

Schlussbericht

des im Rahmen des BMBF-Calls Servicerobotik 2012 geförderten Verbund-
projektes

RODIAR

**Autonom agierendes Robotersystem
für die Inspektion von Trinkwasserleitungen zur
frühzeitigen Erkennung von versorgungskritischen,
materialtechnischen Schwachstellen**

Projektlaufzeit: 01.01.2013 – 31.12.2015

der

TU Ilmenau, Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik

Förderkennzeichen: 01IM12004B
Projektleiter: Prof. Horst-Michael Groß
Telefon: 03677 69-2858
E-Mail: Horst-Michael.Gross@TU-
Ilmenau.de

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01IM12004 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Zur Wahrung berechtigter Interessen des Zuwendungsempfängers oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten aus dem Bericht vertraulich zu behandelnde Einzelheiten sind (z.B. zur Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen) mit ausdrücklich Hinweisen gekennzeichnet.

Änderungshistorie:	Kommentar: Dieser Schlussbericht wird vom Zuwendungsgeber und der Technischen Informationsbibliothek - Deutsche Forschungsberichte - (TIB), Welfengarten 1 B, 30167 Hannover veröffentlicht.
Version: 1 Datum: 22.07.2016	

Inhalt:

1. Kurze Darstellung	4
1.1 Aufgabenstellung	4
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	9
1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	9
1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste	9
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2. Eingehende Darstellung	11
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	11
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	57
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	57
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	60
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	61
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses	61

1. Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Die Nutzung von kabelgebundenen, ferngesteuerten Roboterlösungen zur Inspektion von Rohren und Kanälen hat sich in den letzten Jahren weltweit immer stärker durchgesetzt. In diesem Zusammenhang ist es besonders wichtig, dass die Inspektionsabläufe auf der Basis neuer wissenschaftlich-technischer Erkenntnisse in der Zukunft kostengünstiger und effektiver durchgeführt werden können. Innerhalb des Vorhabens RODIAR sollten deshalb die technischen Grundlagen für die anschließende Entwicklung eines serienreifen autonomen Inspektionsroboters zur kostengünstigen Untersuchung von Rohrleitungen realisiert werden.

Die Wissenschaftlich-technische Herausforderungen des Vorhabens lagen dabei neben der mechanischen und elektronischen Konzeption des Inspektionsroboters, welche hauptsächlich durch den Projektpartner OPTIMESS vorgenommen wurde, in der autonomen Roboternavigation. Dabei sollten durch die TU Ilmenau, Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik (FG NIKR), die notwendigen Verfahren zur autonomen Fahrweise des Inspektionsroboters in der Einsatzumgebung verschiedener Rohrleitungen entwickelt, ausführlich evaluiert und auf ihre Praxistauglichkeit getestet werden. Dazu gehören die Konzipierung und softwaretechnische Umsetzung einer geeigneten Software-Steuerarchitektur und der Sensordatenaufzeichnung mittels Kamera, die Entwicklung eines Verfahrens zur lokalen Navigation und Hinderniserkennung/-vermeidung mittels Kameras, die Unterstützung der fehleranfälligen Odometrie mittels visueller Odometrie, sowie die Entwicklung eines Verfahrens zur robusten visuellen Selbstlokalisierung des Roboters in möglicherweise strukturarmer Umgebung und eines Verfahrens zur selbständigen Rückkehr des Roboters zum Ausgangspunkt bei nicht überwindbaren Hindernissen.

Gegenüber anderen, bereits existierenden mobilen Inspektionsrobotern für die Rohrleitungsinspektion ist ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal des Vorhabens erstmalig die autonome Fahrweise des Roboters (vom Einsatzschacht bis zum nächsten Inspektionsschacht oder auf einer vom Personal vorgegebenen Strecke mit automatischer Rückkehr), die die Arbeit in der Einsatzumgebung für den Operator deutlich vereinfacht und eine eigenständige Rückkehr des Roboters zur Ausgangsposition bei Abbruch der Inspektion aufgrund von Hindernissen ermöglicht, so dass die Plattform und die gewonnenen Missionsdaten gerettet werden können. Eine mögliche, anschließende offline Datenanalyse, die nicht Gegenstand des Vorhabens war, kann dann über eine geeignete MMI dem Operator Hinweise auf mögliche Artefakte im Rohrleitungssystem und einen Verlaufsplan der Leitung liefern.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Genauere Kenntnisse über den Zustand eines Objektes sind Grundvoraussetzung für eine effektive Wartung und Instandhaltung. Sind Objekte wie z.B. Rohrleitungen einer direkten Inspektion nicht zugänglich, so müssen geeignete Hilfsmittel zur Zustandserfassung geschaffen werden. Vor allem die stürmische Entwicklung und Miniaturisierung auf den Gebieten der Sensortechnik, Elektronik und Informationsverarbeitung hat hierzu in den letzten Jahren die notwendigen Voraussetzungen geschaffen.

Das vorhandene Leitungsnetz stellt für den jeweiligen Netzbetreiber eine bedeutende Vermögensanlage dar, deren funktionsfähiger Zustand auch auf Grund sicherheitstechnischer und umweltrechtlicher Aspekte durch regelmäßige Wartung und Instandhaltung ständig zu gewährleisten ist. Grundvoraussetzung für eine effektive Wartung und Erneuerung ist die genaue Erfassung des Ist-

Zustandes der jeweiligen Rohrleitung, um so Entscheidungen über notwendige Sanierungsmaßnahmen ökonomisch sinnvoll treffen zu können.

Im Gegensatz zum Abwasserbereich mit seinen vergleichsweise kurzen Leitungsabschnitten verfügen andere Netzbetreiber, wie z.B. Fernwasserversorger, über sehr lange Leitungsabschnitte (meist mehrere km) zwischen den Zutrittspunkten. Solche Leitungsabschnitte sind nur mit kabellosen Inspektionssystemen ökonomisch und technisch sinnvoll zu untersuchen.

Bei den zurzeit kommerziell verfügbaren Inspektionssystemen bestehen folgende Defizite:

- Die Steuerung und Datenübertragung wird über ein Schleppkabel realisiert. Durch die Nutzung des Kabels wird die Inspektionsreichweite bei kommerziellen Systemen auf max. 500m begrenzt. Außerdem ist durch die Bandbreitenbegrenzung des Kabels ein Aufbau eines Multikamerasystems zur optimalen Erkennung von Schadstellen unmöglich. Kurven bzw. Rohrverzweigungen sind nur sehr eingeschränkt befahrbar.
- Die Bedienung des Inspektionssystems (Steuerung, Hinderniserkennung und Schadenserkennung) erfolgt manuell. Dies führt zu langsamen Inspektionsgeschwindigkeiten.
- Da die Inspektionen meistens mehrere Stunden dauern, verlangen sie vom Bediener ein Höchstmaß an Konzentration, dies kann schnell zu einer Überforderung führen.
- Die Lokalisierung wird bei diesen Systemen über die Länge des eingezogenen Kabels bestimmt. Dies führt zu erheblichen Messfehlern (Schlupf des Messrades auf dem Kabel).
- Die Schadstellen werden mit einer Dreh-Schwenkkopf-Kamera als analoges Videosignal oder als Einzelbilder von max. zwei Digitalkameras aufgenommen. Dies führt vor allem bei großen Rohrdurchmessern zu einer geringen Bildauflösung.
- Die Inspektionseinheiten sind nicht für den ständigen Einsatz in Flüssigkeiten (Wasser) ausgelegt.
- Die Inspektionssysteme bestehen aus einer Inspektionseinheit und einer Kabeltrommel, Stromversorgung und Steuer- und Auswertungseinheit, welche in einem Fahrzeug eingebaut sind. Dadurch ist der Investitionsaufwand für diese Systeme relativ hoch.

Ziel des RODIAR-Projektes war es daher, diese Nachteile, welche hauptsächlich durch die manuelle Steuerung durch einen Operator und die limitierende Kabelverbindung zum Inspektionsroboter entstanden, durch einen vollständig autonomen Inspektionsroboter zu ersetzen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben bestand gemäß der Vorhabensbeschreibung aus mehreren Arbeitspaketen, deren geplanter zeitlicher Ablauf und Aufteilung auf die Projektpartner in Abbildung 1.1 schematisch dargestellt ist.

AP	Name	PM			2013				2014				2015				
		OPT	TFW	TUI	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	
1	AP1, Anforderungsanalyse	10	5	3													
2	AP 2, Mechatron. Konzept	13	0	1													
3	AP 3, Antriebsregelung	14	0	0													
4	AP 4, Sensorik	13	0	4													
5	AP 5, Steuerarch., Softwaresystem	4	0	6													
6	AP6, Lokalisation & Navigation	0	0	22													
7	AP 7, Demonstration	21	11	8													
8	AP 8, Management	3,6	0	0													
Summe		78,6	16	44	ST1				ST2	M18			ST3	M30	ST4		
OPT - Optimess										M	Meilensteine						
TFW - Thüringer Fernwasserversorgung										ST	Statustreffen						
TUI - TU Ilmenau, FG Neuroinformatik & Kognitive Robotik																	

Abbildung 1.1: Arbeitsplan. Untergliederung des Projektes in Arbeitspakete, deren zeitlicher Ablauf, Meilensteine sowie Aufteilung der Pakete auf die Projektpartner.

Der tatsächliche Verlauf des Projektes entsprach aus Sicht des FG NIKR im Wesentlichen dem oben dargestellten geplanten Verlauf. Kleinere Abweichungen ergaben sich bei der Bearbeitung von Arbeitspaket 6, da aufgrund von Schwierigkeiten bei der Hinderniserkennung in der monotonen Rohrumgebung mehrere Iterationen beim Entwurf und dem Test der entsprechenden Verfahren in einer realistischen Rohrumgebung vonnöten waren, weshalb sich die Beendigung des Arbeitspaketes bis Projektende hinzog.

Die für das FG NIKR relevanten Arbeitspakete und Teilaufgaben sind unten im Detail beschrieben. Die von den Projektpartnern ohne Beteiligung des FG NIKR bearbeiteten Teilaufgaben werden im Folgenden nicht betrachtet, sind jedoch in der Vorhabensbeschreibung zu finden (bzw. in den Schlussberichten der Projektpartner).

Arbeitspaket 1:

Ziel des Arbeitspaketes war das Zusammentragen und die Bereitstellung aller notwendigen Informationen welche zur Erstellung eines projektbezogenen Pflichtenheftes notwendig waren.

Teilaufgabe 1:

Recherche zu neuen Trends/Ansätzen im Bereich Hinderniserkennung, autonome Navigation und Datenauswertung

Teilaufgabe 2:

Präzisierung der Rahmenparameter für die Hinderniserkennung, autonome Navigation und Datenauswertung

Teilaufgabe 6:

Zusammenstellung aller relevanten Daten zur Hinderniserkennung, autonomen Navigation und Datenauswertung. Erstellung des Pflichtenheftes.

Arbeitspaket 2:

Erstellung der mechatronischen Grundkonzeption für den Demonstrator.

Teilaufgabe 3:

Festlegung der optimalen Sensorpositionen

Arbeitspaket 4:

Die für die Hinderniserkennung, Navigation, Selbstlokalisierung und Schadenserfassung notwendige Sensorik wurde ausgewählt.

Teilaufgabe 3:

Auswahl des Kamerasystems zur autonomen Navigation und Hinderniserkennung; Optimierung der Beleuchtung.

Teilaufgabe 5:

Festlegung der Sensorschnittstellen

Arbeitspaket 5:

Ziele des AP waren die Entwicklung einer geeigneten Steuerarchitektur und eines modularen Softwaresystems, das es ermöglicht, die in AP6 entwickelten Einzelkomponenten zur Navigation in einem flexiblen Gesamtsystem zu integrieren. Des Weiteren mussten hardwarenahe, low-level Treiberschnittstellen entwickelt werden, die es dem high-level Softwaresystem ermöglichten auf die in den AP3 und AP4 entwickelten und integrierten Antriebs- und Sensor-Systeme zuzugreifen und diese zu steuern. Weiterhin musste eine effiziente Datenspeicherung und Protokollierung realisiert werden, die die aufgenommenen Kamera- und Positions-Daten sowie die generierten Navigations-Informationen im korrekten zeitlichen Kontext persistent speichert, so dass diese Daten zum einen für ein autonomes Homing des Roboters genutzt werden können und vor allem für die nachträgliche Auswertung des aufgezeichneten Videomaterials durch einen Operator zur Rohrinspektion zur Verfügung steht.

Teilaufgabe 1:

Definition und Realisierung einer Steuerarchitektur für den Inspektionsroboter unter Beachtung der Anforderung an dieses System, wie z.B. Effizienz, Ausfallsicherheit, etc. Dabei sollte auch das existierende Softwaresystem MIRA berücksichtigt und genutzt werden. Die Gesamtaufgabe des Inspektionsroboters sollte weiterhin in geeignete funktionale Teilprobleme zerlegt werden, die sich als separate Softwaremodule innerhalb von TA2 und TA3 sowie AP6 implementieren lassen

Teilaufgabe 2:

Protokollierung von Kamera- und Positions-Daten sowie von Navigations-Informationen im korrekten zeitlichen Kontext. Diese Daten sollen für ein autonomes Homing des Roboters genutzt werden können und zur nachträglichen Auswertung des aufgezeichneten Videomaterials durch einen Operator bei der Rohrinspektion dienen. Das Datenmaterial musste zur Speicherung mit geeigneten Codecs entsprechend komprimiert werden, um es effizient speichern zu können. Sowohl bei der Kompression der Datenströme als auch bei der Datenspeicherung konnte teilweise auf bestehende Komponenten des MIRA Softwaresystems zurückgegriffen werden.

Teilaufgabe 3:

Anbindung der Hardwaretreiber an das restliche Softwaresystem, sowie ggf. die Entwicklung von Hardwaretreibern für die AP4 integrierte Sensorik.

Teilaufgabe 4:

Integration der einzelnen Softwaremodule zu einem Gesamtsystem, inklusive Integrations-tests und Parametrisierung der Softwaremodule und Algorithmen.

Arbeitspaket 6:

Eine wesentliche Aufgabe des mobilen Robotersystems ist die autonome Navigation sowie die Bestimmung der eigenen Position innerhalb der Rohrleitungen, so dass dem Operator zusätzlich zu den

gesammelten Bilddaten auch möglichst genaue Positionsinformationen der Schadstellen in den Rohren zur Verfügung stehen.

Die dazu notwendige Selbstlokalisierung des Roboters im Rohr, d.h. die Bestimmung seiner Einfahrtiefe, ist dabei eines der zentralen Ziele dieses Arbeitspunktes. Dazu sollten Lokalisierungsverfahren entwickelt und kombiniert werden, so dass trotz der schwierigen Bedingungen wie texturarmen Rohrwandungen und Lichtbrechung durch im Rohr durch verbleibendes Wasser eine robuste Positionsbestimmung möglich ist.

Zu den einzelnen Navigationsaufgaben zählen das Anfahren der vom Operator vorgegebenen Zielposition im Rohr sowie das selbständige Zurückfahren zur Ausgangsposition (Homing).

Während der Fahrt sollen Hindernisse erkannt und Umfahren werden. Bei der Detektion von nicht überwindbaren Hindernissen wird die Mission abgebrochen und das automatische Homing eingeleitet.

Teilaufgabe 1:

Die Selbstlokalisierung des Roboters erfolgt durch eine Kombination verschiedener Sensoren. Die fehlerbehafteten Odometrie-Messungen der Räder sollten durch eine visuelle Odometrie ergänzt werden.

Während der Eigenbewegung des Roboters werden in den aufgenommenen Kamera-Bildern markante Bildregionen (Features) getrackt und einander zugeordnet. Anhand der Bewegung der Features in den Bildern kann die Eigenbewegung des Robotersystems geschätzt werden. Dabei müssen geeignete Features gefunden werden, die – je nach Verschmutzungs- und Abnutzungsgrad der Rohre – auch in texturarmen Rohrwandungen robust getrackt werden können. Die Schätzung der Eigenbewegung kann dann mit Hilfe eines entsprechenden Optimierungsverfahrens, dem Bündelausgleich (SBA – Sparse Bundle Adjustment), erfolgen.

Teilaufgabe 2:

Entwicklung eines Klassifikators (z.B. auf Basis einer Support-Vektor-Maschine), der mit Hilfe einer Vielzahl von Merkmalen im Bild (Farbe, Textur, Bildgradienten, etc.) Hindernisse, die sich aufgrund dieser Merkmale vom befahrbaren Rohr unterscheiden, sowie Schweißnähte erkennen kann.

Teilaufgabe 3:

Erweiterung der bestehenden Verfahren zur Bewegungssteuerung und Anpassungen an die Einsatzumgebung. Entwicklung von Strategien zur Missionsplanung, d.h. Strategien zum Homing, zum Befreien aus Hindernis-Situationen, etc.

Teilaufgabe 4:

Entwicklung einer Applikation zum Anzeigen und Auswerten des aufgezeichneten Datenmaterials.

Arbeitspaket 7:

Aufbau und Test eines Demonstrators.

Teilaufgabe 3:

Experimentelle Untersuchung der Hinderniserkennung, der autonomen Navigation und der Datenauswertung.

Teilaufgabe 4:

Experimentelle Untersuchung der Hinderniserkennung, der autonomen Navigation und der Datenauswertung unter realen Einsatzbedingungen.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

In [Hansen et. al. 2011a] wird mittels einer monokularen Kamera untersucht, in wieweit eine Lokalisierung basierend auf Bild-Registrierungsalgorithmen und Feature-Trackern in einem Rohr möglich ist. Der Bild-Registrierungsansatz schaut dabei direkt auf die Rohrwand, ist also vom Roboter aus zur Seite orientiert. Die nacheinander aufgenommenen Bilder werden dabei im Überlapp in Übereinstimmung gebracht und so auf die Bewegung geschlossen. Dabei wird ein Lokalisierungsfehler von rund 3cm pro gefahrenem Meter erreicht. Der Feature-basierte Ansatz ermittelt unter Verwendung eines Eckendetektors (Harris) interessante Punkte im Rohr und verfolgt diese mittels SIFT-Deskriptoren über die Bildsequenz hinweg. Nach einer Ausreisserelimination durch den RANSAC-Algorithmus wird dann die Position als Ergebnis eines Optimierungslaufes berechnet. Mit diesem Ansatz erreichen die Autoren einen Lokalisierungsfehler von rund 1cm pro gefahrenem Meter.

[Hansen et. al. 2011b] untersucht die Lokalisierungsproblematik mit einem Stereokamerasystem. Auch hier werden interessante Merkmale in den Rohren gesucht, die allerdings nicht nur über die zeitliche Bildfolge zugeordnet werden, sondern auch auf Bildern beider Kameras. Mittels Bündelausgleich wird dann die Position bestimmt, wobei die Autoren der Studie hier von einem Lokalisierungsfehler von rund 0,1cm pro gefahrenem Meter berichten.

[Krys und Najjaran] beschreibt einen VSLAM (Gleichzeitige Lokalisierung und Kartierung) Ansatz für ein Rohrinspektionssystem für gefüllte Hauptwasserleitungen. Hierbei werden Kamerabilder mit einem Trägheitsnavigationssystem verglichen und kombiniert. Es werden allerdings nur Tests in einem Simulationssystem vorgestellt, daher gibt es auch keine vergleichbaren Angaben zur Lokalisierungsgenauigkeit. Auch ist die begrenzte Rechenleistung eines Robotersystems ein großes Hindernis für die Berechnung eines SLAM-Problems. Weitere Publikationen dieser Arbeitsgruppe beschäftigen sich nicht weiter mit dieser Problematik.

Andere Projekte, wie z.B. Kantaro [Nassiraei], beschreiben in den Veröffentlichungen nur denkbare Konzepte zur Navigation und Lokalisierung ohne dass dabei klar wird in wieweit diese Ideen umgesetzt wurden und welche Leistungen sie erreicht haben.

1.4.2 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Zur Suche von Fachliteratur wurden hauptsächlich Google Scholar (<https://scholar.google.de/>), sowie IEEE Xplore (<http://ieeexplore.ieee.org/>) verwendet.

Verwendete, relevante Literatur:

[Alahi et. al] Alahi, Alexandre; Ortiz,Raphael; Vandergheynst, Pierre: FREAK: Fast Retina Keypoint. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Series: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition New York: IEEE, 2012

[Bay et. al] Herbert Bay, Tinne Tuytelaars and Luc Van Gool: SURF: Speeded Up Robust Features, Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision, Springer Verlag, 2006

[Canny] Canny, John, "A Computational Approach to Edge Detection," in *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* , vol.PAMI-8, no.6, pp.679-698, 1986

[Devy et. al] Devy, M., Manzano, M.I., Boizard, J.L., Lacroix, P., Filali, W., Fourniols, J-Y: Integrated subsystem for Obstacle detection from a belt of micro-cameras, *Advanced Robotics, ICAR 2009, International Conference on* , pp.1-6, 2009

[Einhorn et. al] Einhorn, E., Stricker, R., Gross, H.-M., Langner, T., Martin, Ch.: *MIRA - Middleware for Robotic Applications*. to appear: Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS 2012), Vilamoura, Portugal, IEEE 2012

[Geiger et. al] Geiger, A., Ziegler, J., Stiller, C.: StereoScan: Dense 3d Reconstruction in Real-time, pp. 963-968, 2011

[Grandjean und Matthies] Grandjean, P., Matthies, L.: Perception control for obstacle detection by a cross-country rover, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1993

[Grünewald und Sitte] Grünewald, M., Sitte, J.: A Resource-Efficient Approach to Obstacle Avoidance via Optical Flow, In Proc. 5th int. Nixdorf Symposium: Autonomous Minirobots for Research and Edutainment (AMIRE), pp. 205-214, 2001

[Hansen et. al. 2011a] Peter Hansen, Hatem Alismail, Peter Rander and Brett Browning: Monocular Visual Odometry for Robot Localization in LNG Pipes, *International Conference on Robotics and Automation ICRA 2011*

[Hansen et. al. 2011b] Peter Hansen, Hatem Alismail, Brett Browning and Peter Rander: Stereo Visual Odometry for Pipe Mapping, *International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS 2011*

[Kitt et. al] Kitt, B., Geiger, A., Lategahn, H: Visual Odometry based on Stereo Image Sequences with RANSAC-based Outlier Rejection Scheme, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 486-492, 2010

[Koller et. al] Koller, D., Luong, T., Malik, J.: Binocular Stereopsis and Lane Marker Flow for Vehicle Navigation: Lateral and Longitudinal Control, *Computer Science Division (EECS), University of California*, 1994

[Krys und Najjaran] Dennis Krys, Homayoun Najjaran: Development of Visual Simultaneous Localization and Mapping (VSLAM) for a Pipe Inspection Robot, *International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation*, pp344 - 349 2007

[Labayrade et. al] Labayrade, R., Aubert, D., Tarel, J. –P: Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through "v-disparity" representation," *Intelligent Vehicle Symposium, IEEE*, vol. 2, pp. 646-651, 2002

[Leutenegger et. al] Stefan Leutenegger, Margarita Chli and Roland Siegwart: BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints, *IEEE International Conference on Computer Vision* , 2011

[Lowe] David G. Lowe: Object Recognition from Local Scale-Invariant Features. In: *ICCV '99 Proceedings of the International Conference on Computer Vision*. Band 2, Seiten 1150-1157, 1999

[Nassiraei et. al.] Nassiraei, A.F.; Kawamura, Y.; Ahrary, A.; Mikuriya, Y. & Ishii, K: (2007). Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot "KANTARO", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'07)*, pp.136-143, Roma, Italy, April 2007.

[Rahman] Rahman, S.: Obstacle Detection for Mobile Robots Using Computer Vision, *Departement of Computer Science, University of York, Final Year Project*, 2005

[Ramer] Ramer, Urs: "An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves", *Computer Graphics and Image Processing*, 1(3), 244–256 (1972)

[Rosten und Drummond] Edward Rosten, Tom Drummond: Fusing points and lines for high performance tracking, *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2005

[Rublee et. al] Rublee, Ethan, Vincent Rabaud, Kurt Konolige, Gary Bradski: ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF. *Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on. IEEE*, 2011

[Scaramuzza et. al] Scaramuzza, D., Martinelli, A. and Siegwart, R., (2006). "A Toolbox for Easy Calibrating Omnidirectional Cameras", *Proceedings to IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2006)*, Beijing China, October 7-15, 2006

[Storjohann et. al] Storjohann, K, Zielke, T., Mallot, H.A., von Seelen, W.: Visual obstacle detection for automatically guided vehicles, *Robotics and Automation, IEEE International Conference on*, pages 761-766, 1990

[Strasdat et. al] Strasdat, H., Montiel, J.M.M., Davison, A.J.: *Real-time monocular SLAM: Why filter?* *Robotics and Automation (ICRA)*, 2010 IEEE International Conference on, pp.2657-2664, 3-7, 2010

[Trucco und Verri] Trucco, E., Verri, A.: *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice-Hall, pp 157-161, 1998

[Ulrich und Nourbakhsh] Ulrich, I, Nourbakhsh, I.: Appearance-Based Obstacle Detection with Monocular Color Vision, *Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence, Austin, TX*, 2000

[Wybo et. al] Wybo, S., Bendahan, R., Bougnoux, S., Vestri, C., Abad, F., Kakinami, T.: Movement Detection for Safer Backward Maneuvers, *Intelligent Vehicles Symposium, IEEE*, pages. 453-459, 2006

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit herrschte eine sehr enge und reibungslose Zusammenarbeit auf kurzen Wegen mit den Projektpartnern OPTIMESS Engineering GmbH sowie der Thüringer Fernwasserversorgung. Besonders hervorzuheben ist die hervorragende Unterstützung der Kollegen der TFW bei den experimentellen Untersuchungen. Eine weitere Zusammenarbeit mit Dritten fand nicht statt.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Einleitend zur eingehenden Darstellung der Ergebnisse des Projektes sind diese noch einmal als Übersicht auf der Ebene der in der Vorhabensbeschreibung aufgeführten Arbeitspakete in Tabellenform zusammengefasst. Die aufgeführten Ergebnisse sind dabei ausschließlich die vom FG NIKR durchgeführten Arbeiten:

AP	Ziele	Ergebnisse
1	Bereitstellung aller notwendigen Informationen welche zur Erstellung eines projektbezogenen Pflichtenheftes notwendig sind.	Das Pflichtenheft wurde erstellt. Eine umfassende Literaturrecherche zur visuellen Hinderniserkennung und visuellen Odometrie in Rohrleitungen wurde durchgeführt.
2	Erstellung der mechatronischen Grundkonzeption für den Demonstrator.	In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Opti-mess wurden die optimalen Sensorpositionen festgelegt.
3	Gemäß der Vorhabensbeschreibung hier keine vom FG NIKR durchzuführende Arbeiten.	-
4	Die für die Hinderniserkennung, Navigation, Selbstlokalisierung und Schadenserfassung notwendige Sensorik sollte ausgewählt werden.	In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde die rechentechnische Hardware für den Rodiar-Roboter ausgewählt sowie entsprechenden Sensorschnittstellen festgelegt.
5	Entwicklung einer geeigneten Steuerarchitektur. Entwicklung der Hardwaretreiber. Implementierung der Datenspeicherung und Protokollierung.	Die Steuerarchitektur wurde erstellt und die Hardwaretreiber für die Kameras und den CAN-Bus implementiert und in das vorhandene Roboter-Softwaresystem MIRA des Fachgebietes eingebunden. Die Datenspeicherung und Protokollierung wurde auf Basis von MIRA-Tapes (Bestandteil der MIRA-Middleware – die im Fachgebiet für Roboter verwendete Softwarebasis) vorgenommen und integriert.
6	Entwicklung von Verfahren zur visuellen Hinderniserkennung, visuellen Odometrie, Bewegungssteuerung sowie einer Benutzerschnittstelle für einen externen PC.	Es wurde ein Bündelausgleichsverfahren zu visueller Odometrie und ein zweistufiges Verfahren zur visuellen Hinderniserkennung entwickelt, welches in erster Stufe die Kamerabilder auf Basis von Farb- und Texturmerkmalen auf Hindernisse untersucht und bei einem gefundenen Hindernis stoppt und das Hindernis mit einem Schattenbasierten Verfahren validiert. Die Bewegungssteuerung und die Benutzerschnittstelle für den externen PC wurden

7	Experimentelle Untersuchung der Hinderniserkennung und der autonomen Navigation.	erfolgreich implementiert. Die Experimentellen Untersuchungen wurden durchgeführt. Die Farb-texturbasierte Hinderniserkennung erkennt Hindernisse zu etwa 90%. Die Schattenbasierte Hinderniserkennung unterscheidet zu 100% erfolgreich zwischen leerem und blockiertem Rohr. Die visuelle Odometriekorrektur liefert Werte, welche kritischer weise nicht signifikant besser sind als die der Radodometrie. Probleme bei den Fahrten des Roboters ergeben sich in Rohren mit 400mm Durchmesser, bei Rückwärtsfahrten durch Kurven sowie in einigen Fällen bei Rückwärtsfahrten allgemein. Als Ursachen hat sich die verwendete Lageregelung im Zusammenhang mit der Gewichtsverteilung des Roboters herausgestellt. Die Problematik wurde an Projektpartner Optimess weiter geleitet.
8	Gemäß der Vorhabensbeschreibung hier keine vom FG NIKR durchzuführende Arbeiten.	

Arbeitspaket 1:

Teilaufgabe 1:

„Recherche zu neuen Trends/Ansätzen im Bereich Hinderniserkennung, autonome Navigation und Datenauswertung“

Hinderniserkennung

Im Rahmen dieser Teilaufgabe wurde eine umfangreiche Literaturrecherche für die visuelle Hinderniserkennung mit Blick auf die Anwendung im Rohr durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass eine Hinderniserkennung, welche auf die spezifischen Bedingungen im Rohr zugeschnitten ist, in der Literatur bisher noch nicht betrachtet wurde. Ein Aufweichen der Suchkriterien auf eine visuelle Hinderniserkennung im Allgemeinen erbrachte mehrere Verfahren, welche in Abbildung 2.1 als Taxonomie dargestellt sind.

Von vornherein ausgeschlossen wurden darin Verfahren, welche aufgrund ihrer Charakteristika und Voraussetzungen für den Einsatz im Rohr nicht geeignet sind und auch wenig Hoffnung auf eine entsprechende Anpassung besteht, wie z.B. die Hinderniserkennung durch Inverse Perspective Mapping [Storjohann et. al] (benötigt eine flache Grundebene, welche im Rohr nicht gegeben ist), oder die Hinderniserkennung über Bewegungsdetektion [Wybo et. al] (Hindernisse im Rohr sind typischerweise statisch).

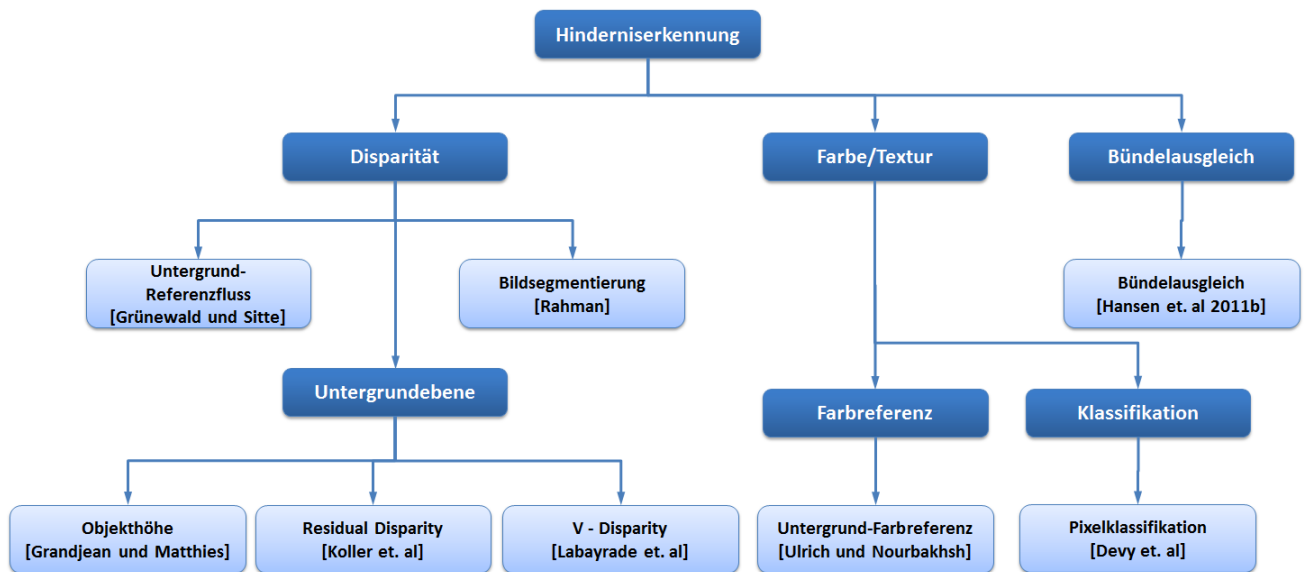


Abbildung 2.1: Taxonomie der recherchierten Verfahren zu potentiellen Ansätzen zur Hinderniserkennung in Rohrleitungen.

Die gefundenen Verfahren lassen sich dabei grob in drei verschiedene Kategorien einteilen:

1. **Disparitätsbasierte Verfahren:** Sie führen ein Stereomatching von markanten Featurepunkten im linken und rechten Kamerabild durch und berechnen basierend auf deren Disparität (Versatz des Auftretens im linken und rechten Kamerabild) die Distanz des markanten Featurepunktes.
2. **Farb-/Texturbasierte Verfahren:** Klassifizieren das Bild pixelweise, ob dieses Pixel zu einem Hindernis oder zum Untergrund gehört. Die Klassifikation basiert dabei auf Farb- und/oder Texturinformationen.
3. **Bündelausgleich:** Ähnlich wie bei der Gruppe der Disparitätsbasierten Verfahren werden hier die markanten Featurepunkten in den Bildern gesucht. Diese werden hier jedoch nicht nur im linken und rechten Stereobild, sondern auch zeitlich fortlaufend in zukünftigen Bildern gematcht. Durch ein Optimierungsverfahren werden anschließend die Positionen sowohl der Featurepunkte als auch der Kameraposen im 3D-Raum optimiert. Im dadurch entstehenden 3D-Modell der Umgebung können dann Hindernisse erkannt werden.

Da Variante 3 prinzipiell als eine Art Erweiterung von Variante 1 aufgefasst werden kann, wurden im weiteren Verlauf des Projekts ausschließlich die Varianten 2 und 3 weiter verfolgt.

Visuelle Odometrie

Für Arbeitspaket 1.1 wurde weiterhin eine umfangreiche Literaturrecherche zur visuellen Odometrie mit Blick auf die Anwendung im Rohr durchgeführt. Die vielversprechendsten Verfahren sind in Abbildung 2.2 in einer Taxonomie dargestellt.

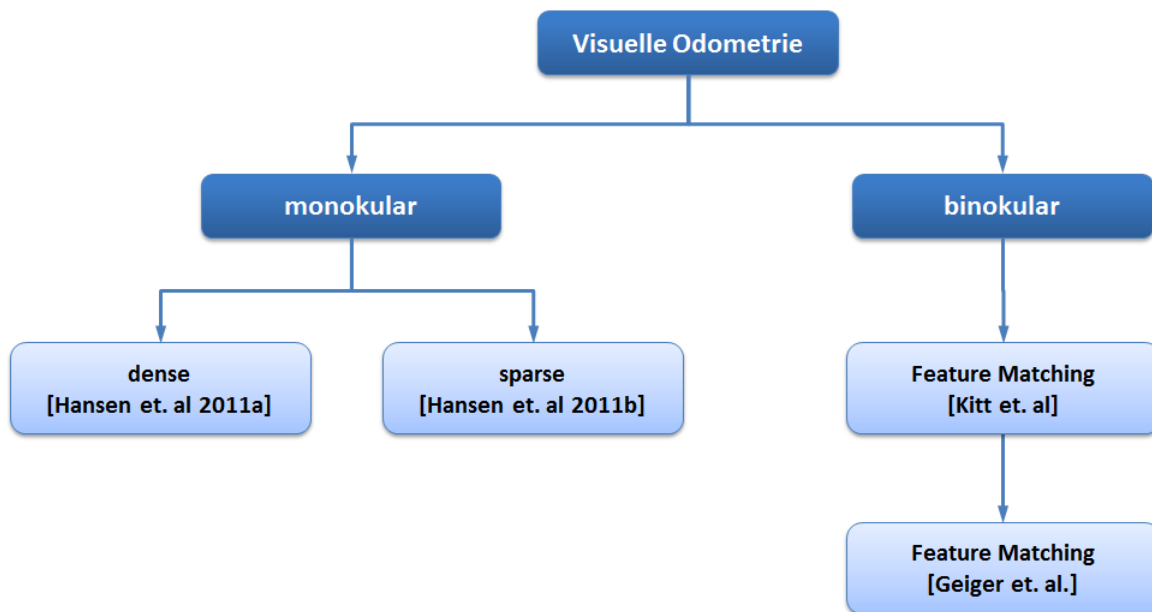


Abbildung 2.2: Taxonomie der recherchierten Verfahren zu potentiellen Ansätzen zur visuellen Odometrie in Rohrleitungen.

Die recherchierten Verfahren unterteilen sich dabei grob in monokulare und binokulare Verfahren. Bei ersteren wird, wie schon beim Bündelausgleich für die Hinderniserkennung erläutert, ein Matching von markanten Featurepunkten in fortlaufenden Bildern durchgeführt und die Position der Features und Kameraposen mit Hilfe eines Optimierungsverfahrens berechnet. Es ist anzumerken, dass in den Arbeiten von Hansen et. al die Kameras ausschließlich senkrecht zur Rohrwand angeordnet sind, was beim Rodiar-Roboter aufgrund der Konstruktion nicht der Fall ist.

Die binokularen Verfahren führen ein Stereomatching im linken und rechten Kamerabild durch und schätzen die Roboterposition mit einem Kalman-Filter.

Teilaufgabe 2:

„Präzisierung der Rahmenparameter für die Hinderniserkennung, autonome Navigation und Datenauswertung“

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden die Rahmenparameter für die Hinderniserkennung, autonome Navigation und Datenauswertung präzisiert und im Pflichtenheft festgehalten. Die relevantesten Punkte für das FG NIKR sind im Folgenden zusammengefasst:

- Der Roboter soll autonom, ohne Kabelverbindung fahren
- Verwendung eines Stereokamerasystems, um mit Hilfe eines Matchings von Featurepunkten im linken und rechten Kamerabild Tiefeninformationen zu erhalten.
- Verwendung von Fischaugenkameras mit 170° Öffnungswinkel, um sowohl den Bereich vor dem Rohr (für die Hinderniserkennung), als auch die seitlichen Rohrwände (für die Inspektionsaufgabe) im Blick zu behalten.
- Eine kontinuierliche Aufnahme der gesamten Rohrwand muss gewährleistet sein.
- Zwei Inspektionsmodi sind vorgesehen:
 - Das Einfahren bis zu einer bestimmten Inspektionstiefe und anschließende Umkehr und Rückkehr zum Ausgangspunkt.
 - Das Fahren bis zur nächsten Kontrollbauwerk

- Der Roboter muss zu jeder Zeit in der Lage sein, umzukehren und den Ausgangspunkt der Inspektionsfahrt wieder zu erreichen (z.B. nach der Detektion eines nicht überwindbaren Hindernisses).
- Geschwindigkeit des Roboters von 1-2 km/h.
- Inspektionslänge von $\geq 2000\text{m}$.
- Eine Lokalisierung des Roboters im Rohr mit einer Genauigkeit von unter 2%.
- Erkennung von Hindernissen mit einer Größe von über 50mm.

Teilaufgabe 6:

„Zusammenstellung aller relevanten Daten zur Hinderniserkennung, autonomen Navigation und Datenauswertung. Erstellung des Pflichtenheftes.“

In Absprache mit den Projektpartnern wurde im Rahmen dieser Teilaufgabe das Pflichtenheft erstellt. Die wichtigsten darin festgehaltenen Punkte sind im obigen Abschnitt aufgeführt.

Arbeitspaket 2:

Teilaufgabe 3:

„Festlegung der optimalen Sensorpositionen“

Das Stereokamerasystem sollte für einen möglichst großen überlappenden Sichtbereich (notwendig für das Stereomatching) und eine einfache Kamerakalibrierung geradlinig und parallel nach vorne ausgerichtet sein. Der Öffnungswinkel der Fischaugenobjektive von 170° ermöglicht dennoch eine gute Erfassung und Aufzeichnung der Rohrwand für die Inspektionsaufgaben des Roboters. Durch die Verwendung der Hinderniserkennung während der Inspektionsfahrt und der Aufnahme der Rohrwand durch Kameraobjektive mit einem sehr großen Öffnungswinkel, sind bei einer möglichen Rückfahrt keine nach hinten gerichteten Kameras notwendig. Weiterhin wurde die Bedeutung eines Neigungssensors sowie eine möglichst robuste Odometrie an den angetriebenen Rädern als notwendig erachtet.

Arbeitspaket 4:

Teilaufgabe 3:

„Auswahl des Kamerasystems zur autonomen Navigation und Hinderniserkennung; Optimierung der Beleuchtung.“

Die verwendeten Kameras sollten einen möglichst hohen Öffnungswinkel besitzen, um für die Datenauswertung nach der Inspektion möglichst große Bereiche der Rohrwand erfassen zu können. Außerdem sollte die Auflösung hoch genug sein, um für die Rohrdiagnose ausreichende Details aufzeichnen zu können.

Die Beleuchtung erfolgt über ein Stroboskop-Blitzlicht (Hochleistungs-LED), welches über einen Trigger mit den Kameras synchronisiert wird um trotz des Rolling Shutters Bewegungsunschärfe zu vermeiden.

Die wichtigsten Merkmale für das ausgewählte Kamerasystem sind:

- Verwendung von Fischaugenobjektiven mit einem Öffnungswinkel von 170°
- Auflösung von 2560×1920 Pixeln
- Ein Trigger-Ein/Ausgang zu Synchronisation mit der Stroboskop-Beleuchtung
- Rolling Shutter (ein Kompromiss, der eingegangen werden musste)

- GigE Schnittstelle zur Übertragung der aktuellen Bilder an den Onboard-PCE (mit geringer Prozessorlast und hohem Datendurchsatz)

Teilaufgabe 5:

„Festlegung der Sensorschnittstellen“

Die Kommunikation mit den Sensoren soll über CAN-Bus bzw. für die Kameras über Gigabit-Ethernet stattfinden.

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Optimess wurden die Schnittstellen für die Sensoren definiert und die Treiber der Kameras und des CAN-Busses an das vorhandene MIRA-Framework (Roboter Middleware des Fachgebietes, siehe [Einhorn et. al]) angebunden.

Arbeitspaket 5:

Teilaufgabe 1:

„Definition und Realisierung einer Steuerarchitektur für den Inspektionsroboter unter Beachtung der Anforderung an dieses System, wie z.B. Effizienz, Ausfallsicherheit, etc. Dabei sollte auch das existierende Softwaresystem MIRA berücksichtigt und genutzt werden. Die Gesamtaufgabe des Inspektionsroboters sollte weiterhin in geeignete funktionale Teilprobleme zerlegt werden, die sich als separate Softwaremodule innerhalb von TA2 und TA3 sowie AP6 implementieren lassen“

Zu Dokumentations- und Koordinationszwecken wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die verschiedenen Module des Projektes sowie deren Zusammenspiel erörtert sowie grafisch dargestellt.

Abbildung 2.3. zeigt die entstandene Grafik aus Systemarchitektursicht. Links werden dabei die auf der Plattform vorhandenen Sensoren gezeigt, während rechts die Aktoren sowie der Speicher dargestellt werden. In der Mitte sind die einzelnen Module aufgelistet, mitsamt den für deren Bearbeitung zuständigen Projektpartnern, wobei Module der Firma Optimess grün und Module des Fachgebietes NIKR orange unterlegt sind.

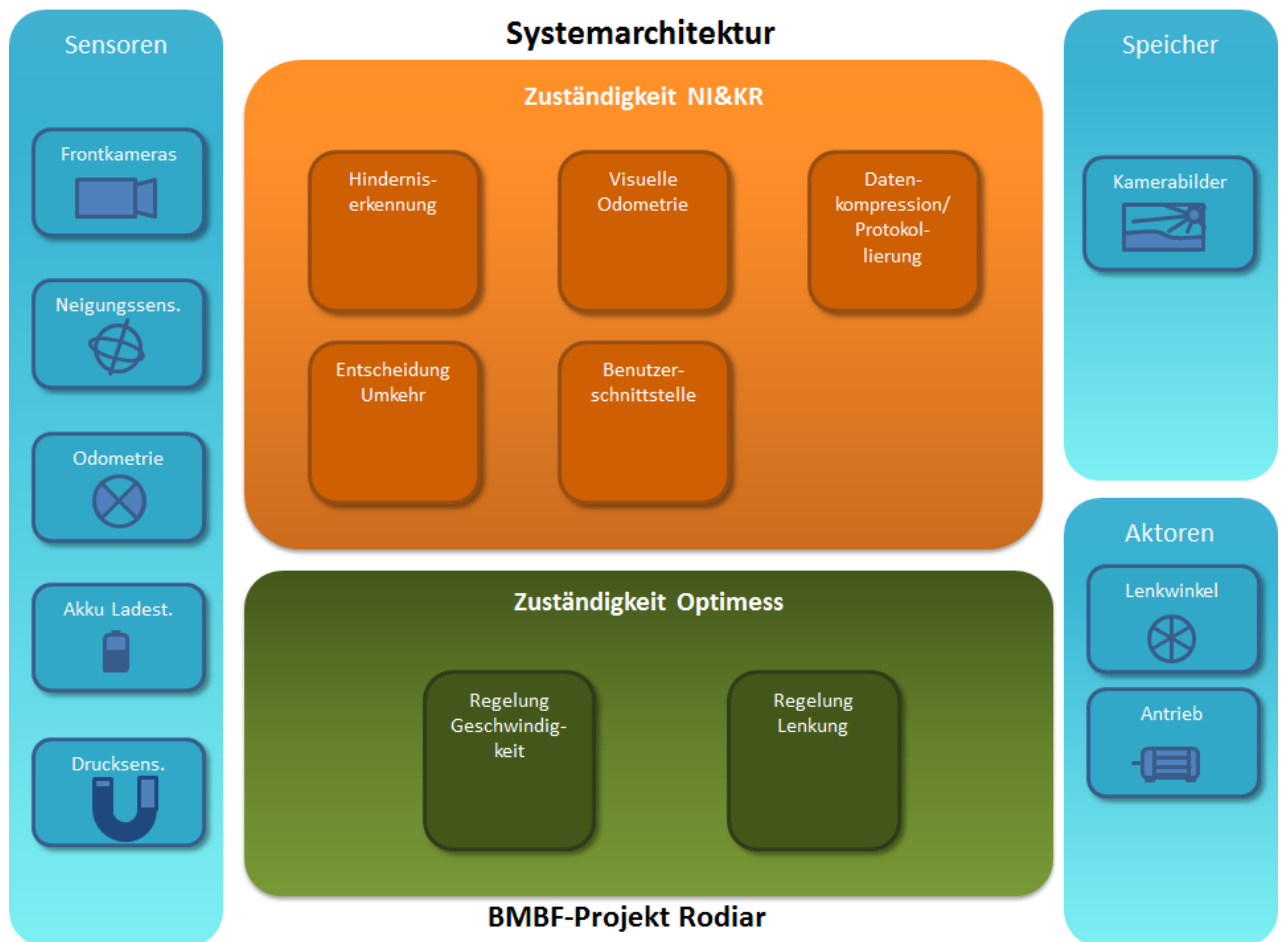


Abbildung 2.3: Systemarchitektur. Softwaremodule, Hardwaremodule, Sensoren und Aktoren des Rodiar-Roboters.

Aufgrund der relativ hohen Komplexität wurde das Zusammenspiel der Module des FG NIKR der in Abbildung 2.3 dargestellten Architektur aus Gründen der besseren Übersicht in mehrere voneinander unabhängige Teilaspekte unterteilt. Die entsprechenden Grafiken sind in den Abbildungen 2.4 – 2.8 zu finden.

Modul Hinderniserkennung

Das Modul Hinderniserkennung entscheidet, basierend auf den aktuellen Kamerabildern, ob das Rohr passierbar ist, oder ob ein Hindernis das Rohr blockiert und dementsprechend umgekehrt und zur Ausgangsposition zurückgefahren werden muss.

Für Details zum Ablauf und der Beschreibung der einzelnen Untermodule für die Hinderniserkennung siehe Arbeitspaket 6, Teilaufgabe 2.

Hinderniserkennung

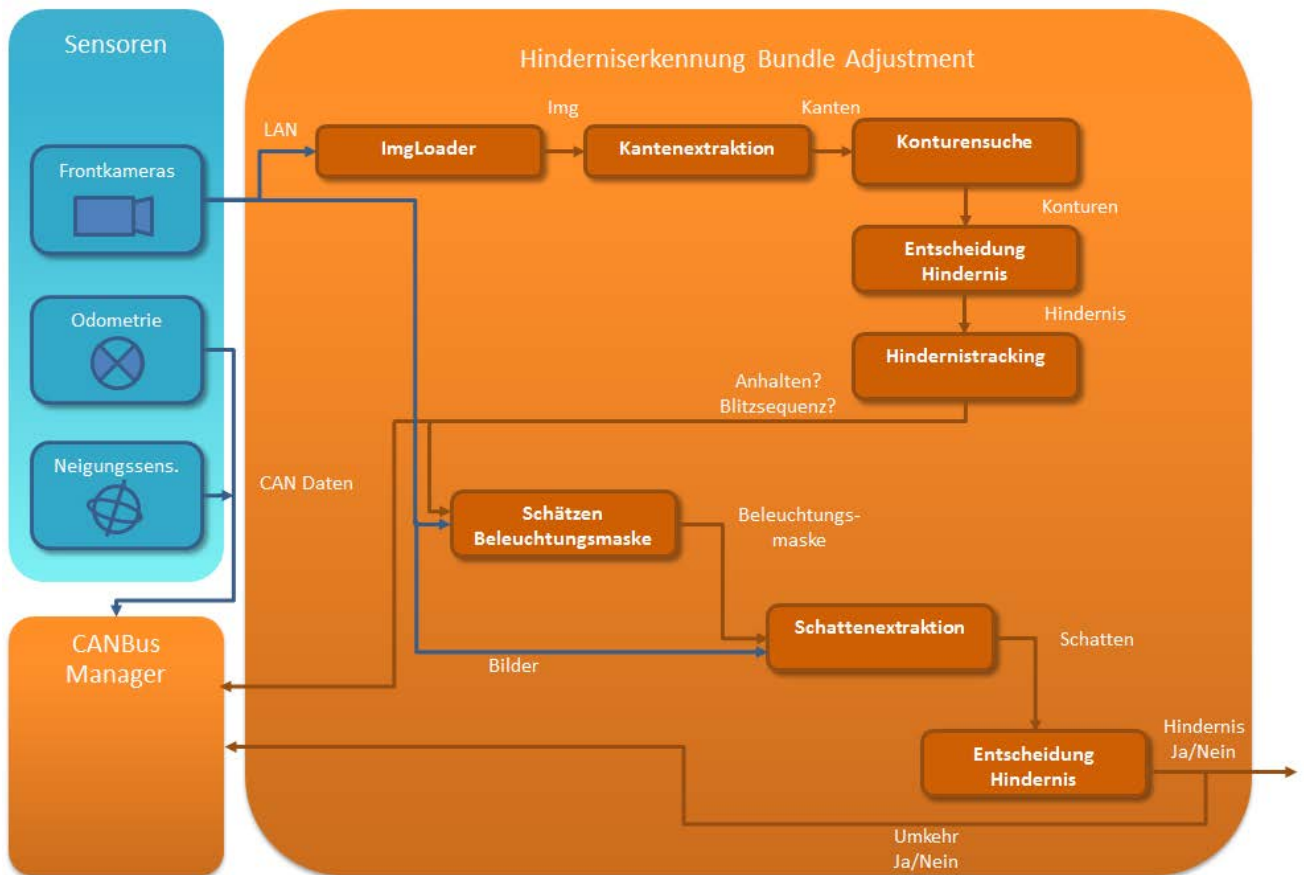


Abbildung 2.4: Architektur für das Modul Hinderniserkennung.

Modul Visuelle Odometrie

Hier wird die genaue Aufnahmeposition der Kamerabilder mit Hilfe der darin zu findenden Korrespondenzen über mehrere Frames sowie den zugehörigen Odometriedaten berechnet, diese Odometriedaten korrigiert und schließlich im Speicher abgelegt.

Für Details zum Ablauf und der Beschreibung der einzelnen Untermodule für die Visuelle Odometrie siehe Arbeitspaket 6, Teilaufgabe 1.

Visuelle Odometrie Bundle Adjustment

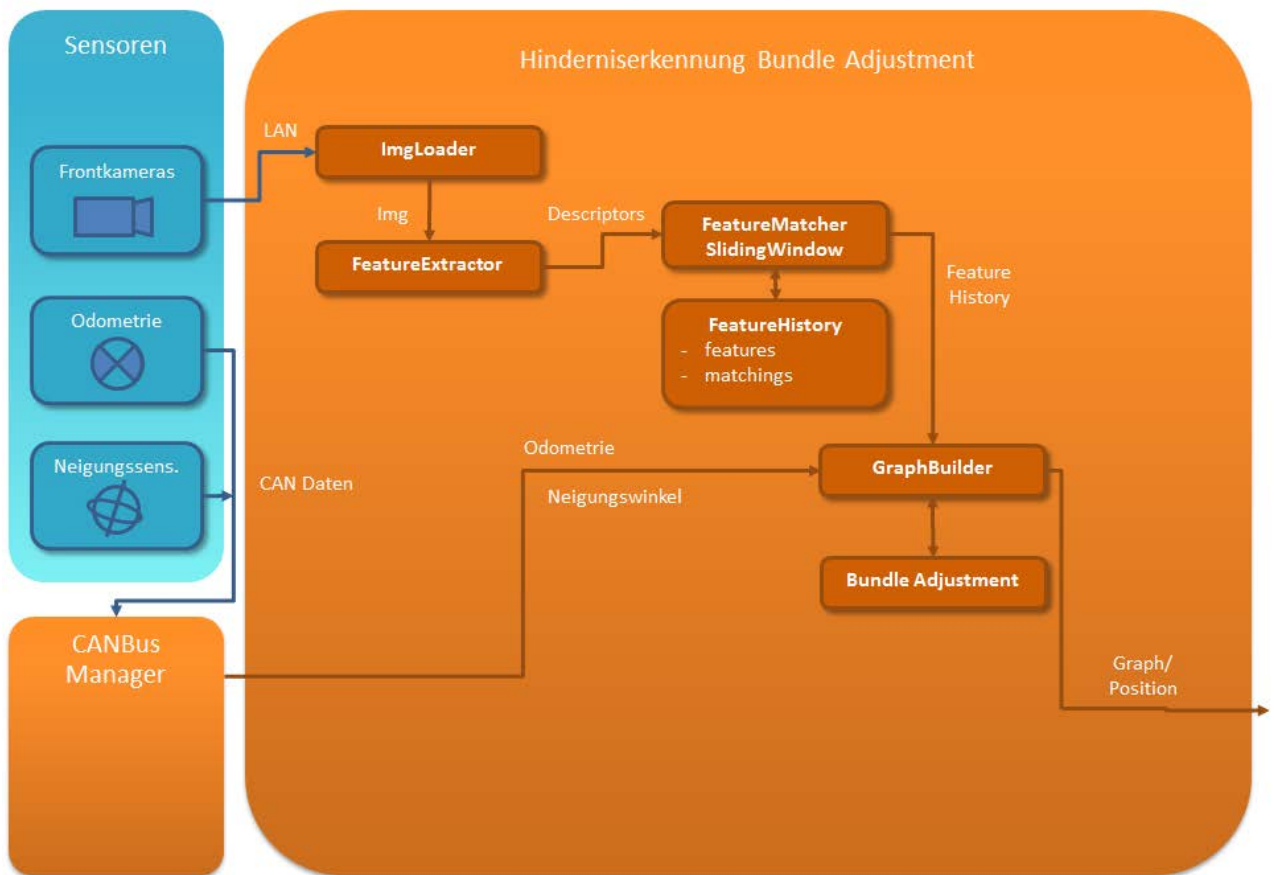


Abbildung 2.5: Architektur für das Modul Visuelle Odometrie.

Modul Datenkompression / Protokollierung

Dieses Modul hat die Aufgabe, die Kamerabilder, die Werte der restlichen Sensoren sowie wichtige Zwischenergebnisse mit einem Zeitstempel zu versehen, evtl. zu komprimieren und chronologisch im Speicher abzulegen.

Für Details zur Datenkompression / Protokollierung siehe Arbeitspaket 5, Teilaufgabe 2.

Datenkompression/Protokollierung

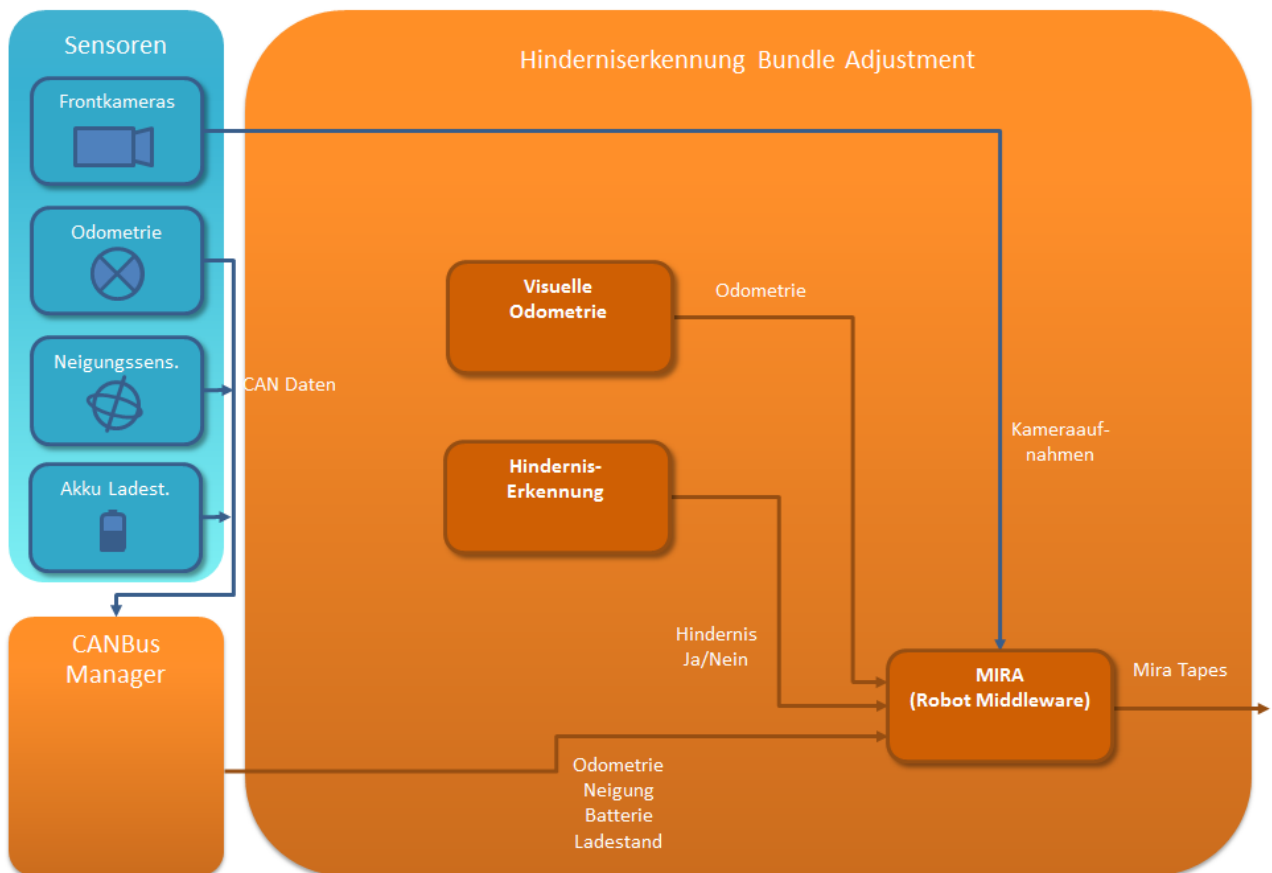


Abbildung 2.6: Architektur für das Modul Datenkompression / Protokollierung

Modul Entscheidung Umkehr

Hier wird die Entscheidung getroffen, ob der Roboter umkehrt und zu seinem Ausgangspunkt zurückfährt.. Die Kriterien für diese Entscheidung basieren auf:

- *Den Odometriewerten der Räder bzw. der korrigierten visuellen Odometrie:* Falls der Operator zu Beginn der Inspektionsfahrt angegeben hat, dass der Roboter nach einer bestimmten Strecke automatisch umkehren soll.
- *Der Ausgabe des Moduls für die Hinderniserkennung:* Wenn vor dem Roboter ein nicht passierbares Hindernis detektiert wurde.
- *Dem Ladestatus der Batterie:* Wenn die Batterie 60% Ladestatus unterschreitet, kehrt der Roboter um, da nur so ein Liegenbleiben des Roboters aufgrund entladener Akkus ausgeschlossen werden kann. Dies ist notwendig da, auch wenn der Roboter das nächste Kontrollbauwerk theoretisch noch erreichen könnte, ein nicht passierbares Hindernis kurz vor dem Kontrollbauwerk den Roboter zur einer Umkehr zwingen könnte und dieser mindestens 50% Ladekapazität (+10% Sicherheit) für die Rückfahrt benötigt.

Entscheidung Umkehr

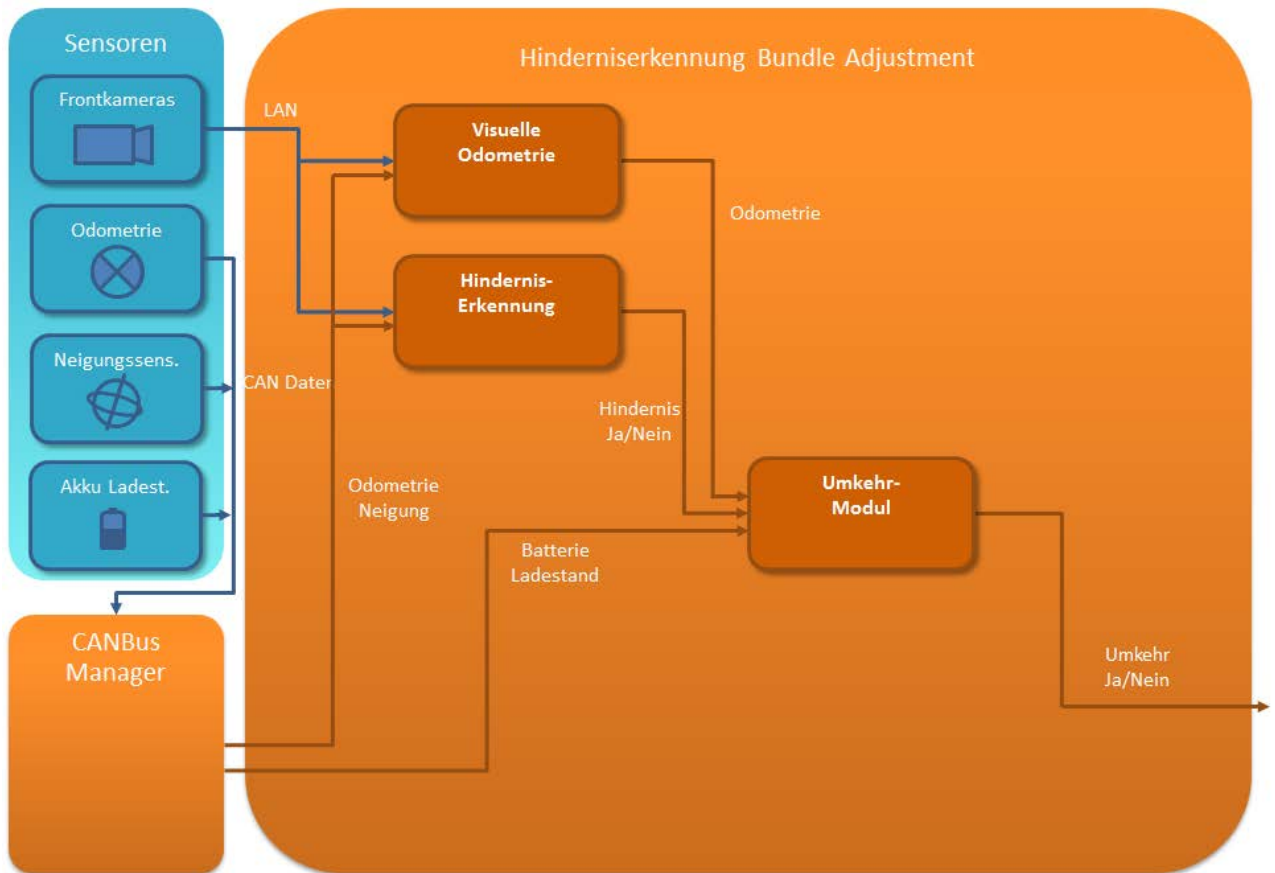


Abbildung 2.7: Architektur für das Modul Entscheidung Umkehr

Modul Benutzerschnittstelle

Dieses Modul ist zuständig für die Verbindung und Kommunikation zwischen dem Rodiar-Roboter und einem externen Operator-PC, von welchem mit der im Rahmen dieses Projektes entwickelten Software, dem RODIAR Control Center, die Inspektionsfahrt gestartet wird und von dem die aufgenommenen Inspektionsdaten ausgelesen werden können.

Die Verbindung der beiden geschieht via Ethernet. Für eine detailliertere Beschreibung des RODIAR Control Centers siehe Arbeitspaket 6, Teilaufgabe 4.

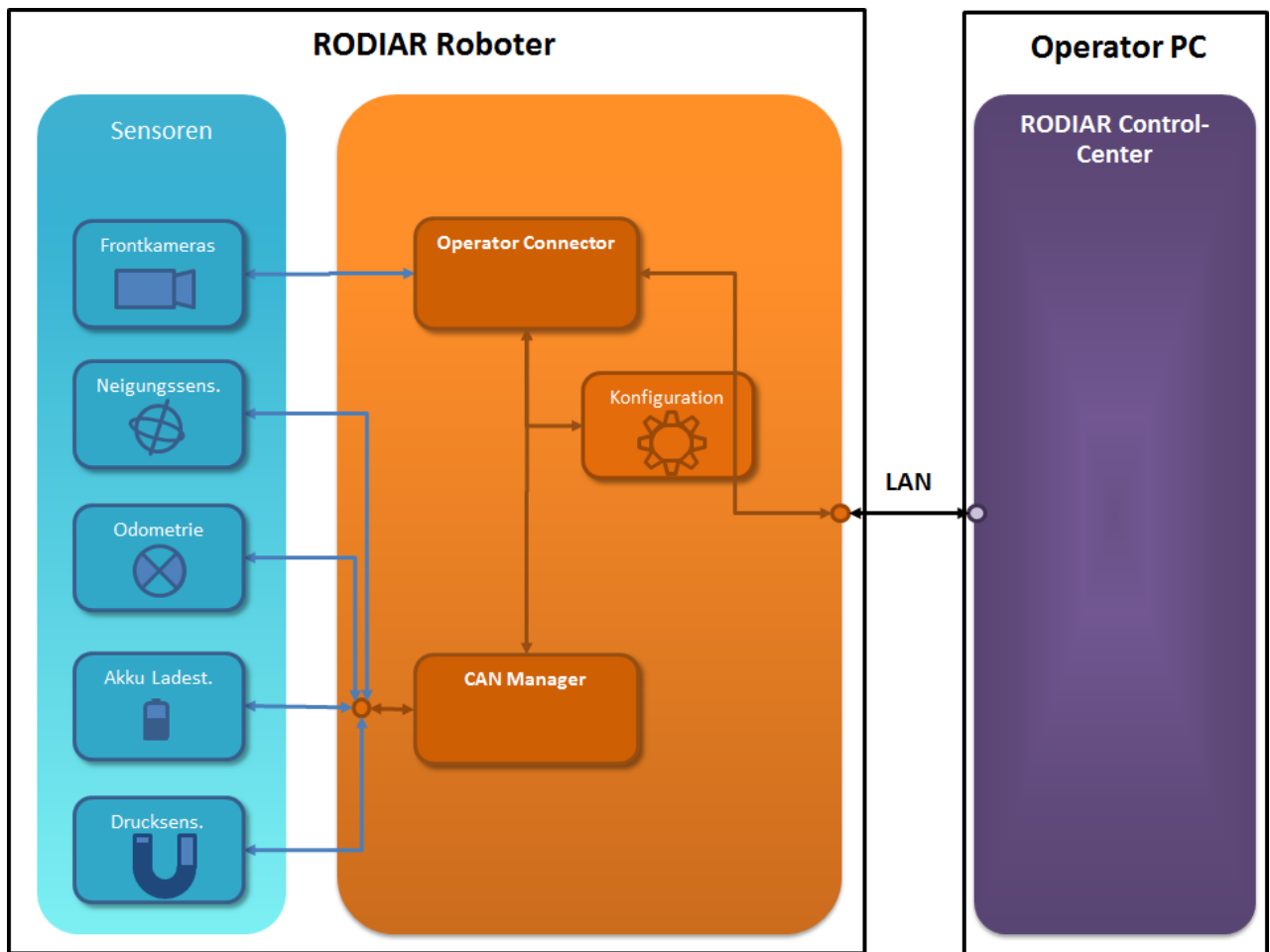


Abbildung 2.8: Architektur für das Modul Benutzerschnittstelle. Dargestellt sind die beiden getrennten Systeme des Rodiar-Roboters und des externen Operator-PC's (jeweils schwarz umrandet), sowie deren Verbindung über LAN.

Teilaufgabe 2:

„Protokollierung von Kamera- und Positions-Daten sowie von Navigations-Informationen im korrekten zeitlichen Kontext. Diese Daten sollen für ein autonomes Homing des Roboters genutzt werden können und zur nachträglichen Auswertung des aufgezeichneten Videomaterials durch einen Operator bei der Rohrinspektion dienen. Das Datenmaterial musste zur Speicherung mit geeigneten Codecs entsprechend komprimiert werden, um es effizient speichern zu können. Sowohl bei der Kompression der Datenströme als auch bei der Datenspeicherung konnten teilweise auf bestehende Komponenten des MIRA Softwaresystems zurückgegriffen werden.“

Für eine nachhaltige Protokollierung der Daten im Sinne einer komfortablen Auswertung und Weiterverarbeitung nach der Inspektion wurde die Speicherung der Daten mit Hilfe von MIRA Tapes vorgenommen, welche von der im Fachgebiet NIKR entwickelten Roboter Middleware MIRA bereitgestellt werden (siehe <http://www.mira-project.org/MIRA-doc/TapesPage.html> und Einhorn et.al). Diese sind in der Lage, sämtliche bei der Fahrt zu speichernde Sensordaten und Zwischenergebnisse sowie deren korrekte zeitliche Beziehungen zueinander (mit Hilfe von Zeitstempeln) in einem Stream aufzunehmen, in einem Binärfile zu speichern und bei Bedarf jederzeit wieder abzuspielen. Die Hinzunahme weiterer, eventuell benötigter Daten (z.B. nach der Installation neuer Sensoren oder weitere interessante Zwischenergebnisse) ist dabei problemlos und mit geringem Aufwand möglich.

Weiterhin besitzen MIRA Tapes eine built-in Komprimierung durch verschiedenste, frei wählbare Codecs (z.B. jpeg-Enkodierung von Kamerabildern, zip-Komprimierung von Sensordaten), weshalb sowohl für die Datenspeicherung und -protokollierung, als auch für die Komprimierung auf bereits vorhandene Softwarekomponenten zurückgegriffen werden konnte.

Teilaufgabe 3:

„Anbindung der Hardwaretreiber an das restliche Softwaresystem, sowie ggf. die Entwicklung von Hardwaretreibern für die AP4 integrierte Sensorik.“

Die Treiber für die Kameras und den CAN-Bus wurden in die verwendete Middleware MIRA eingebunden und in Betrieb genommen.

Teilaufgabe 4:

„Integration der einzelnen Softwaremodule zu einem Gesamtsystem, inklusive Integrationstests und Parametrisierung der Softwaremodule und Algorithmen.“

Anhand der Steuerarchitektur (siehe AP 5.1) wurden die Module zu einem Gesamtsystem zusammengefügt und erfolgreiche Integrationstests durchgeführt.

Arbeitspaket 6:

Teilaufgabe 1:

„Die Selbstlokalisierung des Roboters erfolgt durch eine Kombination verschiedener Sensoren. Die fehlerbehafteten Odometrie-Messungen der Räder sollten durch eine visuelle Odometrie ergänzt werden. Während der Eigenbewegung des Roboters werden in den aufgenommenen Kamera-Bildern markante Bildregionen (Features) getrackt und einander zugeordnet. Anhand der Bewegung der Features in den Bildern kann die Eigenbewegung des Robotersystems geschätzt werden. Dabei müssen geeignete Features gefunden werden, die – je nach Verschmutzungs- und Abnutzungsgrad der Rohre – auch in texturarmen Rohrwandungen robust getrackt werden können. Die Schätzung der Eigenbewegung kann dann mit Hilfe eines entsprechenden Optimierungsverfahrens, dem Bündelausgleich (SBA – Sparse Bundle Adjustment), erfolgen.“

Aufgrund der durchweg guten Ergebnisse in der Literatur [Strasdat et. al.], der vergleichsweise schnellen Laufzeit und der gleichzeitigen Verwendbarkeit für die visuelle Hinderniserkennung, hat sich das FG NIKR dazu entschieden, das Bündelausgleichverfahren für die visuelle Odometrie zu verwenden.

Die Grundidee für den Bündelausgleich besteht darin, ein Objekt aus mehreren Perspektiven aufzunehmen, darin markante Punkte zu detektieren und in den verschiedenen Perspektiven einander zuzuordnen (siehe Abbildung 2.9).

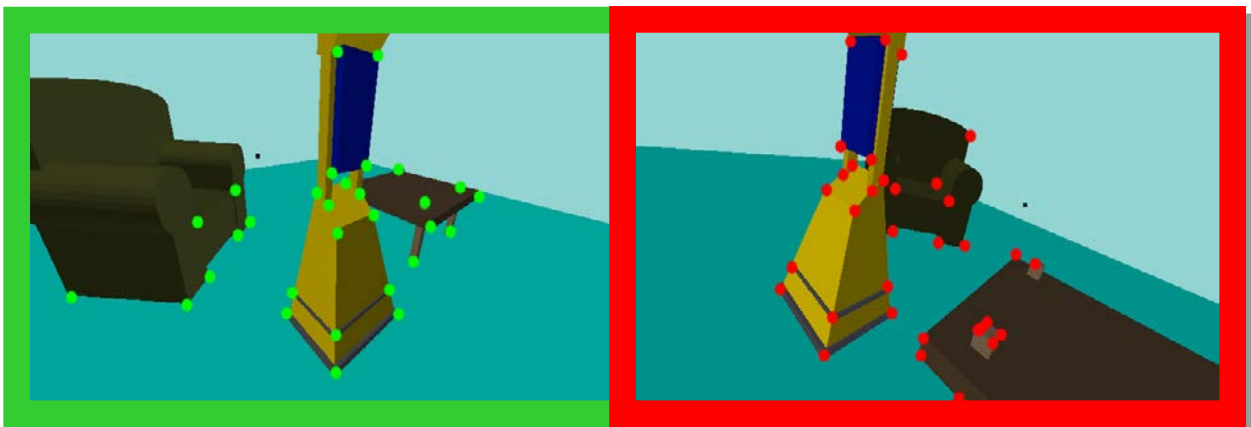


Abbildung 2.9: Aufnahme der gleichen Szene aus verschiedenen Perspektiven für den Bündelausgleich. Markante Punkte der Szene werden dabei auf verschiedene Pixelpositionen der beiden Bilder abgebildet.

Die markanten Punkte und die Positionen der Kamera (aus denen die Aufnahmen getätigt wurden) können anschließend, ausgehend von einer Startschätzung, solange im Raum verschoben werden, bis auf der einen Seite die realen Beobachtungen der markanten Punkte im Bild, und auf der anderen Seite die analytische Berechnung der Projektionen der geschätzten Features im Raum auf die Bildebenen der geschätzten Kamerapositionen (siehe Abbildung 2.9) möglichst gut übereinstimmen. Vor der detaillierten Erläuterung des Verfahrens zur visuellen Odometrie werden im Folgenden erst noch die dafür notwendigen Kamerakalibrierungs- und Stereorektifizierungsverfahren vorgestellt.

Kamerakalibrierung

Für die Rückprojektion der Features aus dem 3D-Raum in die Bildebene ist eine möglichst exakte Kamerakalibrierung notwendig. Standard-Kalibrierungstools sind hier nicht geeignet, da diese gewöhnlich nicht für Fischaugenobjektive gedacht sind. Sie kann jedoch durch die Methode von Scaramuzza [Scaramuzza et.al] vorgenommen werden, welche speziell für Omniobjektive und Fischaugenobjektive entworfen wurde und das Omni- bzw. Fischaugenbild in ein entzerrtes Bild nach dem Lochkameramodell umwandelt.

Die Methode versucht, den Strahlenverlauf an dem Omni- bzw. Fischaugenobjektiv zu approximieren, indem ein Polarkoordinatensystem um die optische Achse eingerichtet wird. Ausgehend vom Koordinatenursprung, bzw. der optischen Achse, findet eine Ablenkung der Lichtstrahlen durch das Objektiv ausschließlich in z-Richtung statt, während die x-y-Richtung unverändert bleibt (siehe Abbildung 2.10 am Beispiel eines Omniobjektives. Für Fischaugenobjektiv analog.).

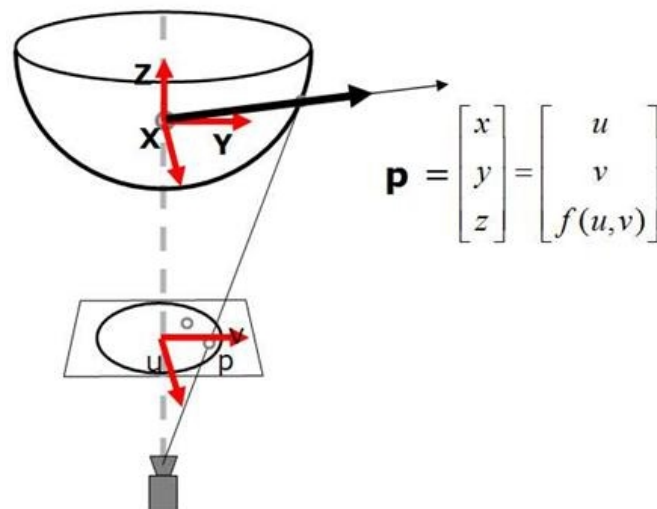


Abbildung 2.10: Ablenkung des Strahles an einem Omniobjektiv (Bildquelle: <https://sites.google.com/site/scarabotix/ocamcalib-toolbox>)

Die Stärke dieser Ablenkung ist Abhängig vom Abstand zur optischen Achse r und kann über ein Polynom approximiert werden:

$$f(u, v) = a_0 + a_1 r + a_2 r^2 + a_3 r^3 + \dots$$

Zusätzlich werden noch die intrinsischen Parameter der Kamera abgeschätzt, welche entstehen, wenn Bild- und Linsenebene nicht vollständig parallel und mittig zueinander ausgerichtet sind, was in einem Ellipsen förmigen anstelle eines Kreis runden Bildes resultiert, dessen Mittelpunkt nicht mit der optischen Achse übereinstimmt (Beispiel in Abbildung 2.11).

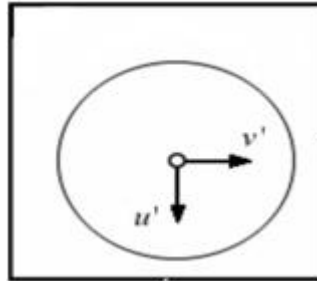


Abbildung 2.11: Nicht parallel ausgerichtetes und mittiges Bild eines Fischaugenobjektives

Korrigiert werden kann dies durch eine affine Transformation:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c & d \\ e & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_c' \\ y_c' \end{bmatrix}$$

Wobei u, v die Position des unkorrigierten Pixels im Bild, u', v' die Position des korrigierten Pixels und (x_c', y_c') die Verschiebung der optischen Achse zum Bildmittelpunkt angibt.

Die freien Parameter sowohl bei der Approximation des Strahlenverlaufes, als auch bei der affinen Transformation können abgeschätzt werden, indem mit dem Objektiv mehrere Ansichten eines Kalibrierungsmusters (z.B. Schachbrettmuster) bekannter Ausmaße aufgenommen werden. Durch die Detektion der markanten Punkte dieses Musters (z.B. Ecken des Schachbretts und deren bekannter Abmessungen) können durch ein entsprechendes Optimierungsverfahren die freien Parameter abgeschätzt werden.

Stereorektifizierung

Ziel der Stereorektifizierung ist es, die beiden Kamerabilder so zu transformieren, dass jedes Feature in beiden Kamerabildern auf der gleichen Bildzeile liegt. Dies ermöglicht die analytische Berechnung der Distanz von Roboter zum Feature und erleichtert das Featurematching, da zum Finden der korrespondierenden Features nur noch auf einer Bildzeile gesucht werden muss.

Entscheidend für die Rektifizierung sind die Epipolarebenen, welche durch die Projektionszentren der beiden Kameras und die aufgezeichneten Objektpunkte aufgespannt werden (siehe Abbildung 2.12). Die Schnittgeraden der Epipolarebenen mit den Bildebenen ergeben die Epipolarlinien, welche für ein rektifiziertes Bild parallel zu den Scanlines der beiden Kamerabilder verlaufen sollen.

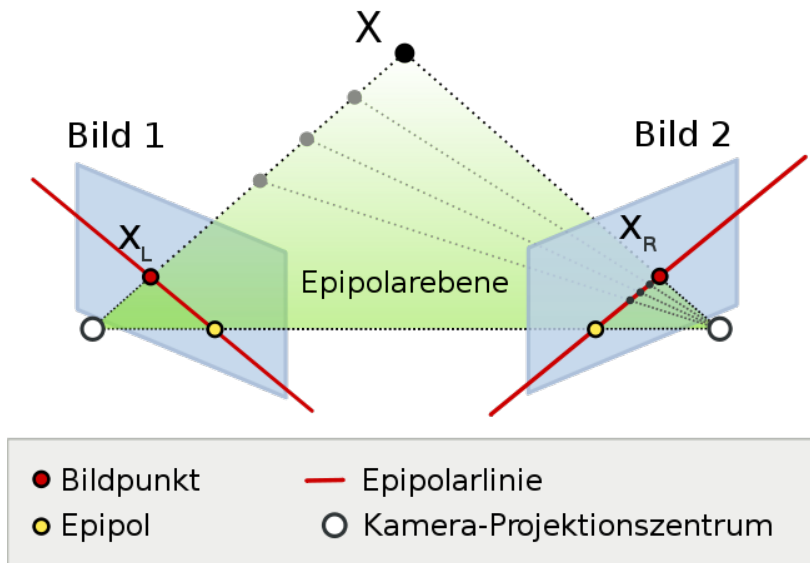


Abbildung 2.12: Epipolargeometrie.

(Bildquelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Epipolargeometrie>)

Um dies zu erreichen, werden die Bilder in zwei virtuelle Kameras rückprojiziert, welche diese Eigenschaften besitzen. Dafür sind 2 Schritte notwendig:

1. Rotieren der beiden Kameras so, dass ihre Projektionszentren in die gleiche Richtung zeigen. Dies bewirkt, dass ihre Epipolarlinien generell parallel zueinander verlaufen.
2. Unter Beibehaltung von Punkt 1, werden die virtuellen Kameras so rotiert, dass die Epipolarebenen parallel zur x-Achse der beiden Kameras verlaufen.

Nach Trucco & Verri [Trucco und Verri] kann dies erreicht werden, indem eine Rotationsmatrix bestehend aus drei Einheitsvektoren nach folgendem Schema erstellt wird:

$$e_1 = \frac{T}{\|T\|}$$

Wobei T die Translation zwischen den beiden Kameras angibt, welche aus der Kamerakalibrierung errechnet werden kann.

Der zweite Vektor sollte lediglich orthogonal zu e_1 sein. Das Kreuzprodukt von e_1 mit dem Richtungsvektor der optischen Achse ergibt:

$$e_2 = \frac{1}{\sqrt{T_x^2 + T_y^2}} [-T_y, T_x, 0]^T$$

Und schließlich e_3 :

$$e_3 = e_1 \times e_2$$

Die Rotationsmatrix aus

$$R_{rect} = \begin{pmatrix} e_1^T \\ e_2^T \\ e_3^T \end{pmatrix}$$

rotiert nun die linke Kamera so, dass die Epipolarlinien parallel zur horizontalen Achse des Bildes verlaufen. Für die rechte Kamera ist selbiges mit der Rotationsmatrix

$$R_R = R^{-1} R_{rect}$$

Zu bewerkstelligen, wobei R die ursprüngliche Rotation der rechten zur linken Kamera angibt. Mit Hilfe der Kamerakalibrierung aus dem letzten Kapitel ist es möglich, die Rotation R und den Versatz T der beiden Kameras zueinander zu approximieren, zwei virtuelle Kameras durch die Rotation um R_{rect} bzw. R_R einzurichten und eine Rückprojektion des ursprünglichen Bildes in die virtuellen Kameras vorzunehmen. Das obige Verfahren wurde im Fachgebiet NIKR erfolgreich implementiert und im Rahmen des Bündelausgleichsverfahrens als Teil der visuellen Odometrie des Rodiar-Roboters eingesetzt.

Visuelle Odometrie

Der grundlegende Ablauf des Verfahrens zur visuellen Odometriekorrektur besteht aus insgesamt 7 Schritten und ist in Abbildung 2.13. dargestellt.

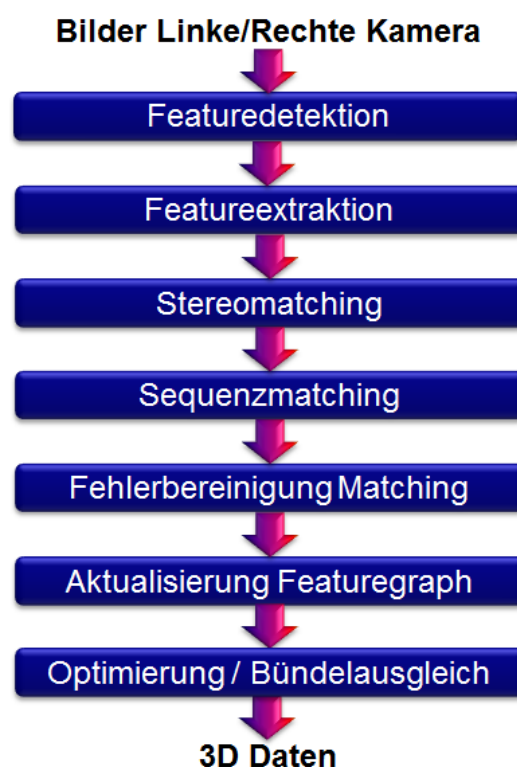


Abbildung 2.13: Grundlegender Ablauf zur Visuellen Odometrie.

Schritt 1: Featuredetektion

Ziel ist es, in den aktuellen Kamerabildern (linkes und rechtes Kamerabild) markante Featurepunkte zu suchen, welche sich möglichst gut in folgenden Bildern wiederfinden lassen. Nach dem Vergleich mehrerer gängiger Featurdetektoren (siehe Arbeitspaket 7, Teilaufgabe 3), haben sich BRISK Features [Leutenegger et. al] als für die Rohrumgebung bester Kompromiss zwischen möglichst geringer Laufzeit und hoher Wiedererkennungsgüte erwiesen.

Diese BRISK-Features testen jeden Featurepunkt im Bild und vergleichen seinen Grauwert mit den Grauwerten der Pixel in einer kreisförmigen 16er Nachbarschaft (siehe Abbildung 2.14).

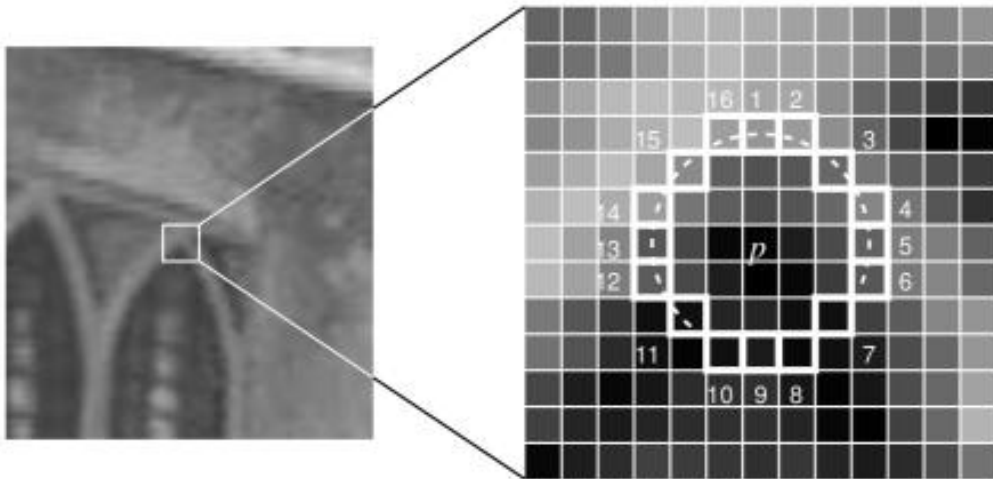


Abbildung 2.14: Illustration der kreisförmigen 16er Nachbarschaft um den Featurepunkt beim BRISK Featureextraktor (Bildquelle: [Leutenegger et. al]).

Überschreitet die absolute Differenz dieser Grauwerte bei mehr als 8 zusammenhängenden Pixeln eine vorher definierte Schwelle (d.h. mindestens ein Halbkreis um den Pixel ist signifikant heller oder signifikant dunkler), ist dieser Punkt als markant und damit für die Wiedererkennung geeignet anzusehen.

In Abbildung 2.15. sind einmal zur Illustration beispielhaft drei Featurepunkte jeweils im linken und rechten Kamerabild als markant markiert worden (Anm: Für den Realfall sind wesentlich mehr detektierte Features vonnöten. Bei Tests haben sich 1000-1500 Features pro Bild als am praktikabelsten erwiesen, wobei deren Anzahl durch Anpassen der Schwelle steuerbar ist).

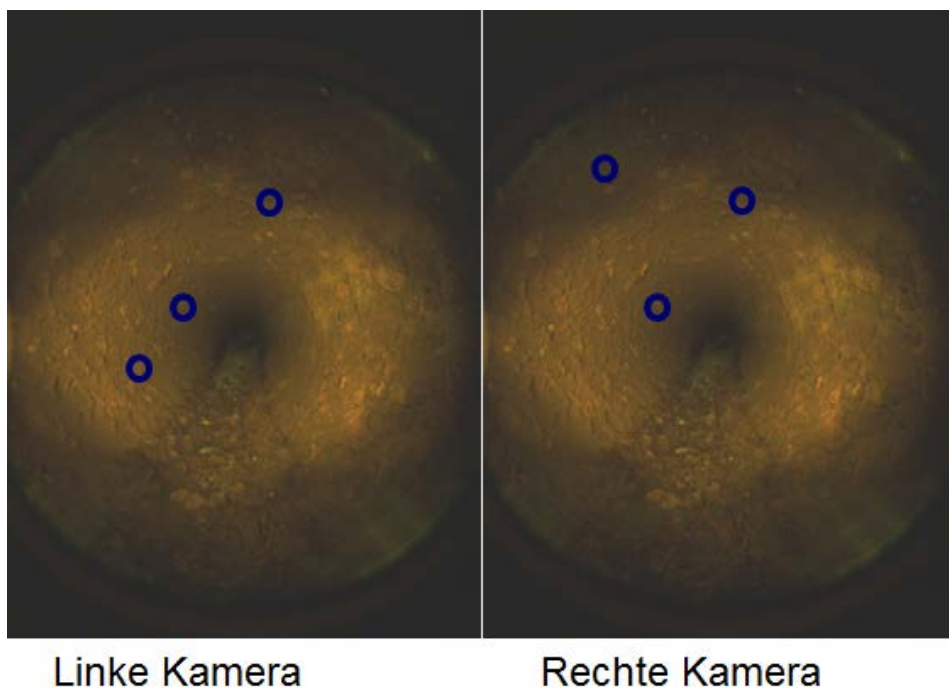


Abbildung 2.15: Beispiel für jeweils drei detektierte Features im linken und rechten Kamerabild (blaue Kreise).

Schritt 2: Featureextraktion:

Hier werden die in Schritt 2 als markant detektierten Features „beschrieben“, um so eine Wiedererkennung zu ermöglichen. Verwendet wird dazu der speziell für BRISK-Features entworfene BRISK-Deskriptor [Leutenegger et. al]. Dieser verwendet Pixel in einem vorher definierten Muster um den Featurepunkt (siehe Abbildung 2.16).

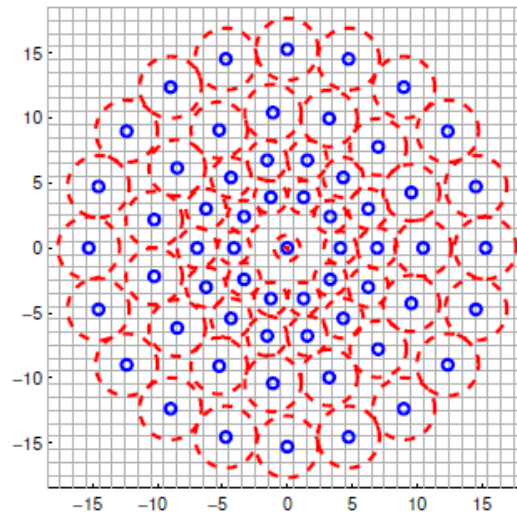


Abbildung 2.16: Muster des BRISK-Featuredeskriptors (Bildquelle: [Leutenegger et. al])

Dabei werden paarweise die Grauwerte der Pixel an der Stelle dieses Musters verglichen und geprüft, welcher von beiden heller ist. Basierend auf den Ergebnissen aller dieser Vergleiche (kodiert als „0“ oder „1“), ergibt sich ein Binärstring, der die lokale Umgebung um den Featurepunkt beschreibt und mit welchem ein Maß definiert werden kann, wie ähnlich sich zwei Featurepunkte sind, indem entsprechend die Hamming-Distanz der BRISK-Deskriptoren berechnet wird. Ist die Hamming-Distanz der Binärstring-Deskriptoren gering, sind sich die Featurepunkte ähnlich.

Schritt 3: Stereomatching

Beim Stereomatching werden auf Basis der Distanz der Featuredeskriptoren (siehe Schritt 2), die markanten Featurepunkte des linken und rechten Kamerabildes einander zugeordnet.

Aufgrund der extrem monotonen Umgebung im Rohr und der entsprechend sehr ähnlichen Featurepunkte würden sich bei einem Brute-Force-Ansatz (Vergleich aller Featurepunkte miteinander) entsprechend sehr viele „Fehlmatches“, also fehlerhafte Zuordnungen der Punkte ergeben. Um dies zu vermeiden, wird der Suchbereich vorher stark eingeschränkt:

Durch eine vorher durchgeführte Stereorektifizierung der Kamerabilder, befinden sich Featurepunkte im linken und rechten Kamerabild (in der Theorie) auf der gleichen Scanline, können also nur mit Features mit gleicher y-Koordinate gematcht werden. Aufgrund möglicher kleinerer Abweichungen z.B. wegen Ungenauigkeiten im Kameramodell, werden Featurepunkte jedoch auch in einem kleinen Bereich über und unter der aktuellen Scanline verglichen.

Die Sichtweite in einem typischen Fernwasserrohr beträgt mit dem Rodiar-Roboter nur etwa 1,5m. Die Minimaldistanz, bis auf welche das Matching stattfindet, wurde aus praktischen Gründen auf 10cm festgelegt. Da die Disparität, also der Abstand der Positionen der Featurepunkte im linken und rechten Kamerabild von der Entfernung des Roboters zum 3D-Featurepunkt bestimmt wird, lässt sich außerdem die Breite des Suchfensters für das Matching begrenzen.

Dieser Vorgang ist noch einmal in Abbildung 2.17. beispielhaft dargestellt, wo das Matching zweier Featurepunkte im linken und rechten Kamerabild mitsamt den korrespondierenden Suchbereichen dargestellt ist.

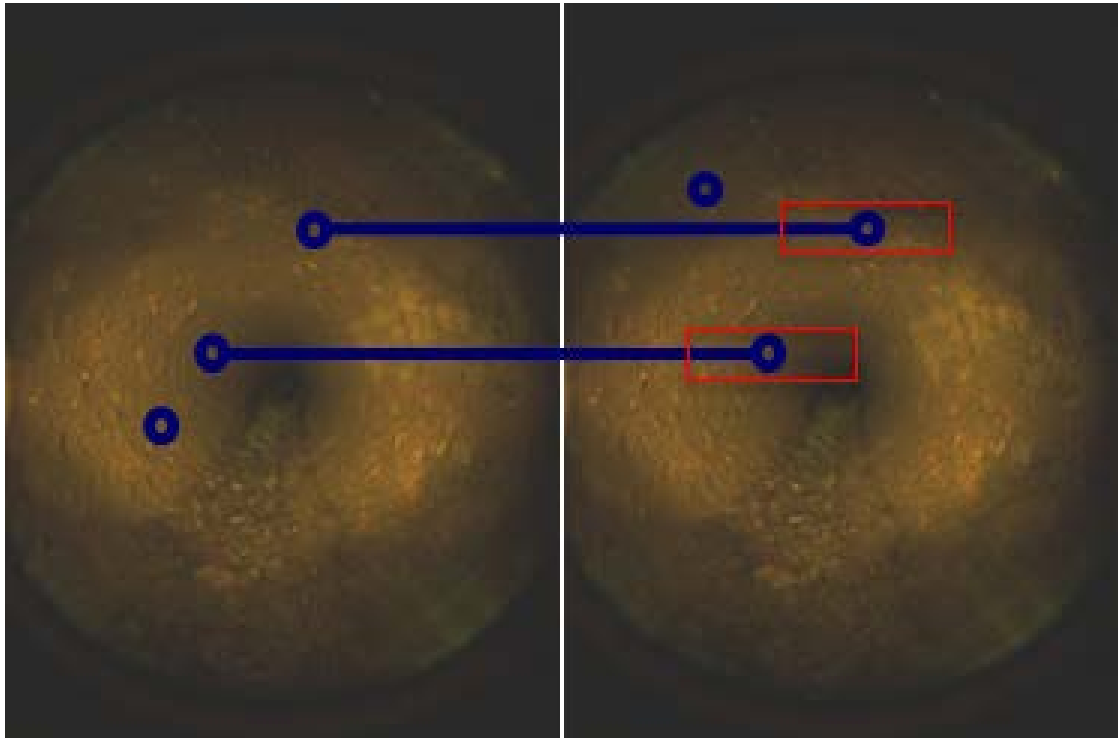


Abbildung 2.17: Beispiel für das Matching zweier Featurepunkte im linken und rechten Kamerabild (blau). Rot umrandet sind die entsprechenden Suchbereiche.

Nach dem Matching werden zusätzlich die 3D-Positionen der gematchten Featurepunkte berechnet. Dies geschieht mit Hilfe der Berechnung der Entfernung des Featurepunktes vom Roboter (d) auf Basis der Disparität ($disp$) in den rektifizierten Kamerabildern:

$$d = \frac{f \cdot B}{disp}$$

Wobei f die Brennweite der Kamera und B den Basisabstand der linken und rechten Kameras zueinander angibt. Mit Hilfe dieser Entfernung, des Winkels des Featurepunktes in Relation zur Kamera und der aktuellen Posenschätzung des Roboters, kann eine erste, näherungsweise Schätzung der 3D-Koordinaten eines Punktes berechnet werden. In Abbildung 2.18 wird dieser Vorgang noch einmal grafisch verdeutlicht.

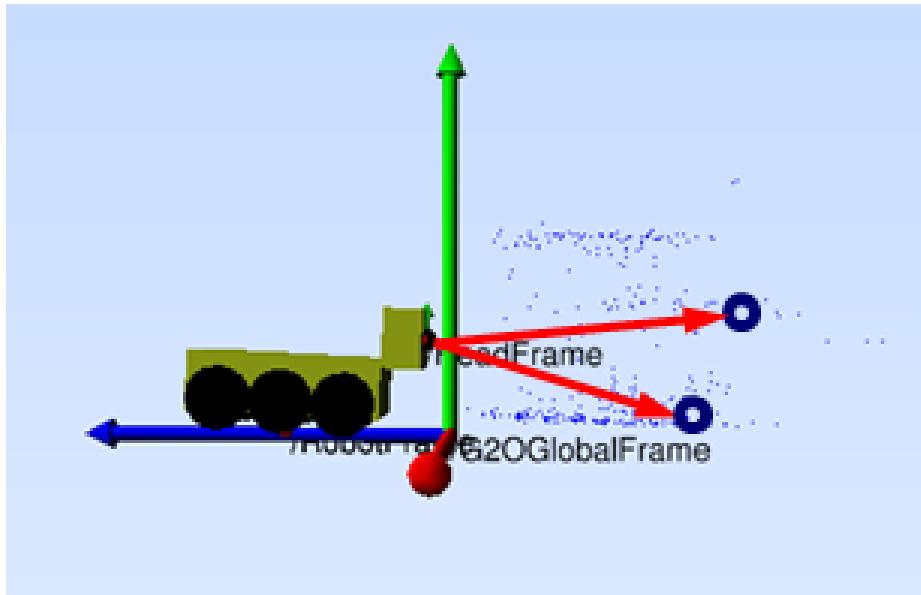


Abbildung 2.18: Berechnung der 3D-Koordinaten der Featurepunkte mit Hilfe der Entfernung, des Winkels und der Posenschätzung des Roboters.

Schritt 4: Sequenzmatching

Im vierten Schritt, dem Sequenzmatching werden die Featurepunkte der aktuellen Aufnahme, mit den Featurepunkten vergangener Aufnahmen gematcht. Das verwendete Matchingverfahren ist dabei grundlegend das gleiche wie beim Stereomatching in Schritt 3.

Auch hier stellen Fehlmatches aufgrund der monotonen Rohr Umgebung ein Problem dar, der Suchbereich kann jedoch nicht auf die gleiche Weise wie in Schritt 3 eingeschränkt werden, da sich der Roboter zwischen den beiden Aufnahmen höchstwahrscheinlich bewegt hat. Jedoch können die Rückprojektionen der 3D-Features in die aktuellen Bilder einen guten Anhaltspunkt für die Positionen der Features im Bild geben. Dies geschieht wie folgt:

1. Die Position des Roboters im 3D-Raum wird anhand der Odometriemessungen der Radodometrie sowie des Neigungssensors aktualisiert. Die Positionen der Featurepunkte im 3D-Raum rücken dabei z.B. bei einer Vorwärtsbewegung näher an den Roboter heran.
2. Die 3D-Featurepunkte der vergangenen Aufnahmen werden mit Hilfe des Kameramodells in die aktuellen Bilder projiziert. Diese Rückprojektionen sollten näherungsweise der tatsächlichen Positionen der Features im aktuellen Bild entsprechen, wobei kleinere Abweichungen anhand von Ungenauigkeiten im Kameramodell und in der Odometrie zustande kommen können, weshalb in einem kleinen Suchfenster gesucht wird.

Abbildung 2.19 verdeutlicht dieses Vorgehen noch einmal grafisch.

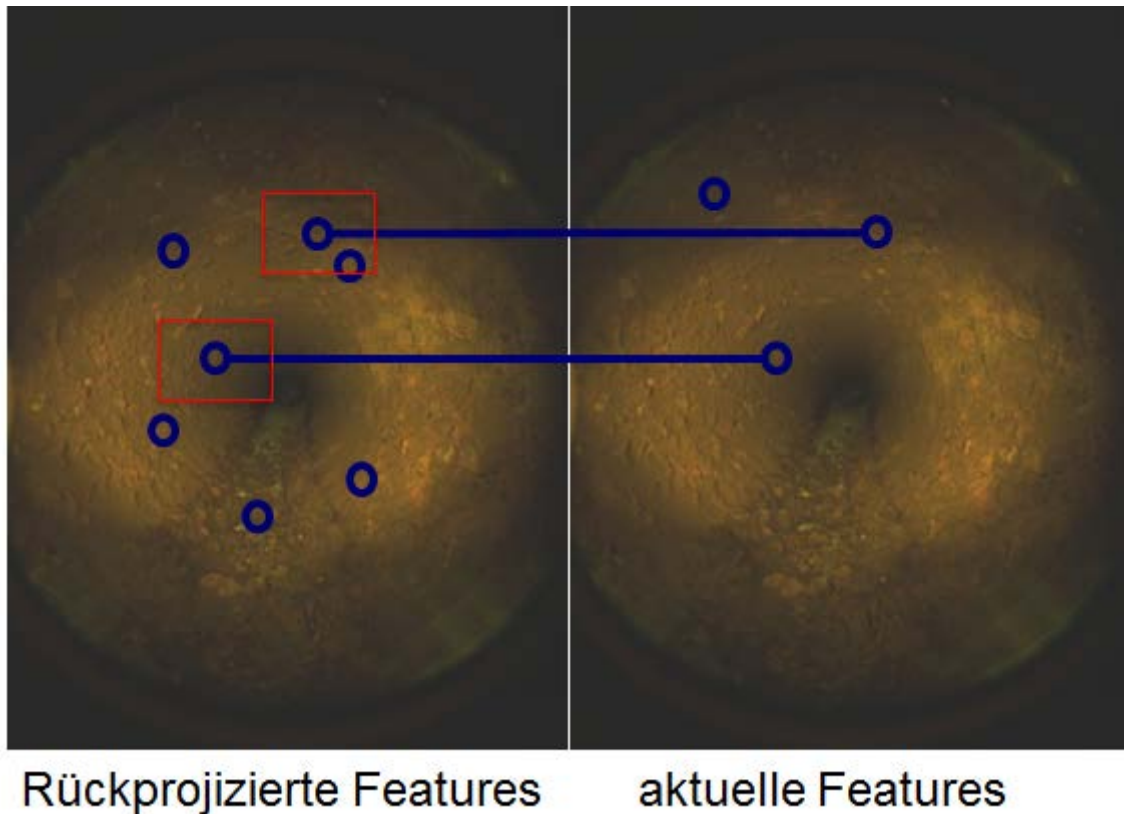


Abbildung 2.19: Beispiel für das Sequenzmatching zweier Featurepunkte im Bild mit den durch die Radodometrie aktualisierten und anschließend rückprojizierten Features vergangener Aufnahmen (links) und den gefundenen Features der aktuellen Aufnahme (rechts). Die entsprechenden Suchbereiche sind rot umrandet.

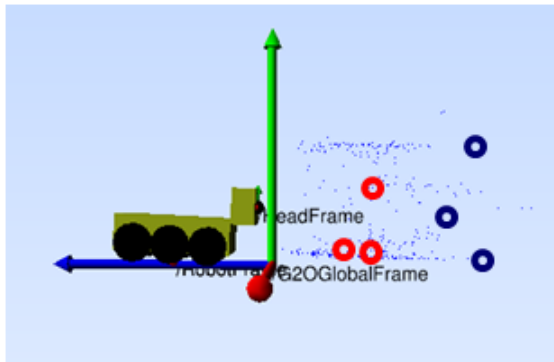
Schritt 5: Fehlerbereinigung

Da trotz der Einschränkungen im Suchbereich beim Matching weiterhin noch Fehlmatches auftreten, ist eine weitere Ausreißerdetektion notwendig.

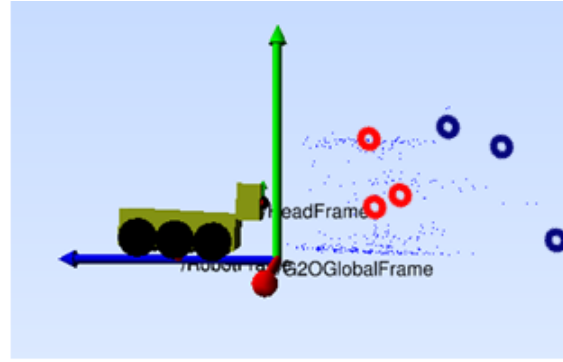
Unterschiede bei den Abschätzungen der 3D-Positionen der Featurepunkte der vergangenen Aufnahmen und der aktuellen Aufnahme können sich hauptsächlich aus folgenden Gründen unterscheiden:

1. Fehlerhafte Abschätzungen der Odometrie/Neigung und damit der Translation des Roboters zwischen vergangener und aktueller Aufnahme.
2. Fehler bei den Matches

Vereinfacht dargestellt ist dies einmal in Abbildung 2.20.



Aktuelle Matchingpunkte im 3D-Raum



Punkte vergangener Aufnahmen im 3D-Raum

Abbildung 2.20: Unterschiede bei den 3D-Positionen der Abschätzungen der Featurepunkte vergangener Aufnahmen (links) und der aktuellen Aufnahme (rechts). Anmerkung. Zur Veranschaulichung stark übertrieben dargestellt.

Im Gegensatz zu den Fehlern durch Fehlmatches wirken sich allerdings Fehler bei der Odometrie/Posenschätzung auf alle Featurepunkte gleich aus. Sie können damit abgeschätzt und korrigiert werden, wodurch weitere größere Abweichungen der 3D-Positionen der Features nach der Korrektur ausschließlich durch Fehlmatches hervorgerufen werden.

Für die Korrektur der Odometriemessung wird der RANSAC-Algorithmus verwendet, indem zufällig drei gefundene Matches ausgewählt werden, die 3D-Positionen dieser 3 Matches sowohl mit den Beobachtungen der aktuellen Pose, als auch der Pose vom letzten Zeitschritt berechnet und deren affine Transformation berechnet wird. Diese berechnete affine Transformation kann als Korrektur der Odometriemessung angesehen werden. Die restlichen Featurepunkte werden dementsprechend ebenfalls transformiert und die Anzahl der Featurepunkte berechnet, deren Positionen sich weiterhin zu sehr unterscheiden.

Da die affine Transformation zur Korrektur allerdings anhand von 3 beliebigen Matches berechnet wurde, von denen ebenfalls einer oder sogar mehrere durch Fehlmatches zustande gekommen sein könnten, wird diese Prozedur mehrfach wiederholt und die Transformation gewählt, bei welcher n_f minimal wird.

Die Featurepunkte, deren Positionen sich nach der Korrektur mit der letztendlich ausgewählten Transformation weiterhin signifikant unterscheiden sind letztendlich als Fehlmatches anzusehen und werden gelöscht. Diese Prozedur ist in Abbildung 2.21 noch einmal Beispielhaft gezeigt.

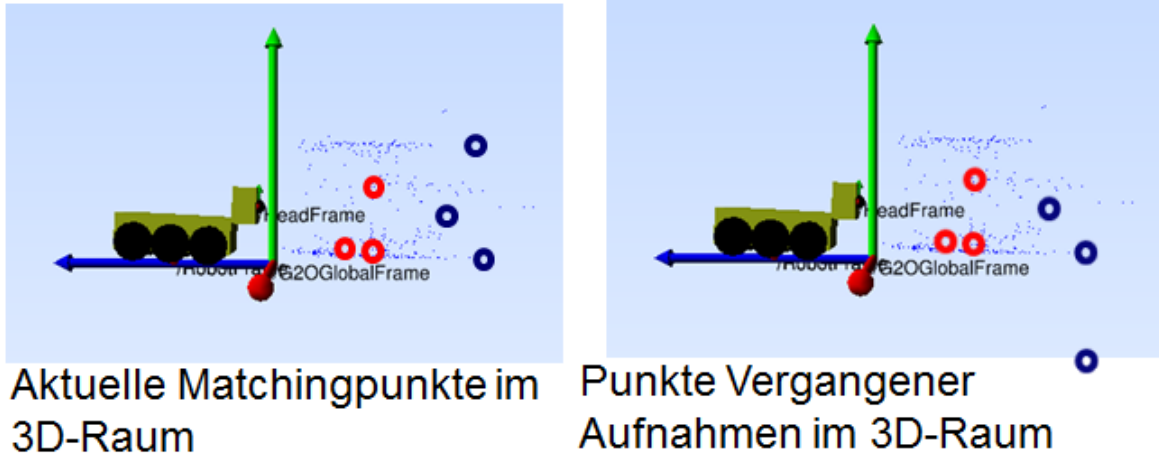


Abbildung 2.21: 3D-Position der Abschätzungen der Featurepunkte vergangener Aufnahmen (links) und der aktuellen Aufnahme (rechts) nach der Korrektur der Translationsschätzung im rechten Bild. Punkte deren Positionen sich weiterhin unterscheiden (wie hier dem obersten Punkt im linken Bild und dem untersten Punkt im rechten Bild) sind Fehlmatches. Anmerkung. Zur Veranschaulichung stark übertrieben dargestellt.

Schritt 6: Aktualisierung des Featuregraphen

Der Featuregraph stellt die Beziehungen der Roboterposen und Featurepunkte zueinander dar und wird für das Bündelausgleichsverfahren (siehe Schritt 7) benötigt. Posen und Features werden durch Knoten in dem Graphen repräsentiert, während Kanten zwischen zwei Posenknoten Odometriemessungen und Kanten zwischen Featureknoten und Posenknoten Beobachtungen des Featurepunktes in der entsprechenden Pose darstellen. Ein kleiner Beispielgraph ist in Abbildung 2.22 zu sehen.

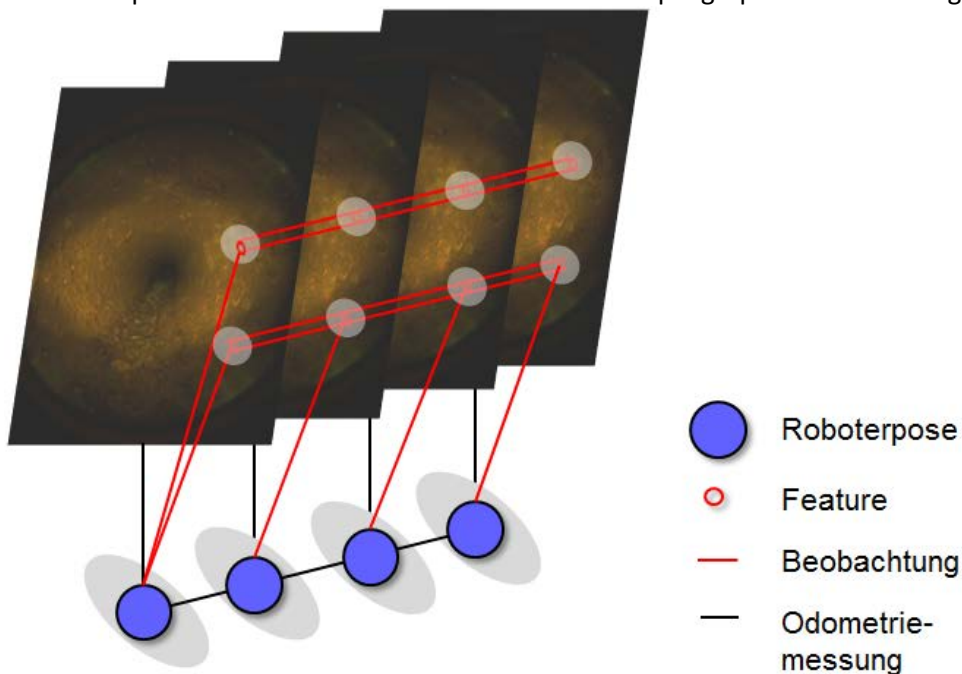


Abbildung 2.22: Beispiel für einen Featuregraphen. Dargestellt sind die Roboterposen (blau), die Odometriemessungen (schwarze Kanten zwischen Roboterposen), die Featureknoten (rote Ellipsen), sowie die Beobachtungen (rote Kanten). Die vorhandenen Ungenauigkeiten bei der Abschätzung der entsprechenden Positionen sind als graue Ellipsen angedeutet.

Schritt 7: Bündelausgleich

Durch das Bündelausgleichsverfahren werden die Positionen der Roboterposen und der 3D-Featurepunkte, für welche bisher nur Schätzungen, basierend auf den fehlerbehafteten Odometrie-messungen, existieren, optimiert. Dies geschieht auf Basis des Schätzfehlers zwischen einerseits den Positionen der analytisch berechneten Projektion der Featurepunkte im 3D-Raum auf die geschätzten Projektionsebenen der Kameras und andererseits der durch den Featuredetektor ermittelten tatsächlichen Positionen der Featurepunkte im aufgenommenen Bild. Ziel ist es dabei, diesen Schätzfehler, genannt Reprojektionsfehler, zu minimieren:

$$\min_{a_j, b_i} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij} d(Q(a_j, b_i), x_{ij})^2$$

Wobei a_j die 3D-Position und Parameter von Kamera j , b_i die 3D-Position von Feature i und x_{ij} die detektierte Position von Feature i im Kamerabild j darstellt. Weiterhin gibt $Q(a_j, b_i)$ die erwartete Position von Feature i auf Bild j und d eine Distanzfunktion an. m ist die Anzahl der Kameras/Kameraaufnahmen, n die Anzahl der Features und v_{ij} stellt eine binäre Variable dar, welche anzeigt, ob Feature i in Bild j sichtbar ist/detektiert worden ist oder nicht.

Dieses Optimierungsproblem lässt sich schließlich mit entsprechenden Gradientenabstiegsverfahren wie z.B. Levenberg-Marquardt minimieren. Bildlich vorstellen könnte man sich dieses Vorgehen als eine Art „zurechtrücken“ der Kameraposen und Featurepunkte im 3D-Raum, sodass die Beobachtungen im Bild möglichst gut mit den berechneten Projektionen bei der entsprechenden Anordnung übereinstimmen.

Durch die so berechneten 3D-Posen des Roboters lässt sich dessen während der Inspektion zurückgelegte Strecke rekonstruieren.

Teilaufgabe 2:

„Entwicklung eines Klassifikators (z.B. auf Basis einer Support-Vektor-Maschine), der mit Hilfe einer Vielzahl von Merkmalen im Bild (Farbe, Textur, Bildgradienten, etc.) Hindernisse, die sich aufgrund dieser Merkmale vom befahrbaren Rohr unterscheiden, sowie Schweißnähte erkennen kann.“

Aufgrund der extrem monotonen Rohrumgebung auf der einen Seite und einer sehr hohen Anzahl an kleineren Unebenheiten, verursacht durch Inkrustationen auf der anderen Seite haben Tests am FG NIKR ergeben (siehe Arbeitspaket 7, Teilaufgabe 4), dass sowohl ein Bündelausgleichsverfahren als auch ein Farb-/Texturbasiertes Verfahren allein die Aufgabe der Hinderniserkennung in Trinkwasserleitungen nicht in einem zufriedenstellenden Maße erfüllen. Die Probleme sind:

- Bündelausgleichsverfahren:
 - Das Bündelausgleichsverfahren wird aus Gründen der Laufzeitoptimierung nur etwa alle 10 Frame durchgeführt, da sonst ein Echtzeitbetrieb nicht möglich wäre. Dazwischen sind die Schätzungen der Featurepunkte nur relativ ungenau und es ist dementsprechend schwierig, Featurepunkte eines kleineren Hindernisses von einfach nur ungenauen Schätzungen von Features der Rohroberfläche zu unterscheiden.
 - Es kann nicht sichergestellt werden, dass, vor allem bei kleineren Hindernissen, ausreichend Featurepunkte auf dem Hindernis detektiert werden, sodass diese zuverlässig von Ausreißern unterschieden werden können
- Farb-/Texturbasierte Verfahren:
 - Inkrustationen und Verfärbungen im Rohr lassen sich nur sehr schwer nur aufgrund ihrer Farb- bzw. Textur-Werte von Hindernissen unterscheiden, sodass sehr oft Hindernisse in einem eigentlich leeren Rohr detektiert werden.

Als Ergebnis der Tests des Farb-/Texturbasierten Verfahrens wurde deutlich, dass für eine zuverlässige Erkennung von Hindernissen 3D-Informationen notwendig sind. Eine Möglichkeit hierfür bietet die

Tatsache, dass Hindernisse Schatten werfen, welche sich, wenn man die Szene aus unterschiedlichen Richtungen beleuchtet (z.B. nur bei Verwendung der LED's auf der linken bzw. rechten Roboterseite), relativ einfach detektieren lassen. Dieses Verfahren, welches im Folgenden noch genauer erläutert wird, wird zukünftig „Schattenbasierte Hinderniserkennung“ genannt.

Dieses ist allerdings nur anwendbar, wenn der Roboter stehen bleibt (!) und sich während des Blitzens der Szene aus unterschiedlichen Richtungen nicht bewegt, da sich ansonsten die Szene in den verschiedenen Bildern verändert.

Aufgrund dieser Erkenntnisse hat sich das FG NIKR dazu entschieden, ein zweistufiges Verfahren zu verwenden, welches in erster Stufe ein Farb-/Texturbasiertes Verfahren verwendet. Erkennt dieses ein Hindernis, stoppt der Roboter und führt die Schattenbasierte Hinderniserkennung durch, welche entweder das Hindernis bestätigt, womit der Roboter zur Umkehr gezwungen ist, oder das Rohr als frei erkennt, somit das vermeintlich vom Farb-/Texturbasierten Verfahren als Hindernis deklarierte Region zukünftig als Fehldetektion markiert und die Fahrt fortsetzt. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 2.23 noch einmal schematisch dargestellt.

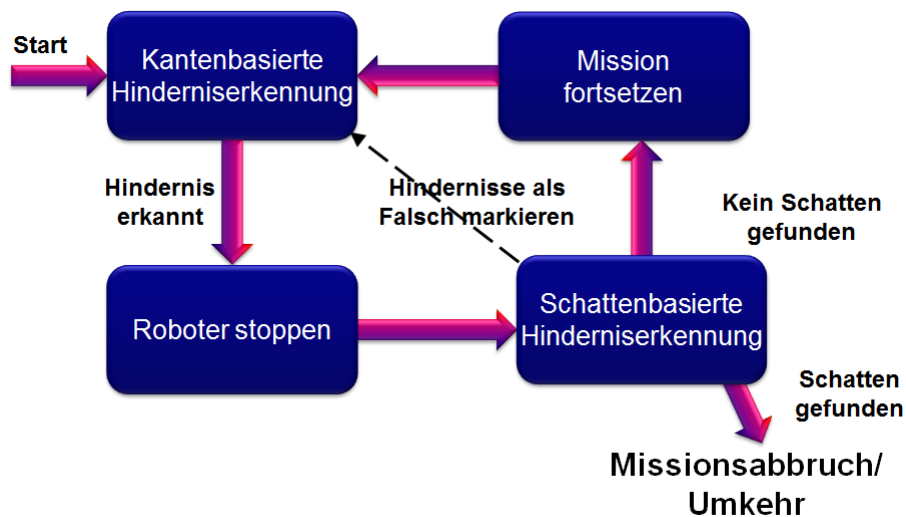


Abbildung 2.23: Vorgehen bei der Hinderniserkennung.

Die Farb-Texturbasierte und die Schatten basierte Hinderniserkennung werden im Folgenden noch einmal im Detail vorgestellt.

Farb-/Texturbasierte Hinderniserkennung

Die Grundidee der Farb-/Texturbasierten Hinderniserkennung ist, die Kanten, welche die Hindernisse vom Rohruntergrund abgrenzen, zu extrahieren und so auf das Vorhandensein des Hindernisses zu schließen. Die Kanten entstehen dabei durch eine unterschiedliche Farbe und/oder Textur des Hindernisses im Vergleich zum Rohruntergrund, aber auch durch die Kanten eventuell vorhandenen Schattenwurfes durch das Hindernis. Der Grundlegende Ablauf hierfür ist in Abbildung 2.24. dargestellt. Die Einzelschritte werden im Folgenden noch einmal detailliert erläutert.

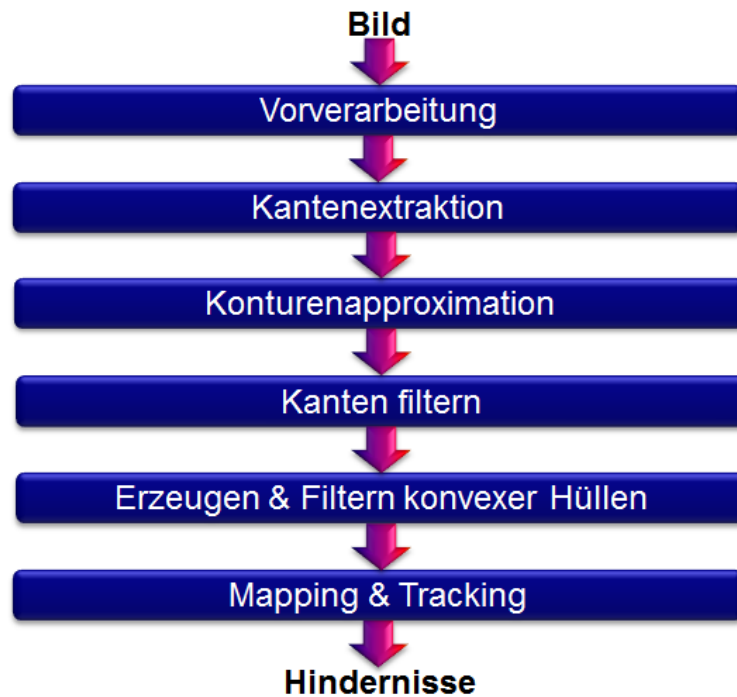


Abbildung 2.24: Grundlegender Ablauf bei der Farb-/Texturbasierten Hinderniserkennung.

Schritt 1: Vorverarbeitung

Bei der Vorverarbeitung wird für eine schnellere Verarbeitung die Auflösung des Bildes verringert und dieses in ein Grauwertbild umgewandelt.

Schritt 2: Kantenextraktion:

Im zweiten Schritt werden mögliche Kanten im Bild durch den Canny-Kantendetektor [Canny] extrahiert, welcher auf Basis lokaler Grauwertgradienten (Sobel-Operator) und einer entsprechenden Nachbearbeitung arbeitet. Durch eine anschließende morphologische Anreicherung werden eventuell nach der Canny-Detektion noch vorhandene Lücken in den Kanten geschlossen. Ein Beispiel für ein Bild nach einer solchen Kantenextraktion ist in Abbildung 2.25. zu sehen.

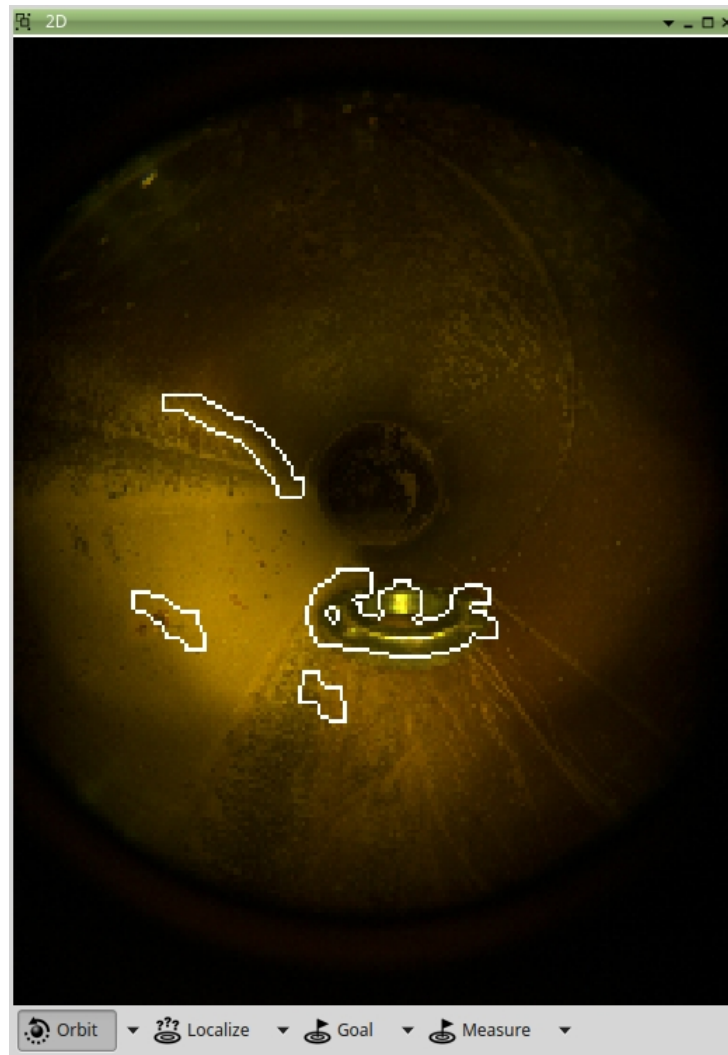


Abbildung 2.25: Beispiel für ein Bild nach der Kantenextraktion. Für eine bessere Veranschaulichung wurden die extrahierten Kanten (weiß) vom Grauwertbild in das Originalbild rückprojiziert.

Schritt 3: Konturenapproximation:

Zur besseren Weiterverarbeitung der Kanten wird ein Algorithmus zur Kurvenglättung, der Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus verwendet [Ramer], welcher die zwei äußersten Punkte der Kurve nimmt (p_0 und p_n), von allen Punkten zwischen diesen beiden Punkten auf der Kurve denjenigen Punkt p_i auswählt, dessen Abstand zur Gerade zwischen p_0 und p_n maximal wird, und den Algorithmus anschließend rekursiv mit jeweils den Paaren (p_0, p_i) und (p_i, p_n) solange ausführt, bis ein vorher definiertes Abbruchkriterium eintritt.

Das Ergebnis dieser Kurvenglättung ist für ein Beispielbild in Abbildung 2.26 abgebildet.

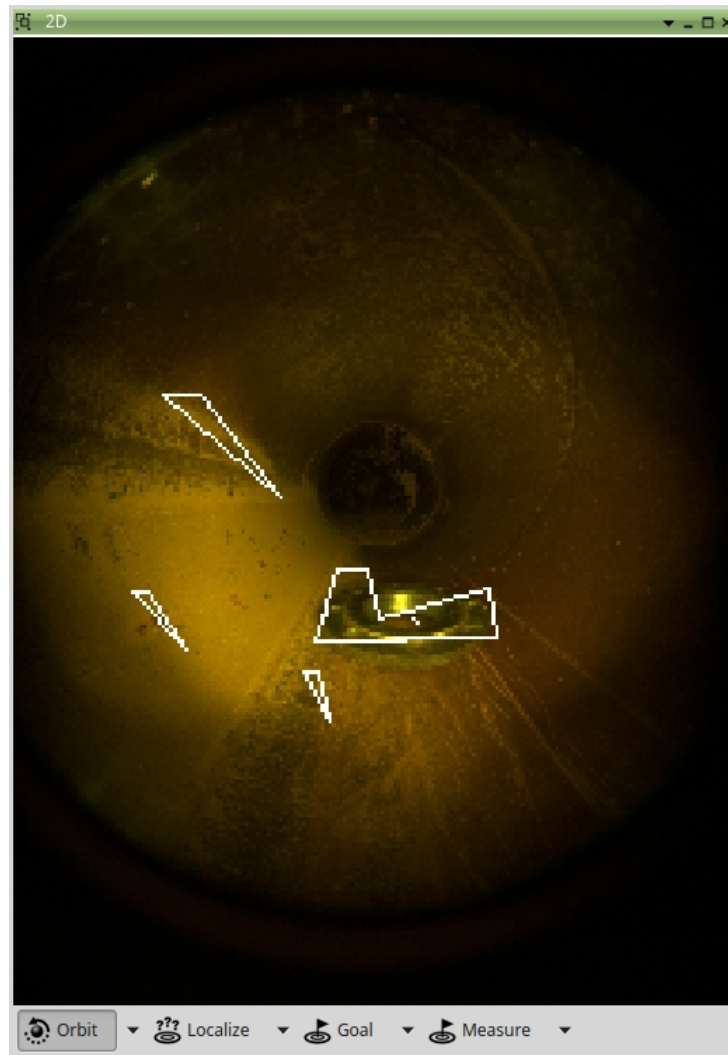


Abbildung 2.26: Beispiel für ein Bild nach der Kurvenglättung. Für eine bessere Veranschaulichung wurden die geglätteten Kurven (weiß) vom Grauwertbild in das Originalbild rückprojiziert.

Schritt 4: Kantenfilterung

Um möglichst viele irrelevante Kanten auszuschließen, werden im vierten Schritt gefundene Strukturen aussortiert, deren Summe positiver und negativer Kantenauslenkungen nicht mindestens 90° beträgt. Es werden also zu flache Objekte ignoriert.

Schritt 5: Erzeugung und Filterung konvexer Hüllen:

Für eine weitere Filterung wird die konvexe Hülle um das Objekt gebildet, dessen Fläche berechnet und Objekte aussortiert, deren Fläche (bzw. die Fläche ihrer konvexen Hülle) ein Mindestmaß nicht überschreitet. Die Schwelle wurde dabei so angepasst, dass ein kreisförmiges Objekt, welches vom Roboter nur noch knapp überfahren werden könnte (ca. 5cm Durchmesser) ca. 10 - 20cm vor dem Roboter als Hindernis erkannt wird, was die optimale Entfernung für die Schattenbasierte Hinderniserkennung ist.

In Abbildung 2.27 ist das Ergebnis dieses Schrittes, die konvexe Hülle um das Hindernis des Beispiels zu sehen.

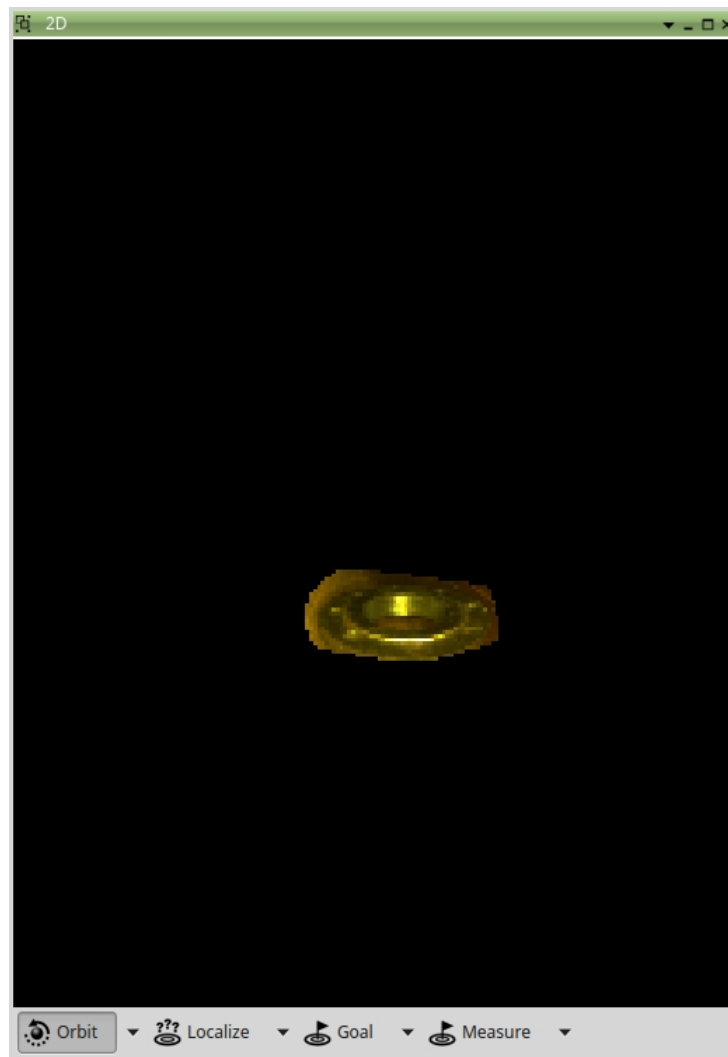


Abbildung 2.27: Extrahierte konvexe Hülle um das Hindernis.

Schritt 6: Mapping und Tracking der Hindernisse

Um die Zahl der Fehldetektionen im Sinne von erkannten Hindernissen in einem eigentlich leeren Rohr zu verringern, stoppt der Roboter erst dann, wenn ein Objekt robust in 3 aufeinanderfolgenden Frames als Hindernis klassifiziert wurde. Hierfür werden alle als Hindernis klassifizierten Objekte gespeichert und auf Basis ihrer Position im Bild und ihrer Abmessungen und Fläche in den folgenden Frames verfolgt.

Schattenbasierte Hinderniserkennung

Die Schattenbasierte Hinderniserkennung setzt dann ein, wenn die Farb-/Texturbasierte Hinderniserkennung eine Region im Bild als Hindernis klassifiziert hat. Da diese teilweise auch Strukturen an Rohrwänden und Inkrustationen fälschlicherweise als Hindernis einstuft, wird die schattenbasierte Hinderniserkennung verwendet, um das vermeintliche Hindernis zu verifizieren.

Die Idee hierbei ist, das Hindernis aus verschiedenen Richtungen zu beleuchten und dabei auftretende Hindernisschatten zu detektieren.

Der Grundlegende Ablauf der Schattenbasierten Hinderniserkennung ist in Abbildung 2.28 dargestellt.



Abbildung 2.28: Grundlegender Ablauf der Schattenbasierten Hinderniserkennung.

Schritt 0: Aufnahme der Blitzsequenzen

Vor dem eigentlichen Verfahren der Hinderniserkennung ist es notwendig, spezielle Blitzsequenzen aufzunehmen, in denen die Hindernisschatten erkannt werden können. Dabei muss der Roboter während der Aufnahme der Sequenzen still stehen, damit sich die Szene währenddessen nicht verändert und die Einzelbilder zuverlässig auf Schattenwurf verglichen werden können.

Damit außerdem das Verfahren möglichst robust gegenüber der Position und den Abmessungen des Hindernisses ist, werden die Aufnahmen mit Beleuchtungen aus möglichst vielen verschiedenen Richtungen durchgeführt. Im Speziellen sind dies Beleuchtungen ausschließlich mit jeweils der linken, der rechten, der oberen und der unteren LED-Reihe des Rodiar-Roboters.

In Abbildung 2.29 sind Beispielaufnahmen zweier solcher Sequenzen mit einer Beleuchtung jeweils von links und rechts abgebildet.

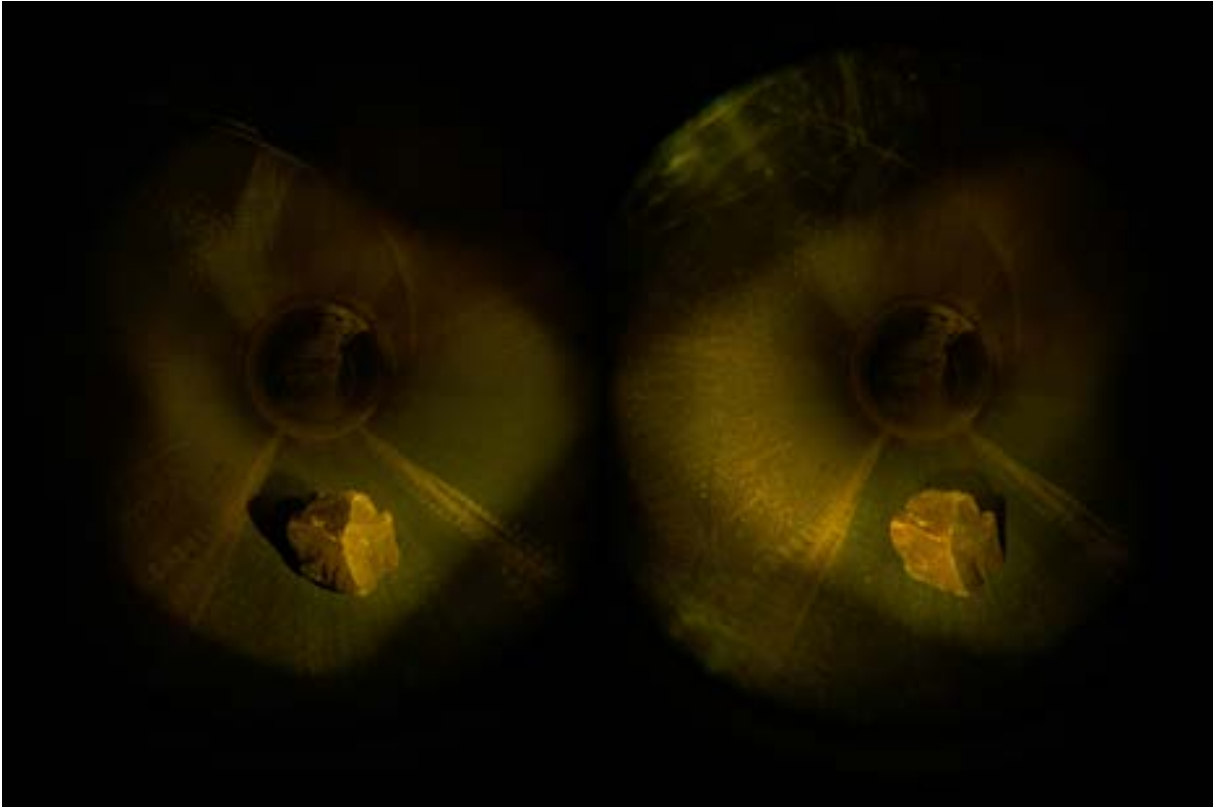


Abbildung 2.29: Zwei Aufnahmen aus einer Blitzsequenz mit einer Beleuchtung jeweils von rechts (linkes Bild) und links (rechtes Bild). Gut zu sehen sind hier die Schatten des Hindernisses im linken Bild.

Schritt 1: Vorverarbeitung

Bei der Vorverarbeitung wird für eine schnellere Verarbeitung die Auflösung der Bilder verringert und in Grauwertbilder umgewandelt.

Schritt 2: Schätzung des Beleuchtungsbereiches:

Da bei der Aufnahme der Blitzsequenzen nur noch Teile des Bildes ausgeleuchtet sind und sich dieser Bereich abhängig von der aktuellen Szene ist (gerades Rohr, Kurve, Fahren nah an der Rohrwand, etc.) muss der beleuchtete Bereich für jedes Bild abgeschätzt werden.

Diese geschieht durch ein einfaches Thresholding, wobei alle Pixel, deren Helligkeit einen bestimmten Schwellwert überschreiten als beleuchtet betrachtet werden. Anschließend wird eine Nachbearbeitung durch morphologisches Closing und durch Erodieren durchgeführt, um kleinere Fehler beim Thresholding zu eliminieren und die Schnittmenge der Beleuchtungsmasken der im nächsten Schritt zu vergleichenden Aufnahmen (paarweise Beleuchtung links – rechts und Beleuchtung oben – unten) gebildet, um die überlappenden Beleuchtungsbereiche zu erhalten.

In Abbildung 2.30 ist ein Beispiel für eine solche Beleuchtungsmaske zu sehen.



Abbildung 2.30: Beispiel für eine extrahierte Beleuchtungsmaske. Der beleuchtete Bereich ist weiß, der unbeleuchtete schwarz dargestellt.

Schritt 3: Beleuchtungsausgleich

Um den Einfluss lokaler Beleuchtungsunterschiede auszugleichen, wird ein Retinexfilter auf die Bilder angewendet, welcher einen lokalen Helligkeitsausgleich durchführt. Abbildung 2.31 zeigt die Beispielbilder nach der Anwendung des Retinexfilters.



Abbildung 2.31: Beispiel für Aufnahmen nach der Anwendung des Retinexfilters. Sehr gut zu sehen ist der Schatten des Hindernisses im linken Bild.

Schritt 4: Erstellen des Differenzbildes

Um den Schatten zuverlässig zu detektieren und von eventuellen dunkleren Stellen im Rohr unterscheiden zu können, werden die komplementären Aufnahmen der Blitzsequenz voneinander abgezogen und so das Differenzbild erstellt (jeweils bei den Paaren mit Beleuchtung von links – rechts und von oben – unten).

Abbildung 3.32 zeigt das Differenzbild der Beispielbilder aus Abbildung 3.31.

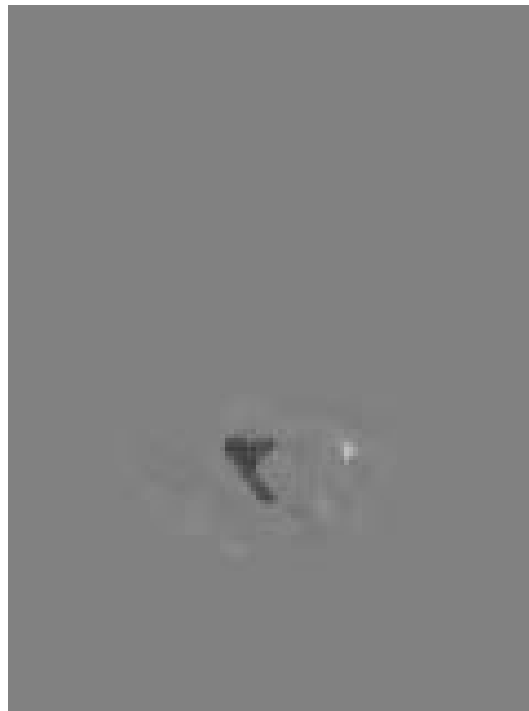


Abbildung 2.32: Beispiel für ein Differenzbild. Grau steht dabei für eine Differenz von 0.

Schritt 5: Thresholding

Im letzten Schritt wird ein Thresholding durchgeführt, um die Schatten im Bild zu detektieren. Bei einem Wert eines Pixels des Differenzbildes, welcher einen Betrag besitzt, welcher größer als ein vorher definierter Schwellwert ist, wird dieser Pixel als einem Schatten zugehörig klassifiziert. Ist eine größere Region als Schatten detektiert worden, ist dieser Schatten einem Hindernis zugehörig anzusehen und der Roboter muss, nach der Detektion eines Hindernisses bei sowohl der Farb-/Texturbasierten, als auch der Schattenbasierten Hinderniserkennung, von einem nicht passierbaren Rohr ausgehen und dementsprechend umkehren und zum Ausgangspunkt zurückfahren.

Teilaufgabe 3:

„Erweiterung der bestehenden Verfahren zur Bewegungssteuerung und Anpassungen an die Einsatzumgebung. Entwicklung von Strategien zur Missionsplanung, d.h. Strategien zum Homing, zum Befreien aus Hindernis-Situationen, etc.“

Implementiert wurden zwei mögliche Missionsarten:

1. Das Fahren einer vorgegebenen Einfahrttiefe und Ausstieg über den nächstgelegenen Ausstiegspunkt
2. Das Fahren einer vorgegebenen Einfahrttiefe mit anschließender Umkehr und Rückfahrt zum Einstiegspunkt.

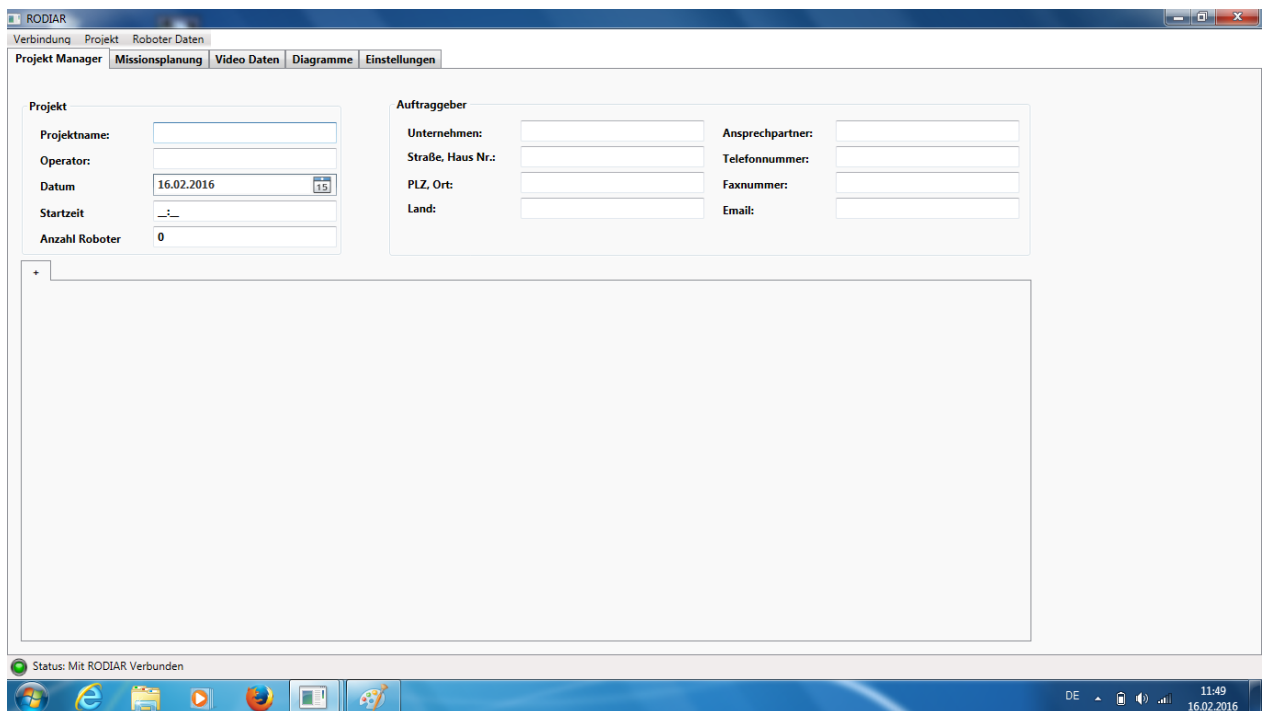
Teilaufgabe 4:

„Entwicklung einer Applikation zum Anzeigen und Auswerten des aufgezeichneten Datenmaterials.“

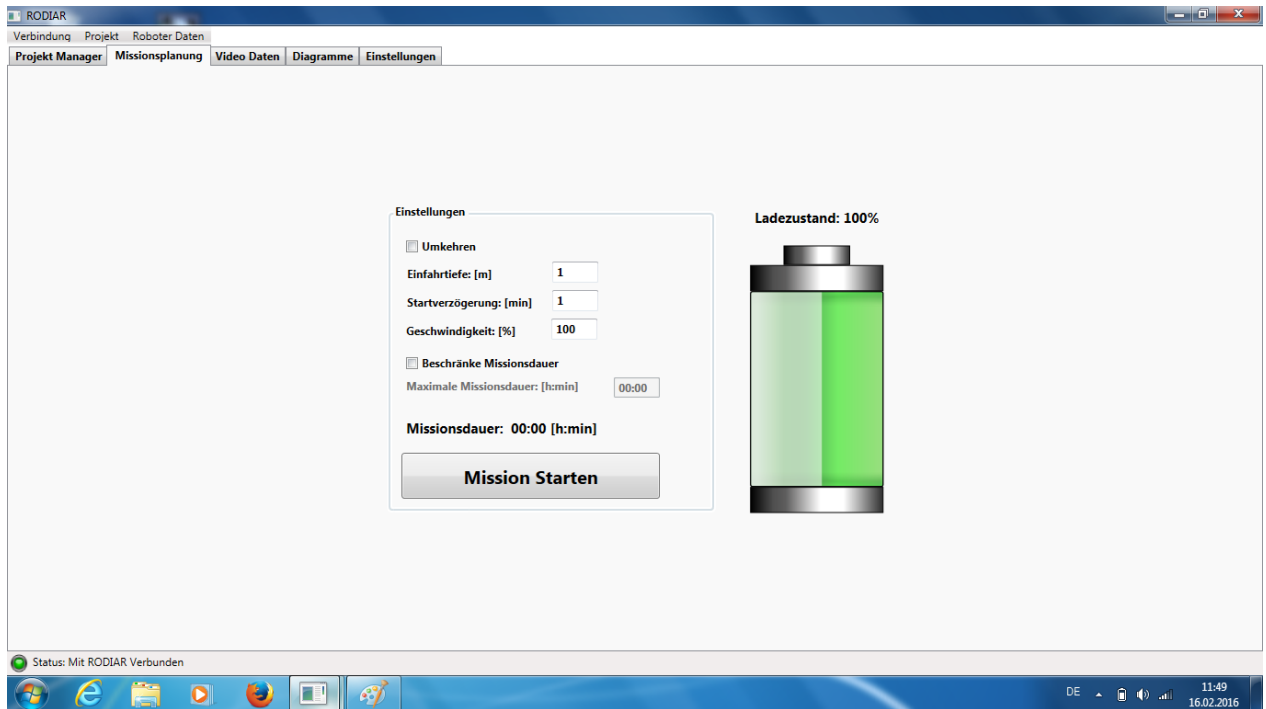
Zur Missionsplanung und zur Auswertung des Datenmaterials wurde eine grafische Benutzeroberfläche für einen externen PC entwickelt, welcher mit dem Rodiar-Roboter vor und nach der Mission über eine einfache Plug&Play LAN-Verbindung verbunden ist.

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden mehrere verschiedene Aspekte in die Benutzeroberfläche eingearbeitet:

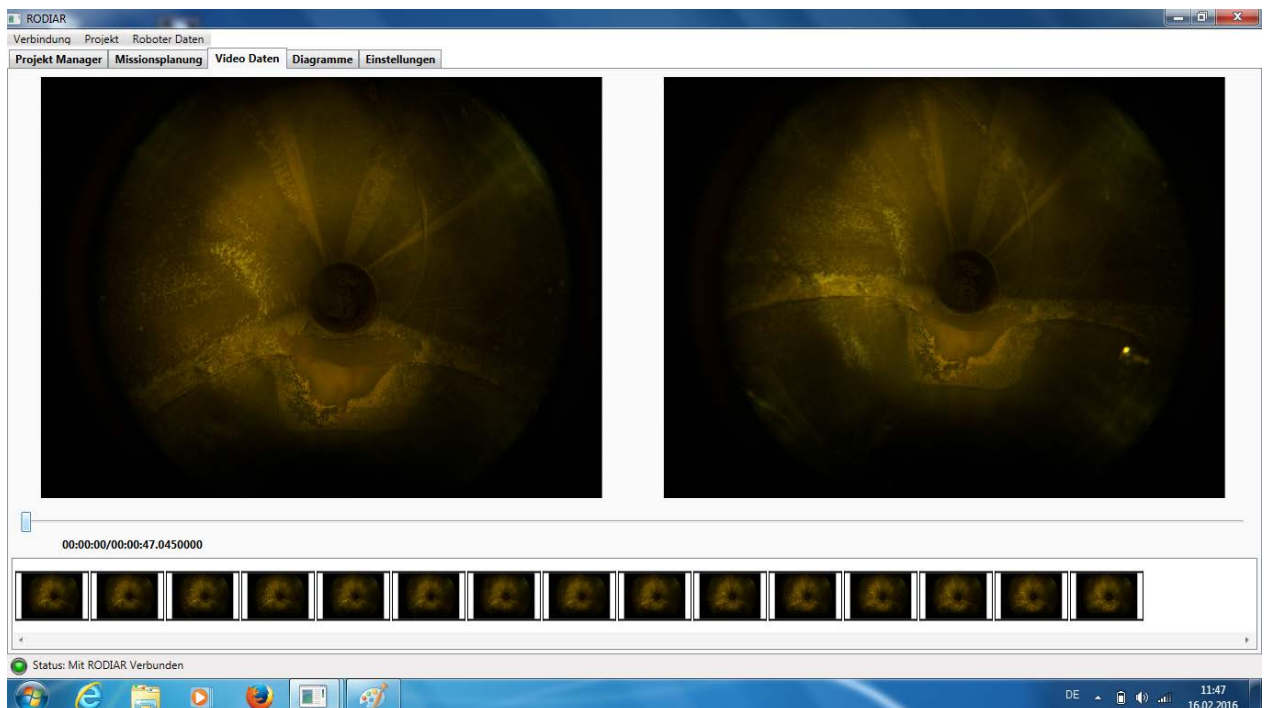
1. *Projektmanager*: Der Projektmanager dient zum Erstellen und Verwalten von Projektbezogenen Daten wie Projektname, Adresse, Datum, Kontaktdaten usw. und bietet weiterhin Möglichkeiten zum Speichern/Laden, PDF-Export und Drucken.



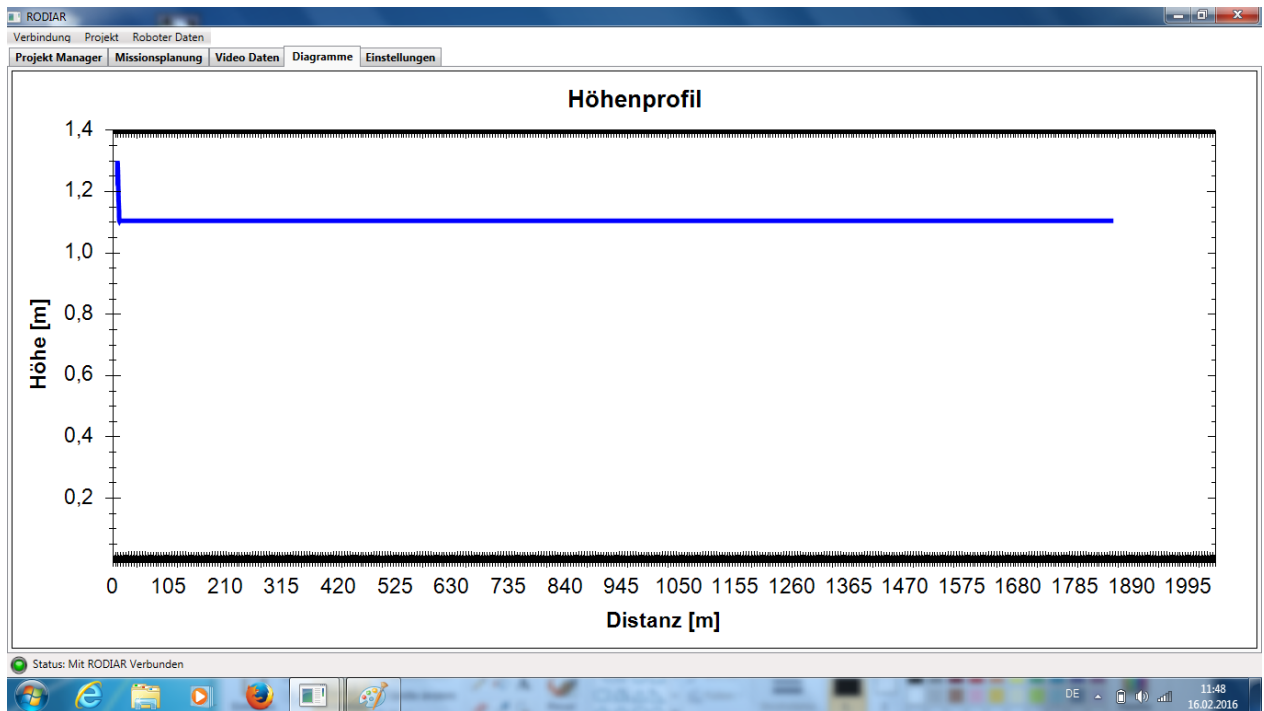
2. *Missionsplanung*: Dient zum Planen der Mission und die Wahl der Missionsparameter wie Einfahrttiefe, Missionsart und die Startverzögerung, zeigt den Akkuladestand und startet die Mission.



3. *Bildwiedergabe*: Dient sowohl als Vorschau auf die gespeicherten Bilddaten auf dem Rodiar-Roboter, als auch zum Überspielen der gespeicherten Daten vom Roboter auf den externen PC.



4. *Höhenprofil*: Zeigt das während der Inspektionsfahrt erstellte Höhenprofil der gefahrenen Strecke.



5. *Admin-Konfiguration*: Ist ein Bereich der GUI, welcher zur Konfiguration einiger ausgesuchter Parameter, wie Blitzvorlaufzeit, Blitzlänge und Framerate genutzt wird. Da diese Parameter kritisch sind und eine Veränderung durch unkundiges Personal sowohl nicht bzw. selten notwendig, als auch kritisch in Hinsicht auf die Funktionalität der Plattform ist, ist dieser Bereich passwortgeschützt.

Arbeitspaket 7:

Teilaufgabe 3:

„Experimentelle Untersuchung der Hinderniserkennung, der autonomen Navigation und der Datenauswertung.“

Aufgrund des Vorhandenseins eines Testrohres, welches von der TFW zur Verfügung gestellt wurde, sind die Tests der Verfahren vom FG NIKR von Anfang an in diesem Testrohr durchgeführt worden (siehe Arbeitspaket 7, Teilaufgabe 4). Jedoch fand eine umfangreiche Untersuchung der für das Bündelausgleichsverfahren möglichen Featureextraktoren und –deskriptoren statt.

Getestet wurden hierbei die Featureextraktoren SIFT [Lowe], SURF [Bay et. al], FAST [Rosten und Drummond], BRISK [Leutenegger et. al] und ORB [Rublee et. al] und die Featuredeskriptoren SIFT [Lowe], SURF [Bay et. al], FREAK [Alahi et. al], BRISK [Leutenegger et. al] und ORB [Rublee et. al]. Für die Tests der reinen Deskriptoren und Extraktoren fand das Matching mit einer Brute-Force-Methode statt, es wurden also alle Deskriptoren des linken Bildes mit denen des rechten Bildes verglichen, ohne den Suchbereich durch Constraints einzuschränken.

Untersucht wurden:

- Die Zeit, welche für eine Featureextraktion in einem Stereobild mit einer Auflösung von 2x2560x1920 Pixeln benötigt wurde
- Die Anzahl der gefundenen Matchings jeweils vor und nach einem Cleaning, bei welchem Matchings bereinigt wurden, bei denen mehrere Matches auf den gleichen Featurepunkt verweisen und bei welchen Matchings mit einer besonders schlechten Güte aussortiert wurden.

- Die Güte der Matchings. Aufgrund der an dieser Stelle nicht möglichen automatisierten Auswertung konnte hier nur eine kleine Stichprobe von jeweils 10 Matches genommen werden, welche manuell in Augenschein genommen und auf ihre Korrektheit überprüft wurden.

Detektor/Deskriptor	Zeit Featureextraktion	Gefundene Matchings vor/nach Cleaning	Stichprobe korr. Matchings
SURF/SIFT	245-820ms	900/140	8/10
SURF/SURF	260-500ms	1650/60	5/10
SIFT/SIFT	800-950ms	320/16	9/10
FAST/SIFT	100-450ms	9900/100	3/10
BRISK/SIFT	50-510ms	2550/150	5/10
ORB/SIFT	25-490ms	740/62	3/10
FAST/FREAK	25-76ms	9980/1	0/1
BRISK/BRISK	87-132ms	2550/75	7/10
ORB/ORB	121-157ms	1290/55	7/10

Tabelle 2.1: Vergleich der getesteten Featureextraktoren und -deskriptoren. Rot markiert sind Ergebnisse aufgrund derer die getesteten Extraktoren/Deskriptoren aussortiert wurden.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Es zeigte sich, dass die SIFT- und SURF Extraktoren und Deskriptoren zwar, zumindest bei der Verwendung des SIFT-Deskriptors, sehr gute Matchingergebnisse erbrachten, für einen Echtzeiteinsatz jedoch beide eine zu hohe Laufzeit von teilweise bis zu einer Sekunde besitzen. Auch finden SIFT-Extraktoren deutlich weniger Features als die anderen getesteten Featureextraktoren.

Die Verwendung ausschließlich der SIFT-Deskriptoren in Verbindung mit binären Featureextraktoren wie FAST, ORB und BRISK erbrachte nur eine ungenügende Steigerung der Laufzeit bei gleichzeitiger

starker Senkung der Matchingqualität, was sich dadurch erklären lässt, dass die beiden Gruppen von Verfahren grundsätzlich verschiedene Ansätze verfolgen (Erkennung von Blobs bei SIFT/SURF und Erkennung von Kanten/Ecken bei BRISK, FAST und ORB).

Die Verwendung des FAST-Extraktors in Verbindung mit dem FREAK-Deskriptor hat sich in dieser Kombination zwar als sehr Laufzeitperformant, allerdings leider von der Matchinggüte her als völlig unbrauchbar erwiesen, was vermutlich an der Einfachheit der Verfahren in Kombination mit der sehr schwierigen Umgebung liegt.

Sowohl ORB als auch BRISK haben sich für eine Verwendung im Trinkwasserrohr als brauchbarer Kompromiss von schneller Laufzeit und vergleichsweise relativ guter Matchingqualität erwiesen. Letztere liegt zwar mit gut 70% weiterhin unter den Anforderungen an einen Realweltansatz, was aber durch die Verwendung von entsprechenden Constraints beim Matching und einer Outlierdetection (siehe Beschreibung zu Arbeitspaket 6, Teilaufgabe 1) kompensiert wird.

Aufgrund der leicht schnelleren Laufzeit und der etwas höheren Anzahl an gefundenen Matches im Vergleich zu ORB, hat sich das FG NIKR schließlich für die Verwendung des BRISK-Featureextraktor und BRISK-Featuredeskriptor entschieden.

Teilaufgabe 4:

„Experimentelle Untersuchung der Hinderniserkennung, der autonomen Navigation und der Datenauswertung unter realen Einsatzbedingungen.“

Testumgebungen

In Zusammenarbeit mit der Thüringer Fernwasserversorgung wurden zwei Testparcours zur möglichst realitätsnahen Untersuchung des Rodiar-Roboters in originalen Fernwasserleitungen aufgebaut. Der erste „Testrohr Ilmenau“ besteht aus einem 6m langen gerade Rohrstück mit 500mm Durchmesser und ist in Abbildung 2.33 zu sehen.



Abbildung 2.33: „Testrohr Ilmenau“ bei der Anlieferung.

Die Zweite Testumgebung, „Testrohr Luisenthal“ ist eine etwa 14m lange geschlossene Testrunde mit ebenfalls 500mm Durchmesser, welche mehrere Kurven und T-Stücke enthält (siehe Abbildung 2.34).



Abbildung 2.34: „Testrohr Luisenthal“

Aufgrund der relativ großen Unterschiede der beiden Rohre in Hinblick auf Beschaffenheit, Inkrustationen, Verfärbungen und Homogenität werden die beiden Teststrecken im Folgenden bei der Auswertung getrennt betrachtet.

Generelle Tests

Fahrten für Tests von Sensorik, Lagekorrektur, Datenaufnahme, Missionsplanung mit Hilfe der GUI und die verschiedenen Missionsarten wurden durchgeführt, welche jeweils zuverlässig funktionierten. Jedoch ergaben sich einige Probleme aufgrund der Gewichtsverteilung und der Abmessungen des Roboters, was zu einem Steckenbleiben des Roboters in folgenden Fällen führte:

- Kurvenfahrten in Rohren mit 400mm Durchmesser (Ursache: Abmessung des Roboters)
- Übergänge von Rohren mit 500mm zu 400mm Durchmesser (Ursache: Abmessung des Roboters)
- Generell Rückwärtsfahrten in Kurven (Ursache: Gewichtsverteilung des Roboters, Art der Lageregelung (s. Partner Optimess))
- Gelegentlich bei Rückwärtsfahrten auch auf geraden Strecken (Ursache: Gewichtsverteilung des Roboters, Art der Lageregelung (s. Partner Optimess))

Test Farb-/Texturbasierte Hinderniserkennung

Für die Farb-/Texturbasierte Hinderniserkennung wurden im „Testrohr Ilmenau“ 20 Fahrten mit insgesamt 1849 Bildern und im „Testrohr Luisenthal“ 63 Fahrten mit insgesamt 3477 Bildern, sowohl

mit Hindernissen als auch in einem leeren Rohr durchgeführt. Mögliche Hindernisse waren hierbei verschiedene Arten von Steinen mit 6-22cm Durchmesser, Holzkeile, Werkzeug und Kohlestücke. Bei der Farb-/Texturbasierten Hinderniserkennung ist die sichere Erkennung von vorhandenen Hindernissen besonders wichtig um Beschädigungen und/oder ein Steckenbleiben des Roboters zu vermeiden. Eventuelles Detektieren eines Hindernisses in einem eigentlich leeren Rohr dagegen kann durch die Validierung durch das Schattenbasierte Hinderniserkennungsverfahren aufgehoben werden und kostet somit zwar ein wenig Zeit, hat jedoch prinzipiell keine weitreichenderen Auswirkungen auf die Inspektionsfahrt.

Die Ergebnisse des Verfahrens im Rohr bei einem vorhandenen Hindernis sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

	Hindernis erkannt	Hindernis nicht erkannt
Ilmenau	96%	4%
Luisenthal	90%	10%

Tabelle 2.2: Ergebnisse Farb-/Texturbasiertes Verfahren bei vorhandenem Hindernis.

Hier zeigt sich, dass das Verfahren im „Testrohr Ilmenau“ 96% der Hindernisse korrekt als solche erkennt, wohingegen die Performanz im „Testrohr Luisenthal“ noch einmal deutlich auf etwa 90% abfällt.

	Leeres Rohr als leer erkannt	Leeres Rohr als Hindernis
Ilmenau	79,6%	20,4%
Luisenthal	59,3%	40,7%

Tabelle 2.3: Ergebnisse Farb-/Texturbasiertes Verfahren im leeren Rohr.

Die Ergebnisse für ein leeres Rohr sind in Tabelle 2.3 zu finden. Hier wurden im „Testrohr Ilmenau“ 20,4% und im „Testrohr Luisenthal“ 40,7% der Einzelbilder im eigentlich leeren Rohr fälschlicherweise als Hindernis erkannt. Da diese Ergebnisse allerdings nicht den Gegebenheiten bei einer tatsächlichen Inspektionsfahrt entsprechen, da bei einer solchen auch die Historie mit einfließt, indem erst dann gestoppt wird, wenn in 3 aufeinanderfolgenden Bildern ein Hindernis detektiert wurde und vermeintliche Hindernisse, welche durch die Schattenbasierte Hinderniserkennung als Falsch-Positive markiert wurde ignoriert werden, wurden noch weitere Tests durchgeführt, bei welchen der Roboter sowohl mit als auch ohne eingeschalteter Hinderniserkennung durch das „Testrohr Luisenthal“ fuhr und die Inspektionszeiten und die Zahl der Stopps ausgewertet wurden. Die Ergebnisse nach 10 Testfahrten waren:

- Länge der inspizierten Strecke: 12,6m
- Aufgenommene Bilder: 1121

- Fahrzeit ohne eingeschalteter Hinderniserkennung: 1:12min
- Mit eingeschalteter Hinderniserkennung:
 - Anzahl der Stopps: 21,6
 - Mittlere Zeit für Stopps: 5,7s
 - Mittlere Fahrtzeit: 3,11min

Statt bei 40% der Bilder und somit 448 Mal ($=0.4 \times 1121$) zu stoppen, was durch die oben gezeigte Tabelle suggeriert wird, waren es „lediglich“ im Schnitt 21,6 Stopps, was aber dennoch die Fahrtzeit fast verdreifachte.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Detektionsrate der Farb-/Texturbasierten Hinderniserkennung vor allem mit der Erkennung von nur 90% der Hindernisse im „Testrohr Luisenthal“ damit leider hinter den Erwartungen zurückblieb und einem Einsatz in der Praxis derzeit noch abzuraten ist. Unmittelbar nach Projektende wurden nach intensiven Diskussionsrunden alternative Möglichkeiten für eine stabilere Hinderniserkennung erörtert und ein neuer Ansatz mit Linienlasern verfolgt. Ergebnisse dazu werden in einer Ergänzung zum Schlussbericht veröffentlicht.

Test Schattenbasierte Hinderniserkennung

Für die Farb-/Texturbasierte Hinderniserkennung wurden im „Testrohr Ilmenau“ 44 Blitzsequenzen und im „Testrohr Luisenthal“ 59 Blitzsequenzen, sowohl mit Hindernissen als auch in einem leeren Rohr durchgeführt. Mögliche Hindernisse waren hierbei verschiedene Arten von Steinen mit 6-22cm Durchmesser, Holzkeile, Werkzeug und Kohlestücke.

Bei der Schattenbasierten Hinderniserkennung ist die sichere Erkennung sowohl von vorhandenen Hindernissen (Beschädigungen und/oder Steckenbleiben des Roboters) als auch die Erkennung eines leeren Rohres (Umkehren zum Ausgangspunkt trotz Passierbarkeit) wichtig. Die Ergebnisse des Verfahrens für ein leeres Rohr sind in Tabelle 2.4 zu finden.

	Leeres Rohr als leer erkannt	Leeres Rohr als Hindernis
Ilmenau	100%	0%
Luisenthal	100%	0%

Tabelle 2.4: Ergebnisse Schattenbasiertes Verfahren im leeren Rohr.

Hier zeigt sich, dass das Verfahren zu 100% in allen getesteten Verfahren das leere Rohr als solches erkannt hat.

Da die Performanz bei Erkennen eines Hindernisses des Schattenbasierten Verfahrens stark von der Entfernung des Hindernisses abhängig ist, wurde bei den Tests eine Einteilung der Hindernisse in verschiedene Entfernungskategorien durchgeführt. Die Kategorien sind:

- Nah: 10-20cm
- Mittel: 20-35cm
- Weit: 35+cm

Die Ergebnisse bei der Detektion von Hindernissen des Schattenbasierten Verfahrens sind in Tabelle 2.5 zusammengefasst.

TUI	Hindernis erkannt	Hindernis nicht erkannt
Nah	100%	0%
Mittel	71%	29%
Weit	16%	84%
Luisenthal	Hindernis erkannt	Hindernis nicht erkannt
Nah	100%	0%
Mittel	58,3%	41,7%
Weit	0%	100%

Tabelle 2.5: Ergebnisse Schattenbasiertes Verfahren in Rohr mit Hindernis.

Hierbei zeigt sich, dass das Schattenbasierte Verfahren zur Hindernisdetektion nahe Hindernisse in den getesteten Fällen zu 100% erkennt, die Performanz mit zunehmender Entfernung zum Hindernis jedoch schnell abfällt. Als Konsequenz dieser Tests wurde das Farb-/Texturbasierte Hinderniserkennungsverfahren dahingehend optimiert, dass es erst dann anhält, wenn sich das detektierte Hindernis in einer Region kurz vor dem Roboter befindet, also in einer Region, in welcher das Verfahren als sehr zuverlässig anzusehen ist.

Im Großen und Ganzen ist das Schattenbasierte Verfahren zur Hinderniserkennung damit als erfolgreich und praxistauglich anzusehen – mit dem Nachteil einer Verlangsamung der Inspektionsfahrt.

Test Visuelle Odometrie

Der Test der visuellen Odometrie wurde für das „Testrohr Ilmenau“ mit 10 Fahrten zu je etwa 3,5m Einfahrttiefe durchgeführt. Die ground truth wurde dabei manuell mit einem Maßband nachgemessen und mit der Radodometrie und der visuellen Odometrie verglichen. Die Ergebnisse dieser Testfahrten sind in Tabelle 2.6 dargestellt.

	Radodo- metrie	Visuelle Odometrie	Maßband
Mittelwert	355,56	325,59	343,20
Std.-Abw.	1,769	3,244	3,347
Fehler Mittelwert	12,35	-17,61	-
Fehler Std.-Abw.	1,617	1,972	-

Tabelle 2.6: Ergebnisse Visuelle Odometrie im „Testrohr Ilmenau“.

Dabei zeigte sich, dass die Ergebnisse der visuellen Odometrie nicht besser als die der Radodomtrie sind. Während letztere die tatsächlich gefahrene Distanz überschätzen, wird sie durch erstere unterschätzt, wobei der Betrag der Abweichung bei beiden jedoch in etwa vergleichbar ist.

Die Ursache für das relativ schlechte Abschneiden der visuellen Odometrie liegt vermutlich an der Verwendung von Fischaugenkameras, die vor allem in den Randgebieten, welche für die Featuredetektion und das Matching eine große Rolle spielen, eine große Verzerrung besitzen. Durch die Kamerakalibrierung lässt sich dies nur schwer zu korrigieren, hat aber einen unverhältnismäßig hohen Einfluss auf die Bündelausgleichsoptimierung. Mögliche Lösungsmöglichkeiten hierfür liegen in der Verwendung eines besseren Kameramodells für die Kamerakalibrierung oder der Verwendung eines den Fischaugenkameras näher verwandten Polarkoordinatensystems für die Optimierung.

Die Tests im „Testrohr Luisenthal“ ergaben noch eine weitere Schwäche des Verfahrens bei der Lokalisierung in Kurvenfahrten. Dem Verfahren gelingt es nicht, die Fahrt durch die Kurve nachzuvollziehen. In Abbildung 2.35 ist das Ergebnis der 3D-Rekonstruktion bei einer Kurvenfahrt zu sehen, bei welcher das Verfahren die Fahrt im virtuellen 3D-Raum durch die Rohrwand hindurch weiter geradeaus fortführt.

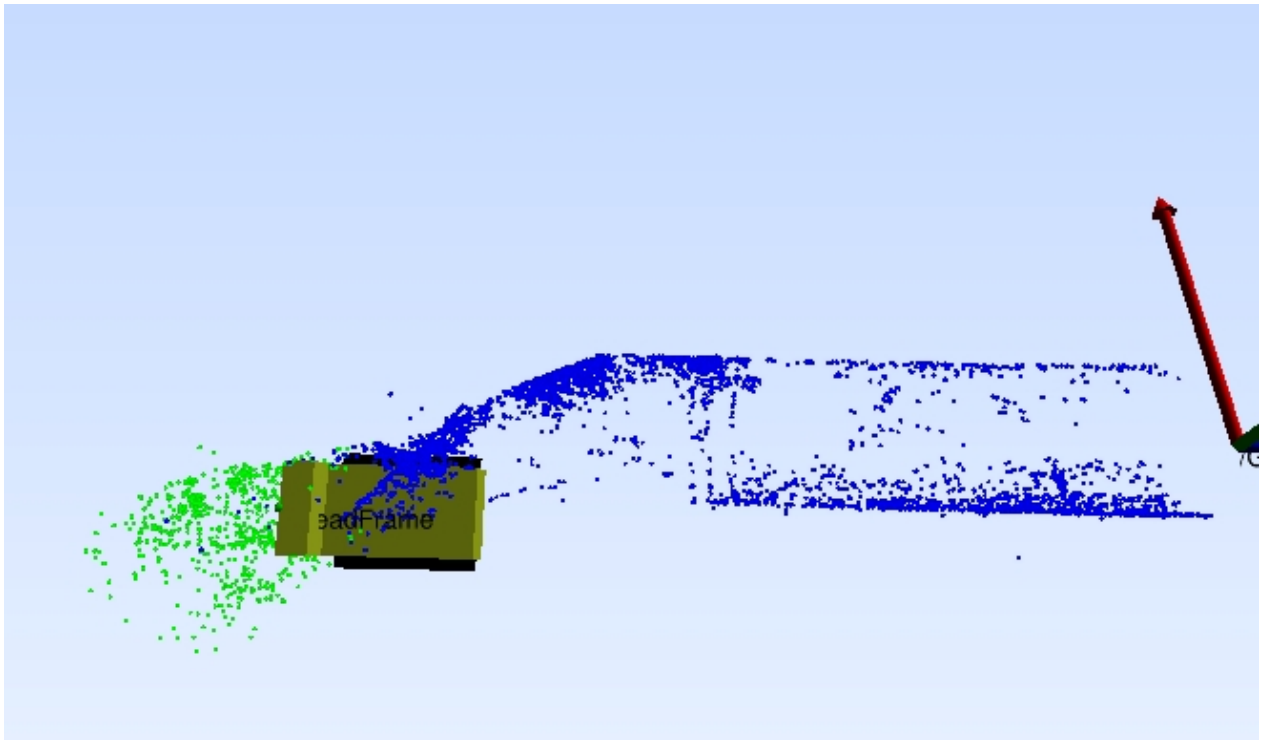


Abbildung 2.35: 3D-Rekonstruktion durch Bündelausgleich bei einer Kurvenfahrt.

Die Ursachen hierfür liegen zum einen im Mangel einer Starthypothese für den Gierwinkel und zum anderen fährt der Roboter während der Kurvenfahrt sehr nah an der Rohrwand entlang, weshalb er nur einen sehr kleinen Ausschnitt dieser Rohrwand in jedem Frame sieht. Dieser kleine Ausschnitt, der durch die Nähe außerdem sehr stark vergrößert ist, ist gewöhnlich stark homogen, was zusammen mit der sehr ungenauen Starthypothese durch den fehlenden Gierwinkel, das korrekte Matching der Featurepunkte praktisch unmöglich macht.

Dieser Nachteil lässt sich vermutlich nur durch eine sehr stark erhöhte Framerate und eine deutlich langsamere Kurvenfahrt ausgleichen.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der ursprüngliche Finanzplan konnte im Wesentlichen eingehalten werden. Die Abweichungen belaufen sich insgesamt unter 2.000 € unter der Bewilligungssumme. Die Positionen 0812 (Gehälter) und 0846 (Dienstreisen) wurden nicht ausgeschöpft (letzteres aufgrund der Tatsache, dass ein geplanter Konferenzbeitrag nicht angenommen wurde), dafür wurden die Mittel für Hilfskräfte (0822) überzogen. Geringe Reste sind ebenfalls in der Position 0850 (Investitionen) zu verzeichnen – die vorgesehen Rechentechnik war preiswerter, als zur Zeit der Antragstellung. Zusammenfassend kann eingeschätzt werden, dass die Kosten- und Arbeitskräfteplanung im Vorfeld korrekt war und auch eingehalten werden konnte. Gewisse Abweichungen sind bei der Bearbeitung von Forschungsprojekten nicht auszuschließen.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

AP 1 – Anforderungsanalyse					
Geplante Laufzeit:		1/13 – 6/13		Insgesamt kalkulierte PM:	5 PM
Tatsächliche Laufzeit:		3/13 – 6/13		Insgesamt eingesetzte PM:	3 PM
Projektpartner	TUI				
kalkulierte PM:	5 PM				
eingesetzte PM:	3 PM				
Kurzbeschreibung: Bereitstellung aller notwendigen Informationen welche zur Erstellung eines projektbezogenen Pflichtenheftes notwendig sind.					
Geleistete Arbeiten: Das Pflichtenheft wurde erstellt. Eine umfassende Literaturrecherche zur visuellen Hinderniserkennung und visuellen Odometrie in Rohrleitungen wurde durchgeführt.					
Anmerkungen: Etwas verspäteter Beginn aufgrund von Personalproblemen					

AP 2 – mechatronisches Konzept					
Geplante Laufzeit:		3/13 – 6/13		Insgesamt kalkulierte PM:	1 PM
Tatsächliche Laufzeit:		3/13 – 6/13		Insgesamt eingesetzte PM:	1 PM
Projektpartner	TUI				

kalkulierte PM:	1 PM			
eingesetzte PM:	1 PM			
Kurzbeschreibung: Erstellung der mechatronischen Grundkonzeption für den Demonstrator.				
Geleistete Arbeiten: In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Optimess wurden die optimalen Sensorpositionen festgelegt.				
Anmerkungen: keine				

AP 4 – Sensorik				
Geplante Laufzeit:	4/13 – 12/13	Insgesamt kalkulierte PM:	4 PM	
Tatsächliche Laufzeit:	3/13 – 6/13	Insgesamt eingesetzte PM:	4 PM	
Projektpartner	TUI			
kalkulierte PM:	4 PM			
eingesetzte PM:	4 PM			
Die für die Hinderniserkennung, Navigation, Selbstlokalisierung und Schadenserfassung notwendige Sensorik sollte ausgewählt werden.				
Geleistete Arbeiten: In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurde die rechentechnische Hardware für den Rodiar-Roboter ausgewählt sowie entsprechenden Sensorschnittstellen festgelegt.				
Anmerkungen: Speziell zu den Kameras (Anschaffung durch Fa. Optimess) hat es sehr intensive Diskussionen gegeben. Das für das Vorhaben optimale Modell konnte nicht beschafft werden.				

AP 5 – Steuerarchitektur, Softwaresystem				
Geplante Laufzeit:	3/13 – 9/15	Insgesamt kalkulierte PM:	6 PM	
Tatsächliche Laufzeit:	3/13 – 6/15	Insgesamt eingesetzte PM:	8 PM	
Projektpartner	TUI			
kalkulierte PM:	6 PM			

eingesetzte PM:	8 PM			
Kurzbeschreibung: Entwicklung einer geeigneten Steuerarchitektur. Entwicklung der Hardwaretreiber. Implementierung der Datenspeicherung und Protokollierung.				
Geleistete Arbeiten: Die Steuerarchitektur wurde erstellt und die Hardwaretreiber für die Kameras und den CAN-Bus implementiert und in das vorhandene Roboter-Softwaresystem MIRA des Fachgebietes eingebunden. Die Datenspeicherung und Protokollierung wurde auf Basis von MIRA-Tapes (Bestandteil der MIRA-Middleware – die im Fachgebiet für Roboter verwendete Softwarebasis) vorgenommen und integriert.				
Anmerkungen: Die Arbeiten wurden durch die Bachelorarbeit von Herrn Eric Tödtmann unterstützt. Die angeschaffte Rechentechnik kam in den AP's 5, 6, 7 zum Einsatz.				

AP 6 – Lokalisation und Navigation				
Geplante Laufzeit:	7/13 – 9/15	Insgesamt kalkulierte PM:	22 PM	
Tatsächliche Laufzeit:	7/13 – 12/15	Insgesamt eingesetzte PM:	22 PM	
Projektpartner	TUI			
kalkulierte PM:	22 PM			
eingesetzte PM:	22 PM			
Kurzbeschreibung: Entwicklung von Verfahren zur visuellen Hinderniserkennung, visuellen Odometrie, Bewegungssteuerung sowie einer Benutzerschnittstelle für einen externen PC:				
Geleistete Arbeiten: Es wurde ein Bündelausgleichsverfahren zu visuellen Odometrie und ein zweistufiges Verfahren zur visuellen Hinderniserkennung entwickelt, welches in erster Stufe die Kamerabilder auf Basis von Farb- und Texturmerkmalen auf Hindernisse untersucht und bei einem gefundenen Hindernis stoppt und das Hindernis mit einem Schattenbasierten Verfahren validiert. Die Bewegungssteuerung und die Benutzerschnittstelle für den externen PC wurden erfolgreich implementiert.				
Anmerkungen: Die Arbeiten wurden durch die Masterarbeit von Herrn Sebastian Wollner unterstützt.				

AP 7 – Demonstration			
Geplante Laufzeit:	7/14 – 12/15	Insgesamt kalkulierte PM:	8 PM
Tatsächliche Laufzeit:	5/14 – 12/15	Insgesamt eingesetzte PM:	8 PM
Projektpartner	TUI		
kalkulierte PM:	8 PM		
eingesetzte PM:	8 PM		
Kurzbeschreibung: Experimentelle Untersuchung der Hinderniserkennung und der autonomen Navigation.			
<p>Geleistete Arbeiten: Die Experimentellen Untersuchungen wurden durchgeführt. Die Farbtexturbasierte Hinderniserkennung erkennt Hindernisse zu etwa 90%. Die Schattenbasierte Hinderniserkennung unterscheidet zu 100% erfolgreich zwischen leerem und blockiertem Rohr. Die visuelle Odometriekorrektur liefert Werte, welche kritischerweise nicht signifikant besser sind als die der Radodometrie. Probleme bei den Fahrten des Roboters ergeben sich in Rohren mit 400mm Durchmesser, bei Rückwärtsfahrten durch Kurven sowie in einigen Fällen bei Rückwärtsfahrten allgemein. Als Ursachen hat sich die verwendete Lageregelung im Zusammenhang mit der Gewichtsverteilung des Roboters herausgestellt. Die Problematik wurde an Projektpartner Optimess weiter geleitet.</p>			
<p>Anmerkungen: Die Arbeiten wurden maßgeblich durch den Partner TFW durch Bereitstellung der Versuchs-Infrastruktur unterstützt. In diesem AP kamen im Wesentlichen die Mittel aus Kapitel 0831 zum Einsatz, außerdem ein erheblicher Teil der Reisemittel.</p>			

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das Fachgebiet NIKR konnte durch das Projekt RODIAR seine Expertise im Bereich der visuellen Odometrie, des Bündelausgleichs und der visuellen Hinderniserkennung weiter ausbauen, was außerdem dazu beitragen soll, die Lehre an der TU Ilmenau weiter zu verbessern und die Attraktivität des Fachgebietes für die Studierenden zu erhöhen.

Die Roboterplattform, sowie die darauf im Rahmen des RODIAR-Projektes entwickelte Software mit samt den Verfahren zur visuellen Odometrie und zur visuellen Hinderniserkennung sollen im Rahmen des vom BMBF geförderten ASINVOS Projektes (Assistierendes und interaktiv lernfähiges Videospektionssystem für Oberflächenstrukturen am Beispiel von Straßenbelägen und Rohrleitungen, (FKZ 01IS15036D)) zum Einsatz kommen. Im Sinne dieser Anschlussfähigkeit wurde nach Projektende erheblicher Aufwand in einige Verbesserungen des Roboters gesteckt, um die Chance der Befahrung

einer frisch stillgelegten 1000mm Trinkwasserleitung in der Nähe von Arnstadt zur Gewinnung von Daten (alter) Rohrrinnenwände zu nutzen (s. Nachtrag zum Erfolgskontrollbericht).

Sowohl die visuelle Odometrie als auch die visuelle Hinderniserkennung wurden mit den in Kapitel 2.1 vorgestellten Ideen am Fachgebiet weiterentwickelt und verbessert.

Weiterhin fanden am Fachgebiet im Rahmen des RODIAR-Projektes mehrere Graduierungsarbeiten statt:

Masterarbeit:

Wollner, Sebastian: *Ansichtsbasierte Hinderniserkennung in Rohrleitungen*, Masterarbeit, Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik, TU Ilmenau, 2016

Bachelorarbeit:

Tödtmann, Eric: *Visuelle Hinderniserkennung in Rohrleitungen*, Bachelorarbeit, Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik, TU Ilmenau, 2015

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Vorhabensrelevante Fortschritte Dritter sind dem Fachgebiet NIKR nicht bekannt.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Ein Paper „An Autonomous Video Inspection Robot for Drinking Water Pipelines“ wurde zur IROS 2015 eingereicht, aber aufgrund von zu diesem Zeitpunkt unzureichend vorhandenen Testdaten abgelehnt. Weitere Möglichkeiten zur Veröffentlichung werden derzeit vom Fachgebiet NIKR geprüft.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel RODIAR - Autonom agierendes Robotersystem für die Inspektion von Trinkwasserleitungen zur frühzeitigen Erkennung von versorgungskritischen, materialtechnischen Schwachstellen	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Prof. Horst-Michael Groß, Dr. Klaus Debes, MSc. Robert Kaltenhäuser	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2015
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Forschungsbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) TU-Ilmenau Fakultät Informatik und Automatisierung Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik Helmholtzplatz 5 (Zusebau) 98693 Ilmenau	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -
	10. Förderkennzeichen 01IM12004B
	11. Seitenzahl 61
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 27
	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 36
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Technische Informationsbibliothek (TIB) – Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1B, 30167 Hannover, 25.07.2016	
18. Kurzfassung Die Inspektion von Fernwasserleitungen wird zurzeit von kabelgebundenen, ferngesteuerten Robotern durchgeführt, was zeitaufwändig und kostenintensiv ist. Ziel des RODIAR-Projektes war daher die Entwicklung eines autonom agierenden, kabellosen Rohrinspektionsroboters, welcher selbstständig durch das Rohr fährt, Videodaten der Rohrwand aufnimmt und für die spätere Auswertung speichert und somit eine kostengünstige Inspektion der Fernwasserleitung ermöglicht. Kritisch sind hierbei insbesondere eine robuste Hinderniserkennung, um zu entscheiden, ob die Rohrleitung passierbar ist oder nicht und, zur möglichst genauen Schätzung der Position des Roboters und eventueller Schadstellen des Rohres, eine Odometriemessung, basierend auf der Radodometrie, welche mit Hilfe einer visuellen Odometriekorrektur verbessert werden soll. Für die Hinderniserkennung wurde dabei ein zweistufiges Verfahren entwickelt, welches auf Basis von Farb- und Texturinformationen des Bildes mögliche Hindernisse detektiert, in einem solchen Falle stoppt und das Ergebnis mit einer schattenbasierten Hinderniserkennung validiert, welches die Szene aus verschiedenen Richtungen beleuchtet und dabei von Hindernissen geworfene Schatten erkennt, was insgesamt eine 90%ige Erkennung von Hindernissen in selbst schwierigsten Umgebungen ermöglicht. Für die visuelle Odometriekorrektur wurde ein Verfahren verwendet, welches mit einem Stereo-Fischaugenkameranystem markante Punkte in den aufgenommenen Bildern sucht, diese in nachfolgenden Bildern wiederfindet und mit Hilfe einer Bündelausgleichsoptimierung sowohl die Positionen der markanten Punkte, als auch die Kameraposen rekonstruieren kann und somit Schlussfolgerungen zur aktuellen Position des Roboters gezogen werden können. Dieses Vorgehen ermöglichte in den durchgeführten Tests eine Schätzung der Pose des Roboters im Rohr mit einem Fehler von etwa 5,13%.	
19. Schlagwörter RODIAR, Visuelle Hinderniserkennung, Visuelle Odometrie, Visuelle Inspektion, Fernwasserleitungen, Rohrleitungsinspektion	
20. Verlag Technische Informationsbibliothek - Deutsche Forschungsberichte - (TIB)	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN oder ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) final report
3. title RODIAR - Autonomous robot system for the inspection of water pipelines for the early detection of supply-critical, material and technical vulnerabilities	
4. author(s) (family name, first name(s)) Prof. Horst-Michael Groß, Dr. Klaus Debes, MSc. Robert Kaltenhäuser	5. end of project 31.12.2015
	6. publication date planned
	7. form of publication research report
8. performing organization(s) (name, address) TU-Ilmenau Fakultät Informatik und Automatisierung Fachgebiet Neuroinformatik und Kognitive Robotik Helmholtzplatz 5 (Zusebau) 98693 Ilmenau	9. originator's report no. -
	10. reference no. 01IM12004B
	11. no. of pages 61
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 27
	14. no. of tables 6
	15. no. of figures 36
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Technische Informationsbibliothek (TIB) – Deutsche Forschungsberichte, Welfengarten 1B, 30167 Hannover, 25.07.2016	
18. abstract The inspection of drinking water pipelines is currently carried out by wired, remote-controlled robots, which is time-consuming and costly. The aim of the RODIAR project therefore was the development of an autonomous, wireless pipe inspection robot, which moves independently through the pipe, records video data of the pipe wall and stores it for later evaluation and thus enables cost-effective inspection of the pipeline. Critical in this respect is a robust obstacle detection algorithm for the decision, whether the pipeline is accessible or not and, for giving an accurate estimate of the position of the robot and any damaged areas of the pipe, an odometry estimate, which is based on the encoder of the wheels and improved by a visual odometry algorithm. For obstacle detection, a two-step process has been developed that detects possible obstacles based on color and texture information of the image, stops in a case it found an obstacle and validates this result with a shadow-based obstacle detection algorithm, which illuminates the scene from different directions and detects shadows cast by obstacles, allowing an overall 90% detection of obstacles in even the most difficult environments. For visual odometry, a method was developed which uses a stereo fisheye camera system and searches for distinctive points in the captured images, matches these points in subsequent images and reconstructs the scene using bundle adjustment, which optimizes both the positions of the distinctive points and the camera poses and therefore can draw conclusions on current position of the robot. This approach allowed a pose estimate of the robot in the test scenario with an error of about 5.13%.	
19. keywords RODIAR, visual obstacle detection, visual odometry, visual inspection, drinking water pipelines , pipeline inspection	
20. publisher Technische Informationsbibliothek - Deutsche Forschungsberichte - (TIB)	21. price