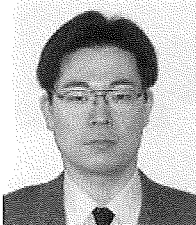


喉頭高速ビジョン스코プによる声帯振動のリアルタイム音声化の研究

Real-time Auditorization of Vocal-Cord Vibration by Using a High-speed Laryngoscope

1091001



研究代表者

広島大学 工学研究科
システムサイバネティクス専攻 教授

石 井 抱

〔研究の目的〕

本研究は、数百 Hz レベルの声帯振動について、高速ビジョンを用いて時空間振動分布として計測することにより、腫瘍等により生じる声帯異常振動をリアルタイム音声化・定量化可能とする喉頭高速ビジョン스코プの研究開発を目的とする。本研究で開発した喉頭高速ビジョン스코プの最終的な目標は、喉頭温存率向上など癌患者の QoL 向上に向け、人間の目や耳で直接観察が難しい声帯異常振動を含む喉頭部位の新たな診断装置として実現することにある。

〔研究の内容、成果〕

a) 研究の背景

声帯は、図1のように喉頭の上部にある左右一対の襞状の粘膜組織からなる発声器官であり、襞の隙間に肺からの呼気が通過することにより、数百 Hz といった周波数で自励振動を行う。声

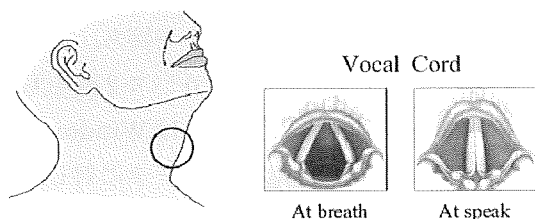


図1 声帯

帯疾患には、喉頭癌、声帯麻痺、声帯ポリープ等があり、頭頸部外科診療現場では、患者の QoL を低下させる喉頭摘出を回避した治療を行うために、病態の進行状況を把握する声帯検査が重要視される。声帯疾患がある場合、腫瘍などの声帯上の病変に伴い、左右非対称な異常振動分布が出現するため、声帯振動の画像検査は静的な外観検査とともに意味を持つ。疾患と声帯振動での左右非対称性の関係は、オフライン高速ビデオ画像を用いた声帯振動の数値モデリングなどの研究でも報告されている。

声帯振動を画像検査する方法としては、声帯振動に近い周波数でのストロボ照明点滅により、検査者にスローモーション画像提示を行うストロボスコープが広く使われている。この診断法は、高速な声帯振動を目視検査による定性的な検査を可能とする一方で、既知の周期振動を前提とし、不規則及び未知周波数の声帯振動には必ずしも適していない。本研究では、これらの問題点を踏まえ、4000 fps (frames per second) で実時間動作する高速ビジョンを導入し、声帯振動の周波数帯域をカバーする高速画像処理を施すことにより、声帯における振動分布をリアルタイム観測する高速喉頭ビジョン스코プを開発した。また人工声帯モデルを用いて、左右非対称の異常振動の定量化及びリアルタイム音声化が可能であることを検証し、実際に健常者に対する動作検証実験を行い、その

基本的な機能を検証した。

b) 開発した喉頭高速ビジョンスコープ

開発した喉頭高速ビジョンスコープは、硬性声帯鏡、照明源、高速カメラヘッド、専用FPGA画像処理ボード、パソコンから構成される。喉頭ビジョンスコープの構成を図2に示す。

硬性声帯鏡にマウントされた高速カメラヘッドでは、 512×256 画素の8ビット濃淡画像を4000 fpsで撮影することが可能であり、これらの画像データは専用FPGA画像処理ボード(IDP Express ボード)を介し、パソコン上の汎用メモリに高速転送される。パソコン上には、声帯の振動分布を自動抽出する画像処理アルゴリズムが実装され、処理結果は入力画像とともに実時間モニタ表示されるとともに、定量化されたデータとして記録される。

硬性声帯鏡には、町田製作所製のLY-CS 30を用いた。LY-CS 30は全長218 mm、外径8 mmの前方斜視型(視野方向 70°)の硬性声帯鏡であり、観察深度が30 mm~70 mm、視野角が 40° に設定されている。Cマウントレンズアダプタが装着されており、各種カメラヘッドがマウント可能である。ライトガイドを介して同軸落射照明が可能であり、本システムでは照明源としてILH-2 A(オリンパス)を用いた。

カメラヘッドにはフォトロン社の高速度カメラMH 4-10 K用カメラヘッドを用いた。このカメラヘッドでは、8ビット濃淡画像につい

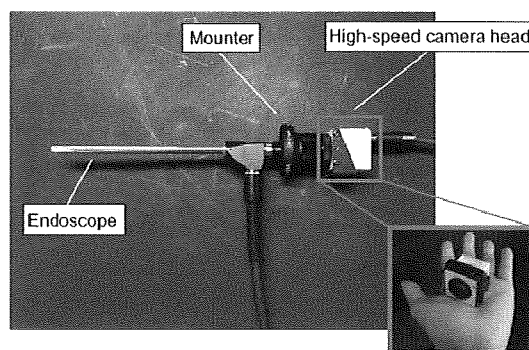


図3 喉頭高速ビジョンスコープの外観

て、 512×512 画素で2000 fps、 512×256 画素で4000 fpsでカメラヘッド外部に転送可能とする。大きさ $35 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$ 、重量300 gと小型軽量であり、硬性声帯鏡にカメラヘッドを直接マウントしても操作性に影響を与えない。図3にカメラヘッドを装着した硬性声帯鏡の外観を示す。

IDP Express ボードは、MH 4-10 K用カメラヘッドに対応した形で、高フレームレートでの実時間画像処理と映像記録の同時実現を目的に設計された専用FPGA画像処理ボードである。このボードは、ユーザカスタマイズ可能なアルゴリズム回路実装機能、8レーンのPCI-eバスを介して、4000 fpsで 512×256 画素画像といった大量データをパソコンの汎用メモリに高速転送する機能の特徴として持つ。本研究ではこれらの機能のうち、パソコンの汎用メモリへの高速画像転送機能を用いた。

パソコンは、IDP-Express ボードの高速画像転送機能に対応し、8レーン以上のPCI-eバス及びPCI-eバスから汎用メモリに対するDMA機能を持つものを用いた。具体的には、メインボードASUSTek P5 E, CPUチップセットCore 2 Quad Q 9300 Bulkを持ち、メモリが4-GB、16レーンのPCI 2.0バス2基をもったパソコンを用いた。動作OSはWindow XPである。汎用メモリ上の画像データに対し、予め用意されたAPI関数を用いて、処理に必要な画素だけを選択することが可能であり、ソフ

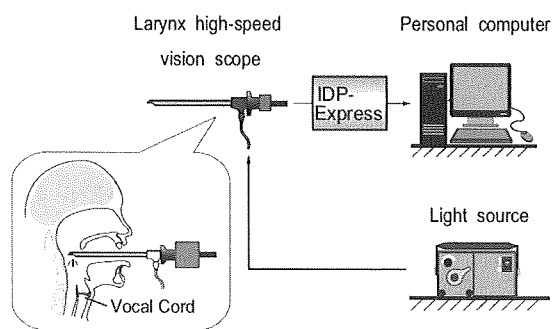


図2 喉頭高速ビジョンスコープの構成

トウェアによる画像処理の高速化を可能としている。

本研究では、次に述べる声帯振動パラメータ抽出処理をパソコン上のソフトウェアで実現し、その処理結果を入力画像とともに実時間モニタ表示・記録するものとした。

c) 声帯振動抽出アルゴリズム

喉頭高速ビジョンスコープでは、図4のように、画像から声門領域を抽出した上で、その左右端位置の速度分布を声帯振動分布として計測し、声帯振動における左右非対称性を定量化する。以下にこれらの処理について説明する。

1) 二値化による声門領域抽出

最初に喉頭ビジョンスコープ画像 $l(x, y, t)$ に対し、閾値 θ に基づく二値化処理を行い、輝度が暗い領域を声門領域とする二値化画像 $B(x, y, t)$ を計算する。

$$B(x, y, t) = \begin{cases} 1 & (l(x, y, t) > \theta) \\ 0 & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (1)$$

2) 声門左右端位置の検出

一定間隔 d に設定されたライン $y = y_i (i = 1, \dots, N)$ に対し、声門領域に対応した $B(x, y, t)$ を走査し、声門左端 / 右端の x 座標 $l_i(t), r_i(t)$

(t) を検出する。なお声門が閉じた状態や計測ライン上に声門が存在しないなど、声門領域が検出されない場合には、最後に声門位置を検出した時刻 $t = t_0$ から動きがないものとして、時刻 $t = t_0$ で検出された左右端の x 座標値を保持するものとする。

3) 声門振動における左右差動成分の検出

ライン x に対し声門中心位置 x を基準にした左右声門位置の振動成分を検出した上で、その振動成分の差分計算を行うことにより、声門振動における左右非対称性を示す左右差動成分 $d_i(t)$ を検出する。

$$L_i(t) = m_i - l_i(t) \quad (2)$$

$$R_i(t) = r_i(t) - m_i \quad (3)$$

$$d_i(t) = |L_i(t) - R_i(t)| \quad (4)$$

ここで声門中心位置の x 座標 m_i は 2 値画像の水平方向の重心成分により決定し。左右声帯弁の距離が極小となる場合に声門中心位置を更新するものとした

本研究では、声門に対する計測ライン数は $N = 20$ として、高速ビジョン IDP Express 上に前述アルゴリズムをソフトウェア実装した。この場合、声門振動における左右差動成分が、4000 fps でリアルタイム検出できることを確認した。

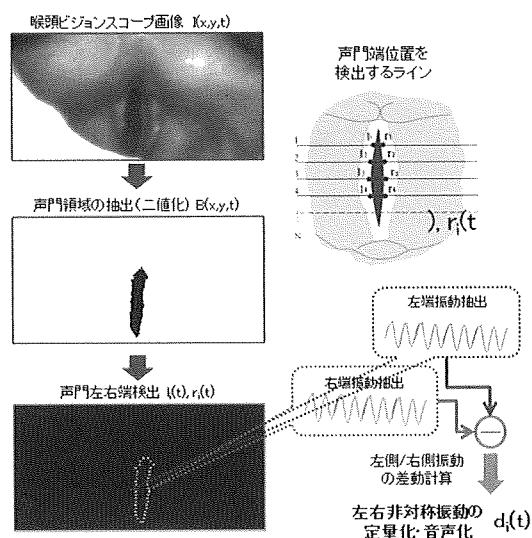


図4 声帯振動抽出アルゴリズム

d) シリコン膜振動モデルを用いた検証実験

声帯に模したシリコン膜振動モデルを用いて、喉頭高速ビジョンスコープが実時間で声帯振動分布を検出し、声帯振動における左右非対称性を定量化及びリアルタイム音声化できることを示す。振動モデルの外観を図5に示す。

振動膜となるシリコンゴムには、成人男性の声帯の大きさに対応した長さ 14 mm の切り込みがあり、エアコンプレッサからの空気噴流により振動数 400 Hz 前後で自励振動が発生するようにした。振動膜左側中心付近に重りをつけ、その重さを変えることにより、異常声帯振動に対応した膜振動における左右非対称性の定量化

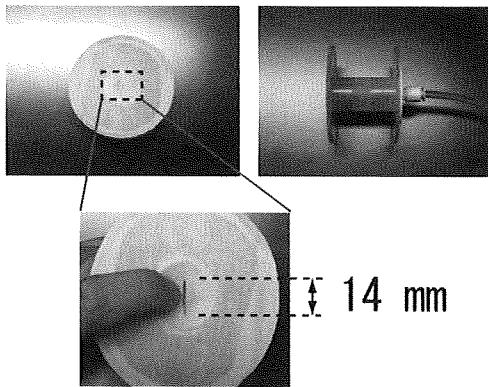


図5 シリコン膜を用いた声帯振動モデル

及びリアルタイム音声化実験を行った。

正常振動（重り 0 g）と異常振動（重り 4 g）について膜振動の左右端振動波形を 0.1 s 間示したものを図 6 に、重りを 0 g から 4 g まで 0.5 g ずつ変化させたとき定常的な膜振動における左右振幅比を図 7 に示す。なおこれらのデータは、計測点 20 点の平均値を計算したものである。図 6 から、400 Hz 前後の膜振動が検出され、正常振動ではほぼ左右対称な振動が計測される一方で、異常振動では左端振動が右端振動よりも振幅が小さくなるのが計測された。図 7 では、正常振動時には左右対称に対応した 1 に近い値である左右振幅比が、重りの重さが増加するにつれてその比が大きくなり、重さに対応した形で左右非対称な振動が実時間で

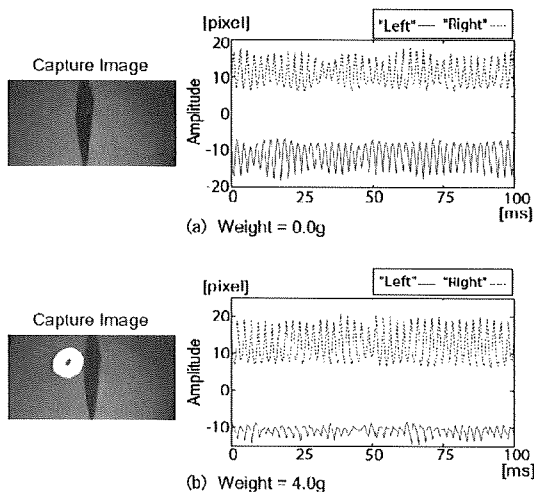


図6 膜振動の左右端振動波形

定量化可能であることがわかる。また、正常 / 異常振動それぞれに対し、左右端の差動信号をリアルタイム生成し、図 8 で示す信号波形を音声としてスピーカーに出力し、振動における左右非対称性が強調された音声出力されることを確認した。

e) 被験者を用いた動作確認実験

人間の声帯に対し、高速喉頭ビジョン스코プを動作確認するために、広島大学病院耳鼻咽喉科の協力を得て、健常者（20 代の男性）に対する臨床実験を行った。図 9 に実験の様子、図 10 に声帯振動の高フレームレート画像を示す。これらの画像から抽出された声帯の左右端の 0.05 s 間の振動波形を図 11 に示す。人間の声帯に対しても、周波数 150 Hz 前後の声帯振動の左右成分を検出し、左右端振動の差動信号のリアルタイム定量化・音声化を確認した。

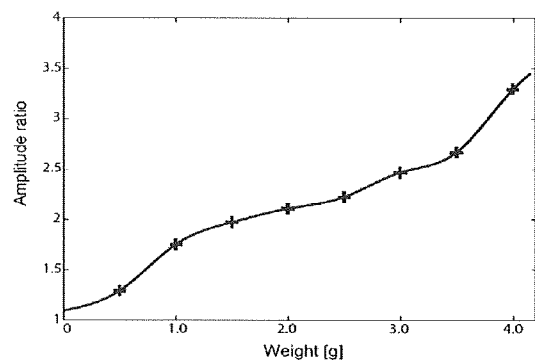


図7 膜振動の左右振幅比

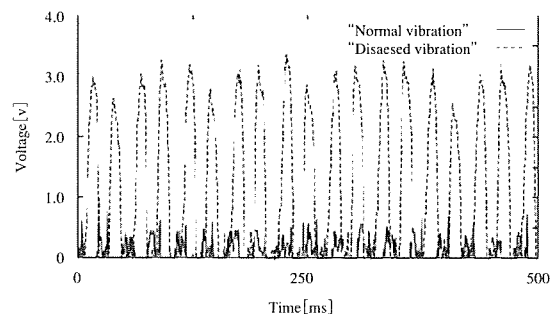


図8 音声化された差動信号

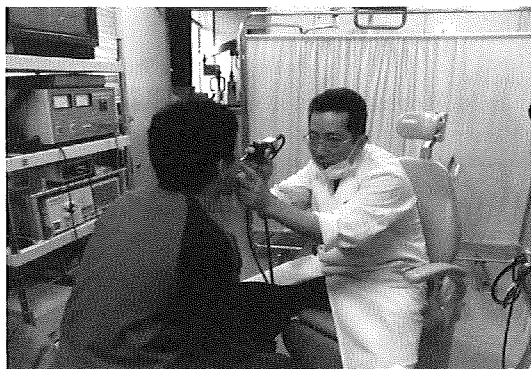


図9 健康者に対する臨床実験の様子

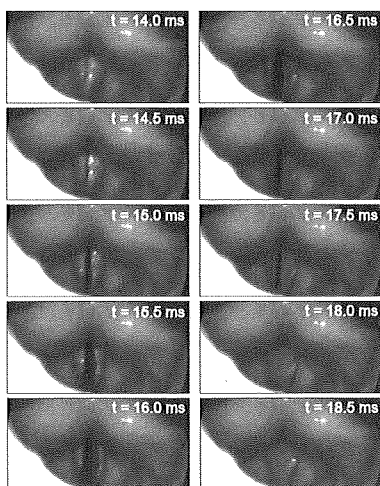


図10 撮影された声帯振動画像

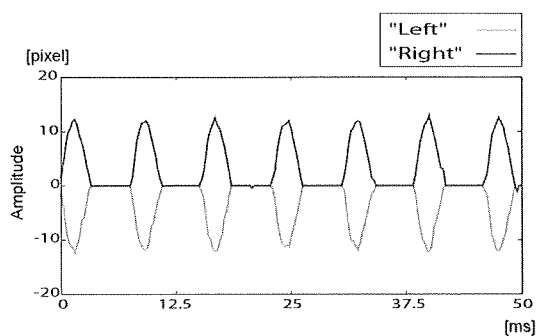


図11 人間の声帯の左右端振動波形

[今後の研究の方向, 課題]

本研究では高速喉頭ビジョンスコープを開発し、その基本的機能の動作確認に成功した。今後は、臨床現場において、喉頭に疾患を持つ被験者に対する動作検証を行い、疾病の程度と定量化された声帯異常振動の関係を解析する予定である。

[成果の発表, 論文等]

竹本ら：高速ビジョンスコープを用いた実時間声帯振動解析システムの開発, 生体医工学シンポジウム 2009, pp. 421 - 422 (2009)