

2D/3D Datenverarbeitung und -fusion auf Basis der PMD-Technologie (2D3DProc)



Prof. Dr.-Ing.
Andreas Kolb

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)
und
Lehrstuhl für
Computergraphik und
Multimediasysteme

Universität Siegen
Hölderlinstr. 3
57068 Siegen



Prof. Dr.-Ing. habil.
Otmar Loffeld

Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)

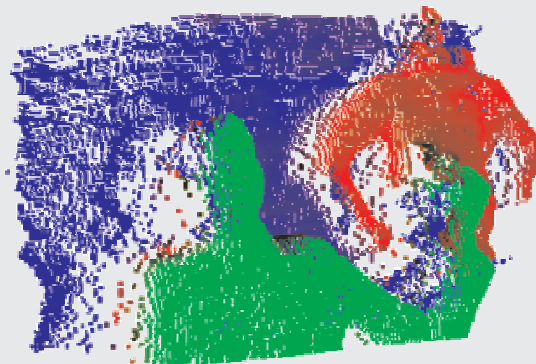
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen

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	1
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	2
2.1	Stand der Forschung	3
2.1.1	Kalibrierung von 2D-Kameras	3
2.1.2	Koregistrierung multiokularer, multimodaler und multivariater Bilder	4
2.1.3	Registrierung und Kalibrierung von 2D-Kameras mit 3D-Laserscandaten	5
2.1.4	2D/3D Datenverfeinerung	5
2.1.5	Datenstrukturen für multiokulare Kameraaufbauten	6
2.2	Eigene Vorarbeiten	9
2.2.1	Vorarbeiten im PMD-Kontext	9
2.2.2	Vorarbeiten in problemnahen Themenbereichen	10
3	Ziele und Arbeitsprogramm	15
3.1	Ziele	16
3.2	Arbeitsprogramm	17
3.2.1	Untersuchung des PMD-Bildgebungsprozesses	17
3.2.2	Kalibrierung	19
3.2.3	Koregistrierung für dynamische Kamerapositionen	20
3.2.4	Fusion, lokale Verfeinerung und Speicherung 2D/3D-Daten	21
3.2.5	Zeitliche Einordnung der Aufgaben	22
3.3	Untersuchungen am Menschen	23
3.4	Tierversuche	23
3.5	Gentechnologische Experimente	23
4	Beantragte Mittel	23
4.1	Personalkosten	23
4.2	Wissenschaftliche Geräte	24
4.3	Verbrauchsmaterial	24
4.4	Reisen	25
4.5	Publikationskosten	25
4.6	Sonstige Kosten	25
5	Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens	25
5.1	Zusammensetzung der Arbeitsgruppe	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	28
5.6	Sonstige Voraussetzungen	29
6	Erklärungen	29
6.1	Max-Planck-Institut	29
7	Unterschriften	
8	Verzeichnis der Anlagen	

1 Allgemeine Angaben

Antrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe
Neuantrag

1.1 Antragsteller

Andreas Kolb, Dr.-Ing.
Universitätsprofessor, Projektbereichsleiter
Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) und
Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme
geb. 04.06.1965, Deutscher

Dienstadresse:
Universität Siegen
Hölderlinstr.3
57068 Siegen
Tel.: 0271 / 740 - 2404

Privatadresse:
Meilerstr. 76
57074 Siegen
Tel.: 0271 / 741 - 1950

Otmar Loffeld, Dr.-Ing. habil.
Universitätsprofessor, Projektbereichsleiter
Zentrum für Sensorsysteme (ZESS), Projektbereich 2, und
Institut für Nachrichtenverarbeitung
geb. 01.06.1955, Deutscher

Dienstadresse:
Universität Siegen
Paul-Bonatz-Str. 9-11
57068 Siegen
Tel. : 0271/740-3125

Privatadresse:
Nassauer Straße 21
57234 Wilnsdorf
Tel.: 02737 / 2299936
Mobil: 0179 / 202 999 6

1.2 Thema

2D/3D Datenverarbeitung und -fusion auf Basis der PMD-Technologie

1.3 Kennwort

2D3DProc

1.4 Fachgebiet und Arbeitsrichtung

Informatik, Informationsverarbeitung, Signalverarbeitung, Bildverarbeitung, Datenstrukturen, Senordatenverarbeitung, Senorfusion

1.5 Voraussichtliche Gesamtdauer

4 Jahre

1.6 Antragszeitraum

24 Monate

1.7 Gewünschter Beginn der Förderung

01.01.2006

1.8 Zusammenfassung

Im Rahmen des Antragspaketes *Dynamisches 3D-Sehen* fokussiert sich dieser Projektantrag auf die sensornahe Datenverarbeitung. Aus Verarbeitungssicht liefern die verschiedenen 2D/3D-Kamerakombinationen die Daten, die in diesem Teilprojekt verarbeitet werden. (Teil-)Ergebnisse dieses Projektes werden unmittelbar in andere Teilprojekte, insbesondere in *PMDLumi* und *3D-PoseMap* transferiert. Die Unabhängigkeit der Teilprojekte wird durch bereits existierende Kameraaufbauten und Simulatoren gesichert.

Ein Schwerpunkt des Projektes ist die Kalibrierung von 3D-PMD-Kameras und von 2D/3D-Kamerakombinationen. Hierbei sind unterschiedliche Ursachen von Verzerrungen der Sensordaten zu untersuchen, zu modellieren und effizient zu korrigieren um eine interaktive Verarbeitung der Sensordaten zu ermöglichen. Es kommen statische und dynamische, mono- und multiokulare Sensoraufbauten zum Einsatz, die zudem unterschiedliche räumliche Auflösungen aufweisen. Entsprechend werden effiziente Datenstrukturen und Algorithmen zum transparenten Zugriff auf die Daten in diesem Teilprojekt erforscht. Im Falle örtlich dynamischer Sensoraufbauten spielt zudem die Koregistrierung verschiedener, in sich statischer Kamera-kombinationen eine wichtige Rolle.

2 Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

Das Grundprinzip der Tiefenmessung mit dem *Photonic Mixing Device (PMD)*, sowie die Abgrenzung dieser Technologie zu anderen Entfernungsmesstechniken, wird hier nicht weiter erläutert. Der Leser wird auf die Ausführungen in der Präambel zu dem Antragspaket *Dynamisches 3D-Sehen* und auf die Literatur verwiesen [1, 2]. Nachfolgend wird nur auf die relevanten Aspekte der Bildgebung und -verarbeitung für dieses Teilprojekt eingegangen.

2.1 Stand der Forschung

Erstmals stehen mit den PMD-Kameras kompakte und preisgünstige Sensoren zur Verfügung, die in hoher zeitlicher Auflösung ($> 10 \text{ FPS}^1$) und in relativ hoher räumlicher Auflösung ($120 \times 160 \text{ Pixel}$) Tiefendaten erfassen. In Kombination mit bewährter 2D-Kameratechnik in hoher Auflösung (mindestens VGA $480 \times 640 \text{ Pixel}$), eröffnet dies einen völlig neuen Forschungshorizont zu dem es bislang keine nennenswerten Forschungsergebnisse gibt. Entsprechend werden zum Stand der Forschung Themen besprochen, die als Grundbausteine für die im Rahmen dieses Teilprojektes avisierten Zielsetzungen dienen (siehe Abschnitt 3.1).

2.1.1 Kalibrierung von 2D-Kameras

Die Kalibrierung einer 2D-Kamera ermöglicht auf der Basis eines einfachen *Lochkameramodells* den direkten Bezug zwischen den Pixeln der Bildmatrix und 3D-Strahlen im Raum. Hierbei modellieren *intrinsische Kameraparameter* Verzerrungsfehler, die i.w. auf zwei Ursachen beruhen [3, 4]:

Lineare Verzerrung aufgrund von Mittelpunktverschiebung, nicht-quadratischer Pixelgeometrie und Bildscherung

Nichtlineare Verzerrung durch die Brechungseigenschaften der Kameraoptik, insbesondere bei Verwendung von Weitwinkelobjektiven

In einer konkreten Abbildung zwischen Objekt- in Kamerapixel-Koordinaten sind zudem die Parameter einer Starrkörper-Transformation, die so genannten *extrinsischen Parameter*, zu berücksichtigen.

Die linearen intrinsischen Parameter werden mit einer projektiven 3×3 -Matrix beschrieben. Die nichtlinearen intrinsischen Parameter beruhen auf unterschiedlichen Modellen. Für optische 2D-Kameras wird die radialsymmetrische Verzerrung mittels eines *Polynoms vierten Grades* beschrieben [3, 4], für andere bildgebenden Verfahren wird auf allgemeinere Modelle, z.B. *Freiformdeformationen* zurückgegriffen [6].

Zur Ermittlung der intrinsischen Parameter werden im wesentlichen zwei Arten von Algorithmen eingesetzt:

Photogrammetrische Kalibrierung: Hierbei wird mit der Kamera ein *3D-Kalibriermuster* erfasst, dessen bekannte Textur mit einfachen Bildverarbeitungsoperatoren identifiziert werden kann [7, 8, 9]. Neuere Ansätze verwenden mehrere Aufnahmen von 2D-Kalibriermuster aus unterschiedlichen Perspektiven (siehe [3, 5] und Abbildung 1).

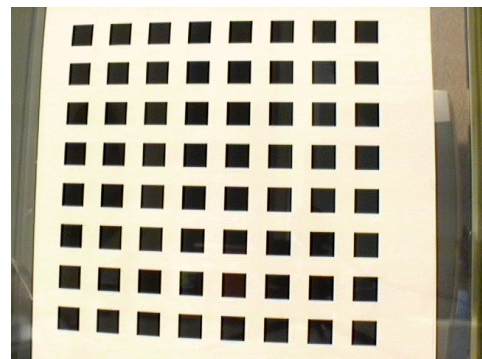


Abbildung 1: Kalibrierungsmuster für 2D-Kameras aus [5].

¹frames per second – Bilder pro Sekunde

Autokalibrierung: Die Schätzung der intrinsischen Parameter beruht hierbei auf der Beobachtung einer statischen Szene mit einer bewegten Kamera [4, 10] oder mit einem registriertem Multikamerasystem [11].

Im Teilprojekt *MultiCam* ist die Erstellung eines omnidirektionalen Tiefensensor geplant. In dieser Art von Sensoren werden Techniken der optischen Strahlenbrechung mit Reflexionskörpern, z.B. spiegelnde Kegel, erweitert. Um derartige Sensoren zu kalibrieren bedarf es erweiterter Kameramodelle. Geyer und Daniilidis [12] führen hierzu die *katadioptrische projektive Geometrie* ein. Dieses Modell beschreibt die Klasse der zentral-katadioptrischen Sensoren, die trotz zusätzlichem Reflexionskörper nur einen effektiven Augpunkt besitzen.

2.1.2 Koregistrierung multiokularer, multimodaler und multivariater Bilder

Die Koregistrierung von *Bildern oder Mustern* stellt in der angewandten Bildverarbeitung kein neues Thema dar. Zum Einsatz kommen hier üblicherweise korrelative Ansätze oder aber auch informationstheoretisch motivierte Ähnlichkeitsmaße, wie beispielsweise *Mutual Information* [13, 14, 15]. Die meisten der Konzepte sind theoretisch sehr gut durchdrungen. Beispielhafte Einsatzgebiete sind die Medizin [16] und die Verarbeitung von Radardaten [17]. Die multimodale Koregistrierung wurde insbesondere im Kontext medizinischer Anwendungen untersucht [18, 19]. Hierbei wird in der Regel eine semi-automatische Grobregistrierung anhand anatomischer Merkmale mit einer anschließenden Koregistrierung basierend auf Mutual Information durchgeführt.

Problemspezifisch besteht weiterer Bedarf an theoretischer Grundlagenarbeit in Bereich der Koregistrierung. Bislang kaum untersucht ist die Koregistrierung multimodaler, multivariater Daten, wie sie im Kontext des beantragten Projektes vorkommt. Hierbei stammen die Daten von multivariaten Sensoren (RGB bzw. Reflektivität und Tiefe vom PMD-Sensor) und weisen unterschiedliche Auflösungen und unterschiedliches Rauschen auf. Die Unterschiede beziehen sich nicht nur auf die Stärke der Störungen, sondern auch auf die statistischen Eigenschaften der Störungen. Die Koregistrierung solcher Daten erfordert i.a. implizite Interpolationen zum Ausgleich der unterschiedlichen Auflösungen in Verbindung mit robusten und störresistenten Ähnlichkeitsmaßen.

Im Kontext von *Kamera-Netzwerken* befassen sich verschiedene Arbeiten mit der Registrierung der Kameras zu einer beobachteten Szene [20, 21]. Zur notwendigen Bestimmung der Epipolar-Geometrie werden hierbei Silhouetten-basierte Ansätze verwendet (siehe auch Abschnitt 2.1.4)

Alternativ zur Koregistrierung auf Basis von 2D-Datenarrays werden im Falle von Tiefendaten auch *geometriebasierte* Registrierungstechniken eingesetzt. Zur Registrierung von Teilgeometrien eines Objektes oder einer Szene ist der *Iterative Closest Point (ICP)*-Algorithmus sehr weit verbreitet. Hierbei werden im einfachsten Fall zwei sich überlappende Teilgeometrien zueinander über Punktreferenzen und einer Abstandsminimierung positioniert [22, 23]. Für geringe Abstände zwischen den verschiedenen Sensorpositionen bei der Erfassung der Tiefendaten gibt es *echtzeitnahe* Varianten des ICP-Algorithmus [24]. Die Beschleunigung ist auf die effiziente Nutzung der räumlichen Kohärenz zwischen den Teilaufnahmen zurückzuführen. Andere Ansätze verwenden eine parallele Positionierung mehrerer Teilgeometrien

oder statistische Oberflächeninformation zur robusteren Referenzfindung [25].

2.1.3 Registrierung und Kalibrierung von 2D-Kameras mit 3D-Laserscandaten

Im Kontext der Entfernungsmessung mit Laserscanner müssen die Tiefendaten vielfach mit zusätzlicher Farbinformation versehen werden. Einige Arbeiten befassen sich mit der Kalibrierung der 2D-Bilddaten anhand der 3D-Tiefendaten. Hierbei wird von idealen und sehr dichten 3D-Scannerdaten ausgegangen, die im Falle der PMD-Kamera nicht vorliegen.

Stamos und Allen [26] beschreiben einen Ansatz zur Registrierung mehrere Laserrangedatensätze mit 2D-Bilddaten zu einem integrierten 3D-Modell. Hierzu werden aus den Tiefendaten lineare Merkmale extrahiert, die zur Registrierung der Laserrangedaten verwendet werden. Die Kalibrierung der 2D-Kamera erfolgt durch manuelle Auswahl korrespondierender Merkmale. Der Algorithmus von Dias et al. [27] verbindet eine semi-automatische Registrierung und eine Kalibrierung von Laserreflexions- mit 2D-Bilddaten. Auf Basis der Schätzung einer 2D affinen Abbildung zwischen den Bildern werden korrespondierende Punktmerkmal in beiden Modalitäten bestimmt. Anhand dieser Merkmale werden mittels der Kalibrierungstechnik von Tsai [8] die intrinsischen Parameter der 2D-Kamera ermittelt. In einer aufbauenden Arbeit integrieren Dias et al. [28] einen photogrammetrischen Ansatz zur Verbesserung der Merkmalsbestimmung und zur Verfeinerung der Tiefeninformation (siehe hierzu auch Abschnitt 2.1.4).

2.1.4 2D/3D Datenverfeinerung

In diesem Abschnitt werden bekannte Ansätze beschrieben, die die lokale Verfeinerung und Korrektur der Tiefeninformation des relativ gering auflösenden PMD-Sensors durch die hochauflösenden 2D-Sensorik unterstützen können.

Eines der klassischen Verfahren zur 3D-Rekonstruktion realer Objekte basiert auf der approximativen Berechnung der *visuellen Hülle* eines Objektes (auch *Shape from Silhouette*) aus kalibrierten und registrierten 2D-Bildersequenzen (siehe [30] und Abschnitt 2.2.2, sowie Abbildung 2). Auf Basis der visuellen Hülle wurden mehrfach kommerzielle Produkte umgesetzt (Beispiel: UZR [31]).

Eine Reihe von Forschungsarbeiten erweitert den Shape from Silhouette Ansatz mit photogrammetrischen Techniken [32, 33, 34]. Die grundsätzliche Vorgehensweise basiert hierbei auf dem Vergleich von Korrespondenzen in den 2D-Bildern, die durch die Lage entsprechender Punkte auf der visuellen Hülle gegeben sind.

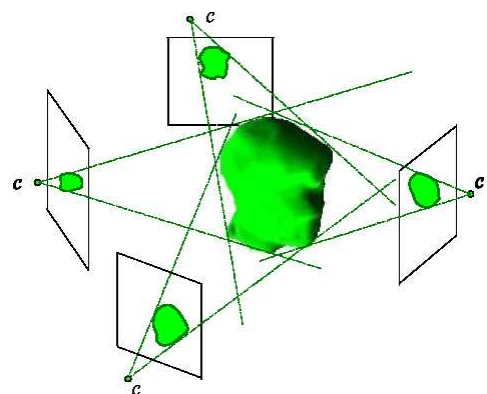


Abbildung 2: Das Shape from Silhouette Verfahren nach [29].

Bildbasierte Repräsentationen der visuellen Hülle bilden die Basis für eine effiziente Bild-

synthese für virtuelle Kamerapositionen [35, 32]. Die visuelle Hülle wird hierbei erst bei der Bildsynthese auf Basis der Objekt-Silhouetten in den registrierten 2D-Bilder rekonstruiert.

Hernández Esteban und Schmitt [33] verwenden einen deformierbares *3D-Snakes-Modell* [36] zur Beschreibung der visuellen Hülle. Der zugrundeliegende Optimierungsansatz minimiert simultan den Lagefehler der Punkte zu den Konturen und die Abweichungen in der lokalen Textur in den Projektionen.

Eine der verbreitetsten Techniken zur expliziten Berechnung der visuellen Hülle basiert auf einem Volumenmodell (*Volume Carving* oder *Volumenrückschnitt*) mit anschließender Polygonalisierung [37]. Kuzu und Sinram [34] verfeinern das Volume-Carving, indem sie die Voxel auf der Oberfläche der visuellen Hülle auf Farbkorrespondenz prüfen und ggf. als nicht zum Objektvolumen gehörend verwerfen. Damit werden Voxel in lokalen Konkavitäten, die zwar zur visuellen Hülle, nicht aber zum Objekt selbst gehören, entfernt. Alternativ zum Volume-Carving bestimmen Matusik et al. [38] die exakte visuelle Hülle anhand der 2D-Silhouetten unter Verwendung der projektiven Abbildungen zwischen den 3D-Kamera-Koordinaten.

Tosovic et al. [39] beschreiben eine Kombination von 3D-Messverfahren auf Basis von *strukturiertem Licht* und der *visuellen Hülle*. Hierbei wird ein hierarchische Volumenmodell (Oc-tree), welches der Volumenrückschnitt liefert, um die Daten aus dem Ansatz mit strukturiertem Licht ergänzt. Die grundsätzliche Fragestellung hat starke Ähnlichkeit mit der in diesem Projekt geplanten lokalen Modellverfeinerung (siehe Abschnitt 3.1). Der verwendete Lösungsansatz auf Basis eines Volumenmodelles ist jedoch zu rechenaufwendig und damit tendenziell ungeeignet.

2.1.5 Datenstrukturen für multiokulare Kameraaufbauten

Die Aufnahme von statische Szenen mit einer bewegten, passiven Kamera oder, äquivalent, die Aufnahme mit multiokulare Kameraaufbauten, wird seit vielen Jahre intensiv erforscht (siehe auch Teilprojekte *PMDLumi* und *3D-PoseMap*). Im Kontext der Lichtfeldrekonstruktion [40], der Lumigraph-Darstellung [41] und der plenoptischen Modellierung [42, 43] kommen entsprechende Aufbauten bestehend aus 2D-Kameras zum Einsatz.

Im Rahmen der genannten Forschungsthemen wurden verschiedene Verfahren zur Speicherung der entsprechenden Daten erarbeitet. Lichtfelder sind 4D-Funktionen, die häufig über zwei parallele Ebene parametrisiert werden. Dieser Ansatz kann räumliche nur eingeschränkt genutzt werden. Für Blickrichtungen nahezu parallel zu den Ebenen ist die Ortsauflösung sehr gering. Entsprechend können mehrere Ebenenpaare in Form eines Würfels eingesetzt werden [41]. Alternativ werden auch Kugelparametrisierung verwendet [44]. Beim Lumigraph kommen zusätzliche Tiefeninformationen hinzu, die Parametrisierungen entsprechen denjenigen der Lichtfeldansätze. Die grundsätzliche Herausforderung liegt in der *interaktiven Datenintegration* und in dem *effizienten Datenzugriff* für die gewählte Darstellung. Insbesondere die Datenintegration ist bei vorgenannten Ansätzen sehr aufwendig, da vielfaches Resampling der Eingangsdaten erforderlich ist.

Buehler et al. [45] verwenden eine Darstellung auf Basis der „Rohdaten“, d.h. der aufgenommenen 2D-Bilddaten, unter Einbeziehung der affinen Abbildungen zwischen den einzelnen Aufnahmepositionen (*unstructured lumigraph*). Dieser Ansatz verbindet die *image-based*

texturing-Technik von Debevec et al. [46, 47] mit den vorgenannten regulären Datenrepräsentationen. Der konkrete Ansatz synthetisiert Bilder für virtuelle Kamerapositionen unter Einbeziehung lokal variabler Auflösungen aufgrund unterschiedlicher Objekt-Kamera Abstände und Ausrichtungen bei der Aufnahme der Daten. Ein effizienter Datenzugriff für unkohärente Strahlen ist beim unstrukturierten Lumigraph schwer zu realisieren.

Literatur zum Stand der Forschung

- [1] 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*, 2004.
- [2] R. Schwarte, Z. Zhang, and B. Buxbaum. Neue 3D-Bildsensoren für das Technische 3D-Sehen. VDE Kongress „Ambient Intelligence“, 18–20 Oktober 2004.
- [3] Human Interface Technology Lab, University of Washington. ARToolKit. www.hitl.washington.edu/research/artoolkit, 2005.
- [4] Y. Ma, S. Statto, J. Kosecka, and S. Sastry. *An invitation to 3D vision*. Springer, 2004.
- [5] Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 22(11):1330–1334, 2000.
- [6] A. Kolb. Bildverzerrung in der Strahlentherapie. Projekt-Dokumentation Fa. positronic beam service GmbH, Rellingen, 2002.
- [7] D. Brown. Close-range camera calibration. *Photogrammetric Engineering*, 37(8):855–866, 1978.
- [8] R. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 3(4):323–344, 1987.
- [9] O. Faugeras. *Three-Dimensional Computer Vision: a Geometric Viewpoint*. MIT Press, 1993.
- [10] Q. Luong and O. Faugeras. Self-calibration of a moving camera from point correspondences and fundamental matrices. *J. of Computer Vision*, 22(3):261–289, 1997.
- [11] T. Svoboda, D. Martinec, and T. Pajdla. A convenient multi-camera self-calibration for virtual environments. In *Teleoperators and Virtual Environments*, volume 14:4, 2005. to appear.
- [12] C. Geyer and K. Daniilidis. Catadioptric projective geometry. *J. of Computer Vision*, 43:223–243, 2001.
- [13] A. Collignon, D. Vandermeulen, P. Suetens, and G. Marchal. Automated multi-modality image registration based on information theory. *Kluwer Acad. Publ's: Computational Imaging and Vision*, 3:263–274, 1995.
- [14] B. Zitova and J. Flusser. Image registration methods: a survey. *Image and Vision Computing*, 21:977–1000, 2003.
- [15] A. Cole-Rhodes, K. Johnson, and J. LeMoigne and I. Zavorin. Multiresolution registration of remote sensing imagery by optimization of mutual information using a stochastic gradient. *IEEE transaction on Image Processing*, 12(12):1495–1511, 2003.
- [16] R. Woods, J. Mazziotta, and S. Cherry. MRI-PET registration with automated algorithm. *Journal of Computer Assisted Tomography*, 17(4):536–546, 1993.
- [17] J. Mittermaier. *Hochauflösende Verarbeitung von Radardaten mit synthetischer Apertur*. PhD thesis, Universität Siegen – Zentrum f. Sensorsysteme, 2000.
- [18] L. Brown. A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys*, 24(4):325–376, 1992.
- [19] A. Maintz and M. Viergever. A survey of medical image registration. *Medical Image Analysis*, 2(1):1–66, 1998.
- [20] S. Sinha, M. Pollefeys, and L. McMillan. Camera network calibration from dynamic silhouettes. In *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 195–202, 2004.
- [21] S. Sinha and M. Pollefeys. Synchronization and calibration of a camera network for 3D event reconstruction from live video. In *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, page 1196, 2004.
- [22] Y. Chen and G.G. Medioni. Object modeling by registration of multiple range images. *J. Image and Vision Computing*, 10(3):145–155, 1992.

- [23] Z. Zhang. Iterative point matching for registration of free-from curves and surfaces. *J. of Computer Vision*, 13(2):119–152, 1994.
- [24] S. Rusinkiewicz, O. Hall-Holt, and M. Levoy. Real-time 3D model acquisition. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 438–446, 2002.
- [25] P. Biber, S. Fleck, and W. Straßer. A probabilistic framework for robust and accurate matching of point clouds. In *26th Pattern Recognition Symposium (DAGM)*, 2004.
- [26] I. Stamos and P. Allen. 3D model construction using range and image data. In *IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 531–536, 2000.
- [27] P. Dias, V. Sequeira, J. Goncalves, and F. Vaz. Automatic registration of laser reflectance and colour intensity images for 3D reconstruction. *Robotics and Autonomous Systems*, 39:157–168, 2002.
- [28] P. Dias, V. Sequeira, F. Vaz, and J. Goncalves. Registration and fusion of intensity and range data for 3D modelling of real world scenes. In *Proc. 3D Digital Imaging and Modeling*, pages 418–425, 2003.
- [29] K. Cheung. Visual hull construction, alignment and refinement across time. Technical report, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, 2002. Thesis Proposal.
- [30] A. Laurentini. The visual hull concept for silhouette-based image understanding. *IEEE Trans. Pattern Anal. and Mach. Intell.*, 16(2):150–162, 1994.
- [31] UZR. iModeller 3D Version 2.5. www.uzr.de, 2005.
- [32] Y. Liu, G. Chen, N. Max, C. Hofsetz, and P. McGuinness. Visual hull rendering with multi-view stereo refinement. In *Proc. Conf. on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision (WSCG)*, pages 261–268, 2004.
- [33] C. Hernández Esteban and F. Schmitt. Silhouette and stereo fusion for 3D object modeling. *J. Comp. Vision and Image Understanding*, 96(3):367–392, 2004. Special issue on Model-based and Image-based 3D Scene Representation for Interactive Visualization.
- [34] Y. Kuzu and O. Sinram. Volumetric model refinement by shell carving. In *Prof. XXth ISPRS Congress*, pages 128–153, 2004.
- [35] W. Matusik, C. Buehler, R. Raskar, S. Gortler, and L. McMillan. Image-based visual hulls. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 369–374, 2000.
- [36] M. Kass, A. Witkin, and D. Terzopoulos. Snakes - active contour models. *J. of Computer Vision*, 1(4):321–331, 1987.
- [37] William E. Lorensen and Harvey E. Cline. Marching cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, volume 21, pages 163–169. ACM, 1987.
- [38] W. Matusik, C. Buehler, and L. McMillan. Polyhedral visual hulls for real-time rendering. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 115–126, 2001.
- [39] S. Tosovic, R. Sablatnig, and M. Kampel. On combining shape from silhouette and shape from structured light. In H. Wildenauer and W. Kropatsch, editors, *Proc. of 7th Computer Vision Winter Workshop*, pages 108–118, 2002.
- [40] M. Levoy and P. Hanrahan. Lightfield rendering. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 31–42, 1996.
- [41] S. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, and M. Cohen. The lumigraph. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 43–54, 1996.
- [42] L. McMillan and G. Bishop. Plenoptic modeling: An image-based rendering system. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 39–46, 1995.
- [43] M. Pollefeys, L. Van Gool, M. Vergauwen, F. Verbiest, K. Cornelis, J. Tops, and R. Koch. Visual modeling with a hand-held camera. *J. of Computer Vision*, 59(3):207–232, 2004.
- [44] I. Ihm, S. Park, , and R. Lee. Rendering of spherical light fields. In *Proc. Pacific Graphics*, page 59, 1997.
- [45] C. Buehler, M. Bosse, L. McMillan, S. Gortler, and M. Cohen. Unstructured lumigraph rendering. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 425–432, 2001.
- [46] P. Debevec, C. Taylor, and J. Malik. Modeling and rendering architecture from photographs. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, pages 11–20, 1996.
- [47] P. Debevec, Y. Yu, and G. Borshukov. Efficient view-dependent image-based rendering with projective texture-mapping. In *Eurographics Workshop on Rendering*, pages 105–116, 1998.

2.2 Eigene Vorarbeiten

Prof. Kolb ist seit ca. 13 Jahren im Bereich der Computergraphik aktiv. Aktuell ist er Leiter des Lehrstuhls für Computergraphik und Multimediasysteme und baut den Projektbereich *Visualisierung, Computergraphik und Bildverarbeitung* am ZESS auf. Der Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme wurde im Jahre 2003 an der Universität Siegen neu eingerichtet.

Prof. Loffeld arbeitet seit 1986 auf dem Gebiet der modellgestützten optimalen Signalverarbeitung, insbesondere der Synthetic Aperture Radar (SAR) Bildverarbeitung und der Koregistrierung deformierter und rauschüberlagerter Bilder. Er leitet den Projektbereich 2 des ZESS *Optimale Multi Sensor Datenfusion, Remote Sensing - SAR*, ist stellvertretender Vorsitzender des ZESS und Sprecher des International Postgraduate Programmes *Multi Sensorics*.

2.2.1 Vorarbeiten im PMD-Kontext

Eine Reihe von aktuellen Aktivitäten beziehen direkt die PMD-Technologie ein. Da es sich größtenteils um laufende Arbeiten handelt, liegen nicht überall Veröffentlichungen im üblichen Umfang vor.

PMD-Sensorentwicklung

Das ZESS entwickelt in Zusammenarbeit mit der ausgegründeten Firma *PMD-Technologies* und in Kooperation mit einer Halbleiter-FAB² PMD-Matrix-Sensoren mit variabler Geometrie. Das ZESS entwickelt die Schaltungstechnologie zur Ansteuerung und Informationsverarbeitung der PMD-Matrix-Sensoren.

Darüber hinaus wurden erste 2D/3D-Kamerakombinationen aufgebaut und getestet. Für einen statisch binokularen 2D/3D-Kameraaufbau mit fester relativer Lage der Kameras wurden erste Tests zur 2D-bildbasierten Kalibrierung unter Einsatz von ARToolKit [1] durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen, dass mit diesem Ansatz eine einfache, entkoppelte Kalibrierung multiokularer 2D/3D-Aufbauten relativ zu einem bekannten Marker im 3D-Raum möglich ist. Es ist zu erwähnen, dass mit diesem Ansatz zunächst die intrinsischen Kameraparameter in der Bildebene und zusätzliche Tiefendaten bzgl. der 3D-Position des Markers ermittelt werden. Die Modellierung und Erfassung der intrinsischen Tiefenparameter ist Teil des Projektantrags *2D3DProc*.

PMD Simulation und synthetische PMD-Daten

Im Rahmen einer Industriekooperation wurde ein Simulator zum Einsatz des PMD in einer Bewegobjektsituation im Hinblick auf ein Fahrerassistenzsystem entwickelt. Dieser Simulator wurde mit Matlab umgesetzt und weist eine hohe Genauigkeit auf.

²Fertigungslinie für die Chipherstellung

Zudem wurde ein einfacher, echtzeitfähiger Simulator unter Verwendung von Standardtechniken der Bildsynthese (OpenGL und C++) entwickelt. Dieser Simulator erzeugt kombinierte 2D/3D Daten zunächst für monokulare Aufbauten und für beliebige, separate 2D- und 3D-Auflösung. Spezifische Sensorfehler, wie z.B. Rauschen, Beugungen oder Laufzeitverzerrungen werden derzeit nicht berücksichtigt.

Verarbeitung von PMD-Daten

Das erste interaktive Visualisierungswerkzeug für die zeitlich hochaufgelösten PMD-Daten wurde in einer Diplomarbeit bei der Firma PMD-Technologies unter Betreuung von Prof. Kolb entwickelt [2, 3]. In das Visualisierungswerkzeug wurden einfache Filtertechniken zur Rauschunterdrückung und Tiefensegmentierung integriert.

Aufbauend fand eine weiterführende Untersuchung zur Umwandlung der PMD-Sensor- in Tiefenmessdaten bzw. kartesische 3D-Daten statt. Diese hat neben einem bekannten, konstanten Tiefenoffset, der durch eine Zeitverschiebung aufgrund der kamerainternen Verarbeitung verursacht wird, eine nicht-lineare, räumliche Verzerrung ergeben. Neueste Untersuchungen deuten darauf hin, dass dieser Effekt im u.a. auf den bistatischen Aufbau des PMD-Sensors zurückzuführen ist (siehe auch Abschnitt 3.2.1).

Basierend auf einem binokularen 2D/3D-Kameraaufbau wurden erste Tests zur interaktiven Erfassung registrierter 2D/3D-Daten durchgeführt [4]. Hierbei wurde neben der Echtzeit-Erfassung auch eine Echtzeit-Bildverarbeitung und -synthese auf dem *Graphik-Prozessor (GPU)* umgesetzt die im weiteren Grundlage für die Untersuchungen im Bereich der Lichtfeldrekonstruktion und -synthese sein werden (siehe Teilprojekt PMDLumi).

2.2.2 Vorarbeiten in problemnahen Themenbereichen

Beide Antragsteller und deren Arbeitsgruppen haben langjährige Erfahrung in einer Vielzahl von Themenfelder, die für die Bearbeitung des beantragten Teilprojektes von großer Bedeutung sind. Im folgenden werden wesentliche Ergebnisse kurz dargestellt.

Sensorik zur Entfernungsmessung

Im Rahmen verschiedener, öffentlich geförderter Forschungsarbeiten wurden am ZESS Techniken zur sensoruellen Erfassung von Entfernungsdaten erforscht [5, 6, 7, 8]. Erste Arbeiten hierzu gehen auf das Jahr 1986 zurück und sind unter [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] dokumentiert.



Abbildung 3: Grauwertbild (links) und Tiefenbild (rechts) des 3D-Messsystems des ZESS

Ein im ZESS entwickelten Multisensorkonzept bietet die Möglichkeit, 3D-Objekte flexi-

bel auf eine Entfernung bis ca. 10 m zu vermessen [18]. Hierbei wurde ein Laserradar-Entfernungsmesssystem mittels eines 2D-Spiegelscanners zu einem 3D-Messsystem erweitert. Eine zusätzliche 2D-Bildkamera erfasst und analysiert die zu vermessende Szene (siehe Abbildung 3).

Neben der Erzeugung von 3D-Daten wurde die Problematik der Fusionierung von 2D-Intensitätsbildern mit den 3D-Laserscannerdaten bearbeitet. Mit der Fusionierung konnte eine adaptive Laserstrahlführung realisiert werden, um nur die relevanten Teile des Sichtfeldes abzutasten [19, 20, 21, 22, 23].

Tiefendaten auf Basis von 2D-Kameras

Zwei grundlegende Ansätze zur Tiefenmessung wurden in Forschungsprojekten untersucht, die auf *strukturiertem Licht* bzw. auf der *visuellen Hülle* eines Objektes basieren (siehe auch Abschnitt 2.1.4 und die Präamble des Antragspaketes).

Der verwendete Ansatz zur Erfassung von Tiefendaten mit strukturiertem Licht basiert auf farbkodierter Beleuchtung unter Einsatz des Phasen-Shift-Verfahrens in einzelnen R-,G-,B-Kanälen. Die Phasenverschiebung bezeichnet hierbei den Versatz zwischen den einzelnen Farbkomponenten der strukturierten Farbbeleuchtung. Die Eindeutigkeit erfolgt über mehrere Beleuchtungsperioden mit linear ansteigender Farbsättigung. Das Verfahren ermöglicht eine schnelle Erfassung von 3D-Daten, die auch dynamisch sein können [28]. Das unterschiedliche Rückstreuverhalten einzelner Objektoberflächen ist bei diesem Ansatz eine große Herausforderung. Zudem ist zu bemerken, dass die Umrechnung der 2D-Bild- in 3D-Tiefendaten nicht interaktiv erfolgt.

Im Rahmen des BMBF-Projektes *Reparatur und Texturierung von Polygonmodellen für Virtual Reality Anwendungen* [34] wurde ein Shape from Silhouette Verfahren zur Erfassung und Integration realer Objekte in virtuelle Szenen umgesetzt. Das Verfahren kombiniert eine markerbasierte 2D Bildregistrierung mit einer teilautomatischen Bildsegmentierung zur Erkennung der Objektsilhouetten.

Im Kontext der Erfassung von Tiefendaten aus 2D-Bilddaten sei auch ein Industrieprojekt mit der Firma Bosch erwähnt. In diesem Projekt wurden Methoden der Stereo-Bildverarbeitung zur Bauteilerkennung und Vollständigkeitsprüfung von Vergasern untersucht [35].

Koregistrierung und Fusion multimodaler 2D- und 3D-Bilddaten

Die eigenen Vorarbeiten und Erfahrungen zur Koregistrierung stammen aus zahlreichen von ESA und BMBF geförderten, interferometrischen Synthetic Aperture Radar (SAR) Vorhaben (ERS1/ERS2-Tandem-Interferometric Mission, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)), sowie aus industriellen Forschungsvorhaben (Dornier, Astrium/EADS). Die Koregistrierung von hochaufgelösten SAR-Bildern und optischen Bildern ist ein aktuelles Forschungsthema des International Postgraduate Programme (IPP) Multi Sensorics am ZESS [36, 37, 38, 39]. Hierbei werden Verfahren zur Koregistrierung von multivariaten

Pixelinhalten für multimodale Daten erforscht. Die Untersuchungen konzentrierten sich insbesondere auf die Einflüsse von multiplikativem (Speckle) und additivem Störuschen. Unter anderem wurde in Form der *Alignability* ein neuartiges Kriterium gefunden, mit welchem die passpunktfreie Koregistrierung multimodaler Szenen effizient durchgeführt werden kann.

Für die Fusion mono- und multimodaler 3D-Bilddaten wurden echtzeitfähige, nichtlineare Deformationsmodelle entwickelt um eine dynamische Verformung der aufgenommenen Objekte zu berücksichtigen [40, 41]. Darüber hinaus wurden Algorithmen zur beschleunigten Berechnung entropie-basierter Ähnlichkeitsmaße (Mutual Information) für die Koregistrierung multimodaler Volumendaten erarbeitet. Hoher Rechenaufwand entsteht hierbei vor allem bei der Schätzung der Verbundwahrscheinlichkeiten (2D Histogramme) zweier überlagerter Datensätze. Um brauchbare Schätzwerte zu erhalten, muss eine große Zahl korrespondierender Bildpunkte untersucht werden. Der Einsatz der Verfahren zur Registrierung und Bildfusion wurde in klinischen Studien [42] zur Berücksichtigung des *Brain-Shifts* bei Gehirnoperationen [43] evaluiert.

Echtzeit-Bildverarbeitung in der Medizin

Bei der Umsetzung von Visualisierungsprojekten in unterschiedlichen Anwendungsfeldern spielen 2D- und 3D-Bildverarbeitungstechniken eine wichtige Rolle.

Beispielhaft wurden Techniken erarbeitet, die die Vorteile von expliziter und impliziter Segmentierung kombinieren um bestimmte Zielvolumina effizient zu visualisieren (z.B. Blutgefäßmalformationen und Stenosen im Rückenmarksbereich [44]). Die explizite Segmentierung der Voxeldaten (z.B. durch anisotrope Diffusionsfilter und Grauwert-Morphologie) trennt dabei in einem Offline-Prozess zunächst nur grob die unterschiedlichen anatomischen Strukturen voneinander. Anschließend erfolgt die implizite Segmentierung von Feinstrukturen in Echtzeit über lokal angewandte Transferfunktionen.

In einem Industrieprojekt mit der Firma positronic beam service GmbH [45] wurde ein Verfahren zur Bildentzerrung für Aufnahmen aus der Strahlentherapie erarbeitet. Hierbei wurde ein generisches Deformationsmodell basierend auf Freiformdeformationen verwendet um die nichtlineare Verzerrung des Aufnahmeprozesses zu modellieren und zu korrigieren.

3D Geometrieverarbeitung

Seit vielen Jahren werden Algorithmen zur Verarbeitung von 3D Geometrien von den Antragstellern erforscht. Hierbei wurden Probleme im Kontext der Berechnung optimierter Interpolationsflächen unter Einsatz verschiedener Qualitätsmaße untersucht [46, 47, 48, 49]. Als Qualitätsmaße wurden beispielsweise die *totale Krümmung* oder die *Minimale Krümmungsvariation* eingesetzt. Darüber hinaus wurden Verfahren zur Reparatur von polygonalen Flächen, insbesondere zum Füllen von Löchern und zur Entfernung redundanter Geometrieteile untersucht [50].

Hardwarebeschleunigte Algorithmen

Die Beschleunigung von Algorithmen verschiedenster Anwendungsbereiche unter Einsatz programmierbarer Graphikhardware (*Graphics Processing Unit (GPU)*) ist ein Forschungsschwerpunkt am Lehrstuhl für Computergraphik und Multimediasysteme. Bislang wurden Optimierungsansätze u.a. in den Bereichen Volumenvisualisierung [51, 52, 53], wissenschaftliches Rechnen für Simulationen [54, 55, 56] und Bildsynthese [57, 58] erfolgreich umgesetzt.

Literatur zu den eigenen Vorarbeiten

- [1] Human Interface Technology Lab, University of Washington. ARToolKit. www.hitl.washington.edu/research/artoolkit, 2005.
- [2] M. Profittlich. Entwurf und Implementierung eines Software-Frameworks zur Ansteuerung entfernungs-messender PMD-Kameras und Verarbeitung der gewonnenen Daten. Master's thesis, Universität Siegen/Fachhochschule Wedel, 2004.
- [3] PMDTechnologies. CamVis Pro 2.0: Graphical user interface for 3D cameras. www.pmdtec.com/inhalt/produkte/documents/CamVisDatenblatt.pdf, 2005.
- [4] S. Todt, C. Rezk-Salama, and A. Kolb. Real-time fusion of range and light field images. SIGGRAPH Poster-Session, 2005.
- [5] O. Loffeld. 3D-Objektvermessung auf größere Entfernungen. BMFT-Verbundprojekt, Fördkz. 13N5882.
- [6] O. Loffeld. Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse. DFG Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte, 1995-1996. Kennz. Lo455/4-1.
- [7] O. Loffeld. Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse. DFG Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte, 1996-1998. Kennz. Lo455/4-2/3.
- [8] R. Schwarte. Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse. DFG Schwerpunktprogramm: Automatische Sichtprüfung technischer Objekte. Kennz. SCHW 630/12000.
- [9] Inst. f. Nachrichtentechnik, Univ. Siegen. Laser Diode Rangefinder Demonstration Model, 1985.
- [10] Inst. f. Nachrichtentechnik, Univ. Siegen. Industrielle füllstandsmessung nach dem laserpuls-laufzeitverfahren. Abschlußbericht des Forschungsprojektes im Auftrag der Firma Krohne, Juli 1986. AiF F.u.E.-Projekt 2610.
- [11] R. Schwarte, V. Baumgarten, B. Bundschuh, W. Graf, K. Hartmann, F. Heuten, and O. Loffeld. Implementation of an advanced laser ranging sensor concept. In *Proc. IAF Conference*, Stockholm, 1985.
- [12] R. Schwarte, V. Baumgarten, B. Bundschuh, R. Dänel, W. Graf, K. Hartmann, F. Heuten, and O. Loffeld. A new concept for a precise and versatile laser range finder and optical radar. In *Proc. Laser Conf.*, München, 1987.
- [13] L. Tran Duc and O. Loffeld. Theoretische und experimentelle Untersuchung und Verifikation neuer Meßwertverarbeitungs-algorithmen für die schnelle, dreidimensionale Objekterfassung. Forschungsbericht für die Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung, 1987.
- [14] R. Schwarte, I. Aller, V. Baumgarten, B. Bundschuh, W. Graf, K. Hartmann, and O. Loffeld. Neuartige Sensorsysteme, Laserradar mit Impulslaufzeitmessung. *Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik*, 1989. Berlin, Springer Verlag.
- [15] R. Schwarte, I. Aller, V. Baumgarten, B. Bundschuh, W. Graf, K. Hartmann, and O. Loffeld. Laserradar mit Impulslaufzeitmessung. In J. Rogos, editor, *Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik*. Springer-Verlag, 1989.
- [16] D. Ley and B. Bundschuh. Methoden der industriellen Bildverarbeitung. Vortrag beim Workshop: Laseroptische und bildgebende Sensorsysteme für die industrielle Messtechnik im Zentrum für Sensorsysteme der Universität Siegen, 1992.
- [17] DFG-Arbeitstreffen. Technisches 3D-Sehen auf der Basis der PMD-Technologie. www.3d-view.org, October 2004.
- [18] J. Weber. *Ein visuell unterstütztes, laseroptisches Multisensorsystem zur automatisierten Erfassung dreidimensionaler Objekte*. PhD thesis, Universität Siegen, 1998.

- [19] D. Ley. *Ein intelligentes Multisensorsystem zur berührungslosen Erfassung dreidimensionaler Konturen*. PhD thesis, Zentrum für Sensorsysteme, Universität-Siegen, 1992.
- [20] D. Ley, J. Klicker, and B. Scheffe. Intelligent multisensor system for high-speed and high-precision 3D metrology. In *Proc. SPIE Vision, Sensors, and Control for Automated Manufacturing Systems*, volume 2063, pages 2–13, 1993.
- [21] D. Justen and K. Hartmann. 3D-image processing through grayscale images and distance data related to individual pixels. In *Proc. SPIE Visual Information Processing*, volume 3716, 1999.
- [22] D. Justen, K. Hartmann, and R. Schwarte. 3D-Bildverarbeitung auf Basis eines Grauwertbildes mit vereinzelt Entfernungsdaten. In *Proc. Optische Formerfassung*, pages 249–258, 1999.
- [23] D. Justen. *Untersuchung eines neuartigen 2D-gestützten 3D-PMD-Bildverarbeitungssystems*. PhD thesis, Universität Siegen, 2001.
- [24] O. Loffeld. *Estimationstheorie I / Grundlagen und stochastische Konzepte*. Oldenbourg Verlag, 1990.
- [25] O. Loffeld. *Estimationstheorie II / Anwendungen - Kalman-Filter*. Oldenbourg Verlag, 1990.
- [26] R. Gerdes. *Dreidimensionales Messen mit einer Videokamera unter Ausnutzung geometrischer Randbedingungen*. PhD thesis, Universität Siegen, 1994.
- [27] J. Li, O. Loffeld, B. Buxbaum, and Z. Xu. Optimization of a laser ranging system in the case of colored noise. *SPIE - Intelligent Robots and Computer Vision XV*, 2904:108–116, 1996.
- [28] E. Schubert. *Mehrfach farbcodierte Triangulationsverfahren zur topometrischen Erfassung und Vermessung von 3D-Objekten*. PhD thesis, Universität Siegen, 1996.
- [29] J. Olk. *Untersuchung von Laufzeitentfernungsmeßsystemen unter besonderer Berücksichtigung des Referenzproblems*, volume 5. Shaker Verlag, 1997.
- [30] R. Otterbach. *Robuste 3D-Objekterkennung und Lagebestimmung durch Auswertung von 2D-Bildfolgen*. PhD thesis, Universität Siegen, 1995.
- [31] R. Schwarte, H. Heinol, Z. Xu, J. Olk, and W. Tai. Schnelle und einfache optische Formerfassung mit einem neuartigen Korrelations-Photodetektor-Array. In *Proc. Optische Formerfassung*, volume 30, pages 199–209, 1997.
- [32] R. Schwarte, H. Heinol, B. Buxbaum, Z. Xu, and T. Ringbeck. Neuartige 3D-Visionsysteme auf der Basis Layout-optimierter PMD-Strukturen. *Technisches Messen*, 65:264–271, 1998.
- [33] Z. Xu, R. Schwarte, H. Heinol, B. Buxbaum, and T. Ringbeck. Smart pixel -photometric mixer device (PMD) / new system concept of a 3D-imaging camera-on-a-chip. In *5th Intern. Conf. on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pages 259–264, 1998.
- [34] A. Kolb. Reparatur und Texturierung von Polygonmodellen für Virtual Reality Anwendungen. <http://vrlab.fh-wedel.de/themen/modellreparatur.html>, 2002-2003. BMBF-gefördert in Rahmen des aFuE-Programms, Förderkennziffer 1706002.
- [35] E. Löcherbach. *Ein Beitrag zur On-line-Entfernungsbestimmung mittels Stereo-Bildauswertung*. PhD thesis, Fachbereich Elektrotechnik, Universität Siegen, 1986.
- [36] A. Amankwah and O. Loffeld. On space and search strategies data in image registration. In *Conf. Proc. Intern. Radar Symposium*, Berlin, 2005.
- [37] A. Amankwah and O. Loffeld. On search space and search data strategies in image registration. In *Proc. Oceans*, Washington, 2005.
- [38] A. Amankwah and O. Loffeld. Image registration by subimage selection and maximization of mutual information. In *Proc. IGARSS*, Seoul, Korea, 2005.
- [39] I. Walterscheid, A. Brenner, J. Ender, and O. Loffeld. A bistatic airborne SAR experiment and processing results. In *Conf. Proc. Intern. Radar Symposium*, Berlin, 2005.
- [40] R. Westermann and C. Rezk-Salama. Real-Time Volume Deformation. In *Proc. EUROGRAPHICS*, 2001.
- [41] C. Rezk-Salama, M. Scheuring, G. Soza, and G. Greiner. Fast Volumetric Deformation on General Purpose Hardware. In *Proc. Graphics Hardware*, 2001.
- [42] C. Rezk-Salama, P. Hastreiter, G. Greiner, and T. Ertl. Non-linear registration of pre- and intraoperative volume data based on piecewise linear transformations. In *Proc. Vision, Modeling and Visualization*, 1999.
- [43] P. Hastreiter, C. Rezk-Salama, G. Soza, G. Greiner, R. Fahlbusch, O. Ganslandt, and C. Nimsky. Strategies for brain shift evaluation. *Medical Image Analysis*, 8(4):447–464, 2004.

- [44] C. Rezk-Salama, P. Hastreiter, K. Eberhardt, B. Tomandl, and T. Ertl. Interactive Direct Volume Rendering of Dural Arteriovenous Fistulae in MR-CISS Data. In *Proc. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI)*, 1999.
- [45] A. Kolb. Bildentzerrung in der Strahlentherapie. Projekt-Dokumentation Fa. positronic beam service GmbH, Rellingen, 2002.
- [46] A. Kolb and H.-P. Seidel. Interpolating scattered data with C^2 surfaces. *Computer Aided Design*, 27:4:277–282, 1995.
- [47] G. Greiner, A. Kolb, and A. Riepl. Scattered data interpolation using data-dependent optimization techniques. *Graphical Models*, 64:1–18, 2002.
- [48] A. Kolb, H. Pottmann, and H.-P. Seidel. Surface reconstruction based upon minimum norm networks. In M. Dæhlen, T. Lyche, and L.L. Schumaker, editors, *Math. Methods for Curves and Surfaces*, pages 293–304, Ulvik, Norway, 1995. Vanderbilt University Press.
- [49] A. Kolb, H. Pottmann, and H.-P. Seidel. Fair surface reconstruction using quadratic functionals. In *Proc. EUROGRAPHICS '95*, volume 14, pages 469–479. Eurographics, Blackwell Publishers, 1995.
- [50] A. Kolb and L. John. Volumetric model repair for virtual reality applications. In *Proc. EUROGRAPHICS*, pages 249–256. University of Manchester, 2001.
- [51] C. Bastuck, T.Hambürger, T.Hof, M.Keller, P.Kohlmann, J.Mehnert, S.Nowak, C.Rezk-Salama, and A.Kolb. An open and extensible framework for visualization. In *Proc. GI-Informatiktage*. Gesellschaft für Informatik, 2005.
- [52] C. Rezk-Salama and A. Kolb. A vertex program for efficient box-plane intersection. In *Proc. Vision, Modeling and Visualization*, 2005. to appear.
- [53] C. Rezk-Salama, P. Hastreiter, C. Teitzel, and T. Ertl. Interactive exploration of volume line integral convolution based on 3D-texture mapping. In *Proc. IEEE Conf. on Visualization*, 1999.
- [54] A. Kolb, L. Latta, and C. Rezk-Salama. Hardware-based simulation and collision detection for large particle systems. In *Proc. Graphics Hardware*, pages 123–131. ACM/Eurographics, 2004.
- [55] A. Kolb and N. Cuntz. Dynamic particle coupling for GPU-based fluid simulation. In *Proc. Symposium on Simulation Technique*, 2005. to appear.
- [56] R. Strzodka, M. Doggett, and A. Kolb. Scientific computation for simulations on programmable graphics hardware. *J. Simulation Practice & Theory*, 2005. to appear.
- [57] L. Latta and A. Kolb. Homomorphic factorization of BRDF-based lighting computation. In *ACM Proceedings SIGGRAPH*, volume 21:3, pages 509–516. ACM, 2002.
- [58] A. Kolb and C. Rezk-Salama. Efficient empty space skipping for per-pixel displacement mapping. In *Proc. Vision, Modeling and Visualization*, 2005. to appear.

3 Ziele und Arbeitsprogramm

Im Zusammenwirken der verschiedenen Teilprojekte im Antragspaket *Dynamisches 3D Sehen* setzt der vorliegende Antrag des Teilprojektes *2D3DProc* den Schwerpunkt auf die Kamera-nahe Datenverarbeitung. Damit hat das Teilprojekt *2D3DProc* eine enge Beziehung zu den Teilprojekten *MultiCam* und *PMDSim*. Abbildung 6 auf Seite 26 zeigt die inhaltliche Verknüpfung des Teilprojektes *2D3DProc* mit allen anderen Teilprojekten auf.

Im folgenden werden zunächst knapp die wesentlichen Projektziele formuliert (Abschnitt 3.1), für die dann im Arbeitsprogramm detailliert die geplante Vorgehensweise beschrieben wird (Abschnitt 3.2)

3.1 Ziele

Die Ziele des Teilprojektes liegen in der Erforschung grundlegender Fragestellungen beim Einsatz einer oder mehrerer, mono- oder binokularer 2D/3D-Kamerakombinationen. Hierbei stehen anwendungsübergreifende Problemstellungen im Vordergrund.

Zunächst seien die wesentlichen Randbedingungen, die für den Einsatz von 2D/3D-Kamerakombinationen unter Einbindung einer 3D-PMD-Kamera vorliegen, zusammengefasst (siehe hierzu auch die Präambel des Antragspaketes):

1. Wesentliche Kenngrößen der PMD-Sensorik:
 - 1.1. relativ geringe laterale Auflösung von derzeit maximal 120×160 Pixeln
 - 1.2. hohe zeitliche Auflösung der PMD-Kamera mit > 10 FPS
 - 1.3. grundsätzliche Problematik aktiver Messtechniken, z.B. Ungenauigkeit bei ungünstigen Reflexionseigenschaften von Objektoberflächen
 - 1.4. spezielle Problematik der Mehrphasenmessung, wodurch bei bewegten Szenen große Ungenauigkeiten in Silhouettenbereichen auftreten
 - 1.5. spezielle Problematik des Messaufbaues durch getrennte Beleuchtungs- und Sensoreinheiten (*bistatischer Aufbau*)
 - 1.6. Unterdrückung von Hintergrundlicht erfolgt im Photogate PMD-Ansatz aktiv (siehe Präambel), wobei eine Pixelsättigung nicht in allen Anwendungsfällen vermieden werden kann
 - 1.7. aktuell keine direkte Erfassen von Farbinformation in dem PMD-Sensor
2. Sinnvolle Sensor-Kombinationen
 - 2.1. mono- oder statisch binokulare Kombination eines PMD- mit einem 2D-Bildsensor mit ähnlicher zeitlicher, aber höherer lateraler Auflösung (*2D/3D-Kamera*)
 - 2.2. mehrere 2D-Bildsensoren mit einer PMD-Kamera in einem *statischen, multiokularen Aufbau*
 - 2.3. mehrere 2D/3D-Kameras in räumlich dynamischer Lage, die eine Szenerie beobachten (*dynamisch multiokularer Aufbau*)

Aus den genannten Randbedingungen leiten sich die zentralen Ziele des Antrages unmittelbar ab:

Untersuchung des PMD-Bildgebungsprozesses: Zur Umwandlung von PMD-Sensordaten in Tiefenmesswerte muss zunächst der PMD-Bildgebungsprozess untersucht und modelliert werden. Ziel ist es, ein mathematisches Modell auf analytischer und/oder statistischer Basis zur Beschreibung der Abbildung von PMD-Sensordaten in Tiefenmesswerte. Hierbei wird eng mit den Teilprojekten *PMDSim* und *MultiCam* zusammengearbeitet.

Kalibrierung: Ausgehend von einer 2D/3D-Kamera und des o.g. Modells sind technische Methoden zur Kalibrierung, insbesondere zur Tiefenkalibrierung, verschiedener 2D/3D-Kamerakombinationen zu entwickeln (siehe auch Abschnitt 2.1.1). In diesem Fragekomplex wird eng mit dem Teilprojekt *MultiCam* kooperiert.

Koregistrierung für dynamische Kamerapositionen: Im Falle von mehreren 2D/3D-Kameras in räumlich dynamischer Lage müssen diese zueinander registriert werden (siehe auch Abschnitt 2.1.2)

Fusion, lokale Verfeinerung und Speicherung von 2D/3D-Daten: Die Fusion der Daten der verschiedenen Sensoren, die zu einem Zeitpunkt erfasst werden ist eine zentrale Schlüsselaufgabe. Hierbei sollen Sensorfehler möglichst ausgeglichen und die fusionierten 2D/3D-Daten effizient gespeichert und zugreifbar gemacht werden (siehe auch Abschnitte 2.1.4 und 2.1.5).

Ein weiteres Ziel des Projektes ist die Weiterentwicklung des einfachen Simulators aus Abschnitt 2.2.1. Dieser Simulator soll, in Kombination mit dem Simulator des Teilprojektes *PMDSim*, in den Teilprojekten *PMDLumi* und *3D-PoseMap* dazu verwendet werden, unmittelbar auf synthetische PMD- und 2D/3D-Kameradaten zugreifen zu können.

3.2 Arbeitsprogramm

In der folgenden Darstellung des Arbeitsprogramms wird zu den in Abschnitt 3.1 genannten Forschungszielen die inhaltliche Vorgehensweise beschrieben und in Abschnitt 3.2.5 zeitlich zueinander in Beziehung gesetzt. Thematisch übergreifend wird eine optimierte Umsetzung einzelner Verarbeitungsschritte auf programmierbarer Graphikhardware untersucht.

3.2.1 Untersuchung des PMD-Bildgebungsprozesses

Aktuell ist die PMD-Kamera ein Tiefensensor. Die Kalibrierung hat als wesentliches Ziel die Tiefensensor- in Entfernungsmessdaten umzuwandeln. Im Folgenden werden derzeit bekannte Ursachen beschrieben, die dazu beitragen, dass die PMD-Sensorwerte keine direkten Entfernungswerte darstellen. Zu den Ursachen werden Ansätze zur Fehlerreduzierung erläutert, die im Rahmen des Projektes tiefergehend untersucht werden sollen:

Bistatischer Aufbau von Beleuchtung und Sensor: Aufgrund des konstruktiv bedingten Abstandes zwischen Beleuchtung und PMD-Sensor-Chip (bistatischer Aufbau) ergibt sich bei der Laufzeitmessung eine Verzerrung durch einen ortsvarianten Versatz zwischen Sensor-Objekt-Entfernung und Lichtlaufzeit (siehe Abbildung 4).

Gesucht wird der Tiefenabstand eines Objektpunkte \mathbf{P} , also p_z in lokalen Kamera-Koordinaten^{3,4}, gemessen wird aber

$$\overline{\mathbf{BP}} + \overline{\mathbf{PS}} = \sqrt{(p_x - b_x)^2 + p_y^2 + p_z^2} + \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} \quad (1)$$

³Koordinatenschreibweise: $\mathbf{P} = (p_x, p_y, p_z)^T$

⁴hierbei wird ein linkshändiges Koordinatensystem angenommen

wobei \mathbf{B} die Position der Beleuchtungsmoduls und \mathbf{S} die des PMD-Sensors darstellt.

Das Problem hat starke Parallelen zu bistatische Aufnahmesituationen beim Synthetic Aperture Radar (SAR). In diesem Kontext zeigt sich bei einem Sender (hier Beleuchtung) und einem örtliche versetzten Empfänger (hier PMD-Sensor-Chip) eine als *flat top hyperbola* bekannte Verzerrungsfunktion [1] für die Entfernungswerte, analog Gleichung (1). Loffeld et al. [2] zeigen, wie diese Verzerrung im SAR-Kontext kompensiert werden kann.

Entsprechend muss zur Korrektur der Sensorwerte ein angepasste Verzerrungsmodell entworfen werden.

Hierbei ist von Vorteil, dass bei bekannten intrinsischen Parametern in der Bildebene der Einfallswinkel α bekannt ist. In diesem Fall ergibt sich der gesuchte Abstandswert p_z aus Gleichung (1) und dem bekannten Wert b_x direkt als analytische Lösung einer quadratischen Gleichung.

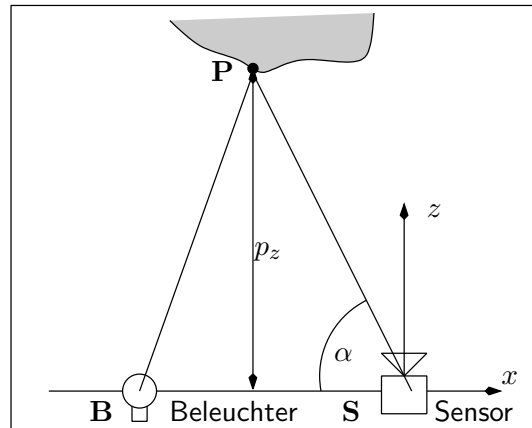


Abbildung 4: Bistatischer Aufbau des PMD-Sensors mit Beleuchtungsmodul.

Verteilte Beleuchtung: Die aktive Beleuchtungseinheit eines PMD-Systems besteht im Normalaufbau aus zwei räumlich getrennten Modulen. Jedes dieser Module besteht seinerseits aus einer verteilten Anordnung von Lichtquellen (LEDs). Aus dieser multistatischen Anordnung resultieren eine Reihe von Effekten, die das Lichtsignal an den PMD-Sensorexeln direkt beeinflussen.

Einerseits besteht das resultierende Empfangsecho eines einzelnen Objektpunktes \mathbf{P} im Raum aus den Überlagerungen aller LED-Einzelsignale. Andererseits entstehen im 3D Raum konstruktive und destruktive Interferenzen der von den PMD-Beleuchtungsmodulen ausgestrahlten Modulationswellen. Dieser Effekt ist vergleichbar mit dem Abbildungsverhalten Synthetischer Apertur Radarsysteme (SAR), bei denen Auflösungszellen in Metergröße (Facetten) als unendliche Überlagerung individueller, in dieser Auflösungszelle verteilter Elementarziele modelliert werden. Als Ergebnis der kohärenten Beleuchtung sind die Helligkeitsdaten Rayleigh verteilt und die Entfernungsphasen gleichverteilt. Diesen Effekt bezeichnet man als Speckle-Rauschen. Speckle-Rauschen ist proportional zur Wellenlänge.

Ein ähnlicher Effekt wird bei der PMD-Bildgewinnung erwartet. Die Kohärenz ergibt sich hier in Bezug auf die verwendete Modulationswellenlänge, die in der Größenordnung von einigen 10 Metern liegt. Das sich ergebende Specklemuster wird aufgrund der geringen Bildausdehnung im Verhältnis zur Wellenlänge weniger statistisch erscheinen und mehr einem *Floating Pattern Noise* ähneln, welches sich in seiner Verteilung abstandsabhängig ändert. Diese Einflüsse verkomplizieren die Koregistrierungsproblematik aufgrund ihrer multiplikativen Eigenschaften nicht unbeträchtlich (siehe Abschnitt 3.2.3). Ein Ziel der Arbeiten ist die Erforschung dieser Problematik und die

schlussendliche Klärung der Frage, mit welcher Genauigkeit eine dynamische Kalibrierung möglich ist.

Eine weitere Problemstellung ergibt sich im Hinblick auf die Ermittlung der Entfernung aus der Phase. Während bei einer großen (gegen Unendlich strebenden) Anzahl von Beleuchtungsquellen von rein statisch verteilten Phasenfehlern ausgegangen werden könnte, werden bei einer endlichen Anzahl von LEDs (< 10) diese Einflüsse eher einen Floating Pattern Phase Noise ähneln. Es ergibt sich ein Winkel- und Entfernungsabhängiger quasi deterministischer Phasen- und Entfernungsfehler, der sich bereit im mm-Bereich auswirken dürfte. Die Fragestellung, inwieweit und wie diese nur quasi-deterministischen Einflüsse dynamisch kalibrierbar sind, ist weiterer Gegenstand dieser Arbeiten.

3.2.2 Kalibrierung

Für die Kalibrierung der PMD-Kamera wird entweder von einer einzelne 3D-Kamera oder eine einzelne 2D/3D-Kamera (mono- oder statisch binokular) ausgegangen.

Hinsichtlich einer hochgenauen Kalibrierung der PMD-Kamera wird derzeit im ZESS ein spezielles *Präzisions-Testfeld* konzipiert (siehe Teilprojekt *MultiCam*, sowie Abschnitt 5 zum Bezug zu einem beantragten BMBF-Projekt). Dieses Präzisionstestfeld dient dazu, die mathematischen Modelle aus Abschnitt 3.2.1 zu verifizieren und ggf. zu überarbeiten bzw. zu verfeinern.

Eine Kalibrierung mit einem Präzisions-Messplatz ist sehr zeit- und kostenintensiv. Entsprechend ist ein weiteres Forschungsziel die Integration der Tiefenkalibrierung in effiziente Kalibriertechniken zur Korrektur linearer und nicht-linearer Verzerrung in der Bildebene, wie sie für 2D-Bildkameras genutzt werden (siehe Abschnitt 2.1.1). Hierbei wird auf bereits vorhandene Ergebnisse aufgebaut (siehe Abschnitt 2.2.1 und Todt et al. [3]). Diese bildbasierten Methoden [4] liefern durch die 3D-Registrierung von 2D Mustern Tiefenwerte, die mit den Daten der PMD-Kamera abgeglichen werden können. Konzeptionell ergibt sich daraus ein schnelleres und weniger aufwendiges Kalibrierverfahren. Grundsätzlich werden hierbei allerdings Probleme aufgrund der relativ geringen lateralen Auflösung der PMD-Kamera erwartet, welche durch die hohe Auflösung der 2D-Bildkamera lokal ausgeglichen werden sollen.

Die Kalibrierung ist auch Teil des Arbeitsprogramms im Teilprojekt *MultiCam*. Hierbei liegt der Fokus jedoch stärker auf der internen Kalibrierung der Multichipkameras, insbesondere der monokularen 2D/3D-Kamera. Grundsätzliche Fragestellungen der Kalibrierung von 2D/3D-Kameras werden in enger Kooperation mit dem Teilprojekt *MultiCam* bearbeitet.

Für statisch binokulare 2D/3D-Kameras können bildbasierte Kalibriertechniken auch simultan arbeiten. Hierbei wird durch die 3D-Registrierung der 2D Muster indirekt die Transformation zwischen den beiden Kameras ermittelt.

Nach aktuellem Wissensstand gehen die Antragsteller davon aus, dass alle Kalibrieraufgaben mit allen in dem Projekt betrachteten Kameraaufbauten (siehe Abschnitt 3.1) *separierbar* sind, d.h. dass für komplexere Aufbauten mit mehreren Kameras jede Kamera für sich

kalibriert werden kann.

3.2.3 Koregistrierung für dynamische Kamerapositionen

Die Koregistrierung von Bildern (allgemein: 2D-Datenarrays) beschreibt die Aufgabe, zwei oder mehrere Bilder der gleichen Szene, die aus unterschiedlichen Aufnahmepositionen und mit verschiedenen Aufnahmeverfahren erfasst wurden, so aufeinander abzubilden, dass korrespondierende Pixel in den Daten den gleichen Objektpunkt beschreiben. Die Aufnahmeverfahren können abweichende Auflösung und Dimension besitzen und aufgrund unterschiedlich stark ausgeprägter Störphänomene abweichende statistische Eigenschaften aufweisen. Die Pixelinhalte sind im konkreten Fall von 2D/3D-Kameras multivariat (RGB, Reflektivität und Tiefe).

Ein wesentlicher Teilschritt der Koregistrierung besteht in der Identifikation von Ähnlichkeiten zwischen korrespondierenden Merkmalen, Marken oder Pixelgruppen und der Bestimmung ihrer relativen Verschiebung auf Subpixelgenauigkeit. Von zentraler Bedeutung hierfür ist die Definition des Ähnlichkeitsmaßes, mit dessen Hilfe die Ähnlichkeit von korrespondierenden Merkmalen beschrieben wird. Abhängig von den Bildinhalten und deren statischen Eigenschaften liefern unterschiedliche Ähnlichkeitsmetriken unterschiedliche Ergebnisse und bedingen i.a. unterschiedliche Vorgehensweisen bei der Koregistrierung.

Vor diesem Hintergrund läßt sich die Problematik in eine Reihe von Einzelpunkten aufgliedern, die bearbeitet werden sollen:

1. Untersuchung und Entwicklung von Algorithmen zur Koregistrierung von PMD (Reflektivität und Entfernung) und 2D-Kameradaten (RGB)
 - Ähnlichkeitsmaße für multivariate Pixelmerkmale: Korrelation, Kolmogorov's Information, Kullback's Information, Mutual Information, Alignability, Gradiententechniken
 - Optimale, ähnlichkeitsmaßangepasste Templatewahl automatische Templategenerierung: Maximierung der spektralen Bandbreite (Korrelation), Maximierung der Template-Entropie (Informationsmaße), Binsize und Klassengröße
 - Geometrie-basierte Ähnlichkeitsmaße, z.B. Abstände von Punktwolken unter Einbeziehung der lokalen 3D-Geometrie mit *Iterative Closed Point (ICP)*-Ansätzen [5]
2. Bestimmung von Verschiebungsvektorfeldern anhand
 - simulierter Daten (Bilder unterschiedlicher Pixelgeometrien und Störstatistiken)
 - realer Daten (PMD-Bilddaten 120×160 Pixel, 64×16 Pixel, 2D-Farbdaten 1024×768 Pixel)
3. Bestimmung der Transformationsvorschriften zwischen den 5D-Datensätzen (RGB, Reflektivität und Tiefe)
4. Darstellung der Ergebnisse mit simulierten und experimentellen Daten

3.2.4 Fusion, lokale Verfeinerung und Speicherung 2D/3D-Daten

Im Rahmen der Fusion von 2D- und 3D-Daten soll neben der Speicherung der registrierten Daten mit unterschiedlicher Auflösung die Verfeinerung der grob aufgelösten 3D-Daten durch die hochaufgelösten 2D-Daten untersucht werden. Grundsätzlich wird im folgenden davon ausgegangen, dass die Daten registriert vorliegen (siehe Abschnitt 3.2.3).

Zur Fusion der dichten 2D-Farbdaten mit den „dünnen“ PMD-Entfernungsdaten kommen Interpolationstechniken (Bezier-Splines und Kalman-Filter) zum Einsatz. Die lokale Verfeinerungen der Tiefendaten soll zunächst bei Verwendung einer einzelnen 2D/3D-Kamera untersucht werden. Hierzu werden Methoden zur Identifikation von Objektgrenzen durch einfache Tiefensegmentierung mittels Schwellwertverfahren oder durch aktive Kantenverfolgung in den grob aufgelösten 3D-Daten untersucht. Eine anschließende Abbildung der groben Objektkanten in die 2D-Bilddaten in Kombination mit lokaler Kantenextraktion ermöglicht eine schnelle Identifikation der feinen Objektkanten in 2D. Die Bestimmung zugehöriger Tiefenwerte kann ohne weitere Information nur durch lokale 1D- oder 2D-Interpolation bzw. lokale Geometrierekonstruktion erfolgen.

Im Falle eines multiokularen Kameraaufbaus mit mindestens zwei 2D-Bildkameras können Ansätze, wie sie zur Verfeinerung der visuellen Hülle verwendet werden zum Einsatz kommen (siehe Abschnitt 2.1.4). Insbesondere der Einsatz lokaler Mutual Information Maße zur Bewertung und ggf. Korrektur von Oberflächenpunkten, ähnlich zu Kuzu und Sinram [6], erscheint hier vielversprechend. Im Grunde entspricht dies einem kombinierten Ansatz aus PMD-Entfernungsmessung und Stereovision (siehe auch Teilprojekt *3D-PoseMap*).

Die Speicherung der fusionierten Daten hat vornehmlich das Ziel, sowohl eine effiziente Integration von Daten aus mehreren Sensoren, als auch einen effizienten Zugriff auf die fusionierten 2D/3D-Daten zu ermöglichen. Eine problemspezifische Integration der Daten über die Zeit ist nicht Bestandteil dieses Teilprojektes (siehe hier Teilprojekte *PMDLumi* und *3D-PoseMap*).

Im Falle einer monokularen 2D/3D-Kamera besitzen die 2D- und 3D-Daten zu einem festen Zeitpunkt einen kanonischen räumlichen Bezug. In dieser Situation können die Daten zunächst als 2D Datenfelder mit fünf Komponenten (RGB, Reflektivität und Tiefe) beschrieben werden.

Zur Speicherung lokal verfeinerter, monokularer 2D/3D-Daten sollen adaptive Datenstrukturen untersucht werden. Zur Komprimierung von Bilddaten werden u.a. Wavelet-basierte Techniken verwendet. Shapiro [7] führte den *Embedded Zerotree Wavelet (EZW)* Ansatz ein, bei dem ganze Teilbäume einer Wavelet-Zerlegung nach einer heuristischen Bewertung bei der Kodierung verworfen werden. Die Untersuchung dieser Ansätze zur Speicherung von lokal verfeinerten 2D/3D-Daten ist Untersuchungsgegenstand dieses Antrages. Zu beachten ist hierbei, dass die Anzahl von Verfeinerungsebenen aufgrund der unterschiedlichen Auflösungen der 2D- und der 3D-Kamera mit etwa 2 – 3 deutlich geringer ist als bei einer Vollbild-Kodierung mit dem EZW-Algorithmus.

Für die Speicherung lokal verfeinerter, multiokularer 2D/3D-Daten ist aus heutiger Sicht nicht entscheidbar, ob sich eine strukturierte Speicherung z.B. auf Basis einer parametrisierten Kugel oder eine unstrukturierte Kodierung besser eignet. Erzwingt eine strukturierte

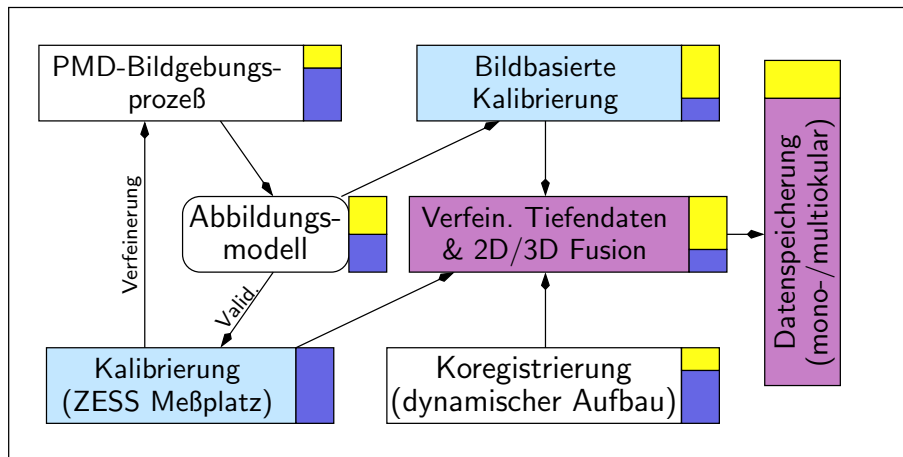


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen den Arbeitspaketen aus Abschnitt 3.2 und deren Aufteilung zwischen den beiden Arbeitsgruppen von Prof. Kolb (gelb) und Prof. Loffeld (blau).

Speicherung i.a. ein Resampling der Messdaten, ist der Zugriff auf die Daten beim unstrukturierten Ansatz deutlich ineffizienter, wenn keine räumliche Kohärenz der Datenzugriffe vorliegt. Aufgabe innerhalb des Projektes ist es, für den statisch multiokularen, sowie für den dynamisch multiokularen Aufbau entsprechende Untersuchungen durchzuführen.

3.2.5 Zeitliche Einordnung der Aufgaben

Die oben genannten Aufgaben stehen in klarer inhaltlicher Relation zueinander, ohne das sie strikt sequentiell bearbeitet werden müssen. Der Zusammenhang ist graphisch in Abbildung 5 aufgezeigt. Hierbei wurde eine etwas andere Gruppierung als in Abschnitt 3.2 vorgenommen, die stärker die inhaltlich zusammenhängenden Teilaufgaben widerspiegelt.

Arbeitspaket	2006				2007				2008				2009			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
PMD-Bildgebungsprozeß	x	x	x	x	x	x	x									
Kalibrierung (ZESS Messplatz)			x	x	x	x	x									
Bildbasierte Kalibrierung				x	x	x	x	x	x							
Verfeinerung Tiefendaten 2D/3D Fusion						x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Koregistrierung (dynamischer Aufbau)								x	x	x	x	x	x	x	x	x
Datenspeicherung (mono-/multiokular)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					

Tabelle 1: Zeitliche Einordnung der Einzelaufgaben in die verschiedenen Quartale im Laufe der Projektbearbeitung

Tabelle 1 zeigt die zeitliche Einordnung der Einzelaufgaben in die verschiedenen Quartale im Laufe der Projektbearbeitung.

Literatur zu Zielen und Arbeitsprogramm

- [1] D. Aria, A. Monti Guarnieri, and F. Rocca. Focusing bistatic synthetic aperture radar using dip move out. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(7):1362–1376, 2004.
- [2] O. Loffeld, H. Nies, V. Peters, and S. Knedlik. Models and useful relations for bistatic SAR processing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10), 2004.
- [3] S. Todt, C. Rezk-Salama, and A. Kolb. Real-time fusion of range and light field images. SIGGRAPH Poster-Session, 2005.
- [4] Human Interface Technology Lab, University of Washington. ARToolKit. www.hitl.washington.edu/research/artoolkit, 2005.
- [5] P. Biber, S. Fleck, and W. Straßer. A probabilistic framework for robust and accurate matching of point clouds. In *26th Pattern Recognition Symposium (DAGM)*, 2004.
- [6] Y. Kuzu and O. Sinram. Volumetric model refinement by shell carving. In *Prof. XXth ISPRS Congress*, pages 128–153, 2004.
- [7] J. Shapiro. Embedded image coding using zerotrees of wavelet coefficients. *IEEE Trans. on Signal Proc.*, 41(12):3445–3462, 1993.

3.3 Untersuchungen am Menschen

finden nicht statt.

3.4 Tierversuche

finden nicht statt.

3.5 Gentechnologische Experimente

finden nicht statt.

4 Beantragte Mittel

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

4.1 Personalkosten

1. 1 BAT2a-Stelle für die Dauer von 2 Jahren
2. 2 50%-BAT2a-Stellen für die Dauer von 2 Jahren

3. Zwei studentische Hilfskräfte⁵ mit insgesamt 120h/Monat

Am Lehrstuhl für Computergraphik & Multimediasysteme wird ein einzustellender Doktoranden mit der Erforschung der oben spezifizierten Probleme betraut. Die beiden halben BAT2a-Stelle sind dem ZESS, Projektbereich 2 unter der Leitung von Prof. Loffeld zugeordnet. Die Doktoranden werden mit hoher Wahrscheinlichkeit aus den Reihen der Absolventen des Fachbereiches gewonnen. Dieser Personenkreis hat bis zum Erwerb des Diploms eine fundierte theoretische und praktische Ausbildung in den projektspezifischen Problemfeldern erworben. Die Zuordnung der Forschungsaufgaben zu den beiden Arbeitsgruppen ist in Abbildung 22 dargestellt.

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

wie im 1. und 2. Förderungsjahr

4.2 Wissenschaftliche Geräte

1.	PMD-Kamera 120 × 160 Pixel gemäß Angebot Fa. PMD-Technologies	5.788,40 EUR
	Summe (inkl. MwSt)	5.788,40 EUR

Begründung des Bedarf

Um einen schnellen Projektstart mit realen PMD-Messdaten zu ermöglichen, ist der Einsatz einer PMD-Kamera unbedingt erforderlich. Die Kamera wird in einem binokularen Aufbau mit einem 2D-Bildsensor zu einer 2D/3D-Kamerakombination verknüpft.

Es gibt am ZESS zwar eine Reihe von PMD-Prototypen, die jedoch hinsichtlich der Auflösung hinter der aktuellen PMD-Kamera der Firma PMD-Technologies zurückbleiben. Die höhere Auflösung ist in diesem, wie in allen vernetzten Teilprojekten des Antragspaketes von großer Bedeutung. Daher ist eine frühzeitige Auseinandersetzung mit den spezifischen Anforderungen dieser höher auflösenden PMD-Kamera unerlässlich.

4.3 Verbrauchsmaterial

Es werden in geringem Umfang Druckkosten pro Jahr anfallen.

1.	Trockentinte für Farbsublimationsdrucker	300 EUR
2.	Druckaufträge für Poster u.ä.	100 EUR
	Summe pro Jahr	400 EUR

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

wie im 1. und 2. Förderungsjahr

⁵Personenbezeichnungen wie „Mitarbeiter“ sind durchweg geschlechtsneutral zu verstehen

4.4 Reisen

Als jährlichen Reisekosten werden in den ersten beiden Jahren veranschlagt⁶:

1.	Präsentation von Ergebnissen auf internationalen Tagungen	
1.1	EUROGRAPHICS, PacificGraphics oder SIGGRAPH	4.000 EUR
1.2	ICCV oder ECCV	4.000 EUR
2.	Arbeitstreffen m. externen Partnern	1.000 EUR
	Summe pro Jahr	9.000 EUR

Geschätzter Aufwand im 3. und 4. Förderungsjahr:

wie im 1. und 2. Förderungsjahr

Begründung:

Die zentralen Themen, die in diesem Projekt adressiert sind, sind den beiden Forschungsrichtungen Computergraphik (1.1) und Computervision (1.2) zuzurechnen. Entsprechend sind Forschungsergebnisse in beiden Themengebieten zu veröffentlichen.

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:

wie im 1. und 2. Förderungsjahr

4.6 Sonstige Kosten

Keine

5 Voraussetzung für die Durchführung des Vorhabens

Abbildung 6 stellt die wesentlichen Verknüpfungen zwischen dem vorliegenden Projektantrag *2D3DProc* und den anderen Teilprojekten des Antragspaketes *Dynamisches 3D-Sehen* dar.

Mit dem Teilprojekt *MultiCam* wird eng im Bereich der Kalibrierung, insbesondere der Tiefenkalibrierung von 2D/3D-Kamerakombinationen kooperiert. Das Präzisions-Testfeld des Teilprojektes *MultiCam* stellt hierzu eine IP-basierte Schnittstelle Remote-Experimente zur Verfügung, die zur Validierung von Kalibrierungsansätzen dienen soll.

⁶Mittlere Kosten für eine der Konferenzen für zwei Teilnehmer

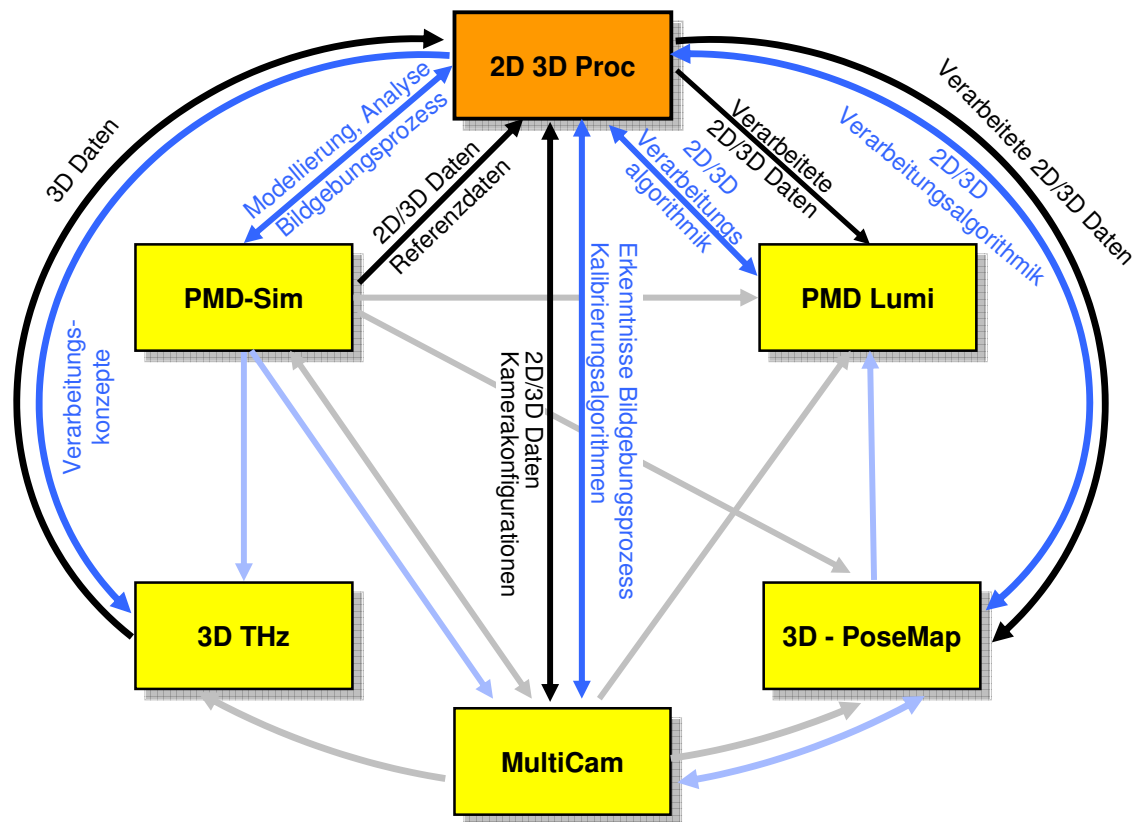


Abbildung 6: Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Teilprojekten des Antragspaketes *Dynamisches 3D-Sehen*. Schwarze Pfeile weisen auf den Austausch von Daten hin, blaue Pfeile stellen den Austausch von Know-How oder anderer Informationen dar.

Die Analyse des Bildgebungsprozesses wird in enger Abstimmung mit dem Simulationsprojekt *PMDSim* erfolgen. Durch die Nutzung von idealen und realistisch verrauchten PMD-Daten aus diesem Projekt ist zudem eine Validierung der Algorithmik in *2D3DProc* möglich. Die Erkenntnisse zum Bildgebungsprozess finden direkten Einzug in das Teilprojekt *MultiCam*, welche dort der Optimierung der konkreten Hardware-Konfiguration, beispielsweise beim Aufbau der Beleuchtungseinheit, dienen.

Der vorliegende Antrag zum Teilprojekt *2D3DProc* konzentriert sich auf anwendungsübergreifende Fragestellungen der 2D/3D-Datenverarbeitung. Dadurch ist ein enger Bezug zu den Teilprojekten *PMDLumi* und *3D-PoseMap* gegeben. Beide Projekte erarbeiten ihrerseits anwendungsoptimierte Algorithmen und Datenstrukturen, welche die aufbereiteten Daten aus *2D3DProc* nutzen können. Mit beiden Projekten wird ein intensiver Austausch in Fragen der 2D/3D-Verarbeitungsalgorithmik stattfinden. Es wird erwartet, dass die Umsetzung von Ansätzen aus unterschiedlichen Forschungskontexten zu ähnlich gelagerten Problemstellungen wichtige Erkenntnisse liefern.

Die Vernetzung mit dem Teilprojekt *3DTHz* konzentriert sich einerseits auf die Nutzung der Algorithmen zur 2D-Datenverarbeitung in Bereich von THz-Systemen. Andererseits werden

im zweiten Projektabschnitt (3. und 4. Jahr) erste Ergebnisse in der 3D-Bildrekonstruktion erwartet, welche dann unmittelbar in dem Teilprojekt *2D3DProc* verarbeitet werden können.

Im Rahmen der BMBF-Leitinnovation *Schlüsselkomponenten für die Service Robotik* wurde vom ZESS unter der Leitung von Prof. Loffeld und in Zusammenarbeit mit den Firmen PMDTec und ifm-Elektronik die Projektskizze *HiCam3* formuliert und eingereicht. Als Ergebnis der Skizzenbegutachtung erhalten die Antragsteller die Möglichkeit, einen gemeinsamen BMBF-Antrag zu formulieren. Zentraler Gegenstand dieses Antrags ist die infrastrukturelle Ausstattung zum Aufbau des in Abschnitt 3.2.2 beschriebenen Mess- und Kalibrierplatzes.

5.1 Zusammensetzung der Arbeitsgruppe

Die Arbeitsgruppe von Prof. Kolb umfaßt derzeit fünf Wissenschaftler, diejenige von Prof. Loffeld besteht aus neun wissenschaftlichen Mitarbeitern. Aus diesem Personenkreis werden neben den aus den beantragten Mitteln zu finanzierenden Mitarbeitern folgende Personen in die Bearbeitung des beantragten Projektes eingebunden sein:

1. Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb, Lehrstuhlinhaber Computergraphik & Multimediasysteme (CG), ZESS-Mitglied
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Loffeld, ZESS Projektbereichsleiter, Projektbereich 2 (PB 2)
3. Dr.-Ing. Christof Rezk-Salama (CG), Leiter des Arbeitsgebietes Wissenschaftliche Visualisierung
4. M.Sc. Seyed Ghobadi (PB 2), Arbeitsgebiet: PMD/CMOS Imaging
5. M.Sc. Fayez Hasouneh (PB 2), Arbeitsgebiet: PMD-Signalanalysis und Optical Local Positioning Systems
6. Dipl.-Phys. Omar Löprrich (PB 2), Arbeitsgebiet: Distributed 2D/3D Imaging Sensorics
7. Dipl.-Ing. Valerij Peters (PB s), Arbeitsgebiet: PMD-Simulation
8. M.Sc. Arun Prasad (PB 2), Arbeitsgebiet: PMD-Systemtechnik
9. Dipl.-Ing. Severin Todt (CG), Arbeitsgebiet: Graphikkarten-basierte 2D/3D-Bildverarbeitung, Lichtfeldrekonstruktion

5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern

Es wird mit den anderen Arbeitsgruppen im Rahmen dieses Antragspaketes in enger Abstimmung kooperiert (siehe Präambel *Dynamisches 3D-Sehen*).

Eine Zusammenarbeit besteht zudem mit folgenden Wissenschaftlern bzw. Arbeitsgruppen:

Dr. Strzodka, Caesar Research Center/Stanford University:

Simulationsalgorithmen auf programmierbarer Graphikhardware

Prof. Wiechert, FOMAAS⁷, Universität Siegen: Simulationen und Visualisierung von Partikelsystemen und Hochenergiemühlen unter Einsatz programmierbarer Graphikhardware

Universitätsklinik Erlangen: Entwicklung intuitiver Benutzerschnittstellen und spezialisierter Darstellungsverfahren für konkrete klinische Problemstellungen im Bereich Visualisierung.

5.3 Arbeiten im Ausland und Kooperation mit ausländischen Partnern

Kooperationen besteht mit folgenden ausländischen wissenschaftlichen Einrichtungen:

Siemens Research, Princeton, USA: Entwicklung von Visualisierungsverfahren mit dem Schwerpunkt des Generierung von Transferfunktionen zur Visualisierung und Analyse tomographischer Bilddaten mit breitem Anwendungsspektrum im Bereich Medizintechnik

VRVis Research Center, Österreich: Arbeiten im Bereich prototypischer Applikationen für die Segmentierung und Fusion medizinischer Bilddaten und zur Weiterentwicklung echtzeitfähiger Volumenvisualisierung.

5.4 Apparative Ausstattung

Der Lehrstuhl für Computergraphik & Multimediasysteme besitzt die räumliche und apparative Ausstattung zur Durchführung des beantragten Projektes. Die Rechner-Ausstattung umfasst neben PCs für die Ausbildung mehrere Arbeitsplatzrechner für Mitarbeiter mit Dual-Prozessoren und, teilweise stereo-fähigen, Graphikkarten.

Am ZESS existieren mehrere PMD-Prototypen, sowie eine weitreichende Infrastruktur für Sensorsysteme im allgemeinen und optische Sensorik im besonderen.

Des weiteren wurde kürzlich ein HBFEG-Antrag auf ein Labor für Virtual Environments (DFG Antragsnummer HBFEG-013-180) positiv beschieden. Der Aufbau und die operative Inbetriebnahme ist für das Jahres 2006 geplant.

5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben

Weitere Mittel für Sachausgaben, die über die speziellen Verbrauchsmaterialien unter 4.3 hinausgehen, werden vom Lehrstuhl für Computergraphik & Multimediasysteme und vom ZESS getragen.

⁷FOMAAS= Forschungsinstitut für Multidisziplinäre Analysen und Systemoptimierung

5.6 Sonstige Voraussetzungen

keine

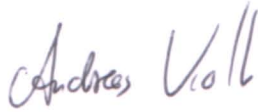
6 Erklärungen

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



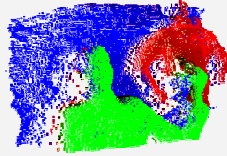
(Prof. Dr. Andreas Kolb)



(Prof. Dr. habil. Otmar Loffeld)

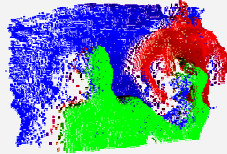
8 Verzeichnis der Anlagen

1. Tabellarischer Lebenslauf mit Schriftenverzeichnis
2. Einführender Artikel zum Photonic Mixing Device, PMD:
H. Kraft, J. Frey, T. Moeller, M. Albrecht, M. Grothof, B. Schink, H. Hess and B. Buxbaum: *3D-Camera of High 3D-Frame Rate, Depth-Resolution and Background Light Elimination Based on Improved PMD (Photonic Mixer Device)-Technologies*, OPTO, Nürnberg, Mai 2004.
3. Kurzprofil des Zentrums für Sensorsysteme (ZESS) als zentrale wissenschaftliche Einrichtung der Universität Siegen
4. IPP-Broschüre des DAAD



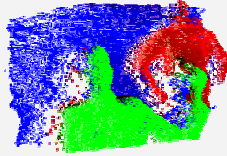
Kurzprofil Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb

Geburtsdatum	04. 06. 65
Abitur 1985	Note 1.0
1986-1992	Mathematik –Studium (Diplom), Universität Erlangen-Nürnberg Abschlußnote: sehr gut
1992-1995	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Graphische Datenverarbeitung (Prof. Dr. Hans-Peter Seidel) der Universität Erlangen-Nürnberg
Promotion, 1995	Optimierungsansätze bei der Interpolation verteilter Daten Note: sehr gut
1996-1998	Entwickler und Projektleiter bei der Fa. debis Systemhaus Engineering GmbH, Leinfelden
1998-2003	Professor (C3) für Medieninformatik (Schwerpunkt Computergraphik) an der Fachhochschule Wedel
Seit Oktober 2003	Professur (C4) für Computergraphik und Multimediasysteme, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik der Universität Siegen
Lehrgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Computergraphik• Geometrische Modellierung• Visualisierung• Virtuelle Realität (VR)
Forschungs- u. Arbeitsgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Simulationen auf Graphikhardware• Sensordatenverarbeitung und –fusion• Rendering und Beleuchtungssimulation auf Graphikhardware• Geometrische Modellierung, Modelloptimierung und -rekonstruktion
Aktuelle Vorhaben:	<ul style="list-style-type: none">• Interaktive Verarbeitung hochdynamischer und massiver 2D und 3D Daten im Bereich der SAR-Sensorik• Interaktive Verarbeitung multimodaler 2D/3D-Sensordaten zur Modell- und Beleuchtungsrekonstruktion und zur 3D-Poseschätzung• Effiziente Umsetzung von Modellierungs- und Simulations- algorithmen auf Graphikhardware
Aktuell:	<ul style="list-style-type: none">• 1998 Mitglied im GI-Fachbereich "Graphische Datenverarbeitung"• Mitglied der EUROGRAPHICS Association seit 2001• Mitglied bei ACM/SIGGRAPH seit 2002• Programm- Komitees: Open SG Forum 2003, Web3D Symposium 2003• Seit 2004 Mitglied im NRW Zentrum für Sensorsysteme (ZESS)• Herausgeber einer Sonderausgabe des Journals „Simulation Practice & Theory“ zum Thema „Programmable Graphics Hardware“• Editorial Board Member Journal „Simulation Practice & Theory“ seit 2005• Reviewer u.a. für: SIGGRAPH, EUROGRAPHICS, ACM-TOG, CGF, CAD, CAGD, SIMPRA, IEEE-TSMC, IEEE-TGRS
Weitere Informationen	http://www.cg.fb12.uni-siegen.de/



Schriftenverzeichnis Prof. Dr.-Ing. Andreas Kolb

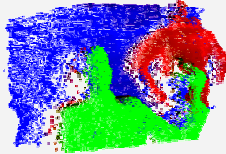
1. C. Rezk-Salama, A. Kolb. A vertex program for efficient box-plane intersection, zur Publikation angenommen, Proc. Vision, Modeling & Visualization, 2005
2. A. Kolb, C. Rezk-Salama: Efficient empty space skipping for per-pixel displacement mapping, zur Publikation angenommen, Modeling & Visualization, 2005.
3. R. Strzodka, M. Doggett, A. Kolb: Scientific Simulations on Graphics Hardware, zur Publikation angenommen, Simulation Practice and Theory, 2005
4. A. Kolb: Dynamic Particle Coupling for GPU-based Fluid Simulation, zur Publikation angenommen, 18. Sym. on Simulation (ASIM), 2005
5. S. Todt, C. Rezk-Salama, and A. Kolb. Real-time fusion of range and light field images. SIGGRAPH Poster-Session, 2005
6. C. Bastuck, T.Hambürger, T.Hof, M.Keller, P.Kohlmann, J.Mehnert, S.Nowak, C.Rezk-Salama, A.Kolb: An Open and Extensible Framework for Visualization, Tagungsband der Informatiktag 2005 der Gesellschaft für Informatik
7. A. Kolb, L. Latta, C. Rezk-Salama: Hardware-based Simulation and Collision Detection for Large Particle Systems, Proc. Graphics Hardware, 2004
8. L. Latta, A.Kolb: Homomorphic Factorization of BRDF-based Lighting Computation, ACM-SIGGRAPH, 21:3, pp 509-516, 2002
9. G.Greiner, A.Kolb, A.Riepl: Scattered Data Interpolation Using Data-dependent Optimization Techniques, Graphical Models 64 pp 1-18, 2002
10. A.Kolb, L.John: Volumetric Model Repair for Virtual Reality Applications, Eurographics 2001, ISSN 1017-4656
11. A.Kolb,W.Ülzmann,M.Bühner: Interaktion und Skalierbarkeit im Bereich Telepräsenz, Technischer Bericht, FH Wedel und Lumo Graphics GmbH
12. P.Slusallek, R.Klein, A.Kolb, G.Greiner: An Object-Oriented Approach for Curves and Surfaces, Object-oriented and fixed programming paradigms, Ed: P.Wisskirchen, Springer, pp 33-44, 1996
13. A. Kolb: Optimierungsansätze bei der Interpolation verteilter Daten, Dissertation, Universität Erlangen, 1995
14. G.Greiner, A.Kolb, R.Pfeifle, H.-P.Seidel, M.Encarnacao, R.Klein: A Platform for visualizing curves and surfaces, CAD, pp 559-566, 1995
15. A.Kolb, H.Pottmann, H.-P.Seidel: Fair Surface Reconstruction Using Quadratic Functionals, Eurographics, Vol. 14, pp 469-479, 1995
16. A.Kolb, H.Pottmann, H.-P.Seidel: Surface Reconstruction Based Upon Minimum Norm Networks in Math. Methods for Curves and Surfaces, Vanderbilt University Press, 1995
17. A.Kolb, H.-P.Seidel: Interpolating Scattered Data with C-2 Surfaces, CAD, 27:4, pp 277-282, 1995
18. P.Slusallek, R.Klein, A.Kolb, G.Greiner: An Object-Oriented Framework for Curves and Surfaces with Applications, Curves & Surfaces II, Eds: P.Laurent, A.LeMehaute, L.Schumaker, AK Peters, pp 457-466, 1994
19. P.Slusallek, R.Klein, A.Kolb, G.Greiner: An Object-Oriented Approach to Curves and Surfaces, 4. Eurographics Workshop on Object-Oriented Graphics, pp 29-39, 1994



Kurzprofil

Prof. Dr.-Ing. habil. Otmar Loffeld

Geburtsdatum	01.06.1955						
Studium 1976 – 1982	Elektrische Nachrichtentechnik an der RWTH Aachen						
1982-1987	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtenverarbeitung der Universität-GH Siegen						
Promotion, 1986	‘Ein neuartiges ‘Switched Kalman-Filter’ mit geringer Wortbreite zur hochauflösenden Entfernungsmessung nach dem Laserpuls-Laufzeitverfahren’, Summa cum laude (mit Auszeichnung)’						
1987-1989	Hochschulassistent an der Universität-GH Siegen						
Habilitation, 1989	‘Grundlagen, Konzepte und Anwendungen der Estimationstheorie’						
Forschungspreis NRW, 1990	‘Doppler-Centroid-Estimation für X-SAR-Anwendungen mit Kalman-Filtern’						
1991	Professor für ‘Estimationstheorie und Digitale Signalverarbeitung’ Universität-GH Siegen						
1995	Gründung und Aufbau des Projektbereichs 2, ‘Optimale Signalverarbeitung- Multisensor Datenfusion, Remote Sensing - SAR’ im Zentrum für Sensorsysteme (ZESS) der Universität-GH Siegen.						
Lehrgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Allgemeine Nachrichtentechnik• Nachrichtenverarbeitung• Stochastische Modelle und Estimationstheorie• SAR-Signalverarbeitung						
Forschungs- u. Arbeitsgebiete:	<ul style="list-style-type: none">• Optimale Signal- und Informationsverarbeitung- Estimationstheorie• Multi-Sensor-Datenfusion (Motormanagement und Navigation)• PMD-Signalverarbeitung• Remote Sensing - SAR (SAR-Bildgewinnung und - Interferometrie)						
Aktuelle Vorhaben	<ul style="list-style-type: none">• Baseline-Kalibrierung für die Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)• Bistatische Synthetic Aperture Radar Signalverarbeitung• Environmental Exploration (E²N)• TerraSAR-X• Tandem-X Mission						
Aktuell:	<ul style="list-style-type: none">• Seit 2000 Stellvertretender Vorsitzender des Zentrums für Sensorsysteme (ZESS) der Universität Siegen, seit 1995 Projektbereichsleiter des Projektbereichs 2: Optimale Signalverarbeitung -Sensor Daten Fusion, Remote Sensing -SAR• Seit 2002 Sprecher des IPP ‚Multi Sensorics‘, DAAD International Postgraduate Programme Multi Sensorics						
Bisherige DFG-Vorhaben	<table><tr><td>Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse</td><td>DFG, Lo455/4-1, 1995-1996</td></tr><tr><td>Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse</td><td>DFG, Lo455/4-2/3, 1996-1998</td></tr><tr><td>Synthetic Aperture Radar Datenfusion „SynFusion“</td><td>DFG, Lo455/5-1, 2000-2003</td></tr></table>	Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-1, 1995-1996	Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-2/3, 1996-1998	Synthetic Aperture Radar Datenfusion „SynFusion“	DFG, Lo455/5-1, 2000-2003
Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-1, 1995-1996						
Integrierte 2D/3D-Geometrieprüfung und Szenenanalyse	DFG, Lo455/4-2/3, 1996-1998						
Synthetic Aperture Radar Datenfusion „SynFusion“	DFG, Lo455/5-1, 2000-2003						
Weitere Informationen	http://linuxpb2.zess.uni-siegen.de/pb2/						

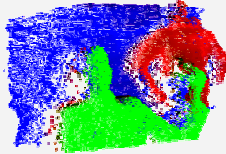


Publikationsverzeichnis

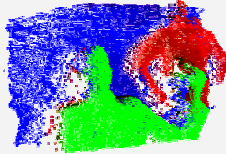
Prof. Dr.-Ing.habil. O. Loffeld

1.1. Veröffentlichungen als Coautor

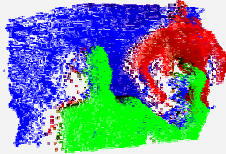
1. INV Siegen 'Industrielle Füllstandsmessung nach dem Laserpuls-Laufzeitverfahren', Abschlußbericht des Forschungsprojektes im Auftrag der Firma Krohne, Duisburg unter Förderung durch das AIF (F.u.E.-Projekt 2610), Siegen, Juli 1986.
2. INV, MBB 'Laser Diode Rangefinder Demonstration Model', Final Report, ESTEC Contract Number 5159/82/NL/HP, March 1985.
3. BMFT-Verbundprojekt 'Intelligente Sensorsysteme für die Handhabungstechnik (FT 2.420) ', Protokoll- und Ergebnisberichte der Verbundteilnehmer, halbjährlich bis März 1988.
4. Schwarte, R., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Graf, W., Hartmann, K., Heuten, F., Loffeld, O., 'Implementation of an Advanced Laser Ranging Sensor Concept', Proc. IAF Conference, Stockholm, 1985.
5. Schwarte, R., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Dänel, R., Graf, W., Hartmann, K., Heuten, F., and Loffeld, O., 'A New Concept for a Precise and Versatile Laser Range Finder and Optical Radar', Proc. of the Laser 87 Conf., München, 1987.
6. Schwarte, R., Aller, I., Baumgarten, V., Bundschuh, B., Graf, W., Hartmann, K., Loffeld, O., 'Neuartige Sensorsysteme, Laserradar mit Impulslaufzeitmessung', in 'Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik', Fachberichte Messen - Steuern - Regeln, Springer Verlag, Berlin, 1989.
7. Tran Duc, L., Loffeld, O., 'Theoretische und experimentelle Untersuchung und Verifikation neuer Meßwertverarbeitungsalgorithmen für die schnelle, dreidimensionale Objekterfassung', Forschungsbericht für die Alfred Krupp von Bohlen und Halbach-Stiftung, Essen, 1987.
8. Klaus, F., Loffeld, O., 'A Concept for the Simulation of SAR Data', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
9. Li, A., Loffeld, O., 'Two Dimensional SAR Processing in the Frequency Domain', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
10. Steinbrecher, U., Bamler, R., Runge, H., Loffeld, O., 'Performance Analysis of Kalman Filters For Doppler Centroid Estimation', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
11. Hartmann, K., Loffeld, O., Li, A., Wiebusch, K., 'A Multiprocessor System For Synthetic Aperture Radar Focusing', Proc. International Conference on DSP Applications and Technology, Berlin, 1991.
12. Klaus, F., Loffeld, O., 'Simulation of Planetary Surfaces for a SAR Data Simulator', Proc. IGARSS'92, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Houston, 1992.
13. Klaus, F., Blewonska, U., Loffeld, O., 'Simulation of Shuttle Trajectory and Attitude for a SAR-Simulator', Proc. IGARSS'93, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo 1993.
14. Mahmoud, R., Loffeld, O., Hartmann, K., 'Multi -Sensor Data Fusion for Autonomous Guided Vehicles', SPIE International Conference on Sensors and Control for Advanced Automation II, Frankfurt, June, 1994
15. Xu Z., Bundschuh B., Schwarte R., Loffeld O., Klaus F., Heinol H., "Optimization of precision aspheric lenses for advanced small sensor heads of large numerical aperture", SPIE-Design, Fabrication, and Applications of Precision Plastic Optics, Vol. 2600, S. 158-165, Philadelphia 1995.
16. Xu Z., Heinol H., Schwarte R., Loffeld O., "An Enhanced Multi-probing Recovering Algorithm Based on Color Mixed Non-linear Modulation and its Application in a 3D-Vision System", SPIE-Intelligent Robots and Computer Vision XIV, Vol. 2588, S. 200-207, Philadelphia 1995.
17. Krämer, R., Loffeld, O., 'Phase Unwrapping for SAR Interferometry with Kalman Filters', Conf. Proceedings EUSAR'96, Königswinter 1996.
18. Krämer, R., Loffeld, O., 'A Novel Procedure For Outline Detection', Conf. Proceedings EUSAR'96, Königswinter 1996.
19. Klaus, F., Hein, A., Loffeld, O., 'Generating Interferometric SAR Raw Data Using SISAR', Conf. Proceedings EUSAR'96, Königswinter 1996.



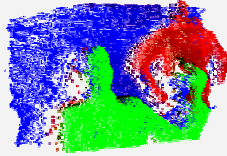
20. Krämer, R., Loffeld, O., 'Presentation of an improved Phase Unwrapping Algorithm based on Kalman filters combined with local slope estimation', Fringe'96, Zürich 1996.
21. Balzer, D., Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Demodulation of Phase Modulated Signals using an expanded Observation Model in Kalman Filters', PIERS 96, Progress in Electromagnetics Research Symposium, 8-12 Juli 96, Innsbruck, Austria.
22. Arndt, Ch., Loffeld O., 'Information gained by Data-Fusion', Conf. Proc. EUROPTO'96, Conference on Sensors and Sensor-Systems, Besancon, 1996.
23. Arndt Ch., Loffeld O., 'Information gained by pseudoredundant Measurements', Conf. Proc. EUROPTO'96, Conference on Sensors and Sensor-Systems, Besancon, 1996.
24. Ganser, T., Scherer, M., Loffeld, O., 'Realization of a Multisensor data fusion algorithm of spark ignition engine control', Conf. Proc. EUROPTO'96, Conference on Sensors and Sensor-Systems., Besancon, 1996.
25. Scherer, M., Ganser, T., Loffeld, O., 'Data fusing for optimization of spark ignition engine control', Conf. Proc. EUROPTO'96, Conference on Sensors and Sensor-Systems., Besancon, 1996.
26. Xu Z., Bundschuh B., Schwarte R., Loffeld O., Klaus F., Heinol H., Klein R., 'Power transmittance of optimized aspherical lens with large numerical aperture', SPIE-Specification, Production, and Testing of Optical Components and Systems, Vol. 2775, S. 639-646, Glasgow 1996.
27. Xu Z., Bundschuh B., Schwarte R., Loffeld O., Klaus F., Heinol H., Klein R., 'Power transmittance of optimized aspherical lens with large numerical aperture', SPIE-Specification, Production, and Testing of Optical Components and Systems, Vol. 2775, S. 639-646, Glasgow 1996.
28. Xu Z., Heinol H., Schwarte R., Loffeld O., Klein R., Olk J., "Model of synthetic non-linear modulation and its algorithm for 3D color vision system", SPIE EOS-Design and Engineering of Optical Systems, Vol. 2774, S. 267-275, Glasgow 1996.
29. Li J., Loffeld O., Schwarte R., Buxbaum B., Xu Z., "Optimization of a laser ranging system in the case of colored noise", SPIE-Intelligent Robots and Computer Vision XV, Vol. 2904, S. 108-116, Boston 1996
30. Heinol H., Xu Z., Schwarte R., Loffeld O., "New Optical 2D-Modulator of large aperture for 3D-Vision systems", SPIE EOS -Design and Engineering of Optical Systems, Vol. 2774, S. 293-300, Glasgow 1996.
31. Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Pseudoredundant Measurements in Nonlinear Mappings', ISIT 97, IEEE International Symposium on Information Theory, 29 June - 4 Juli 97, Ulm, Germany.
32. Arndt, Ch., Loffeld, O., 'How to create Pseudoredundant Measurements', SPIE Conference on Sensors and Sensorsystems, European Symposium on Lasers, Optics, and Vision for Productivity and Manufacturing, 16-20 June 97, Munich, Germany.
33. Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Optimal weighting of Phase Data with varying Signal to Noise Ratio', SPIE Conference on Sensors and Sensorsystems, European Symposium on Lasers, Optics, and Vision for Productivity and Manufacturing, 16-20 June 97, Munich, Germany.
34. Balzer, D., Arndt, Ch., Loffeld, O.; 'C4x online demodulation of phase modulated signals using different Kalman Filters models', SPIE Conference on Sensors and Sensorsystems, European Symposium on Lasers, Optics, and Vision for Productivity and Manufacturing, 16-20 June 97, Munich, Germany.
35. Scherer, M., Arndt Ch., Loffeld, O. 'Influence of Manifold Pressure Pulsations to Mean Value Models in Air Fuel Ratio Control', 5th IEEE Mediteranean Conference on Control and Systems, 21-23 Juli 97, (<http://www.ecs.umass.edu/ece/djaferis/5thMED/>)
36. Arndt, Ch., Hein, A., Loffeld, O., 'Information Theory in Data Fusion', Conference 'Fusion of Earth data', The European Association of Remote Sensing Laboratories (EARSeL), Société des Electriciens et Electroniciens de France (SEE), Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSMP), 28-30 Januar 98, Sophia Antipolis, Frankreich
37. Hart, M., Ziegler, M., Loffeld, O., 'Adaptive Estimation of Cylinder Air Mass Using the Combustion Pressure, SAE, Conf. Proc., Detroit, Michigan, Feb. 1998.
38. Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Information in SAR Images with Special Emphasis on Phase Information', International Conference Signal Processing and Communications, 11-14 Februar 98, Canary Islands, Spain (<http://www.gpds.ulpgc.es/icspc98>)



39. Balzer, D., Arndt, Ch., Loffeld, O., 'Improving Nonlinear Kalman Filters with different Adaptive Elements', IASTED International Conference Signal Processing and Communications, 11-14 Februar 98, Canary Islands, Spain (<http://www.gpds.ulpgc.es/icspc98>)
40. Hein, A., Loffeld, O., Arndt, Ch., 'Correcting Shadowing, Layover and Foreshortening Heighterrors in interferometric SAR-images', IASTED International Conference Signal Processing and Communications, 11-14 Februar 98, Canary Islands, Spain (<http://www.gpds.ulpgc.es/icspc98>)
41. Mittermayer, J., Moreira, A., Loffeld, O., 'The Frequency Scaling Algorithm for Spotlight Processing, IRS'98 München, 1998.
42. Mittermayer, J., Moreira, A., Loffeld, O., 'High precision processing of spotlight SAR data using the extended chirps scaling algorithm', EUSAR'98, Friedrichshafen, 1998.
43. Mittermayer, J., Moreira, A., Loffeld, O., 'Comparison of Stripmap and Spotlight Interferometric SAR Processing using E-SAR Raw Data, Proc. EUSAR'2000, München 2000.
44. Mittermayer, J., Moreira, A., Loffeld, O., 'Spotlight SAR Data Processing Using the Frequency Scaling Algorithm', IEEE Trans. On Geoscience and Rem. Sensing, Vo. 37, No. 5, Sep. 1999, pp. 2198 – 2214.
45. Knedlik, St., Loffeld, O., Hein, A., Arndt, Ch., 'A Novel Approach to Accurate Baseline Estimation', Proc. IGARSS'99, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, 1999.
46. Knedlik, St., Loffeld, O., 'Analysis of different Maximum A Posteriori Estimation Approaches for Interferometric Parameter Calibration', Proc. IGARSS'2000, Honolulu, Hawaii, 2000.
47. Loffeld, O., Nies, H., Gebhardt, U., „Beschreibung des interferometrischen Cartwheels und dessen Vorteile zu Standard SAR-Verfahren“, TN-Cartwheel ZS/01, Technical Note SAFARI, Strategische Ausrichtung für raumgestützte Radar Instrumente, Dornier Satellitensysteme, 2000.
48. Ziegler, M., Hart, M., Loffeld, O., Scherer, M., Model-Based Calibration of Dynamic Plants in Engine Applications, ISATA 2000 on Automotive and Transportation Technology, ISATA 00AE021, Dublin, Ireland, 2000.
49. Knedlik, St., Loffeld, O., Arndt, Chr., Nies, H., 'Baseline Estimation from Orbit Data', PIERS 2001 (Progress In Electromagnetics Research Symposium), 2001, Osaka / Japan
50. Knedlik, S., Loffeld, O., Gebhardt, U., "Baseline Estimation using Phase Fringes and Ocean Elevation Models", Conf. Proc. AP-RASC '01 Asia-Pacific Radio Science Conference, Tokyo, Japan, 2001.
51. Knedlik St., Loffeld, O., Gebhardt, U., 'Baseline Estimation using Phase Fringes and Ocean Elevation Models', AP-RASC'01 (2001 Asia-Pacific Radio Science Conference), 2001, Tokyo / Japan.
52. Knedlik St., Loffeld, O., ' Baseline Estimation and Prediction referring to the SRTM', Proc. IGARSS'2002, Toronto, Canada, 2002.
53. Knedlik, St., Loffeld, O., Nies, H., "Sensitivity of DEMs Generated from Interferometric Cartwheel Configurations", Conf. Proc. IGARSS'03, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse 2003, ISBN: 0-7803-7930-6.
54. Nies, H., Loffeld, O., Gebhardt, U., Peters, V., "Orbit Estimation of the Interferometric Cartwheel Using an Extended Linearized Kalman Filter", Conf. Proc. IGARSS'03, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse 2003, 0-7803-7930-6
55. Gebhardt, U., Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., "Orbit Modeling Related to Cartwheel Geometry", Conf. Proc. IGARSS'03, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse 2003, 0-7803-7930-6
56. Knedlik, S., Loffeld, O., Nies, H., Gebhardt, U., "On the Advantage of Intersatellite Ranging Systems for Orbit Estimation in Bistatic SAR", Conf. Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
57. Nies, H., Loffeld, O., Knedlik, S., "A new Concept in Orbit Modeling Using a Decentralized Estimation Algorithm", Conf. Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
58. Gebhardt, U., Loffeld, O., Kalkuhl, M., Nies, H., Knedlik, S., "Orbit Tracking and Interpolation Using a Realistic Gravitation Model", Conf. Proc. IGARSS'04, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, Alaska, 2004,
59. Nies, H., Loffeld, O., Knedlik, S., Gebhardt, U., Wiechert, W., "A Data Fusion Approach for Distributed Orbit Estimation", Conf. Proc. IGARSS'04, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Anchorage, Alaska, 2004,

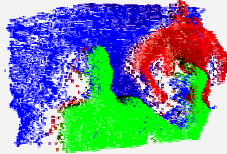


60. Haid, M.; Link, M., Loffeld, O., Marquardt, G., Melander, S., Schneider, U., , Inertial Low Cost Navigation with INS Error Modelling and Kalman Filter', Conf. Proc. Sensor 2005, Nürnberg, May, 2005.
61. Amankwah, A., Loffeld, O., "Image Registration by Subimage Selection and Maximization of Mutual Information", invited paper at IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005,
62. Medrano-Ortiz, A., Loffeld, O., Knedlik, S., Nies, H., Natroshvili K., , "Comparison of Doppler Centroid Estimators in Bistatic Airborne SAR", Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
63. Natroshvili, K., Loffeld, O., Nies, H., , "Bistatic SAR Processing – First Results", Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
64. Nies, H., Loffeld, O., Natroshvili, K., Walterscheid, I., Brenner, A., "Parameter Estimation for Bistatic Constellations", Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
65. Walterscheid, I., Ender, J. H. G., Brenner, A. R., Loffeld, O., 'Bistatic SAR processing using an omega-k type algorithm', Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
66. Kalkuhl M, Noh K, Loffeld O, Wiechert W, , "High precision simulation of near earth satellite orbits for SAR-applications", COMPUTATIONAL SCIENCE - ICCS 2004, PT 2, PROCEEDINGS LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE 3037: 228-235 2004
67. Walterscheid, I., Brenner, A. R., Ender, J. H. G., Loffeld, O., 'A bistatic airborne SAR experiment and processing results', Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
68. Uboldkosold, P., Knedlik, S., Loffeld, O., "Time Synchronization for Distributed Satellite Systems", Conf. Proc. IGARSS'05, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seoul, Korea, 2005.
69. Knedlik, S., Loffeld, O., Ige, S. , "Determining Position and Attitude by GPS-Experimental Results", Proc. European Navigation Conference, GNSS2005, Munich 2005
70. Amankwah, A. Loffeld, O., "On Space and Search Strategies Data in Image Registration", Conf. Proc. IRS, Berlin, 2005.
71. Walterscheid, I., Brenner, A. R. Ender, J. H. G., Loffeld, O., , "A bistatic airborne SAR experiment and processing results", Conf. Proc. International Radar Conference, IRS'05, Berlin, 2005
72. Amankwah, A., Loffeld, O., "On Search Space and Search Data Strategies in Image Registration", Conf. Proc. Oceans 2005, Washington, 2005.
73. Gebhardt, U., Loffeld, O., Nies, H., , "Bistatic airborne/spaceborne hybrid experiment: Basic Considerations", Conf. Proc. SPIE International Symposium on Remote Sensing 2005, Brugge, Belgium

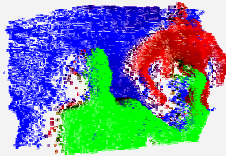


1.2. Veröffentlichungen als Autor

74. Loffeld, O., 'A Switched Kalman-Filter for the Implementation on Microprocessor Units for On-Line Applications', Proc. IASTED International Symposium, Applied Signal Processing and Digital Filtering', Paris, June 1985.
75. Loffeld, O., 'A Switched Kalman-Filter for the Implementation on Microprocessor Units for On-Line Applications', IASTED Microcomputer Applications Journal, Feb. 1987
76. Loffeld, O. and Hartmann, K., 'Technical Assistance For The Use Of Kalman Filtering in Spaceborne Laser Diode Rangefinders', Technical report, ESA/ESTEC Contract No. 6120/84/NL/PR, Noordwijk, 1986.
77. Loffeld, O., 'Kalman Filtering, Basic Concepts and Applications, An Introduction for Potential Users', Tutorial presented at the ESA/ESTEC meeting in Noordwijk, Dec. 1986
78. Loffeld, O., 'A New Switched Kalman Filter For 3D-Contourmeasuring With A Laser Diode Range Finder', Proc ASST'87, 6. Aachener Symposium für Signaltheorie, Informatik Fachberichte Nr. 153, Springer Verlag, Berlin, 1987.
79. Loffeld, O., 'Mathematical Model of the Shuttle's Attitude DLR Study Report, Contr. No. 5-565-4395, München, 1989.
80. Loffeld, O., 'Kalman Filtering for X-SAR Doppler Centroid Improvement, Part I, Kalman Filter Design', DLR Contract Report, Contr. No. 5-565-4408, München, 1989.
81. Loffeld, O., 'Kalman Filtering for X-SAR Doppler Centroid Improvement, Part II, Kalman Filter Implementation and Tests', DLR Contract Report, Contr. No. 5-565-4408, München 1989.
82. Loffeld, O., Estimationstheorie I, Grundlagen und stochastische Konzepte, Reihe 'Einführung in die Nachrichtentechnik' (Herausgeber A. Gottwald), Oldenbourg Verlag, München, 1990.
83. Loffeld, O., Estimationstheorie II, Anwendungen - Kalman-Filter, Reihe Einführung in die Nachrichtentechnik (Herausgeber A. Gottwald), Oldenbourg Verlag München, 1990.
84. Loffeld, O., 'Doppler Centroid Estimation With Kalman Filters', Conf. Proceedings IGARSS'90, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Washington, May 1990.
85. Loffeld, O., and Sack, A., 'Kalman Filters For The Demodulation Of Angular Modulated Signals', Proc. IEEE International Conference on Signal Processing '90, Beijing China, October 1990.
86. Loffeld, O., 'Doppler-Centroid-Estimation für Synthetic Aperture Radar im X-Band mit Kalman-Filtern', Beitrag zur Broschüre 'Forschungsland NRW - Thema Raumfahrt', im Auftrag des Ministers für Wissenschaft und Forschung des Landes NRW, 1990.
87. Loffeld, O., 'Estimating Time Varying Doppler Centroids with Kalman Filters', Proc. IGARSS'91, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Helsinki 1991.
88. Loffeld, O., 'Estimating Range and Time Varying Doppler Centroids with Kalman Filters', Proc. IGARSS'93, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo, 1993.
89. Loffeld, O. 'Demodulation of Noisy Phase or Frequency Modulated Signals with Kalman Filters', ICASSP'94, International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Adelaide, Australia, April, 1994.
90. Loffeld, O., 'Phase Unwrapping for SAR Interferometry with Kalman Filters', IGARSS'94, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Pasadena, Aug. 1994.
91. Loffeld, O., Hein, A., 'SAR Processing by 'Inverse Scaled Fourier Transformation'', EUSAR'96, Königswinter 1996.
92. Loffeld, O., Arndt, A., Hein, A., O. Loffeld, Ch. Arndt, A. Hein, 'Estimating the Derivative of Modulo-Mapped Phases', Fringe 96, Zürich 1996, (<http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/>)
93. Loffeld, O., Tewes, J., 'FM-Rate Estimation From Azimuth Chirp Data', EUSAR'96, Königswinter 1996.
94. Loffeld, O., Arndt, A, 'Estimating the Derivative of Modulo-Mapped Phases', ICASSP'97, München, 1997.
95. Loffeld, O., Schneider, F., Hein, A., 'Focussing SAR Images By Inverse Scaled Fourier Transformation', IASTED International Conference Signal Processing and Communications, 11-14 Februar 98, Canary Islands, Spain (<http://www.gpds.ulpgc.es/icspc98>).

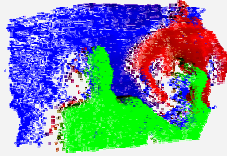


96. Loffeld, O., Hein, A., Schneider, F., 'SAR Focusing: Scaled Inverse Fourier Transformation and Chirp Scaling', IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'98, 6-10 Juli 1998, Seattle WA, USA
97. Loffeld, O., Krämer, R., 'Phase Unwrapping for SAR Interferometry – A Data Fusion Approach by Kalman Filtering', Proc. IGARSS'99, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, 1999
98. Loffeld, O., Knedlik, St., 'Tie Point Generation from Overlapping SAR Image Pairs by Kalman Filtering', Proc. IGARSS'2000, Honolulu, Hawaii, 2000
99. Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., Knedlik, St., 'Models and Useful Relations for Bistatic SAR Processing', invited paper, IGARSS'03, International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, July 2003.
100. Loffeld, O., Nies, H., Gebhardt, U., Peters, V., Knedlik, S., "Bistatic SAR - Some Reflections on Rocca's Smile", Conf. Proc. EUSAR'2004, Ulm, 2004.
101. Loffeld, O., Nies, H., Peters, V., Knedlik, St., "Models and Useful Relations for Bistatic SAR Processing", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 42., No 10, October 2004.
102. Loffeld, O., Progress in SAR-Interferometry, Invited Paper Conf. Proc. FRINGE'05, 5. International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, ITO – Institut für Technische Optik Stuttgart & BIAS - Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik. Stuttgart, Germany, September 11-14, 2005.



1.3. Eingeladene Vorträge

1. 'Kalman-Filter zur Konturvermessung mit einem Laserpuls-Laufzeitmeßgerät', Vortrag im Elektrotechnischen Kolloquium der Universität Siegen, Juni 1986.
2. 'Kalman-Filter, Theoretische Grundlagen und Anwendungen- eine Einführung', Vortrag bei der DLR Oberpfaffenhofen, Oktober 1987.
3. 'Kalman-Filter, Theorie und praktische Anwendungen', Vortrag im Elektrotechnischen Kolloquium der Universität Saarbrücken, Oktober 1987.
4. 'Kalman-Filter und optimale Konturestimationsalgorithmen zur Meßwertverarbeitung gestörter Entfernungsmessdaten', Vortrag im Elektrotechnischen Kolloquium der Technischen Universität Clausthal-Zellerfeld, Nov. 1987.
5. 'Mathematisches Zustandsraummodell zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Shuttle-Lagewinkel', Vortrag auf dem X-SAR Review-Treffen, DLR Oberpfaffenhofen, Oberpfaffenhofen, Oktober 1989.
6. 'Kalman-Filter-Modellbildung zur Doppler-Centroid-Estimation, Kalman-Filter-Design und Ergebnisse', Vortrag auf der X-SAR-Harmonisierungs-Tagung, DLR Oberpfaffenhofen, Oberpfaffenhofen, Dezember 1989.
7. 'Doppler Centroid Bestimmung mit Kalman-Filtern', Vortrag im Ausscheidungsverfahren Forschungspreis NRW 1990, Bielefeld, Februar 1990.
8. 'Doppler Centroid Estimation for X-SAR Precision Processing, Actual Achievements and Results', X-SAR International Review Meeting, DLR Oberpfaffenhofen, Oberpfaffenhofen, Mai 1990.
9. 'Estimationstheorie, Bindeglied zwischen Modell und Wirklichkeit', Beitrag in der Ringvorlesung 'Wissenschaftliche Modelle - Abschied von der Wirklichkeit?', Siegen, Januar 1991
10. 'Kalman-Filter zur Demodulation von winkelmodulierten gestörten Signalen', Vortrag im Informationstechnischen Kolloquium der Technischen Universität München, Januar 1992.
11. 'Multisensorielle Datenverarbeitung, Data-Fusion und Kalman-Filter', Vortrag im Graduiertenkolleg Intelligente Systeme für die Informations- und Automatisierungstechnik an der Technischen Hochschule Darmstadt, Dezember 1992.
12. 'Demodulation winkel- und amplitudenmodulierter, gestörter Signale mit Kalman-Filtern', Vortrag im elektrotechnischen Kolloquium der Universität-Wuppertal, Juni 1994.
13. 'Multi-Sensor Data Fusion for Automated Guided Vehicles', eingeladener Vortrag im VDI-BMFT-Workshop zum Anwendungspotential der Nichtlinearen Dynamik, Frankfurt, November 1994.
14. 'SAR-Fokussierung durch 'Skalierte Inverse Fouriertransformation'', Vortrag im nachrichtentechnischen Kolloquium der Ruhr-Universität Bochum, Juni 1996.
15. 'SAR Interferometrie zur Erfassung von 3D-Oberflächenmerkmalen', Heidelberger Bildverarbeitungsforum, Siegen, März 1999.
16. 'SAR – Computer Vision mit Mikrowellen', ZESS Workshop: "Image Sensors und Bilderfassungssysteme", Siegen, Juni 1999
17. 'Synthetic Aperture Radar - kohärente Fotografie mit Mikrowellen', Vortrag im Kolloquium des Interdisziplinären Zentrums für Wissenschaftliches Rechnen der Universität Heidelberg; Heidelberg, Januar 2000.
18. 'SAR-Interferometrische Herausforderungen', Vortrag im Kolloquium der Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München, Juni 2002.
19. 'From SRTM to Cartwheel – Calibration Challenges', Invited talk to 3. DLR/CNES Workshop 'Methods and Techniques for meter resolution', München, October 2002.
20. '3D-Imaging SAR', Eingeladener Vortrag zum VDI/VDE-Workshop Beurteilung bewegter 3D-Szenarien, Universität Siegen, Dezember 2002.
21. 'Bistatic SAR Processing and Rocca's ©', Invited talk to 4th DLR/CNES Workshop 'Methods and Techniques for meter resolution', München, November 2003.
22. 'Focusing Bistatic SAR – First Results', Invited talk to 5th DLR/CNES Workshop 'Methods and Techniques for meter resolution', München, December, 2004.



23. 'Progress in SAR-Interferometry', Invited Talk at FRINGE'05, 5. International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, ITO – Institut für Technische Optik Stuttgart&BIAS - Bremer Institut für Angewandte Strahltechnik. Stuttgart, Germany, September 11-14, 2005.
24. 'Recent Advances in Bistatic SAR Focusing' Invited talk to 6th DLR/CNES Workshop 'Methods and Techniques for meter resolution', München, Nov. 2005.

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

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.

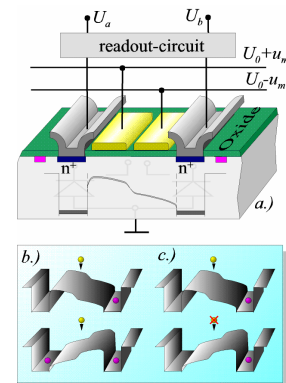


Figure 1: Operation principle of PG-PMD

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.

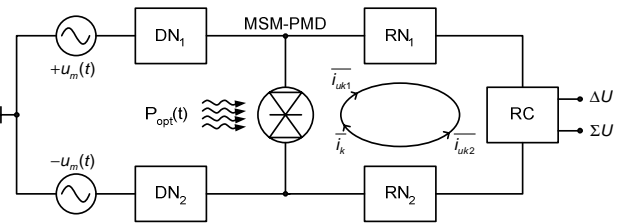


Figure 2: Basic structure of a SM-PMD-device based on a MSM-diode. The MSM-diode as central mixing unit is displayed with the symbol in the middle of the picture

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.

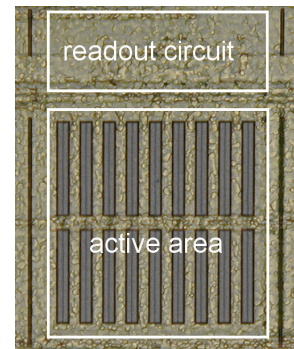


Figure 3: Photogate structure

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

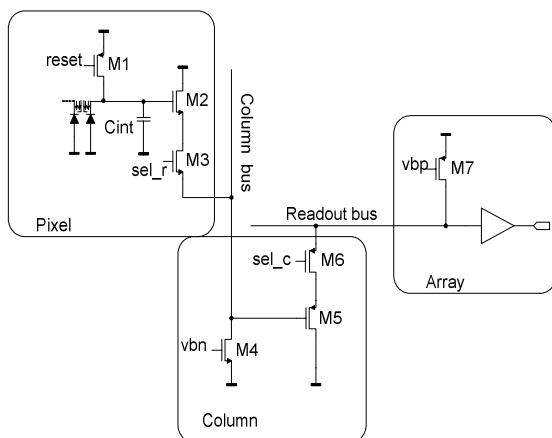


Figure 4: Simplified schematic of the PG-pixel and readout circuitry in the PMD array

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.

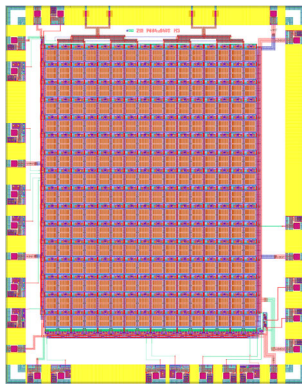


Figure 5: Layout of PG-PMD chip

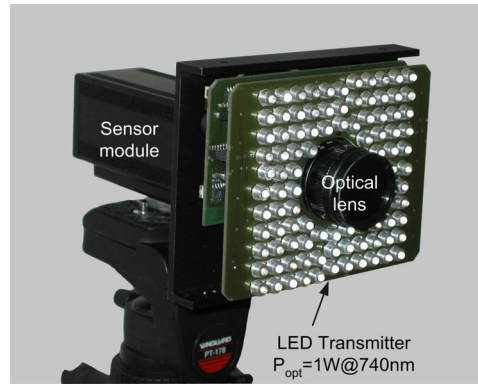


Figure 6: 3D camera module on tripod

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.

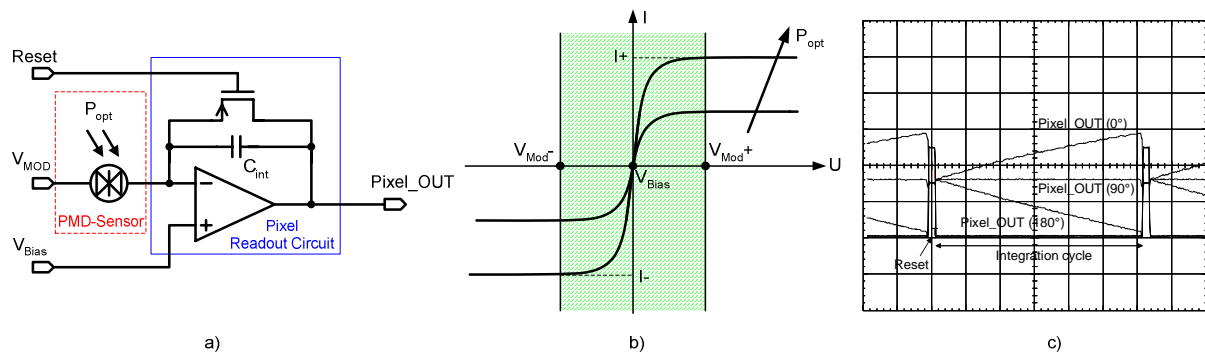


Figure 7: a) Pixel schematic b) typical IV-characteristics of a MSM structure: The switching of the operation points provides the mixing and the SBI functionality c) Integration examples with different phases (0°, 90°, 180°)

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.

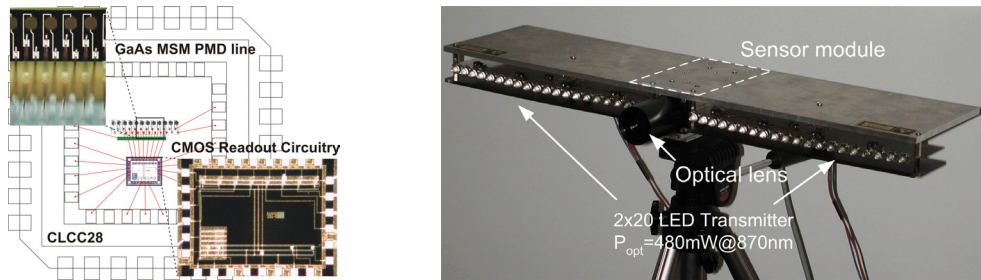


Figure 8: Left: MSM sensor line with CMOS readout circuitry in a multichip approach. Each MSM structure has a diameter of 150µm, the pixel pitch is 250µm. Right: 3D camera module with active illumination on a tripod.

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.

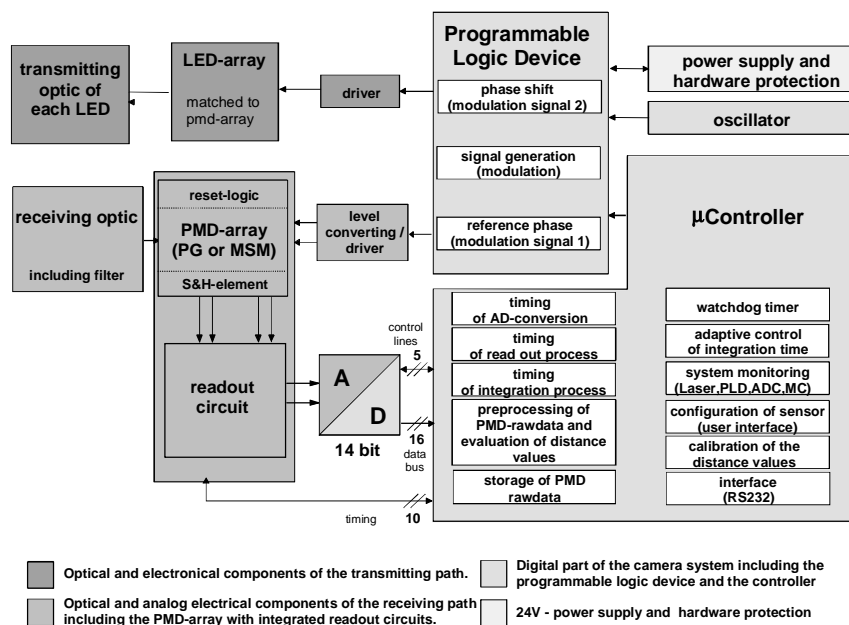


Figure 9: Basic structure of a MSM-PMD- or PG-PMD-camera system

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

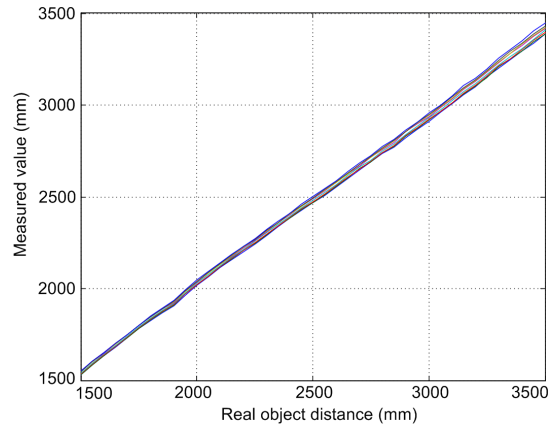


Figure 10: Measurement (mean value) of 8 arbitrary pixels within the PG-PMD camera. The integration time was constant (5ms). Target was a plain surface of white paper.

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.

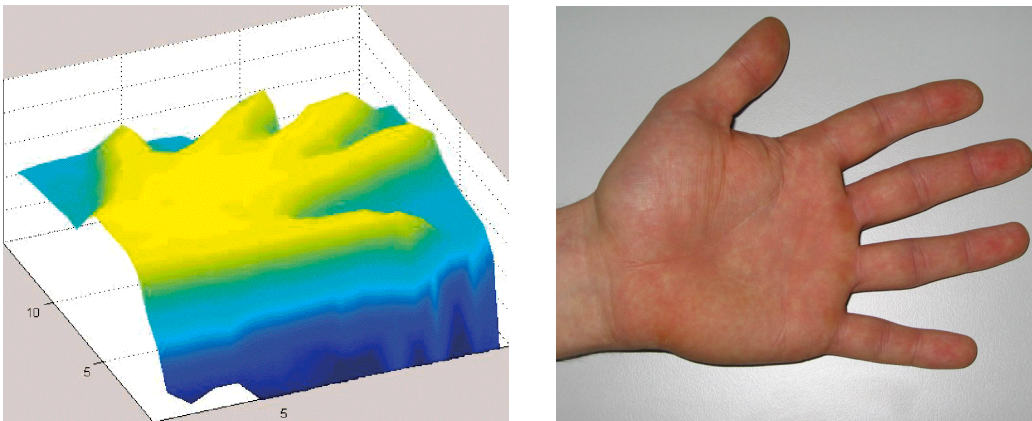


Figure 11: Left: 3D image of a human hand taken with 3D PG camera. 3D Image has been rotated and smoothed to visualize the depth information. Right: A high resolution 2D image for comparison

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).

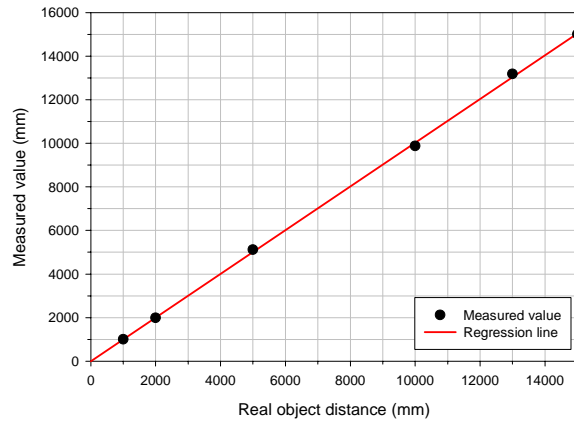


Figure 12: Measurement (mean value) of an arbitrary pixel in the range of 1 to 15m. The integration time was 10ms. Target was a plain surface of white paper.

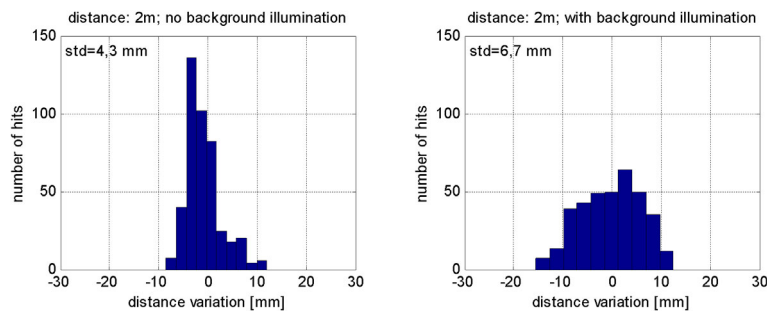


Figure 13: Measurements with a plain surface of white paper in a distance of 2m. Left: only active illumination on target ($160\mu\text{W}/\text{cm}^2$). Right: Same measurement conditions but with additional background illumination ($720\mu\text{W}/\text{cm}^2$). The integration time was 20ms

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.