

機関番号：32689

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2009～2010

課題番号：21860078

研究課題名（和文）人工筋肉を用いた舌実体モデルと3次元の感覚系の構築

研究課題名（英文）Development of mechanical model of human tongue by artificial muscle with human-like sensory system

研究代表者

福井 孝太郎 (FUKUI KOTARO)

早稲田大学・理工学術院・研究員

研究者番号：60547074

研究成果の概要（和文）：

発声系の機械モデル（発声ロボット）に関する研究においてロボットをより人間に近づけるために、電磁石を用いて軟素材製の舌を駆動する機構の検討と、舌形状を非接触で計測するためのセンサシステムの開発を行った。

舌形状の計測用のセンサは、装置のサイズや貼り付け方法などの制約から、LEDとフォトトランジスタを用いるフォトリフレクタを採用し、さらに、広指向性の受光素子と狭指向性の受光素子を併用することで、広いレンジの計測を可能とした。センサの評価として、形状のわかっている舌モックアップをセンサで計測した結果、おおむね計測できていることが確認できた。さらにセンサシステムを用いた場合のロボットの舌形状の再現性について生成音声の再現度から評価を行ったところ、十分な性能を確認した。

研究成果の概要（英文）：

As research of mechanical speech production models (talking robots), I improved the tongue mechanism to be more human-like. The tongue is made of soft material, and I experienced mechanism with electromagnets to actuate the tongue, and developed sensor systems to measure the tongue shape which is adaptable for soft material.

The sensor systems were adopted the photo reflectors, because of the space limitation and the difficulty to attach to the soft material. A photo reflector module is consisted of LED and two types of photo transistors to broaden the measurement range. In evaluation of the sensor, first I set a tongue shape model which shape was already known, measure the shape with the sensor systems and compared the calculated data and known data. The result showed the sensors could measure the shape with enough accuracy. And as second, I reproduced the robot tongue shape by the sensor data and evaluated the productivity from the produced sound. From the result, the system was useful to reproduce the tongue shape.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,080,000	324,000	1,404,000
2010年度	980,000	294,000	1,274,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,060,000	618,000	2,678,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：知能機械学・機械システム

キーワード：発話ロボット、ヒューマノイド、舌機構、光距離センサ

1. 研究開始当初の背景

ヒューマノイドロボットの研究はすでに半世紀の歴史を持ち、世界中の多くの研究機関で取り組まれてきたにも関わらず、人間の機構には未解明な点が数多く残っている。未解明な点は多いものの、人間の歩行補助装置をはじめとして実際に役に立つ装置が開発されるなど、多くの効用をもたらしてきた。そのような中、人間の発声機構、とりわけ舌の動作に関しては、十分な研究が行われてこなかった。人間の舌は、呼吸・発声・嚥下など人間の生存に極めて重要な行動に関わっており、即ちその動作が不完全になると、生命に関わる問題となる極めて重要な部位である。一方その機構は、テニスボールサイズの空間に7種類以上の筋肉が絡まりあって存在しており、お互いの相互作用により複雑な動作を作り出している。また、この筋肉が絡まりあう状態はそれぞれの筋肉の体積変化そのものが重要な意味を持つことがわかっている。筋肉は通常引張方向の動作のみが可能であるが、筋肉自体は体積が保存されるため、引張動作を行うと、短くなった分横に広がる。この作用を利用して、膨らませる動作を実現している。また、舌の動作は3次元的かつすばやい動作が行われている。このように舌の複雑な動作は、骨格系の存在しない軟体機構というこれまでロボティクスであまり検討されてこなかった課題であり、この解明を進めることにより、それ自体に骨格の存在しない内臓などの部位の動作の理解に大きく役立つものと思われる。

舌の発声メカニズムの解明という観点から、シミュレーションの研究が北陸先端大学の党や、カナダ UBC の Fels らをはじめとしていくつかの研究者により行われている。しかし、実体モデルとして、3次元的な舌の動作を再現した研究は早稲田大学で行われてきた Waseda Talker シリーズ以外にはほとんど存在しない。これまでに開発した WT-7RII(Waseda Talker No. 7 Refined II)は、肺(1自由度)、人間を模擬し弾性体で成形した声帯(4自由度)、顎(1自由度)、3次元変形を再現したリンクによる舌(7自由度)、開口面積の正確な再現を目的とした口唇機構(4自由度)および鼻腔および軟口蓋からなっている。この舌機構の開発に置いては、人間が5母音を生成しているMRI画像を元に解析を行ない、「舌尖」「舌前部」「舌体」の3つの領域の変形を再現することに注目し、また、顎機構を用いることで、機構の移動量を減らせることが分かったため、舌のリンク機構は3列のリンクを顎機構の上に設置し、その上にクラレ(株)製のスチレン系熱可塑性エラストマ・セプトン製のカバーをかぶせた機構となっている。リンクは、舌前部(2列目)と舌体(3列目)に関しては、位置が重要であ

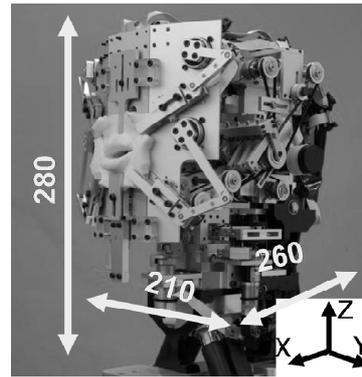


図1 WT-7RII

るため各2自由度のスライダクランク機構を用いた。舌尖に関しては位置の他に傾きも重要であるため、3自由度でパラレルリンクとスライダクランクを組み合わせたリンク系を用いている。また、舌のカバーが十分な厚みが無く、音漏れする問題があったため、カバー内の空間をセプトンへの影響が少なく、且つ音響的特性に適した液体であるエチレングリコールで満たせるようになっている。

また、声帯に関しては、セプトンで成形した、人間の声帯形状を模擬したヒダ型声帯を用いている。声帯モデルの形状は成人男性の声帯の平均的サイズにあわせ、振動部を21[mm]とした。ただし、特性の異なる層を重ね合わせる3層構造の構築が困難であったため、ヒダの内側は中空で成型し、特性の違いを再現している。この際、振動部の厚さに関して、下側の厚みが上側よりも厚くしている。

人間の舌の変形に関して筋肉の動作による体積移動というレベルまで再現した研究は存在しない。これは、これまでロボットで用いられていたアクチュエータの制約による面が大きい。ヒューマノイドの研究においても、弾性体・軟体が含まれる領域は比較的新しく、それに適したアクチュエータもあまり開発されてこなかった。

また、人間の舌の制御面に着目すると、位置制御ではなく、内部モデルと感覚系によるフィードバックを元に行っていることがわかっている。これは、ハードエアが軟体によって構成されているため、精度の高い位置制御は本質的に困難であり、学習によって獲得した内部モデルと、舌表面および口蓋に配置された感覚器、および耳による聴覚のフィードバックにより安定した制御を実現していると考えられている。これは、これまでのロボットの制御思想とは大きく異なるものであり、新しい制御パラダイムの構築が不可欠である。

このような制御系を構築するためには、舌の動作を感覚として捕らえるセンサ系の構築が必要であるが、既存のロボット用触覚セ

ンサにおいては舌の動作を3次元的に計測可能なものに関する研究はあまり行われていない。WT-5(Waseda Talker No. 5)の研究の中で、音響特徴量を元とした舌形状の最適化、さらには2次元的な触覚センサと口腔内に設置された圧力センサのデータにより子音発話時の舌形状を最適化する研究を行った。この研究においては閉鎖子音 (/t/など) 発声時の口腔内圧を人間と比較することにより、最適化を行うなど、感覚系の有効性を示したものの、ハードウェアやセンサが人間と大きく異なっていることなどにより、人間の感覚による制御系そのものを明らかにできたわけではなかった。

一方、人間の舌の動作を3次元的に計測する手法として、パラトグラフィーという、口蓋の内側に電極を設置したプラスチック製の電極を挟んだ上で発声運動などを行うことにより舌の口蓋への接触パターンを計測する方法が行われている。そのほか、時間的分解能が低いものの、MRIを用いる方法、計測点は限られ、また開発途上であるものの、舌上にコイルを設置して磁気変化を用いて舌変形を計測する方法(EMA)、さらには超音波診断装置を用いるものなど様々な方法が行われている。これらの方法は人体に対して害を与えないことを最優先としているため、装置が大掛かりであり、また、ロボットと人間とで材質が異なるため、人間用の手法をロボットにそのまま適用することは不可能である。

2. 研究の目的

人間の舌は、発声や呼吸といった人間においてきわめて重要な役割を有しており、またこれらの動作は舌独特な複雑な機構によって実現されている。これまで、人間の発声運動の解明を進めるため、発声系の機械モデル(発声ロボット)を構築する研究を行ってきたが、ハードウェア開発の制約により、剛体リンクを用いた機構で構築を行ってきた。一方、様々な新しいアクチュエータの開発が取り組まれているものの、応用例は少ない。そこで、本研究では舌機構のような軟体機構を駆動させる機構について検討を行い、ロボットへ適用する際に必要となる諸技術の構築を目指すとともに、将来的には人間と同様の機構で駆動する舌機構を実現することを目的としている。

また、制御においても、感覚をベースとした制御系の構築を目指し、そのために、3次元の舌変形を正確に計測可能なセンサ系の開発を行う。これにより、様々な目的・機構を持って開発されたロボットの舌機構を比較・評価することが可能となり、口腔を対象とするヒューマノイドロボットの発展に極めて有用である。

3. 研究の方法

軟素材の舌用駆動機構およびセンシング・制御系の構築においては、機構の検討および3次元センサ系の構築が必要不可欠である。そこで、本研究では1)舌機構用3次元の感覚センサの構築 2)軟素材を用いたロボット用の駆動機構検討に取り組むこととした。

1) 舌機構用3次元の感覚センサの構築

軟体機構による3次元の舌機構を開発するにあたって、変形の評価は不可欠である。また、舌の能力を評価するにあたっては、物理的な変形量を計測することも重要であるが、口蓋との間の相互作用、さらには節食などの動作への評価を考慮するならば、飲み込む物体との間の相互作用が人間と同等のレベルで実現可能であるかが重要な評価基準となる。そのような観点から、口蓋部にセンサを設置し、舌と口蓋の間の空間の距離や舌または物体との接触を計測できるようなセンサ系の構築を目指す。なお、この際、舌が3次元的に変形を行うことを想定しているため、センサに関しても、口唇から喉頭にかけての一平面上のみではなく、3次元的に計測が行えるセンサを構築する。

3次元のセンサを開発するにあたり、赤外線センサ、超音波センサ、導電ゴム、静電気センサ、圧力センサなど様々なセンサを、舌に用いている樹脂、セプトンに対する相性を含めて総合的に検討を行う。

また、面として接触パターンを計測するにあたって、人間の計測にもちいられるパラトグラフの仕様などを元に、センサの面的配置パターンに関して検討を行う。また、完成したセンサを既存の3次元舌機構を有する人間形発話ロボットの口蓋部に設置し、センサとして十分な計測が可能であるかを検証する。

2) 軟素材を用いたロボット用の駆動機構の検討

人工筋肉としては、SMA、形状記憶合金を用いるもの、化学反応を用いるもの、など様々なものがあり、立命館大学の平井らによる移動跳躍ソフトロボットなど人工筋肉により駆動するものが開発されているものの、小型のものが中心であり、全体として、可動範囲が狭い、十分なトルクが得られないという問題点が言われている。このような状況の中、ロボットの機構として人工筋肉が利用可能なのかを詳細に検討するとともに、軟素材の柔らかさを維持したまま、駆動できる機構に関して、人工筋肉以外のものも含めて検討を行う。

なお、この研究については軟素材を用いて軟体生物の機構を再現する研究に取り組んでいるイタリアの研究者と情報交換しながら行うこととした。

4. 研究成果

本研究においては、軟素材を駆動する新しいアクチュエータの検討と、軟素材で構築された舌形状の計測のためのセンサシステムの開発を行った。

まず、機構の検討においては、軟素材を变形させるための機構として、電磁石を用いた機構の検討などを行った。

舌形状の計測用のセンサの開発においては、センサの選定、実際のロボットの舌形状の計測が行えるようにするための改良および評価実験を行った。

センサの候補としては様々なものを検討したが、超音波センサは発信装置が比較的大型になっているため、磁気センサはDCモータとの干渉のため、さらに、小型のジャイロ・加速度センサは、軟素材に接着する際に弾性体の変形を制約してしまうという問題があった。

そこで、発光素子(LED)から出た光が発散された状態で計測対象にて反射され、反射面からはね返ってくる光量を受光素子(フォトトランジスタ)で計測することにより、距離を測る光センサ(フォトリフレクタ)を口蓋に多数設置する方式を採用した。

この方式の舌計測においては、閉鎖されている状態から、開いている状態まで計測するため、計測レンジとして0-30[mm]が必要であった。しかし、受光素子(フォトトランジスタ)の受光感度特性は、距離と電圧の対応関係が線形に近い特性を有する範囲は限定され、一組のセンサで計測することは困難であった。

そこで、広指向性の受光素子と狭指向性の受光素子を併用し、対象物との距離が0-5[mm]の範囲では広指向性センサのデータを用い、5[mm]を超える場合は狭指向性センサのデータを用いることとした。この二つと広指向性の発光素子を組み合わせることで広い範囲の計測が可能となった。

さらに、舌の変形においては多様な形状をとるため、発光素子との角度を一定に保つことはできないが、フォトインタラプタは、反射面の角度が変化すると反射される光量が変わってしまい、測定値が変わってしまう問題があった。そこで、2つの受光素子を平行に並べることで、角度の影響を相殺する手法を用いた。角度が傾くと、一方の出力は強くなり、もう一方は弱くなるため、単純に出力の平均をとることとした。図2に発光素子と狭指向性の受光素子を組み合わせられた状態で、反射面の角度を-50[deg]から50[deg]まで変化させたときの受光素子から反射面までの距離を5[mm]から20[mm]の範囲において、センサ出力の平均値の変化を示すが、2つの受光素子対を用いることにより、角度の影響

が大幅に低減できた。

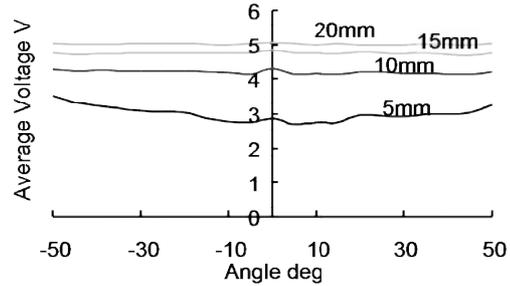


図2 傾きと2つの狭指向性フォトリフレクタの出力平均との関係

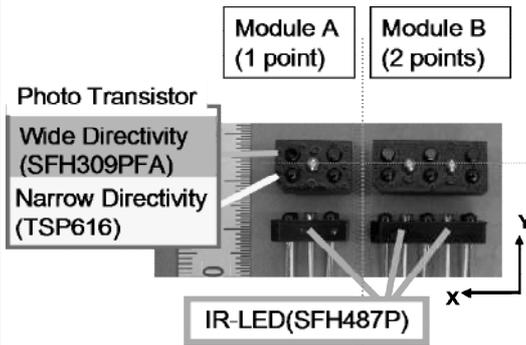


図3 センサモジュール

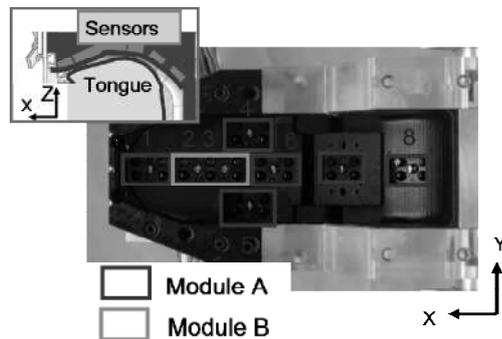


図4 口蓋部に設置した状態

以上の検討により、図3のような1つの発光素子と4つの受光素子を、3Dプリンタで成形したパッケージに設置したモジュールを構築し、舌形状変化を計測するために図4のように口蓋部に設置した。

なお、光センサは、意図しない反射や外光の影響を受けやすく、この影響を抑えるため、舌表面以外の口腔内を黒色で塗装し、反射を抑えた。

このセンサの評価を行なうため、まず、あらかじめ形状のわかっている舌モックアップを口蓋に入れ、センサ出力よりセンサから舌面までの距離を計測し、モックアップに対して直接計測した距離との比較を行った。母

音/ɔ/発声時の舌形状を模擬したモックアップを計測した際の、距離データおよびセンサから計算された距離データ(広指向性受光素子および狭指向性受光素子から計算された各距離データを比較したところ、近距離用のセンサの範囲では計測ができており、遠距離用のセンサ範囲においては、距離にほぼ一定のバイアス誤差が生じているものの、各計測点間の特性の傾向については計測できた。

さらに、母音発声時の舌形状を対象としてモックアップの舌とロボットの舌の合成音声の再現度について検討を行った。まず、母音舌モックアップを口蓋に取り付けた時の距離をセンサで計測する。次に、ロボットの舌機構を組み込み、ニュートラル状態から形状を調整して、距離センサの出力がモックアップを入れて計測した結果と一致するようにする。その状態で人工喉頭を用いて母音発声を行い、舌モックアップで発声を行なった際の音声との比較を行なった。その結果、音声スペクトラムは近い場所にピークを持つなど、音響的には2つの形状が類似しており、開発したセンサの有効性を確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. 福井孝太郎, 草野世大, 高西淳夫, 誉田雅彰, 発話運動データに基づく人間形発話ロボットの制御, 音声研究, 14巻2号, 査読有, 2010年, pp.57-64

〔学会発表〕(計7件)

1. 福井孝太郎, 大金林太郎, 鈴木悠人, 高西淳夫, 誉田雅彰, 声帯機械モデルにおける倍周期振動の生成, 日本音響学会 2011年 春季研究発表会, 2011年3月, 東京

2. Kotaro Fukui, Toshihiro Kusano, Yoshikazu Mukaeda, Yuto Suzuki, Atsuo Takanishi, Masaaki Honda, Speech Robot Mimicking Human Articulatory Motion, INTERSPEECH (Annual Conference of the International Speech Communication Association) 2010, 2010年9月, 千葉市

3. 福井孝太郎, 鈴木悠人, 草野世大, 迎田美和, 誉田雅彰, 高西淳夫, 光距離センサを用いたロボットの舌形状の計測, 第28回日本ロボット学会学術講演会, 2010年9月, 名古屋

4. 福井孝太郎, 草野世大, 鈴木悠人, 迎田美和, 高西淳夫, 誉田雅彰, 発話運動データを用いた人間形発話ロボットの制御, 日本音響学会 2010年秋季研究発表会, 2010年9月, 吹田市

5. Kotaro Fukui, Yuma Ishikawa, Keisuke Ohno, Nana Sakakibara, Masaaki Honda, Atsuo Takanishi, Three Dimensional Tongue with Liquid Sealing Mechanism for Improving Resonance on an Anthropomorphic Talking Robot, IEEE/RSJ 2009 International Conference on Intelligent Robot and Systems, 2009年10月, St. Louis, MO, USA

6. 福井孝太郎, 迎田美和, 榊原菜々, 草野世大, 誉田雅彰, 高西淳夫, 人間形発話ロボットの開発-子音生成のための新型口唇機構の設計・製作-, 日本ロボット学会第27回学術講演会, 2009年9月, 横浜市

7. 迎田美和, 榊原菜々, 福井孝太郎, 草野世大, 誉田雅彰, 高西淳夫, 人間形発話ロボットの新型口唇機構による両唇閉鎖子音の生成, 日本音響学会 2009年秋季研究発表会 2009年9月, 郡山市

〔その他〕

ホームページ等

早稲田大学高西研究室, 発声ロボットプロジェクト

http://www.takanishi.mech.waseda.ac.jp/top/research/voice/index_j.htm

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福井孝太郎 (Kotaro Fukui)

早稲田大学・理工学術院・研究員

研究者番号: 60547074