Julius-Maximilians-Universität Würzburg

Fakultät für Mathematik und Informatik

Informationstechnik für Luft- und Raumfahrt

Lehrstuhl für Informatik 8 Prof. Dr. Sergio Montenegro





Bachelorarbeit

Implementierung und Evaluierung eines Systems zur Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung für Indoor-Quadrokopter

Vorgelegt von

Paul Benz

Matr.-Nr.: 1701862

Prüfer: Prof. Dr. Sergio Montenegro

Betreuender wissenschaftlicher Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Nils Gageik

Würzburg, 30.04.2013

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit einschließlich aller beigefügter Materialien selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Werken entnommen sind, sind in jedem Einzelfall unter Angabe der Quelle deutlich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.
Mir ist bekannt, dass Zuwiderhandlungen gegen diese Erklärung und bewusste Täuschungen die Benotung der Arbeit mit der Note 5.0 zur Folge haben kann.

Würzburg, 30. 04. 2013

_____
Paul Benz

Aufgabenstellung

Implementierung und Evaluierung
eines Systems zur Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung
für Indoor-Quadrokopter

Die Fortschritte im Bereich Sensorik und Mikrotechnik ermöglichen heutzutage den kostengünstigen Bau kleiner unbemannter Luftfahrzeuge (UAV, unmanned airial vehicle, Drohne) wie Quadrokopter. Die Forschung und Entwicklung dieser Systeme wurde in den letzten Jahren aufgrund der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten stark vorangetrieben. Wenngleich im Bereich UAV viel geforscht wurde, ist das Thema Autonomes Flugobjekt längst noch nicht vollständig behandelt. Insbesondere der Indoor-Betrieb ist aufgrund fehlender absoluter Positionsstützung durch GPS problematisch. Der Aufbau eines eigenen autonomen Systems wird daher am Lehrstuhl Aerospace Information Technology der Uni Würzburg erforscht und erprobt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ist ein auf Ultraschall basierendes System zur Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung durch Hinzunahme von Infrarot-Sensoren zu erweitern.

Dazu ist die Anbindung der Infrarotsensoren an den Controller des Quadrocopters zu realisieren. Die Treiberanbindung sollte modular und erweiterbar sein. Das Verfahren zur Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung basierend auf Ultraschall soll durch Infrarot-Sensoren erweitert werden. Die bestehenden Routinen sollen erweitert oder erneuert werden. Dabei ist die bestehende Routine zur Kollisionsvermeidung bezüglich bekannter Schwachstellen (Anflugproblem, Zwischenflugproblem, Kontrollproblem) weiter zu optimieren. Ziel der Aufgabe ist es die Nachteile von Ultraschall zu überwinden und das System robuster zu gestalten. Das gesamte System ist in die existierende Quadrokopter-Software einzubinden und wird an diesem System evaluiert. Zur Aufgabe gehörte eine ausführliche Dokumentation. Des Weiteren ist das PC-Interface zum Auslesen der Infrarotdaten anzupassen.

Aufgabenstellung (Stichpunktartig):

- Infrarot implementieren: Montage + Treiber
- Datenfusion mit Ultraschall
- PC-Software erweitern
- Erweiterung Kollisionsvermeidungsalgorithmus
- Lösung: Anflugproblem, Zwischenflugproblem, Kontrollproblem
- Evaluierung
- Dokumentation

Zusammenfassung

Das Thema dieser Arbeit ist die Erweiterung der bestehenden Hinderniserkennung eines Quadrocopters mit Infrarotsensoren. Aus den Sensorwerten von vorhandener Ultraschallsensorik und Infrarotsensordaten, soll eine Datenfusion, den plausibelsten auswählen und als gültigen Abstandswert zum nächsten Hindernis in Sensorrichtung ausgeben. Die bisher auf diesem Quadrocopter eingebaute Ultraschallsensorik ist, aufgrund der Funktionsweise von Ultraschallsensoren, nicht dazu in der Lage, Hindernisse wie Vorhänge oder bekleidete Personen, wegen deren schallschluckenden Oberfläche, zuverlässig zu erkennen. Dieses Problem soll durch die, neu ins System integrierte, Infrarotsensorik kompensiert werden. Das Ziel des AQopterI8-Projekts der Universität Würzburg, ist der vollkommen autarke Flug im Inneren von unbekannten Räumlichkeiten. Die Verwendung von Karten oder Kamerasystemen zur Bestimmung der Position des Flugroboters ist dabei nicht möglich. Die Infrarotsensorik wurde daher so konstruiert, dass das Umfeld des UAVs, in Sektoren eingeteilt, rund um den Quadrocopter herum, wahrgenommen werden kann, um eine möglichst vollständige Hinderniserkennung zu erreichen.

Die Evaluierung der Datenfusion von Infrarot- und Ultraschallsensorik bestätigte das Potential von kostengünstigen Sensorsystemen für den Einsatz zur flächendeckenden Hinderniserkennung. Die, durch die Fusion der Daten gewonnene, Redundanz macht das System robuster gegenüber Messfehlern einzelner Sensoren. Basierend auf der Genauigkeit der Entfernungsbestimmung zu Hindernissen in der Umgebung, kann eine Abstandsregelung implementiert werden, die es dem Quadrocopter ermöglicht, Räume systematisch zu erforschen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung....1
2. Stand der Technik....3
2.1. Sensortechnik....3
2.2. Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung bei Unmanned Aerial Vehicles....12
2.3. Das System des AQopterI8....19
3. Konzept....24
3.1. Einleitung....24
3.2. Sensordatengewinnung....25
3.3. Sensordatenfilterung....27
4. Implementierung....28
4.1. Überblick....28
4.2. Hardwaredesign....29
4.3. Softwareentwurf....32
4.4. Erweiterung der Kontrollsoftware....37
5. Evaluierung....38
5.1. Sensorreichweite und -genauigkeit....38
5.2. Verhalten von Datenfilterung und -fusion....41
5.3. Funktionalität des Sensors zur Messung des optischen Flusses....45
5.4. Hinderniserkennung in Räumen....46
6. Diskussion und Ausblick....50
6.1. Diskussion der Ergebnisse....50
6.2. Ausblick....51
A. Anhang....54
A.1. Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft von der Umgebungslufttemperatur....54
A.2. Anordnung der Ultraschallsensorik am AQopterI8....55
A.3. Maße der SHARP GP2Y0A710K0F Infrarotsensoren....56
A.4. Charakteristik des Ausgangssignals des SHARP GP2Y0A710K0F Infrarotsensors....57
A.5. Maße der SHARP GP2Y0A02 Infrarotsensors....58
A.6. Charakteristik des Ausgangssignals des SHARP GP2Y0A02 Infrarotsensors....59
A.7. Adressierung und Ansteuerung der Gravitech ADC-I2C Analogdigitalwandler....60

1. Einleitung

In den letzten Jahren ist die Entwicklung von eingebetteten System stark voran geschritten. Darauf aufbauend, ergeben sich mehr und mehr Möglichkeiten im Bereich der Robotik, bestimmte Vorgänge zu autonomisieren. Durch die Erforschung von immer leistungsfähigeren Mikroprozessoren, können immer aufwändigere Systeme entwickelt werden. Der Gedanke, die Arbeit des Menschen durch den Einsatz von Maschinen zu erleichtern, ist zwar alt, doch können mit neuen Technologien immer wieder neue Anforderungen in der Autonomie an Systeme gestellt werden. So ist der Einsatz von UAVs (**U**nmanned **A**erial **V**ehicle) zur Erkundung, von, für den Menschen schwer zugänglichen Gebieten, längst kein reiner Gedanke mehr. Um jedoch den selbstständigen Flug von UAVs in Umgebungen, wie zum Beispiel einsturzgefährdeten Häusern, möglich zu machen, bedarf es noch einiger Forschungen in diesem Gebiet. Da die externe Positionsbestimmung durch GPS innerhalb von Gebäuden auf ihre Grenzen stößt, und auch der Einsatz von Karten in einer unbekannten Flugumgebung nicht möglich ist, muss das System in der Lage sein, nicht nur selbst eine Positionsbestimmung durchzuführen, sondern auch auftretende Hindernisse, wie zum Beispiel Wände, eigenständig und vor Allem zuverlässig zu erkennen. Solche Systeme, die ihre Umgebung absolut autonom erfassen, eigenständig in unbekannten Gebieten navigieren, und auf neue Situationen im Flug reagieren können, sind zur Zeit nur wenig untersucht.

Seit dem Jahr 2011 arbeitet der Lehrstuhl 8 der Informatik der Universität Würzburg an am AQopterI8-Projekt, dessen Ziel es ist, einen vollkommen selbstständig arbeitenden Quadrocopter zu entwickeln. Um diesem Quadrocopter einen sicheren Betrieb zu gewährleisten, werden Beschleunigungs- und Drehratensensoren, sowie eine Kamera zur Erfassung des optischen Flusses in Bodenrichtung verwendet, um die Lage des Systems zu stabilisieren. Für die Regelung der Flughöhe stützt sich die Software auf Messwerte von Distanzsensoren wie Ultraschall- und Infrarotsensoren. Die zur Hinderniserkennung eingesetzte Ultraschallsensorik erlaubt jedoch, aufgrund der gegebenen Eigenschaften dieses Sensortyps, nur bedingt ein sicheres Erkennen von auftretenden Hindernissen. Vor Allem bei Hindernissen mit schallschluckenden Oberflächen, wie Stoff (Vorhänge oder bekleidete Personen), weist die Ultraschallsensorik Schwächen in der zuverlässigen Entfernungsmessung auf. Die Integrierung einer Infrarotsensorik für die Hinderniserkennung, soll auf diese Mängel eingehen und für eine erhöhte Zuverlässigkeit durch Redundanz in der Datenerfassung, sorgen. Dabei sollen die Abstandsinformationen der bestehenden Ultraschallsensorik mit denen der entwickelten Infrarotsensorik fusioniert werden. Das System soll dadurch in der Lage sein, seinen Abstand zu erkannten Hindernissen aktiv zu regeln.

In dieser Arbeit wird das, ins System integrierte, Infrarotsensorsystem beschrieben. Dazu wird im Kapitel 2 zunächst auf die aktuell bestehenden Systeme zur Distanzmessung eingegangen. Im Weiteren werden bereits entwickelte Flugroboter mit Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung in diesem Kapitel betrachtet. Ebenfalls wird dort das bestehende System des

AQopterI8 der Universität Würzburg vorgestellt, wobei hier vor Allem der Fokus auf dem bestehenden Konzept zur Kollisionsvermeidung liegt, für welches die, im Rahmen dieser Arbeit entwickelte, Infrarotsensorik Entfernungsdaten liefert. Im Kapitel 3 wird das Konzept der neuen Sensorik erläutert. Kapitel 4 veranschaulicht die Implementierung dieses Konzepts, das in Kapitel 5 evaluiert wird. Abschließend soll in Kapitel 6 das Potenzial des neu entwickelten Systems diskutiert, und ein Ausblick für die weitere Forschung am AQopterI8 im Gebiet der Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung gegeben werden.

2. Stand der Technik

2.1. Sensortechnik

2.1.1. Allgemeines

Für UAVs, wie es der AQopterI8 der Universität Würzburg ist, ist vor Allem eine zuverlässige Sensorik von Nöten. Da auf der sicheren Hinderniserkennung des Quadrocopters aufbauend, eine Kollisionsvermeidungssoftware betrieben werden soll, sind hierfür in erster Linie Distanzsensoren entscheidend, die berührungslos den Abstand zum nächsten Hindernis in einem möglichst großen Sichtfeld genau ermitteln können. Für die Auswahl der Sensorik spielen daher zunächst Sensorgenauigkeit und -reichweite eine tragende Rolle. Ebenso zu berücksichtigen sind jedoch auch Gewicht, Sensorsamplerate und der maximale Winkel zwischen Hindernis und Sensorachse, in dem ein Hindernis erkannt werden kann. Einige Beispiele für solche Distanzsensoren sind Ultraschall-, Infrarot- oder auch Laserdistanzsensoren. Die Vor- und Nachteile der einzelnen Technologien werden im Folgenden näher erläutert.

2.1.2. Optoelektronische Sensoren

Optoelektronische Sensoren nutzen Lichtwellen als Medium zur Entfernungsmessung. Genutzt wird dabei die Reflexion eines Lichtsignals zur Messung. Das Messergebnis sollte möglichst nicht von der Oberflächenbeschaffenheit des Hindernisses abhängen Dazu nutzen diese Sensoren das, Prinzip der Triangulation oder Lichtlaufzeitmessung. Auf die genauen Funktionsweisen der Entfernungsmessung wird später genauer eingegangen. Grundsätzlich bestehen optoelektronische Sensoren aus einer Lichtsignalquelle (Sender) und einem Lichtsignaldetektor (Empfänger). Der Sender besteht aus einer Leuchtdiode, die in Durchlassrichtung betrieben, einen Lichtimpuls aussendet. Dieser wird durch eine Optik gebündelt und erhält dadurch eine erhöhte Richtwirkung. Trifft das vom Sender emittierte Signal auf ein Objekt, wird es von diesem diffus, also in mehrere Richtung, zurückgeworfen. Die Reflexion wird am Detektor registriert und in eine messbaren Spannung umgewandelt, aus der sich die Entfernung zum Ziel ermitteln lässt. Zu den optoelektronischen Sensoren gehören zum Beispiel die Infrarotsensoren, Laserdistanzsensoren oder auch Laserscanner, deren Funktionsweise im Weiteren genauer beschrieben wird [LinWegAbst, 2004].

2.1.2.1. Infrarotsensoren

Eine Form der optoelektronischen Sensoren stellen die Infrarotsensoren dar. Bei diesen emittiert eine Leuchtdiode im Sender ein kontinuierliches Signal im Infrarotbereich. Der etwas neben dem Sender angebrachte Detektor besteht aus einer speziellen, für Infrarotstrahlen empfindliche Fotodiode. Einfallendes Licht wird durch eine konvexe Linse gebündelt, sodass das der Punkt der höchsten Lichtintensität (Auftreffpunkt) auf der Fotodiode vom Einfallswinkel des Lichtstrahls abhängt. Der Detektor liefert dann, je nach Position des Auftreffpunkts, eine Ausgangsspannung, von der sich auf eben diesen Einfallswinkel zurück rechnen lässt. Über das Prinzip der Triangulation kann man dann die Entfernung des Objektes ermitteln, von dem der vom Sender ausgesandte IR-Strahl reflektiert wurde [SHARP, 2013]. Wie der Einfallswinkel anhand des Auftreffpunkts bestimmt wird, ist im nächsten Abschnitt dargestellt.

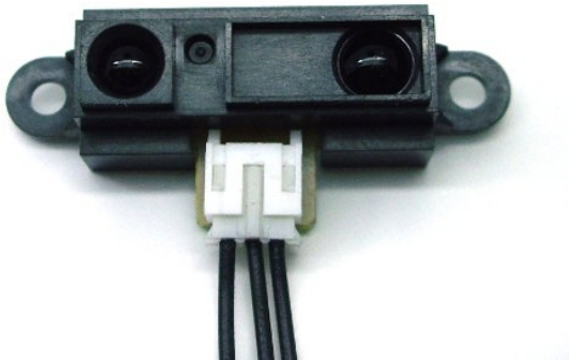


Abbildung 1: SHARP Inrarotsensor

Methoden zur Bestimmung des Einfallswinkels

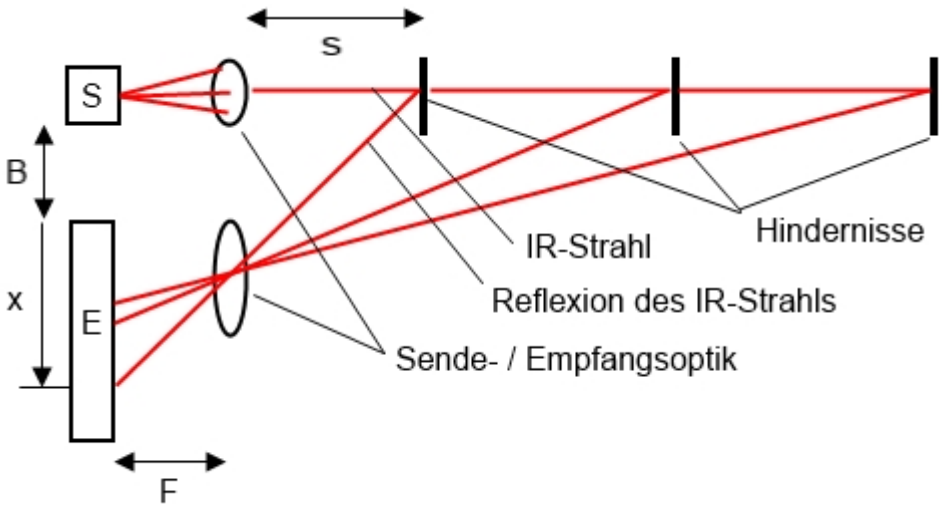
Eine Methode, den Einfallswinkel des IR-Strahls am Detektor zu erhalten, ist das Verwenden eines PSD-Elements (**PSD**: **P**osition **S**ensitive **D**etector). Dieses ist eine ausgedehnte Fotodiode. Im Gegensatz zu einfachen Fotodioden, hängt die Ausgangsspannung hier nicht von der Lichtintensität ab. Stattdessen wird hier der Strom der beim Auftreffen des Lichtsignals fließt, so in zwei Teilströme zerlegt, dass man aus dem Verhältnis der Teilströme auf die Position des Auftreffpunkts und damit auf den Einfallswinkel schließen kann.
Eine andere Technologie zur Ermittlung des Einfallswinkels sind sogenannte CCD-Zeilen (**CCD**: **C**harge **C**oupled **D**evice). Sie bestehen aus mehreren nebeneinander angeordneten Fotodioden, deren Ausgangsstrom direkt, in ihnen zugeordneten Kondensatoren gespeichert wird. Anhand des Ladeprofils der Kondensatoren kann man die genaue Position des Hauptmaximums der Reflexion erkennen.Hierüber erhält man wiederum den Einfallswinkel, aus dem sich per Triangulation die Entfernung zum Objekt, an dem das Sendesignal reflektiert wurde, ergibt.

Das Prinzip der Triangulation

Infrarotsensoren sind so konstruiert, dass Sender, Empfänger und Objekt ein Dreieck bilden. Sind im Dreieck 2 Winkel und die dazwischen liegende Seite bekannt, ist das Dreieck vollständig definiert und alle anderen Größen im Dreieck können eindeutig bestimmt werden. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger ist durch die Bauform gegeben. Des Weiteren strahlt der Sender orthogonal zur Sender-Empfänger-Achse. Der Winkel am Detektor entspricht dem dort bestimmten Einfallswinkel. Für die Entfernung vom Sender zum Hindernis s ergibt sich also aus Abstand Sender – Empfänger B, Abstand Optik am Detektor – Fotodiode F und Auftreffpunkt x:

$$s = \frac{B \cdot F}{x} \tag{1}$$

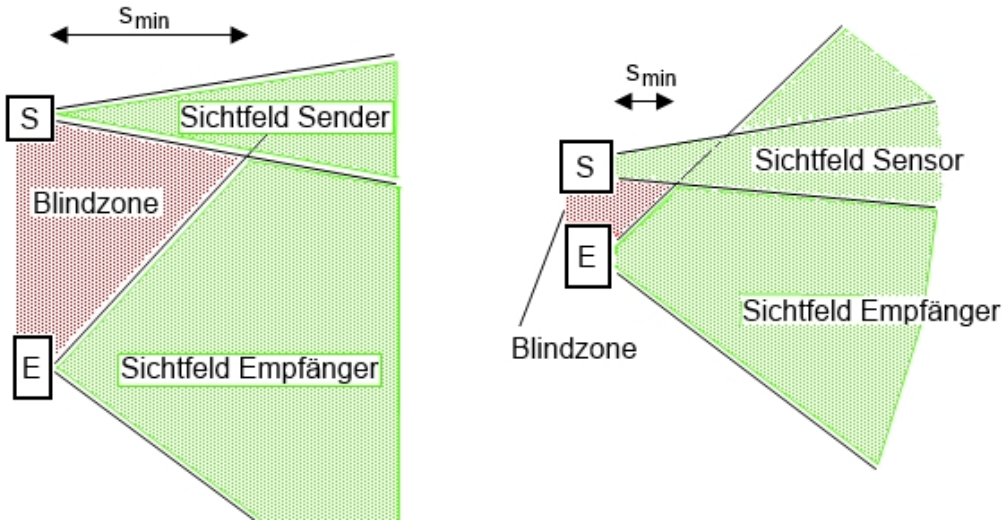
s: Entfernung zum Objekt
B: Abstand zwischen Sender und Empfänger
F: Abstand zwischen Optik am Detektor und Fotodiode
x: Auftreffpunkt der Reflexion auf der Fotodiode



Zeichnung 1: Ausbreitung und Reflexion des IR-Strahls

Der Einfallswinkel hängt tangential von der Entfernung zum Objekt ab. Die Winkeländerung wird also mit zunehmendem Abstand immer geringer. Da die Auflösung der Einfallswinkelbestimmung beschränkt ist, kann eine Abstandsänderung ab einem gewissen Abstand nicht mehr differenziert ermittelt werden. Das legt die obere Schranke des Messbereiches von Infrarotsensoren fest. Je größer jedoch der Abstand zwischen Sender und Empfänger ist, desto größer ist der Einfallswinkel am Detektor bei gleicher Entfernung. Hierdurch lassen sich wiederum größere Distanzen zuverlässig bestimmen. Die Untergrenze des Messbereichs s_min ist auf der anderen Seite durch die Blindzone gegeben. Diese ergibt sich, aufgrund des Öffnungswinkels von Sender und Empfänger direkt am Sensor beginnend, bis zu einer gewissen Entfernung reichend, in der sich die beiden Sichtwinkel von Sender und Empfänger wieder überschneiden. Befindet sich ein Hindernis innerhalb dieser Blindzone, kann der Sensor dessen Entfernung nicht mehr differenziert ermitteln.

Der so definierte Mindestabstand ist umso kleiner, je näher Sender und Detektor beieinander liegen. Um kleinere Entfernungen zu bestimmen, ist der Abstand zwischen Sender und Empfänger also klein zu halten. Dadurch wird die Größe der Blindzone reduziert. Für die Bestimmung größerer Entfernungen ist weniger die Mindestentfernung als die maximale Reichweite des Sensors relevant. Der Abstand zwischen Sender und Empfänger wird hier also erhöht, um auch Distanzen zu weiter entfernten Objekten, durch eine bessere Auflösung differenziert bestimmen zu können (vgl. Zeichnung 2).



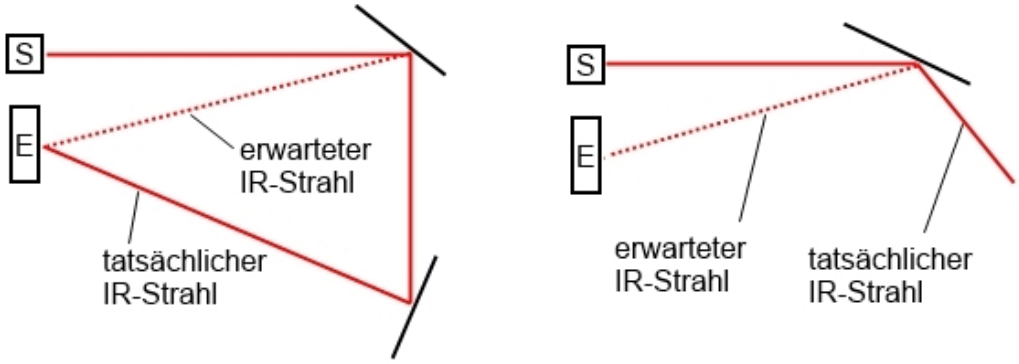
Zeichnung 2: Verhalten der Blindzone in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Sender und Empfänger

Wie bereits erwähnt, kommt es bei der Entfernungsmessung mit optoelektronischen Sensoren darauf an, unabhängig von der Intensität des ausgesandten Signals und dessen Reflexion zu messen. Die Methode der Triangulation gewährleistet dies, indem sie die zu ermittelnde Größe einzig von Winkeln und bekannten Größen abhängig macht, die sich nicht auf eine Strahlungsdichte beziehen. Das Messergebnis ist somit auch nicht von der Beschaffenheit und Farbe der Oberfläche des Hindernisses abhängig. Es bleibt jedoch zu beachten, dass die Intensität eines, sich radial ausbreitenden, Signals quadratisch mit der Entfernung zur Quelle abnimmt. Man kann also die Reichweite dieser Sensorart nicht beliebig durch die Vergrößerung des Abstands zwischen Sender und Empfänger maximieren, ohne die Leistung der Infrarotquelle des Senders zu berücksichtigen. Um immer größere Distanzen bestimmen zu können, bedarf es also zunehmender Lichtleistung neben immer größere werdenden Gehäusen, um Sende- und Empfangseinrichtung unterzubringen, was natürlich mit einer Zunahme des Gewichts einher geht. Da diese Methode ab einer gewissen Entfernung ineffizient wird, nutzt man dann Laserdistanzsensoren, deren Funktionsweise später erläutert wird.

Messfehler bei IR Sensoren

Störquellen, wie andere Infrarotlichtquellen, können die Messung stark beeinträchtigen, da der Empfänger des Sensors nicht zwischen der Reflexion des IR-Strahls des eigenen Senders und anderen Infrarotlichtquellen unterscheiden kann. Es kommt zu sogenannten Scheinechos. Werden in einem System mehrere Infrarotsensoren verwendet, ist also darauf zu achten, dass die verschiedenen Sensoren sich nicht gegenseitig beeinflussen. Neben den Messfehlern durch

Störsignale kann es andererseits zu kritischen Fehlern durch Doppel- oder Totalreflexion kommen, bei denen das emittierte Signal falsch oder gar überhaupt nicht zum Detektor des Sensors zurückgeworfen wird. Bei Doppelreflexionen wird des Signal zweifach an Hindernissen reflektiert und trifft somit unter einem anderen Einfallswinkel am Empfänger auf, was wiederum zu falschen Entfernungsdaten führt. Noch kritischer sind die sogenannten Totalreflexionen. Trifft ein Lichtsignal ungünstig auf eine schräg zur Ausbreitungsrichtung des Infrarotstrahls stehenden Oberfläche, wird die Reflexion nicht mehr in Richtung Sensor zurückgeworfen und somit nicht registriert, was gleichzeitig ein Nichterkennen des Hindernisses bedeutet (vgl. Zeichnung 3).



Zeichnung 3: Strahlverlauf bei Doppel- (links) und Totalreflexion (rechts)

Eindämmung von Messfehlern bei Infrarotsensoren

Während das Auftreten von Messfehlern durch Totalreflexion kaum zu verhindern ist, kann man Störeffekten wie Scheinechos gezielt entgegenwirken. Grundsätzlich sind diese umso wahrscheinlicher, je näher zwei Sensoren und dessen Sensorachsen aneinander liegen. Ordnet man die Sensoren sternförmig an, so ist das Risiko der gegenseitigen Beeinflussung zwar reduziert, doch kann durch Doppelreflexion immernoch ein von Sensor A abgefeuerter Infrarotstrahl zum Sensor B umgelenkt werden und zu einem falschen Messergebnis führen. Um dem aus dem Weg zu gehen, steuert man die Sensoren in Systemen mit mehreren Sensoren möglichst so an, dass stets nur das vom sensoreigenen Sender emittierte Licht detektiert und zur Entfernungsmessung herangezogen wird, indem zum Beispiel immer nur ein Sensor gleichzeitig betrieben wird. Wurde ein Sensor abgefeuert, darf so lange kein anderer Sensor angesteuert werden, bis von diesem Sensor das Ergebnis vorliegt. Dadurch ist sichergestellt, das der Infrarotstrahl abgeklungen ist und nicht mehr von anderen Sensoren registriert werden kann.

Vor- und Nachteile von Infrarotsensoren

Durch die Optik am Sender kann der Infrarotsensor eine hohe Richtgenauigkeit, und damit Winkelauflösung erreichen, die nötig ist, um die Position eines Hindernisses exakt bestimmen zu können. Bei Sensoren mit einer Reichweite von weniger als zehn Meter ist dessen Gewicht sehr gering (< 10g). Dem gegenüber steht allerdings eine relativ hohe Störanfälligkeit durch Nebel oder Rauch. Auch bei der Erfassung von, schräg zur Sensorachse stehenden, Hindernissen sind diese Sensoren ungenau. Ebenfalls besteht die Gefahr, dass ein Hindernis nicht erkannt wird, wenn

dessen Oberfläche den Infrarotstrahl zu schwach reflektiert, um vom Sensor detektiert zu werden, wie es zum Beispiel bei Glas der Fall ist. Das Preis-Leistungsverhältnis der Infrarotdistanzsensoren ist jedoch gut (Kosten ca 20€).

2.1.2.2. Laserdistanzsensoren

Einfache Lasersensoren

Eine andere Form der optoelektronischen Entfernungssensoren sind Laserdistanzsensoren. Sie basieren auf dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung. Zur Entfernungsbestimmung misst man die Zeit, die vom Aussenden eines Laserimpulses vom Sensor, bis zu der Registrierung seiner Reflexion im Sensor, vergeht. Die Lichtquelle des Senders emittiert hier ein phasen- und wellengleiches Laserlichtbündel mit hoher Strahlungsdichte, das auch noch bei größeren Entfernungen zwischen Sender und Hindernis die nötige Lichtstärke aufweist, um vom Detektor registriert zu werden. Die Laufzeit des Laserimpulses hängt nur von der konstanten Lichtgeschwindigkeit und der Entfernung des Objekts, von dem der Laserimpuls reflektiert wird, ab. Dadurch können sehr zuverlässig und präzise Entfernungen bestimmt werden. Da die Laufzeit des Impulses mit zunehmender Entfernung immer größer wird und dabei die Reaktionszeit des Sensors und damit dessen zeitliche Auflösung unverändert bleiben, können mit dieser Technologie sehr große Distanzen gemessen werden. Die Sensorreichweite hängt nur von der Stärke des im Sensor verwendeten Lasers ab. Für die Untergrenze des Messbereichs ist die Reaktionszeit und zeitliche Auflösung der Fotodiode verantwortlich. Je genauer das Zeitintervall vom Senden bis zum Empfangen ermittelt werden kann, desto schärfer ist die Distanzmessung. Der kleinste messbare Abstand entspricht dabei der Hälfte der Strecke, die das Signal im kleinsten vom Sensor differenzierbaren Zeitintervall zurücklegt. Auch hier ist die Intensität des Signals und dessen Reflexion für das Messergebnis selbst nicht von Bedeutung. Es ist jedoch darauf zu achten, dass auch die Strahlungsdichte von Laser mit der Entfernung quadratisch abnimmt. Ist die Entfernung des Hindernisses zu groß, wird die Reflexion zu schwach, um vom Detektor vom Hintergrundrauschen unterschieden werden zu können. Für die genaue Entfernung s ergibt sich aus der gemessenen Zeit t und der Ausbreitungsgeschwindigkeit c des Lichts:

$$s = \frac{t}{2} \cdot c \tag{2}$$

s: Entfernung zum Objekt
t: Laufzeit des emittierten Laserstrahls
c: Lichtgeschwindigkeit

Laserscanner

Eine Erweiterung zu den einfachen Laserdistanzsensoren sind Laserscanner. Diese nutzen das selbe das Prinzip der Laserstrahlemittierung und -registrierung wie die zuvor vorgestellten einfachen Laserdistanzsensoren. Laserscanner haben den Vorteil, dass sie nicht nur die Distanz zu einem einzigen Messpunkt messen können, sondern in der Lage sind, in einem großen Scansektor von 180° bis 270° FOV (**F**ield **o**f **V**iew) Entfernungsdaten zu ermitteln. Dazu wird im Scankopf des Sensors der Laserstrahl durch einen Spiegel umgelenkt. Die aktuelle Stellung des Spiegels wird elektronisch geregelt, damit der durch den Sensor erfassten Abstand einer bestimmten Richtung zugeordnet werden kann. So ist es möglich, mit einem einzigen Sensor ein großes Gebiet um den

Sensor herum auf Hindernisse zu untersuchen. Diese Technik ist sowohl für das Scannen von 2D Ebenen, oder 3D Räumen einsetzbar. Um den Sensor dreidimensional verwenden zu können, muss der Spiegel zur Umlenkung des Laserstrahls senkrecht zur Drehrichtung kippbar sein oder ein zweiter orthogonal zum ersten Spiegel angeordneter Spiegel die Ablenkung des Strahls möglich machen. Die Winkelauflösung beträgt ca 1°, es können also mit einem Scanvorgang bei einem Scanbereich von 270° 270 Entfernungen um den Sensor herum bestimmt werden. Dafür benötigt der Scanner ca 25ms. Der Messvorgang kann also etwa 40 mal pro Sekunde wiederholt werden [HOKUYO, 2013].



Abbildung 2: Hokuyo Laserscanner

Vor- und Nachteile von Laserdistanzsensoren und -scannern

Die zuletzt vorgestellten Technologien weisen vor Allem eine hohe Präzision in der Messung auf. Selbst bei großen Entfernungen sind Laser sehr genau. Die durch die Laserscanner angebotene Winkelauflösung ist ebenfalls sehr hoch, was für ein gutes Hinderniserkennungssystem äußerst hilfreich ist. Auf der anderen Seite sind Laserdistanzsensoren sehr teuer (ca USD $2500 – $5500), schwer (ca 200g - 400g) und benötigen viel Platz durch ihr großes Sensorgehäuse.

2.1.3. Ultraschallsensoren

Ultraschallsensoren nutzen, wie die Laserdistanzsensoren, das Prinzip der Laufzeitmessung. Hier ist es die Laufzeit eines vom Sensor ausgesandten Ultraschallimpulses. Der Impuls wird vom Objekt, auf das er trifft, reflektiert und kommt nach einer bestimmten Zeit wieder am Sensor an. Die Zeit, die der Impuls vom Aussenden bis zu seiner Registrierung braucht, ist direkt proportional zur Entfernung zwischen Sensor und Objekt. Die Obergrenze des Messbereichs ist durch die Stärke des Ultraschallsenders gegeben. Ist der Gegenstand zu weit weg, ist die Reflexion zu schwach, um vom Sensor wahrgenommen zu werden. Ähnlich zum Lasersensor ist die kleinste messbare Entfernung abhängig von der Wiederholrate der Messung. Beim Ultraschallsensor ist diese durch die Abklingzeit des Sensors und der Laufzeit des Ultraschallsignals bestimmt. Die Abklingzeit bezeichnet hier die Zeit, die nach der Aktivierung des Sensors vergeht, bis der Sensor wieder Signale aussenden kann [DEVANTECH, 2013].



Abbildung 3: Devantech Ultraschallsensor

Im Gegensatz zu Licht, kann bei Schall die Ausbreitungsgeschwindigkeit für die Wiederholrate nicht unberücksichtigt bleiben. In Abhängigkeit von den Ausbreitungsgeschwindigkeiten von Schall c_{Schall} = ~330m/s und Licht c_{Licht} = ~300*10^6 m/s ergeben sich zum Beispiel für eine Entfernung s von 10 m die Laufzeiten t_{Schall} und t_{Licht} eines Signals vom Sender bis zum Empfänger aus:

$$t = \frac{2 \cdot s}{c} \tag{3}$$

$$t_{Schall} = \frac{2 \cdot s}{c_{Schall}} = \frac{2 \cdot 10{,}0\,m}{330\mathrm{m}/s} = 60{,}6\,ms$$

t_{Schall}: Laufzeit eines Schallsignals für die Strecke vom Schallsender zu einem Hindernis in 10m Entfernung und zurück
c_{Schall}: Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall

$$t_{Licht} = \frac{2 \cdot s}{c_{Licht}} = \frac{2 \cdot 10{,}0\,m}{300 \cdot 10^6\,m/s} = 6{,}67 \cdot 10^{-8}\,s = 66{,}7\,ns$$

t_{Licht}: Laufzeit eines Lichtsignals für die Strecke vom Schallsender zu einem Hindernis in 10m Entfernung und zurück
c_{Licht}: Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht

Damit der Sensor Objekte in einer Entfernung von 10 Metern Entfernung registrieren kann, muss er also wenigstens 60 ms warten, bevor er einen erneuten Messvorgang startet. Ansonsten würde der Sensor das, bei der vorangegangenen Messung ausgesandte Signal, als Reflexion des zur aktuellen Messung gefeuerten Impulses auffassen. Die gemessene Laufzeit entspräche dann der Dauer von Beginn der zweiten Messung bis zum Auftreffen im Detektor und wäre somit um die Zeit zwischen erstem um zweitem Sensorfeuern kürzer. Der gemessene Entfernungswert ist dann geringer als der tatsächlichen Abstands und falsch. Bei Lasersensoren ist die Lichtlaufzeit von ca 70 ns bei einer Samplerate von 1ms vernachlässigbar klein.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall schwankt mit der Dichte des Mediums in dem er sich ausbreitet. Weiterhin hängt die Dichte der Luft von der Temperatur ab [ELV, 2013]. Für den Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit c_{Luft} und Lufttemperatur T (in °Kelvin) kann man folgendes schließen (vgl Abb. 27):

$$c_{Luft} = 20{,}063 \cdot \sqrt{\frac{T}{°C} + 273{,}15}\,\frac{m}{s} \tag{4}$$

c_{Luft} :Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in der Luft
T: Lufttemperatur in ° Celsius

Ein Nichtbeachten der momentanen Umgebungstemperatur führt also unweigerlich zu Fehlern im Messergebnis. Um diese auszugleichen, ist es notwendig, die Temperatur um den Sensor herum zu bestimmen und in die Entfernungswertermittlung mit einfließen zu lassen.

Aus der Laufzeit t des Schallsignals und der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in der Luft c_{Luft} erhält man die Entfernung s zum Hindernis durch:

$$s = \frac{c_{Luft} \cdot t}{2} \tag{5}$$

Vor- und Nachteile von Ultraschallsensoren

Ultraschallsensoren sind, wie die Infrarotsensoren, leicht in ihrer Bauweise (ca 5g). Im Gegensatz zu Infrarotsensoren haben Ultraschallsensoren keine Probleme in nebliger oder verrauchter Umgebung. Beim Erkennen von Hindernissen mit schallschluckender Oberfläche wie Vorhänge, haben diese Sensoren jedoch große Schwierigkeiten. Auch der Öffnungswinkel ist hier sehr groß, sodass eine hohe Winkelauflösung nur bedingt zu realisieren ist. Desweiteren ist das gelieferte Messergebnis neben der eigentlichen Entfernung von der Umgebungstemperatur abhängig. Die Sensorabfragerate ist mit 1 / 65ms sehr niedrig. Der Aktuelle Kaufpreis liegt bei ca 10€.

2.1.4. Distanzmessung mit Stereokameras

Wie schon bei den Infrarotsensoren beschrieben, kann man die Entfernung eines Gegenstandes per Triangulation ermitteln, wenn man die Blickwinkel auf das Objekt von zwei verschiedenen Richtungen aus kennt. Das wird auch bei sogenannten Stereokameras ausgenutzt. Diese nehmen die Umgebung mit zwei, in fester Anordnung zueinander stehenden Kameras gleichzeitig auf, sodass sich für die selbe Situation zwei leicht verschobene Bilder ergeben. Aus der Verschiebung der Pixel unter den beiden entstehenden Bildern lässt sich wieder per Triangulation die Entfernung jedes einzelnen Pixels zum Kamerasystem berechnen. Es ergibt sich ein flächendeckendes Tiefenbild mit einer sehr hohen Tiefenauflösung. Analog zur Berechnung der Entfernung bei Infrarotsensoren, ist der Abstand zwischen den beiden Kameras möglichst groß zu wählen, um eine gute Messauflösung

auch bei der Bestimmung von höheren Distanzen zu erhalten. Desweiteren ist für die digitale Datenverarbeitung im Sensorsystem ein großer Rechenaufwand zu leisten. Dafür ist es mit leistungsfähiger aber auch schwerer Hardware ausgestattet [PMD, 2013].

Distanzmessende Stereokameras bieten eine sehr große Informationsdichte durch ihre hohe Auflösung und Messgenauigkeit, auch bei der Bestimmung von größeren Distanzen. Die Messung ist stark abhängig von den Sichtverhältnissen, da selbst kleinste Partikel in der Luft zu Rauschen im Datenfluss führen. Zudem ist der Öffnungswinkel solcher Kameras beschränkt, sodass die Umsetzung einer 360°-Hinderniserkennung nur durch Einsatz mehrerer dieser schweren, großen und kostenaufwändigen Systeme zu erreichen wäre.

2.2. Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung bei Unmanned Aerial Vehicles

Grundsätzlich bezeichnet die Hinderniserkennung das Registrieren von Gegenständen in der näheren Umgebung, während die Kollisionsvermeidung die Aufgabe hat, anhand der Daten aus der Hinderniserkennung, Zusammenstöße mit Hindernissen zu verhindern. Eine sichere Kollisionsvermeidung beruht also auf der zuverlässigen Erkennung von Gegenständen in Kollisionskurs. Daten für die Kollisionsvermeidung können einerseits von, im System gespeicherten Karten zur Umgebung stammen oder während dem Flug von eingebauten Sensoren gesammelt werden. In beiden Fällen muss eine ständige Überprüfung der Position gewährleisten, dass das UAV sich nicht zu nah an Hindernisse annähert. Je häufiger diese Überprüfung stattfindet, desto schneller kann das System Situationsänderungen erkennen. Für eine Abstandsregelung des Quadrocopters zu Hindernissen, ist zudem eine möglichst hohe Samplerate von Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung wünschenswert. Das System kann umso besser stabilisiert werden, je mehr Informationen über die Lage des UAVs zur Verfügung stehen und je öfter das System auf seine Lage Einfluss nehmen kann. Es ist also erforderlich, die Samplerate von Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung zu optimieren. Die maximale Samplerate der Hinderniserkennung hängt in erster Linie von der maximalen Sensorabfragerate ab, die stark von der Art der verwendeten Sensorik abhängt. Während Ultraschallsensoren, wie bereits dargestellt, ca. 65ms für einen Messvorgang benötigen, ist bei Infrarotsensoren bereits nach weniger als einer Millisekunde ein neuer Messwert von Sensor auslesbar. Für die Samplerate der Kollisionsvermeidung ist vor Allem der Rechenaufwand im Bordcomputer entscheidend. Je mehr Daten verarbeitet werden müssen, desto mehr Zeit wird für die Auswertung benötigt. Für eine, in Echtzeit laufende, Regelung des UAV, ist die Reduzierung von großen Datenmengen und hohen Rechenanforderungen daher erstrebenswert. Beruht eine Hinderniserkennung auf Sensoren, die den genauen Abstand zu Hindernissen in der Umgebung bestimmen, besteht die Möglichkeit, aus den, von ihnen gelieferten Entfernungsdaten eine Karte zur Umgebung zu erstellen. Die Hinderniserkennung wiederum, könnte eine vorhandene Karte nutzen, um die, von den Sensoren gelieferten Werte zu unterstützen, wodurch im Weiteren die Kollisionsvermeidung robuster und zuverlässiger würde, da sie mit verlässlicheren Informationen arbeiten könnte. Diese Idee der gegenseitigen Kontrolle durch verschiedene Systeme, nennt man Redundanz. Je höher die Redundanz in der Hinderniserkennung, desto verlässlicher kann ein Hindernis und damit eine gegebene Kollisionsgefahr erkannt werden. Die Möglichkeit der Erweiterung der Sensorik, die für die Hinderniserkennung zum Einsatz kommt, stellt somit einen wichtigen Aspekt für die Kollisionsvermeidung dar.

2.2.1. Bestehende Systeme mit Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung

Im Folgenden werden, bereits entwickelte, Unbemannte Flugroboter betrachtet. Hier soll untersucht werden, wie die Problematik der selbstständigen Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung bisher aufgegriffen wurde. Weiterhin soll festgestellt werden, wo, in den einzelnen Systemen, die Schwierigkeiten bei der Lösung des Problems, Hindernisse zuverlässig zu erkennen und diesen auszuweichen, lagen.

Hexa-Rotorcraft, Yokohama, National University

Das an der Yokohoma National University entwickelte „tetraedron Hexa-Rotorcraft“ (dot-HR) [DOT-HR, 2012] ist ein mehrrotoriges UAV (siehe Abb. 5). Es verwendet einen horizontal ausgerichteter Laserscanner des Typs URG-04LN des Herstellers Hokuyo mit einer Sensorabtastrate von 1 Hz und einer Winkelauflösung von 2,7° sowie 1% Messgenauigkeit, zur Abstandsmessung. Dieser Scanner misst den Abstand zum nächsten Hindernis in einer Ebene. Wird der Sensor geneigt, ermittelt er nicht mehr die horizontale Entfernung zum Hindernis, es kommt zu unerwünschten Verfälschungen. Beim dot-HR wurde dieses Problem behoben, indem ein Aufbau entwickelt wurde, der es dem UAV ermöglicht, horizontale Bewegungen durchzuführen, ohne seine Quer- oder Längsneigung zu ändern. Die sechs Rotoren dieses UAVs sind, nicht wie bei anderen mehr-rotorigen Flugkörpern horizontal, sondern etwas schräg zur Waagerechte ausgerichtet. Somit erzeugen die Rotoren einen Schubvektor, der nicht nur nach oben, sondern gleichzeitig in eine horizontale Richtung zeigt. Durch die schräge Anordnung verliert der Antrieb an Effizienz, da der Schubvektor nicht vollständig in die gewünschte Flugrichtung zeigt. Um die Position zu halten, müssen sich die horizontalen Schubkräfte in die verschiedenen Richtungen ausgleichen, da sonst eine unerwünschte Beschleunigung auftreten würde. Die Verluste in der Effizienz zeichnen sich vor Allem in einem erhöhten Energieverbrauch und einer dadurch verminderter Akkulaufzeit ab.
Zur Kollisionsvermeidung nutzt der dot-HR das Prinzip des „Information Amount Feedback“. Hierzu ermittelt die Onbordelektronik das Verhältnis aus der vom Sensor wahrgenommenen Fläche und dem, theoretisch zwar erfassbaren, aber durch Hindernisse verdeckten Gebiet (vgl. Abb. 4). Befinden sich viele Objekte rund um das Hexa-Rotorcraft, wird das Verhältnis kleiner. So erhält der dot-HR einen einfachen Wert für die Offenheit der Umgebung und damit für die momentan bestehende Kollisionsgefahr. Unterschreitet der berechnete Wert eine Mindestgrenze, muss das System darauf reagieren und ein Manöver fliegen, um wieder in offeneres Gebiet zu kommen. Um zu erkennen, in welcher Richtung Raum zu Ausweichmanövern vorhanden ist, vergleicht die Software die Sichtverhältnisse im linken und rechten Scanbereich miteinander. Dadurch ist der dot-HR in der Lage, um erkannte Hindernisse, wie zum Beispiel Wände, herum zu navigieren, und hinter die Wand „blicken“ zu können, wodurch wieder ein besseres Information Amount Feedback zu erhalten wird (siehe Abb. 6). Die Sensorabfragerate des Scanners ist mit 1Hz (1 pro Sekunde) sehr gering. Das System kann also auf plötzliche Situationsänderungen kaum rechtzeitig reagieren. Zudem stellt der Laserscanner die einzige Sensorik zur Hinderniserkennung dar. Hierdurch könnten, durch die Sensorik verursachte, Messfehler unerkannt bleiben, da sie nicht durch andere Entfernungsdaten gestützt oder überprüft werden. Ebenso liegen bei diesem System keine Ansätze für eine Lageregelung anhand der verwendeten Sensorik vor.



Abbildung 5: dot-HR Hexarotorcraft

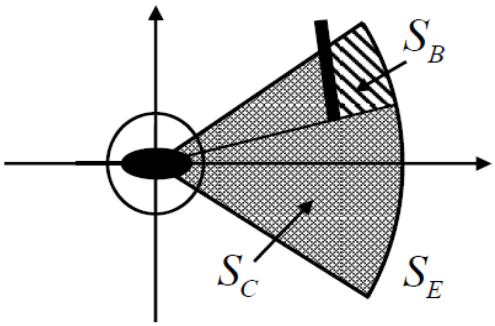


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Information Amount Feedback (S_E: vom Laserscanner erfassbarer Bereich, S_C: vom Laserscanner erfasster, Hindernisfreier Bereich, S_B: Blockiertes Sichtfeld

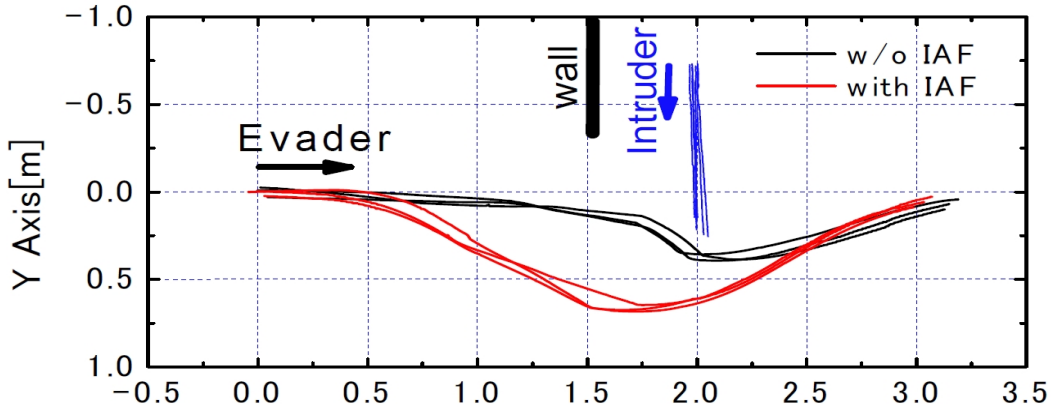


Abbildung 6: Verhalten des dot-HR bei Annäherung an ein Hindernis

Visual Threat Awareness (VISTA), Scientific Systems Company, Woburn

An der Scientific Systems Company (SSC) in Woburn [VISTA, 2005] wurde ein System zur Hinderniserkennung entwickelt, das für die Anwendung außerhalb von Gebäuden konzipiert ist. VISTA (visual threat awareness) ist analog zum menschlichen Sehsystem konstruiert. Verwendet wird eine nach vorne gerichtete Stereokamera, die die Aufnahme von Tiefen, also 3 dimensionale Wahrnehmung der Umgebung möglich macht. Der Abstand zwischen den Einzelnen Kameras der Stereokamera beträgt hier 0,5m. Das Tiefenbild der Stereokamera wird für die Auswertung zunächst in einer Disparity-Map abgespeichert. Im Weiteren werden die so gewonnenen Tiefeninformationen über die Umgebung mit dem optischen Bild verglichen, um Bereiche ausfindig zu machen, in denen ein Hindernis wahrscheinlich ist. Über das sogenannte Foveation-Verfahren lenkt die Software den Fokus der Berechnungen zur Hinderniserkennung auf Bereiche im Bild, die zuvor als Gefahrbereiche markiert wurden. Dadurch wird die Effizienz der Hinderniserkennung erhöht und gleichzeitig der Rechenaufwand eingedämmt. So entsteht eine Karte mit sämtlichen Hindernissen in der Umgebung des Flugkörpers, die als Anhaltspunkt für eine Kollisionsvermeidung dienen kann. Für die Berechnung der Disparity-Map verwendete die SSC einen Sarnoff Corp's Acadia I Vision

Prozessor, für 640 x 480 Stereooptiken mit einer Bildfrequenz von 23 Hz, was einer Rahmendauer von etwa 45ms entspricht. In Flugtests wurde eine Regelfrequenz von 5Hz- 10Hz (100ms – 200ms) je nach Komplexität der Umgebung gemessen. Ob diese Wiederholungsrate im Indoor-Flug für eine stabile Regelung des Systems ausreicht, bleibt zu prüfen. Des weiteren wird nicht dargestellt, ob die aufwändige Datenauswertung der Stereokamera komplett vom Bordcomputer erledigt wird, oder ob, zu dessen Unterstützung, weitere Rechnerkapazitäten am Boden in Anspruch genommen wurden. Ungeklärt bleibt auch, wie zuverlässig das Hinderniserkennungssystem in dunklen oder kontrastarmen Einsatzgebieten arbeitet. Der Autor verdeutlicht abschließend, dass in weiteren Versuchen die Fehleranfälligkeit des Hinderniserkennungssystems weiter verbessert werden soll.

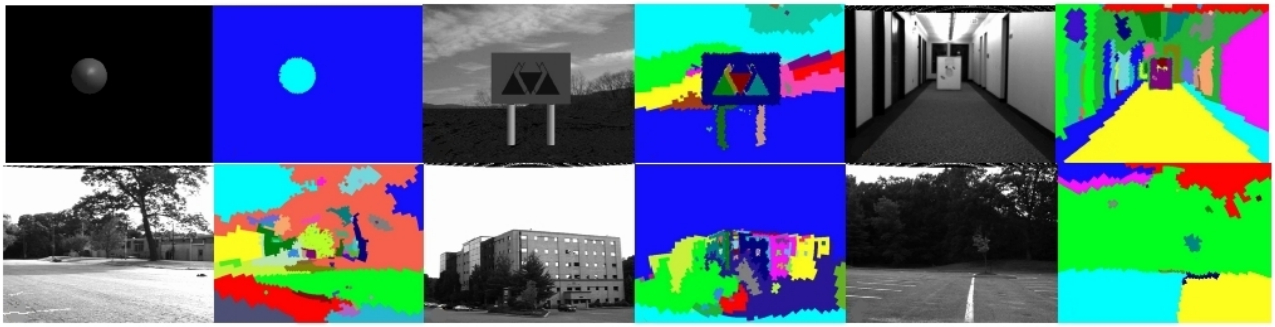


Abbildung 7: Datenfilterung des VISTA-Systems

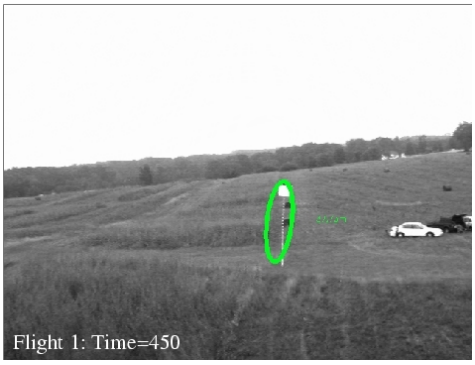


Abbildung 8: Fokusierung des VISTA-Systems auf ein Hindernis

Kollisionsvermeidung mit Dopplerradar, University of Sydney

An der Universität in Sydney verwendeten Studenten ein Dopplerradar, um Hindernisse in der Flugbahn eines UAVs zu erkennen [RCA Sydney, 2006]. Als Flugaufbau wurde ein Flugkörper mit festen Flügeln verwendet (siehe Abb. 9). Da solche Flugkörper nicht in der Lage sind seitlich versetzt oder gar rückwärts zu fliegen, beschränkt sich das hier verwendete System auf die frontale Hinderniserkennung. Der eingebaute Dopplerradarsender hat eine Abtastrate von 10Hz und eine theoretische Reichweite von 10 – 15m sodass dem System für die Berechnung der neuen Flugkurve und der Ausführung des Manövers bei einer Fluggeschwindigkeit von 8 m/s ca 1 - 2 Sekunden bleiben, um dem Hindernis auszuweichen. Das Flugverhalten des verwendeten UAVs bedingt einen Kollisionsvermeidungsalgorithmus, der das Ausweichen ohne Verringerung der Fluggeschwindigkeit möglich macht, da sonst Strömungsabrisse nicht auszuschließen wären. Der Radarsensor besteht aus 4 einzelnen Sensoren, die an der Spitze des Flugzeugs angebracht sind und die Zonen „Obenlinks“, „Obenrechts“, „Untenlinks“, „Untenrechts“ vor dem Flugkörper abdecken (vgl. Abb. 10). Ein weiter entferntes Hindernis wirft nur eine schwache Reflexion des Radarsignals

zurück, während ein nahes, den Sensor höher ausschlagen lässt. Der Algorithmus steuert das Flugzeug nun immer in Richtung der Zone mit der geringsten Intensität des zugeordneten Sensors an und weicht dadurch schnell und ohne großen Rechenaufwand dem Hindernis aus.
Im Versuch mit einem einzelnen, kleinen Hindernis, konnte die Kollisionsvermeidungssoftware das Flugzeug sicher dem Hindernis ausweichen. Die am Boden, mit einem Fahrzeug, getestete Fähigkeit des Algorithmus, das UAV durch Gebiete mit vielen Hindernissen steuern, muss für den Einsatz im Flug erst noch gezeigt werden. Durch die geringe Wendigkeit des Flugzeugs und dessen, für den Flug notwendige Mindestgeschwindigkeit, könnten hier große Probleme auftreten. Ein anderes Problem stellt die Störanfälligkeit des Radars für elektromagnetische Wellen, wie sie zum Beispiel vom UAV für die Signalverarbeitung genutzt werden, dar. Hier ist eine Abschirmung des Sensors gegenüber der anderen Elektronik an Bord nötig, um die Reichweite des Radars von ausnutzen zu können.

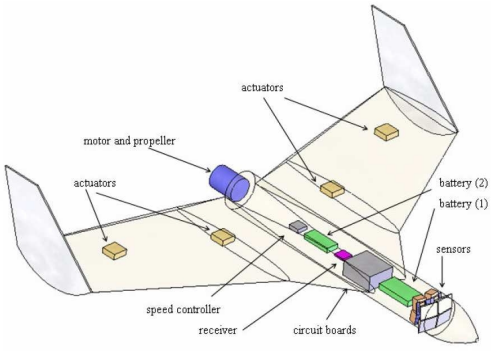


Abbildung 9: Fluggerät der Universität Sydney

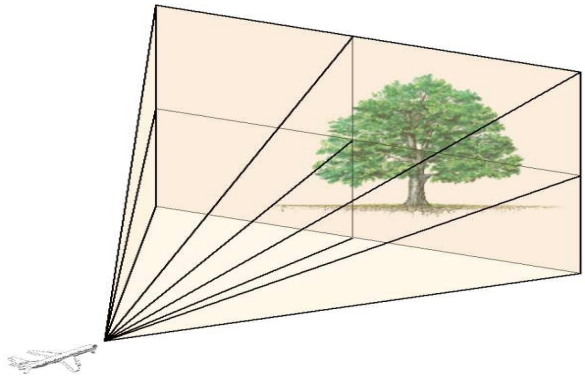


Abbildung 10: Zonenaufteilung des Kollisionsvermeidungsalgorithmus,Sydney

Micro Aerial Vehicle, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge

Das System des Massachusetts Institute of Technologie in Cambridge wurde dafür konstruiert, einen Piloten bei der Steuerung eines UAV durch Informationen über die Umgebung des Flugobjekts zu unterstützen [MAV Cambridge, 2010] . Der Quadcopter des Instituts ist hierzu mit einer Onbordkamera so wie mit einem Laserscanner Hokuyo UTM-30X mit 30m Reichweite und 270° Field of View ausgestattet. Das Videosignal wird zusammen mit den Daten aus vom Laserscanner per 2,4 GHz Videotransmitter an einen PC übermittelt, wo eine Software die empfangenen Informationen auswertet und in einem CODA (Collision- and Obstacle-Detection and Alerting) Display zusammenfasst (siehe Abb. 11). Die graphische Auswertung wurde speziell dazu entwickelt, auf einem Smartphone angezeigt zu werden, sodass dem Piloten ein umfassendes Bild zur momentanen Umgebung des UAVs bereitgestellt wird. Das Bild der Videokamera ist mit den Informationen des Laserscanners kombiniert und gewährleistet eine übersichtliche Steuerung auch außerhalb des direkten Sichtfeldes des Piloten. Neben der optischen Darstellung wird der Pilot mittels akustischen Signalen und Vibrationen des Smartphones auf eventuelle Hindernisse in der Nähe des Quadcopters hingewiesen. Für die Informationsübertragung vom UAV zum Display ergibt sich eine Zeitverschiebung von ca 0,5 bis 1,5 Sekunden. Zusammen mit einer Zeitverschiebung von ca 0,5 Sekunden bei der Übertragung von Steuerbefehlen, ist das Reagieren auf schnelle Situationsänderungen durch den Piloten erschwert. Tests zeigten die Möglichkeit, ein solches System zur Unterstützung des Piloten heranzuziehen, um das Flugobjekt auch in, nicht in Sichtweite des Piloten liegenden Gebieten, wie in Gebäuden, zu steuern. Die Software verfügt allerdings nicht über Algorithmen zur autonomen Steuerung oder Kollisionsvermeidung, was das UAV anfällig für Störungen durch äußere Einflüsse macht. Hier wäre eine zusätzliche Sensorik

nötig, um das System gegebenenfalls auf Abstand zum Hindernis zu halten.

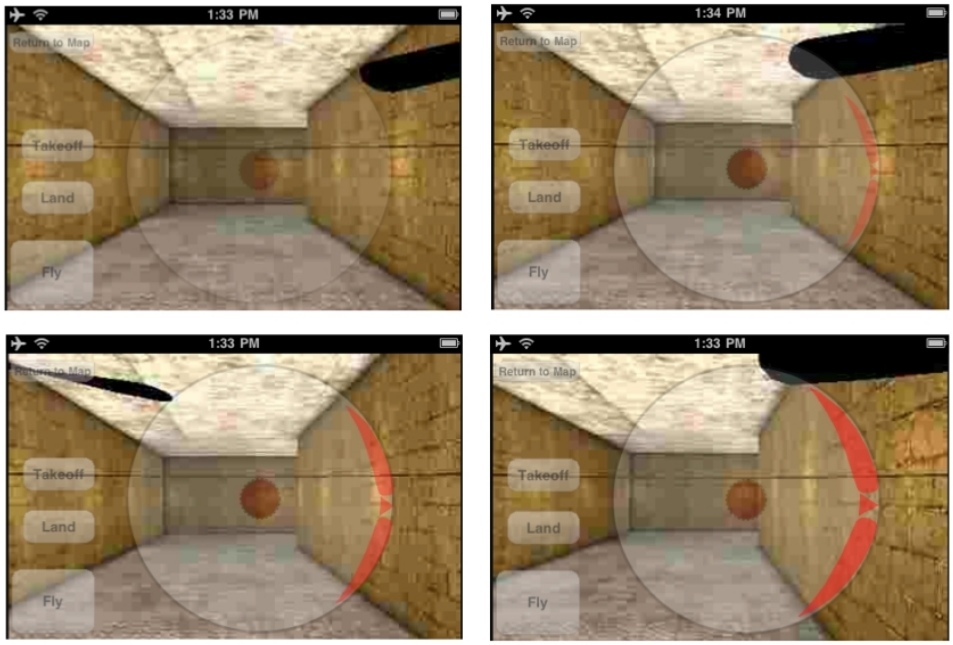


Abbildung 11: CODA-Display

Mini-VTOL mit Ultraschallsensorik

Das folgende Quadrocoptersystem nutzt Ultraschallsensorik zur Kollisionserkennung [VTOL, 2010]. Vier Sensoren sind im 90° Winkel zueinander ausgerichtet, sodass sie in die vier Hauptrichtungen vorne, hinten, links und rechts die Umgebung auf Hindernisse untersuchen. Um die Reichweite durch eine bessere Richtwirkung zu erhöhen, wurden die einzelnen Sensoren mit Plastikkegeln um die Sender herum ausgestattet. Damit erreichen die Sensoren in Tests eine Reichweite von ca 2m. Der Öffnungswinkel eines der verwendeten Sensoren des Typs US SRF 10 beträgt 41°, was bedeutet, dass es zwischen den Sensoren Bereiche gibt, in denen eventuelle Objekte nicht erkannt werden können. Um dadurch hervorgerufene Kollisionen zu vermeiden, ist die Bewegung des Quadcopter auf die, von den Sensoren abgedeckten Richtungen, beschränkt. Um das UAV herum ist ein Sicherheitsring vom Radius 90cm (50cm Abstand Wand – Rotoren) definiert. Erkennt einer der vier Sensoren, die 15 mal in der Sekunde ausgelesen werden, ein Hindernis, wird automatisch eine Quer- / Längsneigung des Quadrocopters eingestellt, um vom Hindernis weg zu fliegen. Damit der Flugkörper aufgrund einer zu heftigen Reaktion nicht gegen ein anderes Hindernis fliegt, oder das System instabil wird, ist die Schräglage hierbei auf 0,18 rad (~ 10°) beschränkt. Um rechtzeitig auf ein, sich mit einer Geschwindigkeit von ca 1m/s näherndes Objekt reagieren zu können, bedarf es einer Neigung von mindestens 0,15 rad (~ 8,5°). Für die Kollisionsvermeidung bleibt dem System also nur geringer Aktionsspielraum. Um also in einer Umgebung mit hoher Dynamik fliegen zu können, muss die Stabilität des Flugkörpers weiter verbessert werden. Zusätzlich ist das bestehende System aufgrund mangelnder Redundanz in der Entfernungsdatenerfassung, sehr störanfällig. Da die Hinderniserkennung alleine auf Ultraschallsensorik beruht, könnten bei der Erkennung von Hindernissen mit schallschluckender Oberfläche Probleme auftreten. Das System ist ferner nicht dazu konzipiert, den Abstand zu einem auftretenden Hindernis zur Regelung der Position zu nutzen.

Miniature Aerial Vehicle (MAV), Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne

In der Ecole Polytechnique Fédérale in Lausanne wurde eine Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung entwickelt, die auf Infrarotsensorik basiert [EPFL, 2007]. Der Quadrocopter verfügt hier über vier Infrarotsensoren (siehe Abb. 13) mit je 3m Reichweite, die die vier Richtungen Vorne, Hinten, Links und Rechts abdecken. Das System ist damit in der Lage, in diesen vier Richtungen Hindernisse zu erkennen und in eine unbestimmte Richtung zurück zu weichen, sollte der Quadrocopter zu nah an ein Hindernis heran fliegen (vgl. Abb. 12). Außerdem ist der Quadrocopter darauf eingestellt, in der Mitte zwischen Hindernissen zu schweben. Das UAV ist jedoch mit der aktuellen Software nicht fähig, eigenständig Wege in Räumlichkeiten zu erkunden. Anfällig ist das System auch noch gegenüber Fehlern in der Entfernungsmessung, da neben der Infrarotsensorik keine weiteren Sensortechniken eingesetzt wurden. Befindet sich der Quadrocopter in Gebieten mit schlechten Sichtverhältnissen, können daher leicht Störungen in der Hinderniserkennung auftreten.

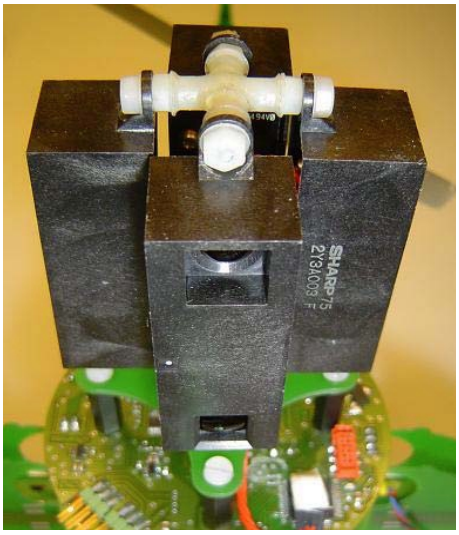


Abbildung 13: Sensorik des MAV, Lausanne

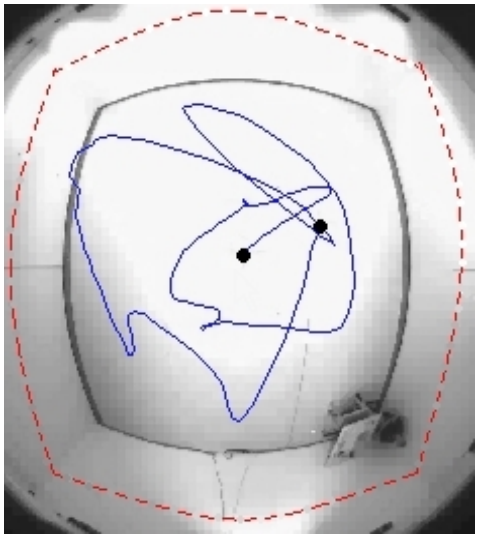


Abbildung 12: Flugverhalten des MAV, Lausanne

2.2.2. Zusammenfassung

In den vorgestellten Systemen wurden meist idealisierte Einsatzgebiete betrachtet. In unbekannten Räumlichkeiten wird ein Unmanned Aerial Vehicle jedoch ständig mit neuen Begebenheiten konfrontiert. Die eingebaute Sensorik muss deshalb auf alle Eventualitäten im Einsatz vorbereitet sein. Das bedeutet, dass gerade hier der Fokus stark auf eine redundante Datenerfassung gerichtet werden muss. Eine einzelne Sensortechnologie hat stets Schwachstellen, bei denen die sichere Messung nicht immer gegeben ist. Aus diesem Grund, muss ein UAV mit einer Mehrzahl an Sensortechnologien ausgerüstet sein, damit, falls ein Sensortyp versagt, die zuverlässige Datenerfassung von einem anderen Sensor übernommen werden kann. Gleichzeitig ist bei der Implementierung einer solchen Sensorik auf Effizienz in den Bereichen Kosten, Energie und Gewicht zu achten. In keinem der betrachteten Systeme wurde eine Abstandsregelung zu einem erkannten Hindernis umgesetzt, die hilfreich wäre, um Räume systematisch zu durchsuchen.
Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb ein kostengünstiges System einer Redundanten Datenerfassung implementiert werden, das den Einsatz der erhaltenen Entfernungsinformationen zu

Hindernissen, für eine aktive Abstandsregelung des Quadrocopters ermöglicht.

2.3. Das System des AQopterI8

Das im AQopterI8-Projekt eingesetzte UAV ist ein Quadrocopter mit einer Größe von ca. 50cm von einer Propellerspitze zur diagonal gegenüberliegenden. Die vier Brushless-Motoren für den Antrieb sind quadratisch um ein Chassis angeordnet, das Elektronik und Sensorik trägt. Als Herzstück der Elektronik ist ein Atmel AVR 32UC3A0512 Prozessor eingebaut. Das System ist durch eine interne Fluglageregelung bereits in der Lage, stabil zu fliegen. Es verfügt über ein IMU3000 Fusion Board, als Gyrometer mit daran angeschlossenem ADXL345 Beschleunigungssensor. Des Weiteren erhält der Quadrocopter Informationen zur aktuellen Flughöhe für eine Höhenregelung. Um die Lage das Driften des Systems in horizontaler Richtung zu unterbinden, wurde eine Kamera zur Messung des optischen Flusses in Bodenrichtung installiert, wodurch das System seine Position über einem bestimmten Punkt zu halten. Die Datenübertragung an Board findet über einen I2C-Bus statt. Zur Kommunikation mit einem PC am Boden wird Bluetooth eingesetzt. Für eine Hinderniserkennung wurde ein Sensorring aus 12 Ultraschallsensoren des Typs SRF02 vom Hersteller Devantech entwickelt . Dieser Ring wurde so konstruiert, dass jeder Sensor je einen Sektor scannt und über Hindernisse in diesem Sektor Entfernungsdaten liefert (vgl Abb.14 und Abb. 28). Die vom Sensorring ermittelten Daten werden gefiltert, und einem Algorithmus zur Kollisionsvermeidung zur Verfügung gestellt [Thilo Müller, 2011]. Im Folgenden soll die Funktionsweise dieses Kollisionsvermeidungsalgorithmus genauer erläutert werden.

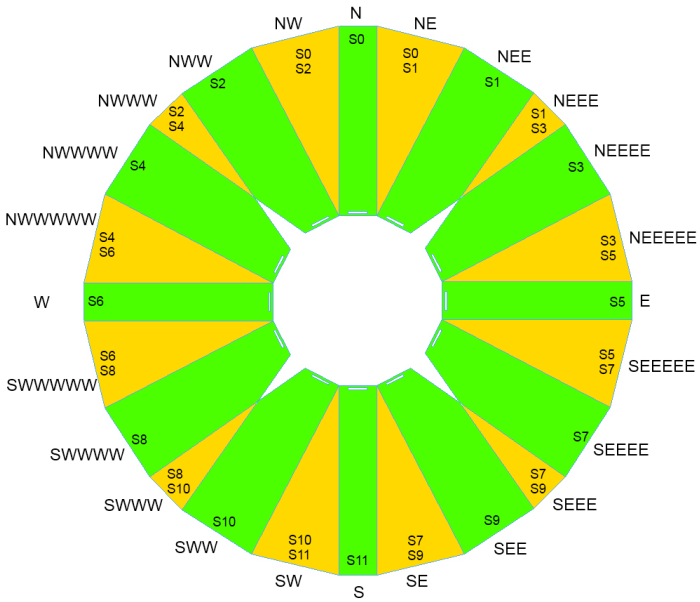


Abbildung 14: Sektoreneinteilung des Ultraschallsensorrings des AQopterI8 [Thilo Müller, 2011]

2.3.1. Kollisionsvermeidungsalgorithmus des AQopterI8

Grundlagen

Grundsätzlich ist es vorgesehen, dass der Quadrocopter selbständig Erkundungen in zuvor gänzlich unbekanntem Gebiet, vornehmen kann. Dafür ist es notwendig, einen kollisionsfreien Pfad zu finden und diesem zu folgen. Es reicht hierzu nicht aus, bei Erkennen eines Hindernisses in Flugrichtung, in eine zufällige Richtung zurück zu fliegen, da das System so leicht enge Passagen übersieht und dadurch der Fortschritt der Erkundung beeinträchtigt wird. Sinnvoller ist es, an Wänden entlang zu fliegen und Gängen zu folgen, um dadurch schneller in der Entdeckung von kollisionsfreien Pfaden voran zu schreiten. Dafür muss der Quadrocopter in der Lage sein, sich an Wände anzunähern und zu ihnen einen vorgegebenen Abstand aktiv zu regeln. Diese Fähigkeit wurde bei keinem der in Kapitel 2.2 betrachteten Unmanned Aerial Vehicles festgestellt. Um genau diese Lücke in der Erforschung von autark arbeitenden Flugrobotern zu füllen, ist die Software zur Kollisionsvermeidung so implementiert, dass je nach Entfernung zu einem Hindernis verschiedene Sicherheitsalgorithmen in die Regelung des UAVs eingreifen. Ist der Quadrocopter für einen sicheren Flug ausreichend weit vom nächsten Hindernis entfernt, befindet sich er sich in der Zone des freien Fluges, in der die Kollisionsvermeidung nicht in die Flugregelung eingreift. Kommt der Quadrocopter näher an ein Hindernis, setzt die Neigungswinkelanpassung ein, die die Quer- und Längsneigung beschränkt, durch die dessen Geschwindigkeit in Richtung des Hindernisses beschränkt wird. Damit ist gewährleistet, dass das System rechtzeitig ausweichen kann, falls es sich auf Kollisionskurs befindet. Nähert sich der Quadrocopter der innersten Zone, der Totzone, wird der Abstand zur Wand aktiv geregelt, sodass das UAV einen vordefinierten Abstand zur Wand einhält (vgl. Abb. 15).

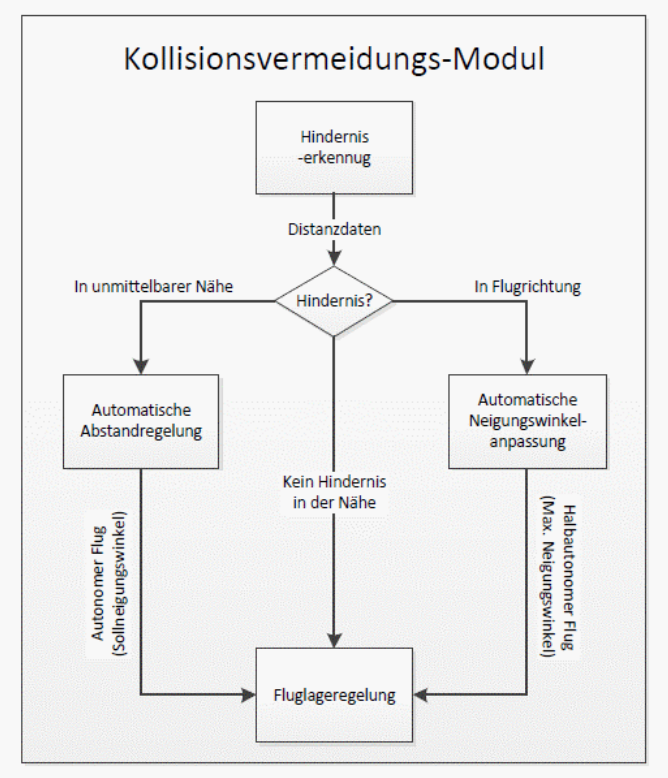


Abbildung 15: Prinzip des Algorithmus zur Kollisionsvermeidung des AQopterI8 [Thilo Müller, 2011]

Neigungswinkelanpassung

Zunächst muss erwähnt werden, dass der Neigungswinkel des Quadrocopters, also der Winkel zwischen Waagerechte und Rotorebene, maßgebend für die momentane horizontale Beschleunigung des UAVs ist. Befindet sich der Quadrotor in der Waagerechten, liefern die Rotoren einen Schub, der ausschließlich nach oben gerichtet ist. Durch eine Änderung der Quer- oder Längsneigung erhält der Schubvektor einen horizontalen Anteil, sodass der Quadrocopter in eine horizontale Richtung beschleunigt wird. Mit zunehmender Fluggeschwindigkeit steigt auch der Luftwiderstand, bis sich schließlich Schub und Luftwiderstand ausgleichen und der Quadrotor seine horizontale Geschwindigkeit beibehält. Aufgrund dieses physikalischen Sachverhalts kann die aktuelle Neigung als Maß für die momentane Fluggeschwindigkeit angesehen werden. Diesen Aspekt kann man sich für die Kollisionsvermeidung zu Nutzen machen, indem man den maximalen Neigungswinkel und damit die Fluggeschwindigkeit bei Erkennen eines Hindernisses beschränkt. Da die verbleibende Zeit bis zur Kollision direkt von Geschwindigkeit des Quadrocopters und dessen Abstand zum Hindernis abhängt, ist es sinnvoll, die maximal zulässige Neigung mit abnehmender Entfernung zu verringern, bis spätestens mit Unterschreitung des Sicherheitsabstandes zum Hindernis keine Schräglage und damit Beschleunigung in Hindernisrichtung mehr erlaubt ist. Eine Limitierung der Schräglage gewährleistet dem System also mehr Zeit, um auf das erkannte Hindernis zu reagieren, es gewinnt dadurch an Robustheit.

Abstandsregelung

Um Kollisionen zu vermeiden, ist es nötig, einen Mindestabstand zum Hindernis einzuhalten. Dieser Abstand wird als Sicherheitsabstand fest der Kontrollsoftware übergeben. Läuft der Quadrocopter Gefahr, diesen Sicherheitsabstand zu unterschreiten, muss das, durch aktives Eingreifen in die Flugregelung, verhindert werden. In der Umsetzung findet, über das Verhindern der Unterschreitung des Mindestabstands hinaus, eine Regelung statt, die dafür sorgt, dass das UAV genau den Sicherheitsabstand zum Hindernis einhält. Dadurch wird verhindert, dass es zum sogenannten „Ping-Pong-Effekt“ kommt, das System also unkontrolliert, wie ein Ball von einer Wand abprallt, zurückfliegt. Die Flugrichtung des Quadrocopters hängt von dessen Längs- und Querneigung ab. Daher ist die Abstandsregelung über die Kontrolle des Neigungswinkels implementiert. Für die Regelung wird immer wieder eine Regelschleife durchlaufen, die zunächst den aktuellen, durch Abstandssensoren ermittelten, Abstand zum Hindernis mit einem Sollwert vergleicht. Die Differenz aus Ist- und Sollwert wird dann an einen PID-Regler weitergeleitet, der den Neigungswinkel des Quadrotors anpasst. Ab hier beginnt die Regelschleife von Neuem, sodass das System kontinuierlich kontrolliert ist (vgl. Abb. 16). Durch die ständige Regelung ist es möglich, auf äußere Störeinflüsse auf die Flugbahn zu reagieren. Besonders beim Annähern an Hindernisse, entstehen Strömungen, die den Flug des Quadrocopters beeinträchtigen. Diese können durch eine aktive Regelung kompensiert werden.
Quer- und Längsneigung sind unabhängig voneinander regelbar, weshalb hier auch für beide Neigungswinkel der selbe Regler verwendet werden kann.

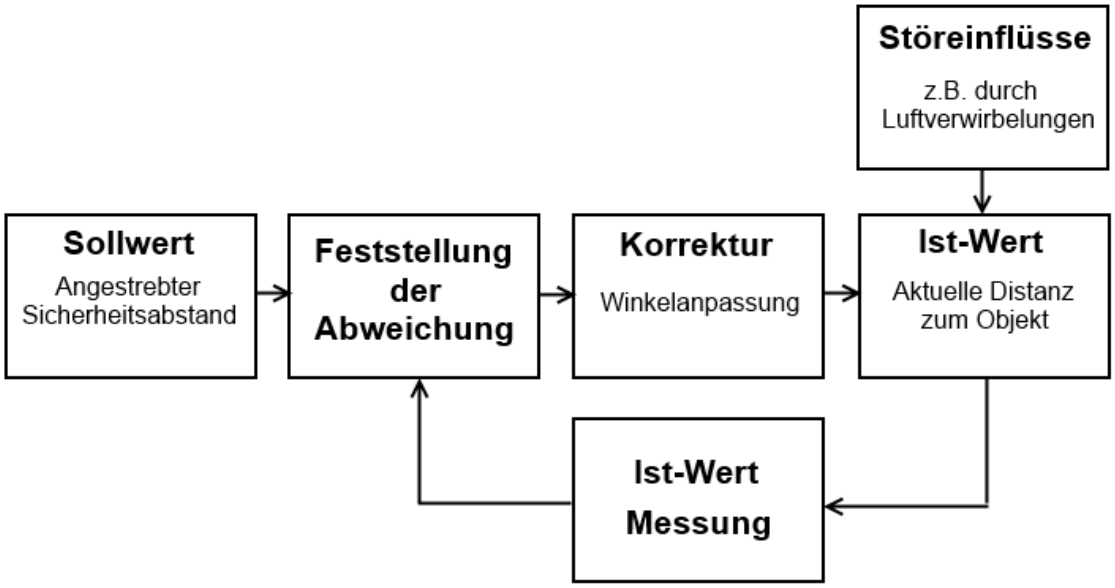


Abbildung 16: Prinzip der Abstandsregelung des AQopterI8 [Thilo Müller, 2011]

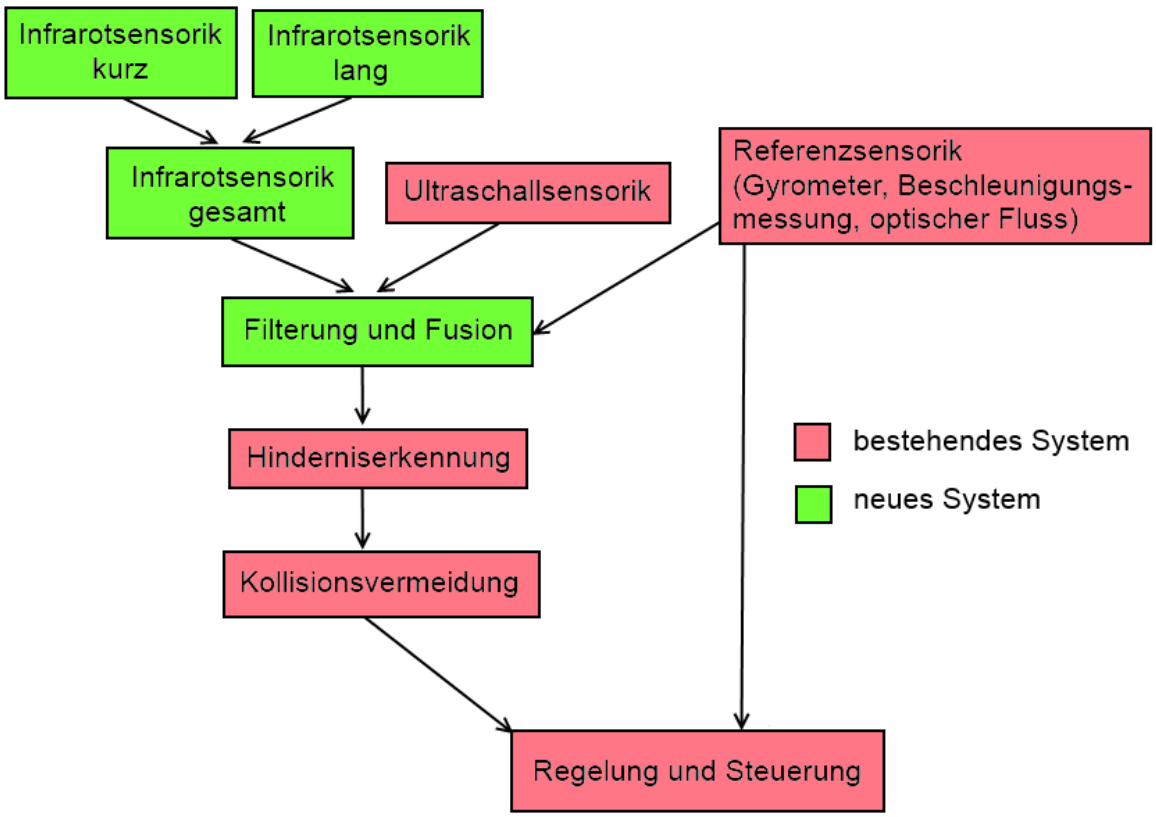
2.3.2. Erweiterungsbedarf am AQopterI8

Wie bereits dargestellt, ist es für eine sichere Hinderniserkennung wichtig, verschiedene Sensortechnologien einzusetzen, um Schwachstellen in der Zuverlässig der Messung eines Sensortyps durch andere Sensoren auszugleichen. Der AQopterI8 ist zur Zeit nur mit Ultraschallsensorik für die Hinderniserkennung ausgestattet. Diese Sensoren sind Störanfällig bei der Entfernungsmessung von Hindernissen mit schallschluckender Oberfläche. Um eine höhere Sicherheit im Flug durch redundante Hinderniserkennungssensorik zu erreichen, soll der Quadrocopter im Rahmen dieser Arbeit mit Infrarotsensoren erweitert werden.

3. Konzept

3.1. Einleitung

Die Vermeidung von Kollisionen ist einer der wichtigsten Aspekte im autonomen Flug. Sie beruht in erster Linie auf der sicheren und zuverlässigen Erkennung von Hindernissen. Um die Hinderniserkennung des AQopterI8 der Universität Würzburg sicherer und zuverlässiger zu gestalten, soll das bestehende, für die Hinderniserkennung verwendete, Sensorsystem erweitert und dadurch dessen Schwachstellen beseitigt werden. Die bisher eingesetzte Ultraschallsensorik hat vor Allem bei Hindernissen mit schallschluckenden Oberflächen, wie Personen mit Kleidung oder Vorhängen Probleme bei der genauen Abstandsmessung. Weiterhin ist die maximale Sensorabfragerate der eingebauten Ultraschallsensoren mit ca 15 Hz sehr niedrig. Für eine Situationserfassung in Echtzeit und eine genaue Abstandsregelung ist eine Sensorabfragerate von wenigstens 100 Hz erstrebenswert. Um diese Mängel einzudämmen, soll im Rahmen dieser Arbeit die bestehende Sensorik zur Hinderniserkennung mit Infrarotsensoren erweitert werden (siehe Zeichnung 4). Diese haben bei einer höheren Sensorabfragerate nicht die, bereits in Kapitel 2.1.3. beschriebenen, Probleme bei der Erkennung von Objekten mit schallschluckender Oberfläche. Dabei soll die Erweiterung in Form einer Sensordatenfusion umgesetzt werden, die die Messwerte von Ultraschallsensorik mit denen eines neu ins System integrierten Infrarotsensorsystems vereinigt. Aufgabe der Sensordatenfusion ist es hier, aus den unabhängig von einander gewonnenen Entfernungsdaten zu Hindernissen in der Umgebung des Quadrocopters, deren wirkliche Distanz zum System zu ermitteln.
Im Weiteren soll das Konzept des Sensorringaufbaus und die Struktur der Sensordatenfilterung und -fusion erläutert werden.



Zeichnung 4: Konzept zur Integrierung einer Infrarotsensorik in das bestehende System

3.2. Sensordatengewinnung

Für die Sensorik kommen distanzmessende Infrarotsensoren zum Einsatz. Durch die Anordnung mehrerer Sensoren im Kreis, soll eine 360°-Objekterkennung möglich gemacht werden. Für eine spätere Verwendung der Sensorik zum Mapping, kommt es darauf an, dass die Sensoren genaue Abstandsinformationen zu Hindernissen in der Umgebung liefern. Auch die, auf diese Sensorik aufbauende, Kollisionsvermeidung benötigt konkrete Distanzwerte. Bei der Implementierung muss deshalb eine hohe Genauigkeit in der Entfernungsmessung erreicht werden. Die hier verwendeten Infrarotsensoren nutzen zur Abstandsmessung das Prinzip der Triangulation, wie es im Kapitel 2.1 beschrieben wurde. Die Entfernungsbestimmung hängt hier also nicht von der Oberflächenbeschaffenheit oder -farbe des Ziels ab. Im Gegensatz zu den bereits eingesetzten Ultraschallsensoren, können diese Sensoren auch Objekte mit schallschluckender Oberfläche gut erkennen.

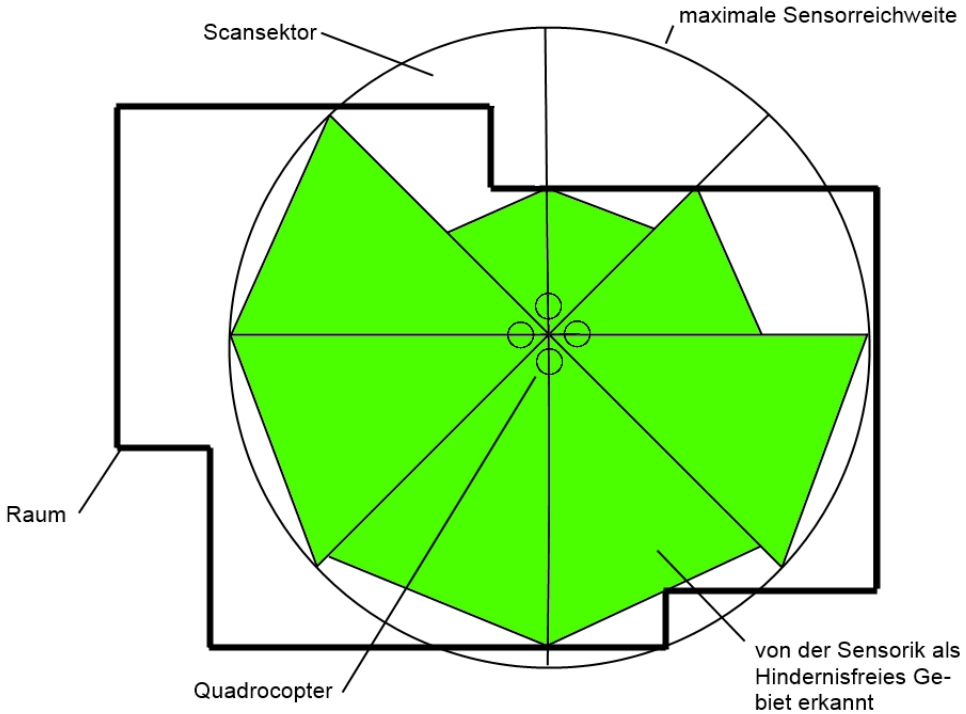
Um kontinuierlich Entfernungsdaten über die gesamte Umgebung des Quadrocopter zu erhalten, werden Infrarotsensoren in einem Ring so angeordnet, dass sie in gleichmäßigen Abständen, ähnlich zum bereits entwickelten Ultraschallsensorring, Sektoren abdecken. Dabei gilt, dass die Auflösung der Hinderniserkennung umso besser ist, je mehr Sensoren verwendet werden. Der Scanbereich α_{Sensor} jedes Sensors ergibt sich bei gleichmäßiger Anordnung aus dem Zusammenhang aus Formel

(6):

$$\alpha_{Sensor} = \frac{360°}{n_{Sensoren}} \tag{6}$$

mit der Sensoranzahl $n_{Sensoren}$. Mit zunehmender Sensorzahl steigt aber auch die Störanfälligkeit nebeneinander liegender Sensoren für Scheinechos. Für eine optimale Sensorzahl muss also auf den Öffnungswinkel der verwendeten Sensoren geachtet werden, um dieses Problem zu minimieren.

Für die spätere Sensordatenfusion von Ultraschall- und Infrarotsensorik, werden die jeweils übereinander liegenden Sensoren der verschiedenen Ringen zu Gruppen zusammen gefasst. Aus den unabhängig voneinander gewonnenen Messergebnissen soll dann ein einziger Abstandswert ermittelt werden, der die Entfernungsdaten aller Sensoren der Sensorgruppe vereinigt. Anhand der Messwerte aller Gruppen ergibt sich ein 360°Abstandsbild um das System herum (siehe Zeichnung 5). Um sowohl in kleinen als auch in größeren Abständen, Entfernungen genau und vor Allem sicher messen zu können, ist es sinnvoll, in einer Sensorgruppe verschiedene Sensorgrößen mit sich leicht überschneidenden Messbereichen zu verwenden. Dabei ist der räumliche Abstand zwischen den einzelnen Sensoren der Gruppe so zu optimieren, dass sich die einzelnen Sensoren einerseits nicht gegenseitig beeinflussen und auf der anderen Seite der beschränkt zur Verfügung stehende Platz auf dem Quadrocopter ideal ausgenutzt wird. Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass das Auftreten von Scheinechos durch die Sensoranordnung nicht begünstigt wird, also immer nur die Reflexion des sensoreigenen Infrarotstrahls vom jeweiligen Sensor registriert und für die Entfernungsmessung herangezogen wird.

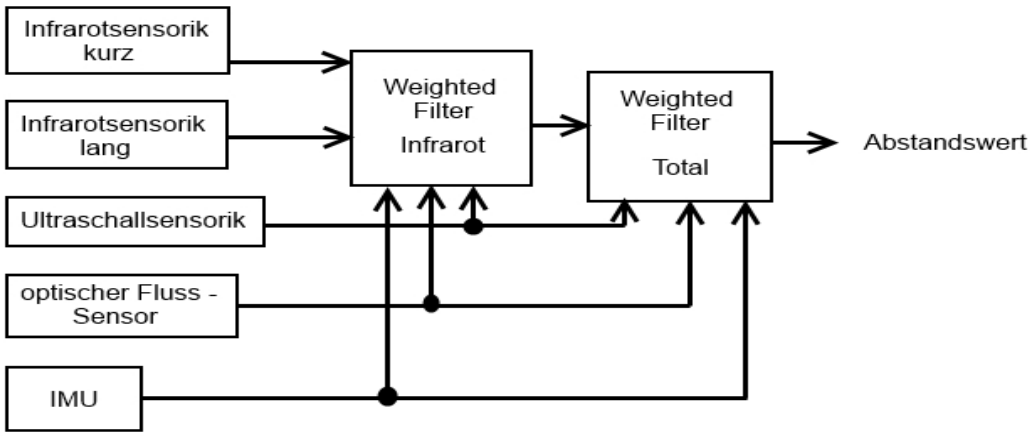


Zeichnung 5: Prinzip der Hinderniserkennung mit Sektorenscannung

3.3. Sensordatenfilterung

Grundsätzlich ist eine Datenfilterung notwendig, da sich nicht auszuschließende Fehler in der Messung direkt auf die Kollisionsvermeidung auswirken. Ein unkorrekt gemessener Entfernungswert kann zu einem Nichterkennen eines Hindernisses führen, was kritisch für die Sicherheit der Arbeit des Quadrocopters wäre. Zusätzlich können, Fehler bedingte, Schwankungen des Messergebnisses zu unerwünschten Reaktionen des Systems führen, wodurch dieses an Stabilität und Robustheit verlöre.
Um für alle Sensorgruppen, die jeweils in unterschiedliche Richtungen ausgerichtet sind, einen gefilterten Abstandswert zu erhalten, sollte jede Gruppe getrennt von den anderen gefiltert werden, sodass am Ende so viele Filterergebnisse erhalten werden, wie es Sensorgruppen gibt.
Der Filter ist nicht nur nötig, um Rauschen und große Sprünge aus den Messerwerten heraus zu filtern, sondern auch dafür verantwortlich, aus den verschiedenen Sensordaten einer Sensorgruppe, den plausibelsten Abstandswert auszugeben. Um die gemessenen Distanzwerte in Echtzeit, dem System zur Verfügung stellen zu können, sollte die Filterung der Daten nicht zu viel Rechenleistung und damit Zeit in Anspruch nehmen.

Die Sensordatenfilterung soll die Entfernungswerte, die von den verschiedenen Sensoren der Sensorgruppe geliefert werden, miteinander vergleichen und kombinieren. Die Schwierigkeit dabei liegt darin, dass die Sensorsysteme nur bedingt das selbe Messergebnis liefern. Gerade bei Hindernissen, die aufgrund ihrer Beschaffenheit, vom einen oder anderen Sensortyp schlecht erkannt werden, sind Differenzen zwischen den Messwerten der verschiedenen Sensoren zu erwarten. Da die Sensoren selbst nicht erkennen, ob sie die wahre Distanz zum Hindernis messen, ist es Aufgabe der Software, den Sensor zu bestimmen, der am besten die Entfernung zum Hindernis misst. Hier soll ein Weighted Filter eingesetzt werden. Dieser wertet dafür, die Daten von Infrarot, Ultraschall und der Referenzsensorik, die in diesem Fall aus einem IMU3000 Fusion Board und einer Kamera zur Bestimmung des optischen Flusses besteht, aus. Nach einer Plausibilitätsprüfung der einzelnen Sensordaten, erhält man schließlich den Wert als Ergebnis der Sensorfusion, der in auch in der Vergangenheit am zuverlässigsten die Distanz zum Hindernis bestimmt hat (vgl. Zeichnung 6). Der genaue Fusionsalgorithmus soll hier kurz erläutert werden.



Zeichnung 6: Prinzip der Datenfusion

Weighted-Filter-Algorithmus [Weighted Filter, 2012]

Der Weighted Filter unterscheidet zunächst zwischen Main- und Referenzsensorik. Während die Mainsensoren solche sind, die einen direkten Abstandswert liefern, also wie Ultraschall- und Infrarotsensorik, liefern Referenzsensoren nur Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsswerte. Anhand von Referenzsensoren kann man zwar die Bewegung des Systems feststellen, nicht aber eine absolute Position. Diese kann man durch die Referenzsensorik nur erhalten, wenn man die, durch sie ermittelte Positionsänderung auf eine bekannte Ausgangsposition aufaddiert.

Im Weiteren werden, zur Bestimmung des wahrscheinlich besten Sensorwertes, im Weighted Filter das Eigengewicht Own Weight E_i sowie die Gewichte von Main- und Referenzsensorik Main Weight M_i und Reference Weight R_i bestimmt. Für die Mainsensorik ergibt sich das Main Weight aus

$$M_i = \sum^{j} \alpha_j \cdot norm(m_i, m_j) = \sum^{j} \alpha_j \cdot (m_i - m_j)^2 \tag{7}$$

M_i: Main Weight
α_j: Gewichtung des Mainsensors j
m_i, m_j: Messwerte von Mainsensor i und j

Für die Referenzsensoren ergibt sich das Reference Weight R_i aus:

$$R_i = \sum^{j} \beta_j \cdot norm(m_i, r_i) \tag{8}$$

R_i: Reference Weight
β_j: Gewichtung des Referenzsensors j
m_i: Messwert von Mainsensor i
r_i: Messwert des Referenzsensors i

Zudem ergibt sich für das Own Weight E_i die Beziehung

$$E_i = L_i + S \tag{9}$$

E_i: Own Weight
L_i: Letzte Messung
S: geschätzte Veränderung des Messwertes

Für das Gesamtgewicht Total Weight T_i ergibts sich mit dem Zeitindex k und dem cut-off Faktor δ:

$$T_i = \delta \cdot T_{i,k-1} + (1 - \delta) \cdot (M_{i,k} + E_{i,k} + R_{i,k}) \tag{10}.$$

Ti: Total Weight
δ: cut-off Faktor
k: Zeitindex

Nachdem alle Gewichte bestimmt wurden, wählt der Weighted Filter den Sensorwert mit dem kleinsten Gewicht, als fertigen Filterwert aus.

4. Implementierung

4.1. Überblick

Im folgenden Kapitel wird die Umsetzung des Konzepts zur Integrierung einer Infrarotsensorik in die bestehende Hinderniserkennung beschrieben. Zunächst wird dabei auf das zugrunde liegende Hardwaredesign eingegangen, bevor das Augenmerk auf die Sensoransteuerung und Datenauswertung über die Software, gerichtet wird.

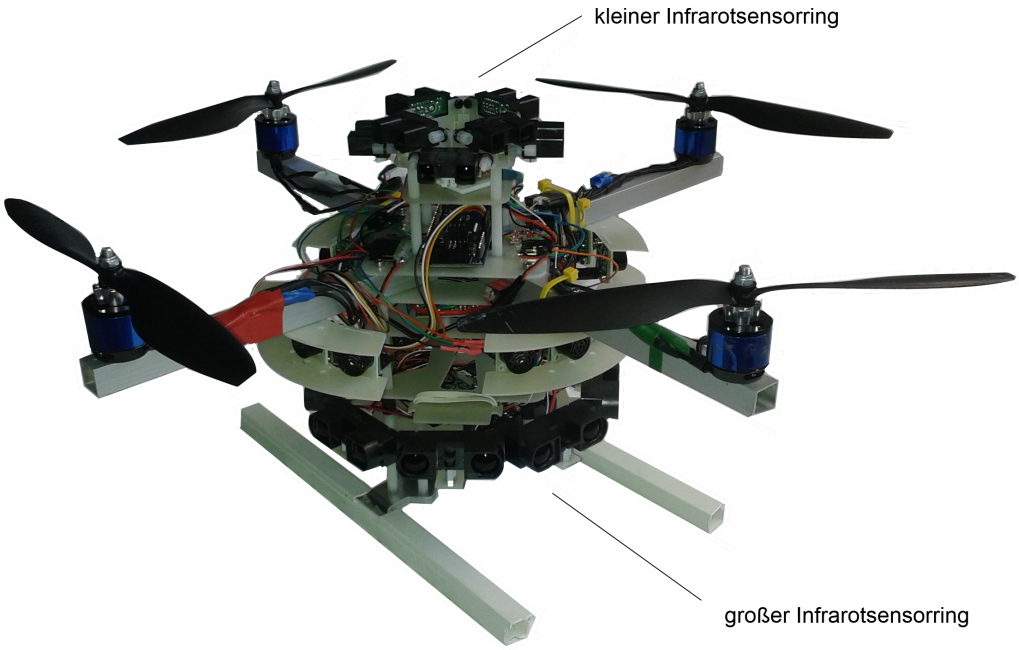


Abbildung 17: Der AQopterI8 Quadrocopter mit eingebauter Infrarotsensorik

4.2. Hardwaredesign

4.2.1. Grundaufbau

Um den Messbereich der Infrarotsensorik zu erweitern, wurden zwei unterschiedliche Sensortypen mit sich leicht überschneidenden Messbereichen eingesetzt. Dafür wurden zwei Sensorhalterungen entwickelt, auf denen je acht Sensoren eines Typs in einer Ringanordnung befestigt werden können. Um die Analogen Ausgangssignale der Sensoren in digitale Messwerte umzuwandeln, befindet sich in beiden Ringen ein Analogdigitalwandler (ADC), der dafür zuständig ist, die Sensorsignale der Sensoren im Ring auf Anfrage zu digitalisieren und über den I2C-Bus des Quadrocopters an den Atmel UC3A-Mikroprozessor an Bord zu senden, auf dem die Software des UAVs läuft. Auf diesem Mikroprozessor laufen alle Sensorinformationen zusammen (vgl. Abb. 18). Auch die Daten von Ultraschallsensorik, IMU3000 Fusion Board und die per SPI-Bus übertragenen Informationen des optischen Flusses werden dort verarbeitet. Bei der gesamten Umsetzung der Sensormodule wurde vor Allem auf eine kompakte Konstruktion geachtet, um bei möglichst wenig Platzbedarf einen einfachen Einbau der Sensormodule zu ermöglichen. Ebenso ist die komplette Verkabelung für Datenübertragung und Stromversorgung der einzelnen Sensoren jeweils auf den Ringen zusammengeführt, um auch den Aufwand zum Anschließen an den Flugaufbau zu minimieren.

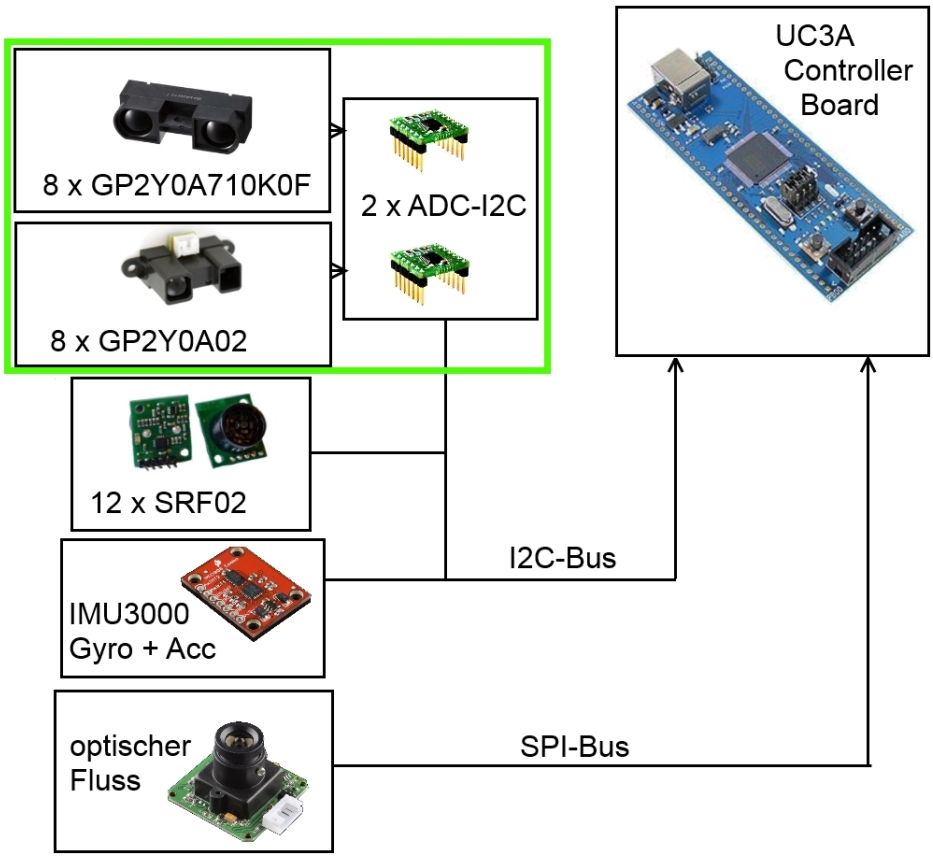


Abbildung 18: Hardwaredesign, neu hinzugefügte Hardware grün markiert

4.2.2. Infrarotsensorik

Die beiden Infrarotsensorringe bestehen jeweils aus acht Sensoren einer Größe. Die Ausrichtung der Ringe ist so bestimmt, dass sich die Sensorachsen von je einem kleinen SHARP GP2Y0A02 und einem großen Infrarotsensor GP2Y0A710K0F von SHARP, exakt überdecken. Dadurch ist es möglich, die Messwerte der beiden Sensoren zu gruppieren und aus der Kombination der beiden einen vergrößerten Messbereich zu erhalten. Zur Befestigung der Sensoren am Quadrocopter wurden zwei Sensorhalterungen aus einem Glasfaser verstärkten Kunststoff herausgeschnitten, auf denen die Sensoren montiert werden. Die Sensoren selbst sind zueinander immer im 45° Winkel angebracht, sodass jeder der Sensoren eines der acht gleichgroßen Sektoren um den Quadrocopter herum ausleuchtet. Die Messbereiche von langem und kurzem Infrarotsensor betragen laut Hersteller 100cm – 550cm bzw. 20cm – 150cm. Die genauen Maße der Sensoren können den Abbildungen 30 und 32 entnommen werden [SHARP, 2013].

Sensorring groß

Die acht Infrarotsensoren für den Messbereich von 100cm – 550cm wurden zusammen auf einer GFK-Platte in einer Ebene im Kreis angeordnet (siehe Abb. 19). Für die Befestigung der einzelnen Sensoren dient je eine 3mm Schraube. Auf der Kunststoffplatte, auf der die Sensoren angebracht sind, ist im Inneren des Sensorkreises ausreichend Platz für einen Analogdigitalwandler (ADC), in dem die Daten von allen acht Sensoren des Rings zusammenlaufen und per I2C Protokoll an den Mikrocontroller an Bord gesendet werden. Die Kabel für Stromversorgung und Datenübertragung sind ebenfalls im Inneren des Sensorkreises verlegt. Der komplette Sensorring lässt sich leicht an den Boden des Quadrocopters anbringen. Der gesamte Aufbau, der zur Abdeckung des ganzen Gebiets um das System herum benötigt wird, besteht also aus einem Stück, was den Austausch des Moduls erleichtert.



Abbildung 19: Großer Infrarotsensorring für Sensoren mit Messbereich 100cm – 550cm

Sensorring klein

Die acht Sensoren mit Messbereich 20cm – 150cm werden in zwei Vierecken mit je vier Sensoren auf dem Quadrocopters befestigt (siehe Abb. 20). Wie beim großen Infrarotsensorring wurde hier darauf geachtet, das gesamte Modul kompakt zu halten. Deshalb befindet sich auch beim kleinen Sensorring die komplette Verkabelung mit Daten- und Stromleitungen im Inneren des Aufbaus. Die Sensorwerte werden ebenfalls in einem ADC auf der Sensorhalterung gebündelt und per I2C weitergeleitet.

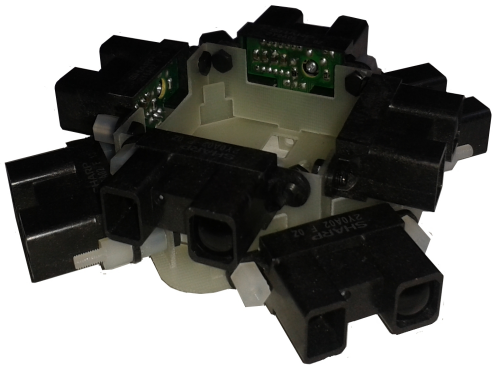


Abbildung 20: Kleiner Infrarotsensorring mit Messbereich 20cm - 150cm

Kommunikation und Stromversorgung der Infrarotsensorik

Um die analogen Messwerte der Sensoren für die Software zugänglich zu machen, müssen sie in einem Analogdigitalwandler in ein digitales Signal umgewandelt werden. Dafür wird in beiden Ringen je ein Gravitech I2C-ADC (siehe Abb. 21) verwendet [Gravitech, 2013]. Dieser 18mm x 18mm große Chip stellt acht Eingangskanäle für analoge Signale zur Verfügung, die mit 12 Bit Auflösung digitalisiert werden. Für die Datenübertragung von ADC zum Mikrocontroller wird der I2C-Bus des Quadrocopters genutzt. Dem ADC-Chip kann eine 2-Bit Adresse zugewiesen werden, sodass die gleichzeitige Verwendung von bis zu vier solcher Analogdigitalwandler am I2C-Bus möglich ist (vgl. Abb. 31).
Sowohl beide Sensortypen als auch die Analogdigitalwandler werden mit 5 Volt Eingangsspannung versorgt. Die Stromaufnahme aller für die Infrarotsensorik verwendeten Sensoren beträgt je ca 30mA – 50mA. Für eine optimale Umwandlung der analogen Ströme aus den Sensoren in ein digitales Signal liegt an den ADCs eine 3,3 Volt Referenzspannung an.



Abbildung 21: Gravitech Analogdigitalwandler

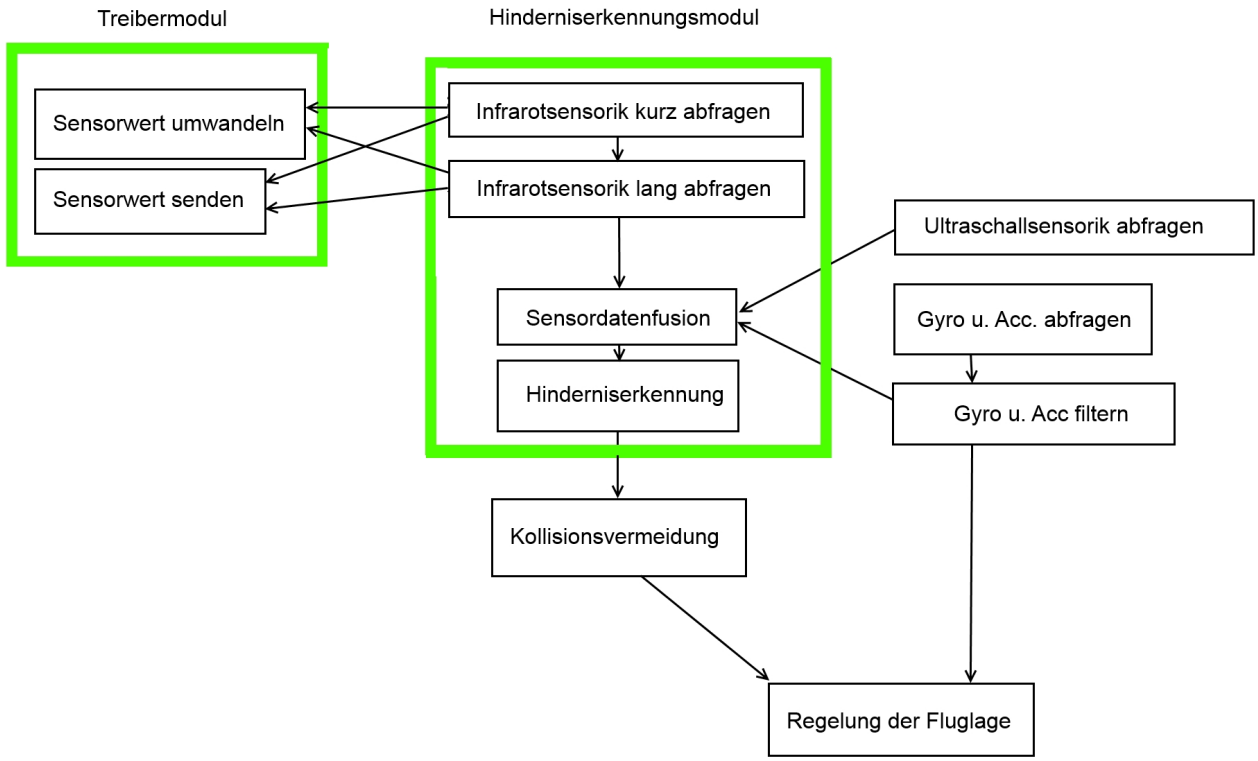
Referenzsensorik

Um aus den erhaltenen Distanzwerten von Infrarot- und Ultraschallsensorik möglichst sicher den am nächsten am realen Abstandswert liegenden Sensorwert zu bestimmen, wird eine, den optischen Fluss in Bodenrichtung messenden Kamera, verwendet. Diese ist bereits im System integriert, sodass die Sensordatenfusion zur Hinderniserkennung direkt auf die von dort gewonnenen Daten zugreifen kann.

4.3. Softwareentwurf

4.3.1. Grundlagen

Die Software zur Hinderniserkennung ist dafür verantwortlich, die beiden Sensorringe auszulesen, die gewonnenen Messwerte in Entfernungsdaten umzuwandeln, und die Messwerte von Infrarot- und Ultraschallsensorik zu fusionieren. Dazu ist das neu entwickelte Programm in zwei Module gegliedert. Das erste ist das Treibermodul über welches die komplette Sensorik mit beiden Sensorringen angesteuert wird. Es beinhaltet die Adressen für die I2C-Datenübertragung und kann somit auf die Sensorik selbst zugreifen. Das zweite, das Hinderniserkennungsmodul ist dafür zuständig, über das Treibermodul die Sensordaten zu erhalten und diese der Datenfusion als Entfernungsdaten bereit zu stellen. Die Fusion der Messwerte läuft außerhalb der Module in einem Weighted Filter ab. Der aus der Fusion hervorgehende Abstandswert wird der Software zur Kollisionsvermeidung übergeben (vgl. Zeichnung 7). Die Software befindet sich im Speicher des EVK1100-Boards, von wo aus auch alle Aktionen des Quadrocopters gesteuert werden. Beim kompletten, in C umgesetzten Softwareentwurf, wurde darauf geachtet, modularisiert vorzugehen, sodass jede Erweiterung des Systems leicht hinzugefügt und wieder aus dem Programm entfernt werden kann.



Zeichnung 7: Softwaredesign, neue Implementierungen grün markiert

4.3.2. Ansteuerung der Sensorik

Programmablauf im Hinderniserkennungsmodul

Die Ansteuerung der Sensoren beginnt mit dem Auslesebefehl, der vom Hinderniserkennungsmodul an das Treibermodul gegeben wird. Die von den Sensoren gelieferten Rohdaten, werden zur Weiterverarbeitung, in Entfernungsdaten umgerechnet. Diese liegen dann für die Sensorfusion in einer Datenstruktur bereit.

Programmablauf im Treibermodul

Erhält das Treibermodul den Befehl zum Auslesen der Sensordaten eines Sensorrings, arbeitet das Programm die Folgenden Schritte für alle acht Sensoren des Ringes nacheinander ab: Zunächst muss dem entsprechenden Analogdigitalwandler der Befehl zum Umwandeln des Sensorsignals gegeben werden. Nach ca 0,4ms liegt dann der Messwert digital im ADC bereit und wird per I2C-Bus an das UC3A Controller Board gesendet, sobald der ADC dazu den Auftrag durch einen zweiten Befehl vom Treibermodul, erhalten hat. Die Befehlscodierung vom Controller Board zum ADC enthält stets die Adresse, die in der Treibersoftware für die einzelnen Sensoren gespeichert ist, sodass die Sensoren individuell angesteuert, und die ausgelesenen Messwerte den Sensoren zugeordnet werden können. Die Zeit, die der Analogdigitalwandler für die Umwandlung der Spannung in einen digitalen Messwert benötigt, stellt für die Datenerfassung in Echtzeit ein großes Problem dar, da, hoch gerechnet auf alle Sensoren der beiden Ringe, für die Auslesung 16 mal 0,4

ms = 6,4ms benötigt werden, was ca zwei Dritteln der Dauer einer Regelschleife des Quadrocopters entspricht. In der Zeit, in der das Programm auf die Messergebnisse der Infrarotsensorik wartet, kann kein anderer Prozess bearbeitet werden.

4.3.3. Sensordatenfilterung und -fusion

Die Sensordatenfilterung und -fusion erfolgt aus den Sensorwerten von den Infrarot- und Ultraschallsensoren, die den selben Sektor abdecken. Da für den bestehenden Ultraschallsensorring 12, und bei den beiden Infrarotsensorringen je acht Sensoren verwendet wurden, überdecken sich die einzelnen, von den Infrarot- und Ultraschallsensoren abgedeckten Sektoren, nicht für alle Sensoren. Aufgrund der Geometrie der Sensoranordnung, ergibt sich nur für jedes zweite der acht Infrarotsensorpaare, ein Ultraschallsensor mit gleicher Ausrichtung. Für die anderen Sensoren ist es daher nötig, die Werte der zwei nächsten Ultraschallsensoren zu kombinieren. Hierfür wird aus Sicherheitsaspekten der kleinste der beiden Ultraschalldistanzwerte für die weitere Sensorfusion verwendet. Die Kombination aus, den selben Sektor abdeckenden, langen und kurzen Infrarotsensor mit einem bzw. zwei Ultraschallsensoren, wird im weiteren als Sensorgruppe bezeichnet.
Um aus den Sensordaten jeder Sensorgruppe, den besten, also den am nächsten an der realen Entfernung liegenden, Sensorwert heraus zu finden, werden die Messergebnisse aller Sensoren in einem Weighted Filter fusioniert. Es werden dafür zuerst jene Sensoren von der Sensordatenfilterung aussortiert, deren Messwerte nicht im Messbereich des jeweiligen Sensortyps sind. Anschließend wird zur Sensordatenfusion anhand von Referenzsensoren die Plausibilität von Infrarotsensorwerten und Ultraschallsensorik überprüft, um den Sensorwert zu ermitteln, der am wahrscheinlichsten dem realen Abstandswert zum Hindernis entspricht.

4.3.3.1. Sensordatenfilterung

Die Sensordatenfilterung ist dazu konzipiert, fehlerhafte Messwerte bereits vor der Sensordatenfusion aus der Verarbeitung auszuschließen. Als fehlerhaft sind zum Beispiel solche Messwerte zu betrachten, die nicht innerhalb des Messbereichs liegen, in dem für den jeweiligen Sensortyp eine genaue Messung möglich ist. Eine solche Filterung beschränkt die, in die Sensorfusion fließende Datenmenge auf die zuverlässigen Messwerte, wodurch die Bestimmung des besten Entfernungswertes treffsicherer wird.

Die Filterung berücksichtigt die Modularität der verschiedenen eingesetzten Sensoriken. Das bedeutet, dass die Software zunächst unabhängig von den Messwerten anderer Sensoren eine Ausschlussentscheidung trifft. Im Fall der Ultraschallsensorik steht nur ein Sensorwert zur Verfügung. Liegt dieser nicht im Messbereich der Ultraschallsensoren, wird er aus dem Datenstrom für die Sensordatenfusion heraus gefiltert. Die Filterung der Infrarotsensorik ist durch die Verwendung zweier Sensoren, die nicht den selben Messbereich abdecken, komplexer und soll daher genauer erläutert werden.

Infrarotsensordatenfilter

Um den Messbereich und die Messgenauigkeit der Infrarotsensorik zu erhöhen, werden zwei Infrarotsensoren mit verschiedenen Messbereichen in einer Sensorgruppe parallel eingesetzt. Man erhält also zwei Messwerte, von denen jedoch meist nur einer im Bereich der korrekten Entfernung

liegt, während der andere nicht im Messbereich des Sensors und somit fehlerbehaftet ist. Dabei können die Sensoren selbst nicht erkennen, ob die Entfernung, die sie gerade Messen, in ihrem Messbereich liegt. Um in solchen Fällen den korrekten Sensorwert herauszufinden, müssen beide Sensorwerte betrachtet werden.
Aufgrund der Position der Infrarotsensoren für die Bestimmung kleiner Distanzen, kann die gemessene Entfernung eines Hindernisses den Messbereich dieser Sensoren nur unterschreiten, wenn sich das Hindernis innerhalb der Rotorspannweite des Quadrocopters befindet. Der Mindestabstand von Quadrotor zu Hindernis, der durch den unteren Rand des Messbereichs der kurzen Infrarotsensoren gegeben ist, kann also im Flug nicht unterschritten werden. Somit kann sich ein Hindernis nur dann außerhalb des Messbereichs dieser Sensoren befinden, wenn der Abstand des Hindernisses zum UAV größer als die maximal, durch den kurzen Infrarotsensor messbare, Entfernung ist.
Liegen die Messwerte beider Infrarotsensoren außerhalb deren Messbereiche, kann man aus dem obigen Sachverhalt und der Überlappung der Messbereiche von kurzem und langem Infrarotsensor schließen, dass sich das Hindernis auch außerhalb der größten Reichweite des langen Infrarotdistanzsensors befindet. In diesem Fall kann die Entfernung zum Hindernis zwar nicht mehr genau bestimmt werden, doch stellt es außerhalb der Sensorreichweite keine Gefahr für den Quadrocopter dar. Ist aus den Messwerten der Infrarotsensoren ersichtlich, dass sich das Hindernis in nur einem der Messbereiche der Infrarotsensoren befindet, kann die Software direkt den jeweils anderen Wert von der weiteren Verarbeitung ausschließen. Befinden sich die Messwerte beider Sensoren innerhalb deren Messbereiche, werden beide Sensorwerte an die, an die Datenfilterung anknüpfende Sensordatenfusion weitergeleitet.

4.3.3.2. Sensordatenfusion

Im Gegensatz zum vorangegangenen Datenfilter, überprüft die Fusion die Messwerte der einzelnen Sensoren einer Sensorgruppe nicht alleinstehend, sondern ermittelt aus allen Messwerten von Infrarot- und Ultraschallsensorik, sofern sie nicht zuvor ausgefiltert wurden, den plausibelsten. Hier wird der in Kapitel 3.3. beschriebene Weighted Filter [Weighted Filter, 2012] eingesetzt. Dieser Wählt durch den Vergleich aller Sensoren miteinander, den am besten, zu allen Sensorwerten passenden, Abstandswert, als gültigen aus.

Für die Datenfusion werden die Gewichte aller in die Fusion einfließenden Sensorwerte bestimmt. Wurde ein Messwert zuvor ausgefiltert, wird er hier nicht berücksichtigt.

Durch den Weighted-Filter werden vor Allem stark schwankende Messwerte aussortiert. Da sich, für große Differenzen zwischen zwei Messungen in der Plausibilitätsprüfung, große Gewichte für diesen Messwert ergeben. Anders als bei konstant bleibenden Messungen, ist bei stark variierenden Messergebnissen die Bestimmung des erwarteten nächsten Messergebnisses über die Referenz-sensoren, erschwert. Deckt sich jedoch die Vorhersage durch die Referenzsensoren mit dem Messwert, würde der schwankende Sensorwert vom Filter als wahrscheinlicher erachtet, als ein Sensorwert, der, zum Beispiel bei einer Bewegung des Quadrocopters, konstant bleibt.
Wird nach der Filterung von Fehler behafteten Messwerten nur ein Abstandwert an den Filter übergeben, wird dieser als gültiges Messergebnis ausgegeben, auch wenn dessen Messung stark schwankt. Stehen für die Datenfusion alle drei Distanzsensorwerte, also zwei Infrarotsensorwerte und ein Ultraschallsensorwert, zur Verfügung, werden wie beschrieben, alle Sensorwerte herangezogen, um den besten zu finden. Die Datenfilterung und -fusion wird für jede der acht Sensorgruppen separat durchgeführt. Man erhält also acht gefilterte und fusionierte Entfernungsdaten.

Referenzsensorik

Als reiner Referenzsensor wird in der Implementierung der Datenfusion die, nach unten gerichtete Kamera zur Bestimmung des optischen Flusses herangezogen. Diese erkennt bei kontrastreicher Bodenoberfläche kleinste Bewegungen des Quadrocopters in horizontaler Richtung. Über die bereits vorhandenen Messdaten kann ermittelt werden, ob sich das UAV in positive oder negative Sensorrichtung bewegt. Dazu transformiert die Software die in Systemkoordinaten gelieferten Daten des optischen Flusses in das jeweilige Sensorkoordinatensystem der Sensoren um. Es handelt sich hierbei um eine zweidimensionale Matrixrotation. Der Rotationswinkel **Θ** entspricht der Blickrichtung des jeweiligen Sensors, wobei die y-Koordinate des Systems auf die x-Koordinate des Sensors transformiert wird. Die Transformationsmatrix kann wie folgt dargestellt werden:

$$R(\Theta)=\begin{pmatrix}\cos\Theta & \sin\Theta\\ \sin\Theta & -\cos\Theta\end{pmatrix} \tag{11}$$

Für den optischen Fluss in Sensorkoordinaten ergibt sich daraus:

$$\begin{pmatrix}x_{Sensor}\\ y_{Sensor}\end{pmatrix}=R\begin{pmatrix}x_{System}\\ y_{System}\end{pmatrix} \quad = \quad \begin{pmatrix}x_{Sensor}\\ y_{Sensor}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}\cos\Theta & \sin\Theta\\ \sin\Theta & -\cos\Theta\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_{System}\\ y_{System}\end{pmatrix} \tag{12}$$

Für die Datenfusion ist nur der Anteil in x-Richtung des Sensors entscheidend. Für diesen gilt:

$$x_{Sensor}=x_{System}\cos\Theta+y_{System}\sin\Theta \tag{13}$$

Die hier gezeigte Transformation kann für jede Erweiterung der Referenzsensorik genutzt werden, sofern die herangezogen Referenzsensordaten in Systemkoordinaten geliefert werden.

Liefert der Referenzsensor, mit der realen Verschiebung des Quadrocopters übereinstimmende, Bewegungswerte, erhält man aus dem obigen Zusammenhang die erwartete Veränderung des Abstandssensorwertes. Da jedoch die gemessene Entfernung über den optischen Fluss stark von der Bodenbeschaffenheit und den Lichtverhältnissen abhängt, kann für die Plausibilitätsprüfung nur die Tendenz der festgestellten Bewegung verwendet werden. Aus der Tendenz wird für die Positionsänderung des Quadrocopters ein fester Wert bestimmt, der zwar nicht der wahren Positionsänderung entspricht, aber eine Aussage zur Positionsvorhersage ermöglicht. Liefert der optische Fluss Daten, die für eine Verringerung des Abstands zum Hindernis sprechen, wird erwartet, dass sich auch die Werte der Distanzsensoren entsprechend verhalten. Sollte ein Wert eine andere Tendenz aufweisen als im optischen Fluss gemessen, wird dieser Sensorwert als weniger vertrauenswürdig eingestuft.

4.4. Erweiterung der Kontrollsoftware

Über die im Rahmen des AQopterI8 entwickelte Kontrollsoftware, kann sich der Benutzer die, vom Quadcopter über Bluetooth gesendeten, Daten zur Hinderniserkennung anzeigen zu lassen und bestimmte Module des UAVs, je nach Bedarf, während dem Flug, aktivieren oder deaktiveren. (siehe Abb. 22). Das Ziel der Erweiterung der Kontrollsoftware im Bereich der Hinderniserkennung war es, die Daten von Infrarot- und Ultraschallsensorik über das selbe Menü ansteuern zu können. Um die Distanzwerte der Infrarotsensorik in den grafischen Informationsfluss der bestehenden Hinderniserkennung einzubinden, wurde die Benutzeroberfläche um ein Dropdown-Menü im Grafikmenü der Hinderniserkennung ergänzt. Darüber kann nun die Sensorik eingestellt werden, deren Werte im rechts daneben liegenden Diagramm angezeigt werden sollen. Je nachdem, welche Sensorik eingestellt ist, wird die Anzahl der Diagrammsektoren an die Anzahl der dafür verwendeten Sensoren angepasst. Anhand der Längen der grünen Sektoren des Diagramms kann direkt die gemessene Entfernung der entsprechenden Sensorik abgelesen werden. Je länger ein Sektor ist, desto größer ist der Abstand vom Quadrocopter zum nächsten Hindernis in Richtung des entsprechenden Sensors. Die Reihenfolge der Sektoren entspricht dabei der der Sensoren. Der senkrecht nach oben gerichtete Sektor repräsentiert den Sensor, der in positive Y-Richtung des Quadrocopterkoordinatensystems zeigt.

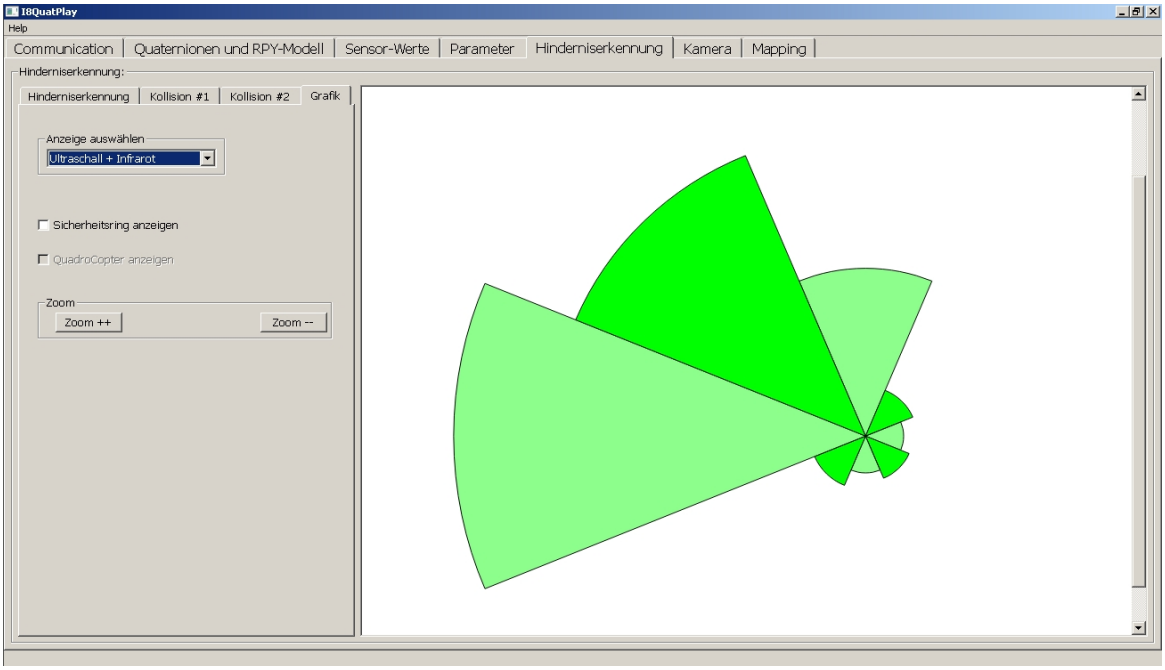


Abbildung 22: Benutzeroberläche der Kontrollsoftware des AQopterI8

5. Evaluierung

Zur Bewertung der, neu ins System integrierten, Sensorik, wurden speziell deren Funktionstüchtigkeit unter Betrachtung der maximal zuverlässig messbaren Entfernung der einzelnen Sensorringe und der Abweichung der Messergebnisse von der tatsächlichen Distanz zu einem Hindernis analysiert. In weiteren Untersuchungen sollte festgestellt werden, in wie fern sich die Abstandsmessung durch die Fusion von zwei Infrarotsensoren miteinander als auch durch eine Fusion der kompletten Infrarotsensorik mit den bereits vorhandenen Ultraschallsensoren verbessern lässt. Dazu wurden verschiedenen Tests aufgebaut, in denen das Verhalten der Messdaten genau bestimmt werden sollte. Die nachfolgend beschriebenen Versuche wurden stets mehrfach wiederholt, um die gewonnenen Messergebnisse zu bestätigen.

5.1. Sensorreichweite und -genauigkeit

Versuchsaufbau

Für die Evaluierung der Sensorreichweite und -genauigkeit wurde eine Teststrecke aufgebaut, auf der der Quadrocopter auf einer Länge von 6m freie Sicht auf ein Hindernis hatte. Das Hindernis war eine vertikal aufgestellte Weichbodenmatte, die sowohl Infrarot- als auch Ultraschallsignale sehr gut reflektiert und somit gut von den verwendeten Sensoren erkannt werden konnte (siehe Abb. 24).
Die Bewertung des Systems erfolgt über die Analyse der Sensorik in einer Richtung. Aus der geometrischen Symmetrie der eingebauten Sensorik kann man dann auf die Gültigkeit der gewonnenen Informationen für alle Sensoren in den Ringen schließen.
Die Versuche fanden zunächst auf dem Boden statt, um eine genaue Position des Quadrocopters zum Hindernis einstellen zu können. Dazu wurde das UAV auf einen 91cm hohes Fahrgestell montiert (siehe Abb. 23). Da für die Sensorfusion als Referenzsensor eine nach unten gerichtete Kamera zur Bestimmung des optischen Flusses verwendet wird, wurde in die Auflage des Fahrgestells ein Loch gefräst, um die Sicht zum Boden zu ermöglichen. Zur Spannungsversorgung diente ein 12V-Netzteil, das den für den Betrieb des Quadrocopters nötigen Strom liefert.
Die Messergebnisse wurden vom UAV per Bluetooth an einen PC gesendet, wo sie angezeigt und gespeichert werden konnten.



Abbildung 23: Auf ein Fahrgestell montierter Quadrocopter

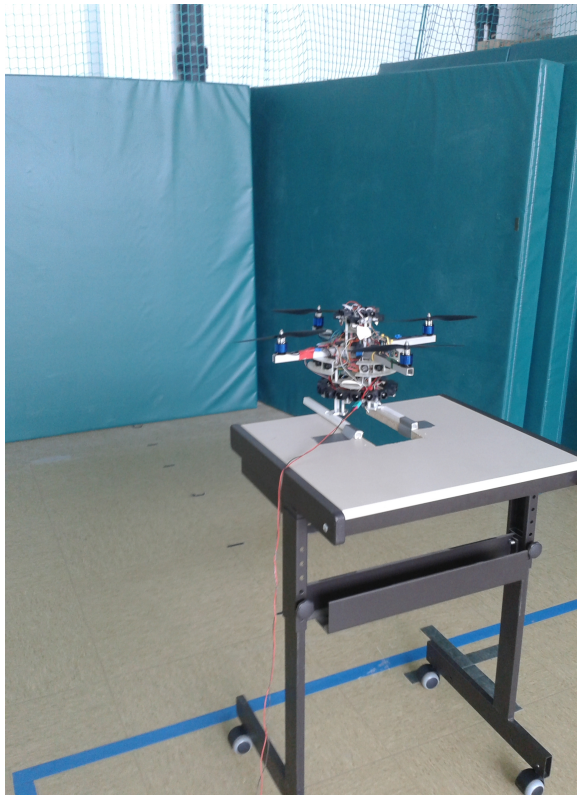


Abbildung 24: Quadrocopteraufbau im Testgebiet

Versuchsdurchführung

In der Messreihe zur Sensorreichweite und -genauigkeit wurde der Quadrocopter in festgelegten Abständen vor dem Hindernis aufgebaut und die gemessene Entfernung von Quadrocopter zu Hindernis für jede eingestellte Distanz 10 Sekunden lang aufgezeichnet. Die Messungen wurde für die Abstände 30cm, 60cm, 100cm, 150cm, 200cm, 300cm, 400cm, 500cm und 600cm durchgeführt. Auf diese Art wurden die maximalen Reichweiten und die Messgenauigkeit von Infrarotsensoren mit kurzem und langem Messbereich, sowie der Ultraschallsensorik bestimmt. Die verschiedenen Abstände wurden direkt nacheinander, ohne die Aufzeichnung zu unterbrechen, gemessen, sodass das Sensorverhalten in einer Messung dargestellt werden kann.

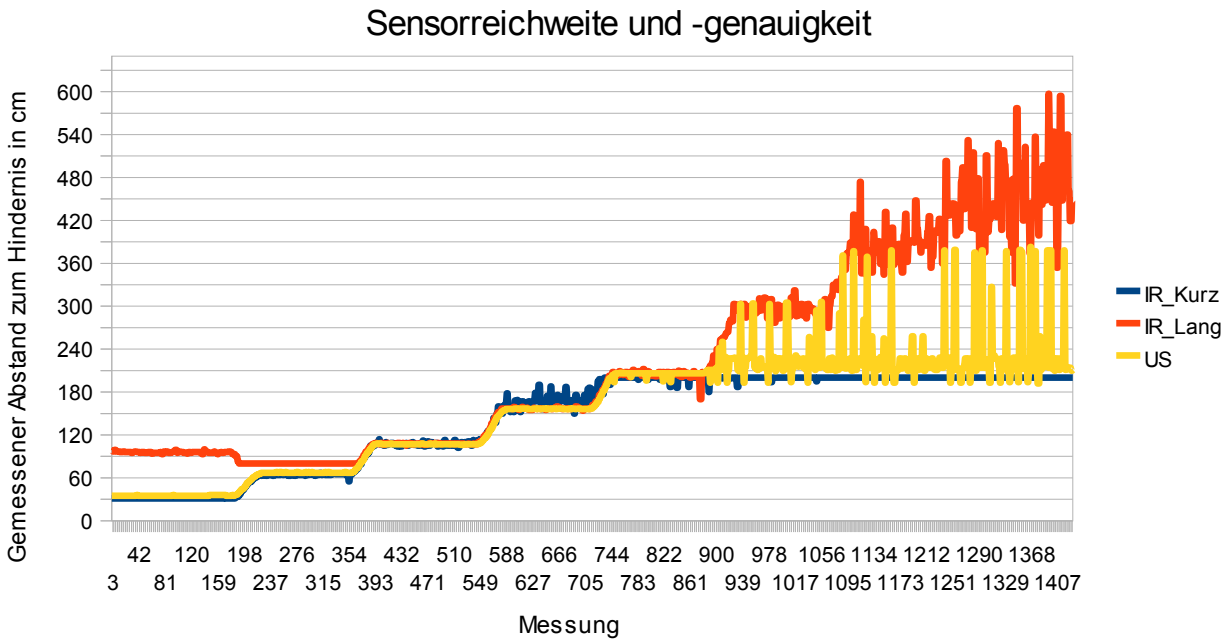


Diagramm 1: Sensorreichweite und Genauigkeit von Infrarot- und Ultraschallsensorik

Aus den Messwerten (siehe Diagramm 1) kann man die Arbeitsbereiche der verwendeten Sensoren ablesen. Kurzer Infrarot- und Ultraschallsensor sind bereits bei kürzester Distanz zum Hindernis in der Lage, die Entfernung zuverlässig zu bestimmen. Bei etwa 150cm kann der kurze Infrarotsensor die eingestellte Entfernung nicht mehr verlässlich bestimmen. Für die Ultraschallsensorik ist das bei ca 220cm der Fall, da hier die Messwerte stark variieren. Der durch die langen Infrarotdistanzsensoren bestimmte Abstandswert weist ein besonderes Verhalten auf. In der Software ist die kleinste verlässlich bestimmbare Distanz für den langen Infrarotsensor auf 80cm eingestellt, weshalb dieser auch nur Messwerte über 80cm liefert. Unterschreitet man jedoch einen Abstand zum Hindernis von ca 40cm, nimmt der bestimmte Abstand wieder zu. Dieses Verhalten ist auf die Charakteristik des Ausgangssignals der Infrarotsensoren zurück zu führen. Für sehr kurze Distanzen, unterhalb des Messbereichs, liefern die verwendeten Infrarotsensoren die selbe Ausgangsspannung wie für eine bestimmte lange Distanz. Da softwareseitig die kleinste messbare

Distanz auf 80cm festgesetzt ist, wird aus der Messspannung ein Abstandsergebnis errechnet, das größer als diese 80cm ist. Es ist Aufgabe der Datenfilterung, in diesem Fall zu erkennen, dass der Messwert ungültig ist. Deren Verhalten wurde in einem weiterer Testreihe untersucht. Für die Messwerte der kurzen Infrarotsensoren würde man den selben Effekt feststellen, wenn man sich dem Hindernis bis innerhalb der Rotorspannweite des Quadrocopters nähert. Aus den Werten der langen Infrarotsensoren kann man ablesen, dass diese Sensoren bis ca 350cm nur geringe Abweichungen von weniger als 10% der tatsächlichen Entfernung aufweisen. Bei größeren Distanzen ist auch hier die Messgenauigkeit nicht mehr ausreichend für eine sichere Abstandsmessung.

5.2. Verhalten von Datenfilterung und -fusion

In diesem Versuch soll untersucht werden, wie zuverlässig Datenfilter und -fusion den am nächsten an der realen Distanz liegenden Messwert auswählen. Hierzu wurde der selbe Versuchsaufbau wie bereits für die Tests zur Sensorreichweite und -genauigkeit verwendet.

5.2.1. Versuchsdurchführung

Datenfilterung und -fusion bei idealen Hindernissen

Um das Verhalten von Datenfilter und -fusion bei idealen Hindernissen, also solchen, die von beiden Sensortypen gut erkannt werden können, zu analysieren, wurde der Quadrocopter auf dem Fahrgestell in 600cm Entfernung zum bereits zuvor eingesetzten Hindernis aufgestellt. Das entspricht der Distanz, in der keiner der verwendeten Sensoren den Abstand zuverlässig bestimmen kann. Nun wird das UAV mit ca 0,3 m/s bis zu einem minimalen Abstand von 30cm auf das Hindernis zu bewegt. Anschließend wird der Aufbau wieder mit ca 0,3 m/s vom Hindernis weg bewegt. Dabei werden die Messdaten der beiden Infrarotdistanzsensoren und der Ultraschallsensorik sowie das Ergebnis aus Infrarotsensordatenfilterung und Datenfusion von Infrarot- und Ultraschallsensorik aufgezeichnet.

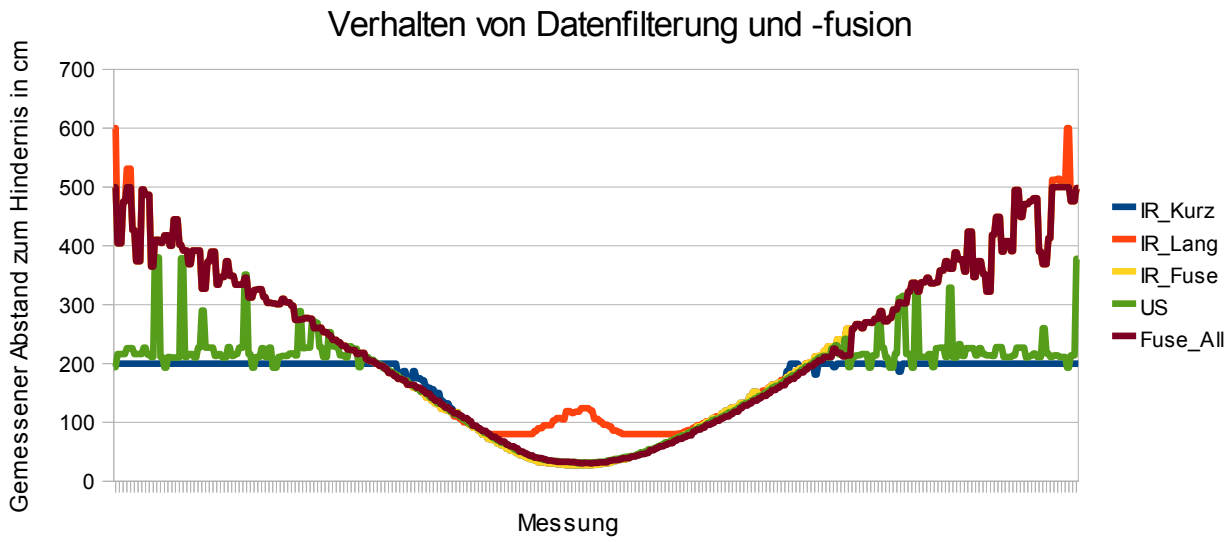


Diagramm 2: Verhalten von Datenfilterung und Funktion bei Veränderung der der Position des Quadrocopters

In der Aufzeichnung der Daten (siehe Diagramm 2) ist zu erkennen, dass das Ergebnis der Datenfusion meinst dem am nächsten am tatsächlichen Abstandswert liegenden Sensorwert entspricht. In maximaler Entfernung zum Hindernis werden kurzer Infrarotsensor und der Ultraschallsensor durch die Datenfilterung von der weiteren Betrachtung in der Datenfusion ausgeschlossen. Obwohl der Messwert des langen Infrarotsensors sehr ungenau ist, gibt die Fusion den Wert dieses Sensors als gültiges Messergebnis aus. Wäre der kurze Infrarotsensor nicht aus der Datenfusion entfernt, müsste der Wert des kurzen Infrarotsensors, aufgrund seines konstanten Messverhaltens, als Ergebnis der Fusion ausgegeben werden. Auch die Filterung der beiden Infrarotsensoren erkennt den Entfernungswert des langen Sensors in diesem Bereich als bestes Messergebnis an. Da der lange Infrarotdistanzsensor über viele Messungen hinweg stets als gültiger Messwert angenommen wurde und im Gegensatz dazu, die anderen beiden Sensoren nie, vertraut die Datenfusion dem langen Sensor soweit, bis dieser bei 80cm seinen Messbereich unterschreitet. Ab dieser Entfernung wird er von der Datenfilterung ausgeschlossen. Die Datenfusion nimmt daraufhin den Wert des Ultraschallsensors als bestes Ergebnis an, da dieser bereits vor dem kurzen Infrarotsensor näher am Ergebnis der Fusion lag und somit ein niedrigeres Gewicht aufgrund seiner Historie besitzt. Im Bereich, in dem der lange Infrarotsensor aufgrund seiner Charakteristik bei kleiner Entfernung ein größeres Ergebnis liefert, folgen Datenfilter und und -fusion weiter dem Ultraschallsensor, da dem langen Sensor wegen der Abweichung dessen Messergebnisses vom Fusionsergebnis zwischen 80cm und 40cm wieder ein höheres Gewicht durch seine Vergangenheit zugeordnet wird und diesem deshalb weniger vertraut wird. Der Ultraschallsensor wird bis zu der Entfernung als vertrauenswürdigsten eingestuft, in der dieser Schwankungen im Messwert aufweist. Ab da befindet sich das Hindernis auch nur noch im Messbereich des langen Infrarotsensors, sodass dessen Ergebnis von der Datenfusion ausgegeben wird. Überschreitet der Wert des langen Infrarotsensors die Obergrenze dessen Arbeitsbereichs, wird die Obergrenze als Ergebnis der Filterung ausgegeben.

Datenfilterung und -fusion bei problematischen Hindernissen

Als problematische Hindernisse werden hier solche bezeichnet, deren Oberflächenbeschaffenheit eine sichere Abstandsmessung durch Infrarot- oder Ultraschallsensorik negativ beeinflusst. Für Ultraschallsensoren sind das vor Allem schallschluckende Oberflächen. Infrarotsensoren haben bei durchsichtigen Hindernissen, wie Glasscheiben, Schwächen bei der Entfernungsbestimmung. Zur Untersuchung, ob die Datenfusion erkennt, ob ein Sensor bei bestimmten Hindernissen versagt, wird der Quadrocopter in einem festgelegten Abstand, im ersten Versuch vor einem Objekt mit schallschluckender Oberfläche, in diesem Fall eine bekleidete Puppe (siehe Abb. 25), und im zweiten vor einer Glasvitrine positioniert. Die eingestellte Entfernung wurde gleichzeitig von beiden Infrarotdistanzsensoren sowie der Ultraschallsensorik gemessen. Weiter sind die Ergebnisse von Infrarotsensorfusion und Datenfusion mit Ultraschallsensorik aufgezeichnet worden.

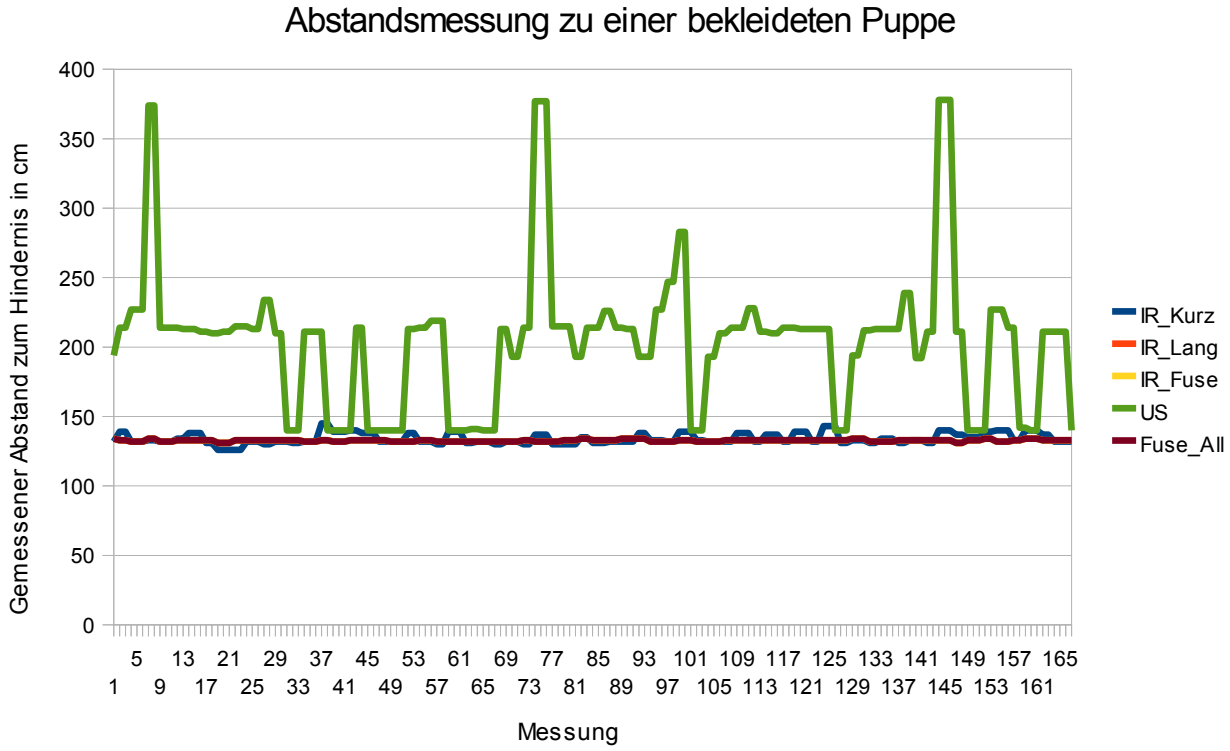


Diagramm 3: Abstandsmessung zu einer bekleideten Puppe mit Infrarot- und Ultraschallsensorik

Wie erwartet, kann der Ultraschallsensor die eingestellte Entfernung zur bekleideten Puppe von 130cm nicht zuverlässig messen, während die Infrarotsensorik hier den Abstand sicher bestimmen kann (vgl. Diagramm 3). Die Datenfusion entscheidet sich hier korrekt für den Wert des langen Infrarotsensors. Die Messergebnisse des kurzen Infrarotsensoren weisen leichte Schwankungen auf, da sich das Hindernis in der Nähe der Grenze dessen Messbereiches befindet.



Abbildung 25: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Verhaltens der Sensorwerte zur Abstandsmessung einer bekleideten Puppe

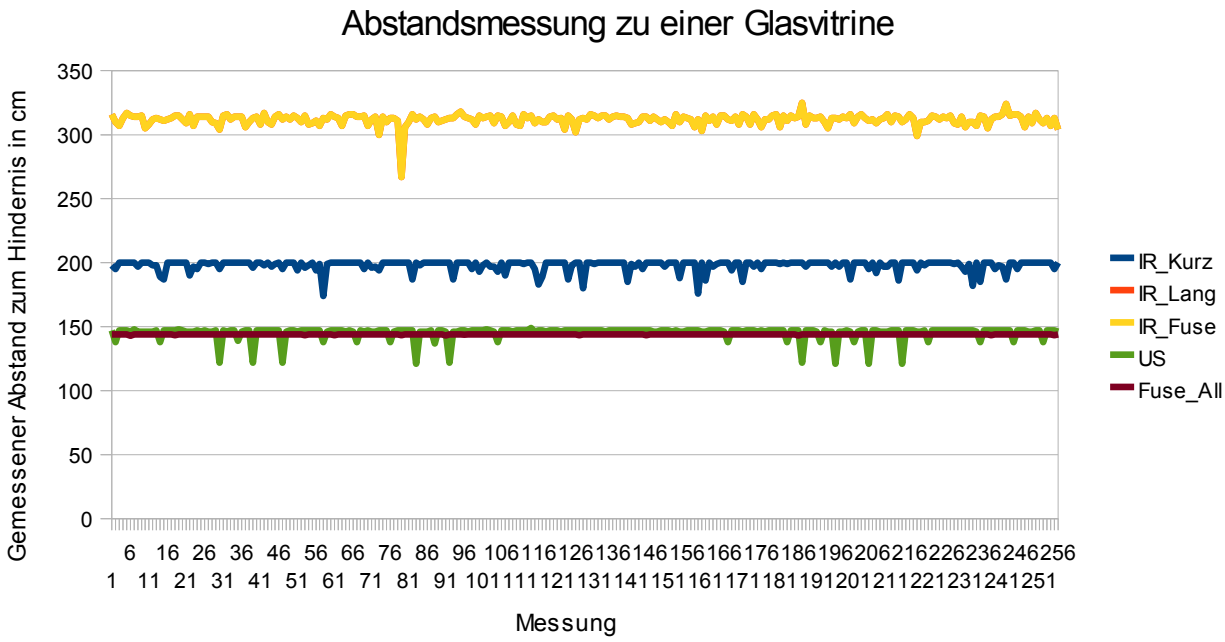


Diagramm 4: Abstandsmessung zu einer Glasvitrine mit Infrarot- und Ultraschallsensorik

In diesem Versuch, bei dem der Abstand zu einer, 150cm vom Quadrocopter entfernt aufgebauten, Glasvitrine gemessen wurde, konnte keiner der Infrarotsensoren die wahre Distanz bestimmen (vgl. Diagramm 4). Stattdessen lieferten diese einen Abstandwert, der weit über der tatsächlichen Entfernung lag. Der Ultraschallsensor ist hier deutlich genauer. In der Grafik ist auch zu erkennen, dass die Infrarotsensorfusion dem langen Sensor auswählt, da der kurze Infrarotsensor bei 200cm an der oberen Schranke seines Messbereichs angekommen ist und deshalb ausgefiltert wird. Die Datenfusion wählt hier richtiger Weise den Ultraschallsensorwert als gültigen aus, da die

Infrarotsensorik aufgrund ihrer schwankenden Messswerte als weniger vertrauenswürdig eingestuft wird.

5.3. Funktionalität des Sensors zur Messung des optischen Flusses

Um die Funktionalität des Sensors zur Messung des optischen Flusses zu untersuchen, wurde wieder der Aufbau aus den vorangegangenen Versuchen verwendet. Gemessen wurde hier der Abstand zu der, bereits zur Evaluierung von Sensorreichweite und -genauigkeit eingesetzten Weichbodenmatte. Für die Messreihe wurde der Quadrocopter in 400cm Entfernung zum Hindernis aufgestellt und mit ca 0,3 m/s zunächst auf das Hindernis zu bewegt. In 30cm Abstand zum Hindernis wurde die Position für einige Sekunden nicht verändert, bevor das UAV auf dem Fahrgestell mit 0,3 m/s vom Hindernis bis zu einer maximalen Distanz von 400cm entfernt wurde. Aufgezeichnet wurde hier das Ergebnis der Sensordatenfusion und die Tendenz des optischen Flusses.

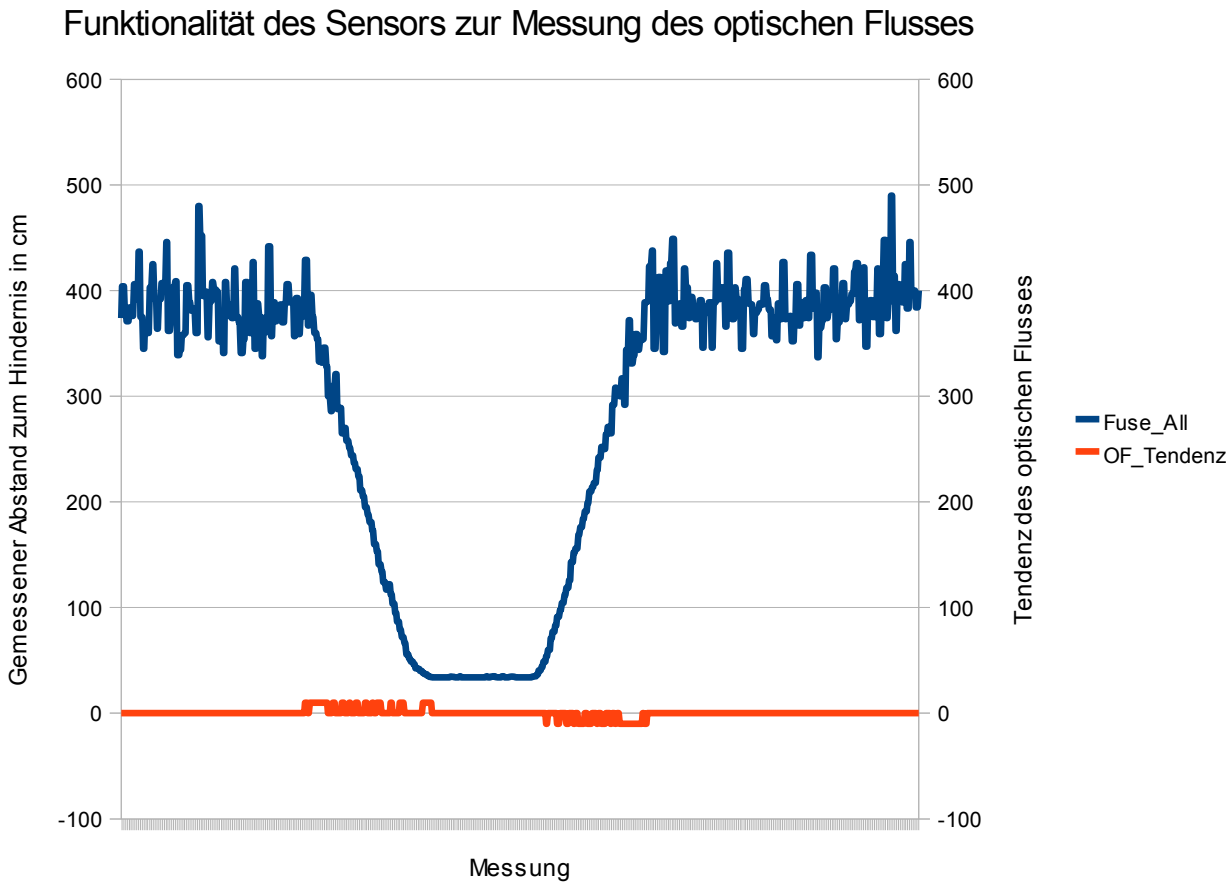


Diagramm 5: Verhalten der Messwerte des optischen Flusses bei Positionsveränderung des Quadrocopters

Wie man anhand der Grafik (siehe Diagramm 5) erkennen kann, zeigt der optische Fluss die richtige Tendenz der Bewegung des Sensors relativ zum Hindernis an. Wird der Abstand des Quadrocopters zum Hindernis verringert, wird eine Bewegung in positiver Sensorrichtung gemessen. Entsprechend umgekehrt verhält sich die Tendenz beim Entfernen vom Hindernis.

5.4. Hinderniserkennung in Räumen

In den vorherigen Versuchen wurde die Funktionalität der Sensorik sowie von Filterung und Fusion einer einzelnen Sensorgruppe getestet. In der folgenden Messreihe wurde das komplette System zur Hinderniserkennung, bestehend aus acht Sensorgruppen, untersucht. Hier sollte fest gestellt werden, wie zuverlässig komplette Räume gescannt werden. Dabei hatte die Sensorik nicht immer die ideale senkrechte Ausrichtung auf ein Hindernis, wodurch die Bedingungen für eine sichere Abstandsmessung erschwert waren.

5.4.1. Versuchsaufbau

Für diese Versuchsreihe wurde ein künstlicher Raum aus Weichbodenmatten aufgebaut (siehe Abb. 26).Der Aufbau für den Quadrocopter ist der selbe wie bei allen Versuchen zuvor.

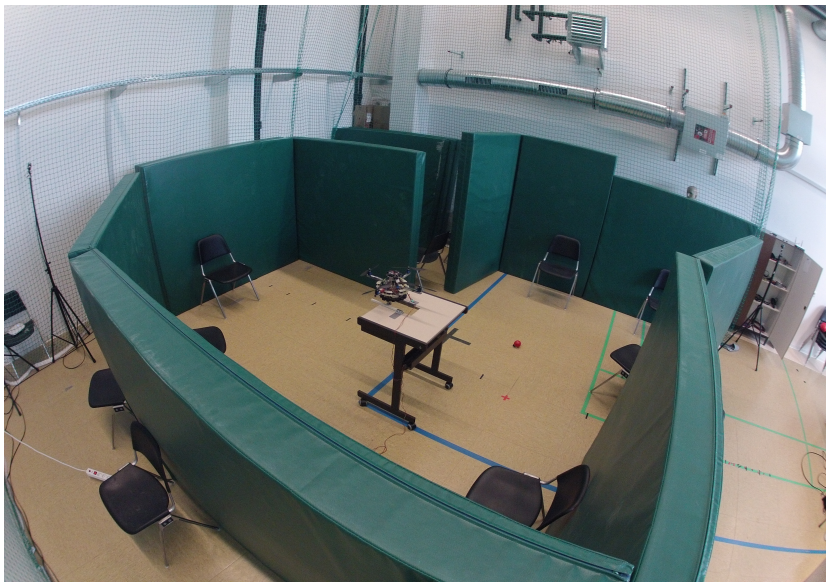


Abbildung 26: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Verhaltens der Hinderniserkennung im Raum

5.4.2. Versuchsdurchführung

Der, auf dem Fahrgestell montierte, Quadrocopter wurde innerhalb des Raumes positioniert und die Entfernungen vom Quadrocopter zu den Wänden in den Richtungen der acht Sensorgruppen von Hand bestimmt. Zudem wurde der Winkel des Hindernis zur Sensorgruppenachse gemessen. Daraufhin wurden die von der Sensorik gelieferten Abstände notiert. Die Messung wurde für

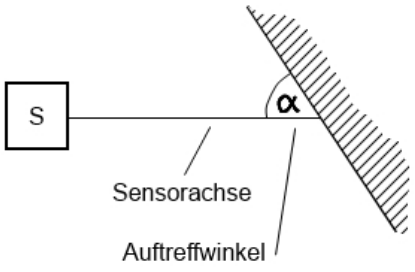
verschiedene Positionen des Quadrocopters durchgeführt. In der ersten Versuchsreihe lag das Augenmerk auf der Zuverlässigkeit der Datenfusion unter Berücksichtigung des Winkels (Definition siehe Zeichnung 8) zwischen Sensorachse und Hindernis. In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Abstandsbilder der einzelnen Sensorringe begutachtet. Die Entfernungsmesswerte sind jeweils in cm angegeben.

Abstandsmessung im Raum unter Berücksichtigung des Winkels zwischen Sensorachse und Hindernis

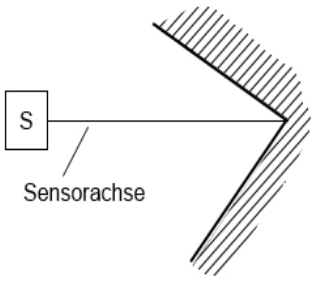
	Position 1			Position 2			Position 3		
SensorNr.	***Messwert***	***wahre Dist.***	***Winkel***	***Messwert***	***wahre Dist.***	***Winkel***	***Messwert***	***wahre Dist.***	***Winkel***
0	160	164	90°	151	147	70°	261	280	90°
1	171	168	90°	129	129	90°	291	310	90°
2	243	234	90°	104	99	90°	292	280	90°
3	179	180	45°	135	150	ecke	137	126	45°
4	199	197	90°	94	101	90°	160	163	90°
5	330	380	ecke	301	412	ecke	226	233	35°
6	163	168	90°	280	307	70°	156	154	60°
7	280	205	ecke	263	275	ecke	146	142	90°

Tabelle 1: Messwerte der Abstandsmessung im Raum von Positionen des Quadrocopters

Grundsätzlich kann man bei der Messung (vgl. Tabelle 1) feststellen, dass die Abstandsmessung, auch bei schräg zur Sensorachse stehenden Hindernissen, zuverlässig ist. Jedoch treten bei der Distanzbestimmung von Ecken(siehe Zeichnung 9) große Schwankungen in der Messung auf, was vor Allem bei den Sensoren 5 und 7 bei Position 1 und Sensor 5 bei Position 2 deutlich wird.



Zeichnung 9: Definition des Auftreffwinkels



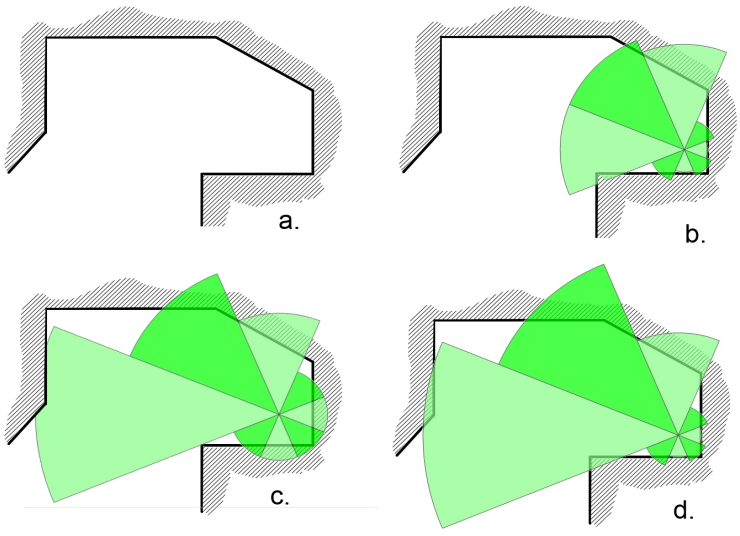
Zeichnung 8: Abstandsmessung zu einer Ecke

Abstandsmessung im Raum – Analyse der einzelnen Sensorringe

SensorNr	wahre Dist.	IR_Kurz	IR_Lang	IR_Fusion
0	157	183	191	191
1	59	61	80	61
2	39	40	80	40
3	62	63	80	63
4	39	39	80	39
5	74	75	80	75
6	393	200	417	417
7	333	200	343	343

Tabelle 2: Messwerte der Infrarotsensorik zur Abstandsmessung im Raum

Diese Messreihe (Tabelle 2) bestätigt, bis auf Sensorgruppe 0, die Treffsicherheit der Datenfusion bei der Auswahl des besten Sensorwertes. Für sieben der acht Sensorgruppen wurde der Sensor ausgewählt, der die Distanz zum Hindernis am sichersten gemessen hat. Wird bei den Sensorgruppen 1 bis 5 der Messbereich des langen Infrarotsensors unterschritten, nimmt die Datenfusion den Wert des kurzen Infrarotsensors als gültig an, während bei den Sensorgruppen 6 und 7 der Messbereich des kurzen Infrarotsensors überschritten wird und die Datenfusion den Messwert des langen Infrarotsensors ausgibt. Für Sensorgruppe 0 befinden sich die gemessene Distanz im Messbereich beider Infrarotsensoren. Hier entschied sich die Fusion, aufgrund der Sicherheit des langen Sensors im Vergleich zum kurzen, für den langen Sensor. Die Distanz der Wand im Sektor der Sensorgruppe 0 konnte von beiden Sensoren nicht genau gemessen werden. Grund dafür kann die schräge Ausrichtung der Wand zur Sensorachse sein (vgl. Zeichnung 10).



Zeichnung 10: Zusammenstellung des Messverhaltens der Sensorringe; a: leerer Raum, b: Abstandsmessung des kleinen Infrarotsensorrings, c: Abstandsmessung des großen Infrarotsensorrings, d: Abstandsmessung und Datenfusion beider Sensorringe

Beim Einsatz der kompletten Sensorringe trat im Versuch das Problem auf, dass Hindernisse, die zwischen den Achsen zweier, nebeneinander liegenden, Sensorgruppen aufgestellt waren, von der Infrarotsensorik nicht registriert wurden. Ein aufgestelltes Hindernis mit einer Breite von ca 40cm wurde, bereits in einem Abstand von 90cm vom Quadrocopter nicht mehr wahrgenommen (vgl. Abbildung 27).

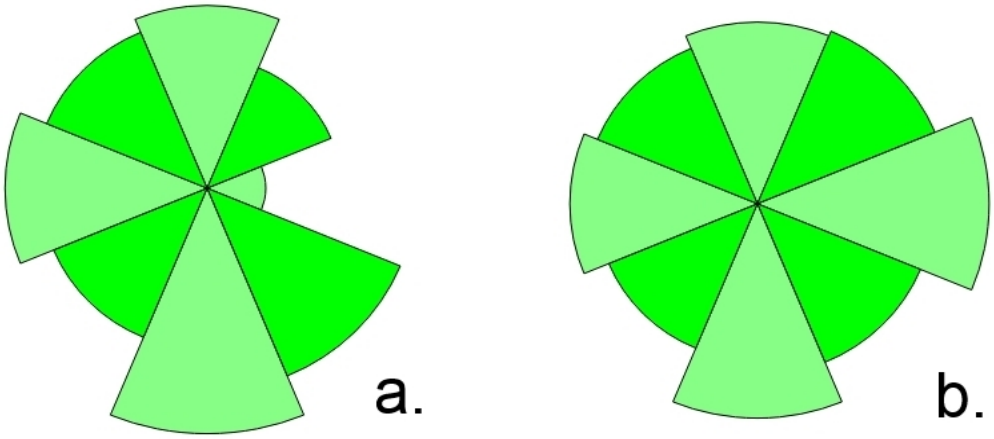


Abbildung 27: Sensorverhalten bei kleinen Hindernissen zwischen den Sektoren der Sensorringe; a: Hindernis wird erkannt, b: Hindernis wird nicht erkannt

Bestimmung der Sampletime der Sensorringe

Um die Zeit, die für das Auslesen aller Infrarotsensoren benötigt wird, zu bestimmen, wird die Zeit gemessen, die für das 100-malige Auslesen der Sensorik in Anspruch genommen wird. Daraus ergab sich nach mehrfacher Wiederholung der Messung eine Dauer von ca 700ms. Somit beträgt die Zeit, die zum einmaligen Auslesen aller Infrarotsensoren benötigt wird 7ms. Diese Zeitspanne ist auf die Auslesegeschwindigkeit des ADC-I2C Chips zurück zu führen. Diese kann auch nicht weiter reduziert werden, ohne die I2C-Bus-Software des Quadrocopters grundlegend umzugestalten.

6. Diskussion und Ausblick

6.1. Diskussion der Ergebnisse

Sensorreichweite und -genauigkeit

Das bestehende System der Ultraschallsensorik weist bereits ab ca 220 cm starke Schwankungen im Messergebnis auf, während die eingebauten Infrarotsensoren bis zu einer Entfernung von 350cm den Abstand zum Hindernis sicher ermitteln können. Die vom Hersteller angegebenen 550cm Reichweite der Sensoren konnte in keinem der durchgeführten Tests bestätigt werden. Der Grund dafür ist vermutlich in der Empfindlichkeit der Infrarotsensorik auf jegliche Infraroteinstrahlung in den Detektor des Sensors, zu suchen, wodurch auch die Wärmestrahlung der Umgebung oder auch der Tageslichteinfall die Sensorgenauigkeit beeinträchtigen.

Datenfilterung und -fusion

Die Datenfilterung und -fusion ist in der Lage, treffsicher den Sensorwert auszuwählen, der die wahre Distanz zum Hindernis am genauesten misst. Bei den problematischen Hindernissen, bei denen die Abstandsmessung aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit einzelner Sensoren erschwert war, hat die Datenfusion stets dem Sensortyp vertraut, der den besten Messwert lieferte.

Referenzesensorik

Die Referenzsensorik ist bis hier hin auf den Sensor zur Messung des optischen Flusses beschränkt. Es wurde aber gezeigt, dass die verwendeten Daten zuverlässig die Tendenz des Verhaltens des Systems beschreiben, sofern die Verhältnisse, also Kontrast der Bodenstruktur und Lichteinfall, ausreichen. Die starke Abstraktion der Sensorwerte des optischen Flusses durch die Reduzierung der Messwerte auf die Tendenz, kann unter Umständen die Auswahl des besten Sensorwertes beeinträchtigen. Ein falscher Messwert könnte zum Beispiel als vertrauenswürdiger eingestuft werden, wenn er sich zwar mit der über die Tendenz geschätzte Positionsänderung deckt, aber in der Realität weit neben der Positionsveränderung des Quadrocopters liegt. Die rein tendenzielle Betrachtung der Referenzsensordaten kann zwar das grobe Verhalten des Systems beschreiben, doch ist für eine zuverlässige Verwendung in der Datenfusion ein genaueres Verfahren zur Bewegungserfassung notwendig. Der Einsatz weiterer Referenzsensoren, wie Beschleunigungsmesser, könnte ebenso einer Verbesserung der Sensorfusion dienen.

Hinderniserkennung in Räumen

Bereits mit der neu implementierten Infrarotsensorik alleine, konnte sich der Quadrocopter einen Überblick über die Umgebung verschaffen. Diese versagt jedoch sehr bald bei kleinen Hindernissen, da die Sektoren der Infrarotsensorik für deren Öffnungswinkel zu groß gewählt wurden. Zwar werden die meisten Hindernisse von der Ultraschallsensorik, die mit einer Sektorgröße von durchschnittlich 30° eine höhere Winkelauflösung hat, wahrgenommen, doch würde, bei einem Ausfall der Ultraschallsensorik, das Hindernis nicht registriert. Die Datenfusion von Ultraschall und Infrarotsensorik hat auch in diesem Versuch stets den besten Sensorwert als gültigen ausgegeben. Bei schräg zum Sensor stehenden Hindernissen, haben die Sensoren mit geringen Abweichungen den Abstand zum Hindernis bestimmen können. Bei der Abstandsmessung zu Ecken traten jedoch große Probleme bei der zuverlässigen Messung auf. Das Ziel, für jeden Durchlauf der Regelungssoftware, einen aktuellen Abstandswert von der Infrarotsensorik zu erhalten kann, aufgrund der Trägheit der Datenübertragung per I2C-Bus, nur unter der Bedingung erreicht werden, dass neben der Infrarotsensorik keine weiteren Systeme betrieben werden. Da innerhalb einer 10ms dauernden Regelschleife alleine 7ms auf die Infrarotsensorwerte gewartet werden muss, blieben für Lageregelung, Datenübertragung und -filterung sowie für die Ansteuerung der anderen Sensoren des Quadrocopters 3ms, was für den nötigen Aufwand nicht ausreicht.

Die neu implementierte Infrarotsensorik kann große Hindernisse, wie Wände, in einem Abstand von 30cm – 350cm zuverlässig erkennen, sofern diese, die, von den Sensoren ausgesandten Infrarotlichtimpulse, für die Sensoren ausreichend reflektieren. Da jedoch kleinere Hindernisse, wie Säulen oder Stühle nicht zuverlässig wahrgenommen werden, falls diese sich zwischen den Scanbereichen der Sensoren befinden, kann das System so nicht alleinstehend für die Hinderniserkennung eingesetzt werden. Die, im Rahmen dieser Arbeit umgesetzte, Datenfusion mit der bereits vorhandenen Ultraschallsensorik, ermöglicht es jedoch dem System, die gewonnenen Daten von zwei Sensorsystemen zu kombinieren, wodurch eine erhöhte Sicherheit in der Erkennung von Hindernissen in der Umgebung des Quadrocopters erreicht wurde. Dennoch wäre eine größere Geschwindigkeit der Auslesung der Sensordaten verbunden mit einer höheren Samplerate der Sensorik wünschenswert, um die Abstandswerte in kürzerer Zeit der Lage- und Abstandsregelung des Systems zur Verfügung stellen zu können.

6.2. Ausblick

Das bestehende System des Quadrocopters ist in idealer Umgebung durchaus in der Lage, Hindernisse in Sensorreichweite wahrzunehmen. Um jedoch den Quadrocopters vollständig autark betreiben zu können, ist weiter eine verbesserte Erfassung der Situation des Systems nötig. Mögliche Ansätze für eine Verbesserung der Hinderniserkennung sind im Folgenden aufgeführt.

Um die Zuverlässigkeit der eingesetzten Referenzsensorik und damit auch die Treffsicherheit der Datenfilterung zu erhöhen, sollten weitere Sensoren, wie Beschleunigungs- oder Geschwindigkeitsmesser, zur Unterstützung der Messergebnisse in die Datenfilterung eingebunden werden. Das hier verwendete System, zur Bestimmung des optischen Flusses, könnte durch eine geeignete Skalierung der Sensorwerte, die genaue Positionsänderung des Quadrotors iefern. Hier bieten sich also noch Möglichkeiten, die Referenzsensorik zu verfeinern.

Die bei der Hinderniserkennung, durch den alleinigen Einsatz der Infrarotsensoren, auftretende

Problematik des Nichterkennens zu kleiner Hindernisse, kann durch verschiedene Ansätze bewältigt werden. Zum einen kann die Winkelauflösung der bestehenden Sensorik durch das Hinzufügen weiterer Sensoren erhöht werden, sodass auch, bisher nicht abgedeckte Zonen, ausgeleuchtet werden können. Das würde allerdings wiederum mit einer Vergrößerung der Nutzlast an Bord des Quadrocopters einher gehen, was nach Möglichkeit verhindert werden sollte. Eine andere Methode, um die bisher nicht gescannten Bereiche zu erfassen, wäre es, den Quadrocopter im Flug ständig zu rotieren. Dadurch gäbe es zwar weiterhin nicht von Sensoren wahrgenommene Gebiete, doch würden, sich mit der Rotation des UAVs, die nicht gescannten Zonen mit den wahrgenommenen abwechseln. Auf diese Weise würde sich allerdings auch wieder die Wiederholrate der Messung des Abstands in eine bestimmte Richtung verschlechtern.

Für eine genaue Regelung des Systems ist eine Datenauswertung in Echtzeit wünschenswert. Um diesem Ziel näher zu kommen, ist es möglich, den bisher verwendeten ADC-I2C Chip zur Umwandlung der analogen Messsignale in Digitale Abstandswerte, durch einen Mikrocontroller zu ersetzen, der die kontinuierlich gelieferten Spannungen der Sensoren bei Anfrage durch den Bordcomputer des Quadrocopters ausgibt. Ein weiterer Ansatz, ist die Implementierung eines Betriebssystems für den Quadrocopter, Dieses könnte dazu eingesetzt werden, die Abläufe im System zu koordinieren, um die Prozessorzeit optimal auszunutzen. Während im aktuellen System die Software 7ms auf das Eintreffen aller Messergebnisse wartet, könnte ein Betriebssystem so eingestellt werden, dass in der Zeit, in der auf die Daten aus dem ADC gewartet werden muss, andere Prozesse im Programm bearbeitet werden, die nicht auf den angeforderten Sensorwerten basieren.

Literaturverzeichnis

LinWegAbst, 2004: Thomas Burkhardt, Albert Feinäugle, Sorin Fericean, Alexander Forkl, Lineare Weg- und Abstandssensoren, 2004

SHARP, 2013: http://www.sharp.de/, SHARP Infrarotsensoren, 2013,

HOKUYO, 2013: http://www.hokuyo-aut.jp/, HOYUKO Lasertechnologien, 2013,

DEVANTECH, 2013: http://www.robot-electronics.co.uk/, Devantech Ltd Robot Electronics, 2013,

ELV, 2013: http://www.elv.de/, Berührungslose Längenmessung, 2013,

PMD, 2013: http://www.pmdtec.com/, PMD Technologies GmbH, 2013,

DOT-HR, 2012: Takehiro Higuchi, Daichi Toratani, Seiya Ueno, COLLISION AVOIDANCE OF INDOOR FLYINGDOUBLE TETRAHEDRON HEXA-ROTORCRAFT, 2012

VISTA, 2005: Jeffrey Byrne, Martin Cosgrove, Raman Mehra, Real Time Stereo Based Obstacle Detection for UAV Threat Avoidance, 2005

RCA Sydney, 2006: Andrew Viquerat, Lachlan Blackhall, Alistair Reid, Salah Sukkarieh,and Graham Brooker, Reactive Collision Avoidance for UnmannedAerial Vehicles using Doppler Radar, 2006

MAV Cambridge, 2010: Kimberly F. Jackson, Development and Evaluation of a CollisionAvoidance System for Supervisory Control of a Micro Aerial Vehicle, 2010

VTOL, 2010: Marcelo Becker, Rafael Coronel B. Sampaio, Samir Bouabdallah, Vincent de Perrot, Roland Siegwart, In flight collision avoidance for a Mini-UAV robot based on onboard sensors, 2010

EPFL, 2007: James F. Roberts, Timothy S. Stirling, Jean-Christophe Zufferey and Dario Floreano, Quadrotor Using Minimal Sensing For AutonomousIndoor Flight, 2007

Thilo Müller, 2011: Thilo Müller, Implementierung und Evaluierung eines Systems zurHinderniserkennung und Kollisionsvermeidung fürIndoor-Quadrokopter, 2011

Weighted Filter, 2012: Nils Gageik, Julian Rothe, Sergio Montenegro, DATA FUSION PRINCIPLES FOR HEIGHT CONTROL AND AUTONOMOUS LANDING OF A QUADROCOPTER, 2012

Gravitech, 2013: http://www.gravitech.us/, Gravitech Electronic Experimental Solutions, 2013,

A. Anhang

A.1. Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft von der Umgebungslufttemperatur

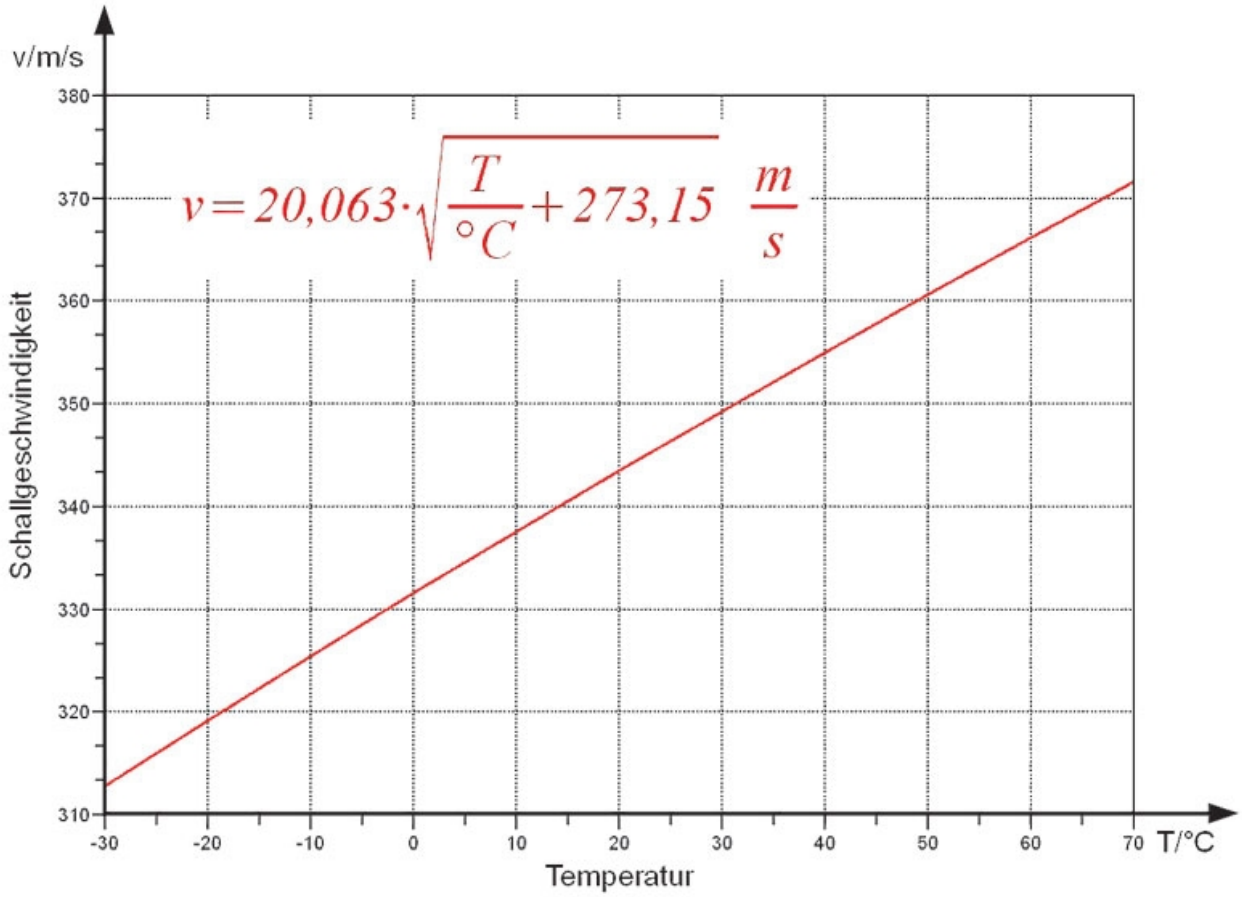


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und Schallgeschwindigkeit [ELV, 2013]

A.2. Anordnung der Ultraschallsensorik am AQopterI8

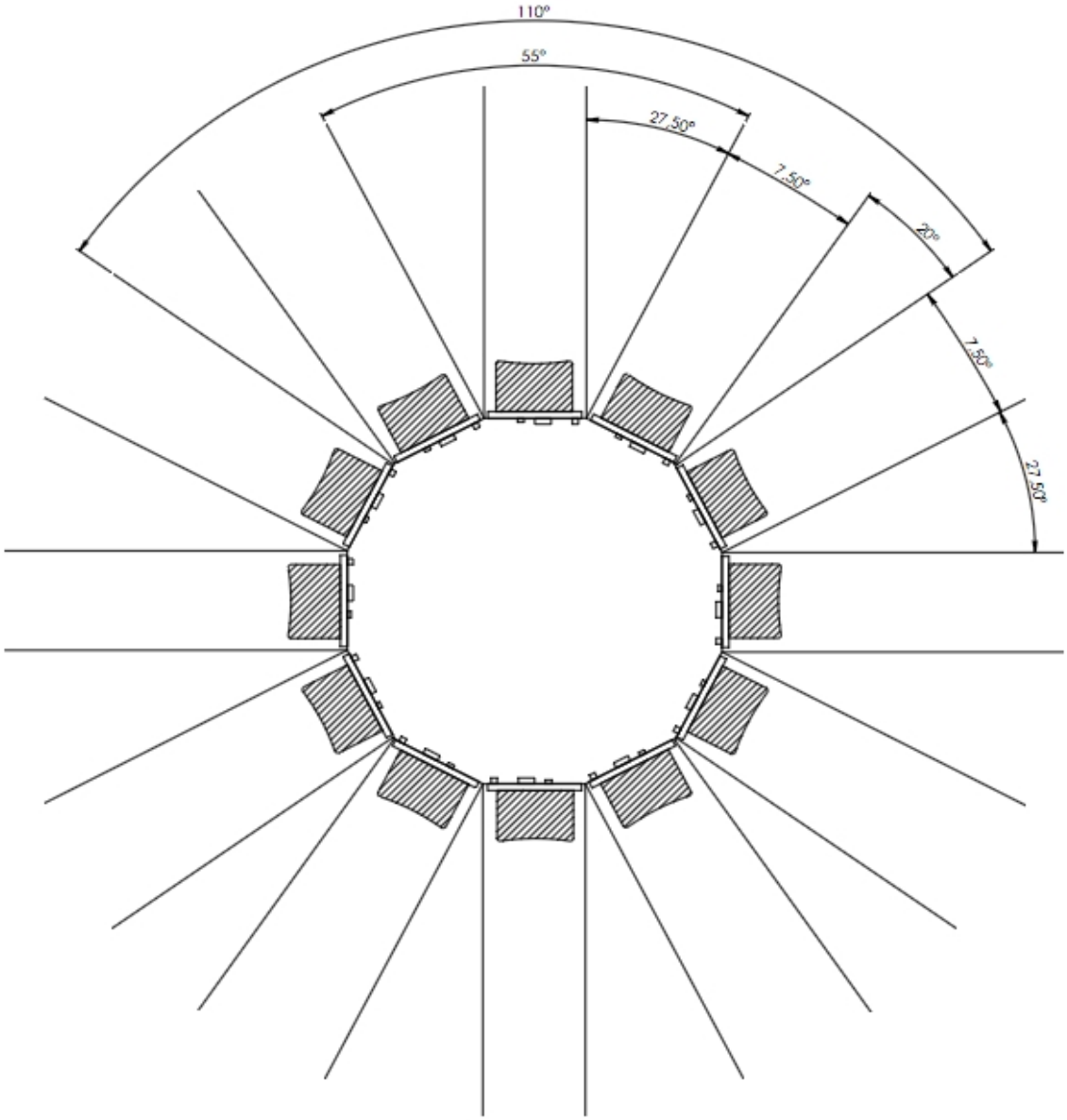
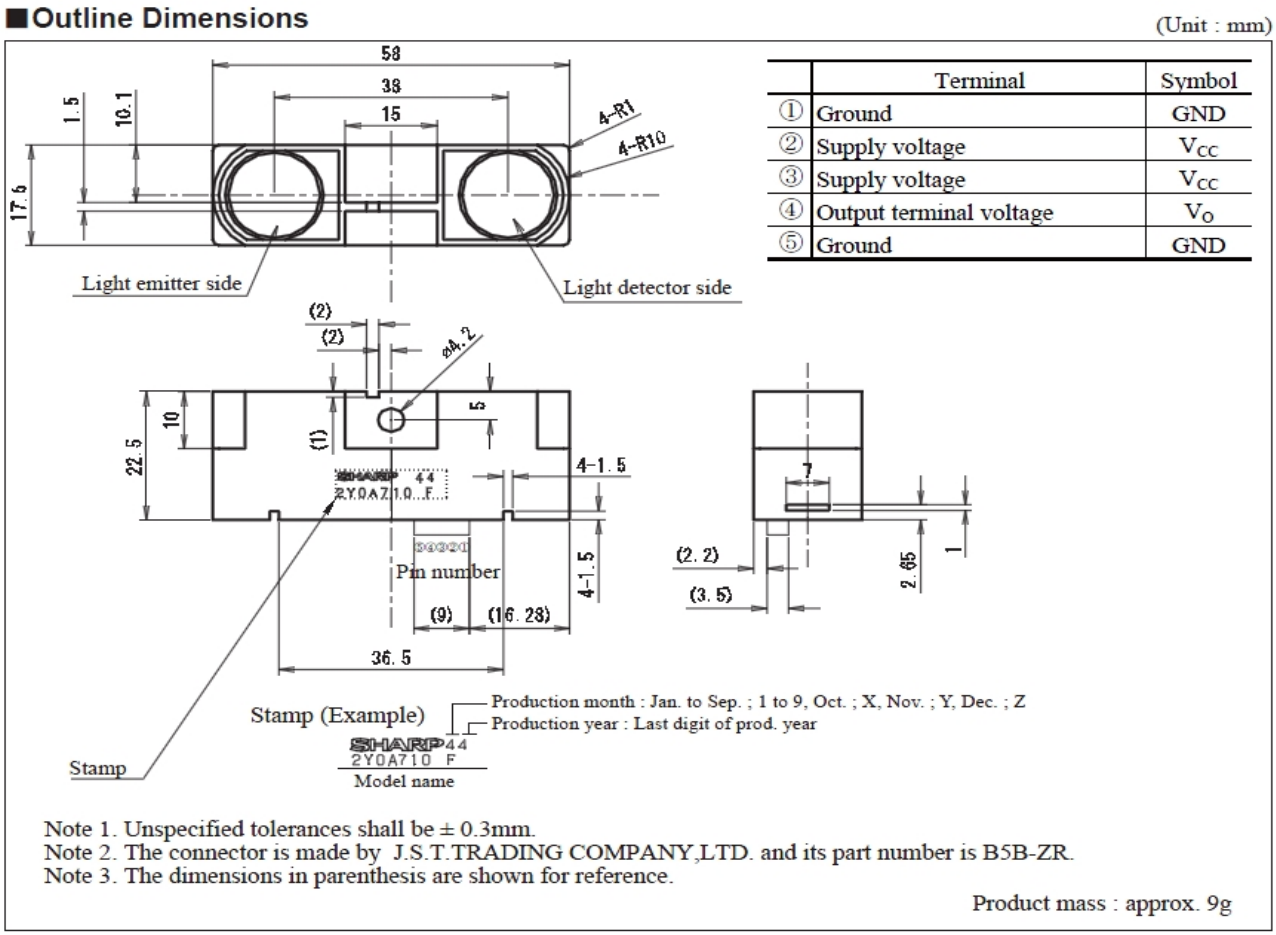


Abbildung 29: Anordnung der Ultraschallsensoren am AQopterI8 [Thilo Müller, 2011]

A.3. Maße der SHARP GP2Y0A710K0F Infrarotsensoren



	Terminal	Symbol
①	Ground	GND
②	Supply voltage	V_{CC}
③	Supply voltage	V_{CC}
④	Output terminal voltage	V_O
⑤	Ground	GND

Abbildung 30: Maße des SHARP GP2Y0A710K0F Infrarotsensors [SHARP, 2013]

A.4. Charakteristik des Ausgangssignals des SHARP GP2Y0A710K0F Infrarotsensors

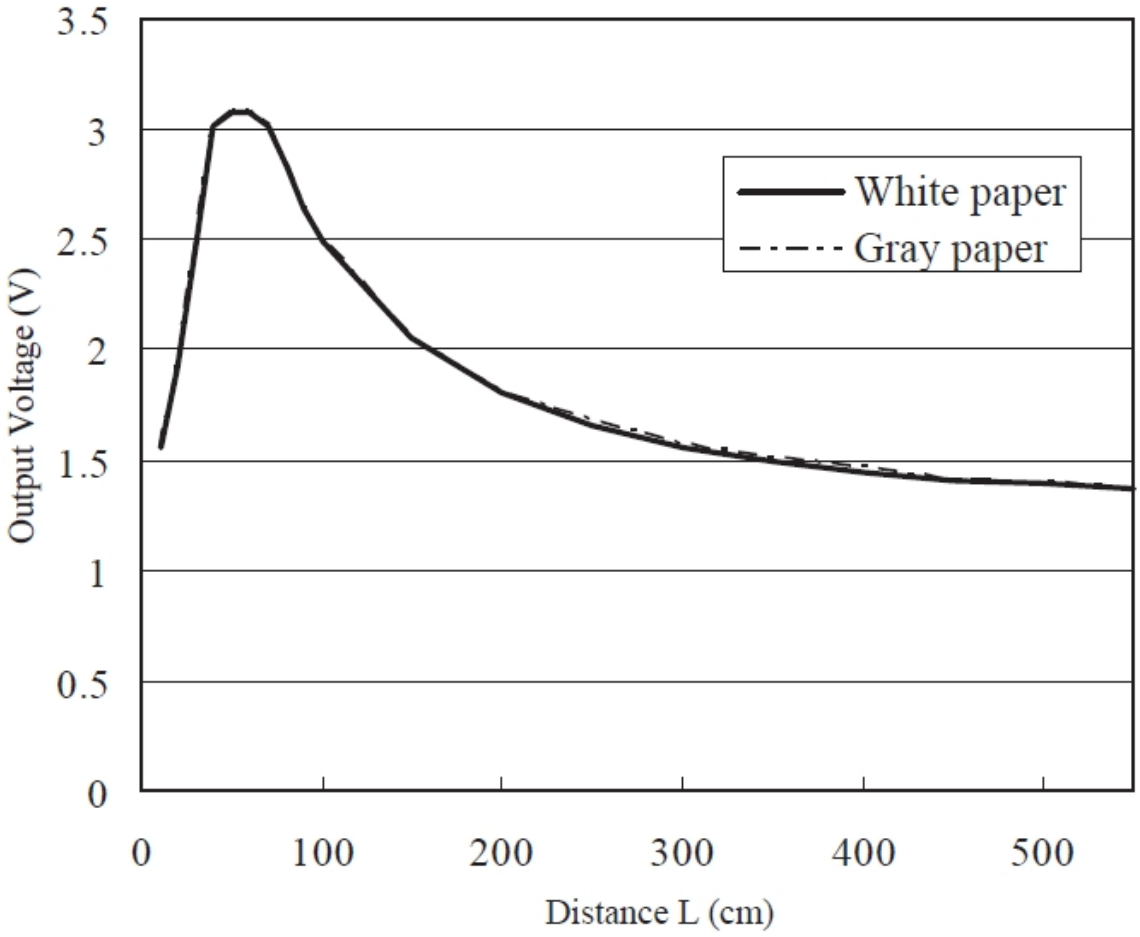


Abbildung 31: Charakterisik des Ausgangssignal beim SHARP GP2Y0A710K0F [SHARP, 2013]

A.5. Maße der SHARP GP2Y0A02 Infrarotsensors

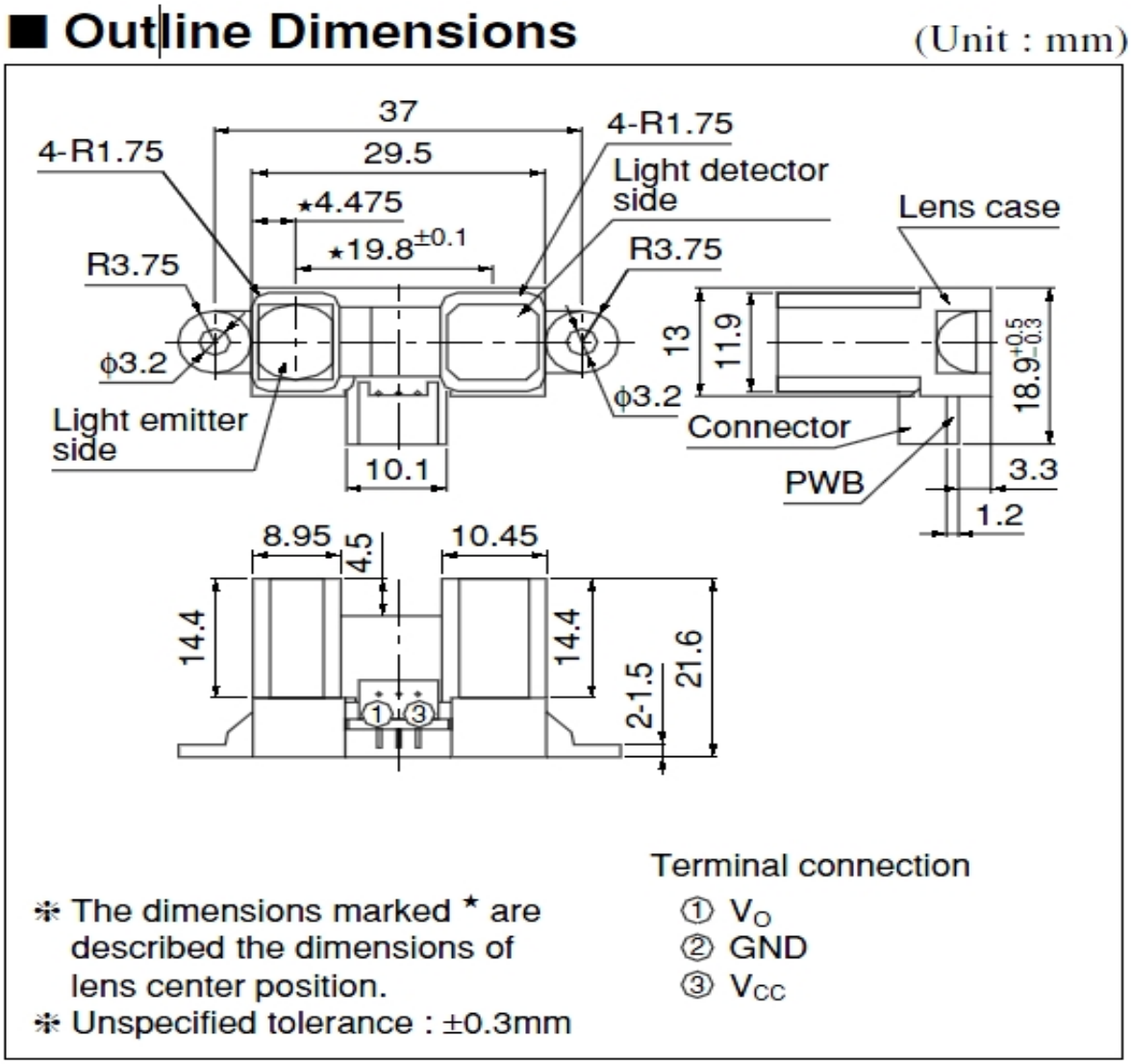


Abbildung 32: Maße des SHARP GP2Y0A02 Infrarotsensors [SHARP, 2013]

A.6. Charakteristik des Ausgangssignals des SHARP GP2Y0A02 Infrarotsensors

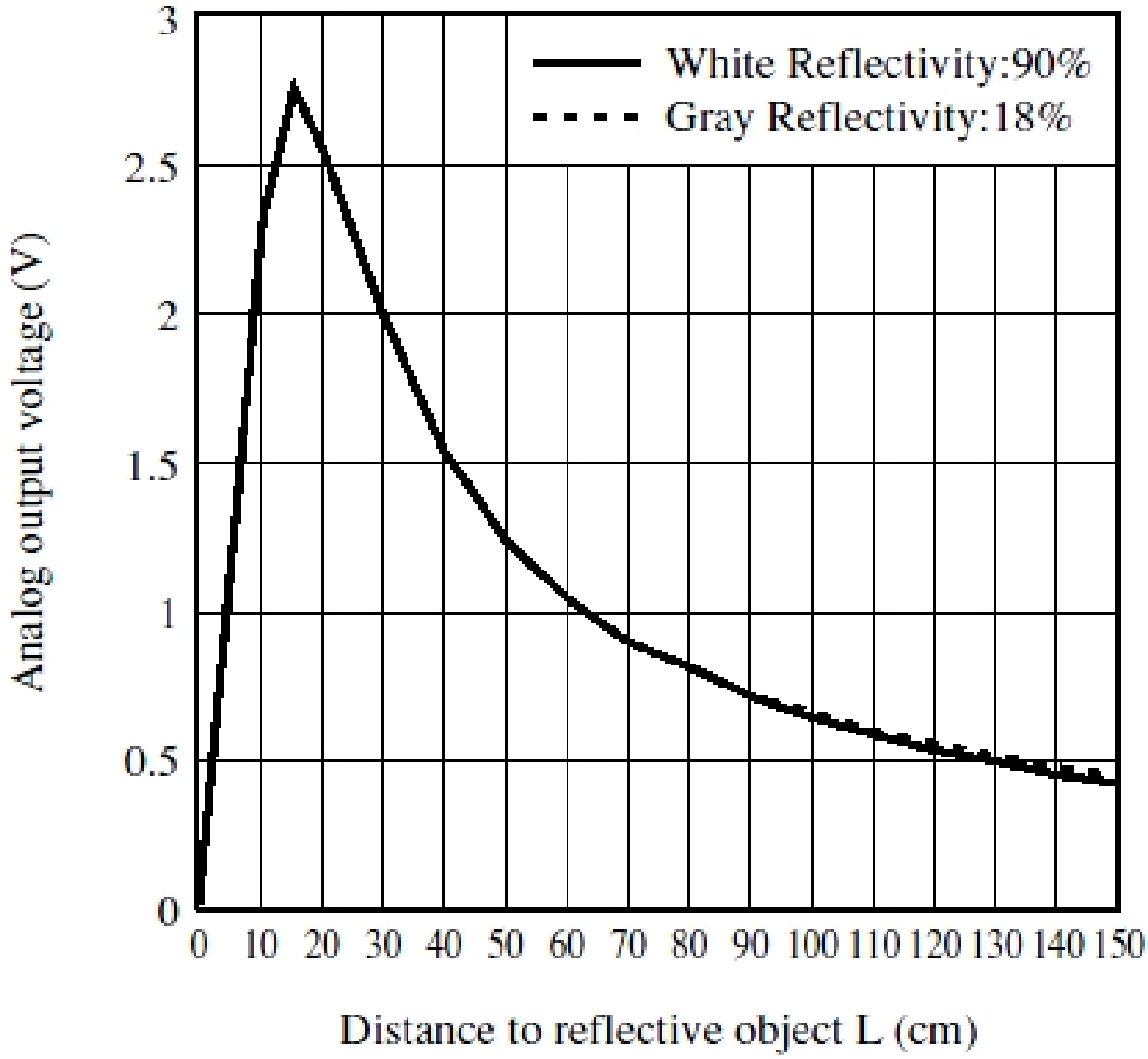


Abbildung 33: Charakteristik des Ausgangssignal beim SHARP GP2Y0A02 Infrarotsensor [SHARP, 2013]

A.7. Adressierung und Ansteuerung der Gravitech ADC-I2C Analogdigitalwandler

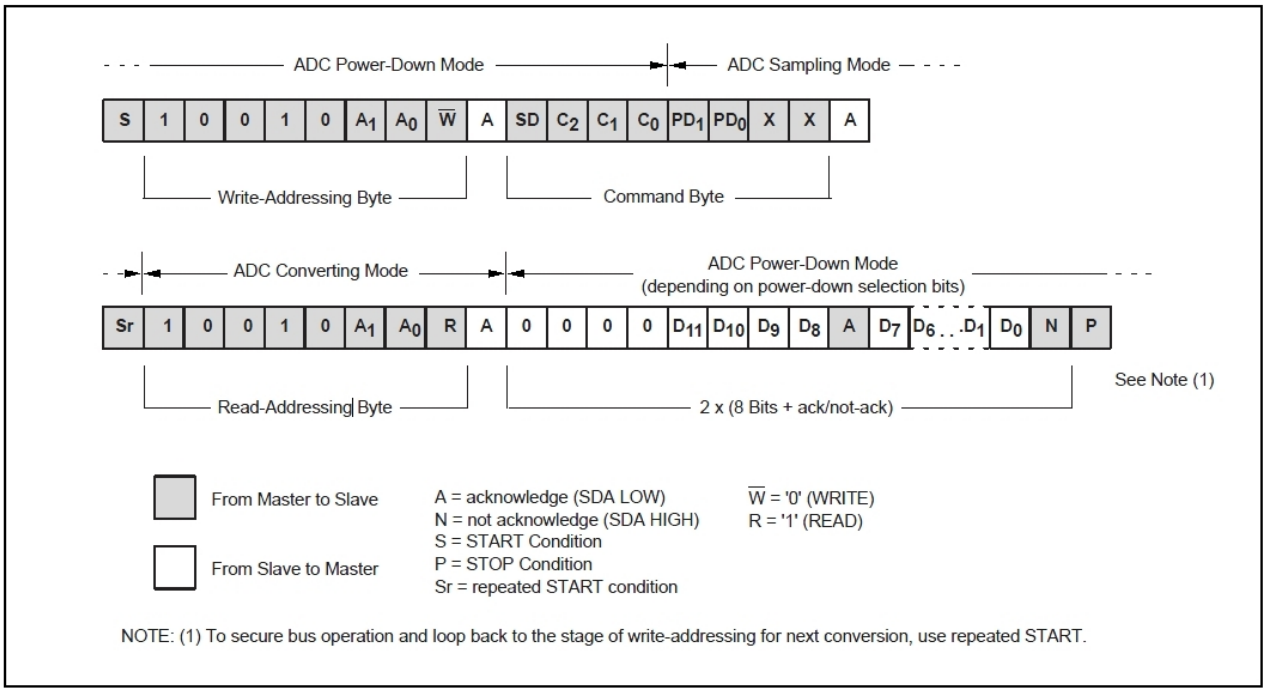


Abbildung 34: Ansteuerungscodierung des Gravitech ADC-I2C [Gravitech, 2013]