Strukturierte Zusammenfassung der Dissertation

Beitrag zur sensorgestützten Positionsbestimmung und Navigation autonomer Roboter

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Fabian Gierschner

Einleitung und Problemstellung

Ingenieurbauten sind flexible technische Bauwerke, welche extremen dynamischen und statischen Beanspruchungen (Überlasten, Kalt-Warm-Wechsel oder auch Alterserscheinungen, wie Risse oder Korrosion u. v. m.) standhalten müssen. Ein Erhalt der Stand- und Verkehrssicherheit über einen größtmöglichen Zeitraum wird umso bedeutsamer, da diese Bauten sich zum großen Teil in der Infrastruktur befinden (z. B. Industrieanlagen, Freizeitbauwerke oder Brücken). Deshalb ist eine regelmäßige Prüfung von baulichen Anlagen notwendig, da nur so Mängel und Schäden an Bauwerken frühzeitig erkannt und die richtigen Rückschlüsse für Sanierungsmaßnahmen gezogen werden können, bevor kostenintensive Instandhaltungsmaßnahmen oder ein Versagen der Struktur auftreten.

Das Ziel einer bautechnischen Begutachtung ist die Gewährleistung der Sicherheit, Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit entsprechender Konstruktionen. Diese manuelle Prüfungsmethode ist jedoch sehr zeit- und kostenintensiv, da das gesamte Bauwerk einer handnahen Sichtprüfung von sachkundigen und erfahrenen Ingenieuren unterzogen werden muss. Dafür ist der Einsatz von speziellen Hilfsmitteln, zum Beispiel Hubsteigern, Industriekletterern oder auch Spezialgeräten, wie Unterflurbesichtigungsgeräte, notwendig. Die Folge ist eine erhebliche Einschränkung der Bauwerksnutzung während der Inspektion (z. B. Produktion in einer Industriehalle). Deswegen ist es erforderlich neue Verfahren zur automatisierten Zustandserfassung und Bewertung von Bauwerken zu entwickeln, die ohne Nutzungseinschränkungen eine zeitlich und örtlich wesentlich detailliertere Abbildung des Zustandes ermöglichen.

Eine Lösung als wirtschaftliches und effizientes Mittel zur zeitnahen Detektion lokaler Schäden bietet hierbei die drohnenflugbasierte Befundung. Dadurch lässt sich die Effizienz der Inspektion erhöhen, indem qualitativ hochwertige, konsistente und wiederholbare Daten des Gebäudes erfasst und Trends identifiziert werden können. Die Herausforderungen dabei liegen einerseits in der sicheren, sensorbasierten Lokalisierung für die automatisierte Befliegung von industriellen Bauwerken (z. B. Hallen) im Außen- und Innenbereich und andererseits in der automatisierten 3D-Flugplanung mit angepassten Aufnahmeorientierungen auf Basis von Geometriemodellen des Gebäudes.

Zielstellung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Verfahrens zur Durchführung einer automatisierten Bauwerksprüfung. Dafür sollen automatisiert agierende unbemannte Flugobjekte (UAV, engl.: Unmanned Aerial Vehicle) als Basis für das Inspektionssystem genutzt werden, um eine einfache, beschleunigte und regelmäßige Prüfung zu ermöglichen. Der Einsatz von UAV für solche Überwachungs- und Inspektionszwecke benötigt Verfahren zur 3D-Routenplanung entsprechend der

Umgebungsbedingungen sowie ein sensorbasiertes Lokalisierungs- und Positionierungssystem für den Einsatz im Außen- und Innenbereich.

Für die automatisierte Befliegung von industriellen Anlagen und Ingenieurbauwerken muss die Flugplanung, insbesondere für den Innenbereich, entsprechend der räumlichen Begrenzungen (wie z. B. der Hallendecke) dreidimensional erfolgen. Dafür müssen Verfahren zur Identifikation der Inspektionsbereiche mit einer angepassten Routenbestimmung anhand eines geometrischen 3D-Umgebungsmodells entwickelt werden.

Eine weitere Herausforderung besteht in der Navigation des UAV. Während sich diese im Außenbereich anhand globaler satellitenbasierter Positioniersysteme (GNSS) realisieren lässt, kann die Navigation im Innenbereich auf Umgebungswissen (2D-Grundrisse, 3D-Modelle) in Verbindung mit Sensoren (z. B. Abstandssensoren, Kamerasysteme) erfolgen. Die dafür benötigte Navigationskarte muss aus dem Umgebungswissen abgeleitet werden. Auf Basis dieser Navigationskarte ist es möglich, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem sich die Position des UAV in komplexen Umgebungen bestimmen lässt, wodurch die Befliegung entlang der geplanten Route möglich wird.

Vorgehensweise und Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit wurden die Grundlagen für ein automatisiertes, UAV-basiertes Inspektionssystem zur Prüfung industrieller Bauwerke entwickelt. Der Fokus der Arbeit liegt dabei auf der Anwendung im Innenbereich ohne GNSS-Zugang. Es werden Methoden zur automatisierten Routenplanung anhand von Umgebungsinformationen sowie ein sensorbasiertes Lokalisierungssystem für den Einsatz auf kompakten, für die Inspektion geeigneten UAV-Systemen vorgeschlagen.

Für die sichere Navigation in komplexen Strukturen, wie es beispielsweise industrielle Hallen sind, ist die Kenntnis der Umgebung für die hindernisvermeidende Bewegungsplanung sowie die Orientierung des mobilen Roboters elementar. Eine Umgebungskarte kann anhand unterschiedlicher Datengrundlagen erstellt werden. Da von industriellen Bauwerken selten Konstruktionsmodelle vorhanden sind, wird im ersten Teil dieser Arbeit ein Verfahren zur Bestimmung der Inspektionsroute auf Basis von Vermessungen mittels terrestrischem Laserscanner (TLS) vorgestellt. In der daraus resultierenden 3D-Punktwolke müssen, neben den für die Bewegung des mobilen Roboters geeigneten Gebieten, die für die Inspektion relevanten Bereiche identifiziert werden. Dafür wird eine Methode zur automatisierten Ausrichtung, Segmentierung und Klassifizierung anhand einer gleichmäßigen 3D-Rasterung vorgeschlagen. Die Identifizierung der Inspektionsbereiche erfolgt anhand von Verfahren der Bildverarbeitung, die auf den 3D-Anwendungsfall adaptiert werden. Darauf basierend lässt sich eine Route samt Dokumentationsstrategie für das UAV ableiten. Für die kollisionsfreie Bewegung müssen entsprechende Sicherheitsabstände zwischen dem UAV und Hindernissen in der Umgebung berücksichtigt werden. Dies erfolgt anhand einer auf das mobile System abgestimmten Rastergröße in der Navigationskarte. Neben dieser objektbasierten Karte dient ein höher aufgelöstes, merkmalsbasiertes Umgebungsmodell als Grundlage für die Selbstlokalisierung des mobilen Systems.

Im zweiten Teil der Arbeit wird ein System zur Bestimmung der Position des UAV innerhalb der Umgebungskarte entwickelt. Durch eine Analyse aktueller Lokalisierungsverfahren für den Anwendungsfall der UAV-basierten Inspektion im Innenbereich zeigt sich, dass eine zuverlässige Bestimmung der eigenen Position in komplexen Umgebungen (z. B. industrielle Hallen) nur anhand von

optischen Sensoren möglich ist. Dies kann z. B. mit Hilfe von Kameras oder laserbasierten Abstandssensoren (LiDAR, engl.: Light Detection and Ranging) erfolgen. Eine experimentelle Untersuchung verschiedener Methoden zur Positionsbestimmung auf Basis optischer Sensoren (z. B. visuelle Odometrie, Scan-Matching oder SLAM-Verfahren, engl.: Simultaneous Localization and Mapping) mittels eines eigens entwickelten Prüfverfahrens zeigt die Schwächen bereits verfügbarer Methoden auf. Während kamerabasierte Verfahren aufgrund der vorherrschenden Umgebungsbedingungen (z. B. ungenügende Beleuchtung oder geringe Oberflächenstruktur) keine zuverlässige Positionsbestimmung gewährleisten und nur als Unterstützung sinnvoll einsetzbar sind, ermöglichen Verfahren auf Basis von LiDAR-Sensoren eine sichere und genaue Lageeinschätzung. In übersichtlichen Umgebungen (z. B. Bereiche ohne Sichteinschränkungen) oder für bodenbasierte Roboter sind dabei 2D-Sensoren ausreichend, für die Bewegungen eines UAV mit 6 Freiheitsgraden in komplexen Strukturen werden aber 3D-Sensoren benötigt. Diese sind allerdings aufgrund der vorherrschenden Umgebungsbedingungen bei der Inspektion industrieller Bauwerke sowie der darauf basierenden Anforderungen an das UAV (hinsichtlich der kompakten Größe und der damit einhergehenden Beschränkungen der Traglast) für diesen Anwendungsfall nicht ohne Weiteres einsetzbar. Deswegen wird in der vorliegenden Arbeit ein Lokalisierungsverfahren vorgeschlagen, das auf zwei leichten 2D-LiDAR-Sensoren sowie einer IMU (Inertiale Messeinheit) basiert, die zu einem 3D-Sensor fusioniert werden. Als Grundlage für die Positionsbestimmung dient ein Verfahren zur direkten Abstands- und Orientierungsbestimmung zweier Punktwolken mittels Distanztransformationen (DLL, engl.: Direct LiDAR Localization), das für 3D-Sensoren konzipiert wurde und für den Anwendungsfall sowie das entwickelte Sensorsystem adaptiert wird. Zur Optimierung der Lokalisierung wird die Schätzung der Bewegung als Grundlage für die Lokalisierungsalgorithmen (Odometrie) anhand eines Scan-Matching-Verfahrens genutzt. So wird das entwickelte Sensorsystem auf Basis von 2D-LiDAR-Sensoren einerseits für die Bewegungsschätzung und andererseits für die Lokalisierung innerhalb der merkmalsbasierten Umgebungskarte verwendet. Für den Einsatz in Umgebungen, die die Verknüpfung von Innen- und Außenbereich erfordern, werden das Zusammenspiel von lokalen und globalen Verfahren untersucht sowie konkrete Bedingungen für die Fusion der Sensoren abgeleitet. Eine Methode zur Kalibrierung von 2D-LiDAR-Sensorsystemen rundet das entwickelte Lokalisierungssystem ab.

Für den praktischen Einsatz und zur Erprobung des Verfahrens erfolgt die prototypische Umsetzung des Inspektionssystems. Die Komponentenauswahl basiert auf einer Analyse des Anwendungsfalls sowie der Umgebungsbedingungen. Eine Genauigkeitsuntersuchung des entwickelten Lokalisierungssystems unter anwendungsnahen Umgebungsbedingungen bestätigt die Eignung für den Einsatz bei der UAV-basierten Inspektion industrieller Hallen. Dabei wird das entwickelte Sensorsystem auch mit weiteren 3D-Lokalisierungsverfahren auf Basis von iterativer Punktannäherung (ICP, engl.: Iterative Closest Point) und der adaptiven Monte-Carlo-Lokalisierung (AMCL) verglichen und entsprechend der Eignung für den Anwendungsfall bewertet. Die experimentelle Untersuchung erfolgt in einer industriellen Halle (Abmaße 31 m x 16 m x 12 m) mit einer Versuchsstrecke von insgesamt ca. 70 m je Messreihe. Während die Vergleichssysteme keine ausreichende Genauigkeit gewährleisten können, erreicht das entwickelte System eine für den Anwendungsfall ausreichende Absolutgenauigkeit von 110,5 mm und eine Wiederholgenauigkeit von 134,0 mm (Auswertung angelehnt an die Norm ISO 9283 zur Prüfung von Industrierobotern). Neben den verwendeten Methoden zur Lokalisierung hat auch die Positionsschätzung (Odometrie) als Eingangsgröße für die Berechnung großen Einfluss auf

die erreichbare Genauigkeit, da ohne ausreichende Vorausrichtung Fehllokalisierungen möglich sind. Während die Odometrie anhand einer Kamera entsprechend der Untersuchungen eine präzise, wenn auch nicht langzeitstabile, 3D-Position bietet, kann mit der 2D-LiDAR-Odometrie eine robuste 2D-Position bestimmt werden. Mit der 3D-Odometrie erreichen die Systeme in den Untersuchungen die folgenden gemittelten Genauigkeiten: DLL 136,8 mm, ICP 283,5 mm, AMCL 355,6 mm. Der Einsatz der 2D-Odometrie verbessert bei dem entwickelten System auf Basis des DLL-Algorithmus die mittlere Genauigkeit, reduziert sie aber bei den anderen beiden Verfahren (DLL 111,0 mm, ICP 959,6 mm, AMCL über 1399,2 mm). Die Ungenauigkeiten sind zum Teil auf die fehlende Höhenbestimmung zurückzuführen, die bei den ICP- und AMCL-basierten Verfahren nur unter enormem Rechenaufwand kompensiert werden können. Mit einer Versuchsdauer von über 30 Minuten kann auch die robuste Lokalisierung des Sensorsystems über die für die Inspektion einer Standardhalle benötigte Zeit nachgewiesen werden. Die entwickelten Methoden zur Routenplanung auf Basis von TLS-Messungen und zur ErgebnISRückführung anhand der bekannten Position der mobilen Plattform und damit der Position der Inspektionsaufnahmen sind in einem Software-Demonstrator umgesetzt. Die abschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt die Vorteile des entwickelten Systems gegenüber der derzeit gängigen manuellen Inspektion.

Das entwickelte Inspektionsverfahren vereint die großvolumige dreidimensionale Erfassung der Inspektionsbereiche mit bildgebenden Aufnahmen der maßgeblichen Strukturbereiche, die bisher manuell und handnah geprüft werden. Anhand der automatisierten Befliegung lassen sich die relevanten Bereiche dokumentieren. Durch die bekannte Position des Systems während der bildgestützten Dokumentation des zu inspizierenden Bauwerkes können die Aufnahmen dem 3D-Umgebungsmodell zugeordnet und auch detektierte Schäden dort verortet werden. Auf dieser Basis kann ein bildbasiertes 3D-Modell mit zusätzlichen Metainformationen erstellt werden, das als Grundlage für die visuelle Schadensbegutachtung dient.

Ausblick

Potential besteht aufgrund des modularen Aufbaus des Systems vor allem für den Einsatz bei weiteren Anwendungen. Die entwickelten Methoden zur Routenplanung auf Basis von Umgebungsdaten lassen sich auch alleinstehend für andere UAV und mobile Roboter zu Inspektionszwecken verwenden. Navigationslösungen von UAVs in Innenräumen sind nach wie vor Gegenstand der aktuellen Forschung. Es ist zu erwarten, dass zukünftig diverse Hardwaresysteme am Markt verfügbar sind. Für diese UAV-Systeme ist beispielsweise die Kombination mit der entwickelten Routenplanung in Verbindung mit der Rückführung der Inspektionsergebnisse denkbar. Auch der Einsatz zur Planung anderer Anwendungsfälle, z.B. Brückeninspektionen, Inventur oder Transport ist möglich. Dies gilt ebenso für das Lokalisierungssystem, das unabhängig von der Routenplanung einsetzbar ist. Auch hier können verschiedene UAV oder mobile Roboter mit dem System verknüpft werden, solange eine Schnittstelle, z.B. mittels ROS (engl.: Robot Operating System), zur Positionsübergabe vorhanden ist. Außerdem können das entwickelte Verfahren sowie das Gesamtsystem direkt mit anderer 3D-Sensorik, z. B. 3D-LiDAR-Sensoren, verwendet werden.

Mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren wird zukünftig eine effiziente und einfache Prüfung ermöglicht, die die Entdeckung von Schäden und Mängeln in einem frühen Stadium zulässt und damit maßgeblich zu einem nachhaltigen Bauwerksmanagement beiträgt.