

Abschlussbericht „Rekonstruktion von durch artikulierte Kiefer- und andere Patientenbewegungen gestörten DVT-Datensätzen“



Lukas Birklein¹, Elmar Schömer¹, Ulrich Schwanecke² und Ralf Schulze³

¹ Johannes Gutenberg-Universität, Mainz, Deutschland

² Hochschule RheinMain, Wiesbaden, Deutschland

³ Universität Bern, Bern, Schweiz

ABSCHLUSSBERICHT

Allgemeine Angaben

DFG-Geschäftszeichen:	SCHU1496/7-1
Projektnummer:	438775359
Titel des Projekts:	Rekonstruktion von durch artikulierte Kiefer- und andere Patientenbewegungen gestörten DVT-Datensätzen
Name(n) des/r Antragstellenden:	Schulze Ralf, Prof. Dr. med. dent. / Schömer Elmar, Prof. Dr.
Dienstanschrift/en:	Freiburgstraße 7, 3010 Bern (Schweiz) / Staudingerweg 9, 55099 Mainz
Name(n) der Mitverantwortlichen:	
Name(n) der Kooperationspartnerinnen und –partner:	Schwanecke, Ulrich, Prof. Dr.
Berichtszeitraum (gesamte Förderdauer):	01.2021 – 01.2024

Zusammenfassung / Summary

Das bearbeitete Projekt befasst sich mit Bewegungskorrektur in der zahnmedizinischen digitalen Volumentomographie (DVT). Genauer wurde an einer Lösung für das Problem von artikulierten Unterkieferbewegungen, sprich getrennter Unterkiefer- und Restschädelbewegung, gearbeitet. Dafür wurden zwei unterschiedliche Methoden entwickelt. Die erste Methode basiert auf einer Segmentierung des Unterkiefers vom Restschädel sowie einer getrennten, aber jeweils starren Bewegungskorrektur. Ein zweites Verfahren basiert auf inversem neuronalen Rendering und optimiert gleichzeitig zur Rekonstruktion ein Deformationsfeld, das in der Theorie jegliche Art von Bewegung darstellen kann. Die erste Methode wurde erfolgreich auf zahnmedizinische Daten angewendet, mit der zweiten Methode konnten zusätzlich sogar Atembewegungen bei Thorax DVTs erfasst und dargestellt werden. Ein quantitativer Vergleich mit anderen Methoden zur Rekonstruktion von Thorax DVTs zeigte, dass das entwickelte Verfahren hinsichtlich verschiedener Qualitätsmetriken Ergebnisse auf oder über dem state-of-the-art erzeugt.

The project deals with motion correction in dental cone beam computed tomography (CBCT). More specifically, a solution was developed for the case of articulated mandibular movements, i.e. separate mandibular and cranial movements. In this project two different methods were developed, one based on segmentation of the lower jaw from the rest of the skull and separate but rigid motion correction. A second method is based on inverse neural rendering for reconstruction and a simultaneous optimisation of a deformation field, which in theory can represent any type of movement. The first method was successfully applied to dental data, while the second method was even able to capture and visualise respiratory movements in thoracic CBCTs. A quantitative comparison with other methods for the reconstruction of thoracic CBCTs showed that the developed method produces results at or above state-of-the-art with regard to various quality metrics.

Wissenschaftlicher Arbeits- und Ergebnisbericht

Das Hauptziel des bearbeiteten Projekts war die Bearbeitung der Fragestellung, ob und wie die Korrektur von Patient*innenbewegungen im Kontext der zahnmedizinischen DVT für den Fall getrennter Unterkiefer- und Restschädelbewegungen möglich ist. Zuerst wurden bewegungsbehaftete Daten sowohl synthetisch generiert als auch mithilfe eines bewegbaren Schädels in echten DVT-Geräten aufgenommen (Abbildung 1). Zusätzlich wurden klinische

Daten gesammelt, die eine Evaluation in realen Szenarien erlaubten. Die Daten aus echten DVT-Geräten stammen aus der zahnmedizinischen Röntgenabteilung der Universitätsmedizin Mainz. Alle gesammelten Patient*innendaten wurden nur innerhalb dieser Räumlichkeiten und dem Netzwerk verwendet, ausgenommen eine ausdrückliche schriftliche Erlaubnis, Ausschnitte anonymisiert zu veröffentlichen, lag vor.



Abbildung 1: Experimenteller Aufbau für die Aufnahme der bewegungsbehafteten DVT Schädelaufnahmen. Durch die Nutzung der Stewart-Plattform ermöglicht sich eine freie Wahl der Bewegungsparameter.

Im Rahmen des Projekts wurden zwei unterschiedliche Methoden zur Lösung der Fragestellung entwickelt. Die erste orientiert sich stark an der im Projektantrag geschilderten Vorgehensweise und die zweite Methode betrachtet das Problem aus mit einer anderen Sichtweise. Entwickelt und implementiert wurden diese beiden Vorgehensweisen im Institut für Informatik der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.

In der ersten Methode, beschrieben in „Motion correction for separate mandibular and cranial movements in cone beam CT reconstructions“ [1] erstellen wir iterativ zuerst eine Segmentierung des Volumens in die beiden Bewegungsbereiche, sprich Unterkiefer und Restschädel, und das Verfahren berechnet dann die optimalen Bewegungsparameter für Schädel und Unterkiefer. Da eine eindeutige Segmentierung des Unterkiefers auf einer artefaktbehafteten Rekonstruktion nicht möglich war, wurde stattdessen eine lernbasierte Segmentierung auf jedem 2D Projektionsbild der Akquise durchgeführt und diese dann in das 3D Volumen übertragen. Dafür wurde ein PCA-Modell bestehend aus Dreiecksnetzen von 43 Unterkiefen erstellt und mit den 2D Segmentierungen registriert, indem folgende Fehlerfunktion minimiert wurde:

$$\min_{\pi} E(A_{max}(p_M) \cdot L(\pi), l_b)$$

$A_{max}(p_M)$ steht hier für die Maximumsprojektion mit den aktuellen Bewegungsparametern des Unterkiefers p_M , $L(\pi)$ ist das PCA-Modell, parametrisiert durch π , und l_b sind die Labels für den Unterkiefer auf den 2D Bilddaten. Für die Fehlerfunktion E wurde die L2-Norm verwendet. Die zugrundeliegenden Dreiecksnetze der Unterkiefer stammen aus dem Datensatz einer früheren Veröffentlichung [2], die vor allem Ergebnis des Fachbereichs Design Informatik Medien der Hochschule RheinMain in Wiesbaden sind.

Anschließend konnte abwechselnd eine Rekonstruktion des Volumens mit den aktuellen Bewegungsparametern für Schädel und Unterkiefer berechnet werden, auf deren Grundlage jeweils neue Bewegungsparameter geschätzt wurden, die den Reprojektionsfehler minimieren.

Die Rekonstruktion des Volumens wurde durch die *conjugate gradient for least squares* (CGLS) Methode berechnet, indem $\|A(p_C, p_M)x - b\|_2^2$ (1) nach x minimiert wird. A ist hier der Projektionsoperator, der auf den aktuellen Bewegungsparametern p_C, p_M beruht, und b die 2D Röntgenbilder der Akquise. Das Resultat x ist das gesuchte 3D Volumen. Um die getrennte Bewegung von Unterkiefer und Schädel berücksichtigen zu können, werden die beiden Bereiche getrennt voneinander projiziert und anschließend addiert. Die Rekonstruktion x wird nun genutzt, um Gleichung (1) nach p_C, p_M zu lösen. Die Gesamtlaufzeit konnte zusätzlich weiter verringert werden, da hierfür ein gradientenbasiertes Optimierungsverfahren, die *nonlinear conjugate gradient method*, verwendet wurde. Dies löst den in einer Vorarbeit [3] verwendeten Nelder-Mead Algorithmus ab. Da ein weiteres Ziel im Antrag ausdrücklich die Parallelisierung des Verfahrens war, laufen die zeitintensiven Projektions- und Rückprojektionsabbildungen parallel auf der Grafikkarte ab. Dadurch konnte eine Gesamtlaufzeit von deutlich unter 30 Minuten auch bei Volumina mit Auflösungen von 450x300x450 erreicht werden. Mit diesem ersten Verfahren konnten getrennte Unterkiefer- und Restschädelbewegungen erfolgreich sowohl auf synthetischen sowie auf realen Daten korrigiert werden, allerdings nur auf Scans von jeweils 360° und unter Zentralprojektion.

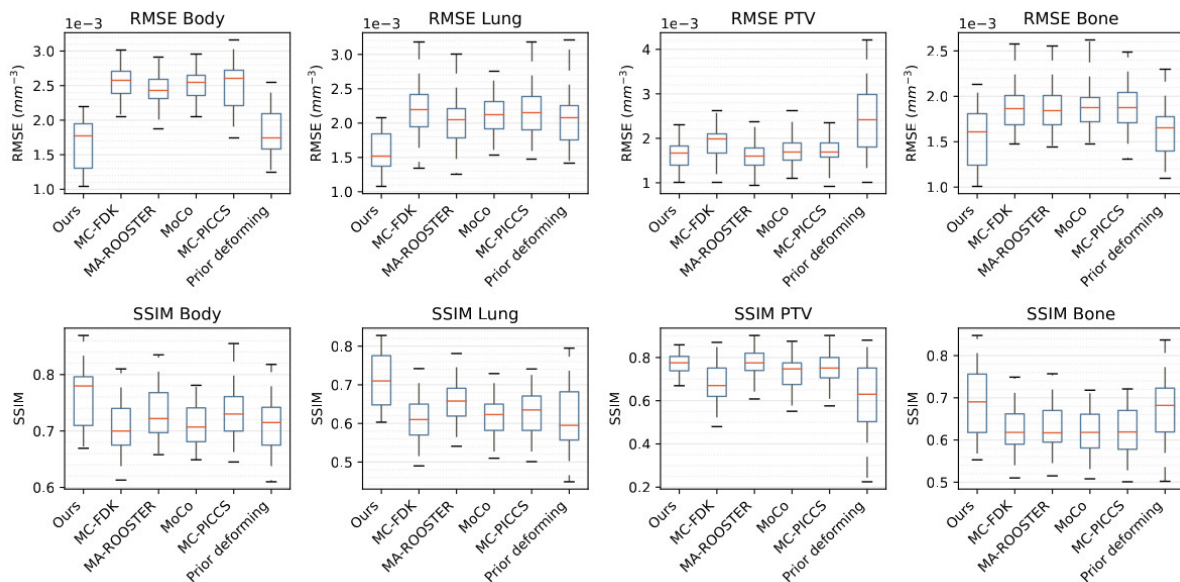


Abbildung 2: "Root mean square error" (RMSE) und "structural similarity index" (SSIM) der zweiten Methode (Ours) im Vergleich zu ähnlichen Verfahren (aus [4]). Kleinere Werte für RMSE sind besser, bei SSIM größere.

Die zweite Methode, „Neural Deformable Cone Beam CT“ [4], verfolgt ursprünglich das gleiche Hauptziel, weicht in ihrer Umsetzung allerdings sehr stark von der ersten ab. Basierend auf dem „NeRF“-Ansatz [5] wird das 3D Volumen durch ein tiefes neuronales Netz σ repräsentiert, das die Dichteverteilung darstellt. D.h. für jeden Punkt $\mathbf{x} = (x, y, z)^T \in \mathbb{R}^3$ ist $\sigma(\mathbf{x})$ die Dichte an diesem Punkt im Raum. Um Patient*innenbewegungen zu modellieren, wurde das Netzwerk um ein Deformationsnetzwerk Γ erweitert, das eine 3D Koordinate zu jedem Zeitpunkt der Aufnahme auf eine andere 3D Position abbildet. Eine Dichte am Punkt \mathbf{x} zum Zeitpunkt t erhalten wir, indem $\sigma(\Gamma(\mathbf{x}, t))$ ausgewertet wird. Durch diese Modellierung entfällt die aufwendige Segmentierung in Unterkiefer und Restschädel des ersten Verfahrens, und zusätzlich lassen sich auch nicht-rigide Bewegungen, wie beispielsweise Atembewegungen bei Thorax-DVTs erfassen. In einem ersten Experiment wurde das Verfahren auch erfolgreich auf synthetische Herz-DVT Daten angewandt. Ein Vergleich mit anderen sogenannten 4D-CBCT Methoden zur Rekonstruktion verschiedener Atemphasen wird in Abbildung 2 gezeigt. In der Abbildung werden zwei Kennwerte für die Rekonstruktionsgüte, SSIM und RMSE, verglichen. Ein größerer SSIM-Wert (nahe eins) und kleinerer RMSE-Wert sprechen für eine bessere Qualität. Unser Verfahren erzielt in fast allen Einzelvergleichen bessere Ergebnisse als die vergleichbaren Methoden und konnte damit den best-paper-award der VCBM 2023 gewinnen.

Wie bei der ersten Methode wird jedem Pixel der Projektionsbilder ein Strahl zugeordnet, der durch das Volumen σ verfolgt wird. Auf diesem werden diskrete Samplepunkte gewählt, deren Dichten summiert und dann mit dem Pixelwert durch eine geeignete Fehlerfunktion verglichen werden. Dieser Fehler wird anschließend zum Training der beiden Netzwerke verwendet. Um die Trainingszeiten zu verkürzen, wurde das *multiresolution hash encoding* [6] in Kombination mit dem sehr effizienten *tiny-cuda-nn* Framework verwendet, wodurch sich Rekonstruktionszeiten (Volumen und Deformationsfeld) von 25 Minuten erreichen ließen. Im Gegensatz zur ersten Methode ließen sich hiermit Scans diverserer Aufnahmegeometrien korrigieren, beispielsweise short scans (180° Rotation) oder Aufnahmen mit „half-fan“ Geometrie, bei denen der Detektor zur Quelle versetzt liegt.

Alle entstandenen relevanten Daten sowie Implementierungen werden auf internen Servern der Johannes Gutenberg-Universität oder des Landes Rheinland-Pfalz, beispielsweise gitlab.rlp.net, gesichert, um eine etwaige spätere Weiterverwendung, beispielsweise in Folgeprojekten oder durch andere Forschungsinstitutionen zu garantieren. Die Forschungsergebnisse wurden in den beiden Publikationen veröffentlicht und sind der Allgemeinheit zugänglich. Gesammelte Daten, vor allem personenbezogene Patient*innendaten, können nicht ohne Weiteres öffentlich zugänglich gemacht werden.

- [1] L. Birklein, S. Niebler, E. Schömer, R. Brylka, U. Schwanecke und R. Schulze, „Motion correction for separate mandibular and cranial movements in cone beam CT reconstructions,“ *Medical Physics*, Bd. 50, pp. 3511-3525, 2023.
- [2] T. Gietzen, R. Brylka, J. Achenbach, K. zum Hebel, E. Schömer, M. Botsch, U. Schwanecke und R. Schulze, „A method for automatic forensic facial reconstruction based on dense statistics of soft tissue thickness,“ *PloS one*, p. e0210257, 2019.
- [3] S. Niebler, E. Schömer, H. Tjaden, U. Schwanecke und R. Schulze, „Projection-based improvement of 3D reconstructions from motion-impaired dental Cone beam CT data,“ *Medical Physics*, Bd. 46, 07 2019.

- [4] L. Birklein, E. Schömer, R. Brylka, U. Schwanecke und R. Schulze, „Neural Deformable Cone Beam CT,“ in *Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine*, 2023.
- [5] B. Mildenhall, P. P. Srinivasan, M. Tancik, J. T. Barron, R. Ramamoorthi und R. Ng, „NeRF: Representing Scenes as Neural Radiance Fields for View Synthesis,“ *Commun. ACM*, Bd. 65, p. 99–106, dec 2021.
- [6] T. Müller, A. Evans, C. Schied und A. Keller, „Instant Neural Graphics Primitives with a Multiresolution Hash Encoding,“ *ACM Trans. Graph.*, Bd. 41, pp. 102:1–102:15, 07 2022.

Veröffentlichte Projektergebnisse

4.1 Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

- Birklein L, Niebler S, Schömer E, Brylka R, Schwanecke U, Schulze R. Motion correction for separate mandibular and cranial movements in cone beam CT reconstructions. *MedPhys*. 2023; 50: 3511-3525. <https://doi.org/10.1002/mp.16347>. Open Access
- Birklein L, Schömer E, Brylka R, Schwanecke U, Schulze R. Neural Deformable Cone Beam CT. *VCBM* 2023. <https://doi.org/10.2312/vcbm.20231211>. Open Access, best paper award.

4.2 Weitere Publikationen und öffentlich gemachte Ergebnisse

- keine -

4.3 Patente (angemeldete und erteilte)

- keine -