

Zusammenfassung der Promotionsschrift

Artificial Intelligence Approach for Structural Control

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der

Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Hamid Radmard Rahmani

Mentor:

Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Könke

Juni 2019

Problemstellung und Zielsetzung

1. Erdbeben sind Naturgefahren, die Gebäude und die Infrastruktur schädigen, das Leben vieler Menschen gefährden und jedes Jahr finanzielle und soziale Verluste verursachen. Aufgrund der stochastischen Natur der Erdbeben ist die Kontrolle der Schwingungen in Bauwerken während des Erdbebens eine herausfordernde Aufgabe. Das Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die gegenwärtigen Methoden der Schwingungskontrolle durch den Einsatz künstlicher Intelligenz (KI) zu verbessern.
2. Als erstes Ziel befasst sich diese Studie eingehender mit der Reduktion der Strukturschwingungen von hohen Gebäuden mithilfe von Schwingungsdämpfern (TMDs) während des Erdbebens. Ein TMD ist eine Masse, die durch eine Feder und einen Dämpfer mit dem Gebäude verbunden ist. Wenn das Gebäude während eines Erdbebens schwingt, vibriert auch der TMD phasenverschoben und übt Kräfte entgegen der Erdbebenlastrichtung auf das Gebäude aus. Das Ziel dieses ersten Teils der Forschungsarbeit ist es, die Auswirkungen verschiedener Parameter wie Anzahl der TMDs, deren Anordnung und die Häufigkeit von Erdbeben auf die optimale Platzierung und Parameter der TMDs zu untersuchen.
3. Die Rückkopplungsregelung ist eine andere Art der Strukturregelung, bei der ein Algorithmus die Regelkräfte während eines Erdbebens in Echtzeit ermittelt. Der Steueralgorithmus verwendet Daten, die von Sensoren gesammelt werden, um optimale Steuersignale zu erzeugen. Diese Steuersignale werden an den Stellantrieb gesendet, um Kräfte auf das Gebäude auszuüben und die Vibration während der Erdbebenerregungen zu reduzieren.
4. Das Ziel des zweiten Teils dieser Forschungsarbeit ist es, die aktuellen Algorithmen für die Steuerung der Regelkräfte durch die Einführung eines neuartigen Vibrationskontrollsystems auf der Basis eines neuronalen Netzes für Strukturen zu verbessern. Das menschliche Gehirn ist in der Lage zu lernen, viele Aufgaben wie zum Beispiel das Gehen zu erledigen, indem es einfach Aktionen ausführt und Rückmeldungen beobachtet. Diese Forschungsarbeit ist vom Lernmechanismus des Gehirns inspiriert und zielt darauf ab, einen Algorithmus zu entwickeln, der in der Lage ist, ein neuronales Netzwerk zu trainieren, um die Schwingungen in einer Struktur während eines Erdbebens durch Eingreifen und Beobachten zu reduzieren. Als Weiterentwicklung früherer Methoden soll der Prozess der Entwicklung einer optimalen Kontrollrichtlinie beim vorgeschlagenen Ansatz vom Computer automatisch durchgeführt werden.

Stand der Wissenschaft

5. Obwohl die Verwendung von TMDs in Gebäuden mittlerer Höhe in der Literatur gut untersucht ist, ist ihre Verwendung in hohen Gebäuden wenig dokumentiert. In der Literatur wird das Problem vereinfacht, indem die Anzahl der TMDs, ihre Positionen oder ihre Abstimmfrequenzen vordefiniert werden. Kürzlich wurde in einigen Arbeiten untersucht, wie sich die Verteilung von TMDs über die Höhe der Gebäude auf ihre Leistung unter Windlast auswirkt. Belastungen aus Erdbeben haben im Vergleich zu den Windbelastungen einen breiteren Frequenzbereich, was die optimale

Ausnutzung der TMDs stark beeinträchtigt. Zur Lösung dieses Problems sind umfangreiche Untersuchungen in diesem Bereich notwendig, was eines der Ziele dieser Forschungsarbeit ist.

6. Die Literatur zu Regelungsalgorithmen für die Reduktion der Strukturschwingungen während des Erdbebens kann in zwei Hauptkategorien unterteilt werden: klassische Algorithmen und intelligente Algorithmen. Im Allgemeinen basieren klassische Algorithmen auf mathematischen Funktionen, während intelligente Algorithmen auf rechnergestützten Intelligenzmethoden basieren. Die intelligenten Algorithmen können dem Steuerungssystem ein gewisses Maß an Anpassungsfähigkeit verleihen.
7. In jüngster Zeit werden bei der Entwicklung der intelligenten Steuerungsalgorithmen zwei Arten von maschinellen Lernmethoden verwendet, die als überwachtes Lernen und unbeaufsichtigtes Lernen bezeichnet werden. Trotz der durch solche Algorithmen erzielten Verbesserungen leiden sie unter einigen Problemen wie Überanpassung, die ihre Verwendung in seismischen Steuerungssystemen einschränken. Ein Überanpassungsproblem bedeutet, dass solche Algorithmen bei Erdbeben, für die sie trainiert wurden, zwar eine gute Leistung zeigen, aber für neue Erdbebenregungen neu geschult werden müssen.
8. Es gibt andere Methoden des maschinellen Lernens, wie Bestärkendes Lernen (BL), die in anderen Branchen, wie z. B. Robotik, Luft- und Raumfahrt und autonomen Maschinen, weit verbreitet sind. Diese Einsatzbereiche weisen auf das Potenzial hin, solche Algorithmen zur Lösung seismischer Steuerungsprobleme im Hochbau einzusetzen. Die Verwendung solcher Methoden zur Weiterentwicklung der aktuellen intelligenten Algorithmen ist ein herausforderndes Ziel des zweiten Teils der vorgelegten Arbeit.

Eingesetzte Methoden

9. Im ersten Teil wurde eine fortschrittliche Methode im Bereich des generischen Algorithmus (GA) mit dem Namen "Non-dominated Sorting Genetic Algorithm" (NSGA-II) verbessert, indem Probleme mit der aktuellen Methode, die die Konvergenzrate begrenzen, behoben wurden. Die entwickelte Methode wurde verwendet, um die optimalen Parameter und Positionen der TMDs für die Reduktion der Strukturschwingungen von hohen Gebäuden während des Erdbebens zu untersuchen. Die binäre Codierung wurde verwendet, um TMD-Parameter zu kodieren und die künstliche Desoxyribonukleinsäure (DNA) der Struktur zu erzeugen. Die Wirksamkeit des Ansatzes wurde an einem Hochhaus mit 76 Stockwerken als Fallstudie untersucht.
10. Im zweiten Teil wurde die Methode Bestärkendes Lernen (BL) verwendet, um einen Rahmen für intelligente Strukturkontrolle zu entwickeln. BL ist eine gehirnlernbasierte Methode in der künstlichen Intelligenz (KI), die sich mit der Frage befasst, wie ein Software-Agent in einer Umgebung Maßnahmen ergreifen sollte, um die kumulative Belohnung zu maximieren. Die vorliegende Arbeit ist die Probleme mit der aktuellen BL-Methode, die ihre Leistung bei Strukturkontrollproblemen verringert, angegangen und hat sie verbessert.
11. Die entwickelte BL-Methode wurde verwendet, um ein tiefes neuronales Netzwerk (NN) darauf zu trainieren, die Schwingung von Strukturen während

eines Erdbebens zu reduzieren. Um die Wirksamkeit des entwickelten Frameworks zu untersuchen, wurde eine Simulationsumgebung im Computer entwickelt, und zwei Fallstudien wurden vorgestellt.

Wesentliche Ergebnisse

12. Es wurde ein Framework entwickelt, um die optimale Platzierung und Parameter der TMDs für die Vibrationskontrolle von hohen Gebäuden während Erdbebenregungen zu bestimmen.
13. Die Probleme mit der aktuellen NSGA-II-Methode wurden behoben und die Methode durch die Entwicklung von zwei GA-Operatoren verbessert, wodurch die Leistung des Algorithmus in Bezug auf die Konvergenzrate erheblich verbessert wird.
14. Die Beziehung zwischen der optimalen Leistung des Steuerungssystems und den Strukturparametern wurde untersucht. Es wird gezeigt, dass im Gegensatz zur üblichen Verwendung von TMDs die Leistung des Steuerungssystems verbessert werden kann, indem die TMDs über die Höhe von hohen Gebäuden verteilt werden.
15. Auf der Grundlage des Lernmechanismus des Gehirns wird ein neuartiges intelligentes Framework für die Vibrationskontrolle von Strukturen entwickelt. Das vorgestellte Framework ist in der Lage, ein tiefes neuronales Netzwerk zu trainieren, um die Schwingungen in einer Struktur während eines Erdbebens zu reduzieren. Bei der entwickelten Methode handelt es sich um eine modellfreie Methode, die von den Systemparametern und ihrer Dynamik unabhängig ist. Die Wirksamkeit des Frameworks wird in einem System mit einzelnen Freiheitsgraden und einem Hochhaus als zwei Extremfallstudien untersucht.
16. Als wichtiger Vorteil des vorgeschlagenen Verfahrens im Vergleich zu früheren wird gezeigt, dass das trainierte tiefe neuronale Netzwerk unter Umweltbedingungen eine stabile Performance aufweist.
17. Es wird auch gezeigt, dass das trainierte tiefe neuronale Netzwerk die Schwingungen der Strukturen unter Erdbebenregungen signifikant verringert hat. Darüber hinaus kann der Controller seine Leistung bei Erdbebenregungen beibehalten, für die er nicht ausgebildet wurde.
18. Die Ergebnisse der Empfindlichkeitsanalyse zeigen, dass der entwickelte Regler unter Umweltunsicherheiten einschließlich Änderungen der Strukturparameter eine stabile Performance in Bezug auf die Reduzierung der Spitze der Verdrängungsreaktion aufweist. Zum Beispiel wirkt sich eine Toleranz von 40% in Bezug auf die strukturelle Steifheit auf die Leistung des tiefen NN von weniger als 5% aus.

Die Probleme mit der RL-Methode werden behoben, und die Methode wird durch die Entwicklung eines Algorithmus zur Auswahl des Schlüsselzustands verbessert. Die Wirksamkeit der verbesserten Methode im Vergleich zur ursprünglichen Methode wird untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Leistung des ursprünglichen Algorithmus in Bezug auf die Reduzierung der Schwingungen der Struktur während des Erdbebens durch die vorgeschlagene Methode um 30% verbessert wird.