

Sebastian Sauppe

Dr. sc. hum.

Vier- und fünfdimensionale Bewegungskompensation für Kegelstrahl- Computertomographie-Aufnahmen in der Strahlentherapie

Einrichtung: DKFZ

Doktorvater: Prof. Dr. rer. biol. hum. Marc Kachelrieß

Das Ziel dieser Arbeit ist die Verbesserung der Bildqualität von zeitlich aufgelösten 4D- (3D + Atmung) und 5D- (3D + Atmung + Herz) bewegungskompensierten Bildern für die Strahlentherapie. Der Fokus der Arbeit liegt insbesondere auf der Reduzierung von Bewegungsartefakten. Außerdem wird eine Methode zur Verbesserung der Schätzung von Patientenbewegungen vorgestellt. Hierzu werden drei neue Algorithmen präsentiert, die durch die Verbesserung der Bildqualität eine genauere Patientenpositionierung ermöglichen und interfraktionelle Veränderungen identifizieren können. Die vorgestellte 4D-Bewegungskompensation, basierend auf der artifact-specific cyclic Motion-Compensation-Methode in Kombination mit dem Phase-to-Amplitude Resampling-Verfahren, beinhaltet ein neues phasenbasiertes Amplitudengating. Dieses ermöglicht es Vektorfelder, die auf phasenkorrelierten Bildern geschätzt wurden, auf amplitudenkorrelierte Bilder anzuwenden. Hierzu wird eine Beziehung zwischen Phasen- und Amplitudenbins hergestellt, sodass der Bewegungszustand dieser Bins trotz verschiedener Gatingverfahren identisch bleibt. Für retrospektives Gating zeigt sich, dass bei Patienten mit unregelmäßiger Atmung eine robuste Bewegungsschätzung nur mittels Phasengating möglich ist. Die bewegungskompensierten Bilder, bei denen die Schätzung der Bewegungen auf phasenkorrelierten Bildern erfolgt, zeigen aber weiterhin Bewegungsverschmierungen. Durch die vorgestellte Phase-to-Amplitude Resampling-Methode, die einen Wechsel vom Phasen- hin zum Amplitudengating ermöglicht, konnte eine deutliche Reduzierung der Bewegungsverschmierung in den kompensierten Bildern erreicht werden. Die qualitativen und quantitativen Auswertungen zeigen eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu den 3D- und 4D-Bildern ohne das Phase-to-Amplitude Resampling-Verfahren. Durch ein zusätzliches Upsampling der Vektorfelder kann die Bildqualität weiter gesteigert werden. Die gradientenbasierte Metrik für Bildschärfe weist eine Verbesserung von bis zu 8% gegenüber der herkömmlichen 4D-Bewegungskompensation und 12% gegenüber der 3D-Rekonstruktion auf. In den Ergebnissen zeigt sich auch, dass das gewählte Amplitudenbin-Arrangement bereits bei der Phase-to-Amplitude Resampling-Methode (ohne Upsampling) sehr effizient gewählt wurde, da die Verbesserungen durch das Upsampling im Verhältnis gering ausfallen. Die Schätzung von Bewegungen in Bereichen in denen eine sogenannte Sliding-Organbewegung auftritt, kann zu Unstetigkeiten im Bewegungsvektorfeld führen. Hierbei gleiten Organe aneinander entlang oder bewegen sich unabhängig voneinander. Beispielsweise treten

Sliding-Organbewegungen zwischen Lunge und Thorax auf. Eine übliche homogene Glättung der Bewegungsvektorfelder kann in diesen Bereichen zu einer fehlerhaften Bewegungsschätzung führen. Um auch diese Bewegungen berücksichtigen zu können wird ein geführter bilateraler Filter vorgestellt. Dieser wird mittels eines Priorbilds, das Informationen über die anatomischen Strukturen enthält, gesteuert. Die adaptierte Filterung der Vektorfelder verhindert die Glättung tangentialer Bewegungen über die entsprechende Organgrenzen hinweg. Gleichzeitig werden Bewegungen in Normalenrichtung zugelassen. Die Auswertungen anhand von Simulationen und Patientenmessungen zeigen das erfolgreiche Verhindern von unphysiologischen Bewegungen, insbesondere im Bereich der Rippen und Wirbelsäule. In Kombination mit der vorgestellten Phase-to-Amplitude Resampling-Methode ergeben sich zeitlich hochaufgelöste, bewegungskompensierte Bilder. Für die 5D-Bewegungskompensation wurde eine sequentielle Methode zur Schätzung der Atem- und Herzbewegungen vorgestellt. Die Methode ermöglicht die zeitlich aufgelöste Rekonstruktion von Herz- und Atembewegungen im Thoraxbereich, basierend auf intrinsisch extrahierten Bewegungssignalen. Das vorgestellte Verfahren führt zu einer deutlichen Verbesserung der Bildqualität hinsichtlich Bewegungsartefakten im Bereich des Myokards. Die Reduktion von Bewegungsartefakten wird anhand einer gradientenbasierten Bildmetrik bestätigt. Diese zeigt eine Verbesserung von bis zu 8% gegenüber der 4D-Bewegungskompensation und bis zu 16% gegenüber einer 3D-Rekonstruktion. Die in dieser Arbeit vorgestellten Bewegungskompensationsverfahren basieren auf der Annahme von zyklischen Bewegungen im Thorax-Bereich. Nicht-zyklische Bewegungen und andere Körperregionen werden nicht berücksichtigt. Die verschiedenen Auswertungen zeigen allesamt, dass durch die neu entwickelten Methoden die Bildqualität im Bezug auf Bewegungsartefakte, Streifenartefakte und Registrierungsfehler in allen Bewegungsphasen stark verbessert werden konnte.