Konzept für die integrative, funktionelle Visualisierung des Bronchialbaums der menschlichen Lunge

Andreas Schmidt, Andres Kriete

Institut für Anatomie und Zellbiologie
Bildverarbeitungslabor, Uni-Klinikum, Aulweg 123, 35385 Giessen
Email: andreas.h.schmidt@anatomie.med.uni-giessen.de

Zusammenfassung. Computergestützte Repräsentation biologischer Organe, Gewebe und Zellen können zum besseren strukturellen und funktionellen Verständnis beitragen. Zur Strukturierung des Arbeitsablaufs von funktionellen Simulationen wird ein Konzept vorgestellt, welches am Beispiel des Organs der Lunge erläutert wird. Dabei wird aus computertomografischen Bilddaten ein strukturelles System auf der Basis finiter Elemente gewonnen. Zur Beschreibung von Gastransportprozessen werden Massentransport-Gleichungen gelöst und visualisiert.

1 Einleitung

Die anatomisch korrekte Modellierung des respiratorischen Systems der menschlichen Lunge und die funktionelle Modellierung und numerische Simulation der Gastransport- und Austauschprozesse ist ein wichtiger Schlüssel zur Verbesserung des Verständnisses der Physiologie der Atmung und bringt wichtige Fortschritte im Bereich der Lungenfunktionsdiagnostik mit sich.

Neben rein mathematischen Modellbildungen, die primär auf die Repräsentation des strukturellen Aufbaus zielen, gewinnen diejenigen Simulationen an Bedeutung, die versuchen, dynamisch-funktionelle Eigenschaften biologische Strukturen auf der Basis der Physik zu beschreiben [1]. Dazu gehören unter anderem elektrophysiologische, kinematische, elektromechanische oder thermische Prozesse. Zu berücksichtigen ist, dass gerade bei funktionellen Aspekten die strukturelle Hierarchie biologischer Strukturen Einfluss auf die Funktion hat. Gerade dieser Zusammenhang kann mit dem hier entwickelten Modell deutlich gemacht werden.

Es ist in der Regel nicht ausreichend mit nur einem Abbildungsmaßstab oder festen Bildelementen (Pixel, Voxel) zu arbeiten. Vielmehr muss das System auflösungsabhängig in Elemente zerlegt werden, die eine physikalische Berechnung zulassen. Im gleichen Moment macht jedoch die Berücksichtigung mehrerer Ebenen ein Modell zunehmend komplexer. Es ist daher vorher genau zu definieren, welche strukturellen Ebenen und funktionellen Eigenschaften der Strukturen in Kauf genommen werden müssen, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Um den Arbeitsablauf und Datenfluss zu beschreiben, wird

ein Konzept zur strukturellen und funktionellen Repräsentation biologischer Strukturen vorgestellt und diese exemplarisch auf den Bronchialbaum der Lunge angewandt.

2 Modellbildung und Simulation des Bronchialbaumes

Das Konzept, welches den Arbeitsablauf und Datenfluss zur funktionellen Simulation beschreibt, beinhaltet im wesentlichen eine strukturell-dynamische Modellierung (linienhafte Struktur) mit einer Finite-Elemente-Methode, die hierarchisch und auflösungsunabhängig ist und eine funktionelle Simulation durch computergestützte Physik mit nachgeschalteter Visualisierung.

Aufbauend auf einer Programmentwicklungen zur Visualisierung der linienhaften Topologie von Nervenzellen [2] wurde eine Weiterentwicklungen vorgenommen, welche es erlaubt, computertomografische Bilddaten des Bronchialbaums einzulesen und in ein dreidimensionales computergrafisches Modell des Bronchialbaums umzusetzen [3,4]. Darüber hinaus können höhere Verzweigungsgenerationen mit Hilfe eines asymmetrischen Verteilungs-Algorithmus modelliert werden. Die computergrafische Darstellung erlaubt einen flüssigen Übergang zwischen den einzelnen Elementen des Bronchialbaums und die Hervorhebung der Räumlichkeit durch Beleuchtungs- und Shading-Algorithmen. Die numerische Lösung von Massentransportgleichungen zur Berechnung des Gastransportes in der Lunge wird zunächst in einem eigenen Programm berechnet. Die Lösung wird dann direkt in das Modell implementiert und mit den Daten des Modells durchgerechnet. Die Ergebnisse der Simulation können farbkodiert im Modell visualisiert oder numerisch ausgegeben werden. Es werden parametrisierte Darstellungsmodi implementiert, zwischen denen der Benutzer wählen und konfigurieren kann. Mit dem Programm können unterschiedliche CT-Datensätze von Lungen eingelesen und hinsichtlich ihrer Funktion miteinander verglichen werden.

Damit wird das Studium des Einflusses der verschiedenen physikalischen Komponenten in Abhängigkeit von der Geometrie ermöglicht. Die Visualisierung kann interaktiv vom Benutzer auf individuelle Betrachtungs- und Darstellungswünsche eingestellt werden. Dies erlaubt auch einen direkten Vergleich unterschiedlicher CT-Datensätze von verschieden Lungen, z.B. krankhaft veränderte zu gesunden Lungen bezüglich deren Funktionalität.

3 Diskussion

Es wurde ein Konzept für computergestützte Repräsentation biologischer Systeme bezüglich ihrer Struktur und Funktion vorgestellt. Am Beispiel des Organs der Lunge wurde exemplarisch gezeigt, wie durch das Auswerten von CT-Bilddaten ein strukturelles Modell gewonnen werden kann. Bisherige Modelle gehen von einem idealisiertem, regelmäßig-dichotomischen Verzweigungsmuster des Bronchialbaumes aus [5,6]. Aus solchen Modellen lassen

sich daher nur in beschränkten Umfang Aussagen zur Funktionalität ableiten. Das entwickelte Programm integriert das Einlesen von strukturellen CT-Daten des Bronchialbaums, die Modellbildung, Simulation und computergrafische Darstellung. Diese Lösung kommt ohne umfangreiche Zwischenspeicherungsschritte aus, bedarf aber einer leistungsfähigen Rechenleistung. Der Gewinn an Interaktivität bezieht sich auf die Veränderung der Objekte in der gewählten Darstellungsart, wie dem Arrangieren im Raum, um das Objekt aus jedem beliebigen Blickwinkel aus zu betrachten.. Die Veränderung der Objekte ist in jeder gewählten Darstellungsart flexibel gehalten. So können zum Beispiel die Simulationsergebnisse des Gastransportes unter einzustellenden Anfangskonzentrationen getrennt voneinander oder in Kombination dargestellt werden. Das Programm erlaubt damit die Analyse des Einflusses verschiedener Geometrien von normalen und pathologisch veränderten Lungen auf die spezifischen physikalischen Anteile. Das vorgestellte Konzept ist ein flexibles Werkzeug für die Darstellung linienhafter Strukturen unterschiedlicher Herkunft und ihrer funktionellen Dynamik.

Literatur

1. Hersh JS: A survey of modeling representations and their application to biomedical visualization and simulation. Conf. Proc. VBC 1990, IEEE Comp. Society Press, pp 432-441, 1990.
2. Domke C: Visualisierung der linienhaften Struktur der Nervenzelle. Diplomarbeit FB MNI, FH Giessen, 2001.
3. Kriete A: Hierarchical data representation of lung to model morphology and function. In: (Eds. Höhne,K.-H., Kikinis, R).: Visualization in Biomedical Computing. Springer, NY, pp 399-404, 1996.
4. Kriete A: Form and function of mammalian lung: analysis by scientific computing. Adv. In Anatomy, Embryology and Cell Biology, Springer-Verlag, Berlin, 1998.
5. Talhami H: L-Systems for three-dimensional anatomical modelling: towards a virtual laboratory in anatomy, in: (Eds.)Höhne, K.-H.,Kikinis,R: Visualization in Biomedical Computing, Springer, NY, pp 393-398, 1996.
6. Weibel ER: Morphometry of the human lung. Springer, Berlin, 1963.