2005).
11. R. Koch: Analysis by Synthesis in 3D Reconstruction from Images. 12th Tübinger Wahrnehmungskonferenz

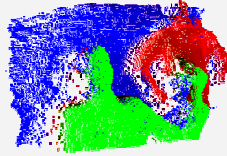


- TKW05, Tübingen, Febr. 25-27, (2005).
12. Daniel Grest and Reinhard Koch: Realtime Multi-Camera Person Tracking for Immersive Environments. Proc. Workshop on Multimedia Signal Processing, Sienna, Italy, Oct. 2004.
 13. J. Woetzel and Reinhard Koch: Multi-camera real-time depth estimation with discontinuity handling on PC graphics hardware. 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2004), Cambridge, United Kingdom, August. 2004.
 14. Woelk, Felix and Reinhard Koch: Fast Monocular Bayesian Detection of Independently Moving Objects by a Moving Observer. Proceedings DAGM, Tübingen, Sept. 2004, Springer LNCS 2004.
 15. Frahm, Jan-Michael and Reinhard Koch: Pose Estimation with a Multi-Camera Rig. Proceedings DAGM, Tübingen Sept. 2004, Springer LNCS, 2004.
 16. F. Woelk, S. Gehrig, R. Koch "A Monocular Image Based Intersection Assistant", Proceedings IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Parma, Italy, June 2004.
 17. Woetzel, Jan and Koch, Reinhard: Real-time multi-stereo depth estimation on GPU with approximative discontinuity handling. Proc. of the 1st European Conference on Visual Media Production (CVMP 2004), London, United Kingdom, March 2004.
 18. Jan-Friso Evers-Senne and Jan Woetzel and Reinhard Koch, Modelling and Rendering of Complex Scenes with a Multi-Camera Rig. Proc. of the 1st European Conference on Visual Media Production (CVMP 2004), London, United Kingdom, March 2004.
 19. Jan-Michael Frahm and Reinhard Koch, Camera Calibration and 3D Scene Reconstruction from image sequence and rotation sensor data. Proc. of VISION, MODELING, AND VISUALIZATION (VMV), pp. 79-83, Munich, Germany, Nov. 2003.
 20. Daniel Grest and Jan-Michael Frahm and Reinhard Koch: A Color Similarity Measure for Robust Shadow Removal in Real Time. Proc. of Vision, Modeling and Visualization (VMV), Munich, Germany, Nov. 2003.
 21. Evers-Senne, J.-F. and Koch, R.: Image Based Rendering from Handheld Cameras using Quad Primitives. Proc. of Vision, Modeling and Visualization (VMV), Munich, Germany, Nov. 2003.
 22. Evers-Senne, J.F., Koch, R., "Image Based Interactive Rendering with View Dependent Geometry", Computer Graphics Forum, Proceedings Eurographics 2003, Granada, Spain, September 2003.
 23. J.-M. Frahm and Reinhard Koch: Camera Calibration with Known Rotation. Proceedings of IEEE Int. Conf. Computer Vision ICCV '03, Nice, France, Oct. 2003.
 24. Jan-Michael Frahm and Jan-Friso Evers-Senne and Reinhard Koch: Distributed Interaction Processing and Visualization of 3D Scenes in Realtime. Proc. of 3rd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis, Rome, Italy, Sept. 2003.
 25. J.-M. Frahm and Reinhard Koch: Robust Camera Calibration from Images and Rotation. Proceedings of DAGM, pp. 249-256, Springer LNCS, Magdeburg, Germany, Sept. 2003.
 26. Evers-Senne, J.F. and Koch, R.: Interactive Rendering with View-dependent Geometry and Texture. Sketches and Applications SIGGRAPH, San Diego, Aug. 2003.
 27. Jan-Friso Evers-Senne and Jan-Michael Frahm and Jan Woetzel and Felix Woelk and Reinhard Koch: Distributed Realtime Interaction and Visualisation System. Proc. of 7th International Workshop on Vision, Modeling and Visualization (VMV), Erlangen, Germany, Nov. 2003.
 28. Koch, R. and Frahm, J.M. and Evers-Senne, J.F. and Woetzel, J.: Plenoptic Modeling of 3D scenes with a Sensor-augmented Multi-Camera Rig. Proceedings of Tyrrhenian International Workshop on Digital Communication (IWDC), Sept. 2002.
 29. Frahm, Jan-Michael and Evers-Senne, Jan-Friso and Koch, Reinhard: Network Protocol for Interaction and Scalable Distributed Visualization. Proceedings 3DPVT June 2002.
 30. R. Koch, B. Heigl, M. Pollefeys: Image-Based Rendering from Uncalibrated Lightfields with Scalable Geometry. In: Klette, Huang, Gimmel'farb (Eds.), Multi-Image Analysis. Proceedings 10th Int. Workshop on Foundations of Computer Vision (revised papers), Dagstuhl March 2000, Springer LNCS 2032, 2001.
 31. Koch, Reinhard : Visual-Geometric Scene Reconstruction from Image Streams. Proceedings of 6th International Workshop on Vision, Modeling and Visualization (VMV), Stuttgart, Nov. 2001.
 32. R. Koch, M. Pollefeys and L. Van Gool: Realistic 3D Scene Modeling from Uncalibrated Image Sequences. Proceedings of Int. Conf. Image Proc. Kobe, Japan, Oct. 1999.
 33. Kalibrierfreie Formerfassung: Theorie und Anwendungsmöglichkeiten der 3D- Oberflächenrekonstruktion aus unkalibrierten Bildfolgen Jahrestagung Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Fachtagung Optische Formerfassung: 3D-Messtechnik in Produktion und Entwicklung. Stuttgart, Germany, Oct. 1999.
 34. M. Pollefeys, R. Koch and L. Van Gool: A simple and efficient rectification method for general motion. Proceedings Int. Conference Computer Vision, Corfu, Greece, 1999.
 35. J. Vanden Wyngaerd, L. Van Gool, R. Koch, M. Proesmans: Invariant-based Registration of Surface Patches. Proceedings Int. Conference Computer Vision, Corfu, Greece, 1999.
 36. R. Koch, M. Pollefeys, B. Heigl, L. Van Gool and H. Niemann: Calibration of Hand-held Camera Sequences for



Plenoptic Modeling. Proceedings Int. Conference Computer Vision, Corfu, Greece, 1999.

37. R. Koch, M. Pollefeys and L. Van Gool: Robust Calibration and 3D Geometric Modeling from Large Collections of Uncalibrated Images. Proceedings DAGM, Sept. 1999.
38. B. Heigl, R. Koch, M. Pollefeys, J. Denzler and L. Van Gool: Plenoptic Modeling and Rendering from Image Sequences taken by Hand-held Camera. Proceedings DAGM, Sept. 1999.
39. R. Koch, B. Heigl, M. Pollefeys, L. Van Gool and H. Niemann: A Geometric Approach to Lightfield Calibration. Proceedings Inf. Conference CAIP, Ljubljana, Sept. 1999.
40. M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen and L. Van Gool: An Automatic Method for Acquiring 3D Models from Photographs: applications to an Archaeological Site. Proceedings ISPRS International Workshop on Photogrammetric Measurement, Object Modeling and Documentation in Architecture and Industry, Thessaloniki, July 1999.
41. M. Vergauwen, R. Koch, T. Tuytelaars, L. Van Gool: Vision-based Robotics Control Experiment on ETS VII. Proceedings of the ISAIRAS'99, Noordwijk, The Netherlands, June 1999.
42. T. Tuytelaars, L. Van Gool, L. D'haene, R. Koch: Matching of Affinely Invariant Regions for Visual Servoing. Int. Conference Robotics and Automation ICRA, Detroit, U.S.A. May 1999.
43. M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen and L. Van Gool: Flexible acquisition of 3D structure from motion, 10th International Workshop IMDSP'98, Alpbach, Austria, July 1999.
44. M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen and L. Van Gool: Automatic Generation of 3D Models from Photographs. Proceedings Virtual Systems and MultiMedia (VSMM'98), Japan, Oct. 1998.
45. M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen and L. Van Gool: Virtualizing Archaeological Sites. Proceedings Virtual Systems and MultiMedia (VSMM'98), Japan, Oct. 1998.
46. R. Koch, M. Pollefeys and L. Van Gool: Automatic 3D Model Acquisition from Uncalibrated Image Sequences. Proceedings Computer Graphics International, pp.597-604, Hannover, Germany, June 1998.
47. L. Van Gool, F. Defoort, R. Koch, M. Pollefeys, M. Proesmans and M. Vergauwen: 3D modeling for communications. Proceedings Computer Graphics International, pp.482-487, Hannover, Germany, June 1998.
48. M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen and L. Van Gool: Metric 3D Surface Reconstruction from Uncalibrated Image Sequences. Proc. SMILE Workshop (post-ECCV'98), LNCS, Springer, June 1998.
49. R. Koch, M. Pollefeys and L. Van Gool: Multi Viewpoint Stereo from Uncalibrated Video Sequences. Proc. ECCV'98, Freiburg, 1998, LNCS 1406, Springer.
50. M. Pollefeys, R. Koch, M. Vergauwen and L. Van Gool: Flexible 3D Acquisition with a Monocular Camera. Proceedings IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation'98, Vol.4, pp.2771-2776, Leuven, 1998.
51. M. Pollefeys, R. Koch and L. Van Gool: Self-Calibration and Metric Reconstruction in spite of Varying and Unknown Internal Camera Parameters. Proc. ICCV'98 (International Conference on Computer Vision), pp.90-95, Bombay, 1998.
52. Koch, R.: 3D Modeling of Human Heads from Stereoscopic Image Sequences. Proceedings Conference of the German Pattern Recognition Society 96 (Deutsche Arbeitsgemeinschaft Mustererkennung), Heidelberg, Germany, Sept. 1996.
53. Koch, R.: Surface Segmentation and Modeling of 3-D Polygonal Objects from Stereoscopic Image Pairs. Proceedings International Conference on Pattern Recognition 96, Vienna, Austria, August 1996.
54. Rost, U., Koch, R.: Rekonstruktion von Schleifpapieroberflächen für die Qualitätskontrolle. 17. DAGM-Symposium Mustererkennung 1995 13.-15. Sept., Bielefeld, Deutschland, 1995.
55. Koch, R.: 3-D Surface Reconstruction from Stereoscopic Image Sequences. Proceedings International Conference of Computer Vision ICCV '95, Cambridge, MA., USA, June 1995.
56. Koch, R.: 3-D Scene Modeling from Stereoscopic Image Sequences. in: Paker, Y. and Wilbur, S. (Ed.), Image Processing for Broadcast and Video Production, Hamburg 1994, pp. 128-135, Springer series on Workshops in Computing, ISBN 3-540-19947-0, Springer Great Britain, 1994.
57. Toenjes, R., Grau, O., Koch, R.: Analyse durch Synthese Modellierung von 3D Objekten in Stereobildfolgen. Proceedings Workshop of Visual Computing, Darmstadt, Germany, 1994.
58. Koch, R.: Model-based 3D Scene Analysis from Stereoscopic Image Sequences. 2nd Workshop on 3DTV, Rennes, France, Nov. 1993.
59. Koch, R.: Automatic Reconstruction of Buildings from Stereoscopic Image Sequences. Computer Graphics Forum Vol. 12 (3), Proceedings of Eurographics '93, Barcelona, Spain, Sept. 1993.
60. Koch, R.: Model-Based 3D Scene Analysis from Stereoscopic Image Sequences, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, ISPRS Conference '92, Washington, D.C., USA, August 1992.
61. Koch, R.: Adaptation of a 3D Facial Mask to Human Faces in Videophone Sequences using Model Based Image Analysis. Proceedings Picture Coding Symposium PCS '91, pp. 285 - 288, Tokyo, Japan, Sept. 1991.
62. Liedtke, C.-E., Busch, H., Koch, R.: Shape Adaptation for Modelling of 3D Objects in Natural Scenes. CVPR Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hawaii, USA, 1991.



63. Koch, R., Liedtke, C.-E.: 3D-Modelling of Natural Scenes from Image Sequences for Stereoscopic Reconstruction. Proceedings 3DTV Workshop, Darmstadt, Germany, Sept. 1990.
64. Koch, R.: Automatic Modelling of Natural Scenes for Generating Synthetic Movies. In: Vandoni, C.E. and Duce, D.A. (ed.) EUROGRAPHICS Association, pp. 215 -224, Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 1990.
65. Liedtke, C.-E., Busch, H., Koch, R.: Automatic Modelling of 3D Moving Objects from a TV Image Sequence. Proceedings of SPIE Vol. 1260, Sensing and Reconstruction of Three-Dimensional Objects and Scenes, pp. 230 - 239, Santa Clara, CA., USA, Feb. 1990.
66. Koch, R., Busch, H.: A Hierarchical Strategy for Analysing Motion, Shape, and Colour of Three-dimensional Objects from an Image Sequence. Proceedings 2nd International Workshop on 64 KBit/s Coding of Moving Video, Hannover, Germany, Sept. 1989.

Auszeichnungen und Preise

1982: Mitglied der American Physics Honor Society Sigma Pi Sigma

1995: Preis der Deutschen AG Mustererkennung (DAGM '95) für den Beitrag: U. Rost und R. Koch, Rekonstruktion von Schleifpapieroberflächen für die Qualitätskontrolle.

1996: ECVNet Technology Innovation Award des ECVNet Consortiums bei der International Conference on Pattern Recognition '96, für das Produkt Sphinx der DIMENSION GbR.

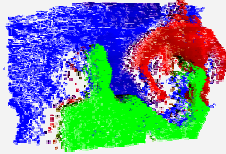
1996: Preis der Deutschen AG Mustererkennung (DAGM '96) für den Beitrag: R. Koch: 3D Modeling of Human Heads from Stereoscopic Image Sequences.

1997: OLYMPUS Preis 1997 der Olympus Europa Stiftung 'Wissenschaft für Leben' während der DAGM '97, für die Beiträge zur automatischen 3D Oberflächenmodellierung aus stereoskopischen Bildsequenzen.

1998: David Marr Award bei der International Conference of Computer Vision ICCV '98 für den Beitrag: M. Pollefeys, R. Koch, L. Van Gool: Self-Calibration and Metric Reconstruction in spite of Varying Internal Camera Parameters.

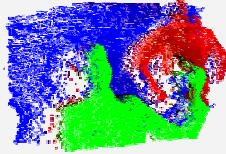
1999: Hauptpreis der Deutschen AG Mustererkennung (DAGM '99) für die Beiträge: R. Koch, M. Pollefeys and L. Van Gool: Robust Calibration and 3D Geometric Modeling from Large Collections of Uncalibrated Images, sowie: B. Heigl, R. Koch, M. Pollefeys, J. Denzler and L. Van Gool: Plenoptic Modeling and Rendering from Image Sequences taken by Hand-held Camera.

2005: Best Student Paper Award for: F. Woelk, I. Schiller, R. Koch: An Airborne Bayesian Color Tracking System. IEEE Intelligent Vehicles Symposium IV05, Las Vegas, USA, June 5-7, (2005).



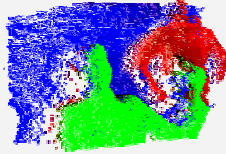
Kurzprofil Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth

Geburtsdatum	21.03.1954
Studium, 1974-1979	Elektrotechnik an der Universität Karlsruhe mit Schwerpunkt in Regelungstechnik und Informatik
1979-1983	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (Prof. Dr. Dr. Föllinger) der Universität Karlsruhe
Promotion, 1983	Ein neues Verfahren zur Ordnungsreduktion und Reglerentwurf auf der Basis reduzierter Modelle
1983-1988	Systemingenieur bei der Fa. Dornier System, Bereich Raumfahrt, Abteilung Regelungstechnik
1988-2000	Professor für Regelungs- und Sensortechnik an der Fachhochschule Ravensburg-Weingarten
2000-2001	Lehrstuhlvertretung in der Fachgruppe für Regelungs- und Steuerungstechnik an der Universität Siegen
Seit 2001	Leiter der Fachgruppe für Regelungs- und Steuerungstechnik im Fachbereich Elektrotechnik und Informatik der Universität Siegen
2000	Übernahme der Leitung des Projektbereichs 4, "Automation, Mechatronik und Medizintechnik" im Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)
Forschungspreise 2001	<ul style="list-style-type: none">• Verleihung des Schweizer Innovationspreises, St. Gallen, Schweiz• Verleihung des Kulturpreises der Städte Ravensburg und Weingarten, Weingarten
Lehrgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Regelungstechnik,• Robotik• Mechatronische Systeme (in Englisch)• Advanced Control (in Englisch)• Intelligent Control (in Englisch)• Attitude Control for Space Applications (in Englisch)
Forschungs- u. Arbeitsgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Navigation und Lokalisation bei kooperierenden mobilen Robotern• Regelung in der Luft- und Raumfahrt• Bahnplanung und Hindernisvermeidung bei Manipulatoren• Tele-Control, Tele-Manipulation, Tele-Präsenz• E-learning
Aktuelle Vorhaben	<ul style="list-style-type: none">• Navigation mobiler Roboter mit Hilfe der PMD-Kamera• Search and Rescue Robotics• Outdoor Robotics• Environmental Exploration (E²N)
Aktuell:	<ul style="list-style-type: none">• Seit 1992 Leiter des Steinbeis-Transferzentrums „Angewandte Rechner- und Software-Technologien“• Seit 1994 Mitglied im "Technical Committee on Components and Instruments" der "International Federation of Automatic Control"• Seit 2002 Leiter des "Technical Committee on Computers and Telematics" der "International Federation of Automatic Control"
Weitere Informationen	http://www.uni-siegen.de/rst

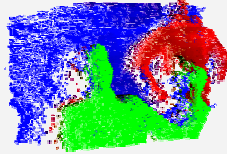


Schriftenverzeichnis Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth

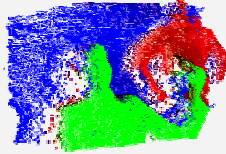
1. Niramon Ruangpayoongsak, Hubert Roth, Rudolf Schwarte: Position Calibration of a Mobile Robot Based on 3D Vision. 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, from July 4 to July 8, 2005.
2. Alexander Prusak, Hubert Roth, Rudolf Schwarte: Application of 3D-PMD Video Cameras for Tasks in the Autonomous Mobile Robotics. 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, from July 4 to July 8, 2005.
3. O. Roesch, H. Roth, M. Klinkov: Vibration Damping of a Flexible Structure. VSTech2005, The First International Symposium on Advanced Technology of Vibration and Sound, page 347-351, Mjyajima, Hiroshima, Japan, 2005.
4. O. Roesch, H. Roth, A. Iqbal: Extended Stability margins on controller Design for Nonlinear Input Delay Systems. IFAC World-Congress, Prague, 2005.
5. O.J. Roesch, M. Ruehl, H. Roth: Feedback Control with Varying Time Delays by a Dead-Beat Controller. IPSI 2005 SPAIN, International Conference on Advances in the Internet, Processing, Systems, and Interdisciplinary Research, Girona, Spain, 2005.
6. Otto J. Roesch, Alexander Prusak, Hubert Roth: Remote Controllable Vibration Damping Platform. 1st IFAC Symposium on Telematics Applications in Automation and Robotics, June 2004, Helsinki, Finland, page 155-160.
7. Frauke Driewer, Herbert Baier, Klaus Schilling, Jiri Pavlicek, Libor Preucil, Niramon Ruangpayoongsak, Hubert Roth, Jari Saarinen, Jussi Suomela, Aarne Halme, Miroslav Kulich, Jan Kout: Hybrid Telematic Teams for Search and Rescue Operations. IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics, Gustav Stresemann Institute, Bonn, Germany, 24. - 26. May 2004.
8. O. J. Rösch, H. Roth: Internet Laboratories in the Control Engineering Education. 15th EAAEIE Annual Conference on Innovations in Education for Electrical and Information Engineering, Mai 2004, Sofia, Bulgaria, ISBN 954-9518-22-1, page 34 - 38.
9. Toma L. Dragomir, Hubert Roth and Otto J. Roesch: Control Loop Adjustment of Plant Uncertainties. SCIENTIFIC BULLETIN of "Politehnica" University of Timisoara, ROMANIA, Transactions on AUTOMATIC CONTROL and COMPUTER SCIENCE, Vol. 49 (63), No. 1, 2004, ISSN 1224-600X, page 227 - 234.
10. Hubert Roth, Otto Roesch, Alexander Prusak, Joerg Kuhle: Experiments in mechatronics for remote laboratories. 21st ICDE World Conference on Open Learning & Distance Education, Lifelong Learning in the Networked World; February 2004, Hong Kong, Page 82.
11. H. Roth, R. Schwarte, N. Ruangpayoongsak, J. Kuhle, M. Albrecht, M. Grothof, H. Heß: 3D Vision Based on PMD-Technology and Fuzzy logic control for Mobile Robots. Second International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control (ICSCCW – 2003), Antalya, Turkey, 9. - 11. September 2003.
12. Klaus Schilling, Hubert Roth, Christina Spilca: A TELE-EXPERIMENT ON ROVER MOTOR CONTROL VIA INTERNET. Journal of Robotics Systems, 2003.
13. Hubert Roth, Otto Rösch, Alexander Prusak: Internetbasierte Laborexperimente für die regelungstechnische Ausbildung. at–Automatisierungstechnik (2003) 11, Oldenbourg Verlag, S. 518 - 524.



14. H. Roth, A. Prusak, O. Rösch: Internetbasiertes Buchungs- und Verwaltungssystem "Learn2Control" für Tele-Experimente. (Fachtagung Telematik 2003), June 2003 Siegen, Germany, ISBN 3-18-091785-7, page 105 - 114.
15. H. Roth, O. Roesch, A. Prusak: Virtual Laboratories for Experiments in Mechatronics. GMA Kongress 2003 "Automation und Information in Wirtschaft und Gesellschaft", Juni 2003, Baden Baden, Germany, ISBN 3-18-091756-3, page 331 - 338.
16. H. Roth, O. Roesch, A. Prusak, J. Kuhle, A. Hernán González: Mechatronic Experiments in the Engineering Education. (14th EAEEIE International Conference on Innovations in Education for Electrical and Information Engineering), June 2003, Gdansk, Poland, ISBN 83-918622-0-8, page 15.
17. Roth, Hubert; Rösch, Otto; Kuhle, Jörg; Prusak, Alexander: Virtual laboratories for control engineering education. (UNESCO (UICEE) Annual Conference on Engineering Education Cairns/Australien February) 2003.
18. K. Dinesh Kumar; L. Karunamoorthy; Roth, Hubert; T. T. Mirmalinee: WEB Based Real-Time Mobile Access to Integrated Automation. (ICARCV 2002, Control Automation Robotics Vision Singapore 2.-5. December) 2002.
19. Roth, Hubert; Rösch, Otto; Kuhle, Jörg; Prusak, Alexander; A. Herán González: Virtuelle Labors for Experimente in der Mechatronik. (UNESCO (UICEE) World Transactions on Engineering and Technology Education Melbourne/Australia) 2002.
20. George S. Georgiev; Roth, Hubert; Silvia Stefanova; Georgi T. Georgiev; Emil Stoyanov; Rösch, Otto: How and why to build and use virtual laboratories. (UNESCO (UICEE) World Transactions on Engineering and Technology Education Melbourne/Australia) 2002.
21. Roth, Hubert; Prusak, Alexander: E-Learning-Portal "Learn2Control". In: Buletinul Stiintific al Universitatii "Politehnica" din Timisoara, Romania, Seria Automatica si Calculatoare, Periodica Politehnica, Transactions on Automatic Control and Computer Science 47 (61) (2002)
22. Roth, Hubert: Development of a modular surgery robot system. (Collaboration program to develop the Bachelor of Emerging Technologies, Azerbaijan State Oil Academy Baku, Azerbaijan November) 2002.
23. K. Dhinesh Kumar; Roth, Hubert; L. Karunamoorthy: Critical success factors for the implementation of integrated automation solutions with PC based control. (The 10th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED) Lisabon/Portugal) 2002.
24. Silviya Stefanova; Emil Stoyanov; Georgi Georgiev; Hubert Roth; Otto Roesch: An approach of standardizing the Virtual Labs structure. (13th EAEEIE International Conference on Innovations in Education for Electrical and Information Engineering York, England April) 2002. 5 Seiten.
25. Otto J. Rösch, Klaus Schilling and Hubert Roth: Haptic interfaces for the remote control of mobile robots. Control Engineering Practice, November 2002. In Volume 10, Issue 11, Pages 1309-1313.
26. H. Roth, O. Roesch, J. Kuhle, A. Prusak, A. Hernán González, G. Georgiev, G. Lehov, S. Stefanova: Remote laboratories for experiments in mechatronics. Monash Engineering Education Series, 6th Baltic Region Seminar on Engineering Education, September 2002, p. 75 - 78.
27. Roth H., O. Roesch, C. Arhelger, W. Chonnaparamutt: Kalman Filter and Controller Design for the Mobile Robot Experiment via Internet. Workshop, August 2002, Sherbrooke Canada.
28. Roth, H., K. Schilling, O. Roesch: Haptic Interfaces for Remote Control of Mobile Robots. 15th IFAC World Congress b'02, July 2002, Barcelona Spain, page 212.
29. Roth, H., K. Schilling, O. Roesch: Control of Mobile Robots with Force Feedback Devices. Mechatronics 2002, June 2002, Enschede Netherlands, ISBN 90 365 17672, page 100.



30. G. Georgiev, E. Stoyanov, I. Tscvetkov, S. Stefanova, D. Stoykov, H. Roth: Step by Step Towards the Virtual Lab Organisation. International Journal Information Theories & Applications, Volum 9, Number 4, 2002, pp. 153-160.
31. Silviya Stefanova, Emil Stoyanov, Georgi Georgiev, Hubert Roth, Otto Roesch: An approach of standardizing the Virtual Labs structure. 13th EAEEIE International Conference on Innovations in Education for Electrical and Information Engineering, April 2002, York - England, ISBN 1-85911-009-6, page 5.
32. Klaus Schilling, Hubert Roth and Robert Lieb: Remote Control of a 'Mars Rover' via Internet - to Support Education in Control and Teleoperations. Acta Astronautica Vol. 50, No. 3, pp. 173-178. 2002.
33. R. D. Irwin, T. M. Adami, H. Roth, G. Münt, O. Roesch: Sensor and Control Concepts for the Internet-Based Flexlab Experiment. Workshop on Internet Based Control Education, IBCE'01, December 2001, Madrid - Spain, page 231 - 234.
34. Klaus Schilling, Hubert Roth und Otto Rösch: Fernsteuerung und Telesensorik für mobile Roboter in Raumfahrt, Industrie und Ausbildung. at - Automatisierungstechnik 49 (2001) 8, Oldenbourg Verlag, Seite 366-372.
35. Cristina Spilca, Klaus Schilling, Hubert Roth: Developing a Motor Control Experiment for a Virtual Laboratory. Proceedings 1st IFAC Conference Telematics Applications in Automation and Robotics, FH Ravensburg-Weingarten Juli 2001, Seite 391-395.
36. Otto J. Rösch, Klaus Schilling, Hubert Roth: Haptic Interface for Remote Control of Mobile Robots. Proceedings 1st IFAC Conference Telematics Applications in Automation and Robotics, FH Ravensburg-Weingarten Juli 2001, Seite 143-147.
37. John Ogness, Klaus Schilling, Hubert Roth: A System to Facilitate Telematic Implementation. Proceedings 1st IFAC Conference Telematics Applications in Automation and Robotics, FH Ravensburg-Weingarten Juli 2001, Seite 117-122.
38. Hubert Roth, Gerhard Münt: Sensing and Control for Flexible Structures. Proceedings of the Workshop "Tele-Education in Mechatronics Based on Virtual Laboratories", FH Ravensburg-Weingarten Juli 2001, Seite 60.
39. Cristina Spilca, Klaus Schilling, Hubert Roth: Developing a virtual laboratory experiment. Proceedings of the Workshop "Tele-Education in Mechatronics Based on Virtual Laboratories", FH Ravensburg-Weingarten Juli 2001.
40. K. Schilling, H. Roth, O. J. Rösch: Virtual Laboratories for Engineering Education. 4th Unesco International Engineering Education / UICEE - Annual Conference on Engineering Education, Feb. 2001 Bangkok, Thailand.
41. K. Schilling, H. Roth, O. J. Rösch: Mobile Mini-Robots for Engineering. Education 4th Unesco International Engineering Education / UICEE - Annual Conference on Engineering Education, Feb. 2001 Bangkok, Thailand.
42. Roth, Hubert: Performing Control Experiments in Virtual Laboratories via Internet. ACE 2000 Symposium, Sea World Nara Resort, Australia, 17th - 19th December, 2000.
43. K. Schilling, H. Roth, O. J. Rösch: Virtual Laboratories to Perform Experiments in Mechatronics. Proceedings 11th EAEEIE Conference, Ulm 2000, pp. 208 - 212.
44. K. Schilling, H. Roth, O. J. Rösch: Fernsteuerung Mobiler Roboter. Forschungstag der Fachhochschulen Baden-Württemberg, November 2000.



45. Klaus Schilling, Hubert Roth, Otto Rösch: Fernsteuerung mobiler Roboter in der Tele-Ausbildung. horizonte 17, November 2000, Seite 19-20.
46. K. Schilling, H. Roth, O. J. Rösch: Sensordatenfernerfassung und Fernsteuerung von Maschinen über das Internet. Siemens Automatisierungskreis, Konstanz, Mai 2000.
47. K. Schilling, H. Roth, O. J. Rösch: Mechatronik Experimente in Virtuellen Labors. KI - Künstliche Intelligenz 2/2000, pp. 41 - 46.
48. K. Schilling, H. Roth, O. Rösch: Mechatronik-Experimente in Virtuellen Labors. Dokumentation Workshop VVL, Aalen 1999, S. 37 - 44.

3D-Camera of High 3D-Frame Rate, Depth-Resolution and Background Light Elimination Based on Improved PMD (Photonic Mixer Device)-Technologies

H. Kraft, J. Frey, T. Moeller, M. Albrecht, M. Grothof, B. Schink, H. Hess, Universität Siegen;
B. Buxbaum, PMDTechnologies GmbH Siegen

Universität Siegen
Institut für Nachrichtenverarbeitung (INV)
Hölderlinstraße 3
57068 Siegen

PMDTechnologies GmbH
Am Eichenhang 50
57076 Siegen

ABSTRACT AND INTRODUCTION

The knowledge of three-dimensional data is essential for many control and navigation applications. Especially in the industrial and automotive environment a fast and reliable acquisition of 3D data has become a main requirement for future developments.

This contribution describes novel 3D camera modules used in Time-of-Flight measurement systems for 3D imaging applications. The key components are array and line sensors which can measure the distance to the target pixelwise in parallel, i.e. without scanning. Therefore these cameras have the advantages of fast imaging and high lateral resolution combined with the depth information of the captured scene. The sensors consist of smart pixels, called the Photonic Mixer Device (PMD) which enables fast optical sensing and demodulation of incoherent light signals in one component [1][2].

To realize a Photonic Mixer Device there are different techniques currently under investigation. Sensors are conceivable working with different types of electromagnetic waves, e.g. light, microwaves or ultrasound. In this paper two types of optical 3D-cameras with different PMDs are described. Each camera consists of a sensor chip, a modulated optical transmitter, control and processing electronics and software package. One camera is realized with standard CMOS technology based on Photogate (PG) PMD. The other sensor uses a different type of PMD, called Metal-Semiconductor-Metal (MSM) PMD.

Beginning from the description of both PMD types and their characteristics the system concept is shown. Based on realized cameras the sensor architectures and system environment are described. Finally measurements are presented to show the performance of the cameras in terms of accuracy, resolution and suppression of background illumination.

THE PHOTOGATE PMD (PG-PMD)

This section describes the principle of a simplified Photogate PMD realized in CMOS technology. The PG-PMD element is a smart pixel device because the mixing process of the electric and optical signal takes place in the device. **Figure 1** shows an illustration of a single pixel PG-PMD sensor element. It is a five-terminal device with an optical input window, i.e. two transparent modulation electrodes in the middle of the illustration. These photogates are isolated from the substrate by a thin oxide layer. The gates are conductive and transparent for the received light. On the left and the right there are readout diodes which are connected to the pixel readout circuitry. In a PG-PMD the charges do not only move in one direction, they move to the left or to the right depending on the reference signal applied to the modulation gates. The potential distribution in the surface region is influenced by these push-pull voltages leading to a "dynamic seesaw" for the generated charges. If the incident light is constant and the modulation is a rectangular signal with a duty cycle of 50% the generated charge carriers within a modulation period move to the left and to the right equally. At the end of such a modulation process the output voltage at the readout nodes are the same which is shown in **Figure 1 b)**. If both signals are, e.g. rectangular signals and there is no phase delay between them, all charges will be moved to one of both readout diodes which is shown in **Figure 1 c)**. The modulation of the light intensity and its phase delay to the electrical reference signal results in a difference between the two output voltages. Obviously the difference of both output nodes is directly dependent on the phase delay between light and pixel modulation and represents the correlation function. This data can be used to calculate the distance from a light-reflecting object to the sensor as described in a later section.

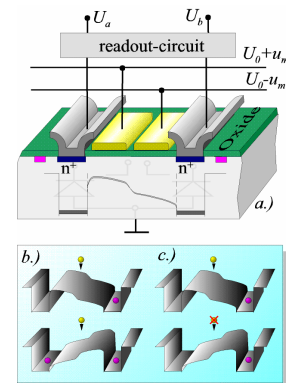


Figure 1: Operation principle of PG-PMD

THE METAL SEMICONDUCTOR METAL PMD (MSM-PMD)

The MSM-PMD that is used in one of our systems is based on photodiode structures using Schottky-barrier structures as shown in a later section. The bandwidth of these diodes is experimentally proven up to several GHz, depending on the material, the barrier realization, and so on. This fact offers a very fine resolution in a ranging system based on such a MSM-PMD reception principle. **Figure 2** shows the basic structure of such a MSM-PMD receiver. The electrical reference signal is used for modulation of the optical transmitter and for demodulation of the

reflected light signal $P_{opt}(t)$. For demodulation the reference signal is changed into push pull signals $+u_m(t)$ and $-u_m(t)$. The AC-part of these signals is applied to the MSM-diode via the decoupling networks $DN_{1,2}$.

The readout networks $RN_{1,2}$ on the right part suppress these RF-signals. Only that part of the signal which correlates to the modulation voltage, is *slow* enough to pass these networks. The readout circuit RC analyses the signal and delivers the results. The main feature of this circuit is that the mixing of the generated charge carriers takes place directly inside the light sensitive area of the diode. The closed circuit on the right side of the structure is the key to an improvement of the SBI (Suppression of Background Illumination)-functionality [3]. Any uncorrelated photocurrents $i_{uk1,2}$ are – on the average – equally distributed onto both arms. Therefore these uncorrelated signals compensate each other. This effect only depends on the symmetry of the structure and is attained without any additional components. The correlated part of the averaged photocurrent i_k has a flow-direction depending on modulation phase. This results in different voltages in the readout networks after a certain integration time. These voltages are the values that are analyzed by the readout circuit to deliver the measurement result.

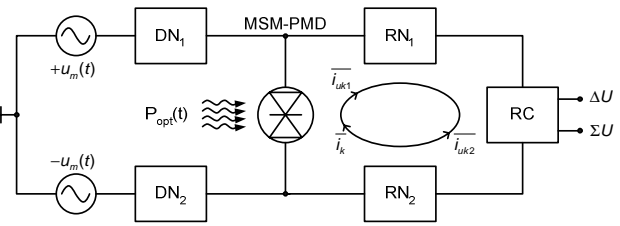


Figure 2: Basic structure of a SM-PMD-device based on a MSM-diode. The MSM-diode as central mixing unit is displayed with the symbol in the middle of the picture

SENSOR CONCEPT AND CAMERA DESCRIPTION

Smart optical sensor array based on PG-PMD

Our development in the past has led to a Photogate-pixel with scalable pixel pitch without a loss in the mixing efficiency. The active pixel size can be modified based on application requirements from $20\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ up to $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$. Other application specific sizes and aspect ratios are also conceivable. This feature is based on a new kind of pixel layout. The structure of readout channels and modulation gates are independent of the pixel dimension and optimized for matrix structures. Photogate pixels with large dimensions can therefore offer almost the same performance as small designs. The channel width has been optimized for higher bandwidth (up to several 100 MHz) to increase pixel performance and accuracy. **Figure 3** shows the PG-structure of the 16×16 matrix in the described 3D camera. The active area consists of 2 rows with 9 fingers each and has a typical channel width of $10\mu\text{m}$. Single pixel and line pixel sensors can reach an optical fill factor up to 60% (designed in a typical $0.6\mu\text{m}$ process). A smaller process can offer a fill factor of approx. 75% in the optical active area.

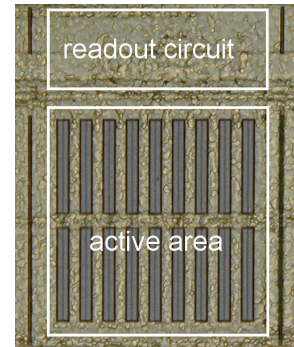


Figure 3: Photogate structure

Even if a PMD pixel looks a little exotic in comparison to a 2D active pixel, a PG-PMD sensor is build in a standard process. The sensor array was integrated in a $0.6\mu\text{m}$ triple metal n-well CMOS process. A 16×16 array with a pixel pitch of $210\mu\text{m} \times 155\mu\text{m}$ was developed. Photogate pixels normally have two output signals and so the read out circuitry consists of two separate branches. One of them is shown in **Figure 4**. A simple PG-pixel has a reset switch (M1), a pixel select switch (M3) and a read out buffer (M2) working as a source follower. All pixel source followers share one load transistor (M4) at the bottom of each column. The column

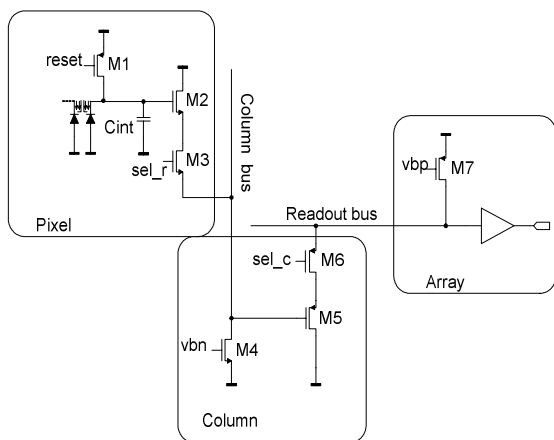


Figure 4: Simplified schematic of the PG-pixel and readout circuitry in the PMD array

circuitry consists of a PMOS source follower (M5) with the column select switch (M6). At the end of the row a load transistor (M7) and the output stage are placed. The output signal is converted to digital values off chip. In further designs the analog-digital converter could be integrated on the sensor chip achieving higher frame rates with lower system costs. All bias currents are proper calculated to realize a maximum settling time of 150ns. In combination with our actual camera system a pixel read out speed of 2MSamples/s resulting in a total read out time of $128\mu\text{s}$ is realized. Standard CMOS active pixel sensors need a correlated double sampling for each column and a double delta sampling for the whole array. With these techniques fixed pattern noise can be reduced. Our PG-PMD sensor doesn't need these additional circuits. For calculating the 3D data several integration cycles respectively their output values are needed so that a kind of double or even multi sampling is done, therefore fixed pattern noise is eliminated. Using the absolute values of both integration voltages grayscale data can be calculated as additional information of the observed scene. [1]

High resistance of the modulation lines and the capacity of the modulation gates of each PMD may result in a phase shift of modulation and so in a distance offset variation from pixel to pixel. In comparison to previous designs the modulation lines are more symmetrical and they have a lower resistance to avoid this error. The root-like modulation line design can be seen in top of the chip layout in **Figure 5**. The digital control circuit consists of two units which are the row and the column control circuit. Standard logic blocks are used achieving higher read out speed than 2MHz. **Figure 6** shows the camera module with active illumination, optical components and periphery.

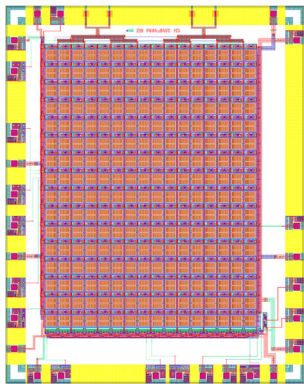


Figure 5: Layout of PG-PMD chip

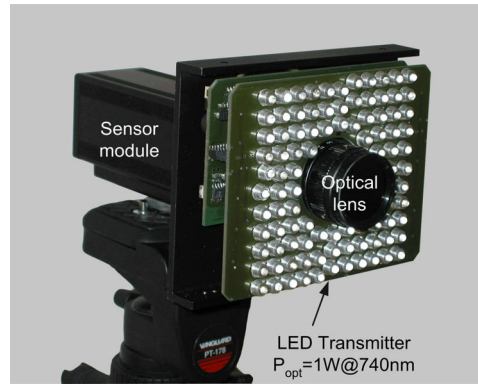


Figure 6: 3D camera module on tripod

Smart Optical sensor line based on MSM-PMD

The usage of MSM-PMD has enormous advantages for applications with disturbing illumination, i.e. uncorrelated background light, without adding additional circuitry for SBI. Furthermore these structures are proven with modulation frequencies up to several GHz allowing a very fine resolution of the 3D information [3]. The following figure illustrates the principle of a smart optical pixel with MSM-PMD in our 3D-camera. In contrast to the description given above a technique of single sided modulation and readout is used. Using this method a high on-chip integration level can be achieved to realize multipixel sensors without additional off-chip filtering.

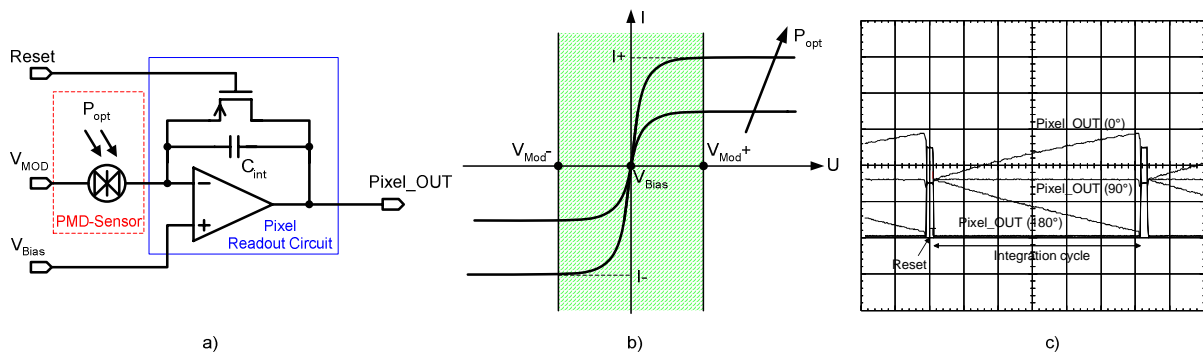


Figure 7: a) Pixel schematic b) typical IV-characteristics of a MSM structure: The switching of the operation points provides the mixing and the SBI functionality c) Integration examples with different phases (0°, 90°, 180°)

For first applications a line sensor of 8 MSM-PMD elements has been defined. Each pixel consists of a MSM-PMD sensor and a specific readout circuit which is based on an active op-amp integrator with reset. This integrator ensures a constant voltage at the readout side of the PMD element (approx. V_{Bias}). All pixels use the same modulation source (V_{MOD}) and have a global reset. After a reset the correlation of the electrical modulation signal and the incident light reflected by the 3D scene (P_{OPT}) is analyzed by integration of the photocurrent as shown above.

The correlation result due to the phase shift between these signals is indicated by a voltage (Pixel_OUT). The readout of the sensor line is done sequentially at the end of the integration cycle. The output voltage of each pixel is processed by an external signal processing unit and is used to calculate the distance from the sensor to the target for each pixel separately as described in the next section. The realization of such a 1x8 line MSM-PMD sensor chip is shown in **Figure 8**.

To combine state-of-the-art MSM structures with application specific CMOS circuitry a first multichip approach has been realized. The MSM-PMD sensor line itself consists of 8 interdigitated Schottky diodes realized with gallium arsenide MSM structures. The outputs of these diodes are connected to a silicon die with an 8 stage readout circuitry using a standard wire bonding technology. Using integrable MSM devices, e.g. silicon based Schottky structures high dense single chip solutions are possible and currently under investigation.

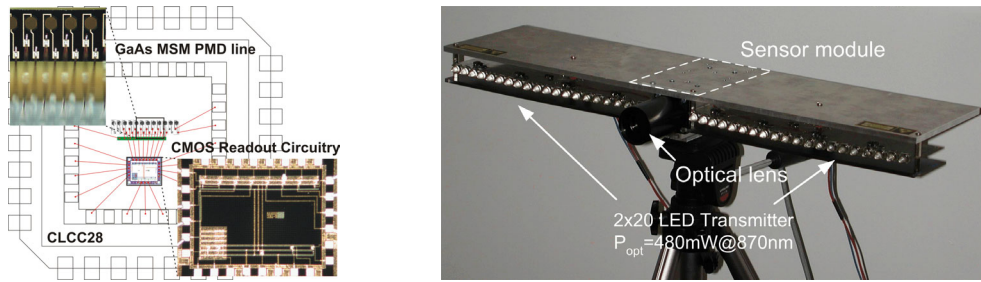


Figure 8: Left: MSM sensor line with CMOS readout circuitry in a multichip approach. Each MSM structure has a diameter of 150µm, the pixel pitch is 250µm. Right: 3D camera module with active illumination on a tripod.

Description of camera system environment

In principle the system environments for both cameras are the same. It can be divided into four main parts. The first part is the system board consisting of a power supply, a microcontroller, an analog-to-digital converter and a programmable logic device. A PMD-chip (PG or MSM) and its required peripheral devices are comprised in the second part, the so called "frontend". To generate the optical signal a third part is needed. The light source mostly consists of an LED-array and an adapted power supply. The last part that is needed is the case of the camera including the optical components (lens, optical filter, ...).

Figure 9 shows an overview of these parts and their function in the camera system.

The function of the programmable logic device is to generate two rectangular signals with the same frequency and duty cycle. The first signal, whose phase can be shifted, is converted into an optical one via the LED array. This optical signal is sent to the objects and the reflected light is received by the PMD-array (PG or MSM).

The second signal of the programmable logic device is directly connected to the PMD-array. The main function of the PMD-array is to correlate the received optical signals with the electrical reference signal and send the results via the analog-to-digital converter to the microcontroller. The microcontroller collects the results of four different measurements. The measurements only differ in the phase (0°, 90°, 180°, 270°) between electrical and optical signal. The results are four equidistant points of the correlation function of the received optical signal in one PMD-pixel and the electrical reference signal. With these points it is possible to determine the offset, the amplitude and the phase delay of the correlation function. The phase delay itself is proportional to the distance which the light has to cover on its way to the object and back, therefore the distance matrix can be calculated.

The communication between the camera system and its environment is based on standard serial interface. The camera system can be connected to industrial control units or a PC via this interface. The incoming data may be used to control a robotic unit, for monitoring purposes or just for visualization of the captured 3D image. Different kinds of visualization are already implemented in C++ and Matlab software.

In the current version of this camera the whole timing control and the readout of the measurement results are implemented in the microcontroller. In the next version which is currently under development the programmable logic device will take over these functions. Additionally the microcontroller will be faster and therefore frame rates like video frame rates or higher will be possible in the next generation of high resolution 3D camera.

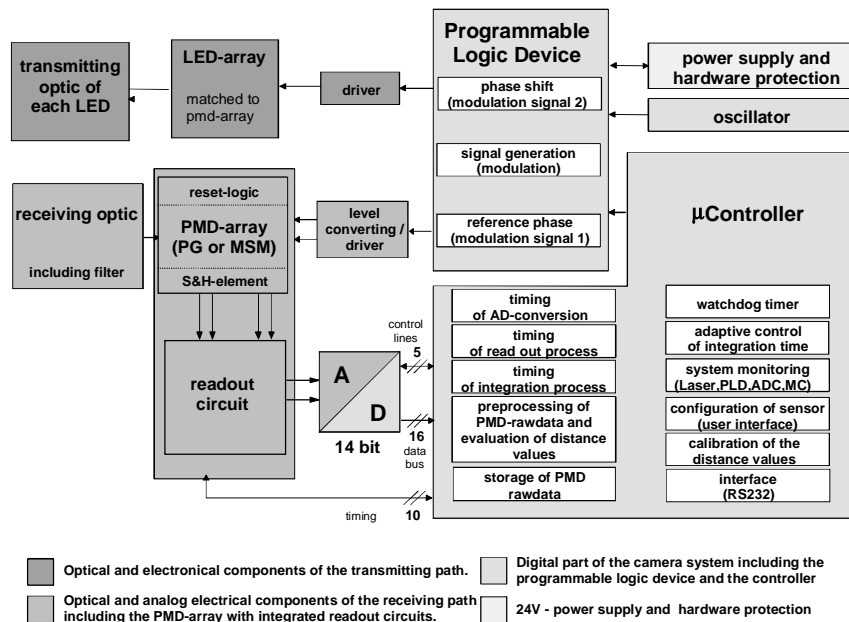


Figure 9: Basic structure of a MSM-PMD- or PG-PMD-camera system

MEASUREMENT RESULTS

16x16 PG-PMD 3D camera

Figure 10 shows an exemplary measurement of 8 arbitrary pixels within the given matrix in the 3D PG-PMD camera. The target was a plain surface of white paper, the integration time was kept constant. The modulation frequency was 20 MHz which allows a range of unambiguously of 7.5m [1]. The standard deviations of the measured values were in the range from approx. 12mm (@1500mm) to approx. 35mm (@3500mm). Of course, the accuracy of the measurement depends on several parameters shown below. For example, the signal to noise ratio is affected by many things like optical power, the distance to the target, background light, system noise and so on.

$$\Delta L = \frac{\lambda_{RF}}{4\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\sqrt{2+K^2}}{K \cdot SNR}$$

ΔL	distance resolution in standard deviation
N	number of measurements
K	modulation contrast
SNR	signal to noise ratio
λ_{RF}	modulation wavelength

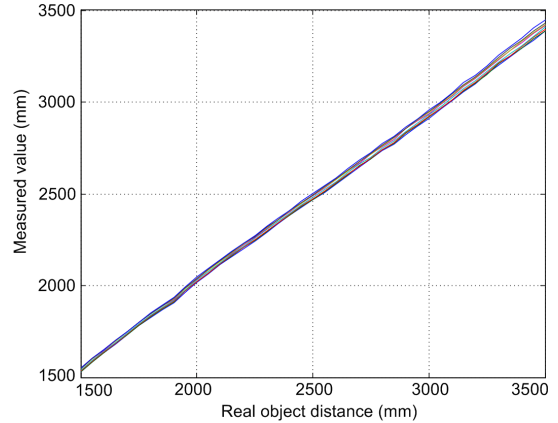


Figure 10: Measurement (mean value) of 8 arbitrary pixels within the PG-PMD camera. The integration time was constant (5ms). Target was a plain surface of white paper.

As described our camera has a total number of 256 pixels for parallel 3D measurement without scanning. In contrast to other low resolution 3D ranging systems, e.g. radar, this camera is already suitable for many applications in industrial and automotive field. In addition to the 3D information our camera has an additional benefit with the acquisition of 2D grayscale information for enhanced image processing. An exemplary measurement of the 16x16 camera is given in **Figure 11** on the left side. It shows a 3D image of a human hand in front of a plain surface. The measured distance is visualized in different hues. Additionally the 3D image has been rotated and smoothed for a better three dimensional perception. For comparison a high resolution 2D image is given on the right side in **Figure 11**.

With our sensor array such 3D images can be taken within a few microseconds which allows the acquisition of a moving scene in realtime.

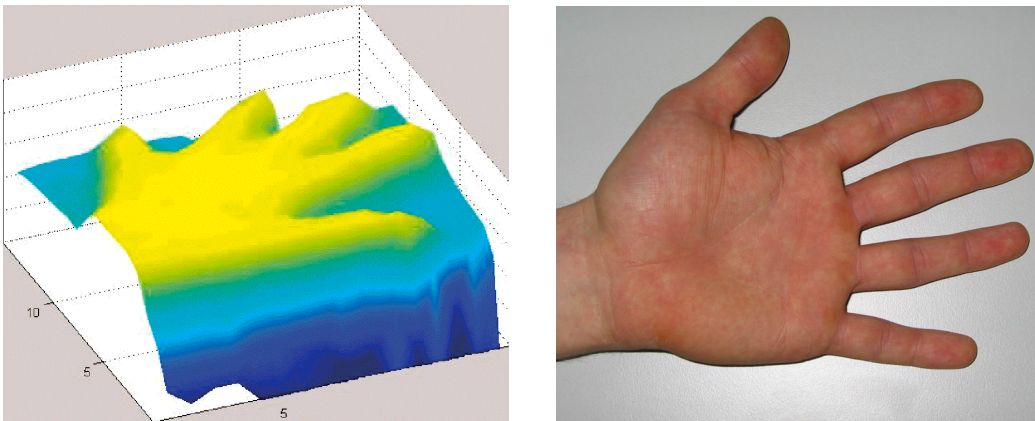


Figure 11: Left: 3D image of a human hand taken with 3D PG camera. 3D Image has been rotated and smoothed to visualize the depth information. Right: A high resolution 2D image for comparison

1x8 MSM-PMD line sensor camera

Figure 12 shows a measurement done with an arbitrary pixel in the described MSM line sensor camera. The used modulation frequency was 10 MHz which allows a range of unambiguously of 15m. The target was a plain surface of white paper in different distances. The standard deviations under these conditions were in the range from approx. 5mm (@1m) to 70mm (@15m).

To show the influence of uncorrelated background light a measurement is given in **Figure 13**. Despite of background light, a measurement can be done with slightly increased standard deviation. It has to be kept in mind that this feature is achieved *without any additional* circuitry. The suppression of uncorrelated signals is provided only by the sensor and the function principle as described above.

The suppression of background illumination has been proven up to a ratio of 1000 in laboratory environment. These measurements were done with a modulated laser source whereas the DC background light was generated with a cold-light lamp (3400K). The MSM pixel has been exposed with the modulated laser light (20nW @635nm) and the background illumination directly. In this configuration phase measurements were possible even if the optical power of the background light was 1000 times higher than the active illumination. The standard deviation of the measured phase was approx. 11° at highest background level. For example, with these conditions the measured distance of an object in the range of 10m has a standard deviation of approx. 0.45m (modulation frequency 10MHz).

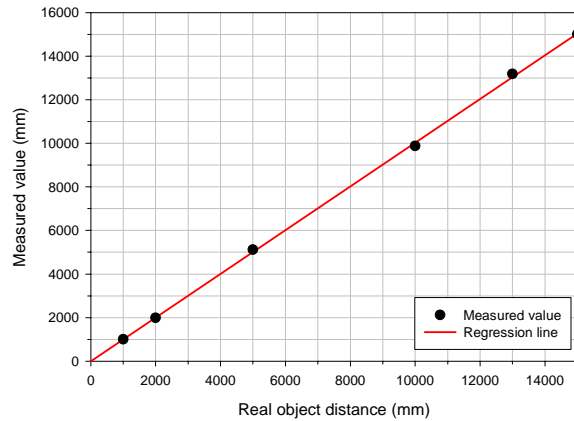


Figure 12: Measurement (mean value) of an arbitrary pixel in the range of 1 to 15m. The integration time was 10ms. Target was a plain surface of white paper.

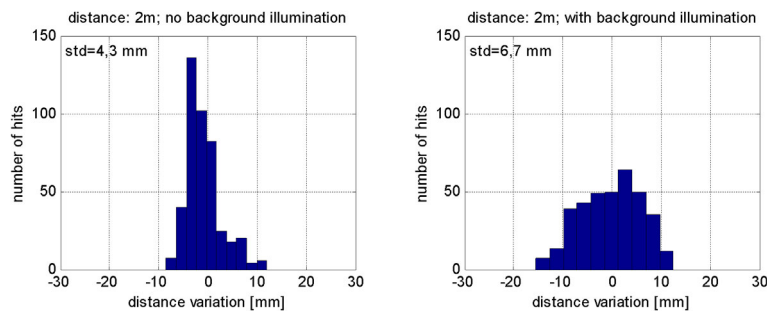


Figure 13: Measurements with a plain surface of white paper in a distance of 2m. Left: only active illumination on target ($160\mu\text{W}/\text{cm}^2$). Right: Same measurement conditions but with additional background illumination ($720\mu\text{W}/\text{cm}^2$). The integration time was 20ms

CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In this paper two types of 3D cameras based on different PMD principles are described. The use of PG-PMD devices allows a high integration level in a standard CMOS process. The advantages are the low production costs and the possibility to integrate additional on chip system components (SOC). In addition to the 3D data the grayscale image of the scene can be detected for an enhanced image processing. The advantage of the MSM-PMD is the high modulation frequency and the inherent suppression of background illumination without additional circuitry.

Because of the mentioned features both concepts are suitable for a wide field of applications, e.g. automotive, safety, industrial control and navigation, robotics and virtual reality. New generations of 3D sensors are currently under development. A PG-camera with resolution of 160x120 will be available this year as well as a MSM-camera with the resolution of 16x4.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the INV, PMDTechnologies, S-Tec and ZESS staff for technical support, as well as partly financial support from BMBF.

REFERENCES

1. Ringbeck, Thorsten; Albrecht, Martin; Frey, Jochen; Grothof Markus; Heß, Holger; Kraft, Holger; Möller Tobias; Mosen Joachim; Schink, Benja, „Time-of-Flight 3D-camera for autonomous navigation and industrial automation“ Sensor 2003, Nürnberg
2. 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.
3. B. Buxbaum, R. Schwarte, T. Ringbeck, M. Grothof, X. Luan, “MSM-PMD as correlation receiver in a new 3D-ranging system”; SPIE – Remote Sensing, Laser Radar Techniques: “Ranging and Atmospheric Lidar”, Toulouse 2001.

Bumblebee Stereo Vision System Price/Product List

640 x 480 Bumblebee Prices:

BB-COL-20	Color Bumblebee System with 2 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-COL-40	Color Bumblebee System with 4 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-COL-60	Color Bumblebee System with 6 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-BW-20	BW Bumblebee System with 2 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-BW-40	BW Bumblebee System with 4 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-BW-60	BW Bumblebee System with 6 mm lenses	\$1995.00 USD

1024 x 768 Bumblebee:

BB-HICOL-40	Hi-Res Color Bumblebee System with 4 mm lenses	\$2495.00 USD
BB-HICOL-60	Hi-Res Color Bumblebee System with 6 mm lenses	\$2495.00 USD
BB-HIBW-40	Hi-Res BW Bumblebee System with 4 mm lenses	\$2495.00 USD
BB-HIBW-60	Hi-Res BW Bumblebee System with 6 mm lenses	\$2495.00 USD

3D Stereo Visualization Kit:

BB-3DSVK	3D Stereo Visualization Kit	\$299.00 USD
----------	-----------------------------	--------------

* Please note the visualization kit will work with any PGR stereo vision product, however the recommended configurations are low or hi-res Bumblebee cameras with 6mm focal length lenses.

Sync Unit:

SYNC	Sync Unit	\$750.00 USD
------	-----------	--------------

**All software development kits that work with the Bumblebee Stereo System such as Triclops™, Compass3D, Censys3D® and Multiclops™ are included in the price. The software can be downloaded from PGR's support web page.

Prices do not include duties, taxes, shipping or insurance. PGR reserves the right to change pricing at any time. This price list is for the sole use of the person and/or the company it is disclosed to and should not be redistributed or published without a prior written consent of PGR. Lead times are subject to availability, please contact us for a quote and the current lead-time.

For part # information and product pictures, please visit: <http://www.ptgrey.com/sales/models.asp>

Website: <http://www.ptgrey.com/>

Email: sales@ptgrey.com

Bumblebee Stereo Vision System Price/Product List

640 x 480 Bumblebee Prices:

BB-COL-20	Color Bumblebee System with 2 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-COL-40	Color Bumblebee System with 4 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-COL-60	Color Bumblebee System with 6 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-BW-20	BW Bumblebee System with 2 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-BW-40	BW Bumblebee System with 4 mm lenses	\$1995.00 USD
BB-BW-60	BW Bumblebee System with 6 mm lenses	\$1995.00 USD

1024 x 768 Bumblebee:

BB-HICOL-40	Hi-Res Color Bumblebee System with 4 mm lenses	\$2495.00 USD
BB-HICOL-60	Hi-Res Color Bumblebee System with 6 mm lenses	\$2495.00 USD
BB-HIBW-40	Hi-Res BW Bumblebee System with 4 mm lenses	\$2495.00 USD
BB-HIBW-60	Hi-Res BW Bumblebee System with 6 mm lenses	\$2495.00 USD

3D Stereo Visualization Kit:

BB-3DSVK	3D Stereo Visualization Kit	\$299.00 USD
----------	-----------------------------	--------------

* Please note the visualization kit will work with any PGR stereo vision product, however the recommended configurations are low or hi-res Bumblebee cameras with 6mm focal length lenses.

Sync Unit:

SYNC	Sync Unit	\$750.00 USD
------	-----------	--------------

**All software development kits that work with the Bumblebee Stereo System such as Triclops™, Compass3D, Censys3D® and Multiclops™ are included in the price. The software can be downloaded from PGR's support web page.

Prices do not include duties, taxes, shipping or insurance. PGR reserves the right to change pricing at any time. This price list is for the sole use of the person and/or the company it is disclosed to and should not be redistributed or published without a prior written consent of PGR. Lead times are subject to availability, please contact us for a quote and the current lead-time.

For part # information and product pictures, please visit: <http://www.ptgrey.com/sales/models.asp>

Website: <http://www.ptgrey.com/>

Email: sales@ptgrey.com



305-1847 W. Broadway
 Vancouver BC V6J 1Y6
 Canada
 Tel: (604) 730-9937
 Fax: (604) 732-8231
<http://www.ptgrey.com>

Dragonfly IEEE 1394 Camera
Price/Product List

****All software development kits that work with the Dragonfly Development Kits such as PGRFlyCapture are included in the price. The software can be downloaded from Point Grey Research's support web page.**

640 x 480 IEEE 1394 Dragonfly:

DRAG-COL-KIT	Color Dragonfly Development Kit	\$795.00 USD
DRAG-COL-EXKIT	Extended Color Dragonfly Development Kit	\$895.00 USD
DRAG-BW-KIT	BW Dragonfly Development Kit	\$795.00 USD
DRAG-BW-EXKIT	Extended BW Dragonfly Kit	\$895.00 USD
10 PACK DRAGONFLY KITS		\$6950.00 USD
10 PACK DRAGONFLY EXKITS		\$7950.00 USD

640 x 480 IEEE 1394 Dragonfly Bare Camera:

DRAG-COL-CS	Color Dragonfly with CS lens mount	\$695.00 USD
DRAG-BW-CS	BW Dragonfly with CS lens mount	\$695.00 USD
DRAG-COL-40	Color Dragonfly with 4 mm lens	\$695.00 USD
DRAG-COL-60	Color Dragonfly with 6 mm lens	\$695.00 USD
DRAG-COL-80	Color Dragonfly with 8 mm lens	\$695.00 USD
DRAG-BW-40	BW Dragonfly with 4 mm lens	\$695.00 USD
DRAG-BW-60	BW Dragonfly with 6 mm lens	\$695.00 USD
DRAG-BW-80	BW Dragonfly with 8 mm lens	\$695.00 USD
10 PACK CAMERAS & ONE SET OF LENSES		\$6000.00 USD

1024 x 768 IEEE 1394 Hi-Res Dragonfly:

DRAG-HICOL-KIT	Hi-Res Color Dragonfly Development Kit	\$995.00 USD
DRAG-HICOL-EXKIT	Extended Hi-Res Color Dragonfly Development Kit	\$1095.00 USD
DRAG-HIBW-KIT	Hi-Res BW Dragonfly Development Kit	\$995.00 USD
DRAG-HIBW-EXKIT	Extended Hi-Res BW Dragonfly Development Kit	\$1095.00 USD
10 PACK Hi-Res DRAGONFLY KITS		\$8950.00 USD
10 PACK Hi-Res DRAGONFLY EXKITS		\$9950.00 USD

Dragonfly IEEE 1394 Camera
Price/Product List

1024 x 768 IEEE 1394 Hi-Res Dragonfly Bare Camera:

DRAG-HICOL-CS	Hi-Res Color Dragonfly with CS lens mount	\$895.00 USD
DRAG-HIBW-CS	Hi-Res BW Dragonfly with CS lens mount	\$895.00 USD
DRAG-HICOL-40	Hi-Res Color Dragonfly with 4 mm lens	\$895.00 USD
DRAG-HICOL-60	Hi-Res Color Dragonfly with 6 mm lens	\$895.00 USD
DRAG-HICOL-80	Hi-Res Color Dragonfly with 8 mm lens	\$895.00 USD
DRAG-HIBW-40	Hi-Res BW Dragonfly with 4 mm lens	\$895.00 USD
DRAG-HIBW-60	Hi-Res BW Dragonfly with 6 mm lens	\$895.00 USD
DRAG-HIBW-80	Hi-Res BW Dragonfly with 8 mm lens	\$895.00 USD
10 PACK CAMERAS & ONE SET OF LENSES		\$7950.00 USD

***Please note to order bare cameras one full Dragonfly Kit must be purchased.**

***Bare Cameras available in EX version (ex: DRAG-COL-EX40) Excluding the CS version of the camera. ADD \$100.00 to the price.**

Accessories:

DRAG-BRACKET	Tripod Mounting Bracket	\$15.00 USD
CS MOUNT (B)	B&W CS lens mount adapter	\$30.00 USD
CS MOUNT (C)	Color CS lens mount adapter	\$30.00 USD
5 MM SPACER	Dragonfly 5mm C Ring Adapter	\$20.00 USD
10 pack 5MM SPACER		\$150.00 USD
DRAG-CSBOX(C)	Color Dragonfly CS Box	\$60.00 USD
DRAG-CSBOX (B)	B&W Dragonfly CS Box	\$60.00 USD
10 PACK DRAG-CSBOX		\$500.00 USD

*please note that the Dragonfly box can only be used on the CS mount version of the Dragonfly camera. This box will not work when using micro lenses.

Sync Unit:

SYNC	Sync Unit	\$750.00 USD
------	-----------	--------------

Prices do not include duties, taxes, shipping or insurance. PGR reserves the right to change pricing at any time. This price list is for the sole use of the person and/or the company it is disclosed to and should not be redistributed or published without a prior written consent of Point Grey Research Inc. Lead times are subject to availability, please contact us for a quote and the current lead-time.

DRAG = Dragonfly 40 = 4mm micro lens
 COL = Colour 60 = 6mm micro lens
 BW = Black and White 80 = 8mm micro lens
 EX = extended
 HIBW = Hi-Res Black & White
 HICOL = Hi-Res Colour
 CS = CS mount lens holder



PMDTechnologies GmbH - Am Eichenhang 50 - 57076 Siegen

Institut für Informatik
Prof. Dr.-Ing. Reinhard Koch
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Olshausenstr. 40

D-24098 Kiel

Bitte bei Rückfragen angeben:
Please refer for inquiries

Angebots-Nr. / Offer-No.

153584

Datum / Date

29.08.2005

Seite / Page

1

ANGEBOT QUOTATION

Zuständig ist Herr/Frau / Your contact Mr./Mrs.:
Bianca Hagebecker

Thank you for your inquiry and for the interest you have shown in our product.

Pos Item	Bezeichnung Description	Menge Quantity	Einzelpreis Unit Price Euro	Gesamtpreis Total amount Euro
1.	<p>PMD[vision]® 3k-S, 64 x 48 pixel (3D time-of-flight camera evaluation kit based on PMD technology)</p> <p>Contents of delivery 1 x Time-of-flight 3D camera 1 x Ethernet cable 5m cross over 1 x Firewire cable 2m 1 x Tripod 1 x Power Supply 1 x Camera Box 1 x Instruction Manual 1 x CD-ROM containing the MiniSDK and CamVis Pro software 1 x Users Guide for the MiniSDK and CamVis Pro</p> <p>The quotation includes engineering services of 0.5 days by phone or e-mail. Additional support will be invoiced at a base rate of 1.000 Euro per day.</p>	2	5.990,-	11.980,-
			Angebotssumme in Euro ohne MwSt Total without tax	11.980,-

Lieferbedingungen / Terms of Delivery:

Zahlungsbedingungen / Terms of Payment:

Lieferzeit / Period of Delivery:

Gültigkeit des Angebots / Validity of the offer:

Haftungsbedingungen / Warranty disclaimer:

Ex works

Immediately after delivery without deduction

10 weeks after placement of order, if in stock

30 days

The Photonics® chips, PMD[vision]® cameras and the related demonstration software are engineering samples, for evaluation purposes only. The client shall be entirely responsible for the use of the camera and the software.

We hope our quotation meets your requirements and we look forward to your order.

Yours sincerely / Mit freundlichen Grüßen

PMDTechnologies GmbH

Dr. B. Buxbaum

T. Gollewski

PMDTechnologies GmbH

Am Eichenhang 50

D-57076 Siegen

http://www.pmdtec.com

Steuernr. 342/5817/1367

Tel +49 271 / 238 538-800

Fax +49 271 / 238 538-809

Mail info@pmdtec.com

Ansprechpartner

Dr. Bernd Buxbaum

Torsten Gollewski

Umsatzsteuer

Amtsgericht Siegen

HRB 56 52

USt-IdNr. DEB13504519

Kontoauskunft

Commerzbank

BLZ 721 400 52

Kto.-Nr. 190 897 900

PMDTechnologies GmbH • Am Eichenhang 50 • 57076 Siegen

 Universität Siegen
 Fachbereich 12
 FG Computergraphik und Multimediasysteme

Hölderlinstraße 3

D-57068 Siegen

 Bitte bei Rückfragen angeben:
 Please refer for inquiries

Angebots-Nr. / Offer-No.

153687

Datum / Date

07.09.2005

Seite / Page

1

ANGEBOT

QUOTATION

 Zuständig ist Herr/Frau / Your contact Mr./Mrs.:
Bianca Hagebeucker

Thank you for your inquiry and for the interest you have shown in our product.

Pos Item	Bezeichnung Description	Menge Quantity	Einzelpreis Unit Price Euro	Gesamtpreis Total amount Euro
1.	PMD[vision]® 19k, 160 x 120 pixel <i>(3D time-of-flight camera evaluation kit based on PMD Technology)</i> Contents of delivery 1 x Time-of-flight 3D camera 1 x Ethernet cable 5m cross over 1 x Firewire cable 2m 1 x Tripod 1 x Power Supply 1 x Camera Box 1 x Instruction Manual 1 x CD-ROM containing the MiniSDK and CamVis Pro software 1 x Users Guide for the MiniSDK and CamVis Pro The quotation includes engineering services of 0,5 days by phone or e-mail. Additional support will be invoiced at a base rate of 1.000 € per day.	1	4.990,--	4.990,--
			Angebotssumme in € ohne MwSt Total without tax	4.990,--

Lieferbedingungen / Terms of Delivery:

Zahlungsbedingungen / Terms of Payment:

Lieferzeit / Period of Delivery:

Gültigkeit des Angebots / Validity of the offer:

Haftungsbedingungen / Warranty disclaimer:

Ex works

Immediately after delivery without deduction

10 weeks after placement of order, if in stock

30 days

The PhotonICs® chips, PMD[vision]® cameras and the related demonstration software are engineering samples, for evaluation purposes only. The client shall be entirely responsible for the use of the camera and the software.

We hope our quotation meets your requirements and we look forward to your order.

Yours sincerely / Mit freundlichen Grüßen

PMDTechnologies GmbH



Dr. B. Buxbaum



T. Gollewski

PMDTechnologies GmbH

Am Eichenhang 50

57076 Siegen

www.PMDTec.com

tel +49 271 238538-800

fax +49 271 238538-809

info@PMDTec.com

Geschäftsführer

Dr. Bernd Buxbaum

Torsten Gollewski

Steuernr. 342/5817/1367

Handelsregister

Amtsgericht Siegen

HRB 56 52

Ust-IdNr. DE813504519

Commerzbank

BLZ 721 400 52

Konto 190 897 900