

# LASER-ODOMETRIE FÜR AUTONOME MULTICOPTER

CES-Seminar  
von  
B. Sc. Jan Schummers  
Matrikelnummer 287302

Studienrichtung: Computational Engineering Science  
Nummer: S1743  
Betreuer: Dipl.-Ing. Björn Schäfer

April 2014

---

---

# Inhaltsverzeichnis

---

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                           | <b>3</b>  |
| 1.1      | Motivation . . . . .                        | 3         |
| 1.2      | Herausforderungen . . . . .                 | 4         |
| 1.3      | „Pelican“ Quadrocopter . . . . .            | 4         |
| <b>2</b> | <b>Navigationssensorik</b>                  | <b>5</b>  |
| 2.1      | Positionskorrektur mit GNSS . . . . .       | 6         |
| 2.2      | Laser-basierte Odometrieschätzung . . . . . | 7         |
| <b>3</b> | <b>Autonomer Flug am Objekt</b>             | <b>10</b> |
| <b>4</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>         | <b>12</b> |

---

# Einleitung

---

Diese Arbeit wurde im Rahmen des CES-Seminars an der RWTH Aachen University angefertigt. Zur Bewertung der Anwendbarkeit von verschiedenen Navigationssensoren bei der autonomen Inspektion von Windenergieanlagen mit Multicoptern werden verschiedene Forschungsberichte [1, 3, 4, 5, 8] herangezogen, die einen Überblick über den Stand der Technik geben und notwendige Forschungsschwerpunkte für zukünftige Arbeiten aufzeigen.

## 1.1 Motivation

Als Multicopter oder allgemein „Unmanned Aerial Vehicles“ (UAV) werden unbemannte Luftfahrzeuge bezeichnet, die sich mit paarweise angeordneten Rotoren frei im Raum bewegen können. Die Rotoren drehen im Normalfall paarweise rechts und paarweise links herum und ermöglichen über die individuelle Regelung der Rotordrehzahlen Vortrieb (Nicken), Gieren und Rollen. Die Flexibilität in der Bewegung machen UAVs interessant für viele Anwendungsbereiche. Eingesetzt werden sie zumeist bei der Aufklärung und Kartographie im militärischen und zivilen Bereich. Zunehmend richtet sich die Forschung auf autonom fliegende UAVs, die nicht durch

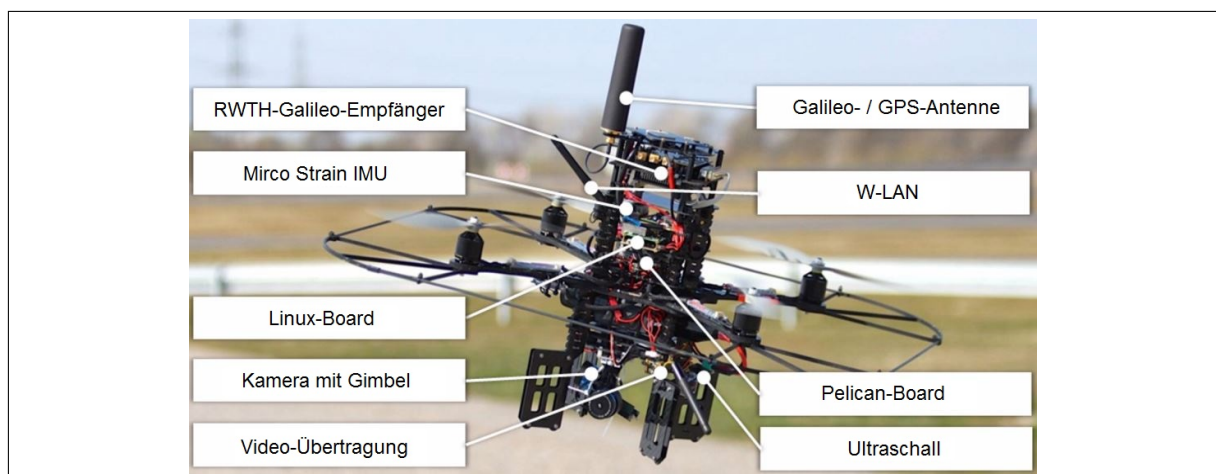


Abbildung 1.1: Quadrocopter am Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen

einen Piloten am Boden gesteuert werden, sondern eigenständig Aufgaben ausführen können. Speziell im Bereich der Befliegung von schwer zugänglichen Gebieten steckt noch viel Potenzial zur Automatisierung. Ziel ist es, gefährliche und teure Helikoptereinsätze vermeiden zu können.

Multicopter bieten hier eine schnelle Dynamik, sind äußerst kostengünstig und werden in naher Zukunft in diesen Bereichen stärker zum Einsatz kommen [9].

Aktuell werden am Institut für Regelungstechnik (IRT) der *RWTH Aachen University* Methoden zur autonomen Inspektion von Gebäuden und technischen Anlagen untersucht. Objekte wie Windenergieanlagen - kurz WEAs - sind ein gutes Beispiel für schwer zugängliche Anlagen, bei denen Inspektion und Erkennung von Schäden hohe Kosten verursachen. UAVs könnten autonom diese Anlagen abfliegen und dabei Fehlverhalten und Schäden kostengünstig sichtbar machen.

## 1.2 Herausforderungen

Die autonome Befliegung von hohen Bauten stellt gleich mehrere technische Anforderungen an die UAVs. Eine schnelle, dynamische Regelung des UAVs muss vorausgesetzt werden, um Objekte in großen Höhen auch bei starkem Wind inspizieren zu können. Ein Extrembeispiel stellen Windenergieanlagen im laufenden Betrieb dar. Der Multicopter darf dabei seine Trajektorie so wenig wie möglich verlassen, um Schäden am Bauwerk zuverlässig zu erkennen. Auch kleine Mängel am Objekt müssen erkannt werden, so dass die installierte Kamera ausreichend hochauflösend sein muss. Sowohl bei der Auswahl der Sensoren, als auch bei der Auswahl der Kamera muss die beschränkte Nutzlast der Multicopter beachtet werden. Der Quadrocopter am IRT beispielsweise kann mit einer Nutzlast von 650 g noch sicher fliegen. Hier muss stets ein Kompromiss zwischen Gewicht und Sensorleistung gefunden werden. Eine reduzierte Kameraauflösung bedeutet zwangsweise eine Verringerung des Abstands zum zu inspizierenden Objekt, um alle Schäden erkennen zu können.

Damit der richtige Abstand zum Objekt und die richtige Trajektorie jederzeit eingehalten wird, muss der Multicopter seine eigene Position und Geschwindigkeit kennen. Anders als Vehikel auf dem Boden kann ein Multicopter nicht in der Luft stehen bleiben und warten, bis die Odometriedaten wieder exakt genug sind. Er muss zu jedem Zeitpunkt seine Position und Lage regeln können, um nicht fälschlicherweise Geschwindigkeit aufzunehmen oder falsche Bewegungen auszuführen. Diese Aufgabe stellt definitiv die größte Herausforderung dar.

## 1.3 „Pelican“ Quadrocopter

In diesem Abschnitt soll kurz der Quadrocopter beschrieben werden, der am Institut für Regelungstechnik als Forschungsobjekt genutzt wird und auch in dieser Arbeit immer wieder als Referenz gedient hat. Die Basis des in Abbildung 1.1 dargestellten Systems bildet der Quadrocopter der Firma Ascending Technologies GmbH und wird unter dem Namen „Pelican“ vertrieben. Ausgestattet mit GPS- und Galileoempfängern kann der Quadrocopter GNSS-Daten zur Positionsbestimmung verwenden und in speziellen Testgebieten bereits die Technik des europäischen Satellitennavigationssystems „Galileo“ nutzen [2]. Zudem kann eine Verbindung über W-LAN zur Daten- und Videoübertragung zum Quadrocopter hergestellt werden.

Das Kernelement bildet das Board „AscTec Autopilot“ (Pelican-Board), auf dem die Flugregelung und alle benötigten Beschleunigungs- und Drehratensensoren sitzen. Im Folgenden wird diese Einheit als Inertial Measurement Unit (IMU) bezeichnet, die über Integration der Beschleunigungswerte die Orientierung und Geschwindigkeit ermittelt. Aus Vergleichs- und Redundanzgründen befindet sich eine weitere IMU der Firma MircoStrain oberhalb des Pelican-Boards. Zur Bild- und Videoaufnahme ist eine Kamera auf Höhe der Landefüße montiert, die aufgrund der ständig wechselnden Fluglage durch ein Gimbal stabilisiert wird. Als weiterer Sensor wird in Kürze ein Laserscanner montiert.

## Navigationssensorik

Die Auswahl der richtigen Sensoren ist entscheidend dafür, ob der Multicopter eine gestellte Aufgabe erfüllen kann. Im Fall der autonomen Inspektion von Windkraftanlagen werden verschiedene Sensoren zur Positions- und Abstandsbestimmung benötigt. Kein Sensor alleine kann den ganzen benötigten Leistungsumfang bieten, sondern muss immer mit anderen Sensoren zusammenarbeiten. Die Vereinigung von Messdaten mehrerer Sensoren zur Verbesserung der Ergebnisse wird Sensorfusion genannt. Die Schwierigkeit dabei ist, die unterschiedlich komplexen und verschieden schnellen Sensoren so zu fusionieren, dass anschließend zuverlässig Odometriedaten zur Steuerung des Multicopters zur Verfügung stehen.

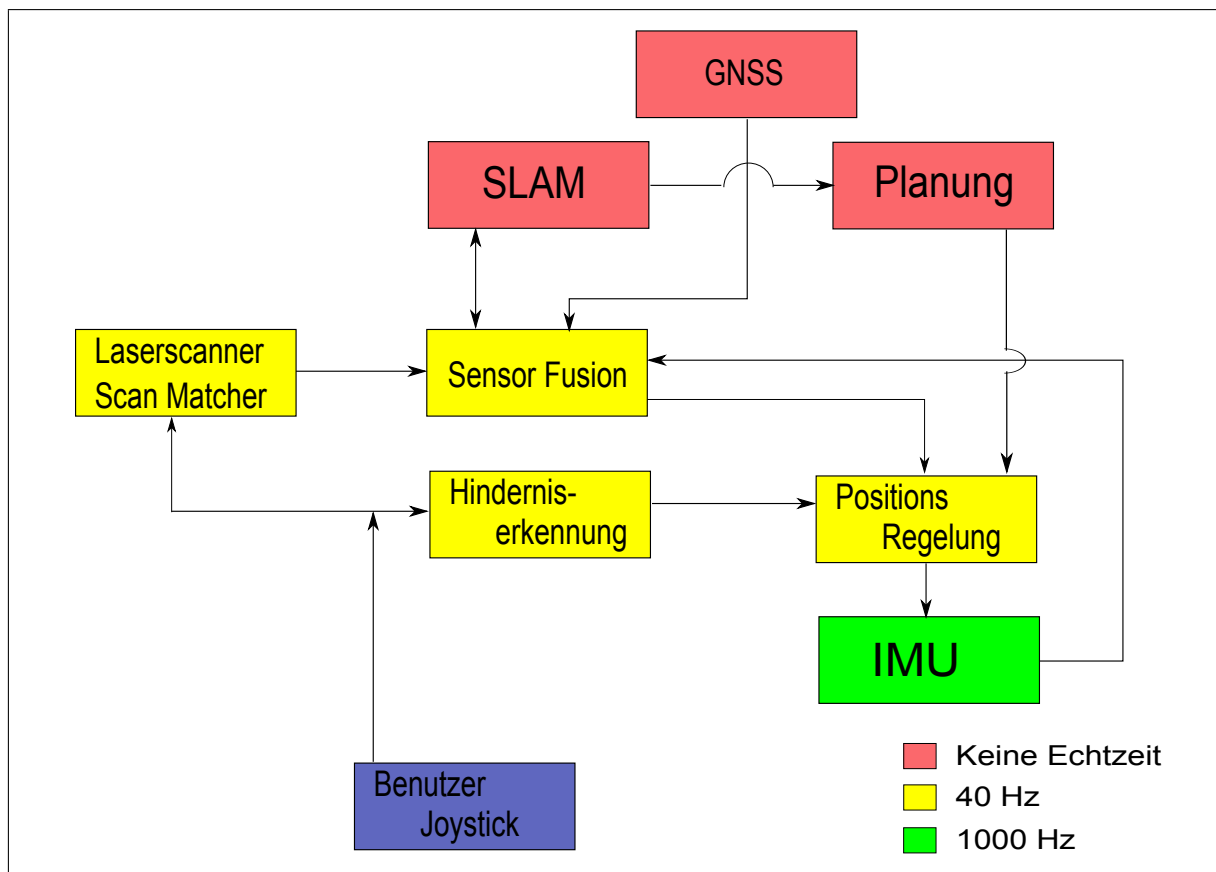


Abbildung 2.1: Vereinfachtes Sensorschema zur autonomen Inspektion mit Multicoptern

Abbildung 2.1 zeigt ein hierarchisch aufgebautes Sensorschema nach dem Vorbild aus [4], wie es für die autonome Inspektion im Multicopter zum Einsatz kommen soll. Farblich unterschieden wird zwischen den Taktzeiten, mit denen die Sensoren und Algorithmen Daten zur Verfügung stellen können. Die „Inertial Measurement Unit“ ist der Hauptsensor in fast jedem autonomen Vehikel. Mit einem Takt von ca. 1000 Hz misst die IMU Beschleunigungen und Drehraten in allen 6 Freiheitsgraden. Durch Integration der Beschleunigungswerte kann auf die ungefähre Geschwindigkeit und Position des Multicopters geschlossen werden. Eine solche Positionsschätzung ist jedoch ungenau und driftet kontinuierlich von den wahren Werten ab. Zur stetigen Korrektur der Positionsschätzungen, sowie zur Ermittlung der Integrationskonstanten werden demnach weitere Sensoren benötigt.

Der Laser-Scanner und die zugehörigen Algorithmen zur Positions- und Geschwindigkeitsschätzung liegen vergleichsweise im deutlich langsameren Bereich von 40 Hz. In dieser Ebene, hier gelb dargestellt, findet die Sensorfusion statt. Die Korrekturdaten jedes Sensors werden genutzt, um die Odometrie so genau wie möglich ermitteln zu können.

Die in rot dargestellte Ebene umfasst alle Sensoren und Algorithmen, die keine Echtzeitanforderung erfüllen können. Hierzu zählt u.a. der GPS-Empfänger, der beispielsweise bei gegebener Signalabschattung keine aktuellen Positionsdaten zur Verfügung stellen kann. Die Anforderung, Messdaten in immer gleichen Zeitabständen zur Verfügung zu stellen, kann von diesen Sensoren nicht sichergestellt werden.

## 2.1 Positionskorrektur mit GNSS

Zur Ermittlung absoluter Positionsdaten in Außenbereichen bietet sich die Nutzung von externen Positionssystemen wie GPS oder Galileo an. Wie zuvor beschrieben, ist ein regelmäßiger Erhalt von Positionsdaten bei einem GNSS-basierten System nicht garantiert. Im Außenbereich ist GNSS dennoch die einfachste Möglichkeit zur Bestimmung der absoluten Position und damit der Integrationskonstanten, die bei der Bestimmung von Position und Geschwindigkeit durch den Inertialsensor entstehen. Standardempfänger bieten eine horizontale Genauigkeit von 5-10 m, während Dual-Frequenzempfänger immerhin 1,1 m erreichen [7]. GNSS-basierte Systeme berechnen die Position des Objekts indirekt über die Signallaufzeit zu den erreichbaren Satelliten. Störungen in verschiedenen Atmosphärenschichten führen zu einer ungewollten Verlängerung der Laufzeiten und damit zu Ungenauigkeiten bei den Positionsdaten. Im Anwendungsfall der vertikalen Inspektion von Windenergieanlagen muss der Multicopter seinen Abstand zum Objekt einhalten können. Genauigkeiten im Bereich von 1-10 m sind dabei nicht ausreichend.

Tabelle 2.1: Genauigkeiten relevanter GNSS-Systeme [7]

| <b>Modus</b>     | <b>Horizontal</b>    | <b>Vertikal</b>      |
|------------------|----------------------|----------------------|
| Einfrequenz GPS  | 1,3 m                | 1,9 m                |
| Zweifrequenz GPS | 0,6 m                | 0,8 m                |
| DGPS             | 0,5 m                | 0,9 m                |
| Galileo          | ca. 1 m <sup>1</sup> | ca. 1 m <sup>1</sup> |

### DGPS

Ungenauigkeiten bei der Positionsbestimmung bei GNSS lassen sich mittels Differential-GPS (DGPS) kompensieren. Das Prinzip ist in Abbildung 2.2 (b) dargestellt. Mittels einer Referenz-

<sup>1</sup>Noch keine exakten Daten verfügbar

station (siehe 2.2 (a)) lässt sich die Zeitdifferenz zwischen den theoretischen Signallaufzeiten *Distanz/Lichtgeschwindigkeit* und den gestörten Werten berechnen. Die Referenzstation vergleicht die eigene exakt bekannte Position mit den empfangenen GNSS-Daten und errechnet daraus die Korrekturwerte, die dem Multicopter über eine mobile Datenverbindungen zur Verfügung gestellt werden können. Die Güte der Korrekturwerte nimmt mit der Entfernung zur Referenzstation ab. Erreicht werden horizontale Genauigkeiten von ca. 50 cm, während die vertikale Genauigkeit im Schnitt nur halb so gut ist [7]. Tabelle 2.1 gibt eine Übersicht über die Genauigkeiten verschiedener GNSS-Systeme.

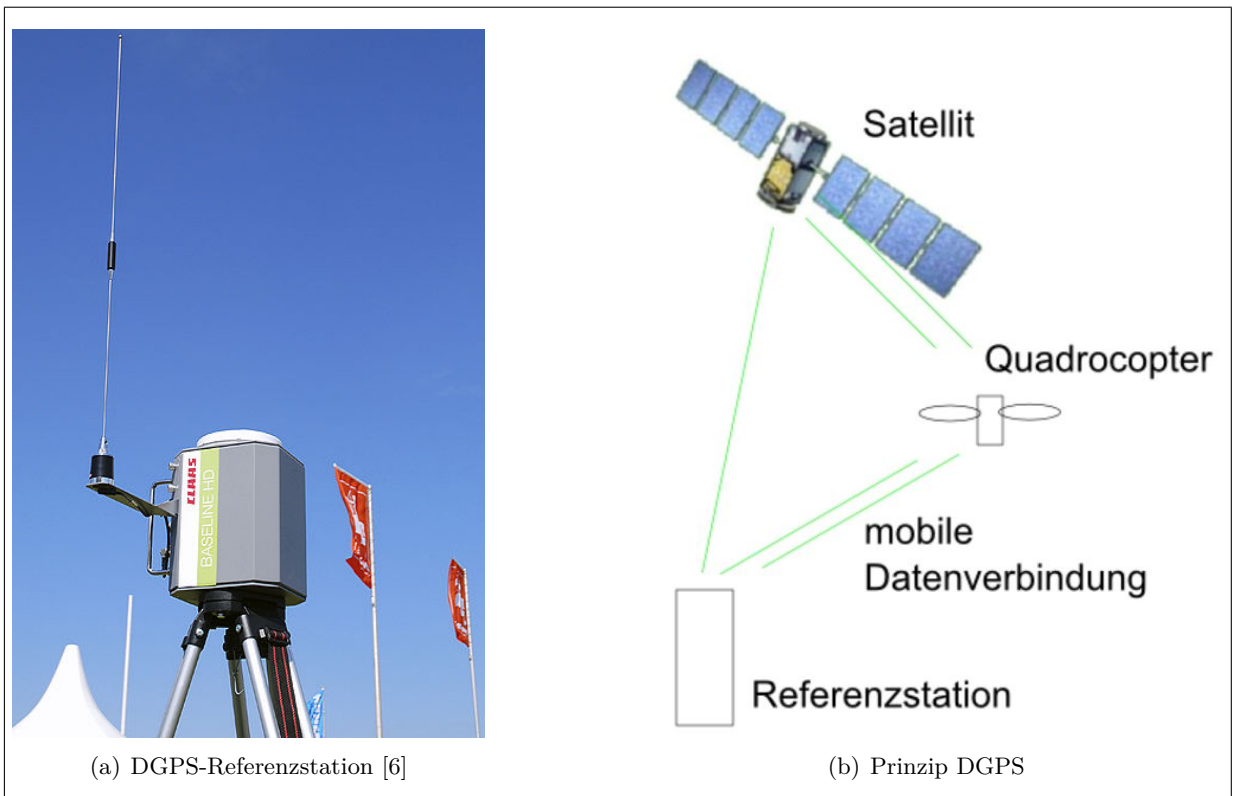


Abbildung 2.2: Referenzstationen verbessern die Genauigkeit von GNSS-basierten Systemen

## 2.2 Laser-basierte Odometrieschätzung

Ein Laserscanner tastet seine Umgebung mit Laserstrahlen ab, um ein Bild der Objekte in Reichweite zu erhalten. Die Informationen können von dem autonomen Vehikel aufbereitet und zur Kartierung und Orientierung benutzt werden. Die Anwendungsmöglichkeiten sind vielfältig und reichen von schnellen Scan-Matching-Verfahren bis hin zu komplexen SLAM-Algorithmen, die nicht zwangsläufig echtzeitfähig sind. Das Thema SLAM wird im Abschnitt 3 aufgegriffen. In den Forschungsarbeiten [1] und [3] wird der Laserscanner als Sensor zur Bestimmung der eigenen Position im Raum genutzt, indem der Multicopter eine Karte seiner Umgebung erstellt und sich selbst in ihr ortet. Dies wird nötig, wenn kein GNSS zur Verfügung steht, wie es beispielsweise in Innenräumen der Fall ist. Für den Anwendungsfall der WEA-Inspektion gilt diese Einschränkung nicht. Hier soll der Laserscanner zunächst nicht für die Schätzung der Position auf seiner Karte, sondern für die Orientierung am Objekt und zur Korrektur der Odometrieschätzungen des Inertialsensors zuständig sein. Aus Geschwindigkeitsgründen kommt ein 2D-Laserscanner zum Einsatz, der nur Objekte in einer Ebene, meist die Rotorebene des Multicopters erfassen kann.

## Probabilistic Scan-Matching

Anders als bei Bodenfahrzeugen befindet sich der montierte Laserscanner auf einem Multicopter nicht dauerhaft in einer Ebene. Zwei aufeinanderfolgende Scans können durch Gieren oder Rollen des Multicopters gegeneinander verdreht sein, wie in Abbildung 2.3 links durch den grünen und roten Scan dargestellt. Kennt man die Transformation des vorigen Scans zum aktuellen Scan, kann man auf die erfolgte Bewegung des Multicopters schließen. Ein Nicken des Copters wird das Bild nur unwesentlich verändern, jedoch fälschlicherweise auf eine Zunahme der Distanz zum Objekt hinweisen. Die Messung des Abstands muss demnach zwingend durch die IMU korrigiert werden. Gieren, Rollen und die Bewegung in der Ebene lassen sich mit Laserscan-Matching gut erfassen: gesucht wird also eine Transformation  $\Delta$  (blauer Pfeil), die den ersten Laser-Scan (Keyframe) zum Zeitpunkt  $S_{t-1}$  auf den Scan  $S_t$  ausrichtet. Übliche Verfahren wie ICP *iterative*

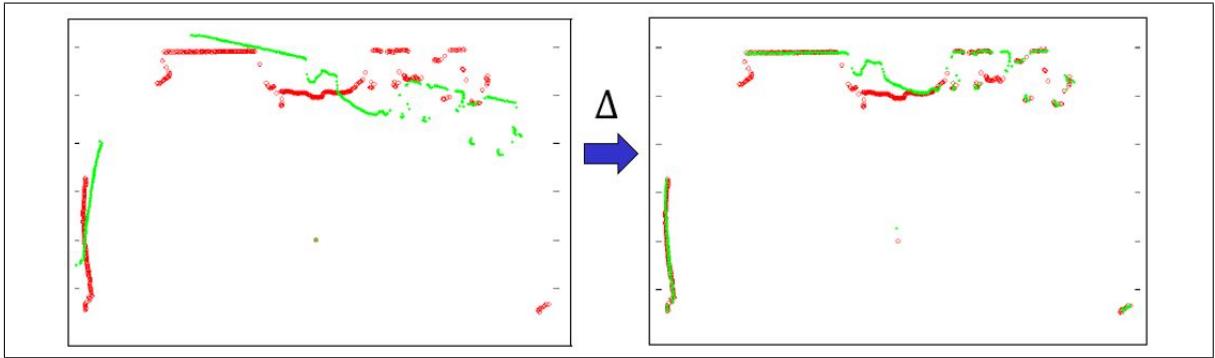


Abbildung 2.3: Gesucht wird eine Transformation zur Ausrichtung zweier konsekutiver Scans [4]

*closest point*, die alle Punkte beider Scans miteinander vergleichen, sind relativ langsam und liefern für den Einsatz bei UAVs zu schlechte Ergebnisse [3, Tabelle 1]. Für den Einsatz in Multicoptern haben sich Probabilistic Scan-Matching-Algorithmen als effizient herausgestellt. Das Verfahren wird in [5, Abschn. III] ausführlich beschrieben: Im ersten Schritt wird ein Gitter über den zuerst erfolgten Scan (den Keyframe) gelegt und eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für jede Zelle berechnet. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein gemessener Punkt  $\mathbf{x}_i$  sich innerhalb der Zelle bewegt, wird als normalverteilt angenommen. Der Mittelwert der Koordinaten aller gemessenen Punkte  $n$  innerhalb einer Zelle wird mit Gleichung (2.1) berechnet

$$\mathbf{m} = \frac{1}{n} \sum_i^n \mathbf{x}_i \quad (2.1)$$

und anschließend die Kovarianzmatrix mit (2.2) gebildet

$$\mathbf{COV} = \frac{1}{n} \sum_i^n (\mathbf{x}_i - \mathbf{m})(\mathbf{x}_i - \mathbf{m})^T. \quad (2.2)$$

Die Normalverteilung  $N(\mathbf{m}, \mathbf{COV})$  innerhalb der Zelle ist anschließend mit der Wahrscheinlichkeitsfunktion  $p(\mathbf{x})$  beschrieben

$$p(\mathbf{x}) \sim e^{\left( \frac{-(\mathbf{x}-\mathbf{m})^T \cdot \mathbf{COV}^{-1} \cdot (\mathbf{x}-\mathbf{m})}{2} \right)} \quad (2.3)$$

Dieses Verfahren wird Normal Distributions Transform (NDT) genannt und liefert eine stückweise stetig differenzierbare Wahrscheinlichkeitsdichte für die gescannte Ebene. Die gesuchte



Transformation  $\Delta$  enthält einen rotatorischen Parameter  $\phi$  und zwei translatorische Parameter  $u_x$  und  $u_y$ , die gefunden werden müssen.

$$\Delta : \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Der nächste ankommende Scan wird mit (2.4) und beliebigen Initialwerten der gesuchten Parameter  $\hat{\mathbf{p}} = (\phi, u_x, u_y)$  auf das Gitter des Keyframes transformiert. Anstelle beliebiger Startwerte können die Parameter mit Odometriedaten der IMU initialisiert werden. Anschließend werden mit den neuen Messpunkten  $\mathbf{x}'$  des zweiten Scans und den Mittelwerten  $\mathbf{m}$  des ersten Scans die Wahrscheinlichkeiten aus den Normalverteilungen analog zu (2.3) berechnet. Die Summe dieser Wahrscheinlichkeiten wird *Score* genannt.

$$score(\hat{\mathbf{p}}) = \sum_i^n e^{\left( \frac{-(\mathbf{x}'_i - \mathbf{m}_i)^T \cdot \mathbf{COV}_i^{-1} \cdot (\mathbf{x}'_i - \mathbf{m}_i)}{2} \right)} \quad (2.5)$$

Nun wird versucht, durch Anpassung der Parameter den *Score* zu maximieren, was in der Praxis mit mehrdimensionalen Newton-Verfahren gemacht wird, hier aber nicht weiter vertieft werden soll [5, Abschn. V]. Die wahrscheinlichste Transformation  $\Delta^*$  ergibt sich aus den Parametern  $\hat{\mathbf{p}}$  mit dem höchsten *Score*.

$$\Delta^* = \Delta(\underset{\hat{\mathbf{p}}}{\operatorname{argmax}}(score(\hat{\mathbf{p}}))) \quad (2.6)$$

Schon wenige Iterationen reichen aus, um eine gute Transformation innerhalb der Echtzeitanforderung zu erhalten [3]. Die erfolgte Positionsschätzung wird mit der Odometrie der anderen Sensoren fusioniert. Ein einfacher Wirkungsplan in Abbildung 2.4 zeigt die Fusion der Beschleunigungswerte der IMU mit den Positionsschätzungen des Laserscan-Matchings. Bewusst wurde auf die Erklärung zur genauen Fusion der Daten mittels erweitertem Kalmanfilter verzichtet, um das Prinzip vereinfacht darstellen zu können. Die eingezeichneten Koordinaten  $x$  und  $y$  bilden die Ebene des 2D-Laserscans.

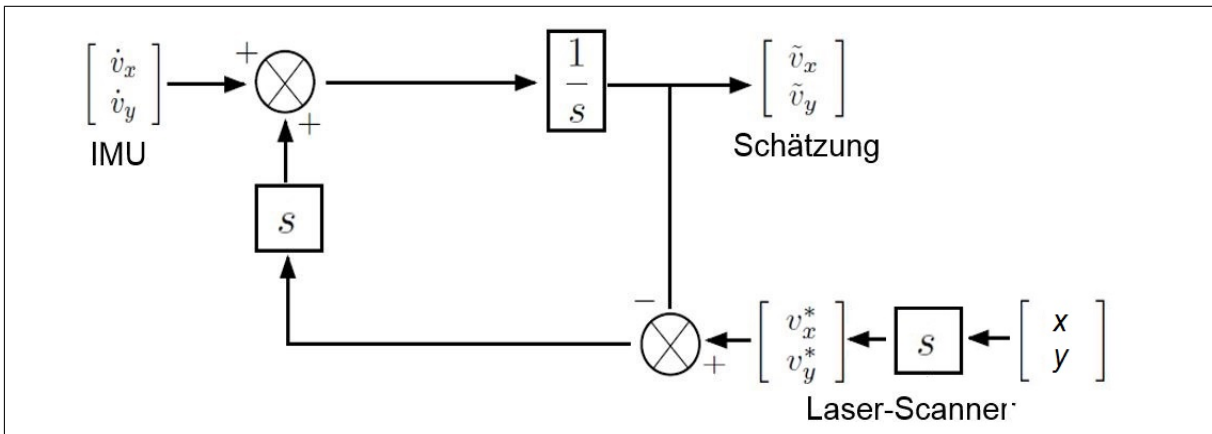


Abbildung 2.4: Schematischer Wirkungsplan zur Sensorfusion von IMU und Laserscanner [8]

Im oberen Pfad werden die Beschleunigungswerte des Inertialsensors integriert, um eine relative Geschwindigkeitsschätzung zu erhalten. Die Positionsschätzung des Laserscanners wird zweifach differenziert und korrigiert die Beschleunigungsschätzungen der IMU über die Rückkopplungsschleife. Differenzierung der Positionswerte führt zu einer Verstärkung der Rundungsfehler. Die benötigte Genauigkeit muss somit durch eine Verfeinerung der erstellten Karte erreicht werden. In [3, Abschn. 3.1.1] wird eine Auflösung von 10 cm als ausreichend angenommen.

---

## Autonomer Flug am Objekt

---

Gespräche mit erfahrenen Piloten zeigen, dass die manuelle Steuerung von Multicoptern bei starkem Wind und in Höhen ab ca. 100 m extrem schwierig ist. Unerlässlich für eine autonome oder zumindest halbautonome Inspektion ist die automatische Ausrichtung des Multicopters am Objekt, hier die Ausrichtung an der Windenergieanlage. Die manuelle Kontrolle über alle 6 Freiheitsgrade ist bei den oft schwierigen Bedingungen zu kritisch. In Paper [8] wird ein Ansatz zur Beschränkung der Freiheitsgrade beschrieben.

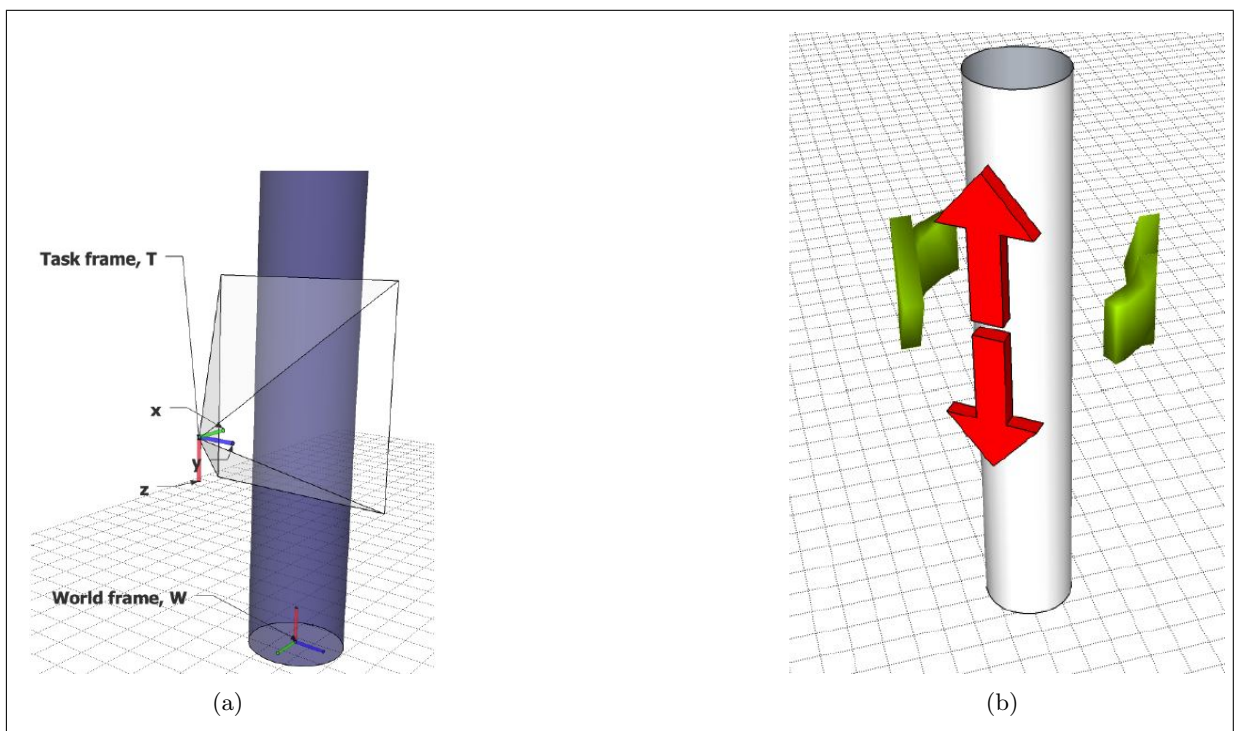


Abbildung 3.1: Beschränkung der Freiheitsgrade beim Flug am Objekt [8]

Abbildung 3.1 (a) zeigt das globale Koordinatensystem  $W$  am Fuß des Mastes. Das lokale Koordinatensystem  $T$  bewegt sich zusammen mit dem Multicopter entlang des Objekts bzw. um den Mast herum. Die Freiheitsgrade sollen wie in Abbildung 3.1 (b) dargestellt, auf die gezeigten zwei Bewegungsrichtungen beschränkt werden. Im halbautonomen Betrieb könnte der Pilot den Multicopter beispielsweise mit einem Joystick entlang dieser zwei Richtungen steuern, ohne den

Abstand oder die Orientierung des UAVs kontrollieren zu müssen. Die autonome Erkennung des Mastes erfolgt ebenfalls mittels Probabilistic Scan-Matching, beschrieben in Kapitel 2.2. Aus einem Laserscan, wie er in Abbildung 3.2 gezeigt ist, wird mittels maximalem *Score* der wahrscheinlichste Kandidat für das zu untersuchende Objekt ermittelt. Die Parameter sind diesmal nicht die Odometriedaten, sondern die gemittelte Position, Breite und Distanz aus vorigen Scans, siehe dazu auch [8, Algorithmus 1].

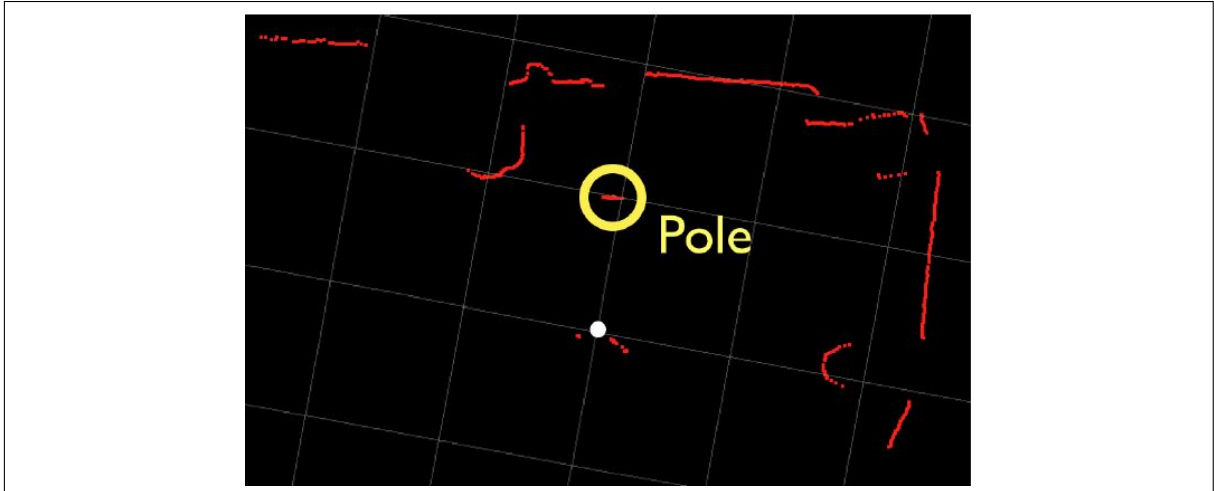


Abbildung 3.2: Die Mast-Erkennung erfolgt ebenfalls über Probabilistic Scan-Matching [8]

## SLAM und Missionsplanung

Im Fall der vollständigen autonomen Navigation muss sichergestellt werden, dass der Multicopter unter Verwendung einer effizienten Trajektorie die Inspektion durchführt. Grundsätzlich sind dabei zwei Szenarien denkbar. In der einfacheren Überlegung wird die Trajektorie manuell vorausgeplant. Die andere Variante ist die autonome Erkundung des Gebiets und Objekts mittels Laserscanner. Das erste Szenario setzt beispielsweise ein CAD-Modell der Windenergieanlage voraus, an der die Trajektorie geplant werden kann. Anschließend ist die Hauptaufgabe der Regelung, diese Trajektorie unter den schwierigen Bedingungen einzuhalten. Wie unkompliziert solche Modelle von Herstellern zu erhalten sind, oder in welcher Genauigkeit diese selbst entworfen werden müssten, ist an dieser Stelle nicht zu beantworten. Sicherlich ist eine Lösung ohne Umwege über Dritte zeit- und kostengünstiger.

Mithilfe der Daten des Laserscanners können zusätzlich zu den schnellen Probabilistic Scan-Matching-Algorithmen komplexere langsamere SLAM-Algorithmen („simultaneously localization and mapping“) eingesetzt werden, die gleichzeitig die Umgebung kartieren und das Vehikel in der erstellten Karte orten können. In Positionen vor Windenergieanlagen ist die Umgebung nahezu offen, so dass die Karte lediglich Informationen über den Abstand zum Objekt und die Höhe durch mögliche Verjüngung der Struktur wiedergeben kann. Die gewonnenen Odometriedaten können, wie in Kapitel 2 beschrieben, mit den anderen Sensoren fusioniert werden. Kurzzeitige Abschattungen des GNSS-Signals könnten so kompensiert werden.

Bei einer autonomen vertikalen Erkundung erstellt die Software intern Zellblöcke, die übereinander angeordnet sind und das Gebiet in erforscht und unerforscht aufteilen [4, Abschn. 5.4]. Durch sukzessives Abfliegen der noch unerforschten Ebenen erhält man das vollständige Bild der Anlage. Anschließend kann eine Trajektorie auf das Bild gelegt und abgeflogen werden.

---

## Zusammenfassung und Ausblick

---

Am Institut für Regelungstechnik der RWTH Aachen University werden zukünftig diverse Projekte zur autonomen Navigation von Multicoptern durchgeführt. Autonome Inspektion von Windenergieanlagen wurde im Rahmen von Kooperationsgesprächen mit Industriepartnern immer wieder als Forschungsschwerpunkt genannt, für den ganz konkret großer Anwendungsbedarf besteht. Die hier ausgewerteten Paper geben einen Einblick in den Stand der Technik, auf den bei der Forschung aufgesetzt werden kann. Es zeigt sich, dass die nötige Technologie für die gestellte Aufgabe existiert, aber die Zusammenführung verschiedener Ansätze und die Umsetzung in die Praxis noch Gegenstand künftiger Forschungsarbeit sein muss.

Komplexe Navigationsaufgaben unter schwierigen Bedingungen setzen schon aus Gründen der Redundanz die Fusion verschiedener Sensorsysteme voraus. Externe Positionssysteme wie GPS oder in Zukunft Galileo bieten die benötigte Genauigkeit, unter Ausnutzung von Verfahren wie DGPS (Kapitel 2.1) und sind für die absolute Positionsbestimmung unverzichtbar. Die Kombination von Inertialsensor und Laserscanner bietet die erforderte Performance, um in Echtzeit gute Positions- und Geschwindigkeitsschätzungen zu erhalten (Kap. 2.2). In den Bereichen SLAM und autonomer Missionsplanung steckt noch viel Potenzial, das mit zunehmend schnellerer und kleinerer Hardware immer besser ausgeschöpft werden kann (Kap. 3).

Ein Großteil der Probleme bei der Automatisierung von Multicoptern kann auf Softwareentwicklungsaufgaben reduziert werden. An dieser Stelle sei auf das offene Framework „Robot Operating System“ *ROS* verwiesen, das eine Sammlung von Bibliotheken und Werkzeugen zur Roboterprogrammierung bereitstellt. In Kombination mit dem Simulator *Gazebo*, konnten verschiedene Sensoren, u.a. der Laserscanner unter Laborbedingungen in Betrieb genommen und mit anderen Sensoren fusioniert werden. Die Möglichkeit die Software am Simulator zu testen und weiterzuentwickeln, spart zeit- und kostenintensive Praxistests, so dass *ROS* sicherlich im Rahmen dieses Projekts und künftiger Anwendungen als Software-Basis am Institut für Regelungstechnik eingesetzt werden wird.

---

# Literaturverzeichnis

---

- [1] ACHELNIK, M. ; BACHRACH, A. ; HE, R. ; PRENTICE, S. ; ROY, N.: Stereo Vision and Laser Odometry for Autonomous Helicopters in GPS-denied Indoor Environments / Technische Universität München, Germany and Massachusetts Institute of Technology, USA. 2013. – Forschungsbericht
- [2] AGIT: *GALILEO above Testgebiete für das europäische Navigationssystem.* <http://www.agit.de/fuer-unternehmen/partner-finden/automotive-rail/galileo-above-testgebiete-fuer-das-europaeische-navigationssystem.html>
- [3] BACHRACH, A. ; HE, R. ; PRENTICE, S. ; ROY, N.: RANGE - Robust Autonomous Navigation in GPS-denied Environments / Massachusetts Institute of Technology, USA. 2011. – Forschungsbericht
- [4] BACHRACH, A. ; HE, R. ; ROY, N.: Autonomous Flight in Unknown Indoor Environments. 2013. – Forschungsbericht
- [5] BIBER, P. ; STRASSER, W.: The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching / University of Tübingen. 2003. – Forschungsbericht
- [6] COMMONS.WIKIMEDIA.ORG/WIKI/USER:BDK: *Mobile DGPS-Referenzstation Baseline HD von Claas für den Einsatz bei satellitengestützten Lenksystemen in der Landwirtschaft.* CC-BY-SA-3.0, 2010
- [7] LEYSSENS, J.: GNSS positioning for UAV Applications / Septentrio, Leuven, Belgium. 2009. – Forschungsbericht
- [8] SA, I. ; CORKE, P.: Vertical Infrastructure Inspection using a Quadcopter and Shared Autonomy Control. 2012. – Forschungsbericht
- [9] THOMAS, P.: *Unbemannte Flugzeuge bis fünf Kilogramm.* [www.faz.net/aktuell/technik-motor/umwelt-technik/drohnen-unbemannte-flugzeuge-bis-fuenf-kilogramm-12711434.html](http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/umwelt-technik/drohnen-unbemannte-flugzeuge-bis-fuenf-kilogramm-12711434.html). Version: 2013