Analysis and Modeling of Vocal Fold 3D-Dynamics during Human Phonation

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Anxiong Yang

Erlangen 2011

Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung : 20.12.2010

Tag der Promotion : 14.02.2011

Dekan : Prof. Dr. R. German

Berichterstatter : Prof. Dr. J. Hornegger

Prof. Dr. Dr. U. Eysholdt

Analyse und Modellierung der 3D-Stimmlippenbewegungen während der Phonation

Der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg
zur Erlangung des Grades

DOKTOR-INGENIEUR

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Anxiong Yang

Erlangen 2011

Kommunikationsstörungen -
Berichte aus Phoniatrie und Pädaudiologie

Band 20

Anxiong Yang

**Analysis and Modeling of Vocal Fold
3D-Dynamics during Human Phonation**

D29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag
Aachen 2011

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9934-7

ISSN 1436-1175

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

Danksagung

Bei Herrn Prof. Dr. Joachim Hornegger möchte ich mich für die gewährte Unterstützung und die Übernahme des Hauptreferats bedanken. Herrn Prof. Dr. Dr. Ulrich Eysholdt danke ich herzlich für die hochwertigen Arbeitsbedingung in seiner Abteilung, die professionelle Einführung in die Medizin und die Überlassung des Themas. Sie haben für Zuspruch nicht nur in fachspezifischen sondern auch in privaten Gesprächen gesorgt.

Meinem Betreuer Prof. Dr. Michael Döllinger danke ich besonders für die Aufnahme in seiner interdisziplinären Projektgruppe und die hilfreiche Unterstützung mit wertvollen Ratschlägen. Er brachte mir viel Geduld entgegen und sorgte mit vielen innovativen Hinweisen für das Gelingen meiner interdisziplinären Forschung. Auch möchte ich Herrn Prof. Dr. Jörg Lohscheller danken, der mir mit seinem Fachwissen und seiner konstruktiven Kritik immer wieder den nötigen Schwung gegeben hat.

Bei Herrn Prof. David A. Berry, Herrn PDDr. Stefan Becker und Herrn Prof. Dr. Michael Stingl möchte ich für die tatkräftige Unterstützung bedanken. Bedanken möchte ich mich auch bei allen Mitgliedern der DFG Forschergruppe FOR894, die mir den gewissenhaften und den ehrlichen Stil der deutschen Wissenschaftler zeigten.

Meinen Kollegen Herrn Björn Hüttner, Herrn Georg Luegmair und Dr. Anke Ziethe danke ich für die Zusammenarbeit, die vielen Diskussionen, die Hilfen, die Anregungen, sowie die angenehme und fruchtbare Arbeitsatmosphäre. Ein besonderes Wort des Dankes möchte ich an meinen ehemaligen Kollegen Herrn Dr. Daniel Voigt richten, der nicht nur meine schlechte Laune und meine Zeiten der überstrapazierten Nerven geduldet und überstanden hat, sondern auch eigene Ideen in das Projekt einbrachte. Ein herzlicher Dank geht auch an Frau Ute Katz, Dr. Maria Schuster, Dr. Anne Schützenberger.

Ganz besonders möchte ich mich bei Jesus Christus, meinen Eltern, Tante Ti Wu, Geliebte Jing Yang und Freunden Shan, Martin, Yu, Xueqian, Zengyu, Thomas, Yunjun, sowie meiner Christengemeinde bedanken, die mir den Rücken während der Anfertigung dieser Arbeit gestärkt haben.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abteilung Phoniatrie und Pädaudiologie des Universitätsklinikums Erlangen bedanken, die auf unterschiedliche Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Projekts EY15/16 innerhalb der DFG Forschergruppe FOR894/1 angefertigt.

Erlangen, Februar 2011

„Die Forschung ist, was ich tue, wenn ich nicht weiß, was ich tue.“

—Werner von Braun

Abstract

Die menschliche Stimme ist das Trägersignal der lautsprachlichen Kommunikation. Es entsteht primär durch symmetrische Schwingungen der Stimmlippen im Kehlkopf während der Phonation. Bei gewissen Pathologien wie der funktionellen Dysphonie tritt keine sichtbare morphologische Veränderung der Stimmlippen auf, sondern eine lateral asymmetrische oder auch irreguläre Bewegung. Mittels einer konventionellen endoskopischen Hochgeschwindigkeitskamera werden die Stimmlippenschwingungen bislang in einer 2D Horizontalebene aufgezeichnet. In bisherigen Untersuchungen wurde die Bewegung meist durch Zwei- oder Mehr-Massen-Modelle nachgebildet, die lediglich laterale Auslenkungen bzw. die 2D Glottisfläche berücksichtigten. Dies beschreibt die physiologischen Vorgänge jedoch nur unvollständig.

In aktuellen *in vitro* Studien zeigte sich, dass während der Phonation zusätzliche nicht zu vernachlässigende vertikale Bewegungskomponenten (d.h. Randkantenverschiebung) der Stimmlippen auftreten. Die gesamten 3D Stimmlippenbewegungen lassen sich bisher *in vivo* am Patienten nicht messen, da das Endoskop nur die laterale Projektion des Kehlkopfes aufzeichnet.

In der vorliegenden Arbeit wird ein biomechanisches 3D-Mehr-Massen-Modell mit zugehöriger Optimierungsprozedur entwickelt, mit der sich realistische Stimmlippenbewegungen in 3D nachbilden lassen. Die physikalischen Parameter wie Massen, Steifigkeit und Volumendurchfluss werden durch die modellbasierte Analyse nach Anpassung an die experimentelle Bewegung bestimmt. Diese Parameter sind nicht direkt während der Phonation messbar. Mithilfe der errechneten Parameter ist die objektive Quantifizierung der Bewegungen möglich. Durch die Nichtkonvexität der Zielfunktion und der fehlenden stetigen Differenzierbarkeit des vorhandenen gewöhnlichen Differentialgleichungssystems werden ableitungsfreie globale und lokale Optimierungsverfahren miteinander kombiniert. Die Optimierungsstrategie beinhaltet eine stufenweise Verfeinerung, bei der sukzessive immer mehr Einzelmassen berücksichtigt werden. Die Funktionalität der Optimierungsprozedur wird mit synthetisch erzeugten symmetrischen Datensätzen bei verschiedenen Glottisschlusstypen gezeigt. Die Methode wird weiterhin auf verschiedene *in vitro* experimentelle Hemilarynxdaten angewandt. Es werden biomechanische Parameter extrahiert und analysiert, um die physiologisch interpretierbaren Eigenschaften der Stimmlippenbewegungen in 3D widerzuspiegeln. Dies liefert auch erste Erkenntnisse über die Verteilung von Gewebesteifigkeiten während der Phonation.

Contents

1	Introduction	1
2	Fundamentals	5
2.1	Principle of Voice Production	5
2.2	Pathological Voice	8
2.3	Examination Methods	9
2.4	High-Speed Recordings and Image Processing	9
2.5	Hemilarynx Experiments	12
2.6	3D Dynamics and Mucosal Wave	15
2.7	Different Glottal Closure Types	15
2.8	Development of Vocal Fold Modeling	19
2.8.1	Two-Mass-Model	19
2.8.2	2D-Multi-Mass-Model	19
3	Modeling of 3D Vocal Fold Dynamics	21
3.1	3D-Multi-Mass-Model	22
3.2	Model Parameter Initialization	26
3.3	Pressure Function	27
3.4	Applied Forces in the 3D-Model	28
3.4.1	Anchor Force	28
3.4.2	Vertical Coupling Force	28
3.4.3	Longitudinal Coupling Force	30
3.4.4	Collision Impact Force	30
3.4.5	Driving Force	32
4	Feasibility Evaluation of the 3D-Multi-Mass-Model	37
4.1	Results	37
4.1.1	Volume Flow Rate and Minimal Glottal Area	37
4.1.2	Pressure and Corresponding Glottal Area	40
4.1.3	Dynamics of the 3D-Multi-Mass-Model	41

4.1.4	Comparison of Dynamics	48
4.2	Discussion	51
4.2.1	Generation of the Volume Flow Rate, Pressure and Glottal Area	51
4.2.2	Overall Dynamics of the 3D-Multi-Mass-Model	53
4.2.3	Applicability of the 3D-Multi-Mass-Model	55
5	Parameter Optimization Procedure	59
5.1	Model Setup	59
5.2	Automatic Parameter Optimization	60
5.2.1	Initialization of Optimization Parameters	60
5.2.2	Objective Function	62
5.2.3	Optimization Algorithms	65
5.3	Progressive Optimization Procedure	66
6	Validation via Synthetic Data	75
6.1	Synthetic Data	75
6.2	Results	77
6.2.1	Global Measures	77
6.2.2	Reproducibility of Parameters	78
6.2.3	Influence of Weighting Coefficients	78
6.2.4	Influence of Glottal Closure Type and Gender	79
6.3	Discussion	81
6.3.1	Validation of Feasibility via Global Measures	81
6.3.2	Reproducibility of Parameters	82
6.3.3	Influence of Weighting Coefficients	83
6.3.4	Glottal Closure Type and Gender	83
6.3.5	Performance of Optimization Procedure	84
7	Application to <i>in vitro</i> Hemilarynx Experiments	85
7.1	Hemilarynx Experimental Data	85
7.2	Application to One Hemilarynx Data Set	86
7.2.1	Results	86
7.2.2	Discussion	88
7.3	Application to Different Hemilarynx Data Sets	91
7.3.1	Results	92
7.3.2	Statistical Analysis	101
7.3.3	Discussion	108
8	Summary and Outlook	117

CONTENTS

iii

A Optimization Results after Applications	121
Abbreviations and Notations	143
Bibliography	147
List of Figures	161
List of Tables	165
Curriculum Vitae	167