

Methoden zur Bestimmung von dreidimensionalen intrakardialen und extrakorporalen Elektrodenpositionen

Dr.-Ing. Ingo H. de Boer

Einleitung Im Bereich der kardiologischen Diagnostik sowie bei der Planung und Durchführung von herzchirurgischen Eingriffen werden Untersuchungen elektrischer endokardialer Aktivität zunehmend wichtiger. Einen bedeutenden Aspekt stellt das Abbilden (*engl. mapping*) von elektrischen endokardialen Potentialen dar. Diese Art von Messung wird mit Kathetern durchgeführt, die eine festgelegte Anzahl von Elektroden aufweisen. In den letzten Jahren stieg die Anzahl solcher Mapping-Systeme in der klinischen Anwendung. In der Literatur werden verschiedene Systeme beschrieben. Diesen Systemen liegt ein lokales Referenzsystem zugrunde, wie z. B. der Katheter selbst. Die großflächige Messung und Abbildung extrakorporaler Potentiale ist schon länger bekannt. Beim Einsatz weniger Elektroden (z. B. drei) spricht man vom Elektrokardiogramm (EKG). Hingegen führt die Verwendung von beispielsweise 32 Elektroden zu sogenannten Oberflächenpotentialverteilungen (*engl. body surface potential map, BSPM*). Die Kombination von extrakorporalen Messungen mit endokardialen Potentialverteilungen eröffnet neue Möglichkeiten, mehr Informationen über die elektrische Aktivität im Herzen zu erhalten.

Um die Physiologie des Herzens im Computer simulieren und generierte Herzmodelle validieren zu können, benötigt man neben den eigentlichen Potentialmessungen ein Leitfähigkeitsmodell des untersuchten Körpers sowie die dreidimensionalen Positionen der Messpunkte in einem globalen Koordinatensystem. Leitfähigkeitsmodelle lassen sich aus Aufnahmen der Computertomographie (CT) oder der Magnetresonanztomographie (MRT) ermitteln. Für die Bestimmung der dreidimensionalen extrakorporalen Elektrodenpositionen wird in dieser Arbeit ein Kamerasystem genutzt. Die intrakardialen Elektrodenpositionen auf den Kathetern lassen sich aus tomographischen Bildern ermitteln. Die Kombination der so generierten Computermodelle – bestehend aus den intrakardialen und extrakorporalen Elektrodenpositionen und dem Volumendatensatz – führt zu hybriden Datensätzen, die für die Feldberechnung sowie Datenanalyse und -validierung genutzt werden. Beispiele hierzu sind das inverse Problem und das Vorwärtsproblem der Elektrokardiographie.

Aufgabenstellung Die Erstellung eines kompletten Satzes von elektrischen und morphologischen Daten erfordert die dreidimensionale Lokalisation der Elektroden im Herzen sowie auf dem Thorax und die Segmentierung und Klassifizierung dreidimensionaler Datensätze.

Zur Berechnung der extrakorporalen Elektrodenpositionen soll ein System aus Kameras entwickelt und validiert werden. Für diesen Zweck müssen verschiedene Referenzobjekte entworfen werden, die eine Kalibrierung und Validierung des Kamerasystems ermöglichen.

Verschiedene Kathetertypen sollen im Rahmen dieser Arbeit aus den Bildaufnahmen verschiedener Modalitäten extrahiert und modelliert werden. Für die Bestimmung der

intrakardialen Elektrodenpositionen auf diesen Kathetern sind Methoden für die verschiedenen Modalitäten zu realisieren. Zur Kalibrierung und Validierung des Röntgensystems sollen Referenzobjekte erstellt werden.

Diese Arbeit ist zum Teil in den Sonderforschungsbereich 414 „*Informationstechnik in der Medizin – Rechner- und sensorgestützte Chirurgie*“ der Universitäten Karlsruhe und Heidelberg sowie des Deutschen Krebsforschungsinstituts eingebunden. Der Sonderforschungsbereich 414 beinhaltet als eines von mehreren Projekten das Teilprojekt H4 „*Elektromechanische Modellierung des Vorhofs: Validierung, Planung und Simulation atrialer rhythmischirurgischer Eingriffe*“, welches u. a. die Simulation des elektromechanischen Verhaltens des Vorhofs zum Inhalt hat. Innerhalb dieses Projektes sollen hochaufgelöste, makroskopische, anatomische Modelle des Herzens aus Tierversuchen erstellt werden. Sowohl morphologische, computertomographische Aufnahmen, als auch elektrische Datensätze sollen erfasst und visualisiert werden.

Die berechneten intrakardialen und extrakorporalen Elektrodenpositionen sind in ein einheitliches Koordinatensystem und danach auf einen dreidimensionalen Volumendatensatz zu überführen. Die Volumendatensätze sind aus den MRT-Aufnahmen sowie den CT-Aufnahmen zu segmentieren und zu klassifizieren.

Methodik Der erste Teil dieser Arbeit stellt die Grundlagen aus den Bereichen der Mathematik, der digitalen Bildverarbeitung und der abbildenden Systeme dar. Zu den mathematischen Grundlagen zählen verschiedene Transformationen, die Eigenwerttheorie und lineare Gleichungssysteme, die Hesse-Matrix, Interpolationsmethoden sowie die Extremwertbestimmung von multidimensionalen Funktionen. Die digitale Bildverarbeitung gibt einen Überblick über die Bildfilterung und -segmentierung. Bei der Bildfilterung werden bestimmte Informationen hervorgehoben und andere unterdrückt. Man unterscheidet im Allgemeinen lineare, nichtlineare und hybride Filter. Die Bildsegmentierung unterteilt ein Bild in homogene Regionen durch punkt-, kanten- oder regionenorientierte Methoden. Die Abbildungseigenschaften eines Kamera- und Röntgensystems werden unter Berücksichtigung der Abbildungsfehler beschrieben.

Die Grundlagen der Anatomie, Physiologie und Pathologie des Herzens werden in einem nächsten Teil der Arbeit dargelegt. Des Weiteren wird der Stand der Forschung zur Thematik „Abbildung von Potentialverteilungen im Herzen“ zusammengefasst und ein Überblick über Elektrodenkatheter gegeben. Im Allgemeinen unterscheidet man drei Typen von Kathetern: Strang-, Basket- und Ballonkatheter. Strangkatheter bestehen aus n Elektroden in einer Reihe auf einem einzelnen Strang. Basketkatheter (*dt. Korb*) setzen sich aus mehreren Strängen (üblicherweise acht) zusammen, die eine bestimmte Anzahl Elektroden ($n = 8$) enthalten und somit eine Gesamtsumme von 64 Elektroden zur Verfügung stellen. Beim Ballonkatheter befinden sich 64 Elektroden auf einem Drahtgeflecht. Ein Ballon im Inneren des Geflechts kann mit einer Flüssigkeit (im Allgemeinen Kontrastmittel) gefüllt werden, um den Ballon zu expandieren. Die Strangkatheter dienen dem Messen und Ablatieren. Die beiden anderen werden ausschließlich zur Messung herangezogen.

Ein weiterer Teil der Arbeit stellt die Kalibrierungstechniken der abbildenden Systeme und die Methodik zur Bestimmung der dreidimensionalen Elektrodenpositionen vor. Zur Kalibrierung des Kamera- und Röntgensystems werden unterschiedliche Referenzobjekte verwendet. Für jede einzelne Kamera und jeden Röntgenbildverstärker liegt eine Kalibrierungsmatrix vor, die die Abbildungseigenschaften der Kamera bzw. des Röntgenbild-

verstärkers enthält. Nach der Kalibrierung kann die dreidimensionale Elektrodenposition aus zwei unterschiedlichen Bildern durch Lösen eines überbestimmten Gleichungssystems berechnet werden, welches aus den Bildpositionen der Elektroden und den Kalibrierungswerten aufgestellt wird. Die Bildpositionen der Elektroden im Kamera- und Röntgensystem werden durch Methoden der Bildfilterung und -segmentierung extrahiert. Durch Minimierung von Gütefunktionen werden die Transformation der Elektrodenpositionen in ein einheitliches Koordinatensystem sowie die Transformation der Elektrodenpositionen in einen Volumendatensatz realisiert. Hierbei handelt es sich um rigide Transformationen. Die Gütefunktion setzt sich aus den Abständen der Elektroden zueinander bzw. zur Thoraxoberfläche zusammen. Zur Registrierung der Elektrodenpositionen in dreidimensionalen computertomographischen Aufnahmen wird der Ballonkatheter nachmodelliert.

Ergebnisse Die Ergebnisse dieser Arbeit werden in einem weiteren Teil vorgestellt. Das Kamera- und Röntgensystem werden kalibriert und mit Referenzobjekten validiert. Es findet eine Lokalisation der Oberflächenelektroden statt, die sich auf dem Thorax eines Patienten befinden. Die dreidimensionalen Positionen verschiedener Katheter werden aus dem Röntgen- und CT-System berechnet.

Für einen Testaufbau wird eine Transformation der Elektrodenpositionen aus dem Kamera- und Röntgensystem in ein einheitliches Koordinatensystem sowie in einen dreidimensionalen Volumendatensatz durchgeführt.

Im Rahmen eines Tierexperiments (SFB 414, Teilprojekt H4) wird der modellierte Ballonkatheter aus den morphologischen CT-Aufnahmen segmentiert und in das dreidimensionale, segmentierte Tierherz positioniert. Es folgt die Projektion der gemessenen elektrischen Daten auf den Katheter.

In einer klinischen Untersuchung werden von einem Patienten morphologische MRT-Aufnahmen aufgenommen. Der Patient wird einer Ablation im Herzen mit Hilfe eines Basketkatheters unterzogen, wobei Röntgenaufnahmen sowie elektrische Daten der Elektrodenkatheter aufgenommen werden. Des Weiteren wird mittels des Kamerasystems eine Elektrodenanordnung auf dem Thorax des Patienten aufgezeichnet. Die dreidimensionalen Positionen der intrakardialen und extrakorporalen Elektroden werden berechnet und in den dreidimensionalen Volumendatensatz des Patienten positioniert.

Zusammenfassung Zusammenfassend ist zu sagen, dass durch diese Arbeit neue Möglichkeiten geschaffen werden, einen vollständigen Satz morphologischer und elektrischer Daten in Verbindung mit den dreidimensionalen Messpositionen der elektrischen Daten zu generieren. Damit können in Zukunft Simulationen der elektrischen Erregungsausbreitung validiert und an die Messdaten des individuellen Patienten angepasst werden, so dass eine optimale Therapiestrategie erarbeitet werden kann.