

| | |
|--------------|---|
| Title | 声帯麻痺による異常声帯振動の病態解析とそのモデリングに関する研究 |
| Author(s) | 永沼, 宙 |
| Citation | |
| Issue Date | 2008-03 |
| Type | Thesis or Dissertation |
| Text version | author |
| URL | http://hdl.handle.net/10119/4327 |
| Rights | |
| Description | Supervisor:徳田功, 情報科学研究科, 修士 |

修士論文

声帯麻痺による異常声帯振動の病態解析と
そのモデリングに関する研究

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

永沼 宙

2008年3月

修士論文

声帯麻痺による異常声帯振動の病態解析と
そのモデリングに関する研究

指導教官 徳田 功 准教授

審査委員主査 徳田 功 准教授
審査委員 党 建武 教授
審査委員 赤木 正人 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報処理学専攻

610064 永沼 宙

提出年月: 2008年2月

概要

声帯麻痺による音声障害は声帯の複雑な非線形振動に起因しており、病態との関連については未解明な問題が多い。声帯数理モデルの異常振動解析による音声障害の理解は、音声外科手術に際しても重要な知見を与える可能性がある。声帯モデル研究では、単純な2質量モデルから複雑な多質量モデルに至るまで様々なモデルが存在するが、これまでは、声帯の標準的かつ定性的な性質に着目することが主流であり、実際の声帯計測データの個々の定量的性質を反映したモデル化を目指した例は少ない。

本研究では、高速度デジタル撮影法を用いて臨床的に計測された異常な声帯振動のデータに対して、その定量的性質を実現するために、数理モデルのパラメータ推定を行う。数理モデルには非対称な二質量モデルを用い、声門下圧、左右の声帯張力、声門開口面積などのパラメータを推定する。外科手術前後のデータを用いることにより、手術効果がパラメータの推定結果に反映されているかを判定する。これによって、数理モデルによる音声外科手術のシミュレータが構築可能かを検討する。

目次

| | | |
|-------|-----------------------------------|----|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | はじめに | 1 |
| 1.2 | 本論文の構成 | 2 |
| 第2章 | 声帯麻痺とデジタルハイスピードカメラデータ | 3 |
| 2.1 | 使用するデータ | 3 |
| 2.2 | 声帯麻痺と手術法 | 5 |
| 2.3 | デジタルハイスピードカメラデータの補正 | 5 |
| 第3章 | 数理モデル | 8 |
| 3.1 | 2質量モデル | 8 |
| 3.2 | SHモデル | 8 |
| 3.3 | SHモデルの非対称性 | 10 |
| 第4章 | パラメータ推定手法 -従来法- | 11 |
| 4.1 | 評価関数 | 11 |
| 4.2 | パラメータ推定範囲 | 11 |
| 4.2.1 | パラメータ推定結果 | 12 |
| 第5章 | 提案するパラメータ推定手法 | 15 |
| 5.1 | 評価関数 | 15 |
| 5.2 | Nelder-Mead アルゴリズム | 16 |
| 5.3 | 推定における初期値 | 16 |
| 5.4 | 声門波形解析 | 16 |
| 5.4.1 | パラメータ推定環境 | 17 |
| 5.5 | 推定結果 | 20 |
| 第6章 | 推定するパラメータの追加 | 35 |
| 6.1 | 質量,ばね定数,結合ばね定数における Q_α の分離 | 35 |
| 6.2 | 上側質量と下側質量における Q_α の分離 | 35 |
| 6.3 | パラメータ推定手順 | 36 |
| 6.4 | パラメータ推定結果 | 36 |

| | | |
|-----|-------|----|
| 第7章 | 結論 | 66 |
| 7.1 | まとめ | 66 |
| 7.2 | 今後の課題 | 66 |

目次

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | デジタルハイスピードカメラを用いた声帯振動撮影のブロック図 | 3 |
| 2.2 | 水平線上の輝度と閾値 . 文献 [1] の図 7. より引用 | 4 |
| 2.3 | 撮影された声帯振動から声門波形を生成 . 文献 [1] の図 7. より引用 | 5 |
| 2.4 | 麻痺声帯振動の例 | 6 |
| 2.5 | 声帯内注入法模式図 文献 [1] の図 4. より引用 | 6 |
| 2.6 | 撮影データにおける画像上の声門長の差 左:手術前 右:手術後 COPY- RIGHT (C) 2006-2007 Miwako Kimura, Hiroshi Imagawa. | 7 |
| 3.1 | SH モデルの概略図 | 9 |
| 4.1 | Q_α の取る範囲 | 12 |
| 4.2 | 患者 B の手術前のデジタルハイスピードカメラと Döelinger <i>et al.</i> の手法に よる推定波形上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: 推定波形実線: 左側声帯 破線: 右側声帯 | 13 |
| 5.1 | Q_α の変化に伴う Γ の軌道の変化の例 $P_S = 25\text{cmH}_2\text{O}$, $a_{rest} = 0.07\text{cm}^2$ | 18 |
| 5.2 | 最適化フローチャート | 19 |
| 5.3 | 患者 A の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯 | 22 |
| 5.4 | 患者 A の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯 | 22 |
| 5.5 | 患者 B の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯 | 24 |
| 5.6 | 患者 B の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯 | 24 |
| 5.7 | 患者 C の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯 | 26 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.8 | 患者 C の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下:シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線:右側声帯 | 26 |
| 5.9 | 患者 D の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下:シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線:右側声帯 | 28 |
| 5.10 | 患者 D の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下:シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線:右側声帯 | 28 |
| 5.11 | 患者 E の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下:シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線:右側声帯 | 30 |
| 5.12 | 患者 E の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下:シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線:右側声帯 | 30 |
| 5.13 | 患者 F の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下:シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線:右側声帯 | 32 |
| 5.14 | 患者 F の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下:シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線:右側声帯 | 32 |
| 5.15 | 患者 G の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下:シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線:右側声帯 | 34 |
| 5.16 | 患者 G の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下:シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線:右側声帯 | 34 |
| 6.1 | 患者 A の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の 上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の 係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破 線:右側声帯 | 40 |
| 6.2 | 患者 A の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の 上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の 係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破 線:右側声帯 | 41 |

| | | |
|------|--|----|
| 6.3 | 患者 B の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 44 |
| 6.4 | 患者 B の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 45 |
| 6.5 | 患者 C の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 48 |
| 6.6 | 患者 C の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 49 |
| 6.7 | 患者 D の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 52 |
| 6.8 | 患者 D の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 53 |
| 6.9 | 患者 E の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 56 |
| 6.10 | 患者 E の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 57 |
| 6.11 | 患者 F の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 60 |

| | | |
|------|--|----|
| 6.12 | 患者 F の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 61 |
| 6.13 | 患者 G の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 64 |
| 6.14 | 患者 G の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯. | 65 |

表 目 次

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | 患者一覧表 | 4 |
| 2.2 | 各患者における声門の座標 | 7 |
| 4.1 | Döelinger <i>et al.</i> の手法により推定されたパラメータ | 13 |
| 4.2 | 推定波形の解析結果 | 14 |
| 5.1 | 患者 A の手術前後において推定されたパラメータ | 21 |
| 5.2 | 患者 A の声門波形解析結果 | 21 |
| 5.3 | 患者 B の手術前後において推定されたパラメータ | 23 |
| 5.4 | 患者 B の声門波形解析結果 | 23 |
| 5.5 | 患者 C の手術前後において推定されたパラメータ | 25 |
| 5.6 | 患者 C の声門波形解析結果 | 25 |
| 5.7 | 患者 D の手術前後において推定されたパラメータ | 27 |
| 5.8 | 患者 D の声門波形解析結果 | 27 |
| 5.9 | 患者 E の手術前後において推定されたパラメータ | 29 |
| 5.10 | 患者 E の声門波形解析結果 | 29 |
| 5.11 | 患者 F の手術前後において推定されたパラメータ | 31 |
| 5.12 | 患者 F の声門波形解析結果 | 31 |
| 5.13 | 患者 G の手術前後において推定されたパラメータ | 33 |
| 5.14 | 患者 G の声門波形解析結果 | 33 |
| 6.1 | 患者 A の手術前後において推定されたパラメータ | 38 |
| 6.2 | 患者 A の声門波形解析結果 | 39 |
| 6.3 | 患者 B の手術前後において推定されたパラメータ | 42 |
| 6.4 | 患者 B の声門波形解析結果 | 43 |
| 6.5 | 患者 C の手術前後において推定されたパラメータ | 46 |
| 6.6 | 患者 C の声門波形解析結果 | 47 |
| 6.7 | 患者 D の手術前後において推定されたパラメータ | 50 |
| 6.8 | 患者 D の声門波形解析結果 | 51 |
| 6.9 | 患者 E の手術前後において推定されたパラメータ | 54 |
| 6.10 | 患者 E の声門波形解析結果 | 55 |
| 6.11 | 患者 F の手術前後において推定されたパラメータ | 58 |

| | |
|---|----|
| 6.12 患者 F の声門波形解析結果 | 59 |
| 6.13 患者 G の手術前後において推定されたパラメータ | 62 |
| 6.14 患者 G の声門波形解析結果 | 63 |

第1章 序論

1.1 はじめに

人間の発声では声帯振動が重要な役割を果たしている。声帯麻痺に代表される声帯疾患を発症により、息漏れ、ハスキーな声や弱い声などの病的音声の原因となる。日常会話において病的音声は聞き取りにくく、コミュニケーションの障害の原因となるため、個人の生活の質が損なわれる。近年の医療技術の進歩はめざましく、声帯疾患に関する研究も進んできているが、声帯麻痺による声帯萎縮症に起因した音声障害は、萎縮した声帯の複雑な非線形振動のために、病態との関連について未解明な問題が多い。声帯麻痺に対する外科手術としては披裂軟骨内転法や声帯内脂肪注入法などが存在する。これらの手術による改善効果を予測することが重要であるが、通常手術計画は医師の経験等に依存する点が大きいが、そのため、術による改善効果が医師の予想よりはるかに小さい場合がある。もし手術前後のシミュレーションが可能となり、外科手術が声帯振動に与える影響などが解明されれば、手術の改善効果を予測することができ、手術効果をより向上させることが可能となると考えられる。また、そのシミュレーション結果はインフォームドコンセントにおいても有益な情報となる。

異常振動解析による音声障害への理解は、音声外科手術に際しても重要な知見を与える可能性がある。そのため、摘出喉頭を用いた吹鳴実験等の生理学的な実験や、声帯数理モデルを用いたシミュレーションがこれまでも多数行われている。声帯モデル研究においては、単純な2質量モデルから複雑な多質量モデルに至るまで様々なモデルが存在する。しかし、これまでの声帯モデル研究では、声帯の標準的かつ定性的な性質に着目することが主流であり、実際の声帯計測データの個々の定量的性質を反映したモデル化を目指した例は少ない。

病的音声の解析の際に重要な要素は、音響現象、声帯振動、声帯の病態の3点である。声帯の病態は異常声帯振動を作り出し、異常声帯振動は病的音声を生成し、その音声は音響現象として観測される [1]。音響現象と声帯振動の関連付けはこれまで報告されているが、声帯麻痺による異常声帯振動と病態の関係は未解決な点があるのが現状である。木村はデジタルハイスピードカメラを用い撮影されたデータにより手術前後の病態と声帯振動の変化を比較し、病態が作り出す声帯振動の解析を行った [1]。デジタルハイスピードカメラデータは、音響データに比べ情報量が非常に多く、声帯振動の解析に有用である。Döllinger *et al.* はデジタルハイスピードカメラデータを用いて振動パラメータを抽出し、Steinecke・Herzel の非対称二質量モデル [4] を用いた声帯振動のモデリングを行った [5]。

本研究では、デジタルハイスピードカメラを用いて臨床的に計測された声帯の異常振動データに対して、その定量的モデリングを実現するために、数理モデルのパラメータ推定を行う。数理モデルには、Steinecke・Herzel の非対称二質量モデルを用い、声門下圧、左右の声帯張力、声門開口面積を推定する。外科手術前後のデータを用いることにより、手術効果がパラメータの推定結果に反映されているかを判定する。これによって、数理モデルによる音声外科手術のシミュレータが構築可能かを検討する。

1.2 本論文の構成

本論文は7章で構成される。第1章は本研究の導入部にあたる。第2章は本研究で使用する患者のデータの詳細と疾患である声帯麻痺について記述する。第3章は本研究で使用する数理モデルである2質量モデルについて記述する。第4章は2質量モデルのパラメータ推定手法について述べた後、提案した手法による2質量モデルのパラメータ推定結果を示す。第5章は推定波形精度向上のため、2質量モデルの拡張法を提案し、そのパラメータ推定結果と従来モデルについての比較を述べる。第6章は結論として、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

第2章 声帯麻痺とデジタルハイスピードカメラデータ

デジタルハイスピードカメラデータは、声帯を直接内視鏡で高速撮影したデータである。デジタルハイスピードカメラで撮影された映像は音響情報のみのデータと比較して情報量が多く、声帯振動の解析に有用である。撮影法のブロック図を図 2.1 に示す。

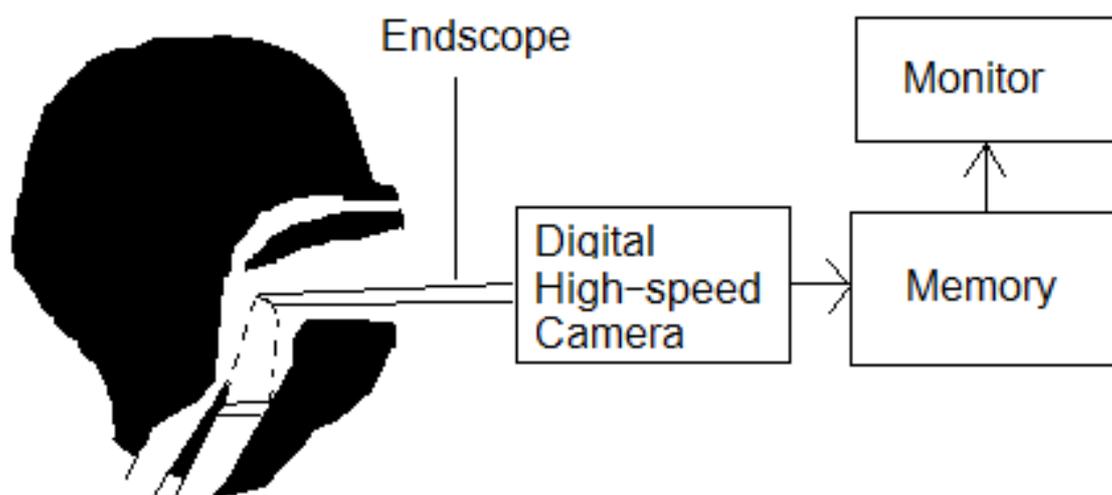


図 2.1: デジタルハイスピードカメラを用いた声帯振動撮影のブロック図

2.1 使用するデータ

本研究で用いたデータは、表 2.1 で示した患者の手術前後のデジタルハイスピードカメラを用いて撮影された声門波形である。全ての患者の症状は声帯麻痺であり、手術には声帯内注入法が用いられた。撮影されたデジタルハイスピードカメラデータのサンプリング周波数は 4500 Hz、画像はモノクロで画素数は 256 × 256 pixels である。撮影時間は患者 A,B は 222 ms (1000 フレーム)、患者 C~G は 111ms (500 フレーム) である。

表 2.1: 患者一覧表

| 患者名 | 性別 | 年齢 |
|-----|----|----|
| A | 女 | 57 |
| B | 女 | 70 |
| C | 女 | 21 |
| D | 女 | 57 |
| E | 女 | 56 |
| F | 男 | 70 |
| G | 男 | 69 |

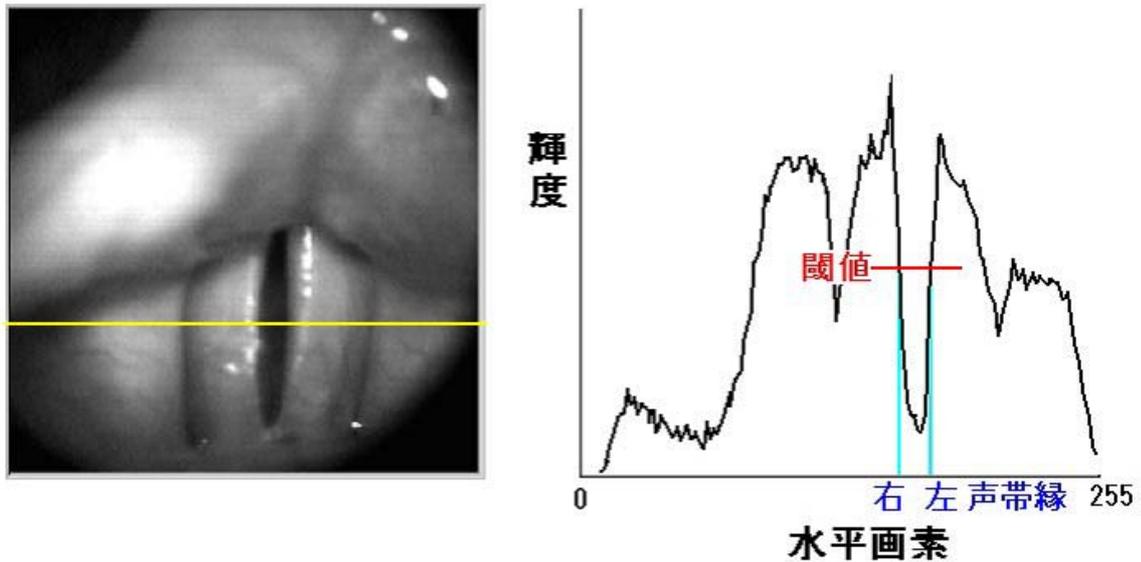


図 2.2: 水平線上の輝度と閾値．文献 [1] の図 7. より引用．

声門波形はデジタルハイスピードカメラにより撮影された画像を解析することで得ている．図 2.2 に示すように，撮影された画像の声門を横切る 1 水平走査線上で各画素の輝度を調べ，輝度が閾値より暗い部分を声門と定義し，声帯の左右の端点を抽出したものを声門波形とした．

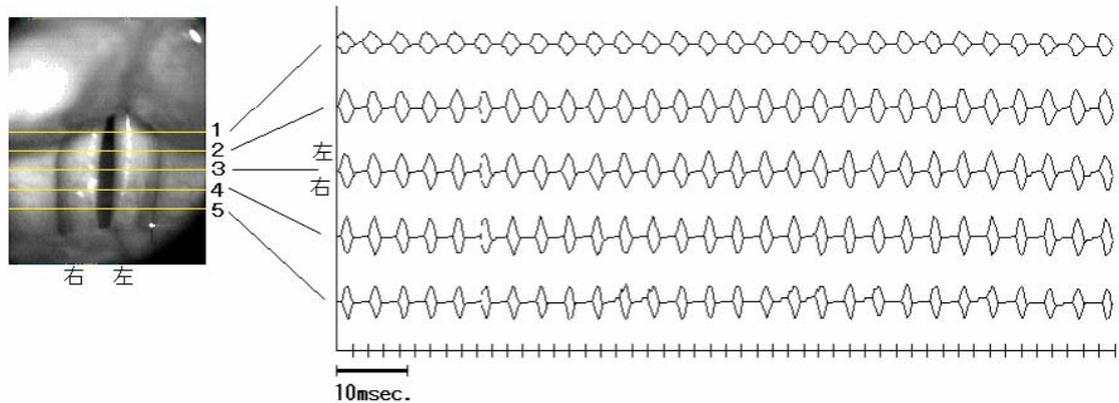


図 2.3: 撮影された声帯振動から声門波形を生成．文献 [1] の図 7. より引用．

図 2.3 に示すように，声門全体の時間的変化を調べるため，各撮影データにおいて発声中の声門を前後方向に 5 等分し各部分での声門波形を生成した．また，声門全体の時間的変化を調べるため，各撮影データにおいて発声中の声門を前後方向に 5 等分し各部分での声門波形を生成した．生成した波形のうち，撮影された声帯の振動をよく表しているのは中央の 3 番のデータであるため，本研究では特に記載がない限りは 3 番のデータを使用する．

2.2 声帯麻痺と手術法

疾患などの原因により声帯麻痺を発症してしまうと，声門が完全に閉じない，声帯が萎縮してしまい振幅が小さくなるなどの症状が発生する．また，多くの場合片側に発生するので声帯振動の対称性が崩れてしまう [7]．麻痺声帯振動の例を図 2.4 に示す．図 2.4 から声門が閉鎖していない様子や，左右の声帯の振動周波数が異なることが分かる．

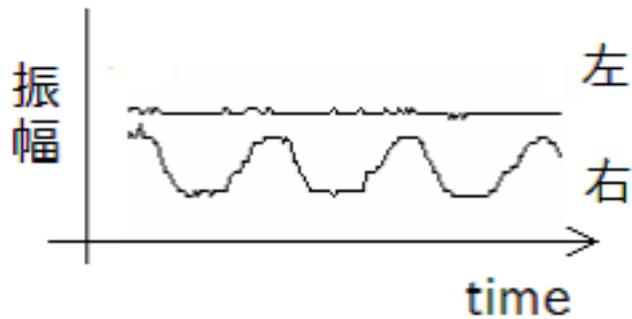


図 2.4: 麻痺声帯振動の例

このような声帯麻痺の症例に対しては手術による治療が行われる。声帯麻痺に対する一般的な手術法には、声帯内注入法や披裂軟骨内転術がある。図 2.5 に声帯内注入法の概略図を示す。声帯内注入法は、主にコラーゲンなどの注入材料を声帯に注入材料を充填し、質量や硬さを調整すること、静止状態の声門開口面積を変化させることを主な目的として行われる手術である。この手術による声門開口面積の変化をモデルに反映させることが本研究の大きな狙いである。

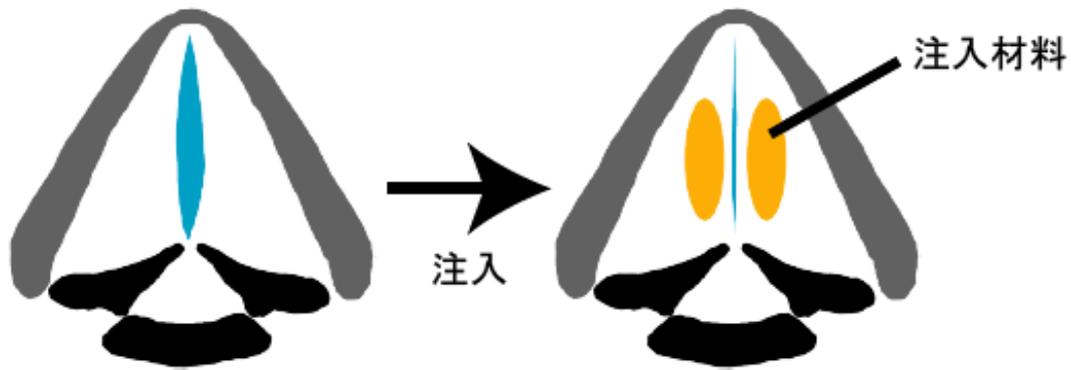


図 2.5: 声帯内注入法模式図 文献 [1] の図 4. より引用。

2.3 デジタルハイスピードカメラデータの補正

デジタルハイスピードカメラによって撮影された声門波形の振幅は、pixel を単位とした値で表現される。一方、SH モデルにより生成される波形の振幅は、cm を単位とした値

で表現される．その上，図 2.1 に示す内視鏡と声帯の距離を一定に保つのは困難である．図 2.6 は同じ患者の手術前後で撮影したものであるが，このように声帯と内視鏡の距離が変化してしまうこと分かる．したがって，1pixel が対応する長さの実測値が変動してしまうため，ピクセルによる値を何らかの方法で正規化し，実測値を推定する必要がある．

ここでは，画像の声門の前後長を標準的な声門の前後長と等しいと仮定し，波形の振幅を pixel から cm に変換する．表 2.2 に各患者の声門の位置を示す．表 2.2 内の数値の単位はすべて pixel である．また，標準的な声門の前後長として男性が 1.4cm，女性が 0.7cm とし，式 2.1 より 1pixel が対応する長さを求める．

$$1\text{pixel 当たりの長さ} = \frac{\text{標準的な声門の前後長} * \text{ハイスピードカメラデータ}}{\sqrt{(\text{x 座標 1} - \text{x 座標 2})^2 + (\text{y 座標 1} - \text{y 座標 2})^2}} \quad (2.1)$$

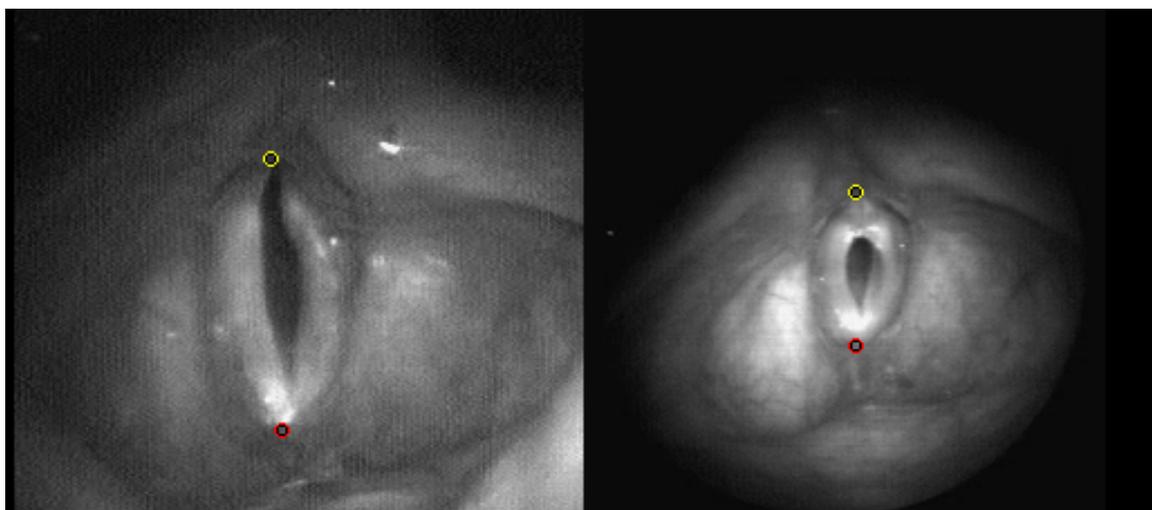


図 2.6: 撮影データにおける画像上の声門長の差 左:手術前 右:手術後 COPYRIGHT (C) 2006-2007 Miwako Kimura, Hiroshi Imagawa.

表 2.2: 各患者における声門の座標

| 患者名 | 手術前後 | 端点 1 | | 端点 2 | |
|-----|------|--------|--------|--------|--------|
| | | x 座標 1 | y 座標 1 | x 座標 2 | y 座標 2 |
| A | 手術前 | 180 | 142 | 166 | 187 |
| | 手術後 | 187 | 166 | 169 | 208 |
| B | 手術前 | 182 | 136 | 170 | 195 |
| | 手術後 | 164 | 139 | 155 | 205 |
| C | 手術前 | 177 | 121 | 182 | 198 |
| | 手術後 | 158 | 101 | 160 | 209 |
| D | 手術前 | 184 | 91 | 171 | 205 |
| | 手術後 | 176 | 96 | 162 | 184 |
| E | 手術前 | 174 | 87 | 168 | 211 |
| | 手術後 | 189 | 117 | 183 | 206 |
| F | 手術前 | 203 | 74 | 197 | 230 |
| | 手術後 | 169 | 100 | 186 | 199 |
| G | 手術前 | 171 | 159 | 171 | 190 |
| | 手術後 | 144 | 123 | 131 | 192 |

第3章 数理モデル

声帯の数理モデルには，単純な2質量モデルから複雑な多質量モデルなど，多数のモデルが存在する．ここでは，本研究で使用するモデルである2質量モデルについて取り上げる．

2質量モデルは声帯の数理モデルとしては非常に単純なモデルでありながら，声帯の基本的な性質を表すことができるモデルである．

3.1 2質量モデル

声帯の2質量モデルは，Ishizaka と Flanagan により 1972 年に提案された [2]．2質量モデルは1つの声帯が2個の結合した振動子の組によって表されたモデルである．このモデルをベースとして様々な変更を施したモデルが存在する．Ishizaka と Isshiki は病的音声のシミュレーションのため，Ishizaka と Flanagan のモデルに非対称性を導入した [3]．さらに Steinecke と Herzel は Ishizaka と Isshiki のモデルの簡略化を行った [4]．非対称性を考慮した2質量モデルにより，声帯麻痺による非対称な左右の声帯の振動を表すことが出来ると考えられる．そこで本研究では，Steinecke と Herzel のモデル（以下 SH モデル）を使用する．

3.2 SH モデル

Fig.3.1 に SH モデルの概略図を示す．SH モデルの振動は以下の方程式 (3.1) および (3.2) で表される．

$$m_{i\alpha}\ddot{x}_{i\alpha} + r_{i\alpha}\dot{x}_{i\alpha} + k_{i\alpha}x_{i\alpha} + \Theta(-a_i)c_{i\alpha}\left(\frac{a_i}{2l}\right) + k_{c\alpha}(x_{i\alpha} + x_{j\alpha}) = \bar{F}_i(x_{1l}, x_{1r}, x_{2l}, x_{2r}), \quad (3.1)$$

$$\Theta(x) = \begin{cases} \tanh\left[50\left(\frac{x}{x_0}\right)\right], & x > 0, \\ 0, & x \leq 0, \end{cases} \quad (3.2)$$

$$i, j = \begin{cases} 1: & \text{lower mass,} \\ 2: & \text{upper mass,} \end{cases} \quad \alpha = \begin{cases} l: & \text{left side,} \\ r: & \text{right side.} \end{cases}$$

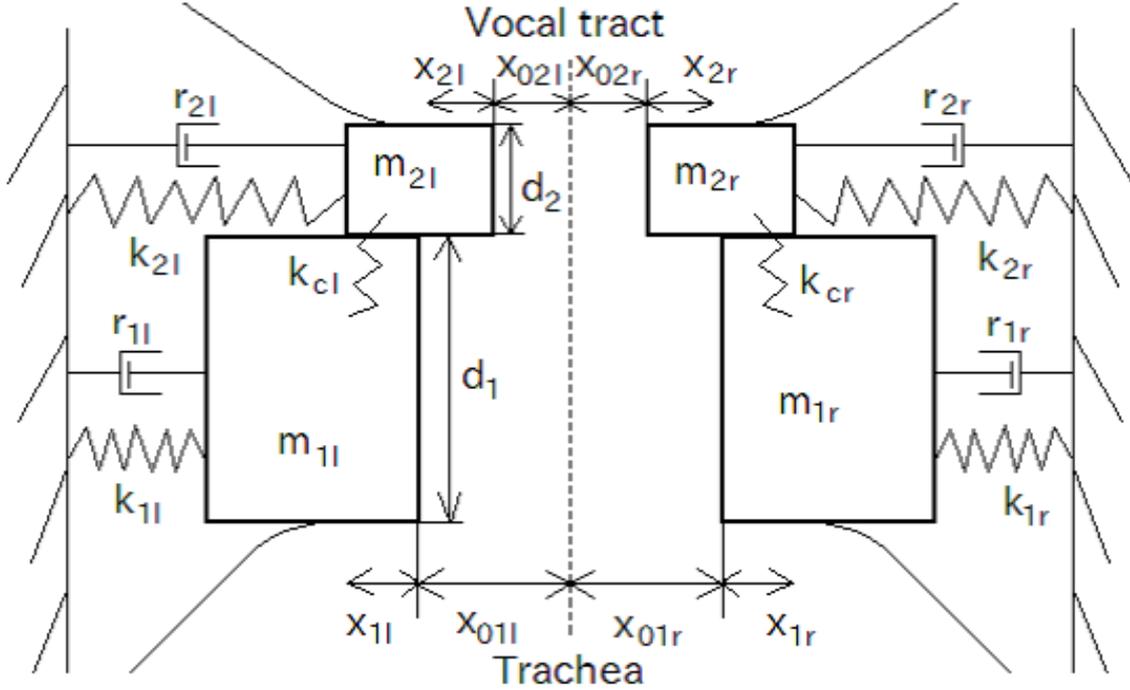


図 3.1: SH モデルの概略図

ここで $m_{i\alpha}$ は質量, $r_{i\alpha}$ は減衰係数, $k_{i\alpha}$ はばね定数, $c_{i\alpha}$ は声帯衝突時の追加弾性係数, $k_{c\alpha}$ は質点 m_1 と m_2 の結合ばね定数, x_i は静止状態からの距離, $F_{i(x)}$ は声帯にかかる力である. F_i は声帯の長さ l , 質点の厚さ d_i , 質点にかかる圧力 P_i を用い, 以下の式 (3.3) で表される.

$$F_i = l d_i P_i \quad (3.3)$$

P_i はベルヌーイ方程式により以下の式 (3.4) から (3.7) で表すことができる.

$$P_1 = P_S \left[1 - \Theta(a_{\min}) \left(\frac{a_{\min}}{a_1} \right)^2 \right] \Theta(a_1) \quad (3.4)$$

$$P_2 = 0 \quad (3.5)$$

$$a_i = a_{0i} + l(x_{il} + x_{ir}) \quad (3.6)$$

$$a_{\min} = \min(a_1, a_2) \quad (3.7)$$

ここで P_S は声門下圧, a_{0i} は圧力のない状態における声門開口面積である. 本研究では $a_{01} = a_{02}$ と仮定し a_{rest} とした. また, 声帯が閉じているとき声門面積は 0 になるので,

$a_{\min} = \max(0, a_{\min})$ である。SH モデルでは、声道の影響を省略していること、声門が開いている時のみベルヌーイ方程式が作用すると仮定しているため、 P_2 は 0 となる。

以上の式 (3.1) ~ (3.7) までに基づいた SH モデルの振動を表した微分方程式は以下の通りとなる。

$$\dot{x}_{1\alpha} = v_{1\alpha}, \quad (3.8)$$

$$\dot{v}_{1\alpha} = \frac{1}{m_{1\alpha}} \left(P_1 l d_1 - r_{1\alpha} v_{1\alpha} - k_{1\alpha} x_{1\alpha} - \Theta(-a_1) c_1 \frac{a_1}{2l} - k_{c\alpha} (x_{1\alpha} - x_{2\alpha}) \right), \quad (3.9)$$

$$\dot{x}_{2\alpha} = v_{2\alpha}, \quad (3.10)$$

$$\dot{v}_{2\alpha} = \frac{1}{m_{2\alpha}} \left(-r_{2\alpha} v_{2\alpha} - k_{2\alpha} x_{2\alpha} - \Theta(-a_2) c_2 \frac{a_2}{2l} - k_{c\alpha} (x_{2\alpha} - x_{1\alpha}) \right). \quad (3.11)$$

ただし P_1, P_2, a_i, a_{\min} は式 (3.4) ~ (3.7) に示す通りである。

3.3 SH モデルの非対称性

SH モデルは非対称な振動を考慮したモデルであるため、非対称な振動を表すことができる。SH モデルの非対称性は張力パラメータ Q によって支配され、式 (3.12) のように表現される。

$$\begin{aligned} k_{i\alpha} &= Q_\alpha k_{i\alpha 0}, & k_{c\alpha} &= Q_\alpha k_{c\alpha 0}, \\ c_{i\alpha} &= Q_\alpha c_{i\alpha 0}, & m_{i\alpha} &= m_{i\alpha 0} / Q_\alpha. \end{aligned} \quad (3.12)$$

Q_l と Q_r が等しいのであれば SH モデルは対称な振動を生成するが、 Q_l と Q_r が大きく異なるならば振動は非対称になる。

また、 $m_{i\alpha 0}, k_{i\alpha 0}, k_{c\alpha 0}$ および $c_{i\alpha 0}$ は SH モデルの基準値であり、以下の値を用いた [4]。

$$\begin{aligned} m_{1\alpha 0} &= 0.125, & m_{2\alpha 0} &= 0.025, \\ r_{1\alpha 0} &= 0.02, & r_{2\alpha 0} &= 0.02, \\ k_{1\alpha 0} &= 0.08, & k_{2\alpha 0} &= 0.008, \\ k_{c\alpha 0} &= 0.025, \\ c_{1\alpha 0} &= 3k_{1\alpha 0}, & c_{2\alpha 0} &= 3k_{2\alpha 0}, \\ d_1 &= 0.25, & d_2 &= 0.5. \end{aligned}$$

なお、SH モデルにおいて質量の単位は g、長さの単位は cm、時間の単位は ms として扱っている。

第4章 パラメータ推定手法 -従来法-

Döelinger *et al.* はデジタルハイスピードカメラデータを用いた2質量モデルのパラメータ推定法を2002年に提案した [5] . 推定するパラメータには左右の非対称性を表す Q_α , 声門下圧 P_S を用いている . この手法の簡単な説明と , 実際の声帯麻痺データへ応用した場合について述べる .

4.1 評価関数

SH モデルにより生成される波形が , デジタルハイスピードカメラによる声門波形と同様になるように SH モデルのパラメータを推定する . パラメータ (Q_α, P_S) の最適化には , 以下の式 (4.1) で定義される評価関数 Γ_D を最小化することによって行われる .

$$\begin{aligned} \Gamma_D(Q_l, Q_r, P_S) = & \|(|b_{1\alpha}|, \dots, |b_{K_\alpha\alpha}|) - (|d_{1\alpha}|, \dots, |d_{K_\alpha\alpha}|)\|_2 \\ & + \|(\arg b_{1\alpha}, \dots, \arg b_{K_\alpha\alpha}) - (\arg d_{1\alpha}, \dots, \arg d_{K_\alpha\alpha})\|_2 \\ \alpha = & \begin{cases} l : & \text{left side} \\ r : & \text{right side,} \end{cases} \end{aligned} \quad (4.1)$$

ここで , $b_{i\alpha}$ はハイスピードカメラデータをフーリエ変換した時のピークとなる周波数におけるフーリエ係数 , $d_{i\alpha}$ は $d_{i\alpha}$ と同様に SH モデルによる波形のピークとなる周波数におけるフーリエ係数 , K_α は $b_{i\alpha}$ および $d_{i\alpha}$ の基本周波数の3倍である . つまり Γ_D の最初の項は , 基本周波数の1倍, 2倍および3倍の周波数におけるフーリエ係数を比較している . この評価関数 Γ_D が最小となる (Q_l, Q_r, P_S) の組み合わせが推定されたパラメータとなる . 評価関数 Γ_D の最小化には , Döelinger *et al.* は後述する Nelder-Mead アルゴリズムを用いている .

4.2 パラメータ推定範囲

最小化デジタルハイスピードカメラによる声門波形をフーリエ変換しスペクトルのピークとなる基本周波数 \tilde{f}_α を求め , 以下の式 (4.2) で \tilde{Q}_α を大まかに推定する .

$$\tilde{Q}_\alpha = \tilde{f}_\alpha \sqrt{2\pi m_{1\alpha 0} / k_{1\alpha 0}}, \quad (4.2)$$

この \tilde{Q}_α を中心に $\tilde{Q}_\alpha \in [\tilde{Q}_\alpha - 0.1, \tilde{Q}_\alpha + 0.1]$ の範囲を考える．この範囲を 0.01 刻みでメッシュ状に区切る．そして図 4.1 の黒線が示すような四角の対角線と各辺における Q_α の各点において， $6 \sim 46 \text{ cmH}_2\text{O}$ の範囲で刻み幅は $1 \text{ cmH}_2\text{O}$ の声門下圧 P_S を用い， Γ_D を最小とする 4 点を選ぶ．その 4 点を初期値とし，Nelder-Mead アルゴリズムを用いて Γ_D が最小となる (Q_l, Q_r, P_S) の点を選ぶ．

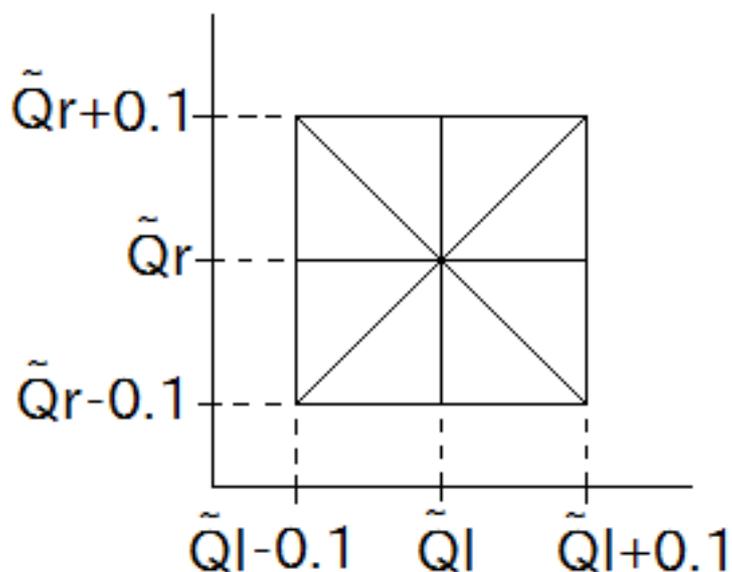


図 4.1: Q_α の取る範囲

4.2.1 パラメータ推定結果

デジタルハイスピードカメラデータと Döelinger *et al.* の手法を用いて，SH モデルのパラメータを推定した．その結果を表 4.1~4.2 と図 4.2 に示す．表より，Döelinger *et al.* の手法では閉鎖期が再現できないことが分かった．ここで示しているのは 1 人だけのデータであるが，他の患者でも同様のことが言える．以上より麻痺声帯振動を表すためには，Döelinger *et al.* の手法では不十分であると考えられる．

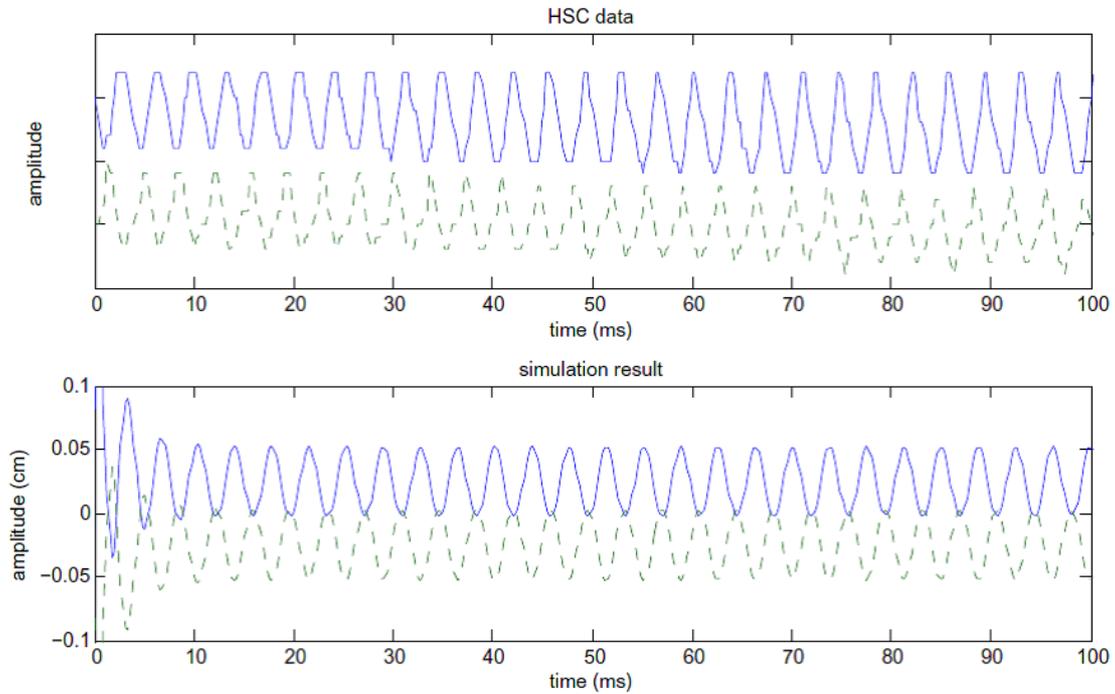


図 4.2: 患者 B の手術前のデジタルハイスピードカメラと Döelinger *et al.* の手法による推定波形上：デジタルハイスピードカメラデータ 下：推定波形実線：左側声帯 破線：右側声帯

表 4.1: Döelinger *et al.* の手法により推定されたパラメータ.

| 患者 B | 手術前 | 手術後 |
|-------------|-------|-------|
| Q_l | 1.956 | 2.117 |
| Q_r | 1.976 | 2.137 |
| $P_S(H_2O)$ | 8.0 | 8.0 |

表 4.2: 推定波形の解析結果

| | 推定波形 | ハイスピードカメラデータ |
|----------------|-------|--------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 268 | 270 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 268 | 270 |
| 閉鎖期 [%] | 16.7 | 0 |
| 位相差 [%] | 1.11 | 12.6 |
| 振幅差 [%] | 0.83 | 12.9 |
| NAQ | 0.283 | - |

第5章 提案するパラメータ推定手法

4節において，従来法では麻痺声帯振動がモデルで再現できないことが示された．また，手術効果のモデルへの反映を目指すためには，呪術による閉鎖期の変化や，声門開口面積の変化を再現することが必要であると考えた．そこで，推定するパラメータに声門開口面積を加え，評価関数に閉鎖期を含めた手法を提案する．声帯振動において閉鎖期の割合は重要な要素であり，また手術の目的の一つに閉鎖期を増加させるという意図があるので，閉鎖期を評価関数に組み込むことで手術効果を推定結果に反映させることができるのではないかと考える．

5.1 評価関数

SHモデルにより生成される波形が，デジタルハイスピードカメラによる声門波形と同様になるようにSHモデルのパラメータを推定する．推定するパラメータには左右の非対称性を表す Q_α ，声門下圧 P_S ，声門開口面積 a_{rest} を用いた．最適化のための評価関数 Γ は以下の式 (5.1) で定義される．

$$\begin{aligned} \Gamma(Q_l, Q_r, P_S, a_{rest}) = & w_f \left(\frac{|f_{lc} - f_{lt}|}{|f_{lc}|} + \frac{|f_{rc} - f_{rt}|}{|f_{rt}|} \right) \\ & + w_S \left(\frac{|S_{lc} - S_{lt}|}{|S_{lc}|} + \frac{|S_{rc} - S_{rt}|}{|S_{rt}|} \right) \\ & + w_C \frac{|C_c - C_t|}{|C_c|} \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$n = \begin{cases} c : \text{ camera data} & w_f = w_S = 1/7, \\ t : \text{ SH model,} & w_C = 5/7, \end{cases}$$

ここで $f_{\alpha n}$ は振動波形の基本周波数， $S_{\alpha n}$ は基本周波数における振動波形をフーリエ変換した時のパワー， C_n は声帯振動における閉鎖期の割合， w_f および w_S に比べ w_C は重み係数である．重み係数 w_f および w_S に比べ w_C の値が大きい理由は，全て同じ重みであると推定結果に手術効果が反映されない結果となってしまうためである．

5.2 Nelder-Mead アルゴリズム

本研究では、評価関数 Γ の最小化に Nelder-Mead アルゴリズムを用いる。Nelder-Mead アルゴリズムは、評価関数の変数の個数により多面体 (Simplex) を決定し、この多面体の頂点での評価関数値により、最小化を行うものである [8]。具体的な方法としては、 n 変数の場合、 $n + 1$ の頂点で多面体を作成し、目的関数値が最も高い点に対して多面体の頂点の並び替え、反射、拡張、縮小や収縮を繰り返すことで最適解を求める手法である。Nelder-Mead アルゴリズムは導関数を用いずに最小化を行う手法であり、処理に時間がかかる場合もあるが収束しやすいという利点がある。

5.3 推定における初期値

評価関数 Γ は非凸関数であり、Nelder-Mead アルゴリズムによる非凸関数の最適化には適当な初期値を選択することが重要となる。図 5.1 は患者 A の声門下圧 $P_S = 25\text{cmH}_2\text{O}$ 、 $a_{rest} = 0.07\text{cm}^2$ 時における Q_α の変化に伴う Γ の軌道であるが、非凸関数であるということが分かる。そのため、初期値の選択に問題があると、解が局所解に陥ってしまい Γ が最小化されず、推定された結果がデジタルハイスピードカメラデータおよび手術効果を反映していない可能性がある。

以下に提案手法の初期値を求める手順を示す。 \tilde{Q}_α を求めるところまでは Döelinger *et al.* の手法と同一である。デジタルハイスピードカメラによる声門波形をフーリエ変換しスペクトルのピークとなる基本周波数 \tilde{f}_α を求め、式 (4.2) を用いて \tilde{Q}_α を大まかに推定する。提案手法では、この \tilde{Q}_α を中心に $\tilde{Q}_\alpha \in [\tilde{Q}_\alpha - 0.2, \tilde{Q}_\alpha + 0.2]$ の範囲とし、0.02 刻みで探索を行う。声門下圧 P_S の探索範囲は $6 \sim 46\text{cmH}_2\text{O}$ で刻み幅は $2\text{cmH}_2\text{O}$ とし、 a_{rest} の探索範囲は $0.02 \sim 0.2\text{cm}^2$ で刻み幅は 0.02cm^2 とした。以上に示した範囲で全探索を行い、が最小となる 20 点を抽出する。この 20 点を初期値として Nelder-Mead アルゴリズムによって が最小になるパラメータを求める。以上の推定手法をまとめたブロックチャートを図 5.2 に示す。

5.4 声門波形解析

デジタルハイスピードカメラデータおよび SH モデルにより生成された声門波形を比較するために、以下の指標を用いた。

- 左右の振動基本周波数
- 位相の左右差
- 振動振幅
- 振動振幅の左右差
- 閉鎖期

- Normalized Amplitude Quotient (NAQ)[6]

NAQ は音源の強度や声質を評価するパラメータであり，以下の式 (5.2) で定義される．

$$NAQ = \frac{f_{ac}}{d_{peak} T}, \quad (5.2)$$

ここで， f_{ac} は声門波形の最大振幅， d_{peak} は振幅の微分値の最小値の絶対値， T は基本周期である．NAQ は健康な人間であれば 0.1 ~ 0.2 程度の範囲である．また，NAQ は声帯の衝突の勢いを表すパラメータであるので，閉鎖期が 0 である場合には計算していない．

5.4.1 パラメータ推定環境

以上までに示した手法を用いて，下記に示す環境でパラメータ推定を行った．

コンピュータ Apple Inc. iMac

OS Mac OS X 10.4.11

CPU Intel Core 2 Duo 2.16GHz

ソフトウェア The MathWorks, Inc. MATLAB R2007a

また，SH モデルを用いた声帯振動シミュレーションには 4 次の Runge-Kutta 法を使用した．

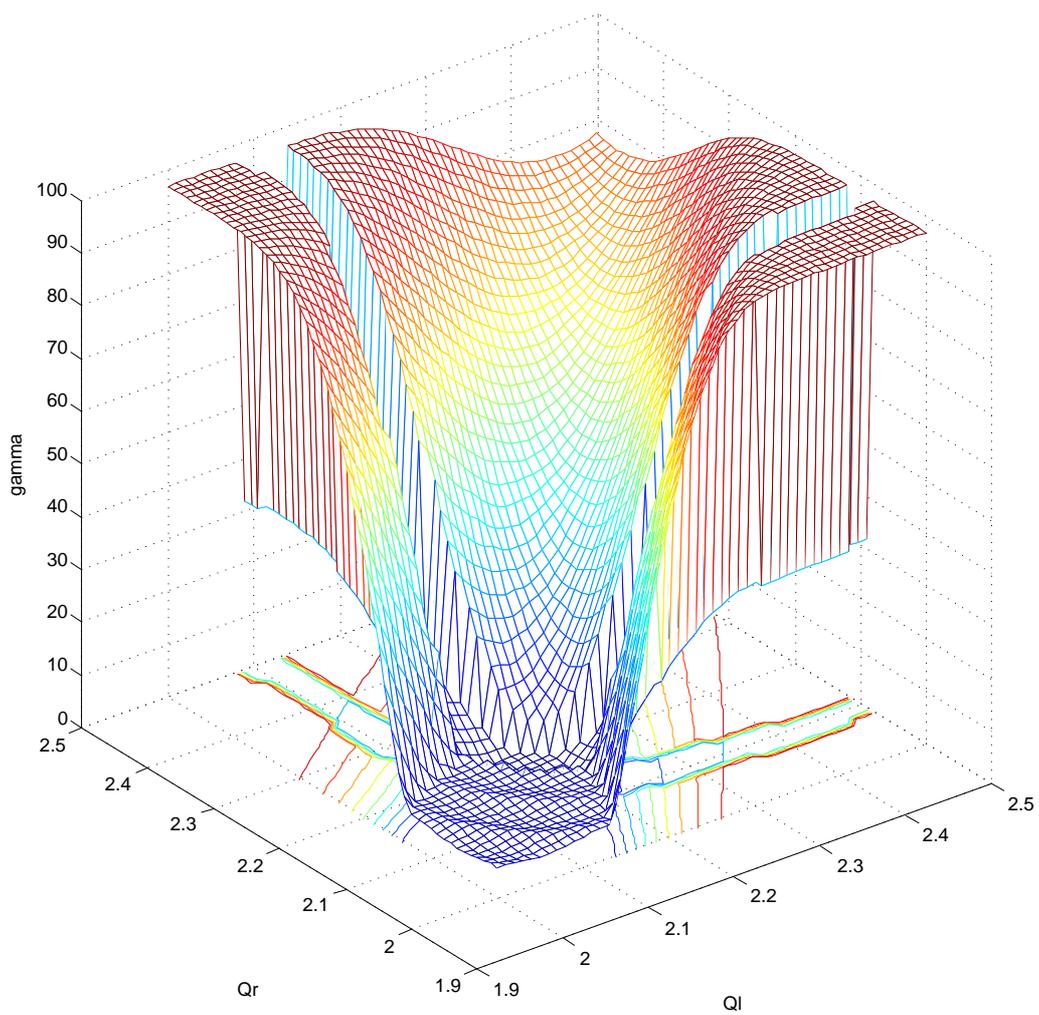


図 5.1: Q_α の変化に伴う Γ の軌道の変化の例 $P_S = 25cmH_2O$, $a_{rest} = 0.07cm^2$

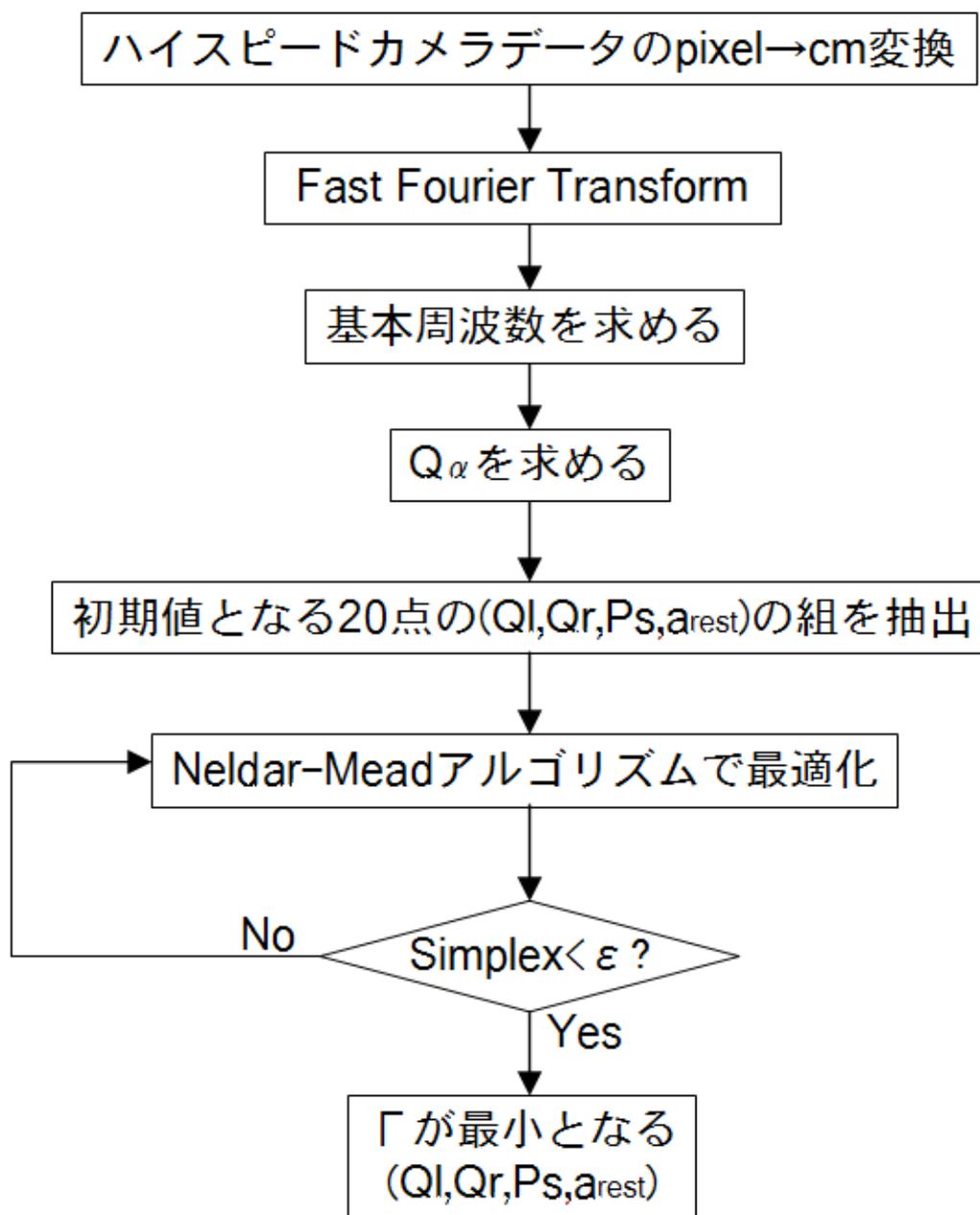


図 5.2: 最適化フローチャート

5.5 推定結果

5節の手法を用いて、デジタルハイスピードカメラによる声門波形に対してSHモデルのパラメータ推定を行った。表5.1~5.14に各患者のパラメータ推定結果および推定結果から得られた波形を解析した結果を示す。また、図5.3~5.16に各患者の推定されたパラメータによる各SHモデルの波形およびそのパワースペクトルを示す。各図において、1段目の図がデジタルハイスピードカメラにより撮影されたデータ、2段目が各SHモデルにより生成された波形を示している。1段目と2段目の実線は左側声帯、破線は右側声帯である。3段目はデジタルハイスピードカメラデータおよびSHモデルにより生成された波形の、左側声帯のパワースペクトルを示している。4段目は同じく右側声帯のパワースペクトルである。3段目と4段目の実線はデジタルハイスピードカメラデータ、破線はSHモデルによる波形である。

表5.1~5.14に示した推定結果を見ると、全ての波形において、振動基本周波数はよく再現できている。その上、患者B,F,Gは手術前後で a_{rest} が小さくなる結果となった。声帯内注入法は声門開口面積を小さくし、閉鎖期を増加させることを意図した手術であることから、推定された声門開口面積は手術の効果を表したものと考えられる。また、患者F,Gにおいては閉鎖期の増加も確認できた。手術の結果をよく表している推定結果として、図5.13~5.14に患者Fの推定されたパラメータによる各SHモデルの波形およびそのパワースペクトルを示す。

また、患者A,C,Eは a_{rest} が小さくはなるがほぼ変わらない結果となった。図5.11~5.12に示されている患者Eの波形を見ると、手術前後とも閉鎖期が多いため a_{rest} が小さい値になったと考えられる。このような衝突後も声門が閉鎖したまま遷移する波形はSHモデルでは再現が難しい。表5.7より患者Dは手術後で a_{rest} が大きくなる結果となったが、表5.8や図5.12を見ると手術後の声門波形において、デジタルハイスピードカメラデータでは声門波形に閉鎖期が存在するのに対し、推定波形では閉鎖期が存在していない。患者Dの手術後では評価関数 Γ が局所解に陥ってしまったために、正しく推定できなかった可能性があるため、 a_{rest} が大きくなる結果となったと考えられる。

以上より、SHモデルのパラメータ推定を行うことで、モデルへ手術効果を反映することができるとは、声門が閉鎖したまま遷移する波形の場合など、SHモデルが不得手としている波形の場合は適切に手術効果を反映することができない可能性があることが分かった。

表 5.1: 患者 A の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|--------|--------|
| Ql | 2.190 | 2.120 |
| Qr | 2.006 | 2.143 |
| $P_S(H_2O)$ | 27.8 | 25.5 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0379 | 0.0388 |

表 5.2: 患者 A の声門波形解析結果

| 手術前 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
|----------------|--------|--------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 283 | 285 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 283 | 285 |
| 閉鎖期 [%] | 13.0 | 14.5 |
| 位相差 [%] | 10.0 | 6.20 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0902 | 0.1034 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0819 | 0.0775 |
| 振幅差 [%] | 4.82 | 14.3 |
| NAQ | 0.284 | 0.260 |
| 手術後 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 291 | 291 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 291 | 291 |
| 閉鎖期 [%] | 13.0 | 32.3 |
| 位相差 [%] | 3.22 | 11.8 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0790 | 0.0801 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0799 | 0.0954 |
| 振幅差 [%] | 0.54 | 8.72 |
| NAQ | 0.286 | 0.217 |

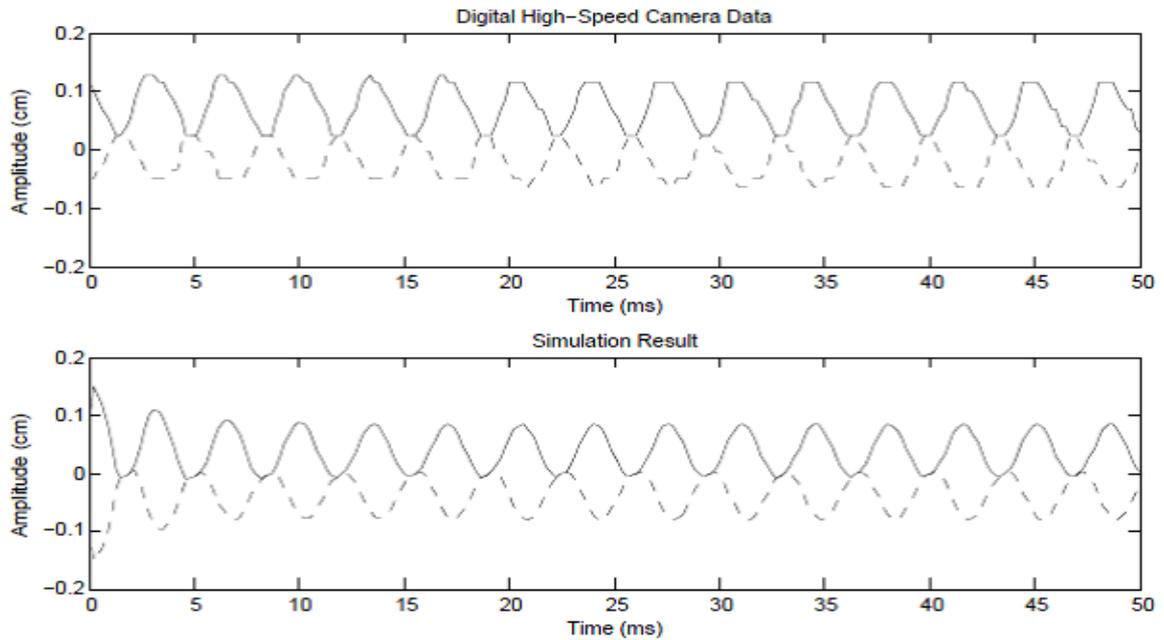


図 5.3: 患者 A の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

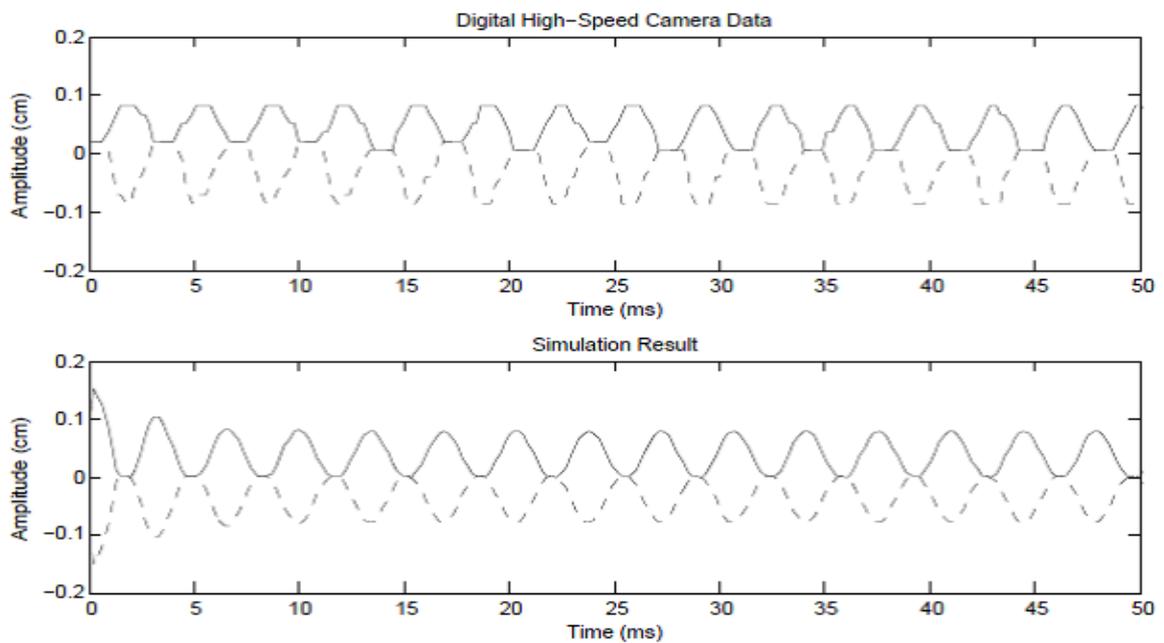


図 5.4: 患者 A の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

表 5.3: 患者 B の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|--------|--------|
| Ql | 1.910 | 2.255 |
| Qr | 2.485 | 1.903 |
| $P_S(H_2O)$ | 38.3 | 28.8 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0658 | 0.0463 |

表 5.4: 患者 B の声門波形解析結果

| 手術前 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
|----------------|--------|--------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 269 | 268 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 269 | 268 |
| 閉鎖期 [%] | 0.2 | 0 |
| 位相差 [%] | 16.2 | 15.7 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0731 | 0.0896 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0473 | 0.0698 |
| 振幅差 [%] | 21.4 | 13.4 |
| NAQ | 0.457 | - |
| 手術後 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 287 | 288 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 287 | 288 |
| 閉鎖期 [%] | 0.4 | 0.8 |
| 位相差 [%] | 13.9 | 20.8 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0894 | 0.1131 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0725 | 0.0880 |
| 振幅差 [%] | 10.4 | 12.7 |
| NAQ | 0.340 | 0.400 |

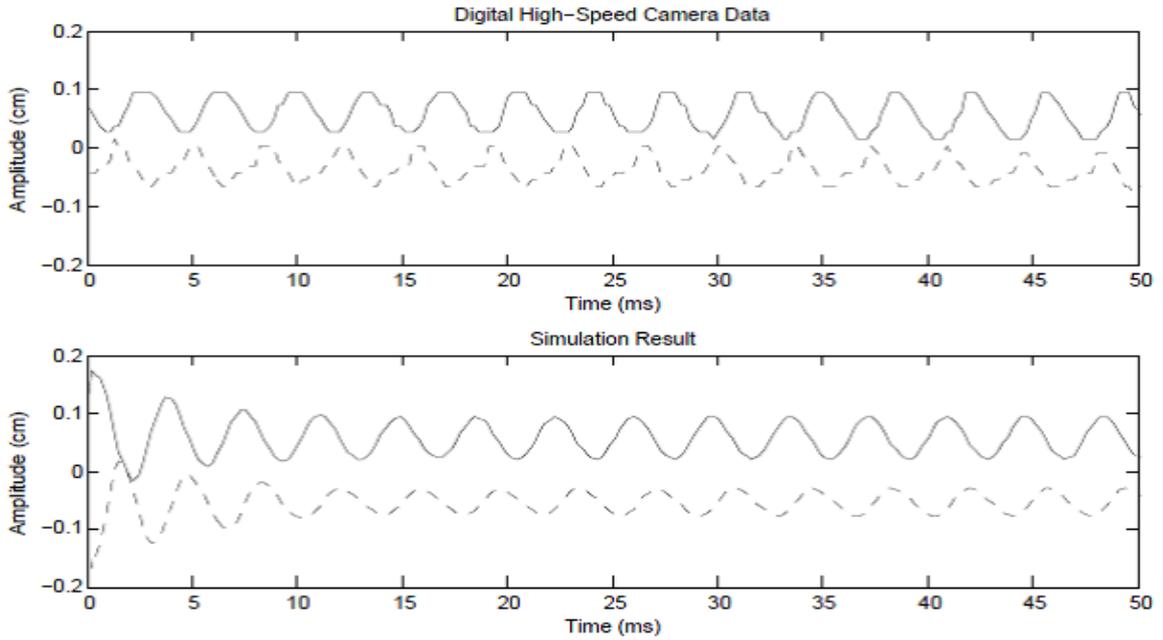


図 5.5: 患者 B の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上：デジタルハイスピードカメラデータ 下：シミュレーション結果 実線：左側声帯 破線：右側声帯

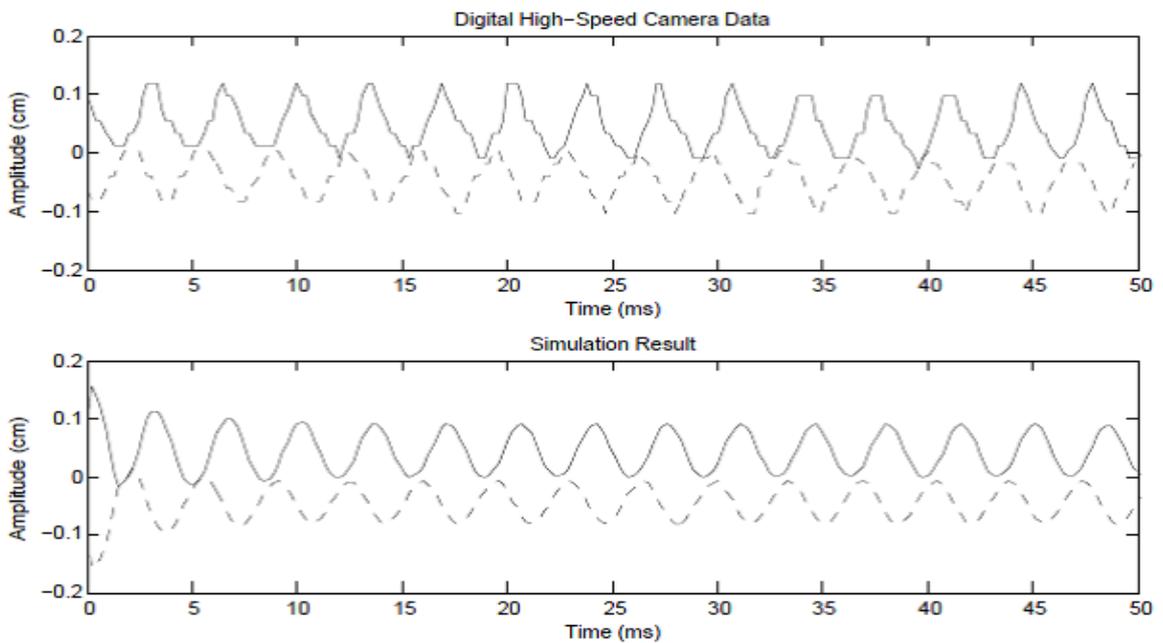


図 5.6: 患者 B の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上：デジタルハイスピードカメラデータ 下：シミュレーション結果 実線：左側声帯 破線：右側声帯

表 5.5: 患者 C の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|--------|--------|
| Ql | 2.525 | 1.948 |
| Qr | 2.355 | 1.744 |
| $P_S(H_2O)$ | 39.1 | 33.4 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.1037 | 0.1010 |

表 5.6: 患者 C の声門波形解析結果

| 手術前 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
|----------------|--------|--------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 331 | 333 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 331 | 333 |
| 閉鎖期 [%] | 0 | 0 |
| 位相差 [%] | 8.32 | 9.50 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0277 | 0.0324 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0285 | 0.0555 |
| 振幅差 [%] | 1.52 | 26.7 |
| NAQ | - | - |
| 手術後 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 236 | 236 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 236 | 236 |
| 閉鎖期 [%] | 0 | 0 |
| 位相差 [%] | 12.1 | 17.3 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0284 | 0.0349 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0303 | 0.0642 |
| 振幅差 [%] | 3.80 | 29.6 |
| NAQ | - | - |

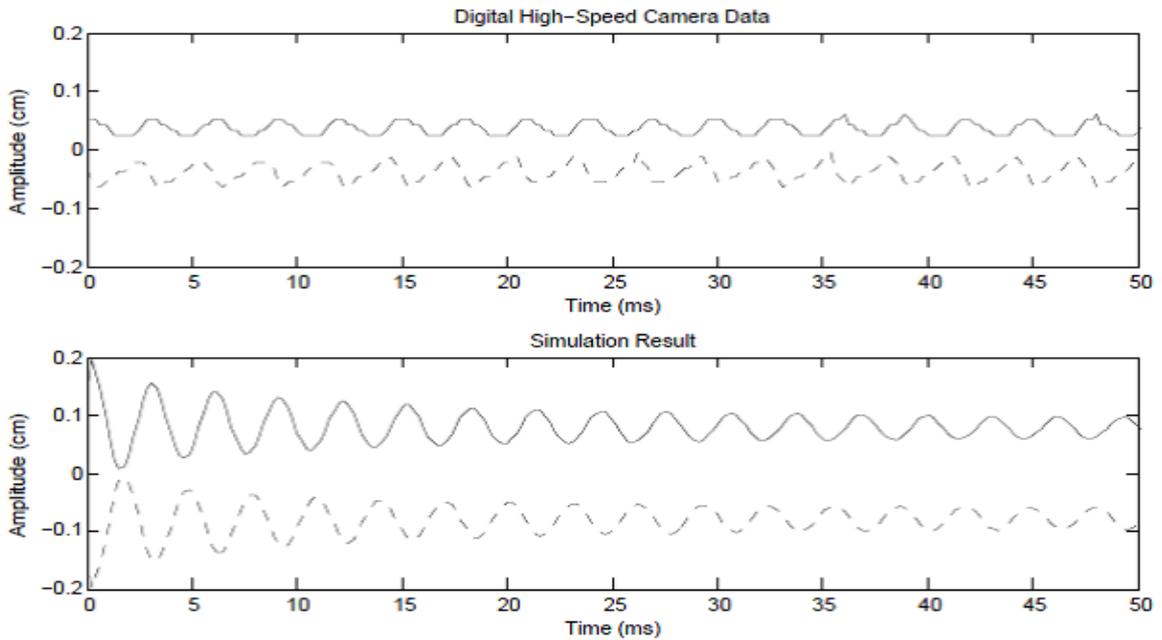


図 5.7: 患者 C の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

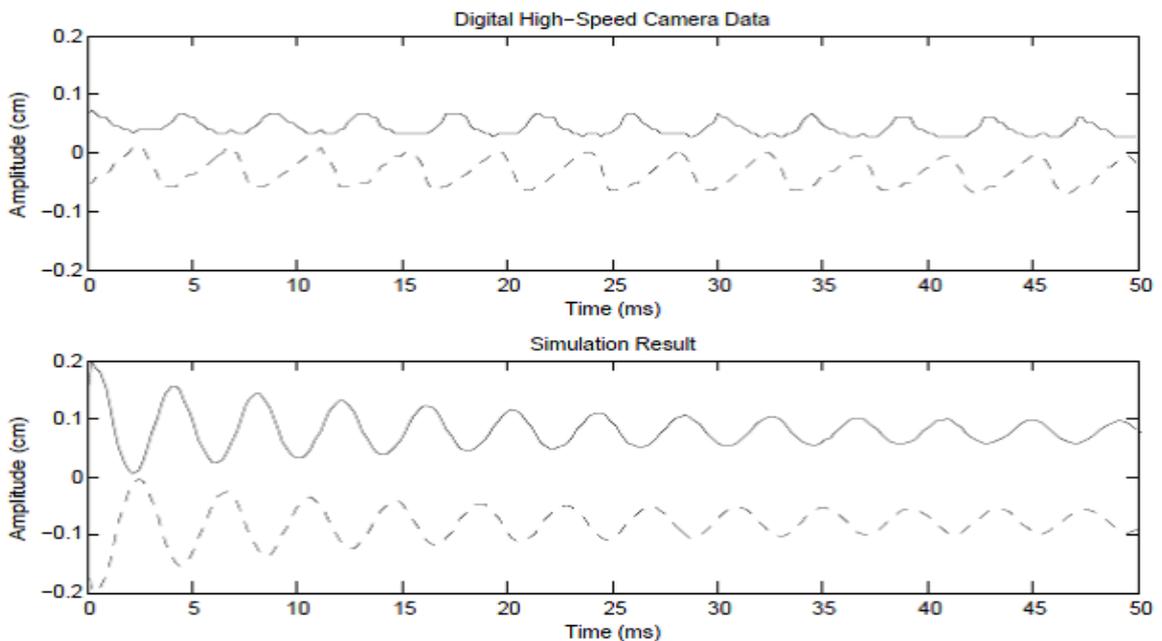


図 5.8: 患者 C の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

表 5.7: 患者 D の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|--------|--------|
| Ql | 2.832 | 2.410 |
| Qr | 2.984 | 2.179 |
| $P_S(H_2O)$ | 27.4 | 40.4 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0617 | 0.1025 |

表 5.8: 患者 D の声門波形解析結果

| 手術前 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
|----------------|--------|--------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 384 | 384 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 384 | 384 |
| 閉鎖期 [%] | 0.2 | 0 |
| 位相差 [%] | 7.71 | 26.3 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0336 | 0.0292 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0336 | 0.0497 |
| 振幅差 [%] | 0 | 25.9 |
| NAQ | 0.0581 | - |
| 手術後 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 302 | 302 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 302 | 302 |
| 閉鎖期 [%] | 0 | 40.3 |
| 位相差 [%] | 11.0 | 21.6 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0387 | 0.0489 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0400 | 0.0444 |
| 振幅差 [%] | 1.89 | 7.72 |
| NAQ | - | 0.150 |

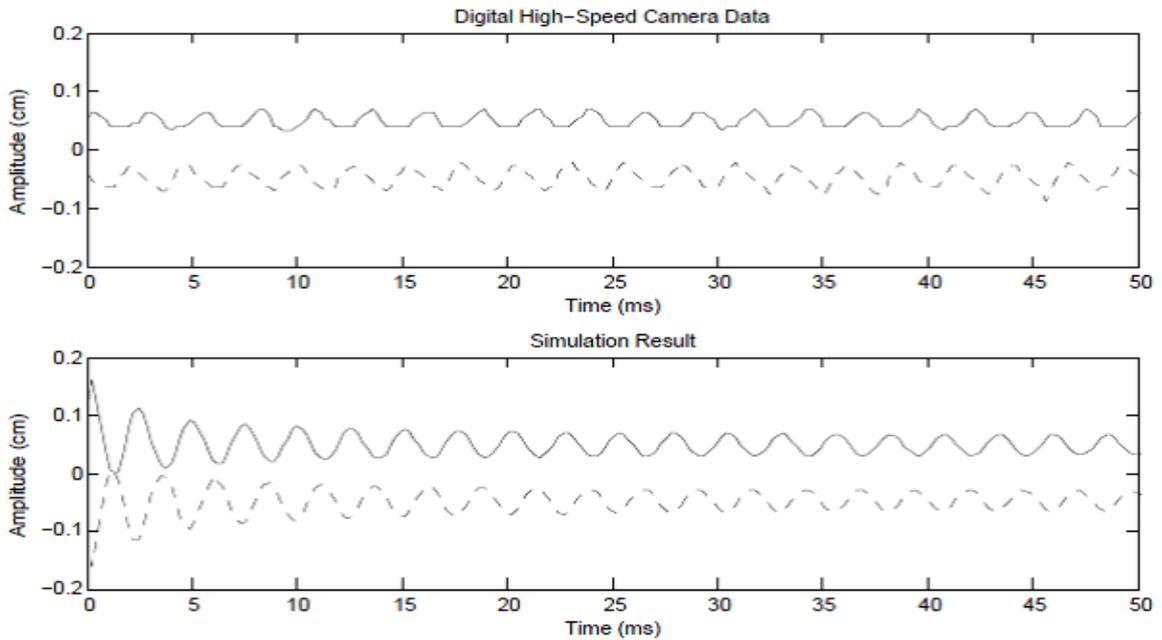


図 5.9: 患者 D の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

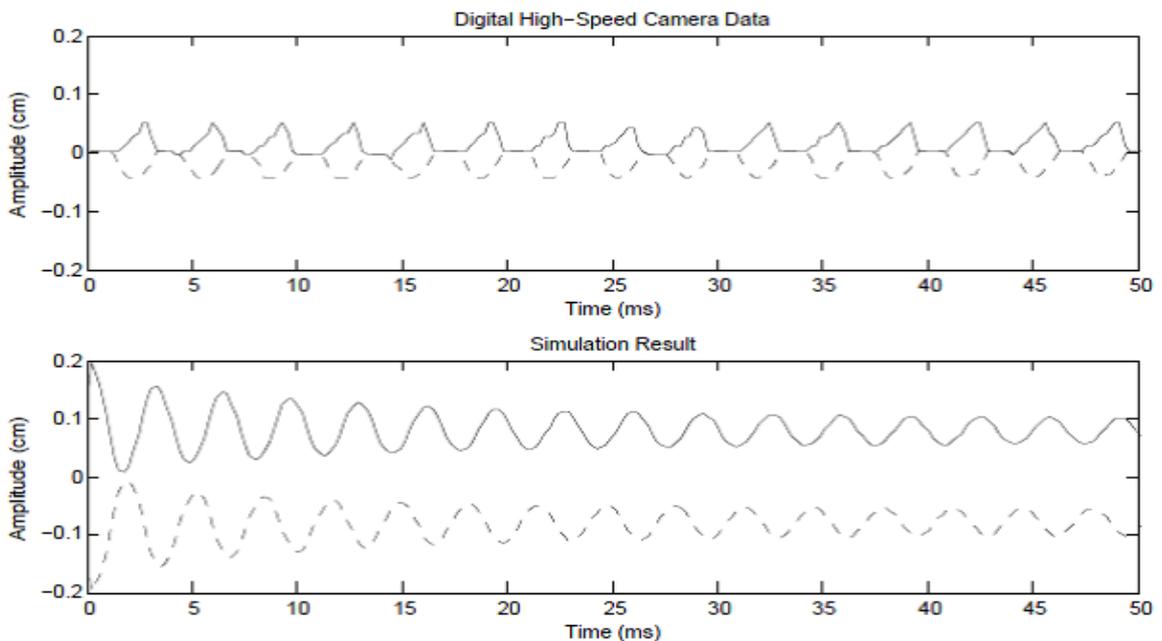


図 5.10: 患者 D の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

表 5.9: 患者 E の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|--------|--------|
| Ql | 0.860 | 1.690 |
| Qr | 1.013 | 1.811 |
| $P_S(H_2O)$ | 12.3 | 13.7 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0206 | 0.0203 |

表 5.10: 患者 E の声門波形解析結果

| 手術前 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
|----------------|--------|--------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 128 | 128 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 128 | 128 |
| 閉鎖期 [%] | 18.4 | 62.5 |
| 位相差 [%] | 12.7 | 17.8 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0665 | 0.0707 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0706 | 0.0759 |
| 振幅差 [%] | 2.97 | 4.90 |
| NAQ | 0.268 | 0.132 |
| 手術後 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 240 | 239 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 240 | 239 |
| 閉鎖期 [%] | 15.0 | 52.3 |
| 位相差 [%] | 5.33 | 16.8 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0465 | 0.0460 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0490 | 0.0517 |
| 振幅差 [%] | 2.59 | 8.76 |
| NAQ | 0.274 | 0.118 |

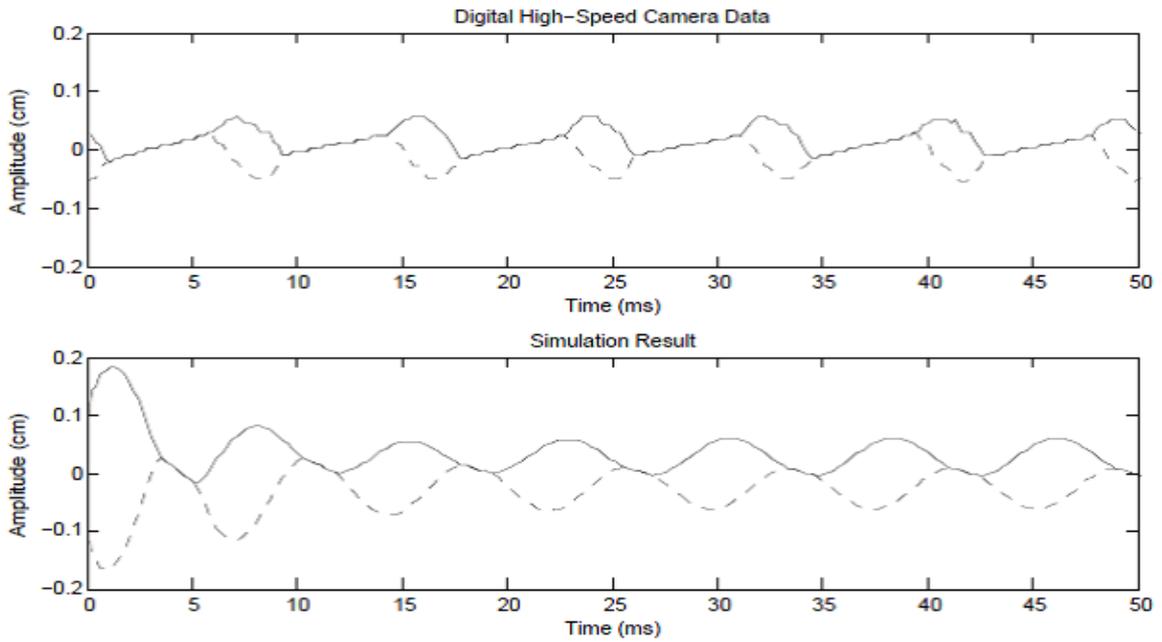


図 5.11: 患者 E の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

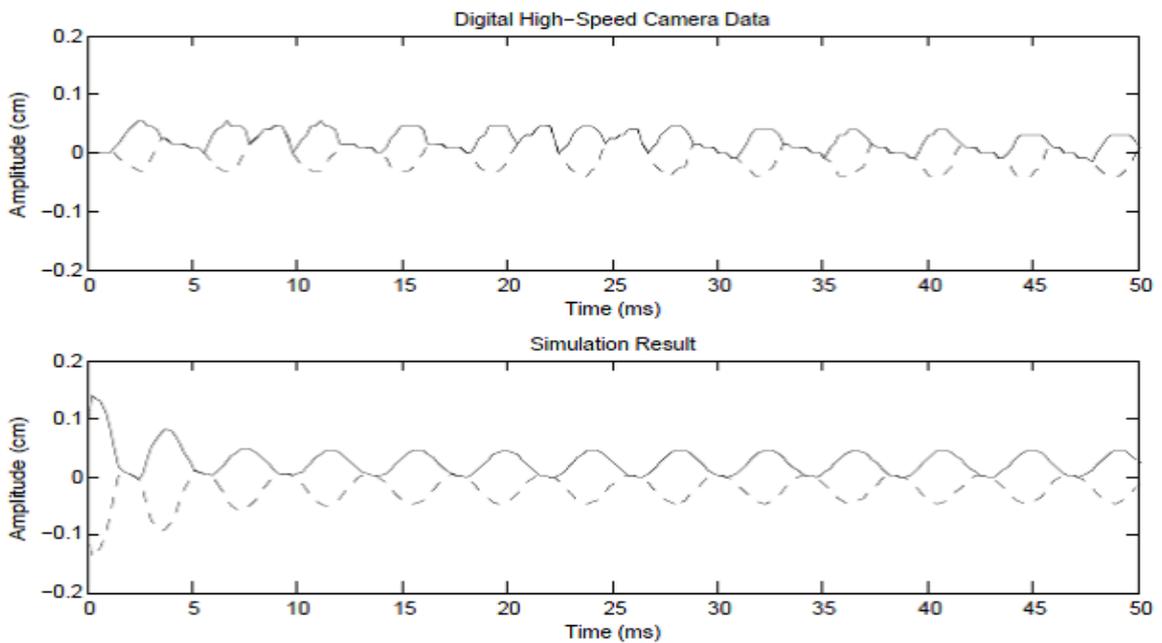


図 5.12: 患者 E の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

表 5.11: 患者 F の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|--------|--------|
| Ql | 1.740 | 1.276 |
| Qr | 1.952 | 1.168 |
| $P_S(H_2O)$ | 10.6 | 17.1 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0700 | 0.0407 |

表 5.12: 患者 F の声門波形解析結果

| 手術前 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
|----------------|--------|--------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 246 | 246 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 246 | 246 |
| 閉鎖期 [%] | 1.00 | 1.00 |
| 位相差 [%] | 9.37 | 11.6 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0697 | 0.0603 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0738 | 0.0699 |
| 振幅差 [%] | 2.87 | 9.09 |
| NAQ | 0.299 | 0.337 |
| 手術後 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 182 | 180 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 182 | 180 |
| 閉鎖期 [%] | 25.0 | 32.0 |
| 位相差 [%] | 6.87 | 10.5 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.1166 | 0.1359 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0937 | 0.1010 |
| 振幅差 [%] | 10.9 | 14.7 |
| NAQ | 0.254 | 0.204 |

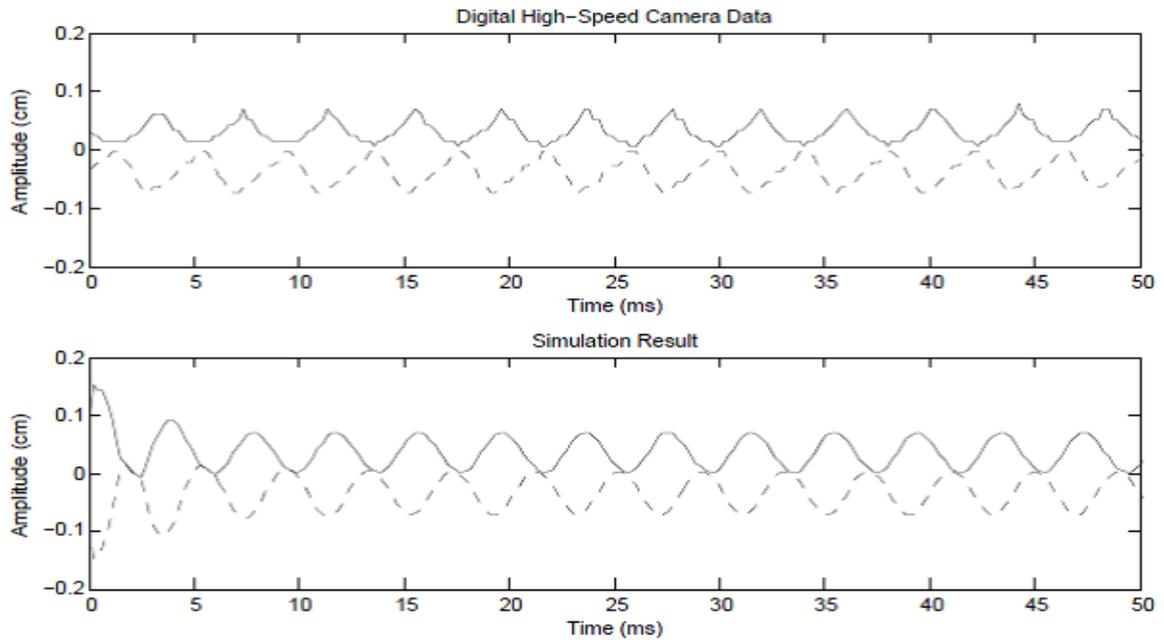


図 5.13: 患者 F の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

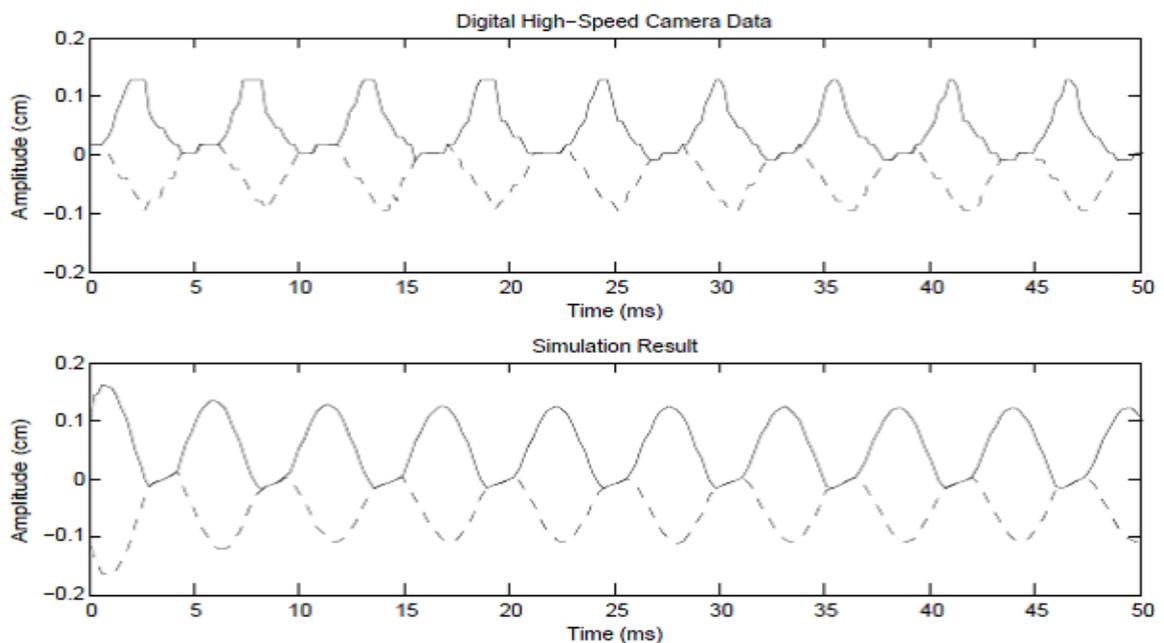


図 5.14: 患者 F の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

表 5.13: 患者 G の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|-------|--------|
| Ql | 2.837 | 1.972 |
| Qr | 2.042 | 2.791 |
| $P_S(H_2O)$ | 27.1 | 16.2 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.759 | 0.0432 |

表 5.14: 患者 G の声門波形解析結果

| 手術前 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
|----------------|--------|--------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 350 | 349 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 350 | 349 |
| 閉鎖期 [%] | 0.2 | 0 |
| 位相差 [%] | 39.1 | 19.7 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.1450 | 0.1806 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0768 | 0.0918 |
| 振幅差 [%] | 29.0 | 32.6 |
| 手術後 | SH モデル | ハイスピードカメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 292 | 291 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 292 | 291 |
| 閉鎖期 [%] | 0.3 | 0 |
| 位相差 [%] | 20.7 | 29.6 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0971 | 0.0828 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0581 | 0.0399 |
| 振幅差 [%] | 25.1 | 35.6 |
| NAQ | 0.271 | - |

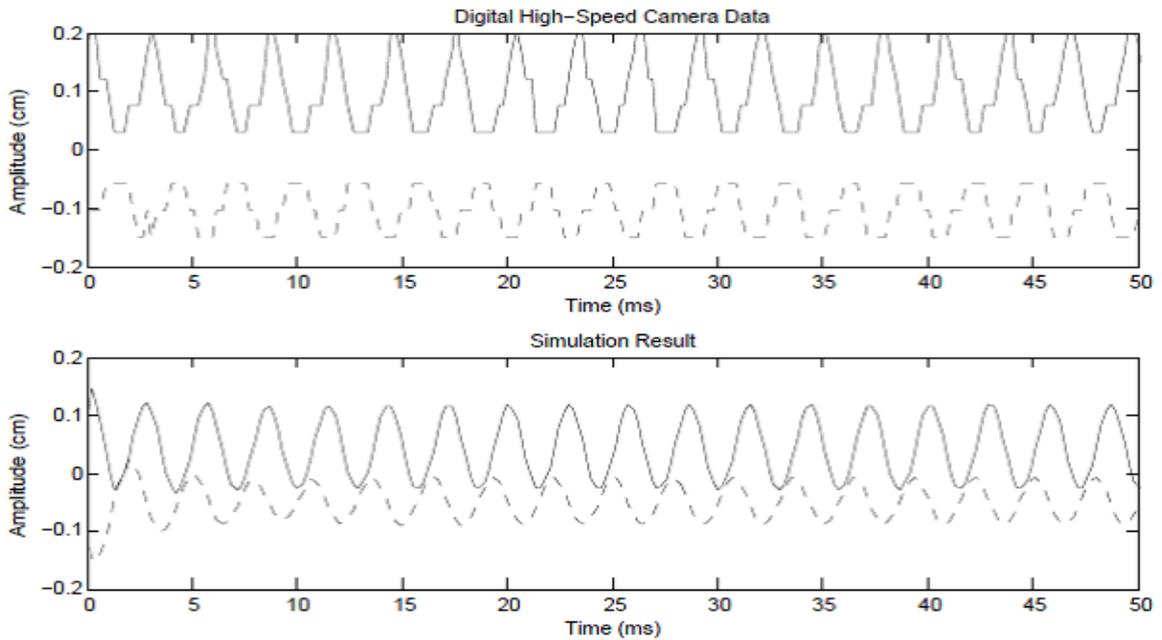


図 5.15: 患者 G の手術前のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

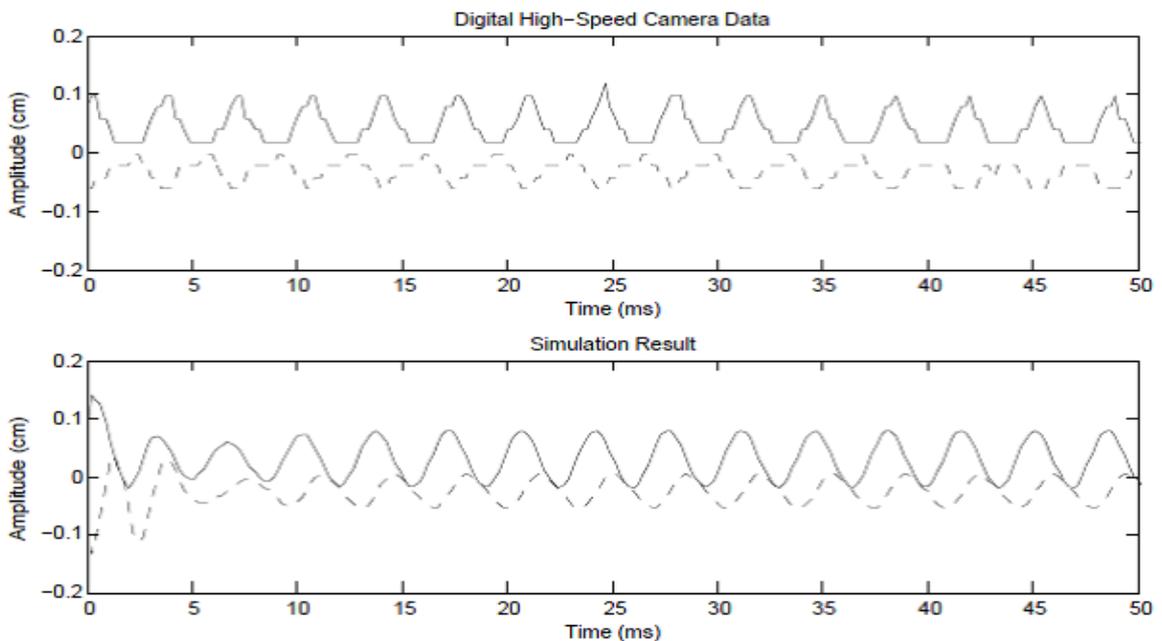


図 5.16: 患者 G の手術後のハイスピードカメラデータと SH モデルによる波形 上: デジタルハイスピードカメラデータ 下: シミュレーション結果 実線: 左側声帯 破線: 右側声帯

第6章 推定するパラメータの追加

5節で提案した手法に基づくSHモデルのパラメータ推定によって、手術効果をモデルに反映することが出来たと考えられるしかし、声帯麻痺の振動波形は健康な声帯の振動波形に比べ複雑であるので、適用するハイスピードカメラデータによっては、振動波形の再現および手術効果のモデルへの反映がなされない可能性があることが示唆された。SHモデルでは、式(3.12)に示されるように、左右の非対称性は Q_l および Q_r の2値のみに支配されているが、複雑な振動をモデルへ反映する場合、 Q_l と Q_r の2値のみでは不十分であると考えられる。ここでは、更なる精度向上を目指し、SHモデルの推定するパラメータを追加する ..

6.1 質量，ばね定数，結合ばね定数における Q_α の分離

1つ目の推定パラメータの追加案として、 Q_α に替えて $Q_{m\alpha}$ 、 $Q_{k\alpha}$ 、 $Q_{k_{c\alpha}}$ の3つを追加する。これは、式(3.12)の各項の Q_α を独立に求めていることになる。ただし、 $k_{i\alpha}$ と $c_{i\alpha}$ の Q は共通として $Q_{k\alpha}$ とする。これは、 $c_{i\alpha 0}$ は $k_{i\alpha 0}$ から求められるためである。したがって、式(3.12)は以下のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} k_{i\alpha} &= Q_{k\alpha} k_{i\alpha 0}, & k_{c\alpha} &= Q_{k_{c\alpha}} k_{c\alpha 0}, \\ c_{i\alpha} &= Q_{k\alpha} c_{i\alpha 0}, & m_{i\alpha} &= m_{i\alpha 0} / Q_{m\alpha}. \end{aligned} \quad (6.1)$$

今後、(6.1)式を用いたパラメータ追加案を Q の係数分離と呼ぶ。

6.2 上側質量と下側質量における Q_α の分離

2つ目の推定パラメータの追加案として、 Q_α に替えて $Q_{i\alpha}(i=1or2)$ を追加し、2質量モデルの下側の質量と上側の質量の Q_α をそれぞれ別に推定する。したがって、式(3.12)は以下のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} k_{i\alpha} &= Q_{i\alpha} k_{i\alpha 0}, & k_{c\alpha} &= Q_{i\alpha} k_{c\alpha 0}, \\ c_{i\alpha} &= Q_{i\alpha} c_{i\alpha 0}, & m_{i\alpha} &= m_{i\alpha 0} / Q_{i\alpha}. \end{aligned} \quad (6.2)$$

今後、(6.2)式を用いたパラメータ追加案を Q の上下分離と呼ぶ。

6.3 パラメータ推定手順

パラメータを追加した場合においても，基本的な推定手順は図 5.2 と同様で，20 点の初期値を求めるまでは流れは同一である．始めに従来の SH モデルを用いて 20 点の初期値 $(\tilde{Q}_l, \tilde{Q}_r, P_S, a_{rest})$ の組を求める．次に各点に対して，Q の係数分離の場合

$$\tilde{Q}_{m\alpha} = \tilde{Q}_{k\alpha} = \tilde{Q}_{kc\alpha} = \tilde{Q}_\alpha \quad (6.3)$$

Q の上下分離の場合

$$\tilde{Q}_{1\alpha} = \tilde{Q}_\alpha, \tilde{Q}_{2\alpha} = \tilde{Q}_\alpha \frac{\sqrt{(m_2/k_2)}}{\sqrt{(m_1/k_1)}}, \quad (6.4)$$

として，新たな 20 点の初期値 $(\tilde{Q}_{m\alpha}, \tilde{Q}_{k\alpha}, \tilde{Q}_{kc\alpha}, P_S, a_{rest})$ または $(\tilde{Q}_{1\alpha}, \tilde{Q}_{2\alpha}, P_S, a_{rest})$ を得る．ここで P_S およ a_{rest} の範囲は 5.3 節と同一である．その後，(6.1) 式または (6.2) を適用した SH モデル，評価関数 Γ と Nelder-Mead アルゴリズムを用いて，評価関数 Γ が最小となる $(Q_{m\alpha}, Q_{k\alpha}, Q_{kc\alpha}, P_S, a_{rest})$ または $(Q_{1\alpha}, Q_{2\alpha}, P_S, a_{rest})$ を求める．

なお，従来の SH モデルを用いて初期値 \tilde{Q}_α を求めているのは，主に計算時間の問題のためである．初期値を求めるまでは全探索を用いているため，1 つのパラメータ Q の探索範囲を x 点とすると，推定するパラメータが n 個増加するにしたがって計算量は $O(x^n)$ 増大するためである．探索点数を少なくすれば計算量は大きく減少するが，探索範囲を荒く取ってしまうと，Nelder-Mead アルゴリズムの特性上解が局所解に陥りやすくなってしまふ．その結果，推定されたパラメータがハイスピードカメラデータおよび手術効果を反映しない結果となってしまう可能性が高くなるため，従来の SH モデルを用いて初期値を求めている．

6.4 パラメータ推定結果

6.1 節および 6.2 に示したパラメータ追加案を用いて，デジタルハイスピードカメラによる声門波形に対してパラメータ推定を行った．表 6.1~6.14 に各 SH モデルについて，各患者のパラメータ推定結果および推定結果から得られた波形を解析した結果を示す．図 6.1~6.14 は Q の係数分離と Q の上下分離を用いて推定されたパラメータによる波形およびそのパワースペクトルを示している．各図において，1 段目の図がデジタルハイスピードカメラにより撮影されたデータ，2 段目が各 SH モデルにより生成された波形を示している．1 段目と 2 段目の実線は左側声帯，破線は右側声帯である．3 段目はデジタルハイスピードカメラデータおよび SH モデルにより生成された波形の，左側声帯のパワースペクトルを示している．4 段目は同じく右側声帯のパワースペクトルである．3 段目と 4 段目の実線はデジタルハイスピードカメラデータ，破線は SH モデルによる波形である．

表 6.1~6.14 に示した推定結果より，パラメータを追加した場合でも追加しない場合と同様の傾向が見て取れるが，患者 C においては手術前後で a_{rest} が小さくなる結果となっ

た。これは、推定するパラメータを追加すればさらに手術の効果をモデルに反映させることができるようになることを示唆している。

しかし、患者 A,D,E については、パラメータを追加しない場合と同様に、適切に手術効果を反映したとは言えない結果となった。これらを解決するためには、モデルの拡張や初期値の推定法を見直す必要があると考えられる。

また、推定するパラメータを追加した場合、振幅差がデジタルハイスピードカメラに近い値となる場合が多い結果となった。

しかし、全体としては拡張しても大きな変化がなかった理由として、現在の評価関数 Γ は基本周波数、振幅、閉鎖期の 3 点のみの評価となっているため、各モデル間に大きな差が出なかったと考えられる。評価関数 Γ の評価項目を増やし、初期値の推定を見直すことで、追加したパラメータを生かし手術効果を適切に表すことができる可能性がある。

表 6.1: 患者 A の手術前後において推定されたパラメータ.

| | | |
|------------------|--------|--------|
| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
| Ql | 2.190 | 2.120 |
| Qr | 2.006 | 2.143 |
| $P_S(H_2O)$ | 27.8 | 25.5 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0379 | 0.0388 |
| Q の係数分離 | 手術前 | 手術後 |
| Qml | 2.139 | 2.139 |
| Qmr | 2.086 | 2.221 |
| Qkl | 2.135 | 1.827 |
| Qkr | 2.097 | 2.270 |
| Qkcl | 2.121 | 2.229 |
| Qkcr | 2.094 | 1.991 |
| $P_S(H_2O)$ | 27.9 | 30.9 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.400 | 0.0386 |
| Q の上下分離 | 手術前 | 手術後 |
| Q1l | 2.118 | 2.037 |
| Q1r | 2.017 | 2.087 |
| Q2l | 3.105 | 3.168 |
| Q2r | 2.865 | 3.145 |
| $P_S(H_2O)$ | 24.7 | 28.2 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0408 | 0.0401 |

表 6.2: 患者 A の声門波形解析結果

| | | | | |
|----------------|--------|-----------------|-----------------|------------------|
| 手術前 | SH モデル | Q の係数分離 | Q の上下分離 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 286 | 284 | 286 | 285 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 286 | 284 | 286 | 285 |
| 閉鎖期 [%] | 13.0 | 14.5 | 12.9 | 14.5 |
| 位相差 [%] | 10.0 | 1.61 | 12.7 | 6.20 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0902 | 0.0864 | 0.0870 | 0.1034 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0819 | 0.0843 | 0.0801 | 0.0775 |
| 振幅差 [%] | 4.82 | 1.32 | 4.11 | 14.3 |
| NAQ | 0.284 | 0.286 | 0.289 | 0.260 |
| 手術後 | SH モデル | SH モデル 拡張法 1 | SH モデル 拡張法 2 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 291 | 290 | 290 | 291 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 291 | 290 | 290 | 291 |
| 閉鎖期 [%] | 13.0 | 15.9 | 19.5 | 32.3 |
| 位相差 [%] | 3.22 | 9.67 | 3.34 | 11.8 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0790 | 0.0810 | 0.0873 | 0.0801 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0799 | 0.1053 | 0.0932 | 0.0954 |
| 振幅差 [%] | 0.54 | 13.1 | 3.27 | 8.72 |
| NAQ | 0.286 | 0.285 | 0.275 | 0.217 |

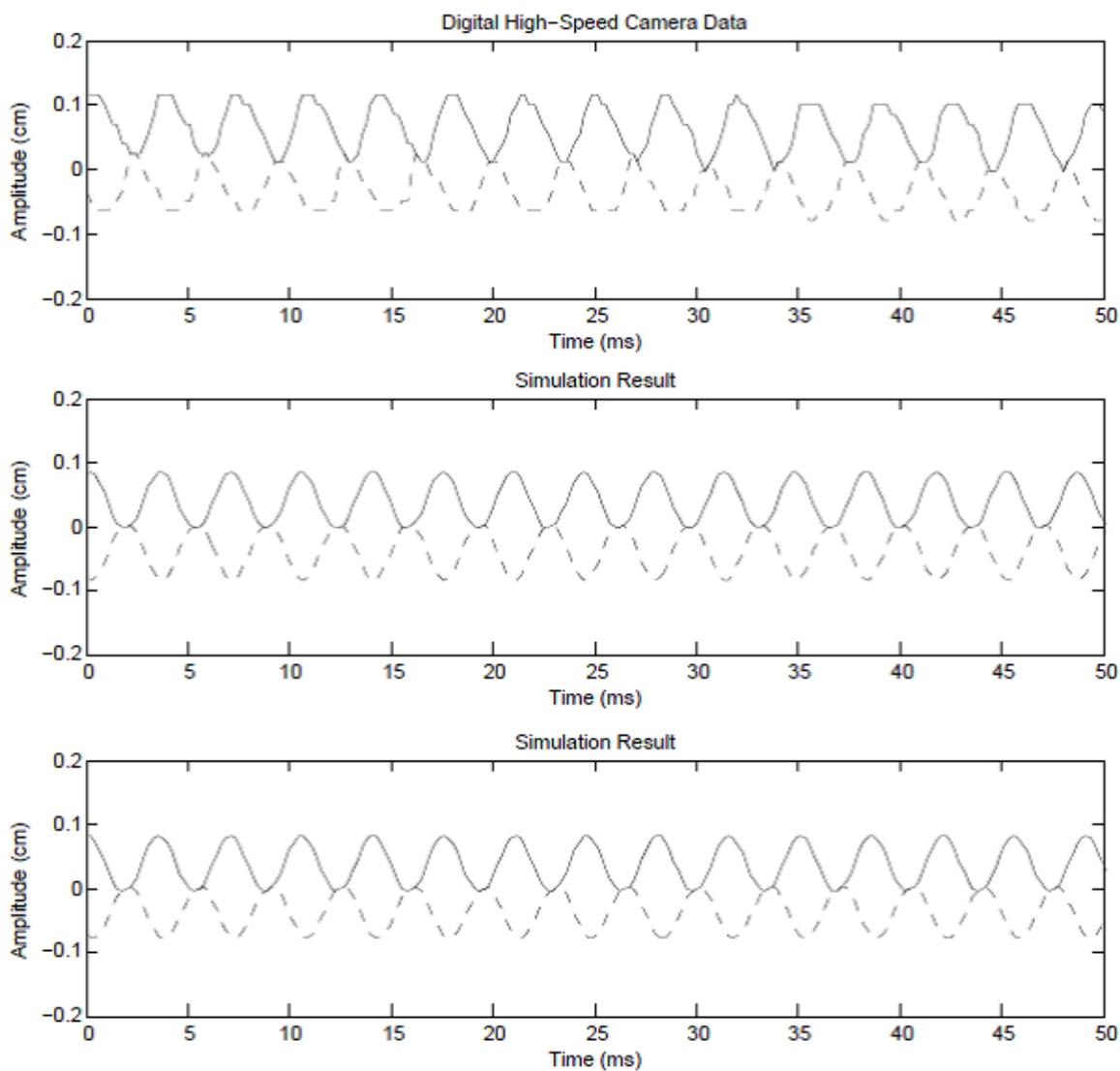


図 6.1: 患者 A の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

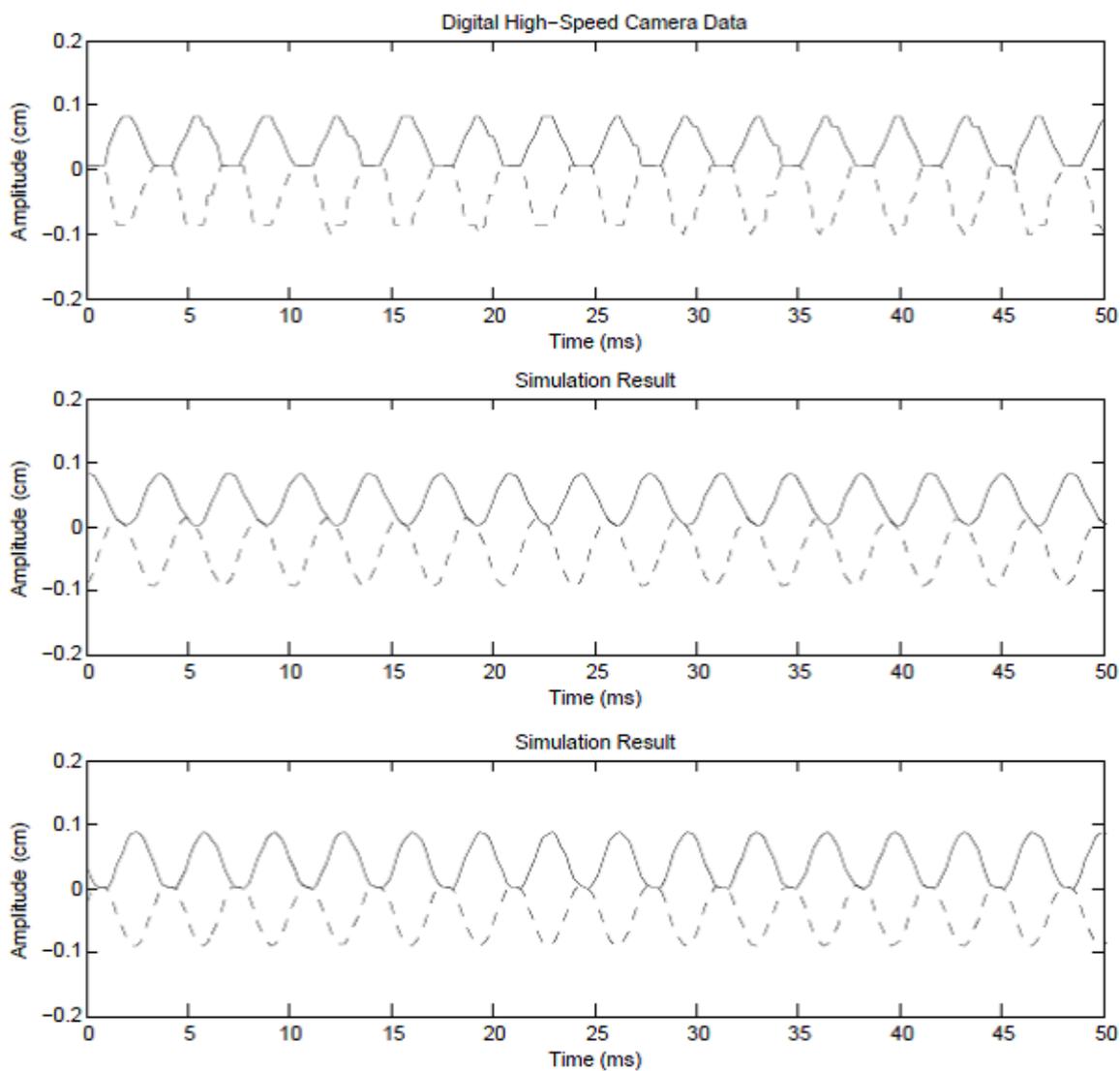


図 6.2: 患者 A の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

表 6.3: 患者 B の手術前後において推定されたパラメータ.

| | | |
|------------------|--------|--------|
| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
| Ql | 1.910 | 2.255 |
| Qr | 2.485 | 1.903 |
| $P_S(H_2O)$ | 38.3 | 28.8 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0658 | 0.0463 |
| Q の係数分離 | 手術前 | 手術後 |
| Qml | 2.025 | 2.115 |
| Qmr | 2.172 | 1.647 |
| Qkl | 2.028 | 2.220 |
| Qkr | 2.179 | 2.485 |
| Qkcl | 1.512 | 1.850 |
| Qkcr | 2.576 | 2.121 |
| $P_S(H_2O)$ | 35.2 | 24.9 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0997 | 0.0420 |
| Q の上下分離 | 手術前 | 手術後 |
| Q1l | 1.955 | 2.118 |
| Q1r | 2.337 | 2.321 |
| Q2l | 2.448 | 2.831 |
| Q2r | 2.709 | 3.239 |
| $P_S(H_2O)$ | 57.5 | 52.0 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.1056 | 0.0933 |

表 6.4: 患者 B の声門波形解析結果

| 手術前 | SH モデル | Q の係数分離 | Q の上下分離 | ハイスピード カメラデータ |
|----------------|--------|-----------------|-----------------|------------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 269 | 269 | 270 | 268 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 269 | 269 | 270 | 268 |
| 閉鎖期 [%] | 0.2 | 0 | 0 | 0 |
| 位相差 [%] | 16.2 | 9.01 | 28.3 | 15.7 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0731 | 0.0665 | 0.0817 | 0.0896 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0473 | 0.0426 | 0.0525 | 0.0698 |
| 振幅差 [%] | 21.4 | 21.9 | 21.8 | 13.4 |
| NAQ | 0.457 | - | - | - |
| 手術後 | SH モデル | SH モデル 拡張法 1 | SH モデル 拡張法 2 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 287 | 287 | 287 | 288 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 287 | 287 | 287 | 288 |
| 閉鎖期 [%] | 0.4 | 0.6 | 0 | 0.8 |
| 位相差 [%] | 13.9 | 11.6 | 20.8 | 20.8 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0894 | 0.0891 | 0.0890 | 0.1131 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0725 | 0.0719 | 0.0709 | 0.0880 |
| 振幅差 [%] | 10.4 | 10.7 | 11.3 | 12.7 |
| NAQ | 0.340 | 0.297 | - | 0.400 |

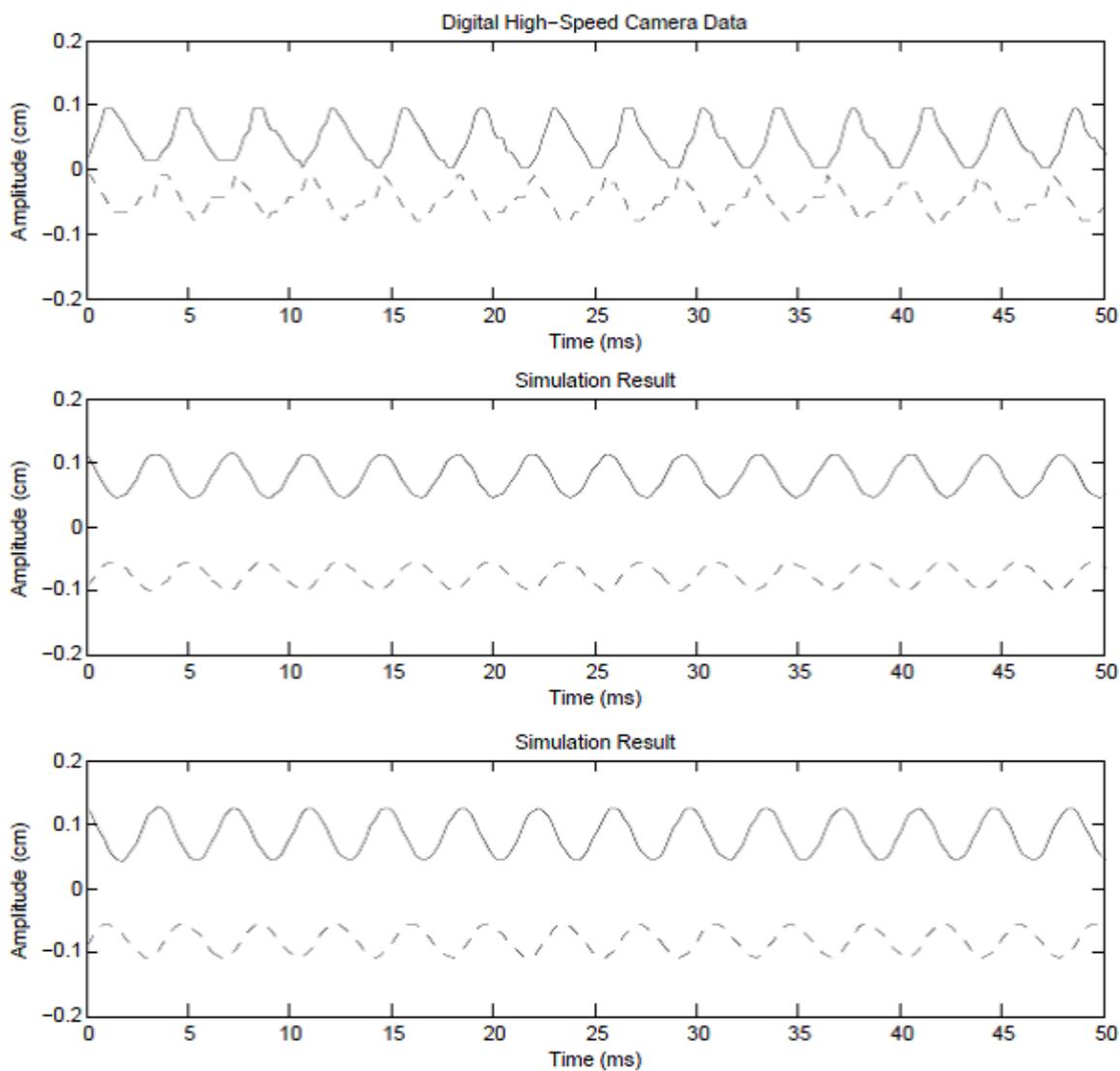


図 6.3: 患者 B の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

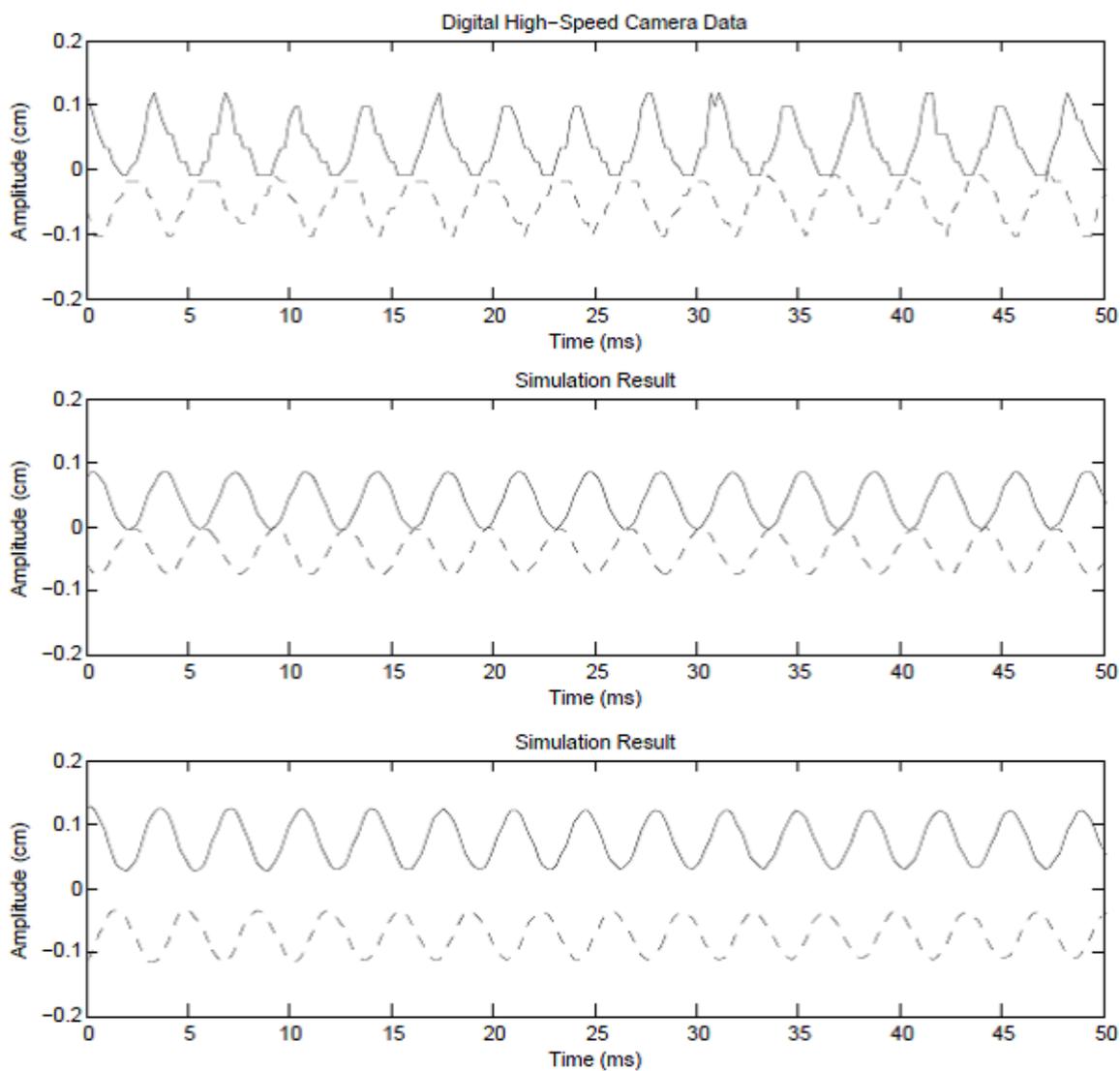


図 6.4: 患者 B の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

表 6.5: 患者 C の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|--------|--------|
| Ql | 2.525 | 1.948 |
| Qr | 2.355 | 1.744 |
| $P_S(H_2O)$ | 39.1 | 33.4 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.1037 | 0.1010 |
| Q の係数分離 | 手術前 | 手術後 |
| Qml | 2.380 | 1.724 |
| Qmr | 2.844 | 1.773 |
| Qkl | 2.425 | 1.721 |
| Qkr | 2.399 | 1.762 |
| Qkcl | 2.612 | 3.109 |
| Qkcr | 1.714 | 1.108 |
| $P_S(H_2O)$ | 47.0 | 36.8 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.1344 | 0.1140 |
| Q の上下分離 | 手術前 | 手術後 |
| Q1l | 2.606 | 2.051 |
| Q1r | 2.425 | 1.684 |
| Q2l | 3.603 | 2.166 |
| Q2r | 3.756 | 3.167 |
| $P_S(H_2O)$ | 53.8 | 32.7 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0986 | 0.0506 |

表 6.6: 患者 C の声門波形解析結果

| | | | | |
|----------------|--------|-----------------|-----------------|------------------|
| 手術前 | SH モデル | Q の係数分離 | Q の上下分離 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 332 | 333 | 332 | 333 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 332 | 333 | 332 | 333 |
| 閉鎖期 [%] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 位相差 [%] | 8.32 | 10.6 | 8.51 | 9.50 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0277 | 0.0235 | 0.0182 | 0.0324 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0285 | 0.0317 | 0.0246 | 0.0555 |
| 振幅差 [%] | 1.52 | 14.8 | 14.9 | 26.7 |
| NAQ | - | - | - | - |
| 手術後 | SH モデル | SH モデル 拡張法 1 | SH モデル 拡張法 2 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 236 | 236 | 236 | 236 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 236 | 236 | 236 | 236 |
| 閉鎖期 [%] | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 位相差 [%] | 12.1 | 3.01 | 10.9 | 17.3 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0284 | 0.0104 | 0.0394 | 0.0349 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0303 | 0.0198 | 0.0715 | 0.0642 |
| 振幅差 [%] | 3.80 | 31.0 | 28.9 | 29.6 |
| NAQ | - | - | - | - |

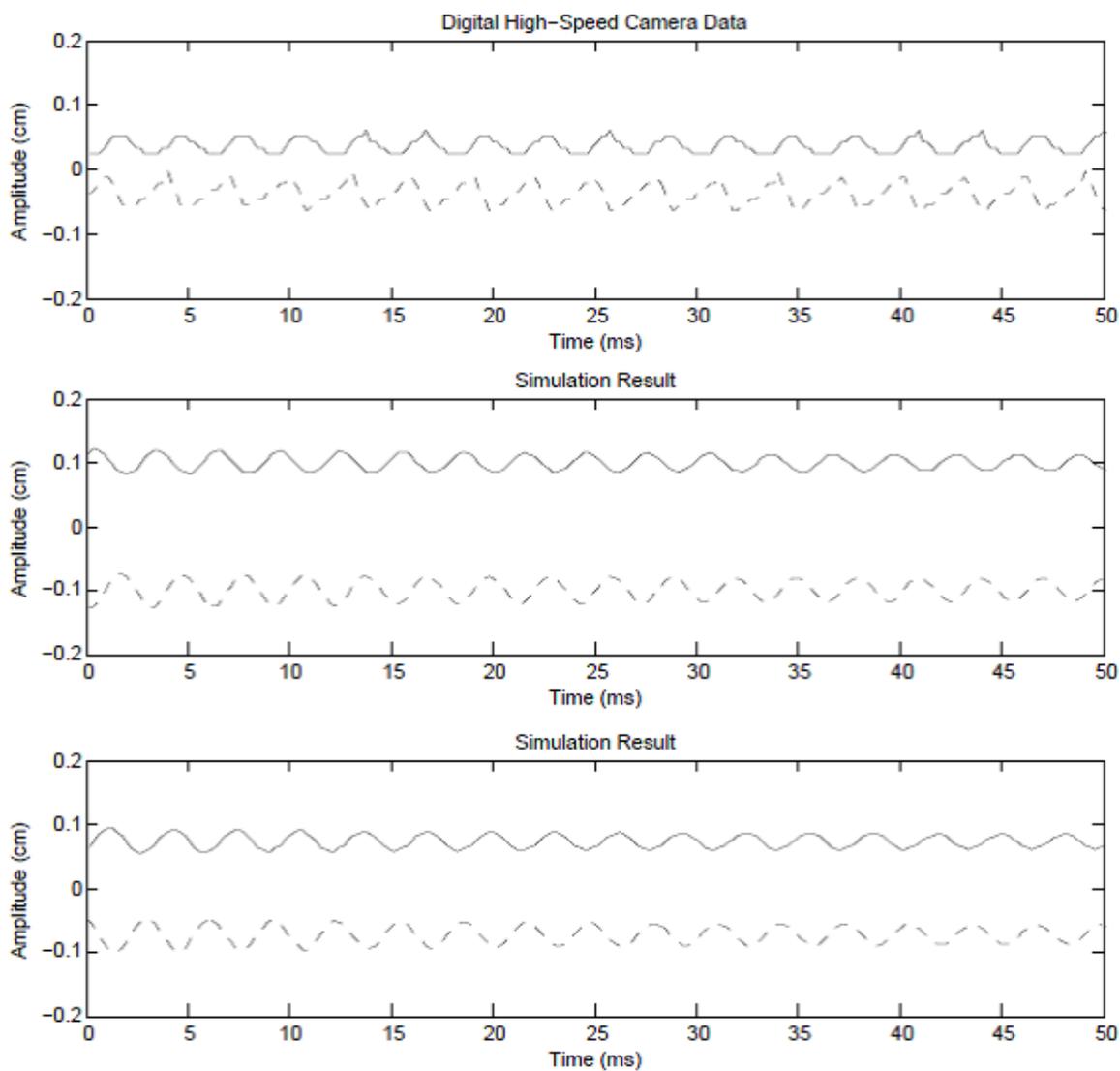


図 6.5: 患者 C の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

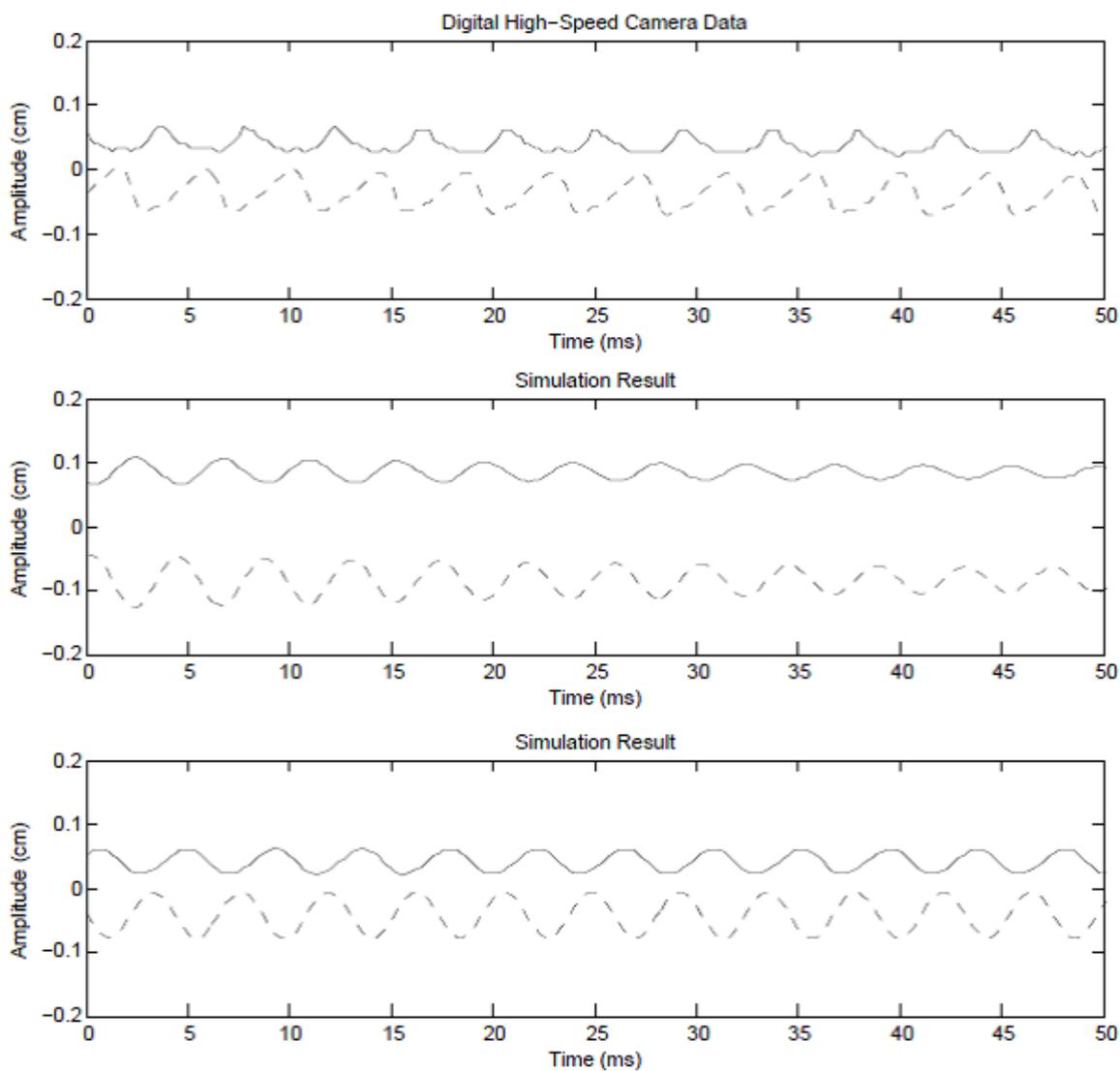


図 6.6: 患者 C の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

表 6.7: 患者 D の手術前後において推定されたパラメータ.

| | | |
|------------------|--------|--------|
| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
| Ql | 2.832 | 2.410 |
| Qr | 2.984 | 2.179 |
| $P_S(H_2O)$ | 27.4 | 40.4 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0617 | 0.1025 |
| Q の係数分離 | 手術前 | 手術後 |
| Qml | 2.704 | 2.150 |
| Qmr | 3.237 | 2.682 |
| Qkl | 2.386 | 2.232 |
| Qkr | 2.927 | 2.174 |
| Qkcl | 3.442 | 2.402 |
| Qkcr | 3.130 | 2.153 |
| $P_S(H_2O)$ | 38.6 | 32.5 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0584 | 0.0779 |
| Q の係数分離 | 手術前 | 手術後 |
| Q1l | 3.144 | 2.340 |
| Q1r | 2.817 | 2.327 |
| Q2l | 3.118 | 2.543 |
| Q2r | 4.951 | 3.894 |
| $P_S(H_2O)$ | 43.7 | 32.6 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.761 | 0.0682 |

表 6.8: 患者 D の声門波形解析結果

| | | | | |
|----------------|--------|-----------------|-----------------|------------------|
| 手術前 | SH モデル | Q の係数分離 | Q の上下分離 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 384 | 383 | 385 | 384 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 384 | 383 | 385 | 384 |
| 閉鎖期 [%] | 0.2 | 0 | 0 | 0 |
| 位相差 [%] | 7.71 | 15.3 | 16.7 | 26.3 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0336 | 0.0325 | 0.0320 | 0.0292 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0336 | 0.0496 | 0.0510 | 0.0497 |
| 振幅差 [%] | 0 | 20.8 | 23.0 | 25.9 |
| NAQ | 0.0581 | - | - | - |
| 手術後 | SH モデル | SH モデル 拡張法 1 | SH モデル 拡張法 2 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 302 | 303 | 302 | 302 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 302 | 303 | 302 | 302 |
| 閉鎖期 [%] | 0 | 0 | 0 | 40.3 |
| 位相差 [%] | 11.0 | 8.51 | 8.27 | 21.6 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0387 | 0.0408 | 0.0424 | 0.0489 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0400 | 0.0469 | 0.0486 | 0.0444 |
| 振幅差 [%] | 1.89 | 6.87 | 6.82 | 7.72 |
| NAQ | - | - | - | 0.150 |

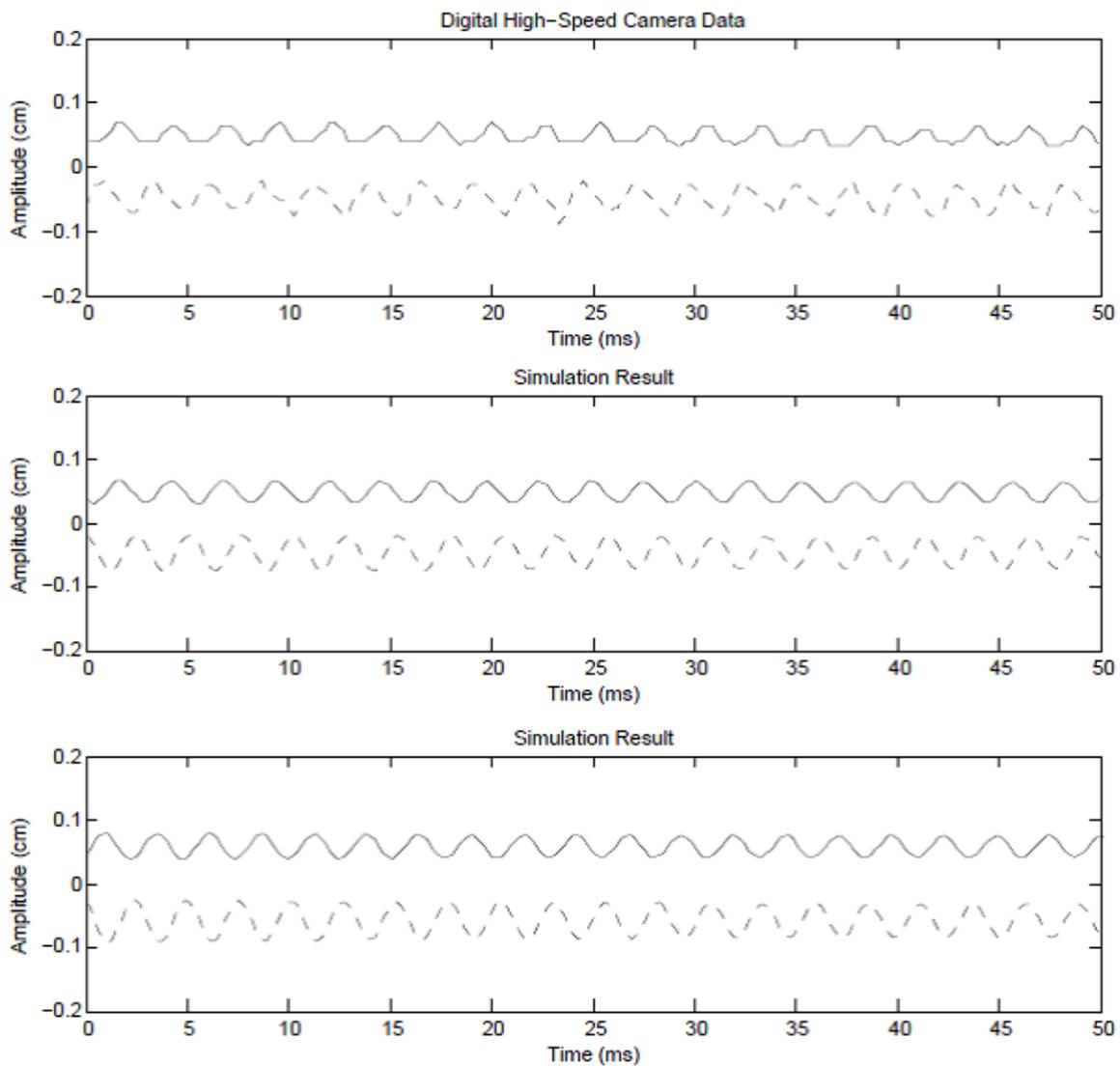


図 6.7: 患者 D の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

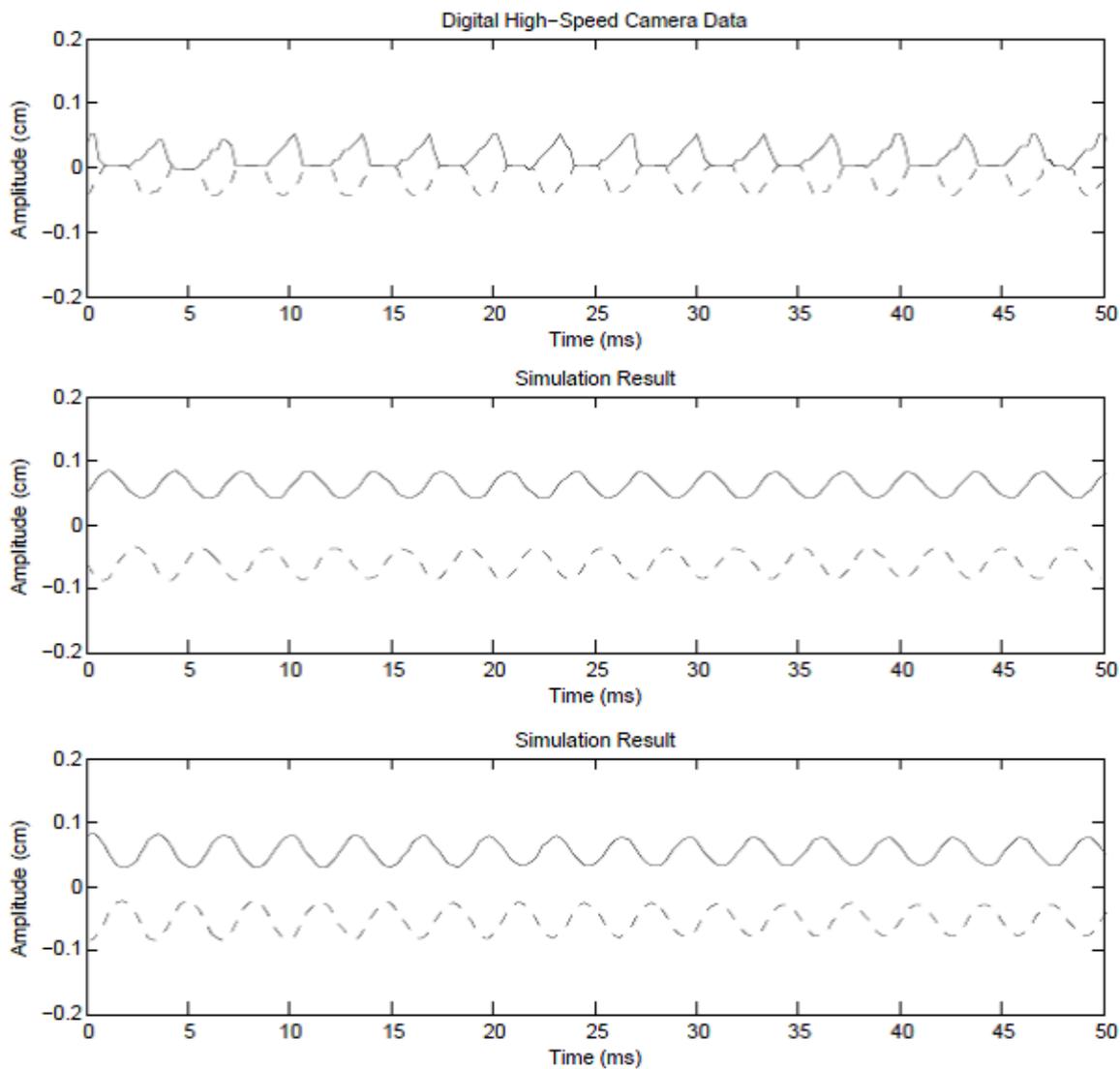


図 6.8: 患者 D の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

表 6.9: 患者 E の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|--------|--------|
| Ql | 0.860 | 1.690 |
| Qr | 1.013 | 1.811 |
| $P_S(H_2O)$ | 12.3 | 13.7 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0206 | 0.0203 |
| Q の係数分離 | 手術前 | 手術後 |
| Qml | 0.858 | 1.674 |
| Qmr | 1.025 | 1.717 |
| Qkl | 0.587 | 1.713 |
| Qkr | 1.024 | 1.799 |
| Qkcl | 0.861 | 1.935 |
| Qkcr | 1.052 | 1.816 |
| $P_S(H_2O)$ | 12.8 | 12.0 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0201 | 0.0192 |
| Q の上下分離 | 手術前 | 手術後 |
| Q1l | 0.866 | 1.627 |
| Q1r | 0.887 | 1.726 |
| Q2l | 1.380 | 2.323 |
| Q2r | 1.255 | 2.508 |
| $P_S(H_2O)$ | 8.0 | 13.7 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0201 | 0.0198 |

表 6.10: 患者 E の声門波形解析結果

| | | | | |
|----------------|--------|-----------------|-----------------|------------------|
| 手術前 | SH モデル | Q の係数分離 | Q の係数分離 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 128 | 128 | 128 | 128 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 128 | 128 | 128 | 128 |
| 閉鎖期 [%] | 18.4 | 18.3 | 20.2 | 62.5 |
| 位相差 [%] | 12.7 | 13.5 | 2.01 | 17.8 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0665 | 0.0686 | 0.0490 | 0.0707 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0706 | 0.0702 | 0.0487 | 0.0759 |
| 振幅差 [%] | 2.97 | 2.48 | 0.26 | 4.90 |
| NAQ | 0.268 | 0.263 | 0.267 | 0.132 |
| 手術後 | SH モデル | SH モデル 拡張法 1 | SH モデル 拡張法 2 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 240 | 240 | 240 | 239 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 240 | 240 | 240 | 239 |
| 閉鎖期 [%] | 15.0 | 13.8 | 20.0 | 52.3 |
| 位相差 [%] | 5.33 | 2.00 | 8.07 | 16.8 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0465 | 0.0398 | 0.0461 | 0.0460 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0490 | 0.0433 | 0.0545 | 0.0517 |
| 振幅差 [%] | 2.59 | 4.29 | 8.55 | 8.76 |
| NAQ | 0.274 | 0.293 | 0.264 | 0.118 |

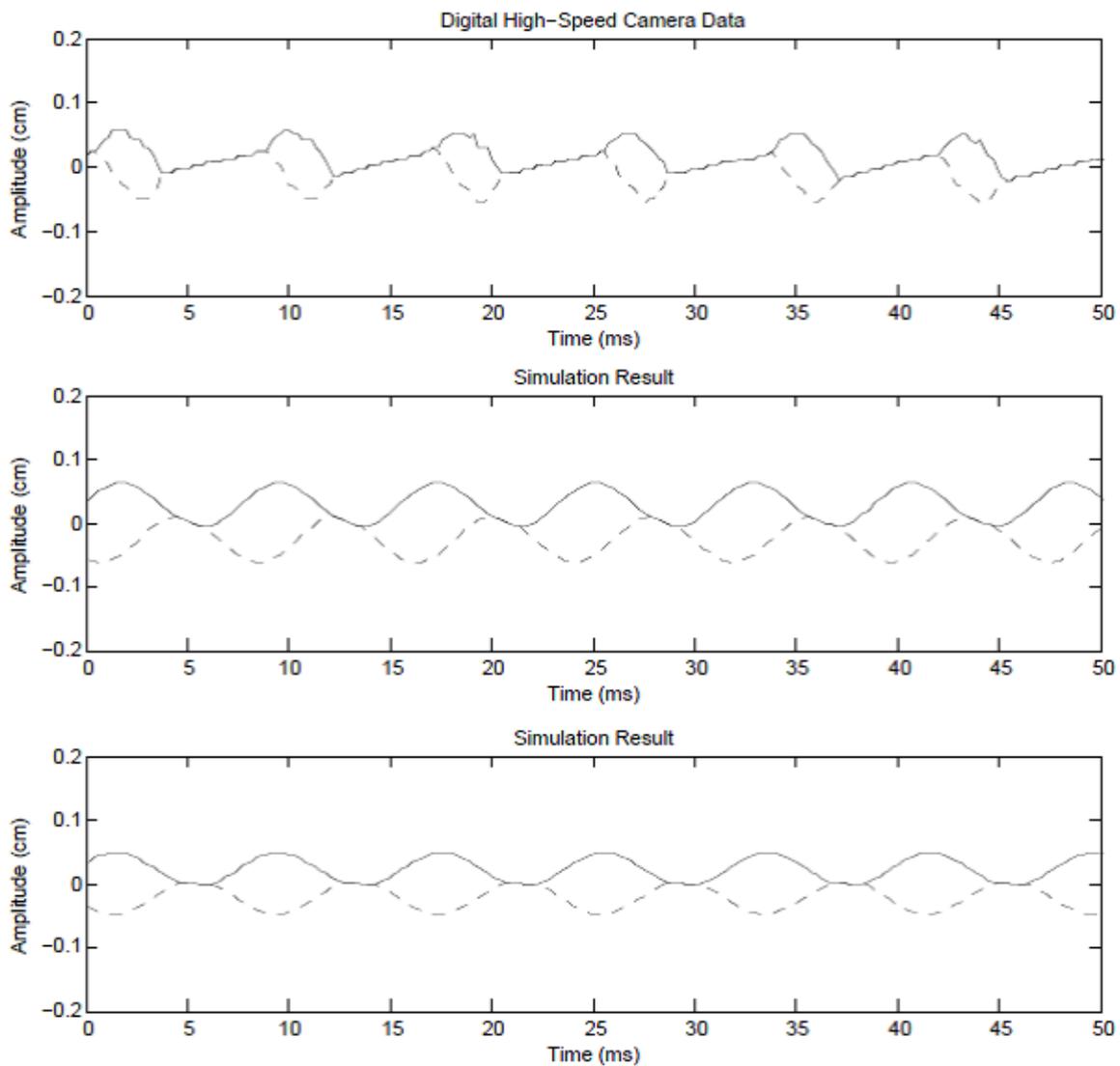


図 6.9: 患者 E の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目: Q の係数分離による波形 3 段目: Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

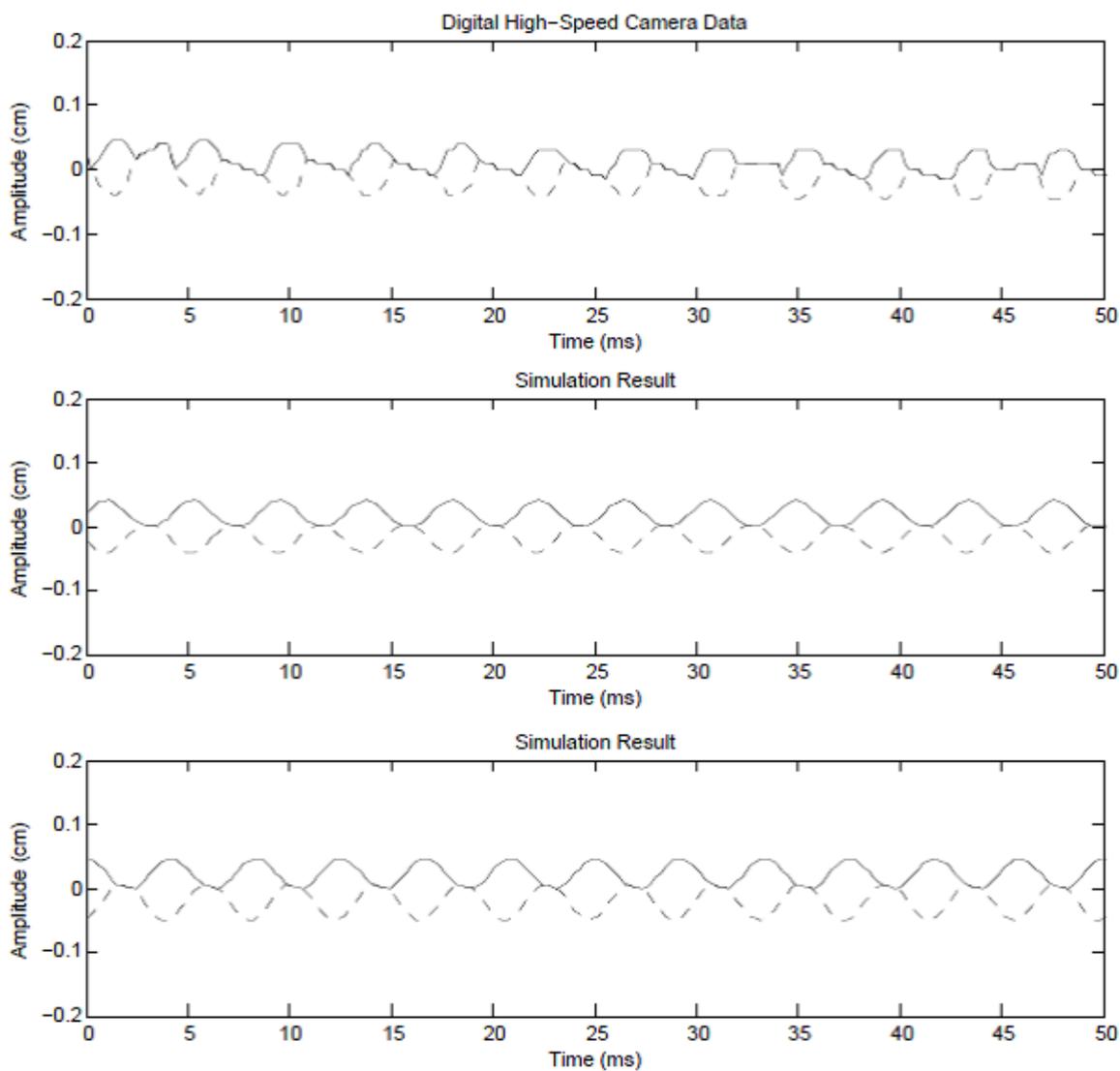


図 6.10: 患者 E の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

表 6.11: 患者 F の手術前後において推定されたパラメータ.

| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
|------------------|--------|--------|
| Ql | 1.740 | 1.276 |
| Qr | 1.952 | 1.168 |
| $P_S(H_2O)$ | 10.6 | 17.1 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.0700 | 0.0407 |
| Q の係数分離 | 手術前 | 手術後 |
| Qml | 1.826 | 1.268 |
| Qmr | 2.022 | 1.097 |
| Qkl | 1.701 | 1.179 |
| Qkr | 1.823 | 1.246 |
| Qkcl | 1.931 | 1.591 |
| Qkcr | 1.639 | 1.774 |
| $P_S(H_2O)$ | 10.4 | 16.4 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.1059 | 0.393 |
| Q の上下分離 | 手術前 | 手術後 |
| Q1l | 1.933 | 1.179 |
| Q1r | 1.856 | 1.140 |
| Q2l | 3.240 | 2.460 |
| Q2r | 2.894 | 2.264 |
| $P_S(H_2O)$ | 16.8 | 14.6 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.1288 | 0.0393 |

表 6.12: 患者 F の声門波形解析結果

| 手術前 | SH モデル | Q の係数分離 | Q の上下分離 | ハイスピード カメラデータ |
|----------------|--------|-----------------|-----------------|------------------|
| 基本周波数 (左) [Hz] | 246 | 247 | 246 | 246 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 246 | 247 | 246 | 246 |
| 閉鎖期 [%] | 1.00 | 0 | 0 | 1.00 |
| 位相差 [%] | 9.37 | 6.18 | 7.31 | 11.6 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0697 | 0.0518 | 0.0303 | 0.0603 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0738 | 0.0638 | 0.0364 | 0.0699 |
| 振幅差 [%] | 2.87 | 10.4 | 9.65 | 9.09 |
| NAQ | 0.299 | - | - | 0.337 |
| 手術後 | SH モデル | SH モデル 拡張法 1 | SH モデル 拡張法 2 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 182 | 180 | 180 | 180 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 182 | 180 | 180 | 180 |
| 閉鎖期 [%] | 25.0 | 25.4 | 26.3 | 32.0 |
| 位相差 [%] | 6.87 | 1.98 | 4.08 | 10.5 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.1166 | 0.1131 | 0.1328 | 0.1359 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0937 | 0.0923 | 0.1075 | 0.1010 |
| 振幅差 [%] | 10.9 | 10.2 | 10.5 | 14.7 |
| NAQ | 0.254 | 0.258 | 0.0207 | 0.204 |

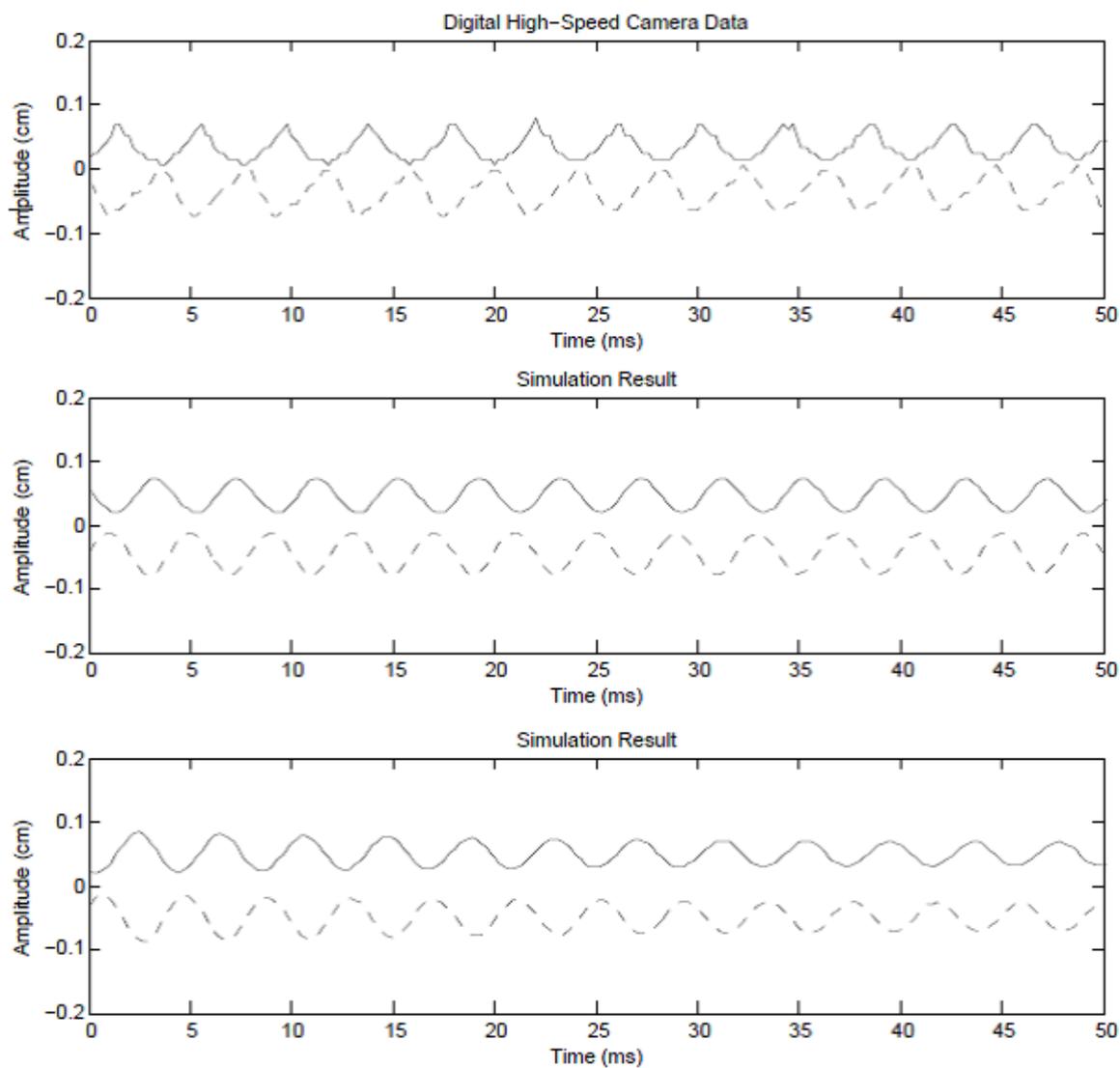


図 6.11: 患者 F の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

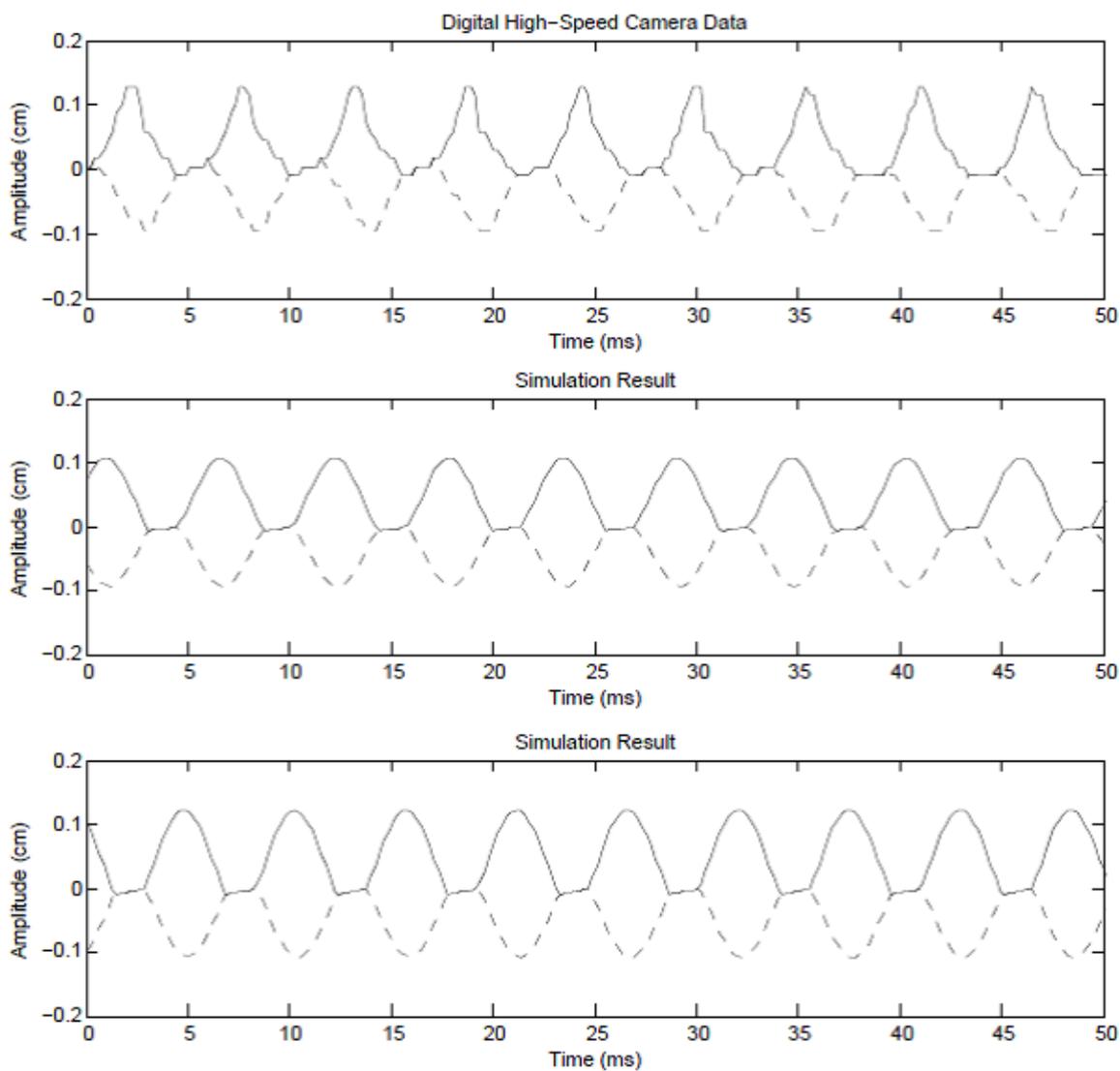


図 6.12: 患者 F の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

表 6.13: 患者 G の手術前後において推定されたパラメータ.

| | | |
|------------------|--------|--------|
| SH モデル | 手術前 | 手術後 |
| Ql | 2.837 | 1.972 |
| Qr | 2.042 | 2.791 |
| $P_S(H_2O)$ | 27.1 | 16.2 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.759 | 0.0432 |
| Q の係数分離 | 手術前 | 手術後 |
| Qml | 2.467 | 2.394 |
| Qmr | 2.521 | 2.533 |
| Qkl | 3.028 | 2.206 |
| Qkr | 2.411 | 1.882 |
| Qkcl | 1.152 | 1.087 |
| Qkcr | 3.438 | 3.055 |
| $P_S(H_2O)$ | 23.1 | 13.4 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.1985 | 0.1343 |
| Q の係数分離 | 手術前 | 手術後 |
| Q1l | 2.501 | 2.138 |
| Q1r | 2.920 | 2.567 |
| Q2l | 3.848 | 3.289 |
| Q2r | 3.330 | 3.591 |
| $P_S(H_2O)$ | 31.9 | 18.0 |
| $a_{rest}(cm^2)$ | 0.1704 | 0.0893 |

表 6.14: 患者 G の声門波形解析結果

| | | | | |
|----------------|--------|-----------------|-----------------|------------------|
| 手術前 | SH モデル | Q の係数分離 | Q の上下分離 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 350 | 349 | 348 | 349 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 350 | 349 | 348 | 349 |
| 閉鎖期 [%] | 0.2 | 0 | 0 | 0 |
| 位相差 [%] | 39.1 | 8.23 | 27.6 | 19.7 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.1450 | 0.1416 | 0.1114 | 0.1806 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0768 | 0.0773 | 0.0717 | 0.0918 |
| 振幅差 [%] | 29.0 | 29.4 | 21.7 | 32.6 |
| NAQ | 0.305 | - | - | - |
| 手術後 | SH モデル | SH モデル 拡張法 1 | SH モデル 拡張法 2 | ハイスピード カメラデータ |
| 基本周波数 (左) [Hz] | 292 | 291 | 291 | 291 |
| 基本周波数 (右) [Hz] | 292 | 291 | 291 | 291 |
| 閉鎖期 [%] | 0.3 | 0 | 0.2 | 0 |
| 位相差 [%] | 20.7 | 4.23 | 28.8 | 29.6 |
| 振幅 (左) [cm] | 0.0971 | 0.0701 | 0.0772 | 0.0828 |
| 振幅 (右) [cm] | 0.0581 | 0.0373 | 0.0405 | 0.0399 |
| 振幅差 [%] | 25.1 | 30.5 | 31.2 | 35.6 |
| NAQ | 0.271 | - | 0.348 | - |

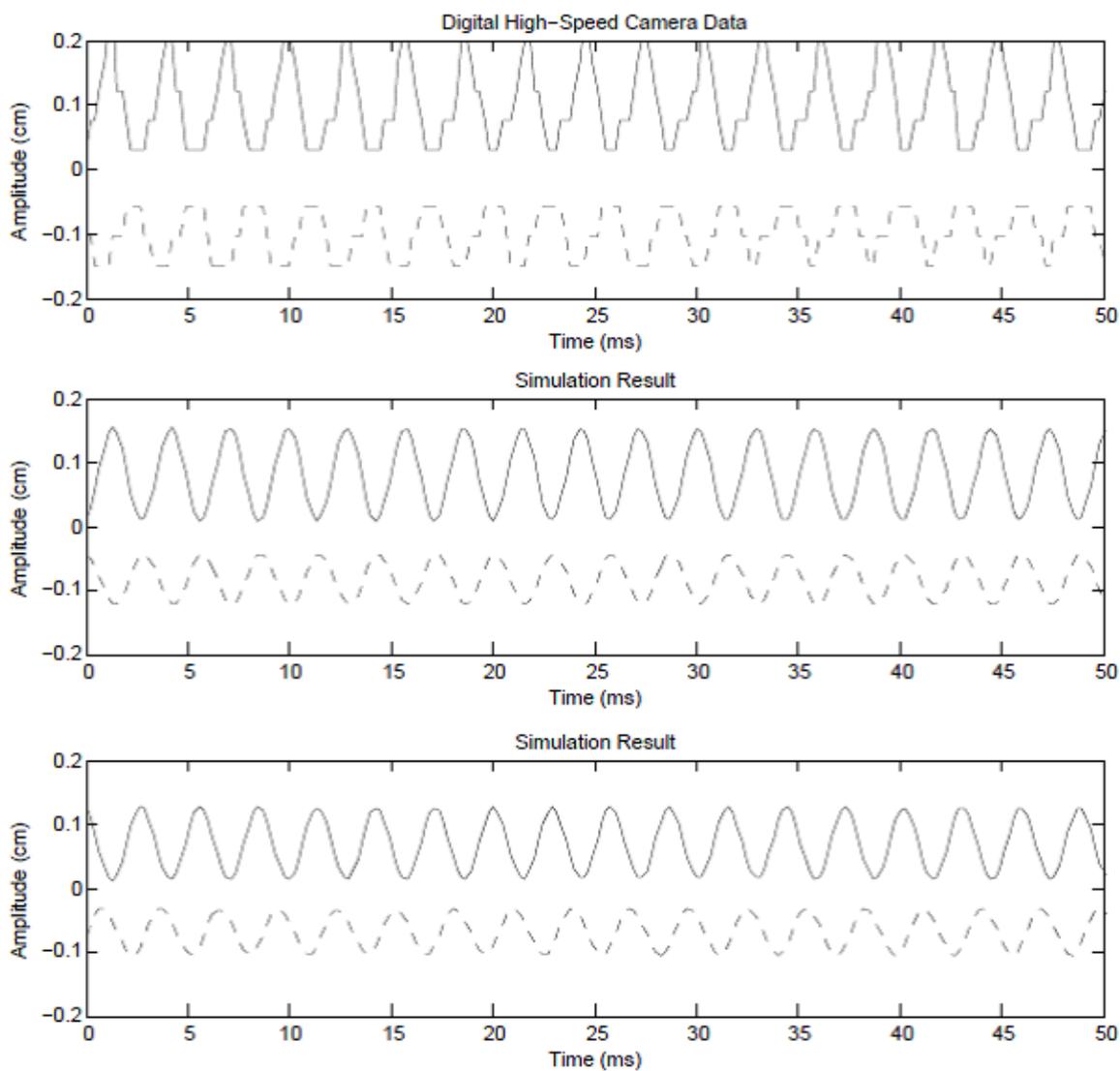


図 6.13: 患者 G の手術前のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

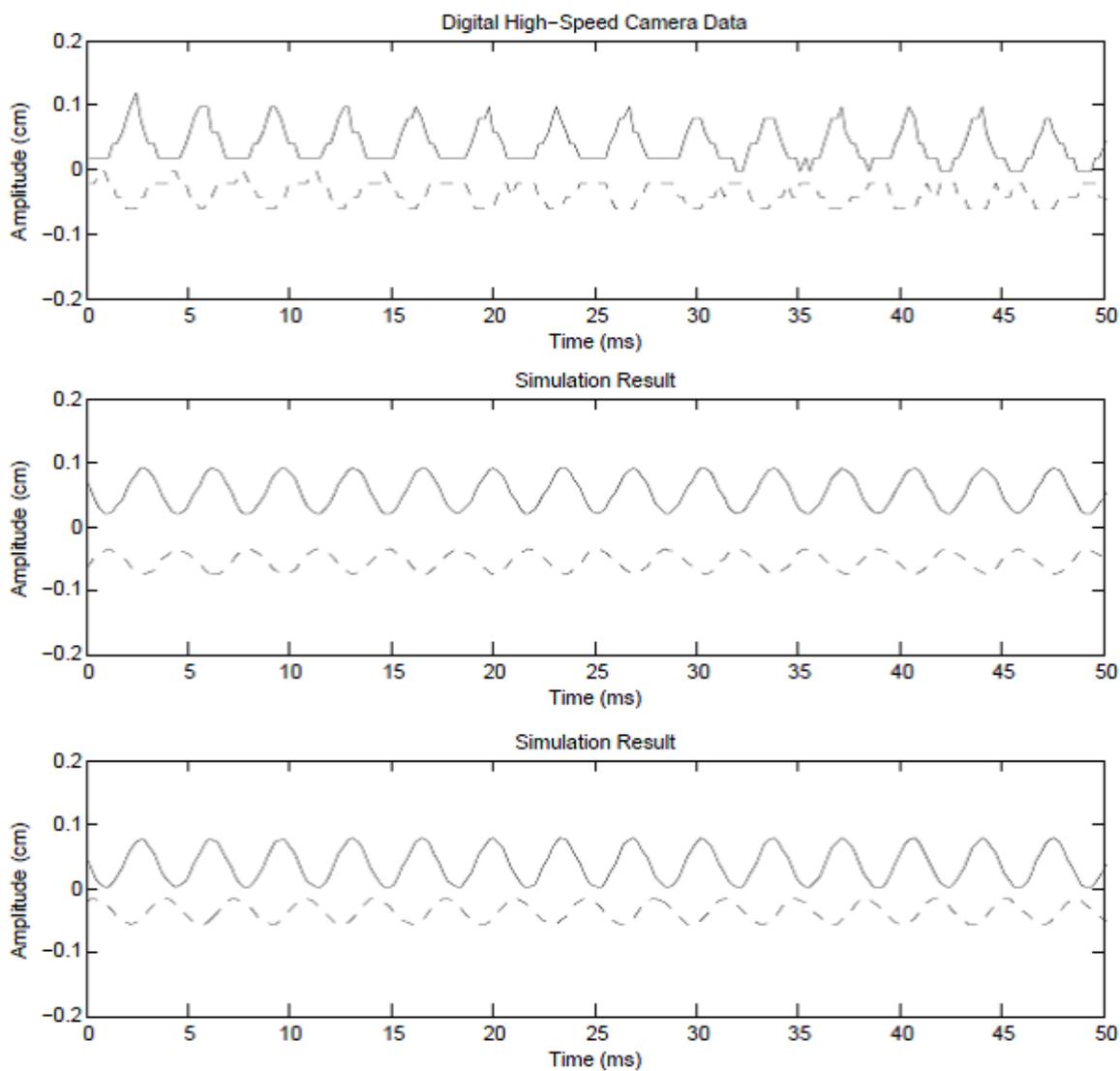


図 6.14: 患者 G の手術後のハイスピードカメラデータと Q の係数分離および Q の上下分離による声門波形 1 段目:ハイスピードカメラデータ 2 段目:Q の係数分離による波形 3 段目:Q の上下分離による波形 実線:左側声帯 破線:右側声帯.

第7章 結論

7.1 まとめ

本研究では、デジタルハイスピードカメラで撮影された声帯麻痺状態の声帯振動を用いて、評価関数 Γ と Nelder-Mead アルゴリズムによる 2 質量モデルのパラメータ推定を行った。推定されたパラメータを比較した結果、手術前後で声門開口面積が小さくなることが確認できた。デジタルハイスピードカメラとモデルにより生成された声門波形を比較した結果、声門の閉鎖期が増加することが確認できた。この 2 点より、手術の効果がモデルに適切に反映されていると考えられる。

また、SH モデルの非対称性を表す張力パラメータ Q に関して、2 通りのパラメータ追加案を提案した。1 つは質量、バネ定数の各 Q を独立であると想定し分離した案である。2 つ目は上側質量と下側質量の Q を分離する案である。それぞれのパラメータ追加案を用いてパラメータ推定を行い、従来の SH モデルおよびパラメータを追加した SH モデルにより生成された声門波形を比較した結果、パラメータを追加することで手術の効果をモデルによりよく反映させることができることが示唆された。また、振幅差についても再現度が向上することが分かった。しかし、大きな改良までには至らなかった理由としては、評価関数 Γ の評価項目が少ないことが考えられる。

最後に、本研究の声帯手術シミュレータへの応用の検討であるが、手術シミュレータへの応用のためにはいくつかの課題が考えられる。その 1 つとして、声帯内注入法により注入された注入材料の質量とモデルの質量との対応を取ることである。

7.2 今後の課題

本研究で提案した手法は、基本的には左右の声帯の振動基本周波数が同一の場合は適切にパラメータ推定が可能であるが、左右の声帯の振動基本周波数が異なる例の場合にはパラメータ推定が難しい。声帯麻痺状態で左右の声帯の振動基本周波数が異なる場合、声門波形に閉鎖期が存在しない場合が多い。2 質量モデルでは、左右の声帯が衝突する場合には左右の振動基本周波数が異なる例を表すことが出来るが、衝突しない場合は表すことが難しい。左右の声帯の振動基本周波数が異なる例にこの手法を適用するためには、何らかの改良が必要であることが考えられる。

参考文献

- [1] 木村美和子, 高速度デジタル撮影法を用いた異常声帯振動の病態解析と音声外科的治療に関する研究, 東京大学 博士論文, 2007.
- [2] K. Ishizaka and J. L. Flanagan, "Synthesis of voiced sounds from a two-mass model of the vocal cords", Bell. Syst. Tech. J., Vol. 51, pp. 1233-1268, 1972.
- [3] K. Ishizaka and K. Isshiki, "Computer simulation of pathological vocal-cord vibration", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 60, pp. 1193-1198, 1976.
- [4] I. Steinecke and H. Herzel, "Bifurcations in an asymmetric vocal-fold model", J. Acoust. Soc. Am., vol. 97, pp. 1249-1259, 1995.
- [5] M. Döllinger, U. Hoppe, F. Hettlich, J. Lohscheller, S. Schuberth, and U. Eysholdt, "Vibration parameter extraction from endoscopic image series of the vocal folds", IEEE Trans. on Biomed. Engin., Vol. 49, pp. 773-781, 2002.
- [6] P. Alku, T. Backstrom, E. Vilkmam, "Normalized amplitude quotient for parameterization of the glottal flow", J. Acoust. Soc. Am., Vol.112, pp701-710, 2002.
- [7] 日本音声言語医学会 編“ 声の検査法 臨床編 ”医歯薬出版株式会社, 1994.
- [8] CYBERNET SYSTEMS 社
“ MATLAB で行う最小化の基礎 - fminbnd 関数と fminsearch 関数 - ”
<http://www.cybernet.co.jp/matlab/library/library/file/T/TT028.pdf?id=TT028>

謝辞

本研究で用いた高速カメラ計測データは、木村美和子博士(国立国際医療センター)、今川博氏(東京大学医学部附属病院)、榊原健一氏(北海道医療大学)、田山二郎博士(国立国際医療センター)より提供頂きました。日頃より共同研究を頂く各氏に感謝致します。

本研究に関する研究業績

口頭発表

1. 永沼 宙, 徳田 功, 木村 美和子, 今川 博, 榊原 健一, 田山 二郎, ”声帯麻痺患者の異常声帯振動データに対する非対称二質量モデルの係数推定”, 電子情報通信学会技術研究報告, NLP2007-109, Dec, 2007.
2. 永沼 宙, 徳田 功, 木村 美和子, 今川 博, 榊原 健一, 田山 二郎, ”二質量モデルを用いた麻痺声帯における手術前後の物性の変化の推定”, 日本音響学会 2008 年春季研究発表会, 1-11-16, March, 2008.
3. Hiroshi Naganuma, Isao T. Tokuda, Miwako Kimura, Hiroshi Imagawa, Ken-Ichi Sakakibara, and Niro Tayama, “ Parameter estimation of asymmetric two-mass model for high-speed recording of vocal fold atrophy”, NCSP08, March, 2008.