

Parameteroptimierung im biomechanischen 3D-Mehr-Massen-Modell

Anxiong Yang¹, Michael Stingl², Jörg Lohscheller³, Daniel Voigt¹, Ulrich Eysholdt¹, Michael Döllinger¹

¹ Abteilung für Phoniatrie und Pädaudiologie, Universitätsklinikum Erlangen, Bohlenplatz 21, 91054 Erlangen, Deutschland

² Lehrstuhl für Angewandte Mathematik II, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nögelsbachstr. 49b, 91052 Erlangen, Deutschland

³ Fachhochschule Trier, Fachbereich Informatik – Medizininformatik, Schneidershof, 54293 Trier, Deutschland

Einleitung

Die normale menschliche Stimme entsteht durch symmetrische dreidimensionale Stimmlippenbewegungen im Kehlkopf. Heiserkeit wird in der klinischen Diagnostik auf asymmetrische Stimmlippenschwingungen zurückgeführt. Bei einer Pathologie wie der funktionellen Dysphonie tritt keine sichtbare morphologische Veränderung der Stimmlippen auf, sondern eine lateral asymmetrische und auch irreguläre Dynamik während der Phonation. Stimmlippenbewegungen werden bislang mittels einer endoskopischen Hochgeschwindigkeitskamera (HG-Kamera, 2000-4000 Frames pro Sekunde (fps)) aufgezeichnet. Dies ermöglicht die Analyse der lateralen und longitudinalen Bewegungen der Stimmlippen. Zusätzlich breitet sich während der Stimmlippenbewegung eine Schleimhautwelle von Inferior nach Superior aus. Mithilfe von Versuchen an exzidierten menschlichen Hemilarynxes [1] können solche Phänomene deutlich beobachtet werden. Reale 3D-Stimmlippenbewegungen lassen sich hierbei aus *in vitro* Hemilarynx-Experimenten extrahieren, siehe Abbildung 1.

3D-Rekonstruktion des exzidierten Hemilarynx

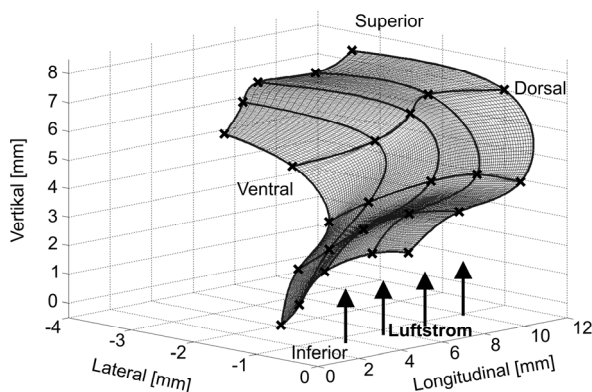


Abbildung 1: Exemplarische 3D-Rekonstruktion des exzidierten Hemilarynx. Die Markierungen \times zeigen die Positionen der 25 Beobachtungspunkte, die auf der Oberfläche einer Stimmlippe lokalisiert sind.

Um die extrahierten 3D-Stimmlippenbewegungen nachzubilden, wurde ein biomechanisches numerisches 3D-Mehr-Massen-Modell (3DM) mit modifizierbaren Modellparametern in vorangegangenen Arbeiten vorgestellt [2]. Mithilfe des Modells konnten nicht nur die gesamten 3D-Vibrationen der Stimmlippen, sondern auch verschiedene Glottisschlusstypen simuliert werden. Außerdem konnten verschiedene physiologisch interpretierbare Eigenschaften der Stimmlippenbewegungen

durch das Modell widergespiegelt werden, z.B. Steifigkeit der Stimmlippe, Phasenverzögerungen, Volumendurchfluss, usw. [2].

In der vorliegenden Studie wird eine Parameteroptimierung zur zukünftigen Anpassung an reale Stimmlippenschwingungen vorgestellt. Wegen der Nichtkonvexität der Zielfunktion werden hierbei verschiedene Optimierungsverfahren miteinander kombiniert.

Methode

3D-Mehr-Massen-Modell

Das biomechanische 3DM besteht aus jeweils (auf der linken und rechten Seite) 25 miteinander gekoppelten Masselementen [3]. Verschiedene Modellparameter wie subglottaler Druck (P^{sub}), Steifigkeit ($k_{i,s}$), Masse ($m_{i,s}$) und Ruheposition ($x_{i,s}^r$) werden modifiziert, um die Stimmlippenbewegungen nachzubilden. Indizes (i,s) bezeichnen das Masselement i in der Ebene s . Eine detaillierte Beschreibung des 3DM ist in [2] zu finden.

Parameteroptimierung

Um die physiologisch interpretierbaren Eigenschaften der Stimmlippenbewegungen approximativ zu bestimmen, wird die Differenz zwischen den vom Modell generierten 3D-Trajektorien $c_{i,s}^M[n]$ und den gegebenen 3D-Trajektorien $c_{i,s}[n]$ mittels einer Parameteroptimierungsprozedur minimiert. Während der Optimierung wird die Bewertung der Parameteroptimierung durch folgende drei Kriterien durchgeführt: der normalisierte Fehler Γ entspricht der minimierten Zielfunktion; der Korrelationskoeffizient κ beschreibt die Ähnlichkeit zwischen den beiden 3D-Trajektorien und die Genauigkeit λ zwischen den vordefinierten und den optimierten Modellparametern.

Eine Kombination aus ableitungsfreien globalen Optimierungsverfahren [*Particle Swarm Optimization* (PSO), *Simulated Annealing* (SA)] und lokalen Optimierungsverfahren [*Powell's Direction Set Method* (PDSM)] wird in der Optimierungsprozedur angewandt, siehe Abbildung 2. Durch die Optimierungsprozedur werden die verschiedenen eingeführten Modellparameter mithilfe nichtphysikalischer Optimierungsfaktoren Q sukzessive adaptiert.

Die Optimierungsstrategie beinhaltet eine Verfeinerung, bei der schrittweise immer mehr Einzelmassen berücksichtigt werden. Dazu sind drei grobe Subprozeduren durchzuführen, die entlang jeder Stimmlippenseite, jedes Querschnitts und jeder Ebene des Modells schrittweise angewendet werden.

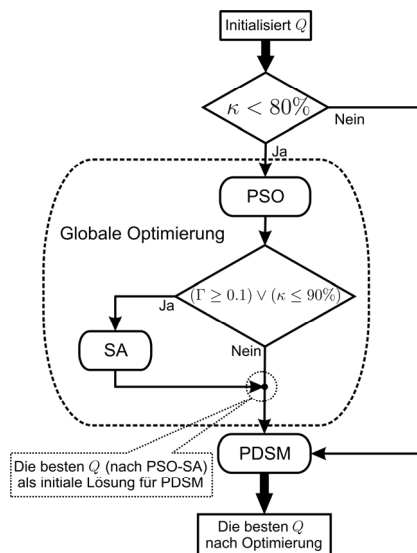


Abbildung 2: Ablaufdiagramm der kombinierten Optimierungsverfahren. Mithilfe der PSO, SA, und PDSM wird die Differenz zwischen $c_{i,s}^M[n]$ und $c_{i,s}[n]$ minimiert.

Um die Funktionalität der Parameteroptimierung zu überprüfen, wurden 50 synthetisch erzeugte symmetrische Datensätze zur Validierung verwendet, die auf vorangegangenen Studien der Stimmlippen beruhen [3]. Bei den synthetischen Datensätzen wurden fünf Muster von Glottisschlussstypen berücksichtigt, die mittels endoskopischer Aufnahmetechnik während der Phonation zu beobachten sind. Diese werden als *Rechteck*, *Sanduhr*, *Dreieck-Spitze Dorsal*, *Dreieck-Spitze Ventral*, und *Konvex* bezeichnet [4]. Außerdem wurde exemplarisch die Dynamik eines *in vitro* Hemilarynx-Experiments durch das Modell adaptiert, um die Anwendbarkeit der Optimierung zu verdeutlichen.

Ergebnisse

Die Funktionalität der Optimierungsprozedur wurde durch synthetische Daten erfolgreich evaluiert [4]. Die ermittelten durchschnittlichen Werte (Γ , κ , λ) betragen $0,07 \pm 0,03$, $96\% \pm 2\%$, und $91\% \pm 4\%$. Das vorgegebene Symmetrieverhältnis (perfekte Symmetrie = 1) rechts zu links wurde mit $1,01 \pm 0,08$ im akzeptierbaren Bereich (0,8 bis 1,2) sehr gut wiedergegeben.

Die Optimierungsprozedur wurde zusätzlich an einem Datensatz aus einem Hemilarynx-Experiment evaluiert. Als zugehörige Messwerte (Γ , κ) wurden 0,16 und 84% erreicht. Abbildung 3 zeigt die Ähnlichkeit zwischen den experimentellen 3D-Trajektorien und den durch das 3DM adaptierten 3D-Trajektorien. Die exemplarisch gezeigte Modellmasse befindet sich auf rechter Seite in dritter horizontaler Ebene im mittleren Querschnitt.

Diskussion

Ein hinreichend kleiner Fehler, der große Korrelationskoeffizient der Bewegung sowie die große Übereinstimmung der rekonstruierten Modellparameter verifizieren die Reliabilität des Optimierungsverfahrens. Die erfolgreiche Anwendung am Datensatz des Hemilarynx-Experiments zeigt die Durchführbarkeit der

Optimierungsprozedur. In Vergleich zu anderen Richtungen (lateral und vertikal) sind die Stimmlippenbewegungen in longitudinaler Richtung relativ klein [1]. Daher wurde die longitudinale Bewegung in der Optimierungsprozedur nur eingeschränkt berücksichtigt, siehe Abbildung 3 (unten). In einer weiterführenden Studie soll das Modell mit zugehöriger Optimierungsprozedur an verschiedene *in vitro* Stimmlippendynamiken angepasst werden. Aus den adaptierten Modellparametern sollen Rückschlüsse auf biomechanische Charakteristiken der Stimmlippen gezogen werden.

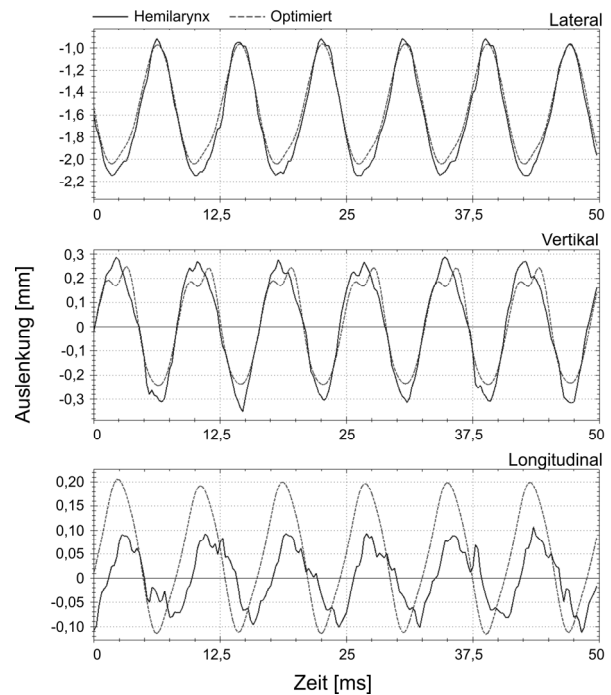


Abbildung 3: Experimentelle 3D-Trajektorien aus einem Hemilarynx-Versuch (durchgezogene Linie) und die durch die Parameteroptimierung nachgebildeten 3D-Trajektorien (gestrichelte Linie) in der mittleren Ebene und dem mittleren Querschnitt.

Literatur

- [1] Boessenecker, A., Berry, D. A., Lohscheller, J., Eysholdt, U. and Döllinger, M.: Mucosal Wave Properties of a Human Vocal Fold. *Acta Acustica United with Acustica* (2007), vol. 93, 815-823
- [2] Yang, A., Berry, D. A., Lohscheller, J., Voigt, D., Eysholdt, U., and Döllinger, M.: Biomechanical Modeling of the Three-dimensional Aspects of Human Vocal Fold Dynamics. *J. Acoust. Soc. Am.* (2010), vol. 127, 1014-1031
- [3] Wurzbacher, T., Schwarz, R., Döllinger, M., Hoppe, U., Eysholdt, U., and Lohscheller, J.: Model Based Classification of Nonstationary Vocal Fold Vibrations. *J. Acoust. Soc. Am.* (2006), vol. 53, 1099-1108
- [4] Yang, A., Lohscheller, J., Stingl, M., Voigt, D., Eysholdt, U., und Döllinger, M.: Optimierung eines 3D-Mehr-Massen-Modells der Stimmlippendynamik. In *Proc. DGPP* (2009), V17