

VERKEHRSDATENERFASSUNG MIT UNBEMANNTEN AUTOMATISIERTEN FLUGGERÄTEN IM PROJEKT UNICARAGIL

N. Voget*, M. Hartmann*, N. Siepenkötter*, D. Moormann*

* RWTH Aachen University, Institut für Flugsystemdynamik, Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Ein Schlüsselfaktor für autonome Fahrzeuge ist die Verfügbarkeit von Informationen über den aktuellen Zustand des Fahrzeugumfelds. Durch Vernetzung mit anderen Verkehrsteilnehmern kann der wahrnehmbare Bereich über die unmittelbare Umgebung des Fahrzeugs hinaus vergrößert werden. Im Forschungsprojekt UNICARagil werden zusätzlich Kippflügler eingesetzt, um bedarfsgesteuert zügig Informationen zu sammeln. Diese unbemannten „Info-Bienen“ erfassen mithilfe von Kameras das aktuelle Verkehrsgeschehen. In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, das zu einer vorgegebenen Folge von zu beobachtenden Straßenabschnitten eine energieeffiziente Flugbahn berechnet, von der aus eine vollständige Abdeckung garantiert ist.

Keywords

UAV; Bahnplanung; Inspektion; autonomes Fahren

1. EINLEITUNG

Im Verbundforschungsprojekt UNICARagil werden modulare Hard- und Softwarekonzepte entwickelt, um verschiedene Typen autonomer elektrischer Fahrzeuge vom Privatauto bis zum Transportfahrzeug aus denselben Basiskomponenten zusammen stellen zu können. Durch dieses Konzept wird es möglich, dass trotz unterschiedlichster Anforderungen der verschiedenen Fahrzeuge bspw. nur ein Antriebs- und ein Sensormodul entwickelt werden muss. [1] Ein zentraler Bereich innerhalb des Forschungsprojekts ist die Automatisierung der Fahrzeuge, durch die vollautonomes Fahren erreicht werden soll. [2] Eine essentielle Grundlage der Automatisierung ist die Wahrnehmung des Fahrzeugumfelds. Hierzu werden vor allem Sensoren eingesetzt, über die das Fahrzeug ein möglichst umfassendes Abbild der direkten Umgebung erhält. Zusätzlich werden den Fahrzeugen bei UNICARagil von einem Clouddienst Informationen über das Verkehrsgeschehen bereit gestellt. [3]

Dieses sogenannte Kollektive Umfeldmodell wird dabei ständig durch die beteiligten Fahrzeuge aktualisiert, indem diese beobachtete Veränderungen des Straßennetzes an die Cloud übermitteln, woraufhin das Kollektive Umfeldmodell aktualisiert wird. Eine derartige Aktualisierung bedeutet aber in der Regel, dass das meldende Fahrzeug bereits in eine Situation geraten ist, die nicht dem erwarteten Zustand entspricht – die geplante Route kann beispielsweise durch eine Baustelle blockiert sein, sodass das Fahrzeug einen Umweg fahren muss. Um solche Vorfälle möglichst im Vorfeld zu erkennen und vermeiden, werden bei UNICARagil unbemannte Fluggeräte eingesetzt, die bedarfsgesteuert mithilfe einer Kamera Informationen über Straßennetz und Verkehrsgeschehen erfassen. Diese sogenannten „Info-Bienen“ werden dazu unter anderem in

solchen Fällen eingesetzt, bei denen aufgrund eines externen Ereignisses eine Blockade von Fahrspuren zu erwarten ist.

Ein Beispiel für derartige Ereignisse sind Unfälle, in deren Folge zunächst die Unfallteilnehmer und Trümmerteile sowie anschließend die hinzukommenden Einsatzfahrzeuge verschiedene Fahrspuren blockieren. In einem solchen Szenario bietet die Info-Biene als Luftfahrzeug den Vorteil, den Unfallort zügig erreichen zu können ohne von entstehenden Staus beeinträchtigt zu werden. Darüber hinaus kann die Info-Biene aus der Luft das Geschehen durchgängig beobachten und kontinuierlich aktuelle Informationen liefern, ohne eine Behinderung für die Einsatzkräfte darzustellen.

Ein weiteres Anwendungsszenario stellt die Suche nach auf die Straße umgestürzten Bäumen infolge eines Unwetters dar. Während die Info-Biene über durch Bäume erzeugte Straßenblockaden hinweg fliegen und unbehindert die nachfolgenden Straßenabschnitte inspizieren kann, werden diese blockierten Landstraßen für bodengebundene Fahrzeuge zu kilometerlangen Sackgassen.

Für eine zügige Informationserfassung soll das Fluggerät möglichst schnell entlang der vorgegebenen Straßenzüge fliegen. Eine wesentliche Beschränkung für die realisierbare Geschwindigkeit stellt die Krümmung des Flugpfades dar, da insbesondere im Innenstadtbereich Straßenverläufe teilweise starke Krümmungen aufweisen. Sollte das Fluggerät dem vorgegebenen Straßenverlauf exakt folgen, müsste aufgrund der flugdynamisch beschränkten maximalen Querschleunigung daher die Geschwindigkeit teilweise deutlich reduziert werden. Dadurch würden jedoch häufige Beschleunigungsmanöver benötigt, die sich negativ auf den Energiebedarf auswirken.

Im Folgenden wird daher ein Verfahren vorgestellt, das unter Berücksichtigung der Größe des Kamera-

sichtbereichs einen aus Geraden- und Kreissegmenten zusammengesetzten Beobachtungsschlauch so um die Straßenabschnitte spannt, dass die Anzahl der Richtungswechsel verringert und die auftretenden Radien möglichst groß werden. Auch unter vollständiger Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Breite des Kamerabildes können in der Beobachtungsbahn Kreissegmente enthalten sein, deren Radius eine deutliche Verringerung der Fluggeschwindigkeit erfordert. Daher wird zusätzlich zur Beobachtungsbahn eine Flugbahn berechnet, bei der kritische Kreissegmente je nach Begebenheiten durch eines der drei verschiedenen in diesem Beitrag vorgestellten Manöver ersetzt werden. Bevor die Berechnungsverfahren der Beobachtungs- und Flugbahn im Detail präsentiert werden, soll zunächst das Fluggerät inklusive der verbauten Sensorik vorgestellt werden, da sich daraus Randbedingungen für die Bahnplanung ergeben.

2. INFO-BIENE

In der vorangehenden Motivation wurden für den Einsatz der Info-Biene verschiedene Szenarien vorgestellt, die unterschiedliche Anforderungen an das Fluggerät stellen. So soll die Info-Biene einerseits längere Zeit an einem festen Ort verbleiben und andererseits mit möglichst hoher Geschwindigkeit vorgegebene Strecken abfliegen können. Neben den Flugabschnitten, die unmittelbar der Auftragserfüllung dienen, besteht ein vollständiger Flug aus Start, Anflügen zu den einzelnen Auftragsgebieten, Rückflug und Landung. Um die angeforderten Informationen möglichst schnell erfassen zu können, sollen die Anflugsegmente mit einer hohen Geschwindigkeit geflogen werden. Zudem erscheint es sinnvoll, die Info-Bienen im Stadtgebiet zu stationieren, weswegen die Info-Biene senkrecht starten und landen können muss.



BILD 1. Die Info-Biene in Schweb- und Flächenflugkonfiguration

Im Forschungsprojekt UNICAR*agil* wird die Info-Biene als Kippflügler ausgeführt. Wie in Bild 1 dargestellt ist, kann dieser sowohl den Hauptflügel als auch das Höhenleitwerk um die Querachse kippen und auf diese Weise im gesamten aerodynamischen Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 30 m/s stabil fliegen. [4] [5] Sind die Flächen nach oben gekippt, wird der Auftrieb vom Schub der Motoren erzeugt. In dieser Konfiguration kann durch unterschiedliche Schubvorgaben der beiden vorderen Motoren ein Rollmoment erzeugt werden. Die Regelung der Nicklage erfolgt durch Verteilung der Schubkraft zwischen den vorderen und dem hinteren Motor. Werden die vom Motorabwind überströmten Querruder gegensinnig ausgeschlagen, ergibt sich ein Giermoment. Mit zunehmender Drehung der Flächen in die Horizontale wirkt der Schub vermehrt als Vortrieb, bis sich das Flug-

gerät schließlich im reinen Flächenflug befindet. Die Momentensteuerung erfolgt in diesem Zustand wie bei Flächenfliegern in Drachenkonfiguration üblich über Quer-, Höhen- und Seitenruder. Da der Auftrieb durch die aerodynamischen Kräfte an der Tragfläche resultiert, kann der zum Vortrieb benötigte Schub komplett durch den Heckmotor erzeugt werden, sodass die beiden vorderen Motoren abgeschaltet und die Blätter der Propeller angelegt werden können. [4] Dadurch ergibt sich eine geringere Leistungsaufnahme im Vergleich zum Flug bei langsameren Geschwindigkeiten, die jedoch anschließend mit zunehmender aerodynamischer Geschwindigkeit aufgrund des größer werdenden Luftwiderstands wieder zunimmt. Der geringste Energiebedarf für eine definierte Strecke ergibt sich dadurch im langsamen Flächenflug.

2.1. Sensorik

Zur Erfassung des Verkehrsgeschehens ist die Info-Biene mit einer RGB-Kamera ausgestattet, die über Ethernet an ein Rechenmodul im Flieger angebunden ist, sodass die Bilder bereits während des Fluges ausgewertet werden können.

Das Fluggerät soll im Bereich von 50 bis 100 Metern über Bodenhöhe fliegen, wobei dieser Höhenbereich der Flugbahnplanung komplett zur Verfügung stehen soll. So wird ermöglicht, dass das Fluggerät beispielsweise beim Flug entlang steiler Straßen einem weniger steilen Flugpfad folgen kann, ohne das zulässige Höhenband zu verlassen. Die mithilfe des Objektivs realisierbaren Bildwinkel müssen groß genug sein, um bei 50 m Höhe bereits ein ausreichend breites Gebiet abzubilden, während gleichzeitig bei 100 m Bodenabstand die von einem Pixel abgebildete Fläche nicht zu groß werden soll. Aus diesen Gründen ist die Info-Biene mit einem 12-mm-Objektiv ausgestattet, wodurch sich bei 50 m Flughöhe das abbildbare Gebiet zu $35,8 \times 29,8 \text{ m}^2$ ergibt; bei 100 m bildet jedes Pixel eine Fläche von $29 \times 29 \text{ mm}^2$ ab.

Fliegt die Info-Biene mit 30 m/s, verschiebt sich die Kamera gegenüber der Straße jede Millisekunde um 30 mm, also eine Pixelbreite bei 100 m Flughöhe bzw. zwei Pixelbreiten bei 50 m. Für eine möglichst kurze Belichtungszeit muss die Blende soweit wie möglich geöffnet werden, sodass sich die Blendenzahl $k = f/2$ ergibt. Mit dieser Einstellung führt eine Belichtungszeit von 1 ms zu einem ausreichend belichteten Bild. Der Effekt der durch die große Blendenöffnung verringerten Schärfentiefe ist gegenüber der Bewegungsunschärfe vernachlässigbar, da selbst für $k = f/2$ der maximale Radius des Zerstreungskreises nur einem Zehntel der Pixelbreite entspricht, wenn der Fokus fest auf eine Gegenstandsweite von 66 m eingestellt wird.

Die Orientierung des Fluggeräts ist aufgrund aerodynamischer Gesetze abhängig von der vorgegebenen Bahn und dem auf das Flugzeug wirkenden Wind. Um die Kamera davon unabhängig auf den gewünschten Zielpunkt ausrichten zu können, wird diese über ein Gimbal mit zwei Achsen kardanisch am Fluggerät befestigt. Auf diese Weise kann die Kamera bis zu $\pm 70^\circ$ um die flugzeugfeste Rollachse sowie ca. $\pm 20^\circ$ um eine darauf senkrecht stehende Achse gekippt werden.

3. BEOBACHTUNGSBAHN

Im Folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, das zu einer gegebenen Folge von Straßenabschnitten einen diese komplett umhüllenden Schlauch aus aneinander anschließenden Geraden- und Kreissegmenten generiert. Die maximale Breite der einzelnen Segmente dieses Beobachtungsschlauchs entspricht der minimalen Breite des Kamerasichtfelds, sodass der gesamte vorgegebene Straßenzug abgebildet wird, wenn die Kamera auf die Beobachtungsbahn ausgerichtet wird, die sich als Mittellinie des Beobachtungsschlauchs ergibt. Im Gegensatz zu den zu erstellenden Schlauchsegmenten liegen die Straßenabschnitte allerdings nicht als mathematische Repräsentationen, also bspw. Geradensegment, Kreissegment oder Klothoide, sondern nur als mehr oder weniger fein diskretisierte Punktefolge vor, wobei für jeden dieser Punkte die zugehörige Straßenbreite bekannt ist.

Die meisten Straßen sind schmaler als der durch die Kamera abbildbare Bereich, sodass ein Straßenabschnitt auch dann im Sichtfeld der Kamera sein kann, wenn sich der Zielpunkt der Kamera seitlich der Straßenmitte befindet. Für die Beobachtungsbahn gilt daher, dass sie einen Straßenpunkt dann abdeckt, wenn der Abstand des Punkts zur Beobachtungsbahn zuzüglich der halben Straßenbreite an diesem Punkt geringer als die halbe Breite des Kamerasichtfelds ist.

3.1. Geraden

Im ersten Schritt werden Beobachtungsgeraden erstellt, die jeweils möglichst viele aufeinander folgende Straßenpunkte abdecken. Die Menge der von einer Geraden abdeckbaren Punkte wird dabei iterativ bestimmt, indem beginnend mit zwei Punkten eine Ausgleichsgerade zu diesen Punkten bestimmt wird. Anschließend wird ermittelt, wie viele ununterbrochen aufeinander folgende Punkte von dieser Geraden abgedeckt werden. Die beiden vorigen Schritte werden daraufhin solange mit der jeweils neu entstehenden Punktmenge durchgeführt, bis sich die Anzahl der abgedeckten Punkte nicht mehr ändert.

3.1.1. Regression

Bei der Berechnung der Ausgleichsgeraden zu einer Punktmenge ist zu beachten, dass die Punkte beliebig im zweidimensionalen Raum verteilt sein können. Damit scheidet die lineare Einfachregression als Verfahren aus, da bei dieser der Abstand der Punkte zur Geraden entlang der y-Achse minimiert wird, während hier der Abstand entlang der Geradennormalen betrachtet werden soll. Stattdessen wird eine lineare Regression angewendet, bei der

$$(1) \quad \sum_i (n_x x_i + n_y y_i - d)^2$$

minimal werden soll, wobei $(n_x, n_y)^T$ der normierte Normalenvektor der Geraden und d der Abstand der Geraden vom Ursprung sind. Ohne Beschränkung der Annahme kann im weiteren Verlauf davon ausgegangen werden,

dass n_y positiv ist, also

$$(2) \quad n_y = \sqrt{1 - n_x^2}$$

gilt, da die durch $(n_x, n_y)^T$ und d definierte Gerade auch durch $(-n_x, -n_y)^T$ und $-d$ beschrieben wird.

Werden zu (1) die partiellen Ableitungen nach n_x und d gebildet und zu 0 gesetzt, ergeben sich

$$(3) \quad d = n_x \bar{x} + n_y \bar{y} \quad \text{und}$$

$$(4) \quad \frac{n_x}{n_y} = a \pm \sqrt{a^2 + 1} \quad \text{mit}$$

$$(5) \quad a = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 - \sum_i (y_i - \bar{y})^2}{2 \sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}$$

\bar{x} und \bar{y} bezeichnen dabei für die jeweilige Koordinate das arithmetische Mittel der Punkte der betrachteten Menge. Da n_y durch (2) auf den positiven Wertebereich beschränkt wurde, muss das Vorzeichen von n_x mit dem von n_x/n_y übereinstimmen, woraus

$$(6) \quad n_x = \text{signum} \left(\frac{n_x}{n_y} \right) \sqrt{\frac{(n_x/n_y)^2}{1 + (n_x/n_y)^2}}$$

folgt.

Aus (4) resultieren zwei Werte für n_x/n_y , wobei der eine Wert dem negativen Kehrwert des anderen entspricht, sodass die beiden zugehörigen Normalenvektoren senkrecht aufeinander stehen. Eine der beiden Geraden ist also die gesuchte mit der geringsten Summe der quadrierten Abstände, während sich für die darauf senkrecht stehende Gerade die größte Summe ergibt.

3.1.2. Abdeckung

Bei der Berechnung der Regressionsgeraden hat die Auswahl der abzudeckenden Punkte einen entscheidenden Einfluss auf die Lage der Geraden und damit auf die Anzahl der von der errechneten Geraden tatsächlich abgedeckten Punkte. Entsprechend sollten nur diejenigen Punkte als Eingabe des Verfahrens dienen, die vom jeweiligen Startpunkt aus ununterbrochen durch eine Gerade abdeckbar sind. Da aber vor der Berechnung einer Beobachtungsgeraden nicht vorhersagbar ist, welche Punkte von dieser abgebildet werden können, ergibt sich eine zyklische Abhängigkeit, weswegen in dem hier vorgestellten Verfahren ein iteratives Vorgehen angewendet wird, bei dem die Anzahl der Punkte schrittweise erhöht wird.

Statt jedoch pro Durchgang nur jeweils einen weiteren Punkt hinzu zu nehmen, wird zu Beginn jedes Durchgangs geprüft, wie viele Punkte von der im vorigen Durchgang berechneten Geraden abgedeckt werden. Vor allem bei Punktefolgen, die den Verlauf einer annähernd geradlinigen Straße abbilden, kann auf diese Weise die Anzahl der benötigten Iterationsschritte deutlich verringert werden, wie in Bild 2 dargestellt ist.

Der Startpunkt in diesem Beispiel liegt in der unteren rechten Ecke, weswegen im ersten Durchgang die beiden untersten Punkte verwendet werden. Das erste Teilbild zeigt die Ausgleichsgerade des ersten Durchgangs, die exakt durch die beiden Punkte verläuft; zusätzlich liegen

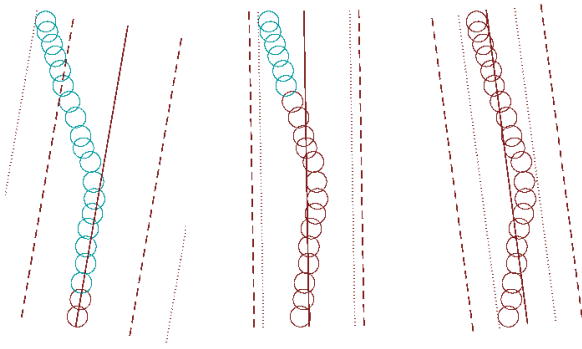


BILD 2. Beobachtungsgerade bei iterativer Vergrößerung der abzudeckenden Punktemenge. Punktierter Linien stellen die Ränder des Beobachtungsschlauchs dar, gestrichelte Linien markieren die Ränder des Kameravisualfelds.

aber auch die nächsten zwölf Punkte innerhalb des durch die gestrichelten Linien gekennzeichneten Sichtbereichs, sodass für den zweiten Durchlauf die ersten 14 Punkte verwendet werden. Wie im zweiten Teilbild dargestellt ist, würde die so berechnete Gerade bereits ausreichen, um alle Punkte abzudecken, allerdings führt ein weiterer Durchgang zu einer besser angepassten Beobachtungsgerade, wodurch der durch die punktierten Linien dargestellte Beobachtungsschlauch schmäler wird.

3.1.3. Schnittpunkte

Mit dem skizzierten Verfahren lässt sich zu einer vorgegebenen Punktefolge eine Menge von Geraden so berechnen, dass jeder Punkt von mindestens einer dieser Geraden abgedeckt wird. Bisher wurde allerdings die Lage der Geraden zueinander nicht beachtet. So wurde bisher davon ausgegangen, dass einer Geraden g_i solange gefolgt wird, bis alle durch diese Gerade abgedeckten Punkte von der Kamera abgebildet wurden, und anschließend auf die nächste Gerade, g_{i+1} , gewechselt wird. Dabei ist es jedoch möglich, dass der Schnittpunkt S_i der beiden Geraden g_i und g_{i+1} bei Bewegung entlang g_i erreicht wird, bevor alle von g_i abzudeckenden Punkte abgebildet werden konnten, sodass bei einem Wechsel auf g_{i+1} bei S_i einige Punkte nicht abgebildet werden können.

Dieses Phänomen tritt unter anderem bei der Einmündung einer Straße in einen Kreisverkehr auf, wie in Bild 3 dargestellt ist. Hierbei werden zusätzlich zur einmündenden Straße auch die ersten fünf Punkte des Kreisverkehrs von der roten Beobachtungsgeraden abgebildet, wodurch diese Punkte nicht in die Berechnung der folgenden, blau dargestellten Beobachtungsgeraden eingehen. Dies führt dazu, dass die blaue Beobachtungsgerade, die sich aus den übrigen Punkten des Kreisverkehrsegments ergibt, die rote Gerade unterhalb des Einmündungspunkts schneidet. Im dargestellten Beispiel werden dadurch vier Punkte um die Einmündung herum nicht vollständig abgedeckt, wenn der Wechsel von der roten auf die blaue Beobachtungsgerade am Schnittpunkt der beiden Geraden vollzogen wird.

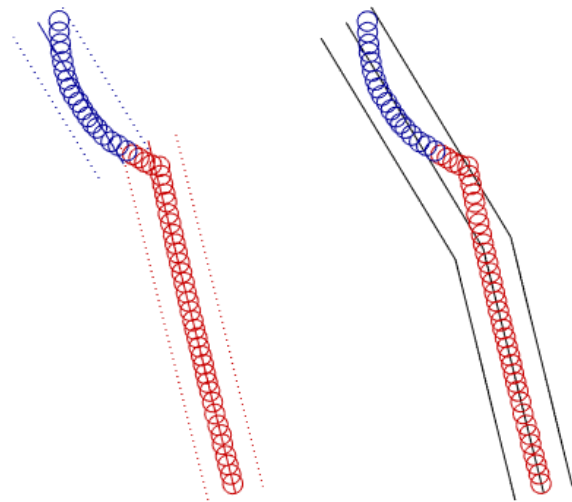


BILD 3. Übergang zwischen zwei aufeinander folgenden Beobachtungsgeraden

In einem solchen Fall wird daher die zweite Gerade erneut berechnet, wobei zur Menge der abzudeckenden Punkte schrittweise der jeweils nächste voran liegende Punkt hinzugefügt wird. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis alle durch eine der beiden Geraden abgedeckten Punkte auch in dem Beobachtungsschlauch liegen, der sich durch Übergang am Schnittpunkt ergibt.

3.2. Kreissegmente

Die Abdeckung der vorgegebenen Straßenabschnitte durch Beobachtungsgeraden ermöglicht eine deutliche Reduktion der Anzahl benötigter Richtungswechsel. Allerdings impliziert ein unmittelbarer Übergang zwischen zwei Geradenabschnitten immer einen sprunghaften Richtungswechsel, der so nicht durch ein Fluggerät realisiert werden kann. Im nächsten Schritt sollen daher die Bereiche um die Schnittpunkte zweier Beobachtungsgeraden durch Kreissegmente ersetzt werden. Jedes Kreissegment muss dabei so geformt sein, dass die Segmente der beiden benachbarten Geraden tangential am Kreissegment anliegen. Daraus folgt, dass der Mittelpunkt des Kreises auf der Winkelhalbierenden des Innenwinkels zwischen den beiden Geraden liegen muss, sodass die Position des Mittelpunkts nur noch vom Kreisradius abhängt.

Ferner müssen alle Straßenpunkte, die von den durch das Kreissegment ersetzten Geradenabschnitten abgedeckt werden, auch vom Kreissegment abgedeckt werden. Für jeden Punkt lassen sich wie in Bild 4 dargestellt ein minimaler sowie ein maximaler Kreisradius berechnen, bei denen der Punkt jeweils gerade noch abgedeckt wird. Da sich der Kreismittelpunkt mit steigendem Radius vom Schnittpunkt der beiden Geraden weg bewegt, berührt beim minimalen Radius der zum Kreismittelpunkt zeigende Rand des Kameravisualfelds den Straßenpunkt, während beim maximalen Radius der Straßenpunkt an den weiter entfernten Sichtfeldrand stößt.

Zudem lässt sich für jeden Punkt derjenige Radius bestimmen, ab dem der Punkt innerhalb des Einflussbereichs des Kreissegments liegt. Ist der Kreisradius kleiner

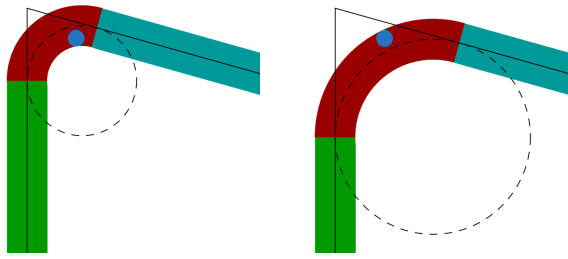


BILD 4. Kreissegment mit minimal bzw. maximal möglichem Radius zur Abdeckung eines Beobachtungspunkts

als dieser Aktivierungsradius, befindet sich der Übergang zwischen der ursprünglich den Punkt abdeckenden Geraden und dem Kreissegment zwischen dem Punkt und S_i , sodass der Punkt weiterhin von dem verkürzten Geradensegment abgedeckt wird. Ist der Kreisradius mindestens so groß wie der Aktivierungsradius, wird das Geradensegment so stark verkürzt, dass sich der Punkt im Bereich des Kreissegments befindet und daher von diesem abgedeckt werden muss. Da der Punkt für Radien unterhalb des Aktivierungsradius nicht betrachtet werden muss, muss entsprechend der minimal für diesen Punkt benötigte Kreisradius nicht berücksichtigt werden, wenn dieser Minimalradius kleiner als der Aktivierungsradius ist.

Ausgehend vom mittleren Punkt wird solange der Punkt mit dem jeweils nächstgrößeren Aktivierungsradius hinzugenommen, wie der kleinste Maximalradius aller betrachteten Punkte größer als der größte Minimalradius ist. Als Radius des Kreissegments wird dann aus dem kleinsten Maximalradius und dem Aktivierungsradius des gerade nicht mehr passenden Punkts der kleinere Wert ausgewählt. Damit sich die Kreissegmente aufeinander folgender Richtungswechsel nicht überlappen, wird der maximale Radius jedes Kreissegments zudem so begrenzt, dass das Kreissegment nicht mehr als die Hälfte des kürzeren verbundenen Geradensegments ersetzt.

Folgen mehrere Richtungswechsel in die gleiche Richtung aufeinander, wird versucht, das erste Geradenstück g_i direkt mit dem letzten, g_n durch ein Kreissegment zu verbinden, wodurch die dazwischen liegenden Geradensegmente g_{i+1} bis g_{n-1} komplett durch das Kreissegment ersetzt werden. Es wird solange die letzte Gerade weggenommen, bis ein passendes Kreissegment bestimmt werden kann.

4. FLUGBAHN

Im vorigen Kapitel wurde ein Verfahren vorgestellt, das zu einer vorgegebenen Punktefolge eine Beobachtungsbahn aus Geraden- und Kreissegmenten erstellt, sodass die Anzahl der Richtungswechsel verringert und zusätzlich die Kurvenradien der Kreissegmente maximiert werden. Je nach Anordnung der abzubildenden Straßenabschnitte kann es jedoch trotzdem dazu kommen, dass die Fluggeschwindigkeit reduziert werden muss, um in einem Kreissegment die maximal zulässige Querbeschleunigung nicht zu überschreiten. Dadurch verlängert sich allerdings die Flugzeit, sodass die angeforderten Informationen spä-

ter zur Verfügung stehen. Zudem wird zusätzliche Energie benötigt, um nach der Kurve wieder auf die höhere Reisegeschwindigkeit zu beschleunigen. Bei starken Richtungsänderungen kann es sogar sein, dass das Fluggerät bis zu Geschwindigkeiten weit unterhalb des rein aerodynamisch getragenen Flugs verzögern muss, wodurch der Flug noch ineffizienter wird.

Die Beobachtungsbahn wird unter der Annahme erstellt, dass alle vorgegebenen Straßenpunkte in voller Breite abgebildet werden, wenn der Mittelpunkt des Kamerabildes der Beobachtungsbahn folgt. Ergibt sich nach Berechnung der Beobachtungsbahn jedoch für einzelne Segmente eine benötigte Breite, die unterhalb der Breite des Kamerasichtfelds liegt, darf die Kameraposition bis zu dieser Differenz seitlich von der Mittellinie abweichen, wobei trotzdem noch eine vollständige Abdeckung erzielt wird. Wird ein solcher seitlicher Versatz zugelassen, kann durch verschieden Varianten eine Flugbahn erstellt werden, die in Kurvenbereichen von der Beobachtungsbahn abweicht, sodass das Fluggerät eine höhere Geschwindigkeit einnehmen kann. Im Folgenden werden drei verschiedene Verfahren vorgestellt.

4.1. Variante A: Innenkurve

Für die erste Variante werden g_i und g_{i+1} analog zur Beobachtungsbahn mit einem Kreissegment verbunden. Durch den zulässigen seitlichen Abstand zwischen Flug- und Beobachtungsbahn darf der Radius des Kreissegments der Flugbahn, R_F , allerdings größer als derjenige der Beobachtungsbahn, R_B , sein. Beide Kreissegmente müssen jeweils tangential an beide Geraden anschließen, wodurch sich beide Mittelpunkte auf der Winkelhalbierenden befinden müssen. Der größte Abstand zwischen Flug- und Beobachtungsbahn senkrecht zur Flugbahn ergibt sich damit gemäß Bild 5 zwischen den Scheitelpunkten der beiden Kreissegmente, also den jeweiligen Schnittpunkten der Kreissegmente mit der Winkelhalbierenden.

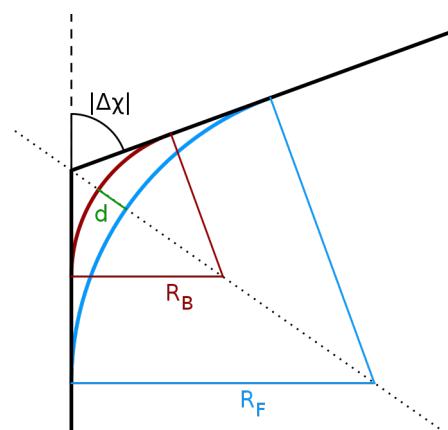


BILD 5. Unterschied zwischen Flug- und Beobachtungsbahn bei erlaubter seitlicher Abweichung

Dieser Abstand berechnet sich entsprechend zu

$$(7) \quad d = (R_F - R_B) \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) ,$$

wobei $2\alpha = \pi - |\Delta\chi|$ der Innenwinkel zwischen den beiden Geraden ist.

Für eine vorgegebene Mindestfluggeschwindigkeit V_{\min} ergibt sich in Verbindung mit der maximal zulässigen Querbewegung $A_{lat,max}$ der minimal fliegbare Kreisradius zu $R_{F,min} = V_{\min}^2/A_{lat,max}$. Damit stellt

$$(8) \quad R_{B,min} = V_{\min}^2/A_{lat,max} - d_{max} \frac{\sin \alpha}{1 - \sin \alpha}$$

den minimalen Radius dar, den ein Kreissegment der Beobachtungsbahn haben darf, damit diesem durch eine Innenkurve gefolgt werden kann. Im Folgenden soll d_{max} 5 m betragen, wodurch der maximale Winkel zwischen der Kamerablickrichtung und dem Erdlot $5,7^\circ$ bei der Mindestflughöhe von 50 m beträgt.

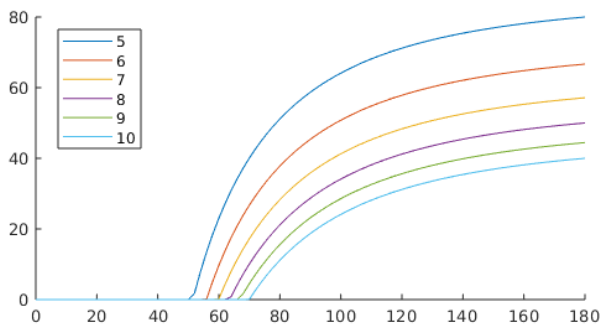


BILD 6. Minimaler Radius des Beobachtungskreissegments abhängig von der Richtungsänderung für verschiedene Werte der maximalen Querbewegung bei $V_{\min} = 20 \text{ m/s}$

Aus Bild 6 erkennt man, dass selbst bei einer hohen maximalen Querbewegung von 10 m/s^2 der Radius des Beobachtungskreissegments bei einer rechtwinkligen Kurve für diese Variante nicht unter 20m liegen darf. Für engere Kreissegmente der Beobachtungsbahn kann keine Innenkurve erzeugt werden, die mit der geforderten Minimalgeschwindigkeit geflogen werden kann.

Die beiden im Folgenden dargestellten Varianten B und C führen daher den Richtungswechsel der Flugbahn so aus, dass g_i bis zum Schnittpunkt S_i gefolgt wird, daran das jeweilige Manöver anschließt und anschließend von S_i aus entlang g_{i+1} geflogen wird. In diesen Fällen wird also das Kreissegment der Beobachtungsbahn nicht beachtet, da die vom Kreissegment abgedeckten Punkte auch von mindestens einer der beiden Geraden abgedeckt werden.

4.2. Variante B: Dubinspfad

Der kürzeste Flugpfad bei vorgegebenem Start- und Endpunkt sowie jeweils zugehöriger Flugrichtung besteht aus einer Kombination von Geraden- und Kreissegmenten mit dem minimal erlaubten Radius. [6] Für den hier auftretenden Sonderfall, dass Start- und Zielpunkt identisch sind, besteht der kürzeste Pfad wie in Bild 7 dargestellt aus drei

Kreissegmenten. Die Strecke des Pfads berechnet sich zu

$$(9) \quad s_{Dubins} = \lambda R = \lambda \frac{V_{Kurve}^2}{A_{lat}}$$

$$(10) \quad \text{mit } \lambda = 2\pi + |\Delta\chi| - 4 \arcsin \frac{\sin \frac{|\Delta\chi|}{2}}{2}$$

und ist damit immer länger als ein Vollkreis.

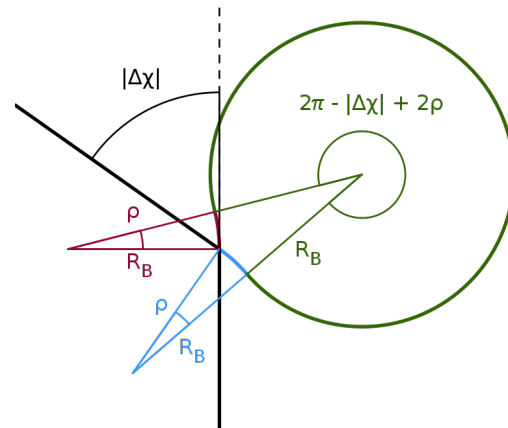


BILD 7. Dubinspfad als kürzeste Verbindung bei gegebenem Radius R_B

Der Radius und damit auch die Strecke ist proportional zum Quadrat der Fluggeschwindigkeit, sodass die für den Dubinspfad benötigte Zeit direkt proportional zur Fluggeschwindigkeit ist. Entsprechend wird diese Zeit umso kleiner, je kleiner die Fluggeschwindigkeit gewählt wird. Allerdings muss das Fluggerät bereits bei S_i auf die Kurvengeschwindigkeit verzögert haben. Ebenso kann auch erst nach Verlassen des dritten Kreisabschnitts wieder auf die Reisegeschwindigkeit beschleunigt werden. Daher erhöht sich die für die Geradensegmente benötigte Zeit umso mehr, je niedriger die Kurvengeschwindigkeit wird. Die insgesamt für das Manöver zusätzlich benötigte Zeit beträgt daher

$$(11) \quad \Delta t = \lambda \frac{V_{Kurve}}{A_{lat}} + \frac{(V_{Ziel} - V_{Kurve})^2}{V_{Ziel} A_{lon}}$$

und erreicht ihr Minimum für

$$(12) \quad \frac{V_{Kurve}}{V_{Ziel}} = 1 - \frac{\lambda A_{lon}}{2 A_{lat}}$$

4.3. Variante C: Außenkurve

Der Dubinspfad stellt zwar immer den Pfad mit der kürzesten Wegstrecke dar, allerdings muss im vorliegenden Fall das komplette Manöver mit der geringen Kurvengeschwindigkeit geflogen werden, sodass es nicht das schnellste Manöver ist. Zudem besteht das Manöver aus drei unmittelbar aufeinander folgenden Kreissegmenten mit jeweils wechselnder Drehrichtung, wodurch das Fluggerät an den Übergangsstellen sprunghaft den Hängewinkel vom einen zum anderen Extremum ändern müsste.

Das im Folgenden als Außenkurve bezeichnete Manöver umgeht dieses Problem, indem gemäß Bild 8 die beiden

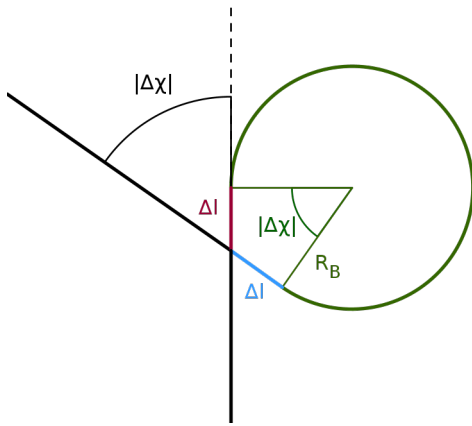


BILD 8. Außenkurvenmanöver mit verlängerten Geradensegmenten

Geradensegmente mit einem einzigen Kreissegment verbunden werden. Damit dieses tangential an die beiden Geraden anschließt, werden die Geradensegmente über den Schnittpunkt hinaus verlängert. Obwohl die Außenkurve dadurch insgesamt eine längere Strecke als der Dubinspfad aufweist, ist die benötigte Zeit teilweise kürzer, da entlang der Geradensegmente länger mit der hohen Zielgeschwindigkeit geflogen werden kann. Lediglich das Kreissegment, das im Gegensatz zum Dubinspfad immer kürzer als ein Vollkreis ist, wird mit der geringen Kurvengeschwindigkeit durchflogen.

Der im Kreissegment überstrichene Winkel beträgt bei der Außenkurvenvariante $2\pi - |\Delta\chi|$. Damit der Kreis tangential an beide Geradensegmente anschließt, müssen diese jeweils um

$$(13) \quad \Delta l = \tan\left(\frac{|\Delta\chi|}{2}\right) \frac{V_{\text{Kurve}}^2}{A_{\text{lat}}}$$

verlängert werden. Damit ergibt sich die für dieses Manöver zusätzlich benötigte Zeit zu

$$(14) \quad \Delta t = (2\pi - |\Delta\chi|) \frac{V_{\text{Kurve}}}{A_{\text{lat}}} + 2 \frac{\Delta l}{V_{\text{Ziel}}} + \frac{(V_{\text{Ziel}} - V_{\text{Kurve}})^2}{V_{\text{Ziel}} A_{\text{lon}}}$$

Dabei gehen die zusätzlichen Längen Δl mit V_{Ziel} ein, da sich durch die Verlängerung der Geradensegmente die Startpunkte der Ent- und Beschleunigungsabschnitte ebenfalls um Δl verschieben. Für (14) ergibt sich für die optimale Kurvengeschwindigkeit

$$(15) \quad \frac{V_{\text{Kurve}}}{V_{\text{Ziel}}} = \left(1 - \frac{2\pi - |\Delta\chi| + 4 \tan\left(\frac{|\Delta\chi|}{2}\right)}{2 \frac{A_{\text{lat}}}{A_{\text{lon}}} + 4 \tan\left(\frac{|\Delta\chi|}{2}\right)}\right)$$

In Bild 9 ist der Verlauf der optimalen Kurvengeschwindigkeit in Abhängigkeit des Winkels der zu realisierenden Richtungsänderung aufgetragen. Für die Außenkurve fällt die Kurvengeschwindigkeit zunehmenden steiler bis auf 0 m/s ab, da bei großen Winkeln der Tangens in (13) dazu führt, dass Δl der dominierende Faktor in (14) wird. Um einen Übergang in den Transitionsbereich zu verhindern, wird im Folgenden die untere Grenze der Kurvengeschwindigkeit auf 20 m/s gesetzt. Dadurch ver-

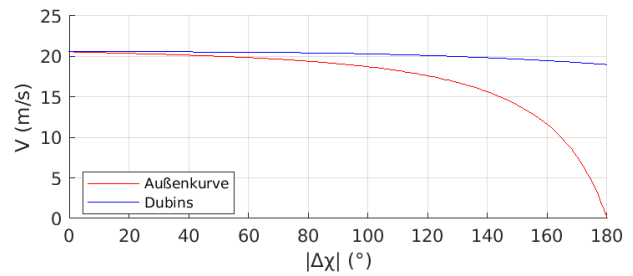


BILD 9. Optimale Kurvengeschwindigkeit abhängig vom Betrag der zu realisierenden Richtungsänderung

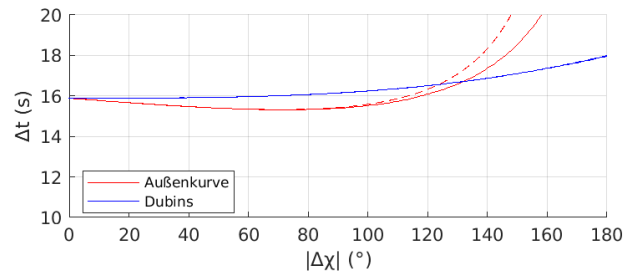


BILD 10. Zusätzliche Flugzeit abhängig vom Betrag der zu realisierenden Richtungsänderung; gestrichelt für Begrenzung auf mindestens 20 m/s

längert sich die benötigte Zeit des Außenkurvenmanövers entsprechend, allerdings ist in Bild 10 ersichtlich, dass der Unterschied für Richtungsänderungen von weniger als 120° bei unter einer halben Sekunde liegt.

Für Richtungsänderungen über 120° wird der Dubinspfad schneller durchflogen als die Außenkurve. Auch beim Dubinsmanöver nimmt die optimale Kurvengeschwindigkeit mit steigendem Winkel ab, allerdings deutlich schwächer, sodass bei 180° die optimale Geschwindigkeit noch bei 19 m/s liegt. Die Begrenzung auf 20 m/s führt dabei zu einem vernachlässigbaren Unterschied der Flugzeit von 0,03 s.

5. EVALUIERUNG

Im Folgenden wird das in diesem Beitrag vorgestellte Verfahren anhand zweier verschiedener Beispiele evaluiert. Das erste Beispiel besteht aus einer Folge von innerstädtischen Straßenabschnitten, die sich durch teilweise starke Richtungswechsel in geringem Abstand auszeichnet. Für das zweite Beispiel soll im Kontrast dazu dem Verlauf einer Landstraße gefolgt werden, bei dem längere Geraden ebenso wie Kurven mit großen Radien vorkommen. Die im Folgenden angegebenen Berechnungszeiten beziehen sich jeweils auf das Mittel aus 1000 Durchläufen auf einem Intel-Prozessor des Modells i7-4710MQ mit 2,5 GHz Taktfrequenz.

5.1. Innenstadt

Für das Innenstadtszenario soll die in Teilbild 11a abgebildete Menge mit 193 Punkten als Eingabe dienen, wobei sich der Startpunkt unten links befindet. Hierbei wurden absichtlich starke Richtungswechsel in den Pfad eingebaut, um die Auswirkungen ungünstiger Vorgaben auf die Beobachtungs- und Flugbahn zu untersuchen. In der

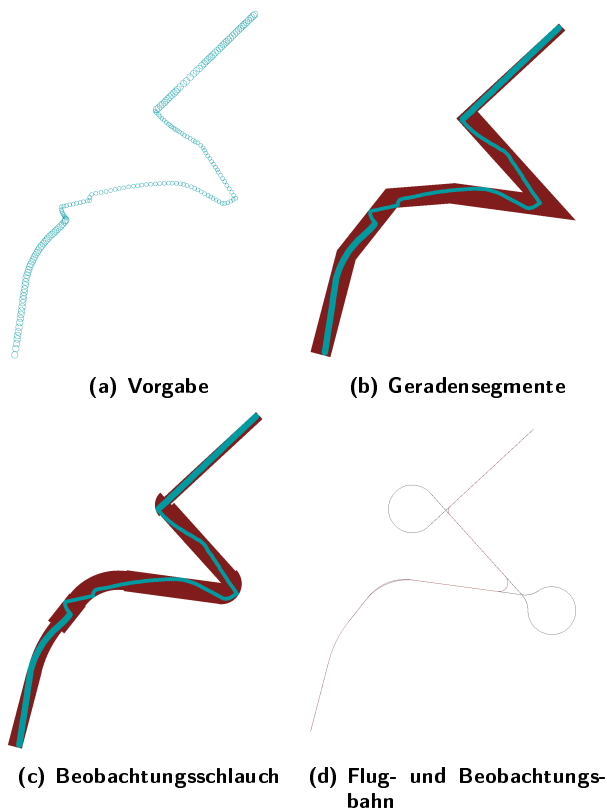


BILD 11. Ergebnisse der verschiedenen Verfahrensschritte für ein Innenstadtszenario

realen Anwendung hingegen ist es typischerweise Aufgabe des vorgelagerten Missionsplaners, zu einem vorgegebenen abzubildenden Gebiet die darin liegenden Straßenabschnitte so zu sortieren, dass möglichst wenige spitze Übergänge entstehen.

Die Ergebnisse der verschiedenen Stufen des Verfahrens sind in den restlichen Teilbildern von Bild 11 abgebildet. Die Berechnung der Geradensegmente dauert 0,95 ms, die darauf folgende Bestimmung der Kreissegmente zusätzliche 0,85 ms und die Flugbahnplanung schließlich 0,13 ms.

Das zweite Teilbild zeigt die nur aus Geradensegmenten bestehende Beobachtungsbahn. Dabei fällt direkt bei Betrachtung des ersten Geradensegments auf, dass dieses gegenüber der abzubildenden Straße verdreht ist. Diese Verdrehung entsteht, da bei der Bestimmung einer Beobachtungsgeraden nach Abschnitt 3.1 stets versucht wird, so viele Punkte wie möglich abzudecken.

Durch eine Variation des Verfahrens könnte die iterative Hinzunahme weiterer Punkte auch dann schon beendet werden, wenn die Richtung einer berechneten Geraden zu stark von derjenigen des vorherigen Iterationsschritts abweicht. Im vorliegenden Fall würde dadurch die erste Beobachtungsgerade den Verlauf der ersten 20 Punkte nahezu exakt abbilden. Dafür würden allerdings auch für kleine Ausbuchtungen wie die Spitze in der zweiten Beobachtungsgeraden separate Geradensegmente bestimmt werden, was zu deutlich mehr Richtungswechseln führt. Durch das in diesem Beitrag präsentierte Verfahren können hingegen diese Straßenabschnitte mit nahezu rechtwinkligen Richtungswechseln durch eine einzige Beob-

achtungsgerade abgedeckt werden. Auch die drei folgenden Geradensegmente decken jeweils mehrere Straßenabschnitte mit klar erkennbar unterschiedlichen Richtungen ab.

Das dritte Bild zeigt die durch das Einfügen von Kreissegmenten geglättete finale Beobachtungsbahn. Das zweite Kreissegment bildet dabei direkt einen Übergang vom zweiten zum vierten Geradensegment, sodass das dritte Geradensegment komplett vom Kreissegment ersetzt wird.

Im vierten Bild schließlich ist die Flugbahn zusammen mit der Mittellinie der Beobachtungsbahn dargestellt. Bei der ersten Kurve liegt schon der Radius der Beobachtungsbahn mit 180 m deutlich oberhalb der 92 m, die den minimal zulässigen Radius für die Maximalfluggeschwindigkeit von 30 m/s darstellen, sodass dieses Kreissegment identisch für die Flugbahn übernommen wird. Die zweite Kurve besitzt in der Beobachtungsbahn einen Radius von 80 m, sodass das Fluggerät auf 28 m/s verzögern müsste. Unter Berücksichtigung der maximal zulässigen seitlichen Abweichung von 5 m dürfte der Radius der Flugbahnkurve aber auf 114 m vergrößert werden, was wiederum größer als die bereits erwähnten 92 m ist. Entsprechend der Optimierungskriterien – möglichst geringe seitliche Abweichung bei kürzest möglicher Flugzeit – wird der Radius der Flugbahn daher auf 92 m gesetzt.

Die folgenden beiden Kurven sind mit 15,1 bzw. 9,6 m zu eng, um in normaler Richtung durchfliegen zu werden. Auch die seitliche Verschiebung der Flugbahn führt aufgrund der großen Winkeländerungen nur zu maximal möglichen Radien von 17,8 bzw. 22 m, sodass die Geschwindigkeit jeweils auf unter 15 m/s und damit deutlich in den Transitionsbereich hinein verringert werden müsste. Aus diesem Grund wird für die vorletzte Kurve das Dubins- und für die letzte Kurve das Außenkurvenmanöver geplant. Diese Auswahl entspricht den Überlegungen zu Bild 10, da sich der Bahnwinkel bei der vorletzten Kurve um 140° und bei der letzten Kurve um 90° ändert.

Durch die Manöver verlängert sich die Flugzeit um 33 Sekunden gegenüber der hypothetischen Dauer von 29 Sekunden, die sich bei konstanter Geschwindigkeit von 30 m/s für die Beobachtungsbahn ergibt. In dem gewählten Beispiel führen diese Manöver damit zu einer signifikanten Erhöhung der Flugzeit, wobei berücksichtigt werden muss, dass der vorgegebene Straßenverlauf absichtlich starke Richtungsänderungen enthält.

5.2. Landstraße

Als zweites Beispiel soll der in Bild 12a abgebildete Verlauf einer Landstraße betrachtet werden, der durch 343 Punkte mit einer Gesamtdistanz von 4448 Metern vorgegeben wird. Entsprechend der größeren Punktemenge steigt auch die Berechnungszeit an, sodass für die drei Schritte 3,5, 1,4 und 0,3 ms benötigt werden.

Im Gegensatz zum innerstädtischen Beispiel sind die auftretenden Kurvenradien deutlich größer, sodass diesmal jeder Richtungswechsel auch zu mindestens einem Übergang zwischen zwei Beobachtungsgeraden führt. Darüber hinaus werden aufgrund der großen Ausdehnungen sogar bei zwei Kurven jeweils drei Beobachtungsgeraden

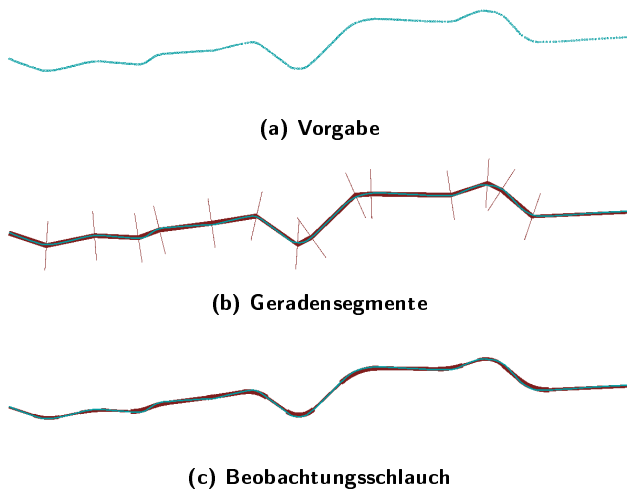


BILD 12. Ergebnisse der verschiedenen Verfahrensschritte für einen Landstraßenabschnitt

für eine vollständige Abdeckung benötigt. In beiden Fällen kann die jeweils mittlere Beobachtungsgerade allerdings vollständig durch ein Kreissegment ersetzt werden, sodass die Beobachtungsbahn den vorgegeben Straßenverlauf relativ genau abbildet. Die größte seitliche Abweichung ergibt sich im Bereich der S-Kurve im nördlichen Bereich, wo sich für die Beobachtungsbahn durch Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bildbreite deutlich geringere Richtungsänderungen ergeben.

Der geringste Radius eines Kreissegments der Beobachtungsbahn beträgt 141 m, sodass der Beobachtungsbahn komplett mit 30 m/s gefolgt werden kann. Entsprechend ist die Flugbahn identisch zur Beobachtungsbahn.

6. ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Beitrag wurde ein Verfahren vorgestellt, mit dem zu einer vorgegebenen Folge von Straßenabschnitten eine Beobachtungs- und Flugbahn geplant wird. In einer anschließenden Evaluierung mit zwei verschiedenen Szenarien wurde die Funktionsfähigkeit des Verfahrens demonstriert.

Die Beobachtungsbahn wird aus Geraden- und Kreissegmenten zusammengesetzt, wobei durch Ausnutzung der vollen Breite des Sichtbereichs die Anzahl der Richtungswechsel gegenüber dem ursprünglichen Verlauf reduziert werden kann. Abhängig von der Krümmung der verbleibenden Richtungswechsel könnte das Fluggerät der Beobachtungsbahn teilweise nur mit starker Reduzierung der Geschwindigkeit folgen. Um eine vorgegebene Mindestgeschwindigkeit einzuhalten, wird eine separate Flugbahn geplant, bei der diese Richtungswechsel durch besondere Manöver realisiert werden.

In der anschließenden Evaluierung konnte gezeigt werden, dass das Verfahren insbesondere bei häufigen Richtungswechseln mehrere kurze Straßenabschnitte durch ein einziges Beobachtungssegment abdecken kann. Durch die vorgestellten Manöver kann auch zu Beobachtungsbahnen mit starken Krümmungen ein Flugpfad erstellt

werden, der die dynamischen Beschränkungen des Fluggeräts einhält.

In diesem Beitrag wurde eine eventuelle Verdeckung der Sicht beispielsweise durch Häuser oder Bäume nicht betrachtet. Hierfür könnte es nötig werden, einen maximalen Abstand der Mittellinie der Beobachtungsbahn zur Straße vorzugeben. Dieser maximale Abstand muss dann auch von der Flugbahn eingehalten werden, was allerdings nur Auswirkungen auf die Planung des Innenkurvenmanövers hat.

7. DANKSAGUNG

Diese Forschungsarbeiten wurden im Rahmen des Projekts „UNICARagil“ durchgeführt (FKZ 16EMO0284K). Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung des Projekts durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).

Kontaktadresse:

voget@fsd.rwth-aachen.de

Literatur

- [1] Timo Wooten, Bastian Lampe, Torben Bötdeker, Lutz Eckstein, Alexandru Kampmann, Bassam Alrifaae, Stefan Kowalewski, Dieter Moormann, Torben Stolte, Inga Jatzkowski, Markus Maurer, Mischa Möstl, Rolf Ernst, Stefan Ackermann, Christian Amersbach, Stefan Leinen, Hermann Winner, Dominik Püllen, Stefan Katzenbeisser, Matthias Becker, Christoph Stiller, Kai Furmans, Klaus Bengler, Frank Diermeyer, Markus Lienkamp, Dan Keilhoff, Hans-Christian Reuss, Michael Buchholz, Klaus Dietmayer, Henning Lategahn, Norbert Siepenkötter, Martin Elbs, Edgar v. Hinüber, Marius Dupuis, und Christian Hecker. UNICARagil - Disruptive Modular Architectures for Agile, Automated Vehicle Concepts. In *27th Aachen Colloquium*, Aachen, Oktober 2018.
- [2] Michael Buchholz, Fabian Gies, Andreas Danzer, Matti Henning, Charlotte Hermann, Manuel Herzog, Markus Horn, Markus Schön, Nils Rexin, Klaus Dietmayer, Carlos Fernandez, Johannes Janosovits, Daniel Kamran, Christian Kinzig, Martin Lauer, Eduardo Molinos, Christoph Stiller, Stefan Ackermann, Tobias Homolla, Hermann Winner, Grischa Gottschalg, Stefan Leinen, Matthias Becker, Johannes Feiler, Simon Hoffmann, Frank Diermeyer, Bastian Lampe, Till Beemelmans, Raphael van Kempen, Timo Wooten, Lutz Eckstein, Nicolai Voget, Dieter Moormann, Inga Jatzkowski, Torben Stolte, Markus Maurer, Jürgen Graf, Edgar v. Hinüber, und Norbert Siepenkötter. Automation of the UNICARagil vehicles. In *29. Aachen Colloquium Sustainable Mobility*, Bd. 2, 1531–1560, Aachen, Oktober 2020. DOI: [10.18725/OPARU-34024](https://doi.org/10.18725/OPARU-34024).
- [3] Bastian Lampe, Timo Wooten, und Lutz Eckstein. Collective Driving - Cloud Services for Automated Ve-

hicles in UNICARagil. In *28th Aachen Colloquium*, Aachen, Oktober 2019.

- [4] Marten Schütt. *Flugzustandsregler für Kippflügel-Fluggeräte mit hohen Flugleistungen*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 2019. [DOI: 10.18154/RWTH-2019-06783](https://doi.org/10.18154/RWTH-2019-06783).
- [5] Johanna Holsten, Philipp Hartmann, Marten Schütt, und Dieter Moormann. DHL Paketkopter 3.0 – Automatische unbemannte Flüge außerhalb der Sichtweite zwischen zwei Packstationen mit einem Tiltwing-Fluggerät. Deutscher Luft- und Raumfahrt Kongress 2016, Braunschweig, September 2016.
- [6] L. E. Dubins. On curves of minimal length with a constraint on average curvature, and with prescribed initial and terminal positions and tangents. *American Journal of Mathematics*, 79(3):497–516, 1957.