

MISSIONSPLANUNGS-METHODEN ZUR GEBIETSSUCHE FÜR KOOPERIERENDE UNBEMANNTE HELIKOPTER

J. Seibold, P. Crocoll, T. Caselitz und G.F. Trommer
Institut für Theoretische Elektrotechnik und Systemoptimierung (ITE)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

Zusammenfassung

Diese Arbeit stellt Missionplanungs-Methoden für zusammenarbeitende Micro Aerial Vehicles (MAV) zur kooperativen Erkundung und Überwachung von Gebieten vor. Dabei werden Quadrocopter als Team-Mitglieder verwendet. Diese zeichnen sich sowohl durch ihre Fähigkeit zu schweben, als auch ihren mechanisch einfachen Aufbau aus. Die Team-Mitglieder und eine Bodenstation kommunizieren über Funkverbindungen miteinander um die Strategien zu koordinieren. Die entwickelten Methoden werden in einer Simulationsumgebung auf ihre Eignung für verschiedene Szenarien untersucht und bezüglich ihrer Effizienz bewertet.

1. EINLEITUNG

Der Bereich der unbemannten Fluggeräte (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) erhält immer größere Bedeutung sowohl für Forschung und Wissenschaft als auch Wirtschaft und Politik. Dabei können große UAVs mit hohen Nutzlastkapazitäten und großen Reichweiten für Erkundungseinsätze in großen Gebieten eingesetzt werden. Micro Aerial Vehicles (MAV, kleines, unbemanntes Fluggerät) gewinnen immer mehr an Bedeutung für Sicherheits-, Beobachtungs- und Aufklärungseinsätze. Dabei können sie zivile Einsatzkräfte, wie zum Beispiel Feuerwehr und „Technisches Hilfswerk“ durch Luftbilder unterstützen, so dass ein schneller Überblick über die Situation gewonnen werden kann.

Die in dieser Arbeit genutzten Fluggeräte sind Quadrocopter, die am *Institut für Theoretische Elektrotechnik und Systemoptimierung (ITE)* am *Karlsruher Institut für Technologie (KIT)* entwickelt werden und den Benutzer durch Flugregelung und automatische Wegpunkt-Navigation entlasten, siehe [1]. Eine automatische Missionsplanung für einzelne Fluggeräte ermöglicht es den Einsatzkräften durch Angabe der für sie wichtigen Punkte mit Hilfe eines Modells der Umwelt einen kompletten Missionsplan in Form einer Wegpunkt-Liste zu erhalten, siehe [2]. Nun soll eine solche Missionsplanung auf mehrere Fluggeräte ausgeweitet werden, um die Rettungskräfte bei Suchoperationen effizient unterstützen zu können.

Die Gebietssuche und Erkundung ist Gegenstand vieler Veröffentlichungen, vor allem im Bereich der Robotik. Wichtige Unterschiede in der Robotik im Vergleich zu MAVs sind zum einen komplexere Bedingungen, die sich durch die komplett dreidimensionale Umwelt ergeben, als auch eingeschränkte Nutzlastkapazitäten der MAVs. Diese schränkt vor allem die nutzbaren Sensoren sowie die Rechenkapazität an Bord der MAVs ein.

Ein Bereich der kooperativen Methoden deckt die Formationsbildung ab. Zum Beispiel werden in [3]

künstliche Potentialfelder genutzt um Bodenroboter in eine gewünschte Formation zu bringen und darin zu halten. Dabei können die Formationen unterschiedliche Formen annehmen. In [4] wurde der Ansatz der Potentialfelder zur Regelung von Formationen für UAVs erweitert. Eine andere Anwendung von kooperativen Methoden stellt die Suche und Lokalisierung eines Ziels, zum Beispiel eines Waldbrandes dar, siehe [5][6][7][8]. Hierbei soll die Position eines Ziels durch Beobachtung aus unterschiedlichen Positionen möglichst exakt ermittelt werden.

Im Bereich der Gebietssuche und Erkundung wurde auch auf die Methode der künstlichen Potentialfelder zurückgegriffen, um Gebiete möglichst komplett abzudecken, siehe zum Beispiel [9]. Andere Arbeiten zeigen Ansätze, in denen das Gebiet in Teilgebiete aufgeteilt wird, um dann von den einzelnen Teammitgliedern separat abgesucht zu werden, siehe [10]. Eine andere Möglichkeit der Gebietserkundung wird in der „Nearest-Frontier“-Methode dargestellt, siehe zum Beispiel [11]. Hierbei wird der nächste Punkt auf der Grenze zwischen unerkundetem und erkundetem Gebiet bestimmt und als nächster Wegpunkt für einen Teilnehmer festgelegt.

In den Modi „Erkundung“ und „Überwachung“ soll das Gebiet mit Hilfe von bildgebenden Sensoren untersucht werden. Dazu werden Bildaufnahmen gemacht, wodurch die abgebildete Fläche als „erkundet“ gilt. Im Szenario der Erkundung soll einmalig eine komplette Abbildung des Gebiets erfolgen. Im Modus „Überwachung“ werden zeitlich wiederkehrende Bildaufnahmen des Gebietes gefordert.

In diesem Paper werden drei Methoden dargestellt, die einen „Nearest-Frontier“- , einen „Divide-and-Conquer“- und einen Potentialfeld-Ansatz verfolgen. Die unterschiedlichen Eigenschaften der Ansätze werden durch Simulationen im Hinblick auf ihre Eignung zur Gebietserkundung und Gebietsüberwachung hin untersucht. Die folgenden Teile des Papers sind wie folgt

untergliedert. Im anschließenden Kapitel 2 wird die Simulationsumgebung, sowie die Modellierung der Teilnehmer erläutert. Die Kapitel 3.1, 3.2 und 3.3 stellen die entwickelten Strategien „Nearest-Frontier“, „Divide-and-Conquer“ und „Potentialfeld“ vor. In Kapitel 4 werden aus Simulationen gewonnene Ergebnisse diskutiert, gefolgt von einer Zusammenfassung in Kapitel 5.

2. SIMULATIONSUMGEBUNG

Um eine schnelle Entwicklung der einzelnen Strategien und einen objektiven Vergleich ebendieser zu ermöglichen, wurde eine Simulationsumgebung in MATLAB® der Firma *The MathWorks, Inc* aufgebaut. Die Simulationsumgebung unterteilt sich dabei in drei große Bereiche:

- 1) Umwelt (Environment)
- 2) Teammitglieder (Agents)
- 3) Kontrollstation (ControlStation)

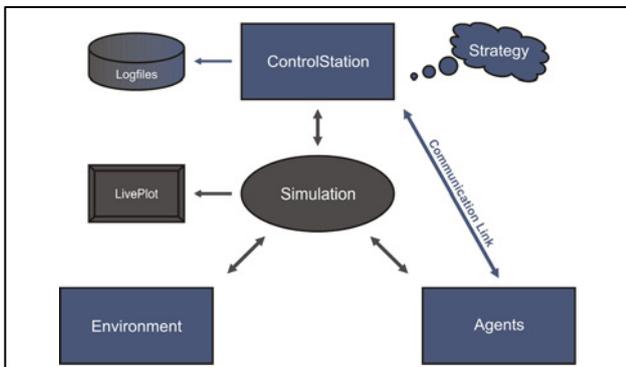


BILD 1. Aufbau der Simulationsumgebung und Zusammenspiel der Komponenten

2.1. Modellierung der Umwelt

Die Umwelt wird als zweidimensionales polygonförmiges Gebiet P_0 modelliert. Dabei wird der Rand ∂P_0 als zum Gebiet gehörend angenommen, das heißt die Teilnehmer dürfen sich auch auf dem Rand bewegen. Innerhalb dieses Polygons dürfen sich beliebig viele Hindernisse befinden, die durch Polygone P_i definiert werden, deren Ränder ∂P_i ebenfalls beflogen werden dürfen. Ein Polygon wird dabei durch mindestens drei, nicht auf einer Gerade liegende, Punkte e_j beschrieben:

$$(1) P_i = (e_1, e_2, \dots, e_n), e_j \in P_0$$

Die n Kanten des Polygons ergeben sich durch die geradlinige Verbindung der Eckpunkte, wobei sich nur einfache Polygone ergeben dürfen, das heißt die Kanten dürfen sich nicht gegenseitig schneiden. Die Polygone an sich müssen paarweise disjunkt sein. Das bedeutet die Schnittmenge zwischen zwei Polygonen muss die leere Menge ergeben. Dadurch entsteht aus einem Gebiet P_0 mit m Hindernissen das zu erkundende Gebiet:

$$(2) K_0 = P_0 \setminus \bigcup_{i=1}^m \{P_i \setminus \partial P_i\}.$$

2.1.1. Darstellung der Gebiete

Die Gebiete werden zur Ausführung der Strategien örtlich diskretisiert, das heißt es findet eine Rasterung des

Gebietes in einzelne Zellen statt, wodurch sich die Karte ergibt, auf der die Methoden arbeiten.

Für die Erkundung wird jeder Zelle ein Erkundungsgrad zugewiesen, der für unerkundete Zellen Null beträgt. Wurde eine Zelle durch eine Aufnahme abgedeckt, wird der Wert auf eins gesetzt.

Im Falle der Überwachung eines Gebietes wird der Überwachungsgrad in ähnlicher Art und Weise definiert. Für unüberwachte Zellen ist der Wert Null. Wird eine Zelle durch eine Aufnahme abgedeckt, wird der Wert auf eins gesetzt. Im Gegensatz zur Erkundung fällt der Wert des Überwachungsgrades allerdings mit der Zeit exponentiell ab. In den hier durchgeführten Simulationen erreicht der Überwachungsgrad nach einer Zeitspanne von 300s einen Wert von 37%.

2.2. Modellierung eines UAVs

Die Teilnehmer, in diesem Fall die UAVs, können in unterschiedlicher Anzahl und mit individuellen Eigenschaften simuliert werden. Die Bewegung und die Sensorik werden dabei für jedes einzelne UAV getrennt propagiert.

2.2.1. Bewegung

Die UAVs sind als punktförmige, bewegte Objekte simuliert. Eine detailliertere Simulation der UAVs ist im Rahmen der strategischen Planung nicht notwendig. Im Fall der genutzten Quadrocopter kann hier eine einfache Modellierung genutzt werden, die eine Soll-Geschwindigkeit v_{soll} mit einer maximal möglichen Beschleunigung a_{max} erreicht. Die Position der UAVs wird dabei nur zweidimensional betrachtet. Die Höhe wird als nicht variabel betrachtet und spielt nur bei der Simulation der Sensorik eine Rolle.

Die auf den Fluggeräten implementierten Fluglage-Regelung und Flugführungsalgorithmen sind in dieser Propagation bereits enthalten. Außerdem wird die Möglichkeit der Wegpunktnavigation impliziert. Durch Regelung der Geschwindigkeit mit Hilfe der maximalen Beschleunigung erreichen die Fluggeräte die gewünschte Position mit einer Endgeschwindigkeit von Null. Dies ist für die Aufnahme von Bildern hilfreich, da dadurch Bewegungsunschärfe vermieden werden kann.

2.2.1.1. Sensorik

Zur Erfassung des Erkundungs- oder Überwachungsgebietes benötigen die UAVs sensorische Fähigkeiten. Dazu ist jedes UAV mit einer Kamera ausgestattet ist, die beim Erreichen eines Fotopunktes ein Bild macht. Die Geschwindigkeit des UAVs ist zu diesem Zeitpunkt Null, siehe Abschnitt 2.2.1. Die Kamera hat einen definierten horizontalen und vertikalen Öffnungswinkel (α_x, α_y) . Da die Flughöhe eines UAVs als unveränderlich angenommen wird, ist auch die Größe des erfassten Gebietes konstant. Die rechteckige Fläche lässt sich über trigonometrische Funktionen berechnen. In den meisten Fällen wird durch eine Bildaufnahme mehr als eine Zelle des gerasterten Gebietes abgelichtet.

Aufgrund der beschränkten Kameraauflösung muss beachtet werden, dass auf den Bildern nur Objekte ab einer gewissen Größe identifiziert werden können. Dieser Aspekt wird nicht weiter betrachtet: Es wird davon

ausgegangen, dass der Benutzer sinnvolle Flughöhen für das simulierte Szenario wählt.

2.3. Kontrollstation

Die Kontrollstation führt eine Strategie aus, welche die Steuerung der UAVs realisiert. Zwischen der Kontrollstation und den UAVs besteht dazu eine Funkverbindung, über die anzufliegende Wegpunkte und Zustandsdaten der UAVs übermittelt werden. Die Funkverbindung wird als reichweitenunbeschränkt, störungsresistent und verzögerungsfrei angenommen. Zur Laufzeit anfallende Daten können von der Kontrollstation für eine spätere Analyse der Strategien abgespeichert werden.

Die zentrale Steuerung der UAVs durch eine Kontrollstation hat Vor- und Nachteile gegenüber dezentralen Lösungen. Ein wichtiger Vorteil besteht in der Möglichkeit die rechenintensiven Strategien auf leistungsfähiger Hardware am Boden realisieren zu können.

Die Bündelung aller Informationen an einer zentralen Stelle vereinfacht zudem die Kommunikationsinfrastruktur. Hiermit geht jedoch auch ein wesentlicher Nachteil der zentralen Steuerung einher: Eine Verbindungsstörung beziehungsweise ein Komplettausfall der Steuereinheit oder der Kommunikationsschnittstelle führt zum Kontrollverlust.

Die von der Kontrollstation ausgeführte Strategie berechnet für jedes UAV den Punkt, an dem es das nächste Foto aufnehmen soll. Dieser Fotopunkt kann allerdings nicht immer auf direktem Weg angefliegen werden, weshalb die Kontrollstation eine Pfadplanung zum Zielpunkt durchführen muss. Die resultierende Wegpunktliste wird an das entsprechende UAV übermittelt.

2.4. Pfadplanung

Die Pfadplanung zum Erhalt der Wegpunkt-Listen wird auf der Kontrollstation ausgeführt. Dazu wird aus der Umwelt ein gewichteter Graph aufgebaut, auf dem mit Hilfe unterschiedlicher Algorithmen eine Graphensuche durchgeführt wird.

2.4.1. Aufbau des Graphen

Der Graph wird anhand der definierten Polygone, siehe Abschnitt 2.1, und einer Sichtbarkeitsprüfung gebildet. Die Kantengewichte werden durch den euklidischen Abstand zwischen zwei Punkten bestimmt. Dadurch entsteht ein ungerichteter Graph.

Eine Möglichkeit zur Berechnung des Sichtbarkeitsgraphen stellt die Prüfung der Sichtbarkeit zwischen jeweils zwei Punkten dar. Dabei werden für eine Gerade die Schnittpunkte zu allen Kanten von Hindernissen berechnet. Zur Berechnung eines solchen Sichtbarkeitsgraphen können jedoch auch unterschiedliche, optimierte Algorithmen eingesetzt werden, siehe zum Beispiel [12].

Da von einer statischen Umwelt ausgegangen wird, kann der größte Teil des Sichtbarkeitsgraphen im Voraus berechnet werden. Zur Pfadplanung müssen dem Graphen lediglich noch Start- und End-Punkt hinzugefügt werden.

2.4.2. Graphensuche

Die eigentliche Suche der Routenführung wird durch die Graphensuche durchgeführt. Dabei wird der optimale Weg im Graphen gesucht, das heißt die Knotenfolge im Graphen, die die geringste euklidische Distanz für die Route darstellt.

Für die Graphensuche kann auf viele bereits entwickelte Algorithmen zurückgegriffen werden. Hier wurde sowohl der Dijkstra-Algorithmus, siehe [13], als auch der A*-Algorithmus, siehe [14], eingesetzt. Eine ausführliche Beschreibung der Algorithmen kann der Literatur entnommen werden.

3. ENTWURF DER STRATEGIEN

Die Aufgabe der kooperativen Strategien zur Gebietserkundung und –überwachung ist die Berechnung effizienter Pfade für jeden Teilnehmer, so dass das Zielgebiet möglichst schnell, beziehungsweise möglichst gleichmäßig abgedeckt wird. Dazu wird die entsprechende Strategie auf der Bodenstation ausgeführt. Alle Strategien haben gemein, dass die Punkte, an denen ein Foto aufgenommen werden soll, während der Programmaufzeit online festgelegt werden. Sobald ein Teilnehmer seine Aufgabe erledigt hat, das heißt ein Foto an der gewünschten Stelle aufgenommen wurde, wird durch die Strategie ein neuer Fotopunkt als Ziel für das Fluggerät ausgewählt. Dadurch kann dynamisch auf Veränderungen im Team reagiert werden. Zum einen können während einer Mission neue Fluggeräte hinzukommen, auf der anderen Seite können Teilnehmer auch an interessanten Punkten verweilen, um zum Beispiel gefundene Objekte näher zu identifizieren.

Die Art und Weise der Auswahl eines entsprechenden Punktes unterscheidet die Strategien und soll in den folgenden Kapiteln näher vorgestellt werden.

3.1. Nearest-Frontier-Strategie

Die grundlegende Idee der Strategie „Nearest-Frontier“ besteht darin, den nächstliegenden Punkt auf der Grenze zwischen bereits erkundetem Gebiet und unerkundetem Gebiet zu finden. In [11] wird die Strategie genutzt um mit einem Team von Bodenrobotern ein Büroräumfeld zu erkunden; die im Folgenden beschriebene Strategie stützt sich darauf.

3.1.1. Bestimmung der Grenze

Um den nächstgelegenen Punkt auf der Grenze zwischen erkundetem und unerkundetem Gebiet zu finden, muss zunächst diese Grenze bestimmt werden. Dazu müssen die Zellen der Karte bestimmt werden, in denen ein Übergang zwischen dem Erkundungsgrad stattfindet.

Dazu wird die aktuell betrachtete Zelle mit ihren acht Nachbarn hinsichtlich des lokalen Erkundungsgrads verglichen. Ergibt sich mit einem der Nachbarn ein Unterschied, wird diese Zelle des Rasters als Grenzzelle betrachtet. Dieser Vergleich muss für jede einzelne Zelle der betrachteten Karte durchgeführt werden.

Durch Verschieben der Erkundungsgrad-Matrix in die acht Raumrichtungen und Subtraktion der so entstandenen Matrizen kann eine effektive Berechnung der Grenze erreicht werden. Die resultierende Grenze besitzt die Breite eines Pixels, siehe BILD 2.

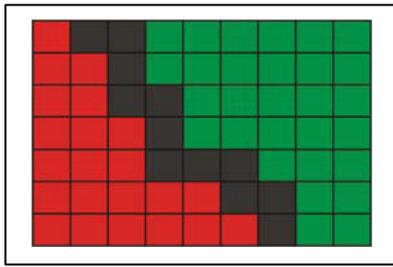


BILD 2. Grenzpixel (grau), die zwischen erkundetem (rot) und unerkundetem Gebiet (grün) entstehen.

3.1.2. Bestimmung der Fotopunkte

Zur Bestimmung eines Fotopunktes für einen Teilnehmer wird auf Basis der aktuellen Erkundungsgrad-Matrix die Grenze berechnet. Um nun den sinnvollsten Punkt aus der Menge dieser Grenzpunkte zu bestimmen, werden unterschiedliche Kriterien angewandt.

- 1) Bei der Zuweisung eines Grenzpunktes an einen Teilnehmer, wird der durch dieses Foto abgedeckte Bereich als „gebucht“ markiert. Die Menge der gebuchten Grenzpunkte wird aus der ursprünglichen Menge entfernt um doppelt besuchte Punkte zu vermeiden.
- 2) Grenzpunkte die für ein UAV nicht sichtbar, das heißt nicht ohne Umwege um Hindernisse erreichbar sind werden entfernt, falls daraus nicht die leere Menge entsteht.
- 3) Aus der Menge der verbleibenden Grenzpunkte wird nun der Punkt mit der geringsten euklidischen Distanz gewählt.

Kriterium 2) stellt sicher, dass die Wahl des euklidisch nächsten Punktes auch eine sinnvolle Wahl darstellt. Würde die Menge der nicht-sichtbaren Punkte nicht entfernt, würden zum Teil Punkte gewählt, die einen erheblichen Umweg auf Grund von Hindernissen bedeuten würden. Durch die Beachtung der Sichtbarkeit wird dies vermieden.

3.1.3. Ablauf

Für jedes Fluggerät, das seine letzte Aufgabe abgeschlossen hat, wird nach oben beschriebener Methode ein neuer Wegpunkt bestimmt. Das Gebiet, welches durch diese Aufgabe abgedeckt wird, wird als „gebucht“ markiert, so dass die Überlappung der Foto-Bereiche minimiert wird.

Mit fortschreitender Abarbeitung der Fotopunkte steigt der Erkundungsgrad der Karte kontinuierlich an, bis alle Punkte mindestens einmal besucht wurden. Die Grenze bewegt sich dabei dynamisch über die Karte, bis sie letztendlich verschwindet. Bei der Aufgabe der Gebietsüberwachung wird nach erfolgreichem Abarbeiten die Erkundungsaufgabe periodisch fortgesetzt, indem das Gebiet wieder als komplett unerkundet definiert wird.

3.2. Potentialfeld-Strategie

Bei der Entwicklung der Potentialfeld-Strategie werden künstliche Potentialfelder aufgebaut, die verschiedene Regeln zur sinnvollen Wahl der nächsten Fotopunkte nachbilden. Durch die Suche des Minimums in diesem Potentialfeld wird der nächste Fotopunkt festgelegt.

3.2.1. Entwurf der künstlichen Potentiale

Der wesentliche Bestandteil dieser Strategie ist der Entwurf der künstlichen Potentiale die durch Überlagerung zu einem Gesamt-Potential addiert werden. Die hier entwickelten Potential-Anteile werden in den folgenden Unterkapiteln vorgestellt.

Innerhalb des Gesamt-Potentials sollte ein einziges Minimum vorhanden sein. In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Potentiale und ihre Auswirkungen auf die Auswahl des nächsten Zielpunktes erläutert. Alle Potentialfelder haben Werte im Bereich $[0;1]$, lediglich der Bereich der Hindernisse wird mit unendlich festgelegt. Das Gesamt-Potential wird schließlich durch Linearkombination der einzelnen Potentialfelder berechnet, wobei die Summe der Koeffizienten eins ergibt.

3.2.1.1. „Obstacle Potential“

Das „Obstacle Potential“ beschreibt ein Potentialfeld, welches die Teilnehmer von den Hindernissen fernhält. Zur Bestimmung des Potentials finden sich in der Literatur verschiedene Ansätze, siehe zum Beispiel [15][16]. Hier wird ein exponentiell, abfallendes Potential genutzt. Nur im Hindernis selbst wird das Potential auf unendlich gesetzt. Da das Hindernis-Potential keine freien Lücken im erkundeten Gebiet hervorrufen soll, muss der Anstieg des Potentials abhängig von der Größe der pro Bildaufnahme abgelenkten Fläche sein. Das impliziert, dass das Hindernis-Potential für jedes UAV gesondert berechnet werden muss.

3.2.1.2. „Distance Potential“

Das „Distance Potential“ kodiert die Entfernung der einzelnen Zellen vom aktuellen Standpunkt eines Fluggeräts. Die Teilnehmer sollen möglichst kurze Strecken zwischen zwei Aufnahmeorten zurücklegen. Deshalb wird das „Distance Potential“ als exponentiell steigende Funktion abhängig von der euklidischen Distanz berechnet. In direktem Umfeld des UAVs wird das Potential auf Null gehalten, um eine negative Wechselwirkung mit dem „Aperture Potential“ zu vermeiden.

3.2.1.3. „Visibility Potential“

Das „Visibility Potential“ ergänzt das „Distance Potential“ um die Sichtbarkeit der Zellen. Es ist ein diskretes Potentialfeld, das Null für sichtbare Zellen und eins für nicht-sichtbare Zellen annimmt. Dadurch werden Punkte, die nicht sichtbar sind, und damit einen Umweg für das UAV bedeuten weniger interessant.

3.2.1.4. „Aperture Potential“

Die Aufgabe des „Aperture Potential“ ist die Minimierung sich überlappender Foto-Aufnahmen. Dadurch wird die fotografierte Fläche pro Zeit maximiert. Punkte in geringer Entfernung, welche die Überlappung minimieren, liegen auf einer Ellipse um die Position des alten Fotopunktes. Dies wird in einem Potentialverlauf nachgebildet, der vom aktuellen Fotopunkt aus exponentiell fällt, auf der Ellipse selbst minimal wird, und anschließend wieder exponentiell steigt, siehe BILD 3.

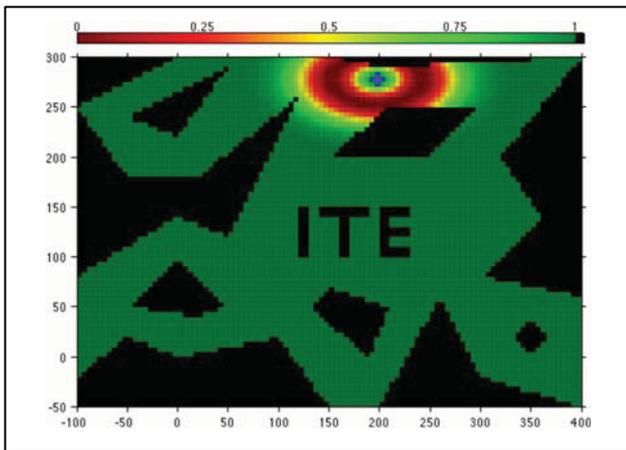


BILD 3. „Aperture Potential“, rote Bereiche stellen niedriges, grüne Bereiche hohes Potential dar.

3.2.1.5. „Observation Potential“

Das „Observation Potential“ stellt Informationen über den Überwachungsgrad der Zellen zur Verfügung. Durch das Anheben des Potentials bereits erkundeter Zellen, wird die Erkundung beziehungsweise Überwachung nicht erkundeter Zellen bevorzugt. Dieses Potential stellt somit einen wichtigen Teil bei der Erzeugung des Gesamtpotentials dar, und wird daher bei der Linearkombination entsprechend stark gewichtet.

3.2.1.6. „Observation Border Potential“

Das „Observation Border Potential“ hat einen ähnlichen Einfluss auf die Wahl neuer Fotopunkte wie das „Obstacle Potential“. Durch diesen Potential-Anteil wird der neue Fotopunkt von der Grenze zwischen erkundetem und unerkundetem Gebiet ferngehalten und unterstützt damit das „Observation Potential“ darin, die neue Fotopunkte nicht direkt an Grenzen zwischen bereits abgedecktem und unerkundetem Gebiet zu setzen.

3.2.1.7. „Booked Potential“

Entsprechend der Vorgehensweise bei der „Nearest-Frontier“-Strategie werden auch bei der Potentialfeld-Strategie bereits „gebuchte“ Zellen gemieden. Dies wird durch das „Booked Potential“ sichergestellt. Zellen der Karte, die bereits durch andere Fluggeräte abgedeckt werden, erhalten das Potential eins, ungebuchte Zellen den Wert Null. Auch hierdurch wird eine doppelte Abdeckung von Zellen vermieden.

3.2.1.8. Überlagerung der Potential-Anteile

Wie bereits angesprochen, werden die einzelnen Potential-Anteile durch lineare Kombination überlagert. Die Summe der Koeffizienten ergibt dabei eins. Somit befindet sich das Potential in den Fluggeräten zugänglichen Bereichen zwischen $[0;1]$, siehe BILD 4.

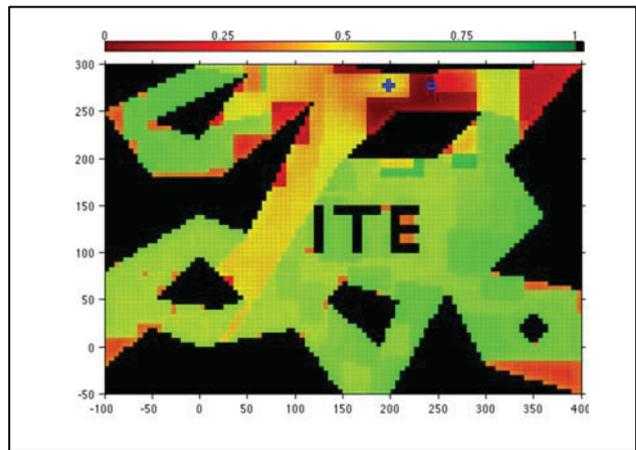


BILD 4. Überlagertes Gesamtpotential. Grün stellt hohes Potential, rot niedriges Potential dar. Für das UAV (blaues Kreuz) wird als nächster Fotopunkt der blaue Punkt ausgewählt.

Durch die Gewichtung der einzelnen Komponenten kann der Einfluss entsprechend gewählt werden. Sind die Fluggeräte zum Beispiel in der Lage sich mit hohen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu bewegen, kann der Einfluss des „Distance Potential“ niedriger gewählt werden, da Flugzeiten keine großen Auswirkungen mehr haben.

Bei Karten, die viele Hindernisse beinhalten, spielt das „Visibility Potential“ eine große Rolle, da es sicherstellt, dass keine Fotopunkte mit unnötig langen Wege ausgewählt werden.

3.2.2. Bestimmung der Fotopunkte

Zur Auswahl der Fotopunkte wird das globale Minimum innerhalb des gesamten Potentials gesucht. Durch die Überlagerung der zuvor genannten Potentiale wird erreicht, dass sinnvolle Punkte ein niedrig liegendes Potential erhalten.

3.2.3. Ablauf

Sowohl im Fall der Erkundung als auch im Fall der Überwachung wird für jeden Teilnehmer, der gerade durch ein Foto ein Gebiet abgedeckt hat, ein neuer Wegpunkt benötigt. Dieser wird ausgehend von vorhergehend beschriebenen Überlegungen bestimmt.

Ist im Falle der Überwachung für das komplette Gebiet eine erste Überfliegung beendet, werden ausgehend vom Überwachungsgrad die bereits beflogenen Gebiete erneut abgedeckt. Durch die implizite Integration des Überwachungsgrades in die Auswahl der neuen Wegpunkte, wird ein hohes Effizienzmaß für diese Strategie im Bereich der Überwachung erwartet.

3.3. Divide-and-Conquer-Strategie

Die dritte Strategie die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden soll ist die Strategie „Divide-and-Conquer“. Dabei wird die Aufgabenstellung aufgeteilt (divide) und dann bearbeitet (conquer). In [10] wird das zu bearbeitende Gebiet anhand der Startpositionen der UAVs aufgeteilt und dann in vordefinierten Mustern abgeflogen.

3.3.1. Zerlegung der Arbeitsgebiete

Das gesamte Suchgebiet wird in konvexe Teilgebiete

zerlegt, da in konvexen Teilgebieten einfache Suchmuster genutzt werden können, um das Teilgebiet komplett abzudecken. Die Zerlegung eines Gebiets in konvexe Teilgebiete stellt eine komplexe Aufgabe dar.

In [17] wird ein Algorithmus vorgestellt, mit dem eine approximativ konvexe Zerlegung eines Gebietes mit Hindernissen möglich ist. Dazu muss ein kontinuierliches Konvexitäts- beziehungsweise Konkavitätsmaß definiert werden, von denen in der genannten Arbeit unterschiedliche definiert und miteinander verglichen wurden. Für diesen Einsatz wurde das „Straight Line Concavity“-Maß ausgewählt. Durch Entfernen der maximal konkaven Teilgebiete von einem Polygon wird letztendlich eine Aufteilung erreicht, welche die gewünschte Konvexität für alle Teilgebiete ergibt. Durch dieses Verfahren kann auch eine exakt konvexe Zerlegung erreicht werden, was aber in diesem Anwendungsfall nicht sinnvoll ist, da sehr viele kleine Teilgebiete entstehen können.

Die Zerlegung des Suchgebiets ist ein rechenintensiver Schritt, muss allerdings nur einmalig vor Beginn der Mission durchgeführt werden. Die Zuweisung der Teilgebiete zu Fluggeräten wird im Folgenden behandelt.

3.3.2. Zuweisung der Arbeitsgebiete

Die Bearbeitung der Teilgebiete erfolgt sowohl sequentiell als auch parallel. Mehrere Teilnehmer bearbeiten parallel unterschiedliche Teilgebiete; jeder einzelne Teilnehmer bearbeitet unterschiedliche Teilgebiete nacheinander.

Während der Initialisierung wird jedem Fluggerät ein erstes Teilgebiet zugewiesen. Sobald ein Teilnehmer die Bearbeitung seines Teiles abgeschlossen hat, wird ihm dynamisch ein neues Teilgebiet zugewiesen. Dabei können drei Zustände für ein Teilgebiet definiert werden: „nicht bearbeitet“, „in Bearbeitung“ und „abgeschlossen“.

Zunächst werden „nicht bearbeitete“ Gebiete bei der Zuweisung bevorzugt. Die Auswahl eines Gebiets aus dieser Liste wird anhand des euklidischen Abstands des Mittelpunkts des umschreibenden Rechtecks bestimmt. Anstelle der euklidischen Distanz kann jedoch auch ein Sichtbarkeits-Graph aufgebaut werden und eine entsprechende Pfadplanung durchgeführt werden.

3.3.3. Bearbeiten der Arbeitsgebiete

Die Bearbeitung der Teilgebiete wird mit zuvor definierten Suchmustern durchgeführt. Dabei wird ein sogenanntes „Sweepinggrid“ über das Teilgebiet gelegt. Die Eckpunkte des Sweepinggrids werden durch das umschreibende Rechteck der Teilgebiete sowie die Ausdehnung der Fotofläche bestimmt. Die Punkte dieses Rasters bestimmen die Fotopunkte. Sollte ein Rasterpunkt außerhalb des Teilpolygons liegen, wird er nach innen verschoben, so, dass trotzdem die komplette Fläche des Polygons erkundet wird.

Die Sweepinggrids können auf verschiedene Weisen, in sogenannten Sweepingmodes, abgeflogen werden, siehe BILD 5.

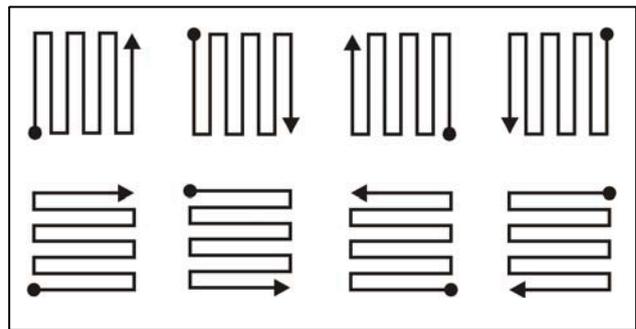


BILD 5. Sweepingmodes

Je nach Ausrichtung der fotografierten Fläche, horizontal oder vertikal, wird entweder einer der vertikalen oder der horizontalen Sweepingmodes ausgewählt. Dadurch wird die Strecke zwischen zwei Aufnahmen minimiert.

Der Startpunkt und dadurch auch die Flugrichtung, werden anhand der euklidischen Distanz zwischen aktueller Position des Fluggeräts und Entfernung zu den möglichen Startpunkten bestimmt. Es wird immer der Startpunkt gewählt, der am nächsten zum Teilnehmer liegt.

Bevor ein UAV einen neuen Wegpunkt innerhalb des Sweepingmodes zugewiesen bekommt, wird überprüft, ob der Wegpunkt zwingend notwendig ist. Durch die Verschiebungen am Rand, und durch Überlappungen aus anderen Teilgebieten kann es vorkommen, dass einzelne Wegpunkte auf dem Sweepinggrid ausgelassen werden können, ohne Verluste im Erkundungs- beziehungsweise Überwachungsgrad zu verursachen, da die Punkte möglicherweise bereits durch UAVs aus anderen Teilgebieten bearbeitet wurden.

3.3.4. Ablauf

Zu Beginn der Mission wird das Gebiet einmalig zerteilt und eine erste Zuweisung von Gebieten an Fluggeräte durchgeführt. Sobald ein Fluggerät sein Gebiet abgearbeitet hat, wird dynamisch ein neues Gebiet ausgewählt und als „in Bearbeitung“ markiert.

Sind im Überwachungsmodus alle Teilgebiete erkundet, wird der Status aller Teilgebiete zurückgesetzt, so dass eine erneute komplette Erkundung durchgeführt wird.

4. ERGEBNISSE

Dieser Abschnitt führt eine Analyse der einzelnen kooperativen Strategien durch. Außerdem werden die Strategien untereinander auf ihre Eignung für Erkundungs- und Überwachungsaufgaben verglichen.

4.1. Szenarien

Zur Analyse und zum Vergleich der Strategien wurden unterschiedliche Simulationen durchgeführt. Alle Strategien hatten dabei die gleiche Ausgangssituation bezüglich der Karte und der Anzahl an Agenten.

4.1.1. Karten

Drei unterschiedliche Karten wurden in der Simulation verwendet. Als Grundlage für alle Karten wurde das gleiche äußere Polygon verwendet, welches sich über eine Größe von $350m \times 500m$ erstreckt. Karte 1 (Map 1) enthält dabei keinerlei Hindernisse. Karte 2 (Map 2) enthält einfache Hindernisse, jedoch keine gangartigen oder labyrinthähnlichen Strukturen, wie sie in Karte 3 (Map

3) enthalten sind.

Die Auflösung der Rasterung wurde zu $5.0m \times 5.0m$ gewählt.

4.1.2. Agenten

Alle Teilnehmer wurden mit gleicher Startposition und gleichen dynamischen Eigenschaften simuliert. Die Höhe aller Agenten ist konstant auf $40m$ eingestellt. Die mit den Öffnungswinkeln resultierende Fläche, die mit einem Foto abgedeckt werden kann beträgt ca. $23.0m \times 14.6m$.

4.2. Erkundung

Da bei der Erkundung das Gebiet nur einmal abgeflogen werden soll, sollte dies auch bei der Analyse und beim Vergleich der Strategien berücksichtigt werden. Dazu werden zwei Gütemaße definiert.

4.2.1. Erkundungsdauer

Eine wichtige Kenngröße bei der Erkundung stellt die Zeitspanne dar, die notwendig ist, um die gewünschte Fläche komplett abzuarbeiten. Daher wird dies als Gütemaß für Strategien gewählt. Wie in BILD 6 dargestellt, kann die Erkundungszeit im Graphen abgelesen werden, der den Erkundungsgrad über der Zeit aufträgt.

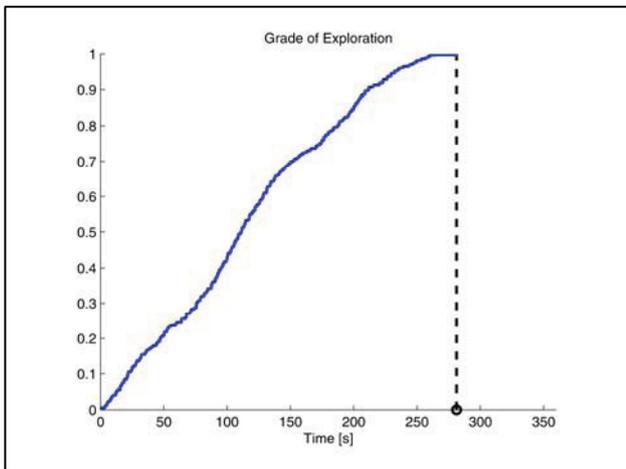


BILD 6. Bestimmung der Erkundungsdauer

Der Erkundungsgrad wird wie folgt berechnet:

$$(3) D_e = \frac{\text{Anzahl erkundeter Zellen}}{\text{Anzahl zugänglicher Zellen}}$$

4.2.2. Erkundungsträgheit

Da Kurven mit gleicher Erkundungsdauer einen unterschiedlichen Verlauf besitzen können, soll außerdem die Erkundungsträgheit betrachtet werden. Die Erkundungsträgheit wird durch die grau eingefärbte Fläche in BILD 7 dargestellt.

Im Falle von Sucheinsätzen, die als Erkundung betrachtet werden können, ist zum Beispiel eine geringe Trägheit von Interesse. Wird davon ausgegangen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass sich eines der gesuchten Objekte oder Personen in einer Zelle befindet über der ganzen Fläche gleich verteilt ist, wird dadurch die durchschnittliche Zeit bis zur Entdeckung verringert.

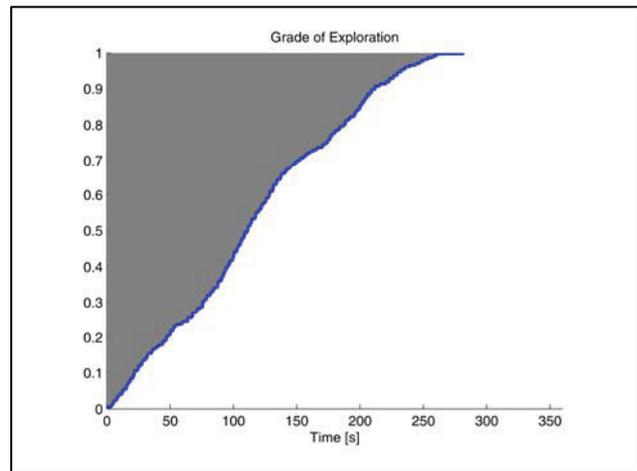


BILD 7. Bestimmung der Erkundungsträgheit

4.2.3. Theoretische Schranke

Mit Hilfe der Anzahl an Agenten der Mission und den weiteren Parametern kann für die Erkundungsdauer eine theoretische untere Schranke berechnet werden. Dazu wird das Gebiet in ein Polygon gleicher Fläche projiziert, so dass alle Teilnehmer parallel ohne überlappende Fotoflächen das Gebiet überfliegen können. Durch die gegebenen Dynamikeigenschaften und Fotofläche kann diese Schranke bestimmt werden.

4.2.4. Vergleich der Strategien

BILD 8 zeigt die Erkundungszeit über der Anzahl an Agenten für die unterschiedlichen Strategien.

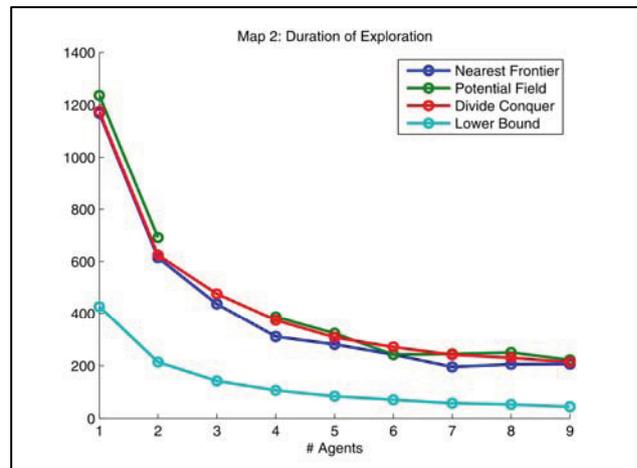


BILD 8. Erkundungszeit über der Anzahl an Agenten für die unterschiedlichen Strategien und die theoretische Untergrenze, jeweils für Karte 2.

Wie in der Abbildung zu erkennen ist, benötigen alle Strategien sehr ähnliche Zeitspannen zur kompletten Erkundung der Karte. Der fehlende Messwert für die Strategie „Potentialfeld“ bei drei Agenten kann dadurch erklärt werden, dass Zellen, die noch nicht erkundet wurden nur lokale Minima hervorrufen, und dadurch nicht weiter beachtet werden. Durch Veränderung der Koeffizienten zur Gewichtung der einzelnen Potentialanteile kann diesem Phänomen entgegengewirkt werden.

Größere Unterschiede bei den Strategien lassen sich bei der Betrachtung der Erkundungsträgheit feststellen, siehe BILD 9.

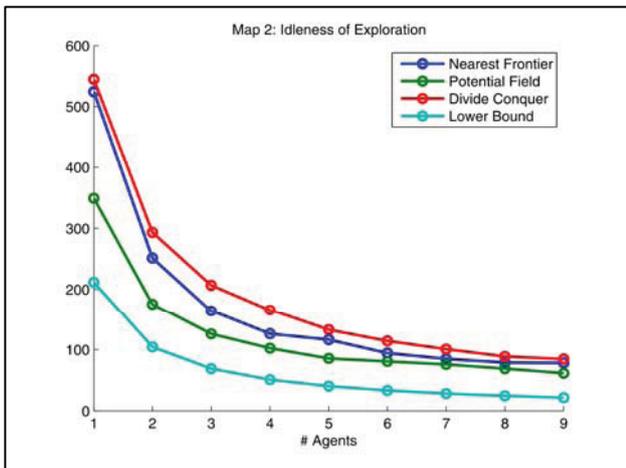


BILD 9. Erkundungsträgheit über der Anzahl an Agenten für die unterschiedlichen Strategien und die theoretische Untergrenze, jeweils für Karte 2.

Hier ist vor allem bei einer geringen Anzahl an Teammitgliedern ein Vorteil der „Potentialfeld“-Strategie gegenüber den anderen beiden feststellbar. Dies liegt vor allem daran, dass durch die unterschiedlichen Potentialanteile eine Überschneidung der Fotoflächen vermieden wird. Dabei wird in Kauf genommen, kleinere Lücken zu lassen, die erst später geschlossen werden. Dadurch wird auch kein Vorteil bei der Erkundungszeit erreicht. Die Strategie „Nearest-Frontier“ hat durch ihre Vorgehensweise die größten Flächen, die sich überlappen.

Bei allen Strategien lässt sich feststellen, dass sowohl die Erkundungsdauer als auch die Trägheit gegen einen festen Wert zu streben scheinen. Ab einer gewissen Anzahl an Agenten wird der Kosten-Nutzen-Faktor also wieder schlechter, geht man von einem linearen Verlauf für die Kosten in Abhängigkeit der Anzahl an Agenten aus.

4.3. Überwachung

Bei der Überwachung eines Gebiets soll jeder Punkt periodisch überflogen werden. Um dies zu vergleichen zu können wird ebenfalls ein Gütemaß definiert.

4.3.1. Überwachungsgrad

Ähnlich dem Erkundungsgrad wird im Fall der Überwachung der Überwachungsgrad definiert:

$$(4) D_s = \frac{\text{Summe der Zellenwerte}}{\text{Anzahl zugänglicher Zellen}}$$

Um eine bessere Vergleichbarkeit der einzelnen Strategien zu erhalten wird zusätzlich der Mittelwert des Überwachungsgrades als Gütemaß definiert. Entsprechend kann ebenso eine theoretische, obere Schranke berechnet werden.

4.3.2. Vergleich der Strategien

In BILD 10 ist der Mittelwert des Überwachungsgrades in abhängig der Anzahl an Agenten für die verschiedenen Strategien exemplarisch für Karte 2 gezeigt.

In der Abbildung ist deutlich zu sehen, dass die Strategie „Potentialfeld“ einen höheren durchschnittlichen Überwachungsgrad erreicht.

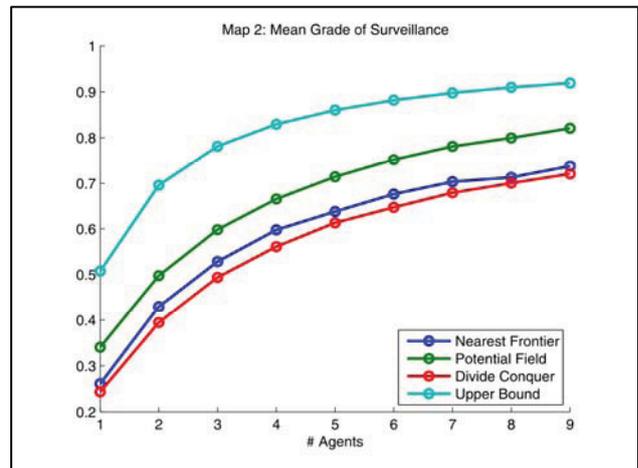


BILD 10. Mittelwert des Überwachungsgrades in Abhängigkeit der Anzahl an Agenten für die unterschiedlichen Strategien und die theoretische Obergrenze.

Dies ist durch den expliziten Einfluß des Überwachungsgrades der einzelnen Zellen in die Planungsphase zu erklären. Sowohl die „Nearest-Frontier“- als auch die „Divide-and-Conquer“-Strategie führen ihren Erkundungsablauf periodisch aus.

Auch in der Kurve des Überwachungsgrades ist ein Abnehmen der Steigung mit zunehmender Agentenanzahl festzustellen. Alle Strategien erreichen jedoch das Maximum von 1, für den Fall, dass so viele Teilnehmer genutzt werden, dass zu jedem Zeitpunkt ein komplettes Abbild des Gebietes gemacht werden kann. Der Kosten-Nutzen-Faktor hat jedoch auch hier früher sein Maximum, wenn man wie vorher von einem konstanten Anstieg der Kosten für zusätzliche Fluggeräte ausgeht.

Durch die periodische Ausführung der Erkundungsstrategie bei den Methoden „Nearest-Frontier“ und „Divide-and-Conquer“ werden Bereiche, die erst vor kurzem beobachtet wurden oft schnell wieder beobachtet, während weiter entfernte Bereiche erst später wieder erkundet werden. An den weit entfernten Zellen sinkt das Überwachungsmaß in diesen Fällen stark ab. Dies kann auch in BILD 11 festgestellt werden.

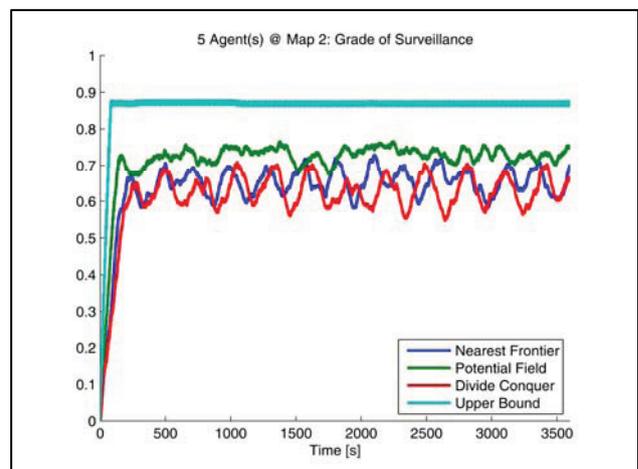


BILD 11. Grad der Überwachung über der Zeit bei 5 Teilnehmern für die unterschiedlichen Strategien (blau, grün, rot) und theoretische Obergrenze (türkis).

Hier können deutliche Schwingungen im Überwachungsgrad über der Zeit für diese beiden Strategien beobachtet werden.

Für die Strategie „Potentialfeld“ wird ein fast kontinuierlicher Verlauf erreicht.

4.4. Einfluss der Karten

Sowohl für den Fall der Gebietserkundung als auch der Gebietsüberwachung wurde der Einfluss der Karte auf die Gütemaße untersucht. Für Karte 1 ohne Hindernisse und Karte 2 mit einfachen Hindernissen ergeben sich für beide Szenarien sehr ähnliche Situationen. Eine mögliche Erklärung ist die reduzierte Fläche die abgesucht werden muss, die die zusätzlichen Wege durch die Hindernisse kompensiert.

Im Fall der Karte 3, die labyrinthähnliche und gangartige Strukturen enthält, verschlechtern sich in beiden Einsatzfällen die Gütemaße. Dies ist durch den zusätzlichen Wegaufwand in den komplexen Strukturen zu erklären, die jedoch keine signifikante Reduktion der zu untersuchende Fläche mit sich bringen. Die Ergebnisse sind in dieser Art zu erwarten.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Diese Arbeit beschreibt den Aufbau einer Simulationsumgebung in MATLAB® auf Basis derer unterschiedliche Strategien zu effizienten Erkundung und Überwachung von Gebieten entwickelt wurden.

Die „Nearest-Frontier“-Strategie sucht den nächsten Punkt auf der Grenze zwischen erkundetem und unerkundetem Gebiet. Im Falle der Überwachung wird die Strategie periodisch ausgeführt, sobald das Gebiet komplett erkundet wurde.

Die Strategie „Potentialfeld“ basiert auf dem Design künstlicher Potentialfelder, wodurch Regeln nachgebildet werden, die eine effiziente Lösung der Problemstellung erreichen sollen. Durch die Linearkombination der hier entwickelten Potentialfeld-Anteile wird ein Gesamt-Potential berechnet auf dem durch eine Minimum-Suche der nächste Wegpunkt berechnet wird.

Die Methode „Divide-and-Conquer“ zerteilt das Gebiet in approximativ konvexe Gebiete, die dann durch Anwenden einfacher Suchstrategien bearbeitet werden können. Auch hier wird der Erkundungsablauf im Falle einer Überwachungsanwendung periodisch ausgeführt.

Für Anwendungen im Bereich der Erkundung erreichen alle Strategien sehr ähnliche Ergebnisse. Sollen zum Beispiel Luftbilder für Mosaiking-Anwendungen erstellt werden, ist die „Nearest-Frontier“-Strategie sinnvoll, da schon bei der Ausführung der Strategie Überlappungsbereiche in den Bildern entstehen, wie sie für Mosaiking-Anwendungen notwendig sind.

In der Analyse und im Vergleich der Strategien untereinander hat sich gezeigt, dass die Methode „Potentialfeld“ einen vielversprechenden Ansatz für Überwachungseinsätze darstellt. Hier wird bei der Planung der nächsten Schritte direkt der Überwachungsgrad der einzelnen Zellen mitberücksichtigt.

6. LITERATURVERZEICHNIS

[1] Meister, O., „Entwurf und Realisierung einer Aufklärungsplattform auf Basis eines unbemannten

- Minihelikopters mit autonomen Flugfähigkeiten“, Karlsruhe Institute of Technology, Institute of Systems Optimization, Logos, 2010
- [2] Meister, O.; Frietsch, N.; Ascher, C. & Trommer, G., „Adaptive path planning for VTOL-UAVs“, Gyroscopy and Navigation, Springer, 2010, 1, 279-284
- [3] Barnes, L.; Fields, M. & Valavanis, K., „Unmanned ground vehicle swarm formation control using potential fields“, Control & Automation, 2007. MED'07. Mediterranean Conference on, 2007, 1-8
- [4] Paul, T.; Krogstad, T. R. & Gravdahl, J. T., „Modelling of UAV formation flight using 3D potential field“, Simulation Modelling Practice and Theory, 2008, 16, 1453 - 1462
- [5] Beard, R.; McLain, T.; Nelson, D.; Kingston, D. & Johanson, D., „Decentralized Cooperative Aerial Surveillance Using Fixed-Wing Miniature UAVs“, Proceedings of the IEEE, 2006, 94, 1306 -1324
- [6] Drake, S.; Brown, K.; Fazackerley, J. & Finn, A., „Autonomous control of multiple UAVs for the passive location of radars“, Proc. 2nd Int. Conf. on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2005, 403-409
- [7] Merino, L.; Caballero, F.; Martinez-de Dios, J.; Ferruz, J. & Ollero, A., „A cooperative perception system for multiple UAVs: Application to automatic detection of forest fires“, Journal of Field Robotics, John Wiley & Sons, 2006, 23, 165-184
- [8] Tisdale, J.; Ryan, A.; Kim, Z.; Tornqvist, D. & Hedrick, J. A., „Multiple UAV system for vision-based search and localization“, American Control Conference, 2008, 2008, 1985 -1990
- [9] Howard, A.; Mataric, M. & Sukhatme, G., „Mobile Sensor Network Deployment using Potential Fields: A Distributed, Scalable Solution to the Area Coverage Problem“, Distributed Autonomous Robotics Systems 5, 2002, 299-308
- [10] Maza, I. & Ollero, A. Alami, R.; Chatila, R. & Asama, H. (Eds.), „Multiple UAV cooperative searching operation using polygon area decomposition and efficient coverage algorithms“, Distributed Autonomous Robotic Systems 6, Springer Japan, 2007, 221-230
- [11] Yamauchi, B., „Frontier-based exploration using multiple robots“, Proceedings of the second international conference on Autonomous agents, 1998, 47-53
- [12] Ghosh, S., „Visibility Algorithms in the Plane“, Cambridge University Press New York, NY, USA, 2007
- [13] Dijkstra, E., „A note on two problems in connexion with graphs.“ Numerische Mathematik, Springer, 1959, 1, 269-271
- [14] Hart, P.; Nilsson, N. & Raphael, B., „A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths“, Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on, IEEE, 1968, 4, 100-107
- [15] Khatib, O., „Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots“, International Journal of Robotics Research, 1986, 5, 90-98
- [16] Ge, S. & Cui, Y., „New potential functions for mobile robot path planning“, Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 2000, 16, 615 -620
- [17] Lien, J.-M. & Amato, N. M., „Approximate convex decomposition of polygons“, Proceedings of the Twentieth Annual Symposium on Computational Geometry, ACM, 2004, 17-26