

Jan Kuntz

Dr. sc. hum.

Computertomographische Niedrigstdosis Fluoroskopie für die vierdimensionale Interventionsführung

Promotionsfach: DKFZ

Doktorvater: Prof. Dr. med. Dr. rer. nat. W. Semmler

Interventionelle Radiologie ermöglicht es Erkrankungen minimal-invasiv, zum Beispiel durch das Gefäßsystem zu therapieren. Mittels biplanarer Fluoroskopie als Standard-Bildgebung während der Interventionsführung können komplexe räumlich Zusammenhängen oft nicht eindeutig erfasst werden, da hier nur Projektionsbilder genutzt werden. Konventionelle Computertomographie hingegen könnte 3D-Datensätze liefern, würde aber zu sehr hoher Röntgendosis führen.

Ziel dieser Arbeit war es, ein Konzept für 4D-Interventionsführung (3D + Zeit) mit Niedrigstdosis CT-Fluoroskopie zu entwickeln, bestehende Rekonstruktionsverfahren, die Vorinformationen und Compressed Sensing nutzen auf ihre Verwendbarkeit für 4D-Interventionsführung zu untersuchen und einen Algorithmus speziell für die 4D-Interventionsführung zu entwickeln. Leistungsfähigkeit und Limitationen sollten an Simulationen, Phantomuntersuchungen und In-Vivo-Experimenten gezeigt werden.

Dazu wurden die beiden Algorithmen PICCS und ASD-POCS analysiert und mit Modifikationen implementiert. Beide Algorithmen basieren auf dem Compressed Sensing Framework und ermöglichen die CT-Rekonstruktion aus stark unterabgetasteten Projektionsdaten ohne die dafür typischen Streifenartefakte. Die optimalen Aufnahme- und Rekonstruktionsparameter wurden mit Simulationen und Phantomuntersuchungen in einem Kegelstrahl-CT ermittelt und die Leistungsfähigkeit für die 4D-Interventionsführung untersucht. Aus den Ergebnissen wurde der neue Algorithmus *Prior Image Dynamic Interventional Computed Tomography* - PrIDICT entwickelt, der speziell die Besonderheiten der interventionellen Radiologie berücksichtigt.

Das Artefaktverhalten und die Bildqualität wurden bei unterschiedlichen Dosisniveaus und unterschiedlicher Anzahl an Projektionen für alle drei Rekonstruktionsalgorithmen ausgewertet, daraus wurden die optimalen Aufnahmeparameter ermittelt. Die Bildqualität wurde zu den Standardrekonstruktionen mit FDK und SART verglichen. Um die Anwendbarkeit der Algorithmen für die 4D-Interventionsführung zu demonstrieren, wurden In-Vivo-Untersuchungen an fünf Hausschweinen in einem experimentellen Kegelstrahl-CT durchgeführt. Aus den unterabgetasteten Projektionsdaten wurden 4D-Datensätze rekonstruiert. Die notwendige Dosis wurde im direkten Vergleich des experimentellen Aufbaus mit einer klinisch eingesetzten Interventionsanlage bestimmt.

Es zeigte sich, dass die drei genutzten Rekonstruktionsalgorithmen PICCS, ASD-POCS und PrIDICT grundsätzlich für die 4D-Interventionsführung eingesetzt werden können. Dabei weisen die Algorithmen unterschiedliches Artefaktverhalten auf, insbesondere bei der Verwendung extrem geringer Röntgendosen hat der PrIDICT-Algorithmus Vorteile

gegenüber PICCS und ASD-POCS. Die Analyse der optimalen Aufnahmeparameter zeigte weitgehend übereinstimmend im Bereich von 10 bis 20 Projektionen pro Rekonstruktion die besten Ergebnisse.

Bei den In-Vivo-Untersuchungen konnten mit diesen Rekonstruktionsparametern eine gute Bildqualität erreicht werden, mit der die 4D-Interventionsführung möglich ist. Führungsdrähte waren beim Sondieren in der Arteria carotis zu jedem Zeitpunkt zweifelsfrei zu lokalisieren, die Position und Orientierung der Spitze war eindeutig erkennbar. Die Expansion von Stents konnte im 4D-Volumen-Rendering dargestellt werden. Aus unterabgetasteten Projektionsdaten, die während der Injektion von Kontrastmittel aufgenommen wurden, konnten unter Verwendung des Prior-Scans mit PICCS und ASD-POCS Gefäßbäume rekonstruiert werden, die die Darstellung von 3D-Roadmaps ermöglichen. Diese können den 4D-Datensätzen der Interventionsführung überlagert werden.

Gute Rekonstruktionsergebnisse konnten in den In-Vivo-Experimenten bereits mit der gleichen niedrigen Dosis wie bei biplanarer Fluoroskopie erreicht werden. Die 4D-Interventionsführung ist daher zum einen technisch realisierbar und zum anderen aus Sicht des Strahlenschutzes vertretbar. Weitere Vorteile wie beschleunigtes Sondieren komplexer Gefäßabschnitte und damit verbundene sekundäre Dosisreduktion können erst in klinischen Studien untersucht werden.

Die gezeigten Methoden und Techniken ermöglichen eine Vielzahl neuer Anwendungen und Implementierungen für die 4D-Interventionsführung, wobei die Algorithmen für spezielle Interventionen oder Geräte weiter optimiert werden können. Obwohl in dieser Arbeit als Basis eine rotierende Gantry verwendet wurde sind auch andere Ansätze und Geometrien möglich, wenn kontinuierlich und mit ausreichender zeitlicher Auflösung tomographische Rohdaten akquiriert werden können. Teile dieser Arbeit können auch für die Implementierung an C-Bogen-Systemen genutzt werden, wobei hier eine echte 4D-Interventionsführung bislang nicht möglich ist, da die zeitliche Auflösung stark limitiert und die Rotation auf 360° beschränkt ist.

Es konnte gezeigt werden, dass die 4D-Interventionsführung am Patienten mit vertretbarer Dosis grundsätzlich möglich ist, dabei kann durch PrIDICT die Röntgendosis gegenüber konventioneller CT mit Standardrekonstruktionen deutlich reduziert werden. Daraus können sich neue Aspekte bei der weiteren Entwicklung von Interventionsanlagen sowie Interventionsmaterial ergeben. Die 4D-Interventionsführung kann dazu beitragen die Belastung für den Patienten zu minimieren, die Strahlendosis bei komplexen Interventionen zu reduzieren und minimal-invasive Eingriffe sicherer zu gestalten.