Autonome Quadrokopter zur Innenraumerkundung

Nils Gageik[1]

Abstract:
Diese Schrift ist die **Kurzfassung** der gleichnamigen Dissertation [Ga15]. Die Arbeit beschreibt alle Aspekte der Entwicklung eines neuartigen, autonomen Quadrokopters, genannt AQopterI8, zur Erkundung von beliebigen Innenräumen. Dank seiner einzigartigen modularen Komposition von Soft- und Hardware ist der AQopterI8 in der Lage auch unter widrigen Umweltbedingungen autonom zu agieren und eine breite Bandbreite an Anforderungen zu erfüllen.
In der Kurzfassung werden das Konzept des Gesamtsystems, sein Soft- und Hardwaredesign sowie die entwickelten Verfahren zur Hinderniserkennung, Kollisionsvermeidung und Autonomen Suche kurz erläutert. Die Zusammenfassung schließt mit einem kurzen Fazit der Arbeit.

1 Konzept des Gesamtsystems

Abbildung 1 beschreibt grob das Konzept der Arbeit. Das Gesamtsystem wird wie jeder Roboter in die drei Teilsysteme Sensorik, Signalverarbeitung und Steuerung eingeteilt. Hinzu kommen Blöcke für die Kommunikation mit der Kommandostation (Ground Station) für TM und TC sowie die Aktuatoren. Eine Besonderheit bzw. Neuheit des Systems liegt in der gleichzeitigen Verwendung von fünf verschiedenen, redundanten, komplementären on-Board Sensortypen, die in die Lagesensoren (z.B. IMU), Positions- und Höhensensoren (z.B. Fourier Tracking, Luftdruck), Optische Hinderniserkennung (z.B. Infrarot), Nicht-Optische Hinderniserkennung (z.B. Ultraschall) und Hochgenaue Hinderniserkennung (z.B. PMD) eingeteilt sind. Abbildung 2 (links) illustriert den Aufbau als Prototypen.

2 Hardwaredesign

Abbildung 2 (rechts) stellt das Hardware-Design des AQopterI8 dar. Es zeigt die Schnittstellen und Verknüpfungen aller funktionalen Komponenten des Systems wie Prozessoren, Sensoren, Aktuatoren und Funkmodule, die in dieser Arbeit verbaut und verwendet wurden. Die insgesamt 42 Sensoren werden entsprechend ihrer Verwendung in Sensoren zur Höhenbestimmung, Orientierungsbestimmung, Hinderniserkennung, Positionsbestimmung und Objekterkennung gegliedert.
Zur Arbeit gehören insgesamt 10 Quadrokopter unterschiedlicher Konfiguration (Flugfähige Subsysteme), mit denen die verschiedenen Methoden, Ansätze und Entwicklungen empirisch validiert werden konnten (Abb. 3).
Darunter befinden sich drei Quanipulatoren (Abb. 4), d.h. Quadrokopter mit Manipulator (Roboterarm), die in die Umgebung eingreifen können.

[1] Gründer und Gesellschafter-Geschäftsführer d. Emqopter GmbH, n.gageik@emqopter.de

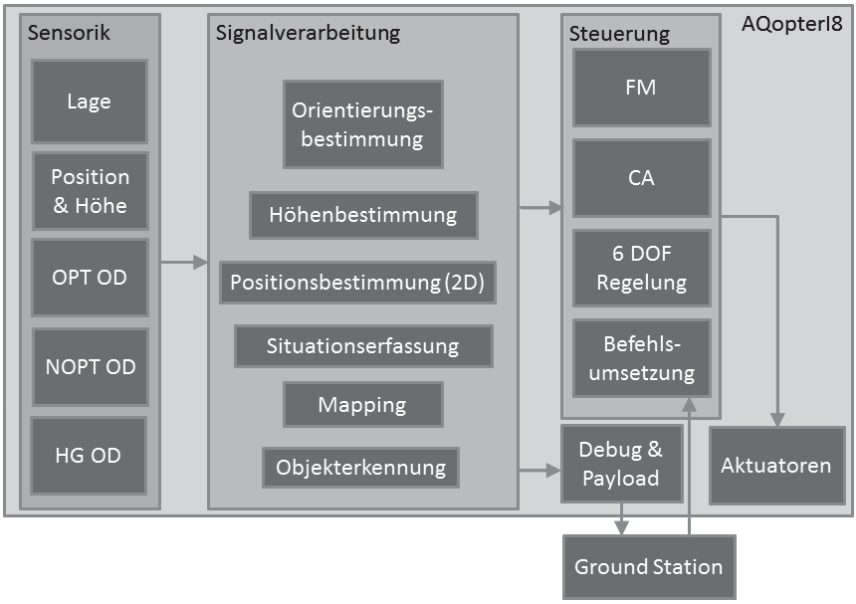

Abb. 1: Gesamtkonzept

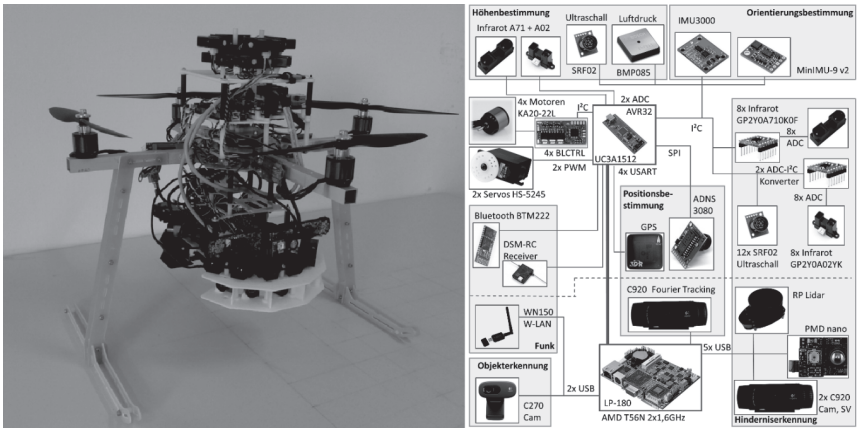

Abb. 2: AQopterI8 Gesamtsystem und Hardware Design

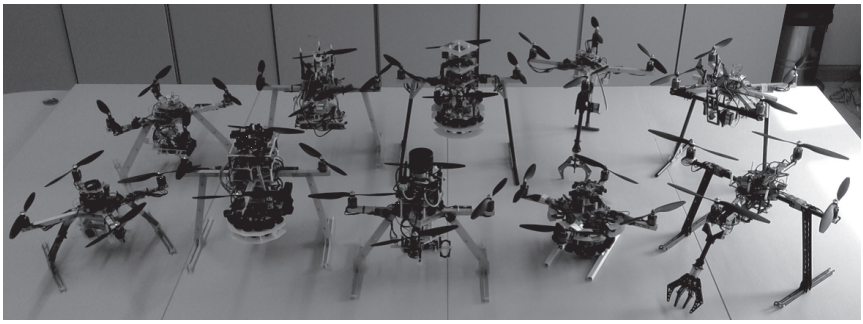

Abb. 3: HW-Instanzen des AQopterI8

Abb. 4: Quanipulatoren (Quadrokopter mit Manipulator)

3 Weighted Filter

Mit Weighted Filter (WF) ist der eigens zum Bewerten widersprüchlicher Datenquellen entwickelte Algorithmus gemeint, der in dieser Arbeit zur Höhenbestimmung und Hinderniserkennung Anwendung findet. Hintergrund ist die Verwendung verschiedener unverlässlicher Sensoren, wobei zunächst keine expliziten Informationen über die Richtigkeit der Sensordaten zur Verfügung stehen. Die Korrektheit der Messungen muss somit mit Hilfe der Messgröße selbst und im Kontext redundanter Messungen überprüft werden, wobei das Ergebnis der Datenfusion die so ermittelte beste Messung ist.
Eben dieses Problem ist typisch bei der Verwendung von Ultraschall und Infrarotsensoren zur Entfernungsmessung. Beide Sensortypen liefern zuweilen aufgrund vielfältiger Fehlerquellen stark verrauschte oder falsche Messwerte. Bei näherer Betrachtung des Problems lassen sich jedoch im Kontext mehrere Phänomene nutzbar machen, die es dem Weighted Filter im Normalfall erlauben, aus widersprüchlichen Daten den korrekten Wert zu bestimmen.
Das erste genutzte Phänomen ist die Tatsache, dass schlechte oder falsche Messungen oftmals stark verrauscht sind. Dies lässt sich durch die Varianz der Messungen bzw. an Hand der Differenz aufeinanderfolgender Messungen feststellen. Des Weiteren kann bei einem dynamischen System wie einem Quadrokopter davon ausgegangen werden, dass Messungen unmöglich über einen längeren Zeitraum konstant sind. Ändert sich ein Wert gar nicht, so ist der Sensor aller Wahrscheinlichkeit nach ausgefallen. Außerdem gilt, ist der Wert au-

ßerhalb des gültigen Messbereichs, so wird er ebenfalls verworfen.
Kerngedanke des Weighted Filters ist jedoch der Vergleich aller zur Verfügung stehenden Sensoren bzw. Sensormessungen miteinander. Der Sensor, dessen Messungen am besten mit allen gültigen Messungen übereinstimmen, ist am wahrscheinlichsten korrekt. Dabei ist zu beachten, dass bei der Bewertung nicht allein die aktuelle Messung aber auch nicht alle Messungen berücksichtigt werden sollten. Lange zurückliegende Messungen liefern nur bedingt Informationen über die aktuelle Gültigkeit. Eine vereinzelte Messung mag aber zufällig mal schlecht sein, das System sollte dann aber nicht sofort dem Sensor misstrauen, da dies erfahrungsgemäß zu mehr Schwankungen, einer geringeren Stabilität und somit schlechteren Resultaten führt. Die kurzfristige Historie fließt also beim Weighted Filter in einem geeigneten Maße ebenfalls mit ein.
In Abgrenzung zum weitverbreiteten Kalman Filter behandelt der Weighted Filter primär das Problem der Gewichtung von Messungen. Bei einem Kalman Filter erfolgt die Gewichtung über die Kovarianzmatrizen von Prozessrauschen und Messrauschen. Dabei geht der Kalman Filter davon aus, dass das Rauschen normalverteilt ist, d.h. es ist mittelwertfrei und durch eine Varianz vollständig beschrieben. Jedoch gibt es eine Reihe von Messfehlern, bei denen diese Voraussetzungen nicht erfüllt sind. Das Problem lässt sich zwar durch eine dynamische Parametrisierung der Kovarianzen umgehen, dennoch stellt dies die größte Schwierigkeit bei der Implementierung eines Kalman Filters dar. Eine Lösung des Problems liefert der Weighted Filter, der jedem Sensor dynamisch Gewichte zuweist. Mit diesen Gewichten können die Kovarianzmatrizen des Kalman Filters aktualisiert werden. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass beim Kalman Filter fehlerhafte Messungen das Ergebnis verfälschen, wenn es nicht gelingt, dies bei Messung und Datenfusion zu erkennen und zu verhindern.
Um dieses Problem zu umgehen, verwendet der Weighted Filter nur die beste Messung. In abgeschwächter Form können auch mehrere gute Messungen eingehen. Somit kann der Weighted Filter auch ohne Kalman Filter zur Datenfusion zum Einsatz kommen. Dies ist auch dann sinnvoll, wenn ein Kalman Filter zu aufwändig erscheint, da ein weiterer Nachteil des Kalman Filters in seiner Komplexität und dem damit verbundenen Rechenaufwand besteht.

4 TAF Filter

Der Triple Awareness Filter (TAF, dt.: dreifache Wahrnehmung) ist ein selbstentwickelter, einfacher Algorithmus zur Datenfusion bei zweidimensionaler Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung, ohne Manipulation der Höhe. Er geht von dem Konzept aus, die Umgebung des Quadrokopters über 8 Sektoren als die verfügbaren Abstände in 8 Richtungen wahrzunehmen (Abb. 5 links). Die Aufgabe des Filters besteht nun darin, aus drei je 45 Grad versetzt gemessenen Abständen die kürzeste Entfernung auszuwählen und dabei Fehler und Störungen zu unterdrücken. Dieser kürzeste Abstand entspricht dem verfügbaren Platz in die jeweilige Richtung. Wie in Abbildung 5 (mittig) zu sehen ist, wird aus dem Abstand nach vorne (rot markiert, engl. main) und den Abständen der direkten Nachbarn vorne links und vorne rechts (gelb markiert, engl.: direct neighbor) - ein gemeinsamer Abstand nach vorne bestimmt. Diese Reduktion ist notwendig und korrekt, da das Problem

der Kollisionsvermeidung hinreichend beschrieben ist durch den verfügbaren Abstand in die vier Raumrichtungen vorne, links, rechts und hinten. Alle weiteren Abstände darüber hinaus sind Kompositionen dieser Raumrichtungen und lassen sich somit durch selbige ausdrücken.

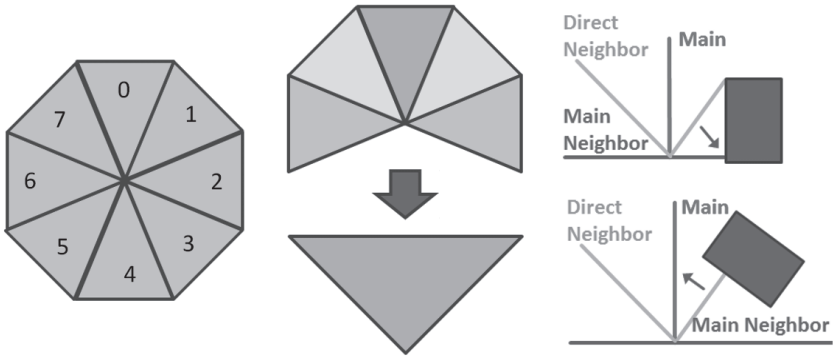

Abb. 5: TAF Konzept

Damit besteht das zugrundeliegende Problem in der Frage, wie multiple Abstände unterschiedlicher Richtungen miteinander zu fusionieren sind. Dazu liefert der TAF Algorithmus eine Lösung. Das Ziel der Fusion ist die Bestimmung des minimalen Abstandes zur Vermeidung von Kollisionen. Die Verwendung der Min-Funktion, d.h. die schlichte Bildung des Minimums, ist nicht ausreichend, da hierbei die nachfolgend beschriebenen Schwierigkeiten auftreten.

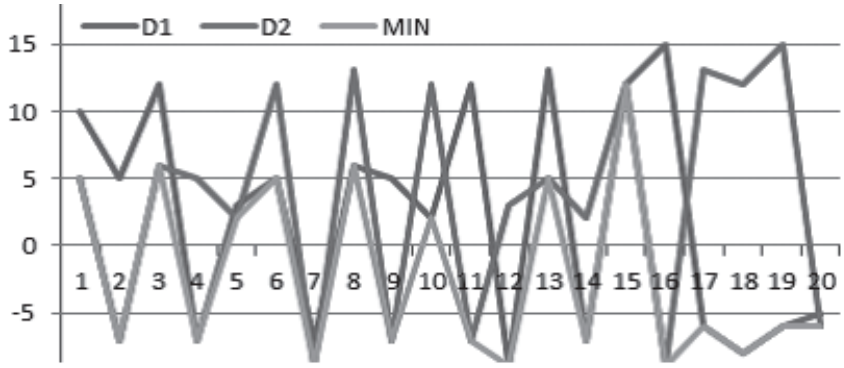

Abb. 6: Minimum (grün) zweier verrauschter Signale D1 und D2

Bei mehreren, ggf. teils stark verrauschten, Signalen ist deren Minimum deutlich niedriger als der Mittelwert jedes einzelnen Signals (vgl. Abb. 6). Die Mittelwerte von D1 und D2 betragen 2,25 und 3,6. Der Mittelwert der Min-Funktion min(D1,D2) beträgt -2,25 und entspricht kaum mehr den beiden ursprünglichen Signalen. Somit wird die Messung durch Bildung des Minimums stark verfälscht. Dieses Problem hängt sehr stark mit dem sprung-

haften Verhalten der Min-Funktion zusammen. Es führt zu einem sehr schnellen Wechsel zwischen den verschiedenen Signalen bzw. Sensoren, was einer stabilen Regelung zuwider läuft. Deshalb verwendet der TAF nicht lediglich die aktuelle Messung, sondern die Ergebnisse der letzten drei Messungen.

Ein weiteres Problem besteht darin, dass die Min-Funktion den Kontext, in dem die Messungen stehen, nicht berücksichtigt. Der TAF hat zum Ziel, den kürzesten relevanten Abstand in eine Raumrichtung zu ermitteln. Wenn der Quadrokopter sich z.B. in einem Gang befindet, so messen die 45 Grad nach vorn versetzten Sensoren auch die Wand an der Seite. Über die Min-Funktion würde die Wand an der Seite vorne miteinfließen. Um dies zu vermeiden, verwendet der TAF auch die 90 Grad versetzten Sensoren (Abb. 5 rechts: blau, main neighbor). Ist deren Abstand niedriger als der Abstand der direkten Nachbarn, so fließt der entsprechende direkte Nachbar nicht ein.

Diesen Ausführungen mag entgegen gehalten werden, dass im beschriebenen Beispiel mit dem Gang die Wand nicht nach vorne wandert, sofern die korrekte Richtung miteinfließt. In dem Fall würde eine Vereinfachung wie beim TAF nicht postuliert. Es stellt sich dann aber die Frage, wie die Messungen in die Regelung einfließen sollen und wie dabei die unterschiedlichen Richtungen Berücksichtigung finden. Spätestens bei der Regelung muss eine Vereinfachung oder Fusion stattfinden. Experimente mit zusätzlichen überlagerten Reglern haben gezeigt, dass das System stabiler ist, wenn exakt ein Regler pro unabhängige Raumachse verwendet wird. Zudem ist das Problem durch die vier Abstände vorne, hinten, links und rechts minimalistisch beschrieben.

5 Hinderniserkennung mit Ultraschall (US) und Infrarot (IR)

Abbildung 7 veranschaulicht das Konzept der Hinderniserkennung basierend auf den 28 Abstandsmessungen der 16 IR und 12 US Sensoren. Herz des Systems sind 12 WF und 4 TAF. Als Stützinformation werden die gemessenen Positionsänderungen der optischen Schätzung (OF) und die Lagewinkel der Orientierungsbestimmung (IMU) hinzugezogen. Die optische Schätzung und die inertiale Schätzung ergeben die jeweiligen Positionsänderungen für die Weighted Filter.

Die Fusion der unterschiedlichen Sensordaten erfolgt mittels WF. Die 12 WF aus Abbildung 7 haben das in Abbildung 8 zu sehende identische Design. Jeder WF fusioniert jeweils 5 Sensoren: 2x IR (lang und kurz), US, OF und IMU, wobei (nur) OF und IMU stets dieselben Sensoren sind. Genau genommen besteht in diesem Fall jeder WF aus zwei WF bzw. aus zwei Schritten. Der IR WF fusioniert den langen und den kurzen IR Sensor mit den übrigen Sensoren als Referenzsensoren. Das ist erforderlich, weil häufig zumindest einer der beiden IR Sensoren falsche Messwerte liefert und somit ein fehlerhafter Wert die Gewichtung verschlechtern würde. Im Anschluss an die IR Fusion wird das Ergebnis der IR Sensoren mit dem US Sensor fusioniert.

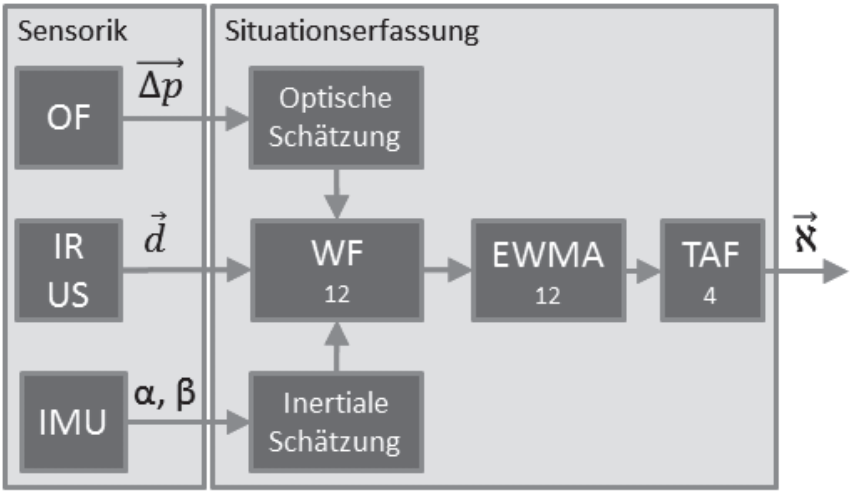

Abb. 7: Konzept der Hinderniserkennung basierend auf IR und US Sensoren zur Abstandsmessung

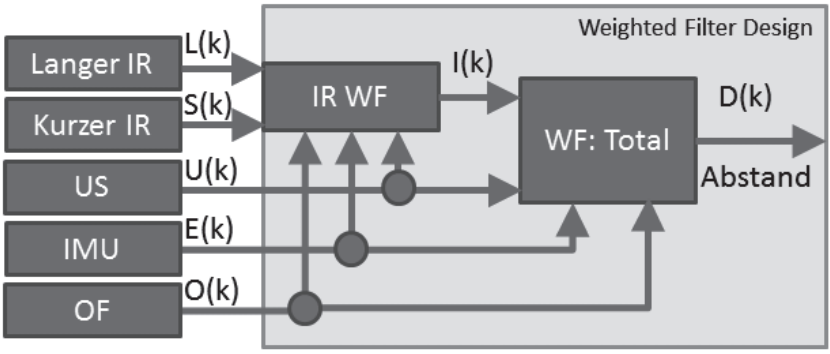

Abb. 8: Weighted Filter Design zur Hinderniserkennung

Abb. 9: Anordnung der 12 US Sektoren (links) und 8 IR Sektoren (rechts)

Die 12 US Sensoren sind 30 Grad zueinander verschoben angeordnet und decken somit 12 Sektoren ab, während die zweimal 8 IR Sensoren 45 Grad verschoben sind und somit 8 Sektoren bilden (Abb. 9). Daher gehen die geometrisch nächsten IR Sensoren in zwei WF ein.
Zur Hinderniserkennung werden 16 IR und 12 US Sensoren verwendet. Die relativ hohe Anzahl an Sensoren ist notwendig, um eine möglichst zuverlässige Abdeckung der Umgebung zu gewährleisten. Somit können Fehler einzelner Sensoren kompensiert werden.

6 Kollisionsvermeidung

Das Konzept der Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung wird in Abbildung 10 zusammengefasst. In die Hinderniserkennung bestehend aus der Sensorik und der Situationserfassung wurde bereits kurz eingeführt. Die Situationsbewertung beurteilt an Hand der Situationserfassung, ob und inwiefern durch die Abstandsregelung in die Steuerung eingegriffen werden muss, um Kollisionen zu vermeiden. Die Abstandsregelung beinhaltet einen Regler, der den Abstand zu Hindernissen in alle vier Raumrichtungen aktiv regelt.

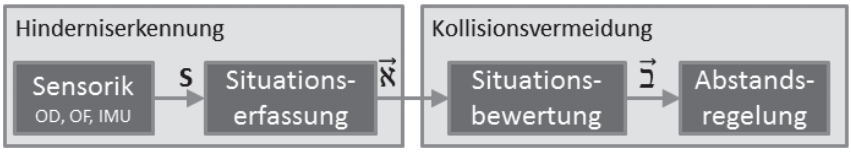

Abb. 10: Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung

7 Autonome Suche

Neben einem autonomen Flug mitsamt Hinderniserkennung und Kollisionsvermeidung bei beliebigen Objekten wie z.B. Personen, ist der AQopterI8 auch in der Lage, die Anzahl an Objekten, hier rote Bälle, die auf dem Boden verteilt sind, autonom, d.h. nur unter Verwendung bordeigener Ressourcen, zu zählen und deren Positionen wiederzugeben.
Das Konzept sieht vor, dass der Suchbereich vom Operator als quadratisches Feld vorgegeben wird. Dieser Bereich wird vom Quadrokopter autonom abgeflogen und mit Hilfe einer nach unten gerichteten Kamera wird die Anzahl roter Bälle gezählt. Gleichzeitig wird deren Position abgespeichert. Am Ende ergibt sich eine Karte, aus der die Lage der roten Bälle hervorgeht. Der Sichtbereich (engl. Field of View, FOV) ist dabei der Bereich, den die Kamera am Boden abdeckt.
Der virtuelle Sichtbereich (engl. Virtual FOV, VFOV) gibt den Bereich an, mit dem der Suchalgorithmus die Suche plant. Die Wegpunktliste wird dabei zu Beginn der Suche automatisch vom Suchalgorithmus in Abhängigkeit des Suchbereichs, des VFOV und der Suchstrategie erstellt. Der Suchalgorithmus stellt sicher, dass der komplette Suchbereich zumindest einmal im Sichtbereich auftaucht. Somit wird quasi der komplette Suchbereich abgescannt (vgl. Abb. 11).

Der Sichtbereich kann als Parameter eingestellt werden. Je kleiner der Sichtbereich ist, desto mehr Wegpunkte werden generiert und desto engmaschiger wird die Suche. Die Suchstrategie kann ebenfalls eingestellt werden. Aktuell sind zwei Suchstrategien implementiert. Die Tiefensuche sucht zunächst den kompletten Suchbereich im Äußeren ab und pflanzt sich dann zirkulär nach innen fort. Dagegen deckt die Breitensuche zunächst die Bereiche nahe dem Startpunkt ab und fährt sukzessive mit den weiter entfernten Bereichen fort.
Mehrfachzählungen desselben Objektes werden durch Maskierung verhindert, d.h. über jedes bereits gefundene Objekt wird an der Position eine Maske gelegt. Objekte, die im Maskierbereich gefunden werden, werden nicht aufgenommen. Mit Maskierbereich ist die Distanz gemeint, die das Quadrat um das Ziel definiert.
In diesem Experiment ist der Quadrokopter auf 1m Höhe den Suchbereich autonom abgeflogen und hat alle 8 Objekte erkannt und mit einem maximalen Fehler von 20cm vollständig und korrekt lokalisiert (Null Fail Positive, Null Fail Negative). Das Experiment wurde unter Änderung der beschriebenen Parameter mehr als hinreichend häufig wiederholt, so dass der Einfluss der Parameter auf das Ergebnis aussagekräftig diskutiert werden konnte.

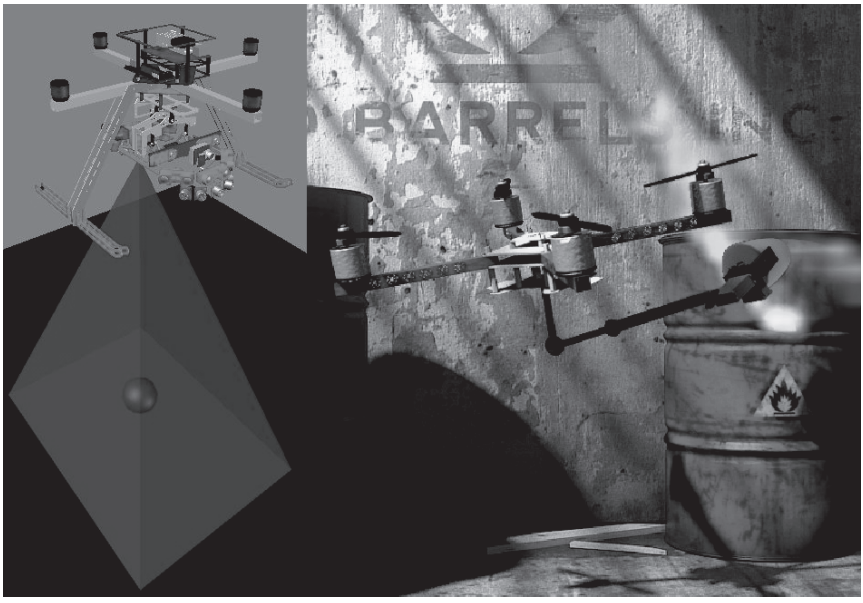

Abb. 11: Konzept Suche (links) und Rettungshelfer mit Propellern (rechts)

8 Fazit und Ausblick

Durch eine hohe Zahl von mehr als 1000 Versuchen (Flügen) im Fluglabor erfolgte die Evaluierung und Bewertung des Systems, die die Vor- und Nachteile der entwickelten

Ansätze und Lösungen klar herausarbeitet. Die Evaluierung der Kollisionsvermeidung ergab z.B., dass der AQopterI8 in der Lage ist Hindernissen wie Wänden und Personen auszuweichen. Dabei kann der Quadrokopter den Abstand zu Hindernissen regeln und damit auch in engen Tunneln (Breite 1,8m) fliegen. Entwicklungen wie der autonome Flug, die autonome Suche und der gerichtete Flug zeigen neue Lösungswege und Zusammenhänge für technische Fragen und Probleme auf. Schließlich wurde das Lehrsystem QCS mit Hilfe eines online Fragebogens didaktisch analysiert und es offenbarte sich dessen Wert für die Lehre.
Zum Ausblick dieser ca. 5 jährigen Arbeit gehört eine ganze Reihe an Aspekten, wobei hier nur auf das Wesentliche eingegangen werden kann. Dies betrifft die bereits erfolgte Firmengründung mit Produktentwicklung und wirtschaftlicher Verwertung der wissenschaftlichen Leistung im Rahmen eines Exist-Stipendiums.
Zu den Aktivitäten im Rahmen des Projektes Rettungshelfer mit Propellern, das 2014 mit dem Förderpreis der Universität und der Mainfränkischen Wirtschaft ausgezeichnet wurde, gehört die Entwicklung und Integration eines Manipulators zur Verwendung im Feuerwehreinsatz. Für die nächsten Schritte dieses ambitionierten Vorhabens arbeiten wir aktuell an einer Finanzierung (Abb. 11), wobei die ersten Hürden bereits genommen sind.

Interessenten an der Thematik sind herzlich eingeladen Kontakt aufzunehmen.

Literaturverzeichnis

[Ga15] Gageik, Nils: Autonome Quadrokopter zur Innenraumerkundung. Dissertation, Universität Würzburg, 2015.

Nils Gageik, 1982 in Aachen geboren, studierte Technische Informatik an der RTWH Aachen und schloss im Oktober 2010 sein Studium mit dem Diplom ab. Von November 2010 bis April 2016 war N. Gageik als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg angestellt. Dort leitete er das Quadrokopter-Labor sowie das Forschungsprojekt AQopterI8. Im März 2016 promovierte N. Gageik mit Auszeichnung. Von Mai 2016 bis April 2017 war N. Gageik Exist-Stipendiat und Ideengeber des Projektes Embedded Qopter. Im Juni 2016 entstand daraus das Unternehmen Emqopter, welches N. Gageik als Gesellschafter-Geschäftsführer bis heute leitet.
Im April 2014 wurde N. Gageik für seine Arbeit mit dem Förderpreis der Mainfränkischen Wirtschaft (IHK) ausgezeichnet. Im Juli 2016 gewann N. Gageik den Promotionspreis der Fakultät Informatik. Im Februar gehörte die Emqopter GmbH zu den BayStartUp BP-Siegern und wurde im Mai mit dem StartZuSchuss Förderpreis ausgezeichnet. Im Mai 2017 erhielt N. Gageik außerdem den Promotionspreis der Unterfränkischen Gedenkjahrstiftung überreicht. Im Juni des selben Jahres ist der Konzern Jopp Holding GmbH als Gesellschafter der Emqopter GmbH eingestiegen.