

韻律制御機能を有する電気喉頭の試作

Development of electrolarynx with prosody-control function

国際医療福祉大学保健学部放射線・情報科学科

Department of Radiological Science, School of Health Science, International University of Health and Welfare

菊地 義信

Yoshinobu Kikuchi

宇都宮大学工学部電気電子工学科

Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Utsunomiya University

粕谷 英樹

Hideki Kasuya

A novel electrolarynx has been developed which has a function of F0 control by thumb's movement. The electrolarynx has adjustment mechanisms with two degrees of freedom, in which the mechanisms convert the thumb's movements of up/down and right/left into electrical signals to independently control on/off as well as the F0 of the vibration. The adjustment mechanisms also make it possible to start and stop the voice production at an arbitrary frequency. An experiment with normal speakers was conducted to investigate how close the mechanisms can generate pitch pattern transitions to those observed in natural utterance. The experiment indicated that the mechanisms were able to produce the pitch pattern transitions similar to those in natural utterances and even to adjust the pitch rise pattern as observed at the end of questions.

Key Words: Electro larynx, F0 control, Prosody control, Finger movements, Two degrees of freedom

1. 研究の目的

喉頭癌などの原因で喉頭を摘出された患者は、食道発声による方法や、発声のための補助器具を使って会話することになる。発声の補助器具としては、笛式人工喉頭や電気式人工喉頭（電気喉頭）が開発されている。後者は、術後の比較的早い時期から利用することができ、かつ簡便であり衛生的であること、習得が比較的簡単であること、などの理由により広く利用されるようになってきている。しかし、製品化されている電気喉頭は振動板をハンマーで打撃する方式であり、その周期は一定であり、声の高さや大きさを発声時に調整することを目的として作られた製品は少ない。会話でのより豊かな表現を行うために、韻律の制御機構を組み込んだ電気喉頭の開発が利用者から望まれるようになってきた。これに応えるべく電気喉頭の改良の試み

も数多くなされ、いくつかの製品が販売されるようになってきている。ピッチ制御の方法で大きく3つのグループに分けることができる。

1) 固定ピッチパターン方式

日本語における健常者の発声では、一般に発声の始まりでピッチが高く、時間の経過に従いピッチが下がる傾向がある。この特性を適用し、電気喉頭のスイッチをオンにするたびに、振動の周波数が高い値から低い値に向かって変化する製品がある[1]。この製品には2つの押しボタンスイッチが付いており、ピッチの変化の速さを変えることができるようになってきている。平坦なピッチパターンの発声と比べると自然性は高いが、ピッチパターンは一定でありイントネーションやアクセントを意図的に付ける目的では利用することができない。

2)直接対応型

何らかの操作量に対し、その操作量に応じた周波数で振動板を駆動する方式の電気喉頭がある。操作量として気管口での呼気圧をセンサーで測定し、その圧力によって振動の周波数を制御する方式が研究[2]され製品化されている。この製品に関して利用者からは、呼気圧によるピッチ制御が難しいことや、呼気圧センサーをうまく気管口に押し当てながら電気喉頭を支持するためには両方の手を必要とすることなどが指摘されており、操作性に関して問題が残されている。

これとは別に、押しボタン型の押し圧センサーを用い、そのボタンの押し圧で振動の周波数を変えられるようにした電気喉頭がある[3]。圧力センサー用いているので原理的な変位量はゼロとなり、微妙な調整を行うのは困難であり、自由に操作できるようになるためには多くの練習を必要とすると考えられる。

これらの製品では操作量とピッチが直接対応するため、習熟するに従い意図的にピッチを変化させることが可能である。しかし、振動のオン・オフを操作量に対して設定した閾値で行っており、任意の高さで発声を開始することや、任意の高さで発声を終了することができないという欠点を有している。

3)合成モデル型

音声合成モデルをあてはめ、ピッチパターンを生成する方式の研究[4]が行われている。ある種の操作量から、発声の開始である声立て指令とアクセント指令を抽出し、音声合成の規則を適応してピッチパターンを生成している。操作量として指圧センサーの出力を用いているが、無音・有声・アクセントの3つの状態の違いが検出できればよく、ボタン操作は比較的簡単であろうと推測できる。標準的な発声であれば簡単な操作で複雑なピッチパターンを生成できる反面、モデルに合わない発声を行うことは難しいと考えられる。

本研究では、簡単な操作でピッチを任意に変化させることのできる電気喉頭を試作し、その操作性を評価[4,5]することを目的とする。試作にあたり、指などの代替器官によってピッチ制御がどの程度容易に行えるのかを調べる。一般に疑問文などでは、語尾のピッチが上昇した状態で発声が終了する。これを実現するためには、振動のオン・オフ操作（有声指令）と振動の周波数制御（ピッチ制御）を独立させる必要がある。

操作が複雑になるのを避けるために一本の指で有声指令とピッチ制御を行うこととし、自由に動かすことのできる親指を使うことにする。操作機構では、その動きを上下方向と左右方向に限定し、どの方向でのピッチ操作が容易であるかについても調べる。

有声指令とピッチ制御を独立させることで、任意の高さから発声を開始することや任意の高さで発声を終了することができるようになる。語頭が高ピッチで始まる発声や語尾のピッチが上昇するような疑問文の発声、さらには歌唱が行えるようになることが期待できる。ここでは、指圧を用いるのではなく指の曲げなどの変位量を使うことにし、指の曲げによる位置を振動の周波数に対応させることにする。こうすることで、より微細なピッチ操作が行えるようになると思われる。

2. 上下方向の変位を使った電気喉頭

操作の容易さについて検討するため、また様々な設定を調整できるようにするため、実験で使用する電気喉頭は専用の装置としないことにした。パーソナルコンピュータの端末装置として動作するように構成し、プログラムにより振動体を制御するようにした。

2.1 自由度1による電気喉頭

代替器官によってピッチの調整が意図したように行えるかを調べるために、1自由度の電気喉頭を試作した。この電気喉頭では、親指の上下方向の曲げの量でピッチを調整できるようにした。図1にその調整機構の構造を示す。押しボタンを押し込むことで発光素子と受光素子の間隔が変化し受光素子への光の入射量が変化することを利用している。受光素子によって変位量が電圧に変換される。この調整機構では自由度が1であるため、ボタンの押し込み量に対し閾値を設け、その値を超えた時点で振動を開始するようにした。よって、この調整機構では任意の高さでの発声の開始や終了を行うことはできないが、指の曲げによるピッチ調整の可能性を調べることができる。押し込むときの力については検討していないが、バネ定数としては約100gf/mmであり、約5mmの可動範囲がある。この調整機構を使った実験装置のブロック図を図2に示す。操作部には図1の調整機構と振動体が組み込まれてい

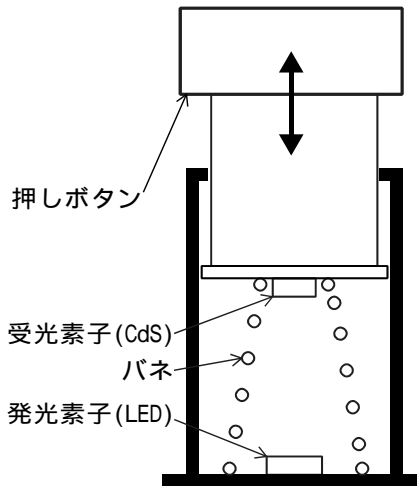


図1 自由度1の調整機構

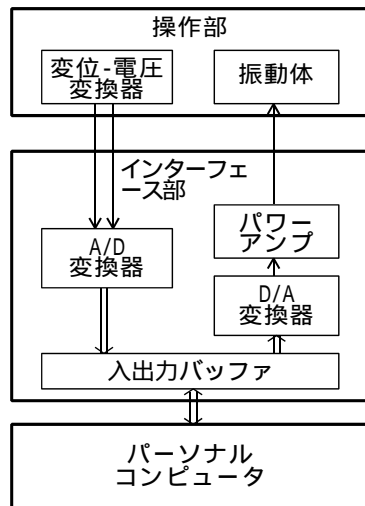


図2 電気喉頭の実験装置の構成

これを1m程度のケーブルを使いインターフェースに接続している。変位量をA/D変換器を介して取り込み、その値によって振動の周期をプログラムによって決定し、振動体の駆動電圧を制御されている。プログラムはC言語を用いて開発し、DOSモードもしくはWindows9X系のDOS窓で動作する。

この実験装置を使いピッチ調整の予備実験を行ったところ、意図したように調整できることがわかった。これを受け、有声指令とピッチ調整を独立して行うことができるように、調整機構の改良を行った。

2.2 自由度2のピッチ調整機構

1自由度のピッチ調整機構では、発声の始まりや終わりが必ず特定の高さになってしまう。これを避けるために、図3に示したように図1の調整機構にマイクロスイッチを付加し、更に左右に動くように改良を行った。この機構では、ボタンを押し込んだ状態で左方向に傾けることで、高いピッチからの発声を開始することができる。また、語尾を上げた状態で発声を終了するには、ボタンを押し込んだ状態で右に戻すことで実現できる。

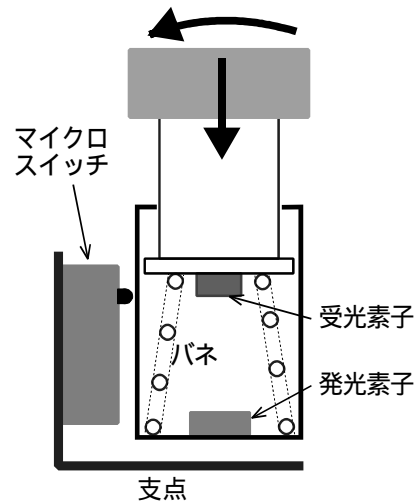


図3 自由度2を有する調整機構

図4に振動体を制御するためのタイミングチャートを示す。システム全体は10kHzのクロックに同期して動作する。有声指令がオフの間は、有声指令の有無をクロックに同期して繰り返し検査する。有声指令がオンのとき、図の のように、F0操作の量をA/D変換器を通して入力し、それに応じた振動の周期に変換する。有声指令がオフになるまでこの動作を繰り返す。振動体の振動の強さを一定に保つために振動体の駆動コイルに印加する電圧の時間長を一定とし、ピッチ周期の調整はオフの時間長で行うようにした。この時間長は10kHzのクロックを数えることで行うためピッチ周期の調整間隔は100μsとなる。また、有声指令の判断による振動の開始点も最大で100μsの遅れを有することになる。プログラムの起動時に、F0の調整範囲を表1に示したモードから選択するようにした。範囲を制

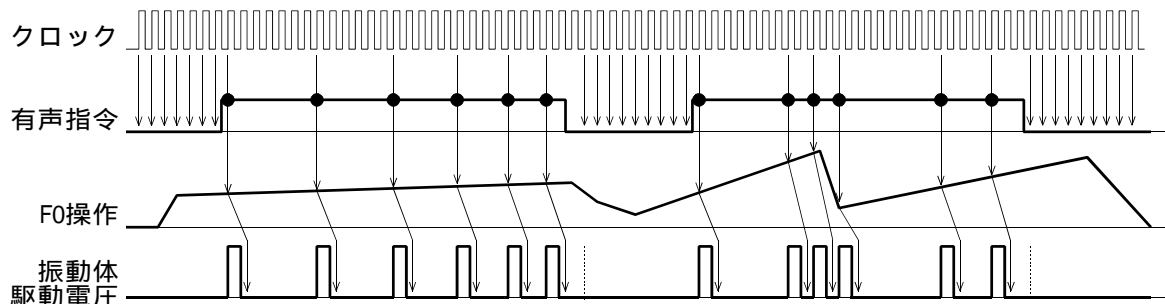


図4 F0制御のタイミングチャート

限することで、例えば女性の利用者において、不適当な低周波数の発声を防ぐことができる。上下の変位量に対するピッチ周波数の関係を図5に示す。図3の調整機構を組み込んだ実験装置の写真を図6に示す。

表1 ピッチの調整範囲

調整モード	調整範囲
女声	176 ~ 356Hz
男声	96 ~ 214Hz
広帯域	88 ~ 370Hz

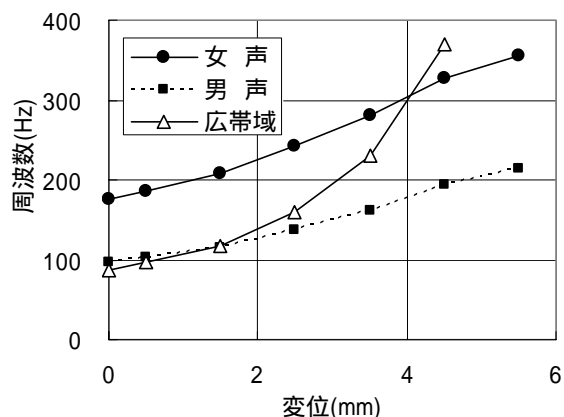


図5 変位量とピッチ周波数の関係

2.3 自由度2の電気喉頭の実験結果

振動のオン・オフとピッチ制御を独立して行える電気喉頭の操作のしやすさを調べるために、健常者による操作に関する習得実験を行った。実験における課題は、事前に発声した自分の音声のピッチ変化を模倣することである。被験者は言語聴覚士を目指す5名の大学生であり音声生成に関する基礎的知識を有している。健常者であり電気喉頭での発声は未経験であるという理由で、発声時に電気喉頭を喉に当てることは強要していない。測定は30分間の練習時間の後に行った。発声する文は日常的な会話文であり、疑問文も含まれている。文は全部で12文あるがその中の代表的な3文を表2に示す。文1はポーズのない文であり、電気喉頭の操作においても連続して調整することになる。疑問文であることより語尾の位置でピッチが高くなる。文2は発声により、平板型のピッチ変化であったり中高型になったりする。文3はポーズの入る2つの文から



図6 実験装置の写真

構成されている。前半は平板型であるが、後半は有声・無声の破裂音が連続し、また疑問文であることより語尾のピッチが上昇する。

表2 実験で用いた文

文1	お昼ご飯はどうする？
文2	眠そうだね。
文3	おはようございます。お出かけですか？

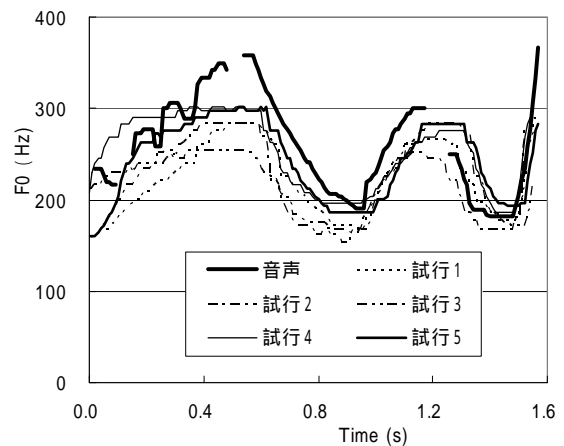
図7は被験者1の結果である。この被験者は表1のピッチの調整範囲で女声モードを選択した。図7a)は文1の結果である。図では開始点の位置合わせを行ったが、時間軸および周波数軸の調整は行っていない。電気喉頭は有声音でない部分で振動を止めることが困難なため連続したピッチ変化として観測される。発話のピッチ周波数の範囲は180~370Hzであり電気喉頭の調整範囲とほぼ同等である。この被験者の場合、文2の発話が平板型になってしまったため、この文に対する実験は行わなかった。図7b)は文3に対する結果である。ポーズの長さが異なるため、重なりがよくなるように目視によりポーズの長さを調整している。図8は被験者2の結果を示している。この被験者は電気喉頭のピッチ調整範囲として広帯域モードを選択した。図8a)は文1の結果を示している。発話のピッチが200~380Hzであるのに対し、電気喉頭のピッチは低い方に推移している。電気喉頭の調整範囲が広帯域であったことから、その操作においてピッチの低い調整位置から有声音が入ってしまったと考えられる。図からわかるように、電気喉頭によるピッチ変化の軌跡が音声のそれと似ていることから、調整操作に関してはうまくできたと考えられる。図8b)は文2の結果を、同図c)は文3の結果を示しているが、同様の結果を示している。

2.4 自由度2の電気喉頭の結論

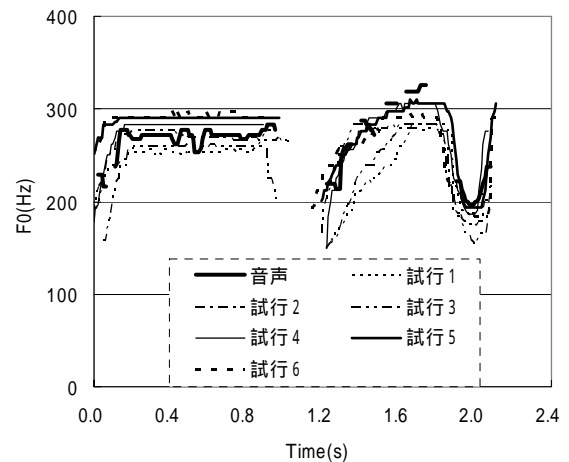
他の3名の被験者に関しても、ほぼ同様の結果を得ることができた。2人の被験者の結果からわかるように、発話に比べピッチの絶対的な大きさや変化範囲は

異なるが、指などの代替器官を使いピッチ変化を短時間の練習で模倣できるようになることがわかった。

このことから指の動きをピッチに対応させる直接対応型であっても、ピッチの調整は意志に従って変化させることが可能であるといえる。また、ピッチの調整範囲は被験者の発声の範囲に合わせることで、調整がより簡単になることがわかった。

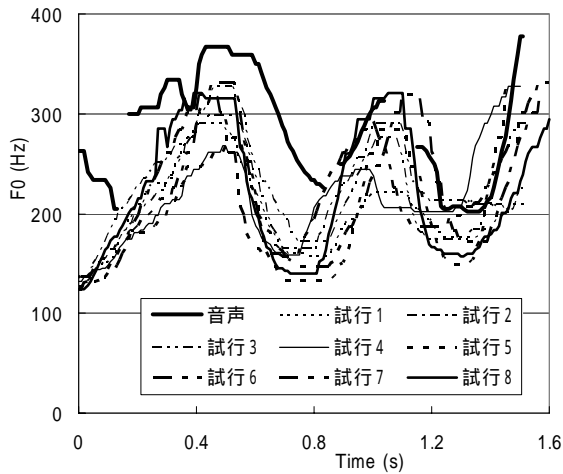


a)文1のピッチ変化

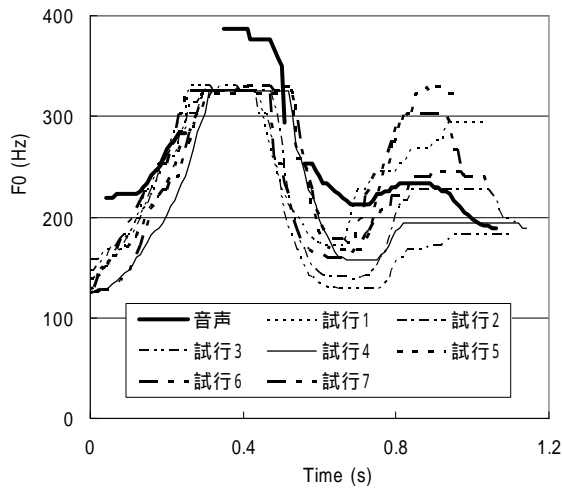


b)文3のピッチ変化

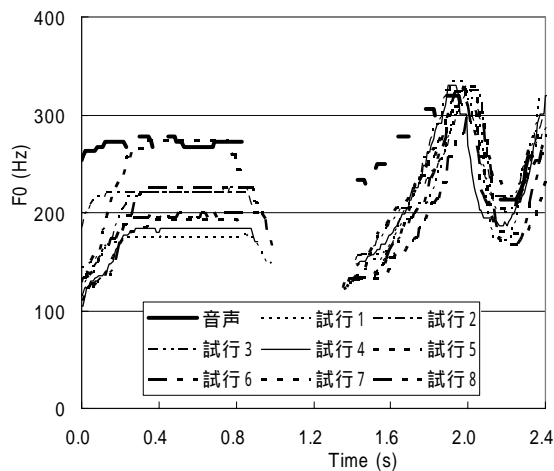
図7 被験者1の分析結果



a)文1のピッチ変化



b)文2のピッチ変化



c)文3のピッチ変化

図8 被験者2の分析結果

3. 左右スライド方向の電気喉頭

指の上下方向でピッチ調整を、左へ傾けることで有声指令を行う図3の調整機構で実験を行ってきた。しかしこの調整方法は、製品化されている電気喉頭が押しボタンを押すことで発声することと対比した場合、操作の互換性がなくなっている。被験者の「ピッチ調整は指の屈伸よりも、左右への振りによる方法がより簡単に操作できそうである」という感想を踏まえ、異なる調整機構を試作した。その構造を図9に示すが、固定板とレバーが向き合って配置されている。レバーを回転させることで、レバーについた発光素子と受光素子の間隔が変化する。これをピッチ制御として利用する。回転に要するトルクはほぼ零であり慣性も小さいため、滑らかな操作が行えるようになっている。レバーを押し下げることでマイクロスイッチにより有声指令が発生する。この機構を使った電気喉頭の装置のブロック図を図10に示す。また実験システムの写真を図11に示す。

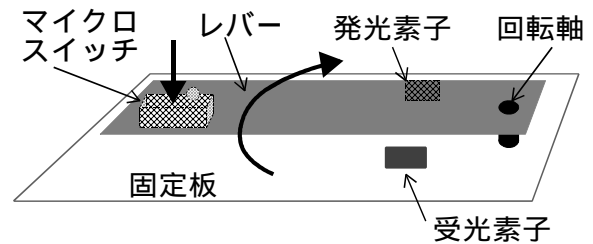


図9 改良した自由度2の調整機構

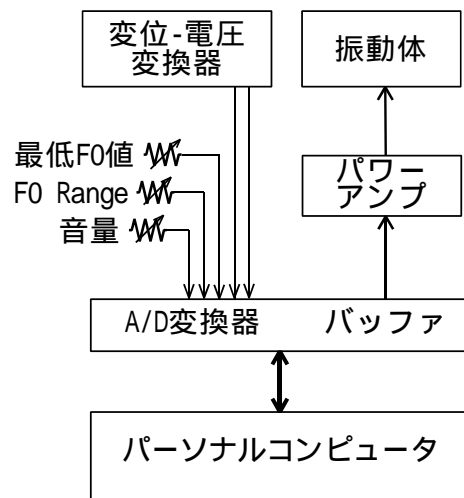


図10 改良したシステムのブロック図

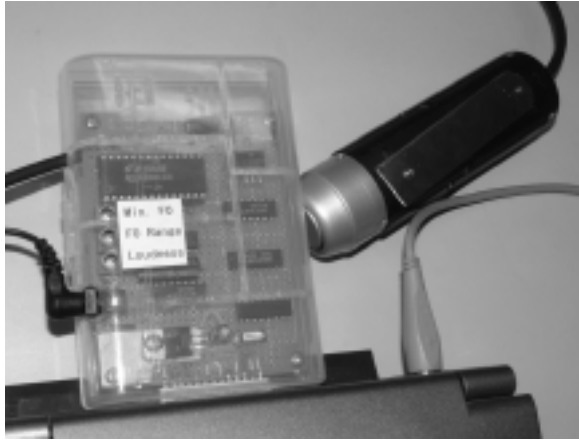


図11 改良したシステムの外観

この装置には、F0に関しその最低値と調整範囲、音量を設定するための半固定抵抗がついている。F0の最低値は100~300Hzで任意に設定でき、またF0の調整範囲は最低F0値の1.2~3倍の範囲とした。音量は駆動コイルに印加する電源のオンの時間で調整するPWM方式を採用した。また、ピッチ周波数は駆動コイルに加えるパルス数で調整するPFM方式を採用した。

図12に回転角に対するF0周波数の調整範囲の実測値を示す。図で白抜きの線は調整範囲が最小の場合を、塗りつぶしのマークは最大の場合である。また、 \bullet は最低F0値が最小の場合、 \blacktriangle は最低F0値が最大の場合である。つまり、調整によって \bullet から \blacktriangle までの範囲の発声が可能である。

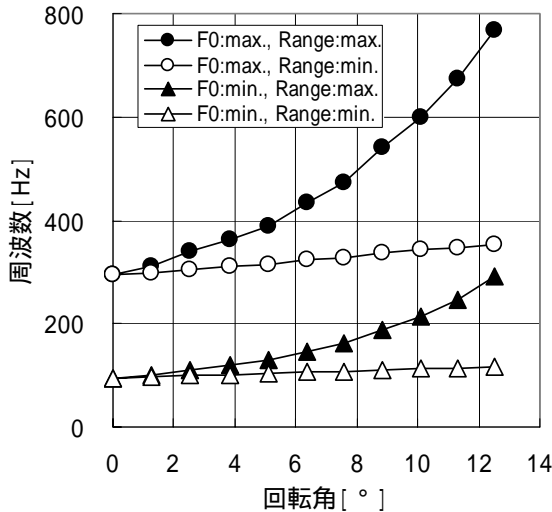


図12 左右スライド方式のピッチ調整範囲

4. 左右スライド方向電気喉頭の実験結果

この電気喉頭を使い、健常者で電気喉頭の操作に慣れている医者1名、言語聴覚士1名による評価実験を行った。内容は日常的な会話文と童謡の歌唱である。図13に童謡「チューリップ」の歌唱の分析結果を示す。音域の関係で相対的な音階になってしまうが、音の高低の変化をうまくトレースできていることが理解できる。練習時間は約1時間である。

また、銀鈴会の方々に試用をお願いした。当然、普通の電気喉頭の操作には習熟しており、ボタンを押して発声するという基本的な使用に関しては問題ない。多くの方が韻律を付けて発声されていた。特に、アクセントに強い関心を持つ方がおられ、練習を行うことなしに東京方言と茨城方言で会話をされていた。また、数名の方は、歌唱もうまくこなしていた。

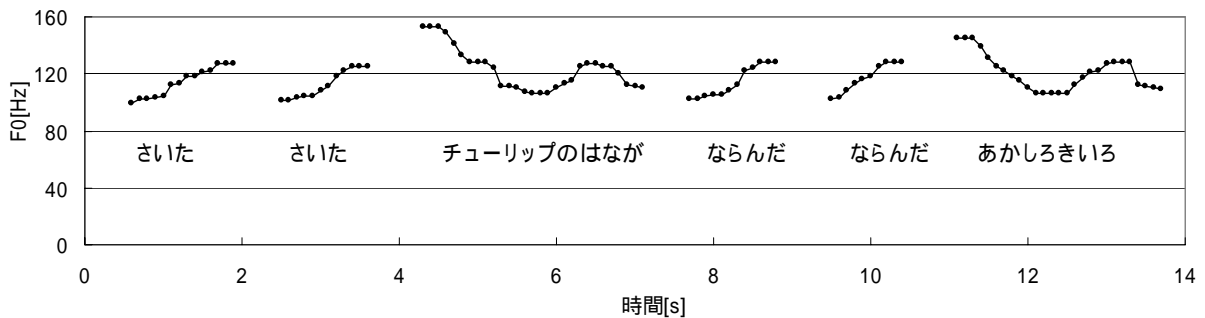


図13 左右スライド方式の電気喉頭による童謡の歌唱

この電気喉頭は上下のスイッチ操作で有声指令を発する方式のため、振動のオン・オフを比較的速く切り替えて操作することが簡単に行える。図14に、破裂音などにおける有声指令の断続操作の結果を示す。図中の文章には有声破裂音も含まれているのでオフにする必要のない部分もあるが、歌唱におけるタンギング唱法などで有用であることがわかった。

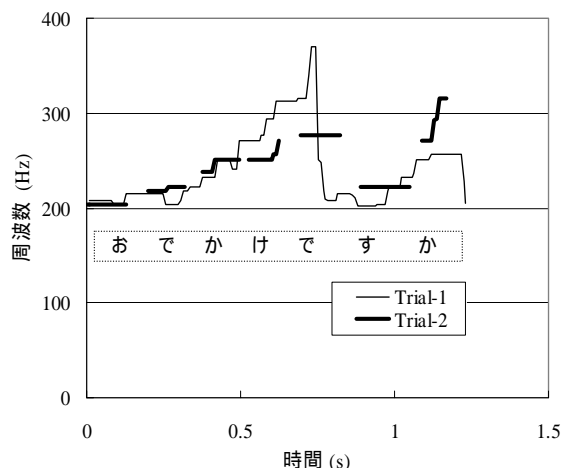


図14 有声指令の断続操作における発声

5. 今後の予定

2自由度を有するピッチ調整機能を有する電気喉頭について示してきた。操作に関する評価から、上下で有声指令を、左右のスライドでF0制御を行う電気喉頭は有用であるといえる。ご試用いただいた銀鈴会の方からは製品化を強く望まれた。現在、スタンドアロンで動作する図15のような電気喉頭の製作を検討している。電子回路部には図16に示したようにA/D変換器を内蔵しているDSPもしくはμCPUの使用を考えている。この電気喉頭を試作しより多くの方の評価を頂き、その意見を取り入れて改良することを考えている。

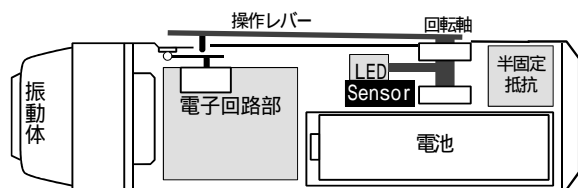


図15 開発を検討している電気喉頭の構造

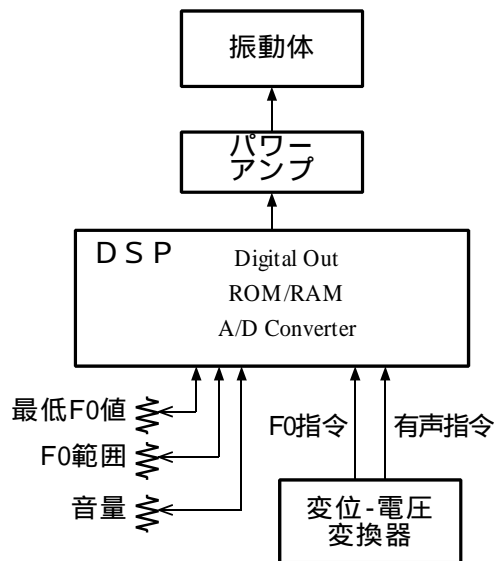


図16 スタンドアロンの電気喉頭のブロック図

謝辞

電気喉頭の実験にご協力いただいた銀鈴会の方々に深謝する。

参考文献

- [1] セコム在宅医療システム, “MY VOICE 電動式人工喉頭お取り扱い説明書”.
- [2] 上見憲弘他, “抑揚制御型人工喉頭の問題点と改良方法について,” 信学技報, sp200-44, pp.17-22, 2000.
- [3] 原田産業, “ツウルトーン取り扱い説明書”.
- [4] 高橋宏知他, “電気式人工喉頭および口腔内原音発生振動子を用いた指圧入力式音声ピッチ制御の試み,” 音声言語医学会, 42-1, pp.1-8, 2001.
- [5] 菊地義信他, “F0制御機能を有する電気喉頭の試作,” 音講論, 2-10-5, pp.295 - 296, 2002.
- [6] 菊地義信他, “電気式人工喉頭のF0制御に関する検討,” 信学技報, 音声・福祉情報研究会, 2002(10月).