Zusammenfassung der Promotionsschrift

Methoden zur Charakterisierung, Modellierung und automatisierten Auswertung von Zustandsdaten im Kontext der digitalen Bauwerkserhaltung

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von
Jakob Taraben
(interner Doktorand)

Mentor:
Prof. Dr. Guido Morgenthal

Weimar, 30.06.2023

Problemstellung und Zielsetzung

1. Die Lebensdauer eines Bauwerks wird stark von der Instandhaltungsstrategie beeinflusst, welche in Abhängigkeit des Bauwerkstyps bestimmten Kriterien bezüglich Intaktheit und Nutzbarkeit des Bauwerks unterliegt. Die frühzeitige Identifikation von Schädigungen durch regelmäßige Inspektionen ist entscheidend für die effektive und ressourcenschonende Planung entsprechender Instandhaltungsmaßnahmen.

2. Die Anamnese, als Teil einer Zustandserfassung, besteht aus mehreren Prozessschritten, welche einen großen zeitlichen Aufwand bei einem hohen Bedarf an nur begrenzt zur Verfügung stehenden ausgebildeten Fachkräften und spezieller Zugangs- und Aufnahmetechnik für eine hinreichend genaue Datenerfassung erfordern. Gleichzeitig steigt die Menge der zukünftig instandzuhaltenden Bauwerke stetig. Demnach müssen die aktuell überwiegend manuellen Prozesse der Anamnese durch den Einsatz digitaler Daten stärker automatisiert werden.

3. Nicht oder schlecht dokumentierte Informationen einer Bauwerksinspektion bedeuten häufig Informationsverlust und sorgen für einen zusätzlich erhöhten Aufwand bei nachfolgenden Inspektionen. Die Informationen müssen konsistent als digitaler Zwilling modelliert werden, um auch die Automatisierung von Analyseprozessen zu ermöglichen.

4. Die bei einer bildbasierten visuellen Inspektion erzeugten Daten sind in der Regel nicht oder nur manuell mit den entsprechenden Objekten eines modellierten Bauwerksinformationsmodells verknüpft und erlauben daher ohne Weiteres keine Anreicherung der Modellobjekte oder eine bauwerksbezogene Auswertung.

5. Aus der Zustandsaufnahme einer Inspektion muss eine Handlungsempfehlung für Sanierungen und Reparaturen abgeleitet werden. Sichtbare und als kritisch bewertete Anomalien werden priorisiert betrachtet, wodurch der Bedarf einer Maßnahme erst reaktiv nach der Diagnose ausreichend starker Symptome entsteht. Eine zusätzliche Betrachtung der Historie einer Anomalie erfolgt auch aus Mangel an dafür geeigneten Methoden für 3D-Datensätze nicht.

6. Zielstellung dieser Arbeit ist die Entwicklung von Methoden für die robuste Zuordnung von Bilddatensätzen, Punktwolken und darauf basierenden Annotationen einer bildbasierten Inspektion zu modellierten Bauwerksinformationsmodellen, um die automatisierte Anreicherung eines digitalen Zwillings zu erreichen.

7. Ein weiteres Ziel besteht in der Entwicklung eines Ansatzes für die automatisierte Extraktion von Veränderungen zwischen Annotationen mehrerer Aufnahmen unterschiedlicher Zustände. Dieser soll die Berücksichtigung einer Schadensentwicklung in der Zustandsbewertung zulassen.

8. Zur Entwicklung der Methoden gehört ebenso die Zielstellung der Untersuchung geeigneter Formen der Darstellung der Ergebnisse in einem Datenmodell.

Stand der Wissenschaft

9. Leistungsstarke Bildverarbeitungsverfahren und photogrammetrische 3D-Rekonstruktion unterstützen die visuelle Bauwerksinspektion. Dies schließt auch die Überführung annotierter Bildinformationen auf eine 3D-Oberfläche ein. Dadurch wird die technische Grundlage für automatisierte Prozesse der Datenanalyse und Zustandsbewertung bildbasierter Inspektionen geliefert. Die Verwendung der 3D-Geometrie von Schadensannotationen findet sich jedoch nur selten und vorwiegend zum Zweck der Visualisierung in der Fachliteratur.

10. Besonders aus dem Bereich der Computergraphik existieren bereits optimierte Verfahren zur Raumpartitionierung und Ermittlung von Hüllkörpern zur Kollisionsprüfung. Auch für die Charakterisierung und Partitionierung von Punktwolken aus Gebäudeaufnahmen werden diese Verfahren, im Speziellen die Zerlegung in Voxel durch Oktalbäume, genutzt. Für die automatisierte

Zuordnung von Objekten eines Modells finden sich jedoch nur Beispiele unter Verwendung grober Hüllkörper.

11. Für die Analyse von Erdbebenschäden werden bereits geometrische Vergleiche von Punktwolken für die Detektion von Veränderungen angewendet. Diese sind jedoch speziell auf die Verwendung von Punktwolken ausgelegt, aber nicht auf die Charakteristik koregistrierter und geometrisch heterogener Annotationsdatensätze.

12. Die Betrachtung der Zustandshistorie von Annotationsgeometrien über mehrere Inspektionen hinweg findet sich bisher nicht in der Literatur oder in entsprechenden Richtlinien.

13. Das Building Information Modelling beschreibt die Methode der Anreicherung von Objekten in Bauwerksmodellen mit Informationen unterstützt durch aussagekräftige Semantik. Dies umfasst auch die Abbildung verschiedener Planungszustände. Für Annotationen aus multitemporalen Inspektionsdaten, deren Lage diskreter lokaler Veränderungen zusätzliche Informationen enthält, gibt es keine spezifische Beschreibung in der Literatur.

Eingesetzte Methoden

14. Zunächst werden aus diversen Datensätzen unterschiedlicher Aufnahme- und Annotationsmethoden charakteristische Eigenschaften von 3D-Annotationsgeometrien herausgearbeitet. Daraus ergeben sich die Anforderungen an die Auswertungsmethodik hinsichtlich der Robustheit gegenüber den Einflüssen aus den Eigenschaften der Eingangsdaten für die entwickelten Algorithmen.

15. Für die Überführung von Bildinformationen auf koregistrierte 3D-Geometrien wird die Methode des Raycastings sowie die Interpolation aus markanten Punkten, welche für die 3D-Rekonstruktion durch Structure from Motion dienen, angewendet.

16. Zur Entwicklung eines geeigneten Verfahrens für die Zuordnung und den Vergleich multitemporaler Annotationsdaten werden verschiedene Ansätze der Raumpartitionierung, im Besonderen die Voxelisierung durch Oktalbäume und die Ableitung der Topologie aus der Bewertung der Voxel, adaptiert.

17. Für die Bewertung der Voxel wurde die zusätzliche Betrachtung der Nachbarbereiche eingeführt, um nachteilig wirkende Eigenschaften der aufgenommenen Zustandsdaten für die Extraktion von Differenzgeometrien möglichst umfänglich zu kompensieren.

18. Aus der im Ansatz des Metamodells beschriebenen Modellierung der Metadaten und Beziehungen unabhängiger Dateien werden Erweiterungen für heterogene Inspektionsdaten abgeleitet. Weiterhin wird durch die Umsetzung dieser Erweiterungen in etablierten Formaten deren Kompatibilität zu verschiedenen Modellierungskonzepten überprüft.

19. Die Validierung der entwickelten Verfahren für die Zuordnung und den Vergleich multitemporaler 3D-Annotationsgeometrien erfolgt anhand repräsentativer Fallbeispiele, welche in Dimension, Datenmenge, Annotationsmethoden und lokaler Genauigkeit der Koregistrierung variieren.

Wesentliche Ergebnisse

20. Für 3D-Annotationsgeometrien aus koregistrierten Zustandsaufnahmen eines Bauwerks oder Bauteils lassen sich folgende charakteristische Eigenschaften herausstellen: (i) Der Betrag von lokalen Verformungen oder Ungenauigkeiten aus der Koregistrierung der Zustandsaufnahmen kann einen signifikanten Anteil der Dimension einer Annotationsgeometrie erreichen. (ii) Der Annotationsprozess beeinflusst die Qualität der Annotation und ist in der Regel nicht reproduzierbar. (iii) Die Magnitude der zu bestimmenden Veränderung kann die Dimension der Annotationsgeometrie übersteigen und deren Gestalt verformen, sodass keine Ähnlichkeiten mehr bestehen.

21. Die Zuordnung von Annotationen zu betroffenen Bauteilen kann durch die entwickelten Verfahren unter Verwendung einer Voxelzerlegung erreicht werden. Die Fallbeispiele weisen eine robuste Zuordnung unter Minimierung von Falschzuordnungen nach. Dies gilt ebenfalls, wenn eine Annotation mehrere Bauteile betrifft.

22. Die Zuordnung korrespondierender Annotationen mehrerer Zustände zu einer Zustandshistorie wird ebenfalls durch Voxelzerlegung erreicht. Die charakteristischen Eigenschaften eines koregistrierten Inspektionsdatensatzes werden dabei durch die Unschärfe des Voxelgitters berücksichtigt, womit auch eine Robustheit gegenüber Falschzuordnungen sich überschneidender Annotationen entsteht.

23. Diskrete Geometrien der Veränderungen zwischen korrespondierenden 3D-Annotationsgeometrien zweier Zustände und ihr prozentualer Anteil bezogen auf die Dimensionen der Annotation werden ebenfalls aus dem bewerteten Voxelgitter abgeleitet. Eine Quantifizierung und eine Lokalisierung der Veränderungen ist somit möglich.

24. Die Methode der Voxelisierung sorgt für eine Anwendung der entwickelten Verfahren, welche unabhängig von der geometrischen Repräsentation oder dem Detailgrad der Objekte ist.

25. Die Betrachtung der Nachbarbereiche belegter Voxel in den entwickelten Methoden führt zu einer zentrierteren Lage der Geometrie innerhalb des Gitters. Außerdem können ungünstige Konstellationen von Geometrien auf den Voxelgrenzen ausgeschlossen und eine gezielte Unschärfe bei höherer Diskretisierung angewendet werden.

26. Zur geeigneten Speicherung der ermittelten Informationen in einem Inspektionsdatensatz, welcher mehrere Zustände beinhaltet, werden folgende Anforderungen formuliert: (i) Jedes Objekt des Inspektionsdatensatzes benötigt eine geometrische Referenz zur Verortung am Bauwerk. (ii) Die Möglichkeit einer flexiblen Strukturierung des Datensatzes nach unterschiedlichen Aspekten durch die Modellierung nach der Graphentheorie im Gegensatz zur üblichen Baumstruktur ist erforderlich. (iii) Zugehörigkeiten und Relationen zwischen aufgenommenen, annotierten und modellierten Daten müssen eindeutig gespeichert werden können. (iv) Korrespondenzen zwischen Elementen eines Zustandes zu Elementen eines vorherigen Zustandes müssen entsprechend hinterlegt werden. (v) Effekte wie Fusion oder Aufteilung der Annotationen zwischen verschiedenen Zeitschritten müssen berücksichtigt werden.

27. Die Fallbeispiele zeigen, dass aus den Ergebnissen der Methoden bereits geschädigte Bauteile, Bauteile mit Veränderungen der Schädigung, der Lage und des prozentualen Anteils dieser Veränderungen entnommen werden können und sich ein Bauwerksmodell damit entsprechend anreichern lässt.

28. Die in den entwickelten Datenmodellen enthaltenen Zuordnungen und Veränderungen der Annotationen sind die Grundlage für die Berücksichtigung einer Schadenshistorie im Zusammenhang mit individuellen Bauteileigenschaften bei einer regelbasierten Bewertung.

29. Die Einbeziehung der zusätzlichen Betrachtung der Veränderung einzelner Annotationen in einer abgeleiteten Zustandshistorie in die Bewertung und die Kombination dieser mit Erfahrungswerten zum Bauwerksverhalten fördert eine prädiktive Instandhaltungsstrategie. Damit würde die Durchführung von Maßnahmen nicht mehr von der Betrachtung eines einzelnen Zustandes abhängen (reaktive Strategie) und kann rechtzeitig vor dem Eintreten kritischer Zustände des Gesamtbauwerks erfolgen.