

Zusammenfassung

Lisa Kausch
Dr. sc. hum.

Robust Deep Learning for Computer-Assisted Spinal Surgery

Fach/Einrichtung: Medizinische Biometrie und Informatik
Doktorvater: Prof. Dr. rer. nat. Klaus H. Maier-Hein

Die Wirbelfusion über Pedikelverschraubung ist der Goldstandard für die Behandlung instabiler Wirbelsäulenerkrankungen. Durch die Nähe der Pedikel zum Rückenmark und der damit verbundenen Komplikationen im Falle von Verletzungen ist eine genaue Schraubenplatzierung essenziell, erfordert jedoch ein hohes Maß an anatomischem Wissen und Erfahrung. Verschiedene bildgestützte Verfahren ermöglichen die Visualisierung der inneren Anatomie und erleichtern die Schraubenplatzierung, z. B. Durchleuchtung oder Computertomografie (CT)-Navigation. In dieser Arbeit werden zwei computergestützte Methoden zur Unterstützung des Chirurgen bei beiden Verfahren vorgeschlagen.

Bei der Durchleuchtung werden wiederholt anatomiespezifische Standardprojektionen aufgenommen. Standardprojektionen sind Röntgenbilder, die aus patientenspezifischen C-Bogen Posen aufgenommen werden und die Beurteilung der Frakturposition und der Implantatplatzierung ermöglichen. In der derzeitigen klinischen Routine wird der C-Bogen unter iterativer oder kontinuierlicher Durchleuchtung manuell positioniert, was eine hohe Strahlendosis und einen hohen Zeitaufwand mit sich bringt. Die CT-Navigation bietet einen alternativen Ansatz für die bildgestützte Navigation von Wirbelsäuleneingriffen. Dabei wird intraoperativ ein CT aufgenommen, in dem die Schraubentrajektorien für die anschließende 3D-Navigation manuell geplant werden. Beide bildgestützten Verfahren erfordern manuelle Interventionen, die in hohem Maße expertenabhängig sind, tiefe Kenntnisse der Anatomie und der anatomischen Ausrichtung erfordern und die Verfahrensdauer verlängern.

Die in dieser Arbeit entwickelten Methoden sollen den Chirurgen bei der C-Bogen-Positionierung während der Durchleuchtungsführung und bei der Pedikelschraubenplanung während der CT-Navigation unterstützen. Viele aktuelle Ansätze, die eine Computerunterstützung für die manuell ausgeführten Schritte vorschlagen, gehen von restriktiven Annahmen bezüglich der Modellierung oder der Aufnahmetechnik aus oder erfordern externe Hardware, was die Integration in den klinischen Arbeitsablauf erschwert und die klinische Anwendbarkeit bis heute einschränkt. In dieser Arbeit werden Deep Learning Techniken verwendet, die die anatomische Variation aus retrospektiven CT Datensätzen und zusätzlichen Simulationen lernen, die durch Expertenannotationen ergänzt werden, ohne dass weitere technische Geräte erforderlich sind.

Konkret wurde für die automatische Schraubenplanung eine Methode entwickelt, die die Schraubenpositionen anhand von chirurgischen Planungsdaten in retrospektiven CT Datensätzen simuliert und in einem patchbasierten Ansatz auf der Grundlage des Bildkontextes erlernt, anstelle von manuell definierten geometrischen und strukturellen Eigenschaften oder atlasbasierter Modellierung. Der vorgeschlagene Ansatz über eine zusätzliche Segmentierungsaufgabe zeigte genauere und robustere Performance als die direkte convolutional neural network-basierte Landmarkenregression. Die Methode wurde als Prototyp Plugin in das Open-Source-Framework Medical Imaging Interaction Toolkit integriert und führte in 96.2% der Fälle zu klinisch akzeptablen Schraubenplänen. Die automatische Planungsleistung war vergleichbar mit der inter-rater Varianz unter manueller Planung, sodass die vorgeschlagene Methode die derzeitige manuelle Expertenplanung ersetzen kann. Darüber hin-

aus erhöhte die vorgeschlagene automatische Planungsmethode die Zeiteffizienz drastisch um das 8-fache (4.9s pro Wirbelebene), was eine Verbesserung gegenüber dem Stand der Technik darstellt.

Für die automatische C-Bogen Positionierung für Standardprojektionen wurde eine Methode entwickelt, die anatomische Variationen ebenfalls aus einem retrospektiven diversen CT-Datensatz mit Deep Learning Techniken lernt. Die gewünschte Positionierung des C-Bogens wurde direkt aus einem ersten Röntgenbild geschätzt, ohne die Notwendigkeit eines präoperatives CT oder zusätzlichen technischen Equipments, im Gegensatz zu vielen anderen state of the art Ansätzen. Im Vergleich zum derzeitigen manuellen, iterativen Positionierungsverfahren würde der Ansatz die Strahlendosis und den Zeitaufwand drastisch reduzieren. Dabei wurden drei verschiedene Herausforderungen angegangen. Erstens gibt es keine echten Röntgenbilder mit annotierten Pose Labels, da es in der intraoperativen Fluoroskopie keinen konstanten Referenzrahmen gibt. Daher basierte das Lernen auf Simulationen, die anhand von CT Scans erstellt wurden. Die zweite Herausforderung bezieht sich auf die intraoperativen Anforderungen, wo vorhandene chirurgische Implantate die Anatomie teilweise überlagern können. Dieses Problem wurde durch die Ergänzung der synthetischen Röntgenbilder mit simulierten K-Drähten und Schrauben adressiert. Um einen Transfer von simulierten zu realen Röntgenbildern zu erreichen, wurde die Pipeline so konzipiert, dass sie die klinischen Entscheidungsprozesse von Neurochirurgen nachahmt. Die Einbeziehung sichtbarer anatomischer Orientierungspunkte in die Pipeline bietet Einblicke in den Entscheidungsprozess. Sie erhöht die klinische Interpretierbarkeit, was die dritte Herausforderung von Deep Learning Algorithmen adressiert, die oft als Blackboxen betrachtet werden. Die erweiterte Methode wurde in einer großen Studie evaluiert, wobei verschiedene Schritte eines realen klinischen Eingriffs simuliert wurden. Im Vergleich zur direkten intensitätsbasierten Posenregression konnte die Genauigkeit und Robustheit erhöht werden. Die Methode kann mit anatomischer Variation umgehen und lässt sich von in silico auf ex vivo Daten menschlicher Kadaver übertragen. Fehler konnten auf spezifische Szenarien wie den Leichensack, den Leichenzerfall oder seitliche Armüberlagerungen zurückgeführt werden, was durch eine größere Vielfalt an Trainingsdaten behoben werden könnte. Weitere klinische Evaluation ist erforderlich, um die Robustheit und Anwendbarkeit in einem intraoperativen Umfeld zu untersuchen. Der vorgestellte Ansatz wurde für den vierten Lendenwirbel und die anterior-posteriore und laterale Standardprojektion evaluiert. Er kann auf andere Wirbelniveaus, Standardprojektionen oder Anatomien übertragen werden, wenn entsprechende Trainingsdaten zur Verfügung stehen.

Zusammenfassend bieten die beiden vorgeschlagenen Computer-Assistenzsysteme für die Wirbelsäulenchirurgie eine Unterstützung für den Chirurgen während zwei unterschiedlicher bildgebender Verfahren. Die vorgeschlagenen Methoden können nahtlos in den klinischen Arbeitsablauf integriert werden. Dadurch kann die manuelle Interaktion und die Abhängigkeit von Expertenwissen erheblich verringert werden, was insbesondere für unerfahrene Chirurgen von Vorteil ist. Auch die Strahlenbelastung und die Eingriffsdauer kann sowohl für Patienten als auch für das Klinikpersonal reduziert werden.