

3D Ultraschall-Entfernungsmessung mit Pseudo-Random Sequenzen

Markus Berg, Klaus-Werner Jörg & Jan-Peter Paulick

AG Robotik & Prozessrechentechnik, Fachbereich Informatik
Universität Kaiserslautern, Postfach 3049, 67653 Kaiserslautern
email: {berg, joerg}@informatik.uni-kl.de
<http://ag-vp-www.informatik.uni-kl.de>

Zusammenfassung: Der vorliegende Beitrag stellt zuerst ein Verfahren vor, welches das simultane Messen mit mehreren, gleichartigen Ultraschallsensoren erlaubt. Dazu werden auf realen Messungen basierende, experimentelle Ergebnisse präsentiert. Anschließend wird beschrieben, wie dieses Verfahren prinzipiell zur ultraschallbasierten 3D-Entfernungsmessung genutzt werden kann - dabei auftretende Problemstellungen werden diskutiert.

1 Einleitung

Ultraschallsensoren mit konventioneller Laufzeitmessung sind in der Robotik seit Jahren weit verbreitet, da sie vergleichsweise preiswert sind und sich auf einfachste Weise an einen Rechner anschließen lassen. Darüber hinaus ist der kegelförmige Detektionsbereich bei manchen Anwendungen von Vorteil, beispielsweise dann, wenn ein einzelner Sensor zur Überprüfung der Anwesenheit von Objekten eingesetzt wird. Wird jedoch eine hohe Richtungsauflösung gefordert, wie dies im Kontext mobiler Roboter häufig der Fall ist, dann sind konventionelle Ultraschallsensoren ungeeignet. Weitere Nachteile konventioneller Ultraschallsensoren sind ihre Anfälligkeit gegenüber Spiegelreflexionen und Fremdschall (crosstalk), sowie ihre begrenzte Entfernungsauflösung.

Vor diesem Hintergrund stellt der vorliegende Aufsatz zunächst ein Verfahren vor, welches die Entfernungsauflösung eines Ultraschallsensors signifikant verbessert. Gleichzeitig erlaubt das Verfahren das simultane Messen mit mehreren, gleichartigen Ultraschallsensoren, wobei das Auftreten von crosstalk explizit ausgenutzt wird. Anschließend wird beschrieben, wie auf der Basis dieses Verfahrens 3D-Entfernungsmessungen mit Ultraschall durchgeführt werden können.

Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms *Autonomes Laufen* bildet der beschriebene Ansatz die Grundlage eines neu genehmigten Teilprojektes, das die "Entwicklung eines ultraschallbasierten Entfernungsmesssystems zur Bodenprofilanalyse für eine Laufmaschine" zum Gegenstand hat. Das Ziel dieses Projektes besteht in der Extraktion

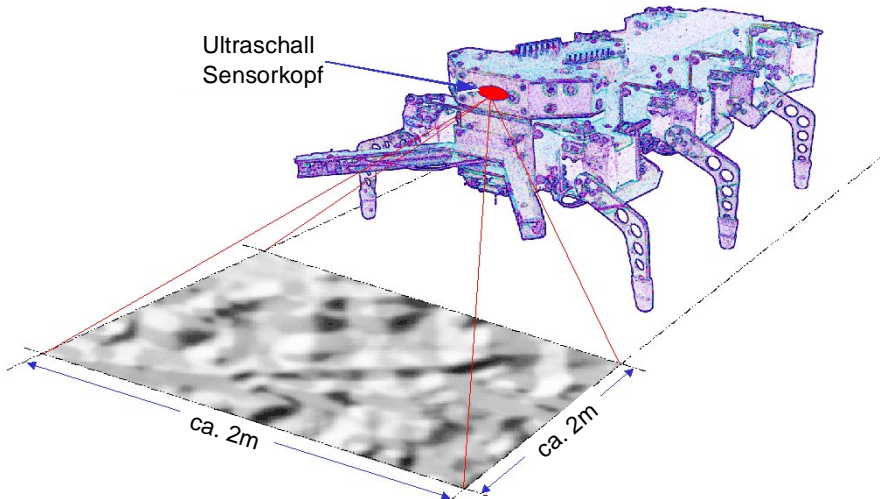


Abbildung 1: angedachtes Anwendungsszenario

des geometrischen Bodenprofils als essentieller Voraussetzung für die sichere Platzierung der Beine einer Laufmaschine (Abb. 1). Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen des Projektes untersucht, inwieweit dieses Ziel auf der Grundlage von Ultraschalldaten erreichbar ist. Die Verwendung von Ultraschallsensoren ist durch deren spezifische Vorteile motiviert, die immer dann zum Tragen kommen, wenn optische Systeme versagen, beispielsweise bei starker Rauchentwicklung, Nebel oder Dunkelheit.

Dieser Aufsatz ist wie folgt gegliedert: Abschnitt 2 erläutert das der 3D-Entfernungsmessung zu Grunde liegende Messverfahren und präsentiert experimentelle Ergebnisse. Abschnitt 3 beschreibt unseren Ansatz zur 3D-Entfernungsmessung und damit verbundene Probleme. In Abschnitt 4 wird die sich momentan im Aufbau befindliche Hardware beschrieben, welche weitergehende Tests erlaubt. Eine Zusammenfassung in Abschnitt 5 beschließt den Aufsatz.

2 Entfernungsmessung mit Pseudo-Random Sequenzen

Zur Entfernungsmessung mit einem konventionellen Ultraschallsensor wird bei fester Frequenz ein möglichst kurzer Impuls ausgesendet, um eine möglichst hohe Entfernungsauflösung zu erreichen. Der in der Robotik häufig verwendete Polaroid-Sensor (49,7 kHz) erreicht zum Beispiel bei einer Impulsdauer von $330 \mu\text{s}$ eine Entfernungsauflösung von ca. 5,5 cm. Aus Sicht des Sensors näher beieinander liegende Objekte können nicht aufgelöst werden. Dies ist erst dann möglich, wenn anstatt eines festfrequenten Impulses beispielsweise ein linear frequenzmodulierter Impuls gesendet und das empfangene Echo mittels Autokorrelation ausgewertet wird. In diesem Fall ist die Entfernungsauflösung nämlich nicht von der Dauer des Schallimpulses abhängig, son-

dem nur von der Breite des Peaks der Autokorrelationsfunktion. Die Verwendung linear frequenzmodulierter Impulse erlaubt dann das simultane Messen mit zwei Ultraschallsensoren, wenn beide Signale gegenläufig verlaufen und daher nicht korrelieren. Das simultane Messen mit mehr als zwei Ultraschallsensoren ist auch unter Verwendung linear frequenzmodulierter Impulse nicht möglich. Um mit mehr als zwei Ultraschallsensoren gleichzeitig Messungen durchführen zu können, bedarf es entsprechend vieler, miteinander nicht korrelierender Sendesignale, von denen sich aber jedes einzelne mittels Autokorrelation in eindeutiger Weise identifizieren lässt. In [4] wird gezeigt, dass dies mit Pseudo-Random Sequenzen möglich ist, wobei jedem Ultraschallsensor eine eigene Pseudo-Random Sequenz zugeordnet wird. Werden die einzelnen Pseudo-Random Sequenzen so gewählt, dass ihre individuellen Autokorrelationsfunktionen scharfe Peaks aufweisen, während die Kreuzkorrelationsfunktion zweier beliebiger Pseudo-Random Sequenzen keinen Peak aufweist, dann ist jeder Ultraschallsensor prinzipiell in der Lage, in einem überlagerten Echo seinen eigenen Anteil zu identifizieren. Dazu wird die aus dem Radarbereich bekannte Matched-Filter Technik zur Pulskompression eingesetzt, welche die Eigenschaft besitzt, umso bessere Ergebnisse zu liefern, je höher das Produkt aus Bandbreite und Impulsdauer ist. Neben der signifikanten Verbesserung der Entfernungsauflösung eröffnet das Verfahren die Möglichkeit, durch Triangulation die mangelnde Richtungsauflösung eines konventionellen Ultraschallsensors ebenfalls entscheidend zu verbessern. Das zum simultanen Messen entwickelte Verfahren nutzt das Auftreten von crosstalk explizit aus und ist äußerst unempfindlich gegenüber Störschallquellen. Ein Nachteil des Verfahrens ist der im Vergleich zu konventionellen Ultraschallsensoren erheblich höhere Hardwareaufwand, der sich aus der Notwendigkeit ergibt, die benötigten Signalformen aussenden zu können und deren Echos vollständig abtasten zu müssen.

Nachfolgend werden auf realen Messungen beruhende, experimentelle Ergebnisse präsentiert. Die in den Experimenten verwendete Hardware besteht aus Ultraschallsensoren der Fa. Polaroid, die durch spezielle selbstentwickelte Endstufen angesteuert werden. Weiterhin kam ein kommerzielles DSP-Board zur Ansteuerung der Sensoren und zur Auswertung der Echos zum Einsatz [12], wobei zum Abtasten und Digitalisieren ebenfalls eine kommerzielle Elektronik verwendet wurde [13].

Im ersten Experiment wird gezeigt, dass es möglich ist, bei Verwendung von Pseudo-Random Sequenzen als Sendesignale diese eindeutig im empfangenen Echo zu identifizieren. Um dies zu zeigen, wurden mit einem Polaroid-Sensor verschiedene Pseudo-Random Sequenzen ausgesendet und die resultierenden Echos als Referenzsignale für die jeweilige Pseudo-Random Sequenz gespeichert. Der Versuchsaufbau wurde dabei so gewählt, dass keine Überlagerungen der ausgesendeten Impulse entstehen. Die so gewon-

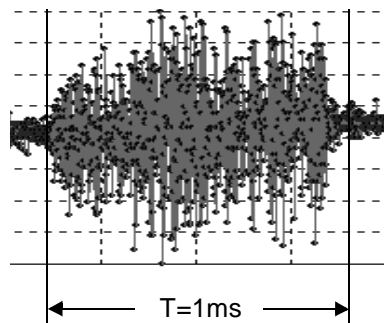


Abbildung 2: Beispiel einer Pseudo-Random Sequenz

nenen Referenzaufnahmen werden, statt der vom Computer erzeugten Pseudo-Random Sequenz, zur Korrelation verwendet, um dem Übertragungsverhalten der Messstrecke Rechnung zu tragen. In Abb. 2 ist zwischen den senkrechten Linien die Referenzaufnahme einer Pseudo-Random Sequenz der Dauer $T = 1\text{ms}$ abgebildet. Im nächsten Schritt wurden weitere Messungen durchgeführt und die resultierenden Echos mit den zugehörigen Referenzsignalen korreliert. Zusätzlich wurde als Gegenprobe auch mit Referenzsignalen von Pseudo-Random Sequenzen korreliert, welche nicht bei der Messung verwendet wurden. Abb. 3a zeigt das Korrelationsergebnis eines Echos mit dem

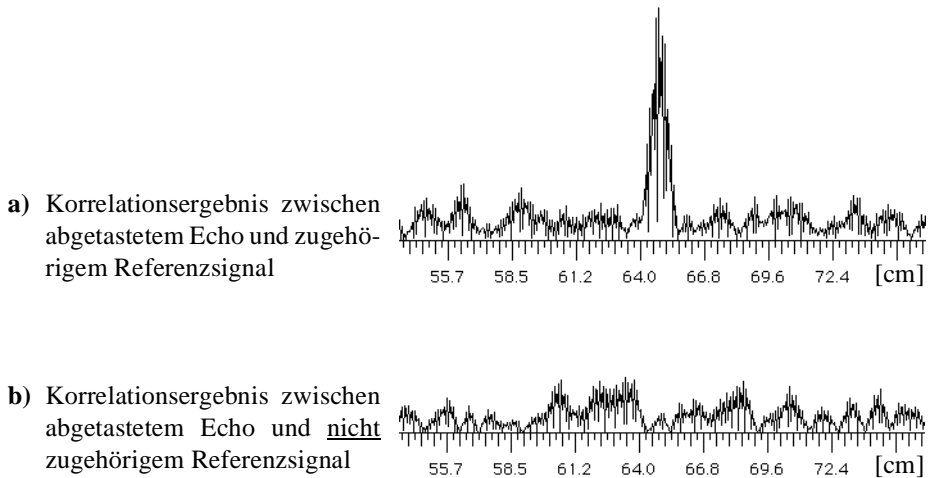


Abbildung 3: Korrelationsbeispiele

zugehörigen Referenzsignal. Der Peak markiert die Entfernung zur Echoquelle. Zu beachten ist hier, dass die Entfernung zur Echoquelle mit einer Genauigkeit von $1/2\text{cm}$ bestimmt werden kann. Abb. 3b zeigt die Korrelation mit dem Referenzsignal einer Pseudo-Random Sequenz, welche nicht bei der Messung verwendet wurde. Es ist leicht zu erkennen, dass kein signifikanter Peak entsteht. Dieses Experiment zeigt, dass es möglich ist die Signalanteile eines bestimmten Sensors selektiv aus einem Echo herauszufiltern.

Im zweiten Experiment wurden drei Polaroid Sensoren eingesetzt, wobei mit zwei Sensoren ausschließlich gesendet und mit dem dritten Sensor nur empfangen wurde. Abbildung 4 zeigt die Versuchsanordnung. Beide Sender emittierten simultan individuelle Pseudo-Random Sequenzen. Das vom Empfänger aufgenommene Echo wurde digitalisiert und von der DSP-Hardware ausgewertet. Die Trennung zwischen Sender und Empfänger wurde hier vor dem Hintergrund des in Abb. 1 dargestellten Anwendungsszenarios und dem damit verbundenen, potentiell niedrigen Messabstand, sowie der zur

Korrelation notwendigen, langen Impulsdauer bewusst gewählt. Nur so können Entfernungen zu Objekten gemessen werden, die nicht weiter als $d = cT/2$ vom Sensor entfernt sind. Mit einem abwechselnd als Sender und Empfänger verwendeten Ultraschallsensor ist dies nicht möglich, wobei die minimale Messentfernung durch $d = cT/2$ gegeben ist. Bei einer Impulsdauer von $T = 4\text{ms}$ und einer Schallgeschwindigkeit von $c = 33\text{cm/ms}$ muss ein Objekt beispielsweise einen Abstand $d \geq 66\text{cm}$ vom Sensor haben, um detektiert zu werden.

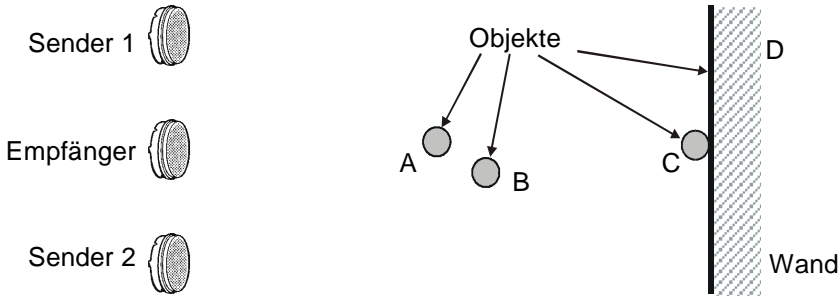


Abbildung 4: Versuchsanordnung

Abb. 5 und Abb. 6 zeigen experimentelle Ergebnisse. Dabei ist die von Sensor 1 emittierte Pseudo-Random Sequenz ($T = 4\text{ms}$) in Abb. 5 wiedergegeben. Abb. 6a zeigt den vom Empfänger abgetasteten Signalverlauf, eine Überlagerung von maximal 8 einzelnen Echos.

Dieses Empfangssignal wurde anschließend mit einem Matched Filter ausgewertet, wobei zur Korrelation aus Sicht von Sensor 1 der in Abb. 5 zwischen den beiden senkrechten Linien eingeschlossene Signalanteil der von Sensor 1 emittierten Pseudo-Random Sequenz als Referenzsignal herangezogen wurde. Das Korrelationsergebnis aus Sicht von

Sensor 1 ist in Abb. 6b wiedergegeben. Die zu den vier Objekten gehörenden Peaks sind deutlich zu erkennen. In Abb. 6c ist das Korrelationsergebnis des gleichen Echos mit der von Sensor 2 emittierten Pseudo-Random Sequenz zu sehen.

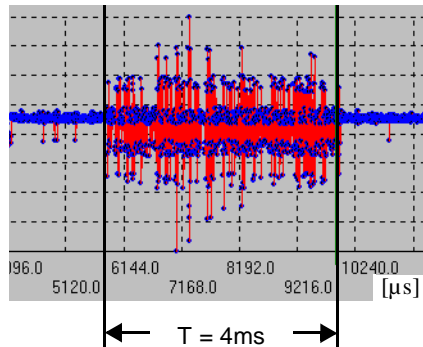
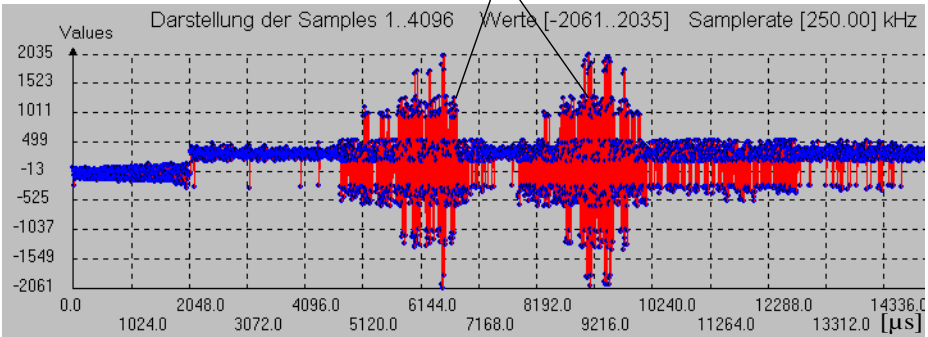
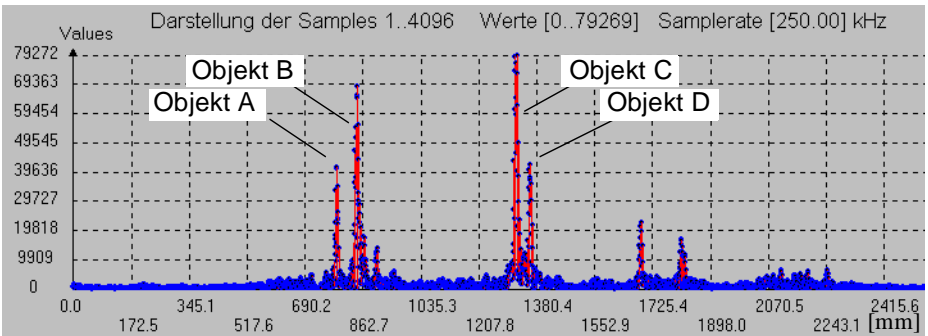


Abbildung 5: von Sensor 1 gesendete Pseudo-Random Sequenz (Referenzsignal)

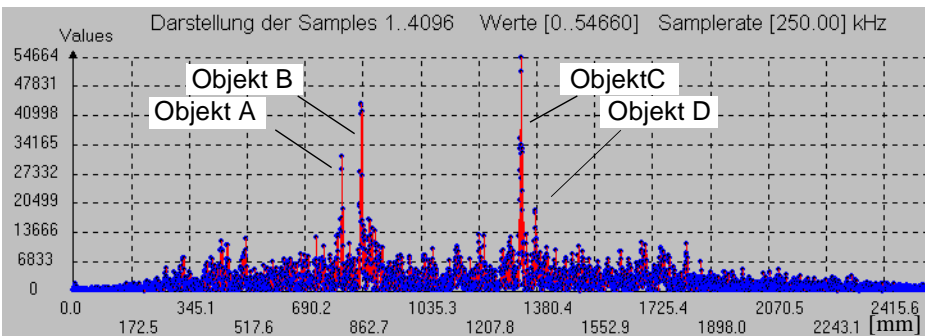
jeweils Überlagerungen von 4 Echos



a) Vom Empfänger abgetasteter Signalverlauf



b) Korrelationsergebnis aus Sicht von Sensor 1



c) Korrelationsergebnis aus Sicht von Sensor 2

Abbildung 6: vom Empfänger aufgenommene, überlagerte Echos

Da es zur Gewinnung eines Bodenprofils prinzipiell notwendig ist, über möglichst hochauflösende 3D-Entfernungsinformation zu verfügen, werden im Rest des Aufsatzes Probleme vorgestellt, welche bei der ultraschallbasierten Extraktion von 3D-Information auftreten und Lösungsansätze diskutiert.

3 Ultraschallbasierte Extraktion von 3D-Informationen

Essentielle Voraussetzung zur ultraschallbasierten Extraktion von 3D-Informationen ist, dass über eine Szene mindestens von drei Positionen, die eine Ebene im Raum aufspannen müssen, Entfernungswerte vorliegen. Die Orte, an denen sich die individuellen Echoquellen befinden, lassen sich dann durch Triangulation bestimmen. *Triangulieren* heißt in diesem Kontext, anhand der gemessenen Entfernungen und der bekannten Sensorkonfiguration (Position und Ausrichtung der einzelnen Sensoren) die genaue Position einer Echoquelle im Raum zu bestimmen. Dies ist allerdings nur dann möglich, wenn die von einer Echoquelle stammenden Echos in den von den einzelnen Sensoren empfangenen Signalen einander eindeutig zuzuordnen sind. Anders ausgedrückt muss herausgefunden werden, welches Echo von welchem Objekt reflektiert wurde. Dieses sog. *Korrespondenzproblem* ergibt sich in Folge der unterschiedlichen Laufzeiten zwischen einer Echoquelle und den individuellen Sensoren. Sind die Korrespondenzen in eindeutiger Weise aufgelöst, dann kann aus den gemessenen Entfernungen auf die Winkel geschlossen werden, welche die Echoquelle zu den Schallachsen der individuellen Sensoren einnimmt. An dieser Stelle sei erwähnt, dass im Unterschied dazu bei der Stereobildverarbeitung von den errechneten Winkeln auf die Entfernung eines Objektes geschlossen wird.

Die Schwierigkeit bei der Lösung des Korrespondenzproblems ist in dem hier beschriebenen Fall das Finden korrespondierender Echos, d.h. in der korrekten Zuordnung der einzelnen Peaks in den Korrelationsfunktionen der individuellen Sensoren. Abb. 7 ver-

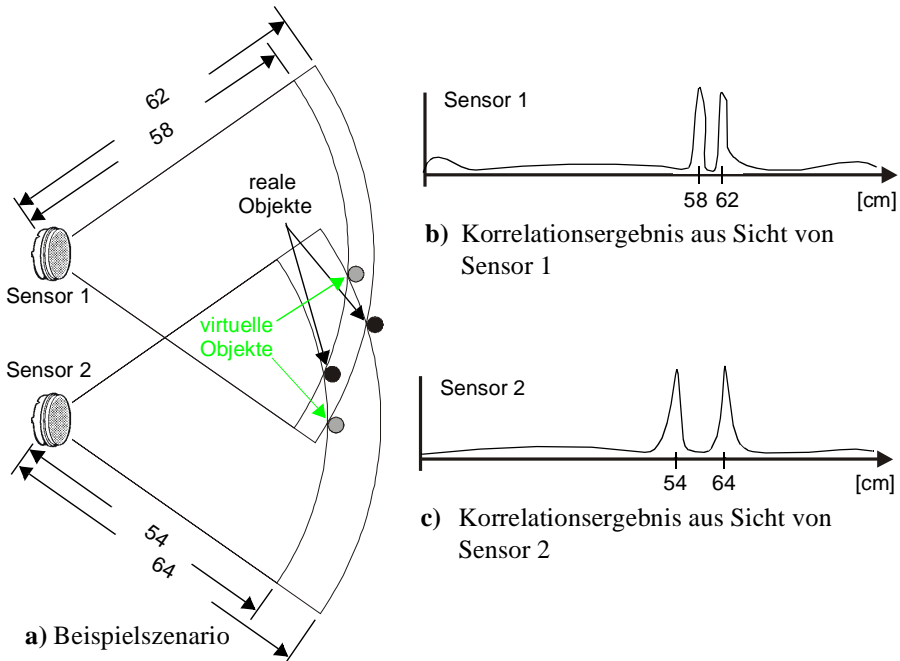


Abbildung 7: Korrespondenzproblem

deutlich diesen Sachverhalt. In dem abgebildeten Beispiel liefern sowohl Sensor 1 als auch Sensor 2 jeweils zwei Entfernungswerte. Bei dem Versuch, durch Triangulation die genaue Position der beiden Objekte zu bestimmen, kann ohne weitere Annahmen prinzipiell nicht zwischen den in der Grafik angedeuteten Positionen unterschieden werden. Sowohl die realen Positionen, als auch die angedeuteten virtuellen Positionen der beiden Objekte sind möglich.

Eine Lösung des Problems wird durch die Tatsache begünstigt, dass die zeitlichen Abstände der Echos, also der prinzipiell möglichen Objektpositionen, umso kleiner sind, je kürzer die Basisabstände der einzelnen Ultraschallsensoren gewählt werden [3]. Bei kleinem Basisabstand lässt sich so eine Vielzahl potentieller Kandidaten von vornherein ausschließen. Abb. 8 veranschaulicht diesen Sachverhalt. Die vier Sensoren haben untereinander den gleichen Abstand und sind auf einen Bereich vor Sensor 1 ausgerichtet. Wird nun von Sensor 1 ein Objekt detektiert, so sind die Bereiche, innerhalb derer für Sensor 2 bzw. Sensor 4 ein korrespondierendes Echo gesucht werden muss, grau unterlegt. Abb. 8a zeigt ein Beispiel für einen kleinen Basisabstand, während Abb. 8b dieses für einen großen Basisabstand veranschaulicht. Durch Plausibilitätschecks alleine lässt sich das Korrespondenzproblem einschränken, jedoch nicht notwendigerweise vollständig lösen. Daher wird im Rahmen des Projektes untersucht, ob es durch Auswertung aufeinanderfolgender Messungen und unter Ausnutzung der in dem Sensorsystem inhärent vorhandenen Redundanz mit probabilistischen Ansätzen möglich ist, das Korrespondenzproblem in eindeutiger Weise zu lösen. Um verlässliche Aussagen machen zu können, müssen allerdings erst Ergebnisse mit der neuen Hardware vorliegen. Diese wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

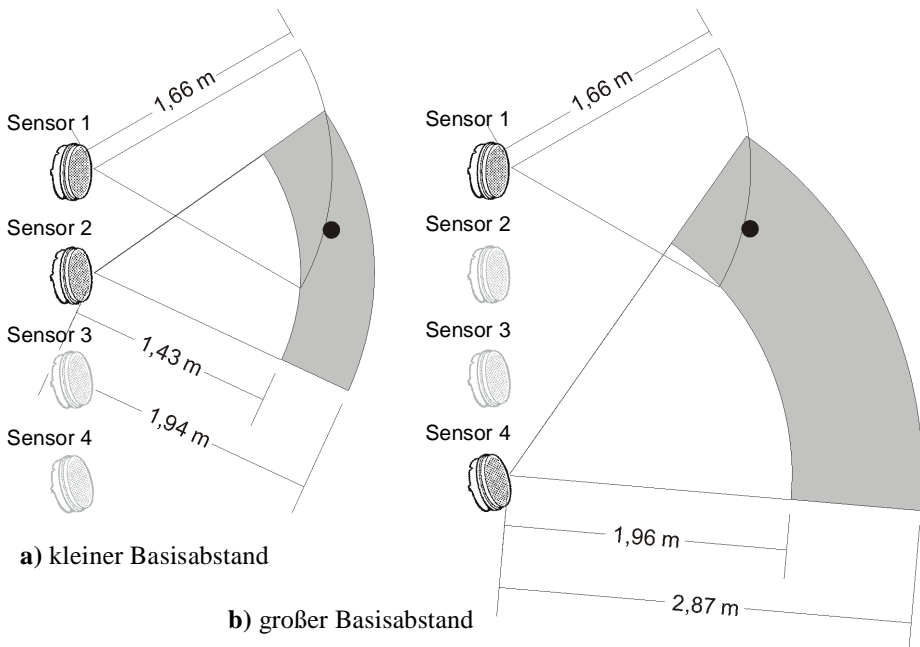


Abbildung 8: Beispiel mit verschiedenen Basisabständen

4 Hardwareaufbau

Die Tatsache, dass die im Rahmen des DFG-Projekts zu lösenden Problemstellungen die Leistungsfähigkeit der bislang verwendeten Testhardware erheblich überfordern, macht eine wesentlich leistungsfähigere Hardware unabdingbar. Abbildung 9 zeigt die Struktur dieser sich momentan im Aufbau befindlichen Testplattform. Kernelement der Konfiguration ist auch hier die DSP-Hardware [14], welche die Ansteuerung der A/D- und D/A-Wandler, sowie die Kommunikation mit dem Host-PC übernimmt. Darüber hinaus ist die verwendete DSP-Hardware in der Lage, mit vier Polaroid-Sensoren simultan beliebig lange Pseudo-Random Sequenzen zu emittieren. Die resultierenden Echos werden mit weiteren vier Sensoren abgetastet und von der DSP-Hardware in Echtzeit ausgewertet. Dies erlaubt das Durchführen redundanter Entfernungsmessungen, wodurch das Auflösen von Korrespondenzen erleichtert wird. Darüber hinaus wird es das neue System ermöglichen, kontinuierliche Sequenzen zu senden. Ob sich daraus im Sinne des Projekts positive Perspektiven ergeben, ist derzeit unklar und somit ebenfalls Gegenstand der weiteren Forschung.

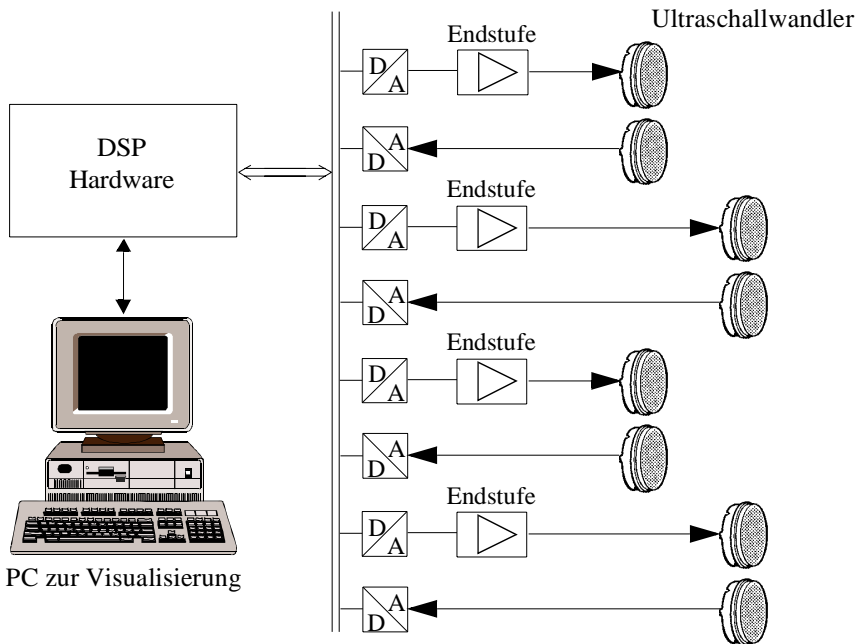


Abbildung 9: Struktureller Aufbau der Hardware

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde zunächst ein Verfahren vorgestellt, welches das simultane Messen mit mehreren, gleichartigen Ultraschallsensoren erlaubt. Im Rahmen des DFG-

Schwerpunktprogramms *Autonomes Laufen* bildet dieses Verfahren die Basis eines Projekts, welches die "Entwicklung eines ultraschallbasierten Entfernungsmesssystems zur Bodenprofilanalyse für eine Laufmaschine" zum Gegenstand hat. Vor diesem Hintergrund wurden anschließend Fragestellungen diskutiert, die bei der ultraschallbasierten Extraktion von 3D-Entfernungsinformation auftreten. Von besonderem Interesse ist hier insbesondere die Frage, inwieweit sich durch Triangulation Oberflächenstrukturen rekonstruieren lassen und wie granular diese Oberflächenstrukturen aufgelöst werden können. Die Beantwortung dieser Frage hängt entscheidend davon ab, wie gut von kleinen Objekten hervorgerufene, schwache Echos detektiert und für die Triangulation nutzbar gemacht werden können. Zur Zeit sind dazu allerdings noch keine Aussagen möglich.

6 Literatur

- [1] Audenaert, K.; Peremans, H.; Kawahara, Y.; Van Campenhout J.: *Accurate Ranging of Multiple Objects using Ultrasonic Sensors*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '92), Nice, France, 1992
- [2] Hanebeck, U.D.: *Pipelined Sampling Techniques for Sonar Tracking Systems*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '98), Leuven, Belgium, 1998
- [3] Kleeman, L.; Kuc, R.: *Mobile robot sonar for target localization and classification*, International Journal of Robotics Research, Volume 14, Number 4, 1995
- [4] Jörg, K.W.; Berg, M.: *Sophisticated Mobile Robot Sonar Sensing with Pseudo-Random Codes*, Robotics and Autonomous Systems 25 (1998) 241-251, Elsevier Science, 1998
- [5] Jörg, K.W.; Berg, M.: *Mobile Robot Sonar Sensing with Pseudo-Random Codes*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '98), Leuven, Belgium, 1998
- [6] Jörg, K.W.; Berg, M.; Müller, M.: *Towards Sophisticated Mobile Robot Sonar Sensing using Pseudo-Random Sequences*, 2nd Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots (EUROBOT '97), Brescia, Italy, 1997
- [7] Lindstedt, G.: *Borrowing the Bat's Ear for Automation - Ultrasonic Measurements in an Industrial Environment*, Doctoral Dissertation, Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund Institute of Technology, 1996
- [8] Purcell, D.W.; Huisson, J.P.: *A Curved array Transducer for Autonomous Vehicle Navigation*, Proceedings of Acoustic Sensing and Imaging, 1993
- [9] Rencken, W.D.; Peremans, H.; Möller, M.: *Tri-aural versus Conventional Sonar Localisation and Map Building*, Intelligent Autonomous Systems, IOS Press, 1995
- [10] Sabatini, A.M.; Spinelli, E.: *Correlation Techniques for Digital Time-of-Flight Measurement by Airborne Ultrasonic Rangefinders*, Proceedings of the IROS '94, Munich, Germany, 1994
- [11] Stubenvoll, W.; Dimitrova, T.: *3D high accuracy sonar system for multiple mobile vehicles*, SPIE Conference on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing 1.-6. Nov. 1998 Boston
- [12] Handbook micro-line C44CPU, Orsys Orth System GmbH, Markdorf, Germany, 1996
- [13] Handbook micro-line AD4-612, Orsys Orth System GmbH, Markdorf, Germany, 1996
- [14] Handbook Innovative Integration M62, GBM mbH, Germany, Mönchengladbach, 1997