

胸骨舌骨筋の筋電位制御による 電気人工喉頭のピッチ制御法

○ 関 惠 貞 *, 高 橋 誠 *, 西 澤 典 子 **, 西 澤 伸 志 ***,
上 見 憲 弘 *, 伊 福 部 達 *, 犬 山 征 夫 **

*北海道大学電子科学研究所 **北海道大学医学部耳鼻咽喉科

***美唄労災病院 耳鼻咽喉科

我々は胸骨舌骨筋(SH)の筋電位によって制御できる埋込み型電気人工喉頭の開発を目指している。SHの筋電位を利用した電気人工喉頭の制御条件として音源の振動のON/OFF制御、有声/無声音の出し分けの制御、ピッチ制御を考慮した。特にピッチの制御においては、2つの方法が考えられる。まず、筋電位の振動小さくなるのに従ってピッチを高くすること制御方法がある。また、筋電位の振動小さくなるのに従ってピッチも小さくする制御方法がある。上記の2種類のピッチ制御を考慮して生理学的実験を行った。その結果を用いて適切な電気人工喉頭を製作してその性能を評価した。

Two pitch control methods of an electrolarynx controlled by the sternohyoid muscle

Heajung MIN*, Makoto TAKAHASHI*,
Noriko NISHIZAWA**, Shinji NISHIZAWA***, Norihiro UEMI*
Tohru IFUKUBE* and Yukio INUYAMA**

* Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

** School of Medicine, Hokkaido University

***Department of Otolaryngology, Bibai Rosai Hospital

We have been studying an implantable electrolarynx that is controlled by the activity of EMG of the sternohyoid muscle. Purpose of this study is to investigate the possibility that pitch frequency can be voluntarily controlled by the EMG detected from the sternohyoid muscle. For this purpose, we carried out two experiments regarding two control methods of the electrolarynx and the following results were obtained. In the first pitch control method of the electrolarynx, we found that the pitch produced by the electrolarynx increases according to the decrease in amplitude of the sternohyoid EMG, and vice versa. In the second pitch control method of the electrolarynx, we found that the pitch produced by the electrolarynx decreases according to the decrease in amplitude of the sternohyoid EMG, and vice versa. However, in this case, if submaxillar is moved, the electrolarynx can't be difficult to control by the second pitch control method. Therefore, we developed an electrolarynx with the first pitch control method and tested the property of the pitch control of electrolarynx. From the result of the experiments, we found that the developed electrolarynx have a good property of the pitch control of electrolarynx.

1. はじめに

現在、代用発声法としては、食道発声法、気管食道シャント発声法および笛式人工喉頭や電気人工喉頭などを用いる方法がある。食道発声法を除いたほとんどの代用発声法は器具および手を用いるために一側の手を使用せざるを得ない。そのため、両手使用が困難となり日常生活で不便である。一方、食道発声法は音声持続や音量において人工喉頭に劣り、人によっては本法で発声できない場合がある¹²⁾。気管食道シャント発声は肺からの呼気流を利用できるのが長所であるが、唾液あるいは食物の気管内流入が少なくないという短所がある³⁾。笛式人工喉頭は、口腔チューブが口の中にあるため調音操作が制約される³⁾。電気人工喉頭は電気エネルギーを利用するので音声持続や音量の点で有利であるが、短所としては発話中に有声/無声音の出し分け、およびピッチ周波数の制御が難しいことが指摘されている^{12,4)}。現実的には電気人工喉頭のみならず、ほとんどの代用発声はピッチ変化と無声音/有声音の出し分けを行えない。

従来の代用発声を改善するために、我々は筋電位によって制御できる埋め込み型電気人工喉頭の開発を目指している。そのために、我々は外喉頭筋の一種である胸骨舌骨筋（M. sternohyoideus、以下SHとする）を利用した人工喉頭を報告した³⁾。SHの解剖学的な位置を図1に示す。

人工喉頭制御のためにSHを選んだ理由を次に示す：

- 1) SHは、音源に近いので、筋放電の導出および電気喉頭の制御に有利であること。
- 2) SHは通常の喉頭摘出手術では全部摘出されるが、この筋を舌骨付着部で切断したまま保存して喉頭摘出を行うことが可能であること。

上記2)のように保存すれば、舌骨を引き下げるといった本来の機能を失った状態でSHは保存される。したがって、もしもSHを人工喉頭制御の目的にそって“再訓練”することができれば、

電気人工喉頭の制御にも利用できる可能性が生まれる。

発話の開始、停止を考慮した比較的長時間の音源のON/OFF制御、有声/無声音の出し分けを考慮した短時間の音源のON/OFF制御およびピッチ制御をSHの筋電位を利用した電気人工喉頭の制御条件として考えた。

人工喉頭の音源のON/OFF制御は、EMGの発火の始めて人工喉頭の音源の振動を開始し、EMGの発火の終わりで音源の振動を停止する。

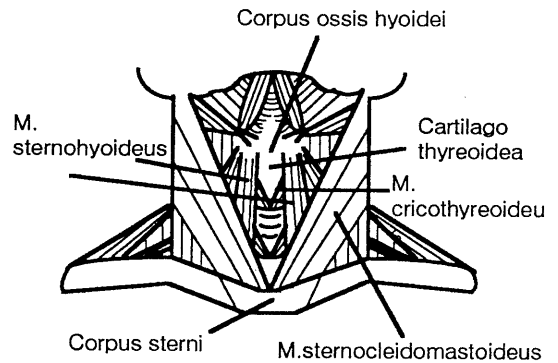


図1 胸骨舌骨筋
Fig. 1 M. sternohyoideus (SH)

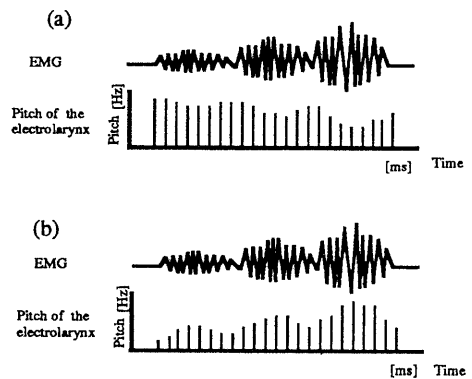


図2 SHの筋電位を利用した電気人工喉頭のピッチ制御のための概念図

(a)ピッチ制御方式1、(b)ピッチ制御方式2

Fig.2 Controls of electrolarynx using the SH

(a) Pitch control method 1 by amplitude of the EMG, (b) Pitch control method 2 by amplitude of the EMG

人工喉頭のピッチ制御においては図2のように2つの方式が考えられる。すなわち、筋電位の振幅が小さくなるのにしたがってピッチを高くする方式（以下ピッチ制御方式1とする）と、筋電位の振幅が大きくなるのにしたがってピッチを高くする（以下ピッチ制御方式2とする）方式である。

本研究では上記の2種類のピッチ制御を生理的に検討し、適切と考えられるピッチ制御方式の電気人工喉頭を試作してその性能を調べた。

2. 実験方法

まず、人工喉頭のピッチ制御の2つの方式を想定した実験を行い、それぞれの場合のSH筋電位の特性を調べた。次に、良いと考えられるピッチ制御方式の電気人工喉頭を試作し、試作人工喉頭のピッチ制御の性能を調べた。

被験者として23～26才の4名の喉頭機能が正常である男性を選び、すべての実験の計測は20回以上繰り返して行った。

筋電位の取り方は、被験者の前頸部の甲状軟骨の高さにディスプレイ双極表面電極（東京衛材研究所：TE-6135）を筋線維の方向に沿って装着して、SHの筋電位を導出した。ただし、不関電極は乳突部に付着し、2つの関電極の間隔は1cm離れて装着した。

筋活動の強さを評価するための基準の電位は被験者ごとに以下の手順で設定した。

被験者の下顎を上向に押えて負荷をかけた上で、被験者に開口の努力を続けさせ筋活動開始から2秒の間に記録されたSH筋電位をEMGstandとした。EMGstandの2秒間のデータの絶対値の平均値を $|EMGstand|_{avg}$ とした。すべての筋電位は絶対値の平均を求め、 $|EMGstand|_{avg}$ で正規化した。この正規化したものを以下EMGnormzとした。

2・1 SH筋電位の特性

実験装置の概要を図3に示す。実験装置は表面電極から導出したSHの筋電位を増幅器（利得：2000倍，周波数帯域：16Hz～5kHz）を通じ

てコンピュータ（AD変換器の分解能：12bits，サンプリング周波数：10kHz）およびデータレコーダに記録すると同時に、被験者の音声もマイクを通じ増幅し、データレコーダに記録する。

被験者はコンピュータ制御による時間呈示信号にしたがって筋収縮を行わせた。この時間呈示信号は、時間を示すパルスをコンピュータで発生させ、ディスプレイに呈示したものである（以下視覚刺激とする）。

2・1・1 ピッチ制御方式1を想定した実験（実験1）

図2(a)に示したピッチ制御方式を想定した実験である。本実験は発話中の筋電位の振幅と音声のピッチの関係を調べる。電子オルガンのド（C3=130.8Hz）、レ（D3=146.8Hz）、ミ（E3=164.8Hz）、ファ（F3=174.6Hz）の音を呈示音として被験者に聞かせた後、その呈示音と同じ音程で被験者が母音/i/を発声し、それと同時に筋電位を出すように指示を与えた。そのとき、ファ、ミ、レ、ドの順に筋電位の振幅が次第に大きくなるように指示した。/i/を選んだ理由は、発声する時に顎が余り動かないためである。

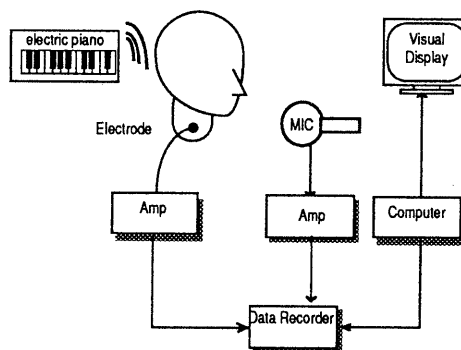


図3 SHの筋電位の特性を調べる実験システム
Fig.3 Block diagram of test systems of the SH EMG controlled voluntarily

また対照として/i/ではない発声を被験者に選ばせて、顎が不安定な状態で同じ実験を行った。

2.1.2 ピッチ制御方式2を想定した実験(実験2)

図2(b)に示したピッチ制御方式を想定した実験である。内容は実験1と同様のものである。呈示音のド、レ、ミ、ファの順に筋電位の振幅が次第に大きくなるように指示した。

2.2 試作人工喉頭のシステム構成

SHの筋電位によって制御する試作電気人工喉頭のシステム構成を図4に示す。表面電極から導出したSH筋電位を前置増幅器を通じ、全波整流して包絡線を検出する。検出された包絡線をシュミットトリガ回路に通し、人工喉頭の音源をON/OFF制御させる。また、人工喉頭のピッチ周波数制御のため、その包絡線によりPPM(パルス位置変調器)で振動子の駆動周波数(周波数帯域: 57Hz~167Hz)を決める。SH筋電位が低くなるにしたがって振動子駆動周波数は高くなるようにした。また包絡線を反転増幅器を通し振動子駆動回路にいれ、ピッチ周波数が高くなるにしたがって駆動信号の振幅も大きくなるようにした。しかし、今回は試作人工喉頭の駆動電圧の振幅制御の特性を調べる実験については除いた。図4はピッチ制御方式1の人工喉頭のシステム図であり、図4のEnvelope detectorとPPMの間に反転増幅器を入れることでピッチ制御方式2の人工喉頭になる。

2.3 試作人工喉頭の特性

実験装置の概要を図5に示す。表面電極から導出したSHの筋電位を増幅器を通じてコンピュータおよびデータレコーダに記録すると同時に、試作人工喉頭の音もマイクを通じ増幅し、データレコーダに記録する。被験者にコンピュータ制御による視覚呈示信号にしたがって筋収縮を行わせた。今回はピッチ制御方式1の人工喉頭を用いた実験のみを行った。

また、発声意図と試作人工喉頭の発音が一致していると被験者が報告するところまでに、シ

ュミットトリガ回路の閾値レベルを被験者ごとに調節した。

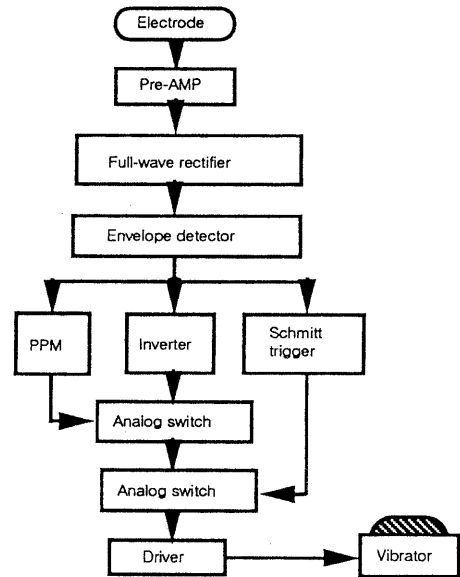


図4 試作人工喉頭のシステム
Fig.4 System of an electrolarynx controlled by the M. sternohyoideus

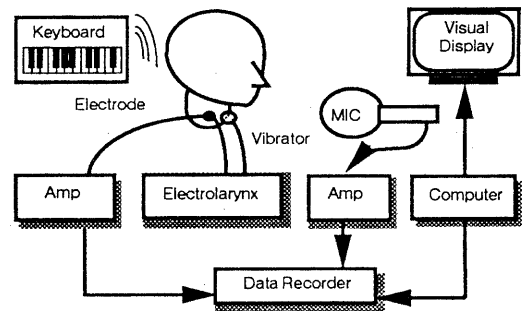


図5 試作人工喉頭の特性を調べるための実験装置

Fig.5 Block diagram of test systems of the electrolarynx

実験の手順は電子オルガンのド (C3), し, ミ, ファの音を呈示音として被験者に聞かせた後, その呈示音と同じ音程で, 調音器官を/i/の発声と同じ構えにして試作人工喉頭を用いて音を出すように指示した. 筋電位の振幅と試作人工喉頭のピッチ周波数を調べた.

3. 結果

3・1 SH筋電位の特徴

ピッチ制御方式1を想定した実験の結果を図6および図7に示す. 図6は/i/を発声した場合の結果である. また図7は顎が不安定な状態の結果である. これらの結果から, 被験者の発声した音声のピッチの変化と筋電位の平均値との関係を見ると, すべての被験者で負の相関が認められた. 図6のすべてのデータの回帰直線 ($f(x)$) の傾きは -7.0×10^{-3} (EMGnormalize/Hz) であった.

ピッチ制御方式2を想定した実験の結果を図8に示す. 図8は/i/を発声した場合における被験者の発声した音声のピッチの変化と筋電位の平均値との関係である. この結果から, すべての被験者で正の相関が認められた. しかし顎が不安定な状態の結果である図9は被験者3人の内, 2人の被験者の結果が線形的に増加していないことがわかる. 図8のすべてのデータの回帰直線 ($f(x)$) の傾きは 7.2×10^{-3} (EMGnormz/Hz) であった.

3・2 試作人工喉頭の特徴

試作人工喉頭のピッチ制御の実験の結果を図10に示す. 図10の被験者の発声した音声のピッチの変化と筋電位の平均値との関係を見ると, 全ての被験者で負の相関が認められた. すべてのデータの回帰直線 ($f(x)$) の傾きは -7.4×10^{-3} (EMGnormz/Hz) であった. また, 今回の試作人工喉頭を用いた発話では平均8.5Hzから143Hzまでピッチ周波数を変化させることが可能であった.

4. 考察

4段階のピッチ制御で日常会話のピッチをある程度カバーできるであろうという考えから, 人工喉頭のピッチ制御の検討に対しては4段階で行った.

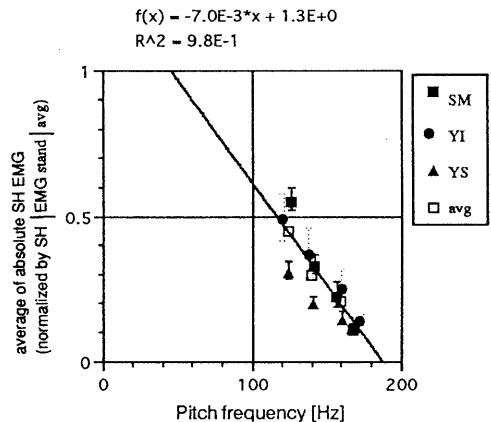


図6 /i/発声時のピッチ制御方式1に関する結果特性

Fig.6 SH EMG amplitude according to pitch between C3 and F3 during voicing of /i/ in pitch control method 1

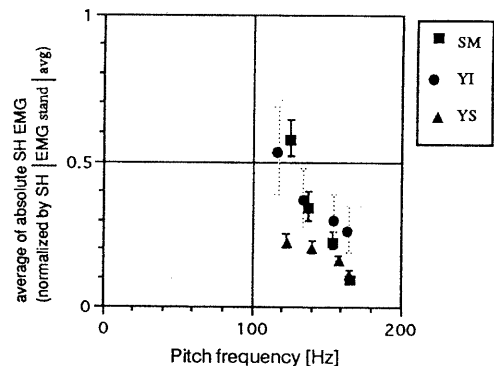


図7 被験者が自由に選んだ発声に対するピッチ制御方式1の特性

Fig.7 SH EMG amplitude according to pitch between C3 and F3 during voicing freely in pitch control method 1

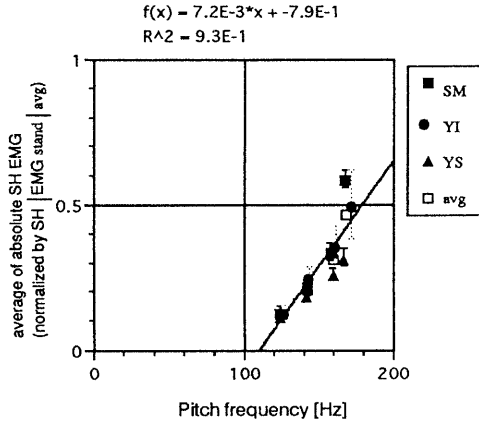


図8 /i/の発声に対するピッチ制御方式2の特性
Fig.8 SH EMG amplitude according to pitch between C3 and F3 during voicing of /i/ in pitch control method 2

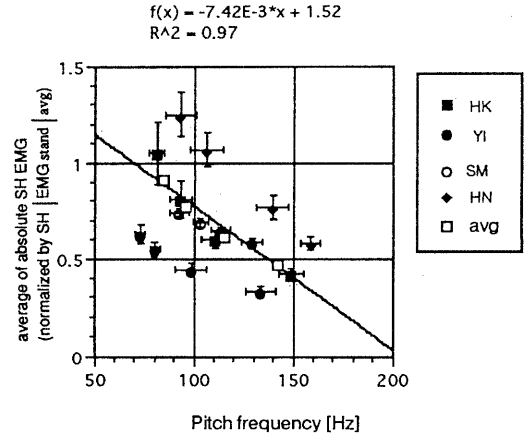


図10 C3 (ド) からF3 (ファ) までのピッチ変化の指示に対する試作人工喉頭の音声のピッチとその時のSH EMG
Fig.10 SH EMG amplitude and pitch frequency of the electrolarynx

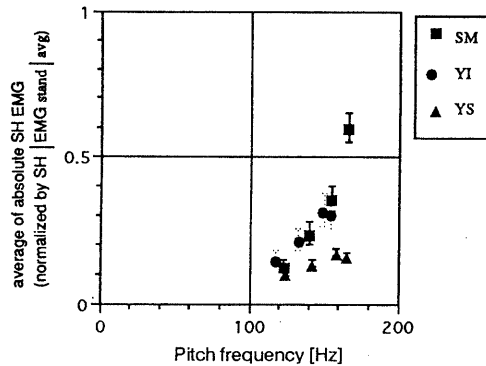


図9 被験者が自由に選んだ発声に対するピッチ制御方式2の特性
Fig.9 SH EMG amplitude according to pitch between C3 and F3 during voicing freely in pitch control method 2

ができた。この結果から、SHのEMGの振幅が段々大きくなるにしたがい人工喉頭の音源の振動周波数を段々低くする方法を、SHで制御する電気人工喉頭のピッチ制御の設計指針として採用できる。また、図6の平均値 (avg) から4段階のピッチ制御ができるという可能性がある。

4・1・2 ピッチ制御方式2を想定した実験

人工喉頭のピッチ制御方式2を想定した実験2の結果である図8からは、4人のデータのすべてが正の傾きを示しており、ピッチが高くなるにしたがい筋電位を強く出すことができた。この結果だけで考慮すると、SHのEMGの振幅が段々大きくなるにしたがい人工喉頭の音源の振動周波数を段々高くする方法を、SHで制御する電気人工喉頭のピッチ制御の設計指針として採用できる。しかしながら、顎が不安定な状態になる場合の結果である図9では被験者3人の内2人の被験者の結果が線形的に増加していない。このことから、ピッチ制御方式2を選ぶ場合には生理的な観点でもう少し考察が必要と考えられる。

4・1 SH筋電位の特性

4・1・1 ピッチ制御方式1を想定した実験

人工喉頭のピッチ制御方式1を想定した実験1の結果である図6および図7からは、4人のデータのすべてが負の傾きを示しており、ピッチが低くなるにしたがい筋電位を強く出すこと

4・2 人工喉頭のピッチ特性

我々はピッチ制御方式1の方が適切と考えてピッチ制御方式1の人工喉頭を試作した。その結果である図10では4人のデータのすべてが負の傾きを示しており、筋電位を強く出すにしたがい試作人工喉頭のピッチを低くすることができた。しかし、今回の試作人工喉頭の周波数帯域は57Hzから167Hzであるが、実際の試作人工喉頭を用いた発話では85Hzから143Hzであった。この理由としては、今回の試作人工喉頭において筋電位の振幅に合わせたPPMのレベル調節がうまくできていないことおよび人間はSH筋電位を続けて安定に出すことが無理であることが考えられる。

5. 結 論

SH筋電位によって制御する人工喉頭のピッチ制御においては2種類の方式が考えられる。本研究では2種類のピッチ制御を生理的に検討した。その結果を利用し、適切と考えられるピッチ制御方式の人工喉頭を試作し、健常者でその性能を検査した。以上をまとめてみると以下のような結果が得られた。

1. ピッチ制御方式1をSH筋電位によって制御する電気人工喉頭に採用できる。
2. ピッチ制御方式2もSH筋電位によって制御する電気人工喉頭に採用できるが、調音操作などで顎が不安定になる場合に対して十分考慮が必要と考えられる。
3. ピッチ制御方式1を用いた試作人工喉頭では4段階のピッチ制御ができた。

文 献

- 1) 高橋宏明：無喉頭発声—治療の一環として、音声言語医学，28，132-134，1987
- 2) 福田宏之：人工喉頭を用いた無喉頭発声の現状と将来，日本音響学会誌，44，130-134，1988
- 3) 大森孝一，児島久剛：振動部からみた喉摘後の代用音声，耳鼻臨床，83，945-952，

1990

- 4) M.S. Weiss & A.G. Basili: Electrolaryngeal speech produced by laryngectomized subjects: perceptual characteristics, J. Speech Hearing Res.,28, 294-300, 1985
- 5) 関恵貞，高橋誠，西澤伸志，西澤伸志，小橋眞美子，上見憲弘，伊福部達，犬山征夫：胸骨舌骨筋の筋電位制御による電気人工喉頭の試作，信学技報，MBE94-38，107-113，1994