様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ６ 月 １５ 日現在

機関番号： ３２６８９
研究種目： 基盤研究(B)（一般）
研究期間： 2013～2015
課題番号： ２５２８００７７

研究課題名（和文） 口腔インタフェースとタクタイルフィードバックによる身体拡張(第３の腕)の研究

研究課題名（英文） Body extention using intraoral interface and tactile display - The third arm

研究代表者
橋本　周司（Hashimoto, Shuji）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：６００６３８０６

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は，身体に新たな動作自由度を付加するための技術的基盤を確立することを目的とする．身体拡張には，付加された自由度を操作する手段ばかりでなく，拡張された身体のイメージをユーザが獲得する必要がある．そこで，両腕の自由を失わずロボットアームを第３の腕として自在に操ることを例題として研究を行なった．アームの制御には繊細な運動が可能な舌を用いる口腔インタフェースを開発し，また，アームの姿勢と動きのイメージを身体に提示するために背面に装着するタクタイルディスプレイを開発し，実験によりそれぞれの有効性を確認した．また、運動制限機構を用いた新たな原理のロボットアームの試作と評価を行った。

研究成果の概要（英文）：Our aim is to establish a technical foundation for adding a new degree of freedom to human body. The body extension means not only creating a new degree of freedom of motion but also acquiring of the image of the extended body. In this project, we conducted a study to make an artificial third arm that is a robot arm controlled without loss of user's degree of freedom of the innate arms. For the arm control we developed an intraoral interface using a tongue capable of delicate movements. We also developed a haptic display to be mounted on the back in order to present an image of the posture and movement of the third arm to the user. The experimental results proved the validity of the developed system. In addition, we made a prototype of a new principle of the robot arm using a motion limiting mechanism.

研究分野：計測・情報工学

キーワード：インタフェース　ロボットアーム　第3腕　ハプティックフィードバック　ＨＣＩ　ハプティックディスプレイ　口腔インタフェース　運動制限機構

１．研究開始当初の背景

近年のロボティクス技術の進歩により様々な移動機器が開発されている．これらの機器の制御は，手足の物理的な運動あるいは手足を動かすときに生じる筋電による．また，介護・福祉分野では高齢者などの支援装置として，人間の日常生活の動作を直接補助することを目的としたパワーアシストシステムが開発されている（山海１９９６，遠山２０１０等）．これらはいずれも，身体が元来持っている運動能力を補強するためのものであり，身体運動の自由度の増加を目的とするものではない．一方，身障者用補装具は失われた手足の機能を代替するものとして種々開発され「新しい腕」や「新しい足」を提供している．これらは減少した身体の自由度を回復するものである．

したがって，2 本以上の腕を持つ千手観音像に見られるような姿形で身体の自由度を増加して，人間に新しい身体的機能を実装する試みはほとんどなかったのが研究開始当時の状況ということができる．

２．研究の目的

本研究では介護・福祉分野のみでなく，人間の身体の拡張という考え方に基づき，人間の身体運動に新たな自由度を付加するための技術的基盤を確立することを目的とする．この場合，付加された自由度を操作する手段ばかりでなく，拡張された身体の感覚を獲得する必要がある．新たな自由度を自在に操作するためには，必ず身体の動作が必要である．特に指先や手足の動作は正確さと迅速さにおいて優れているが，操作を行うためにそれらの自由度が使われる．したがって，これら身体の自由度の一部が別の自由度に変換されるということになる．これまで，障害により運動の自由がきかない人のためのインタフェース手段として，首の運動，瞬き，息吹きなどが代替として用いられているが，柔軟性，精度，速度などの点で必ずしも十分とは言えない(宮崎２００２，田中２０１１等)．また，筋電のように生理的な運動指令情報を検知して操作に用いることも可能であるが，やはり，使用者の意図を十分にくみ取ることは困難であり，利用できる場面は限られている．

研究代表者らは，手と同じように繊細な運動が可能な舌および口蓋の運動を用いるワイヤレス型の口腔インタフェースを開発し，コンピュータ操作，電動車椅子の制御，および身体に装着したロボットアームの制御に用いる実験によりその可能性を検討した．コンピュータ操作への応用では，両手をタイピング位置に置いたまま，口腔インタフェースでカーソルを制御することができ，電動車椅子の制御では，両手が荷物などでふさがった状態で，車椅子の運転が可能になった．また，ロボットアーム制御では，第３の腕を持ったかのように，多様な作業を行えることが判った．口腔インタフェースは，口の中で舌と顎の運動でジョイスティックを制御するもので，上下，左右，前後のほか，咬合動作による操作が可能である．使用中は，発話と摂食は不可能になるから，厳密には新しい自由度が付与されたということではないが，２本の腕手とは独立に運動する３本目の腕を有するように身体の作業自由度が増したと見なすことができる．以上のこれまでの研究から，さらに洗練されたロボットアームを装着することにより身体の拡張が可能であるとの見通しを得た．しかしながら，その実現には重要な研究課題があることも判明した．我々のロボットアーム制御実験では，アームへの制御指令は口腔インタフェースにより正確に伝えることが可能であるが，その結果のモニタリングは，視覚に頼らざるを得ず操作中に眼を離せないということである．コンピュータの操作や電動車椅子の制御ではこのことは特に問題ではないが，身体の拡張においては拡張された身体部分の動作状況をイメージできることが重要である．人間が手で物をつかむ時には眼での確認が必要であるが，眼を閉じても自分の様子（位置や形状）は想像することができために，視覚での確認は重要な時点だけで行っている．さらに，物を把持する場合は反力を感じるため自動的に適切な把持力を出すことができる．したがって，口腔インタフェースでロボットアームの動きを指示するだけでは不十分であり，アームの状態をユーザの身体に適切にフィードバックし，空間的なイメージを想像可能にする必要がある．

そこで，本研究の期間内に達成すべき具体的な目標として，①操作性など口腔インタフェースの改良と実装試験，②ロボットアームの状態をフィードバックする触覚型ディスプレイの開発と認知実験，③象の鼻に類似した新しいアームの原理の確立，を設定した．

３．研究の方法

(1)口腔インタフェースについては，従来のジョイスティック型では主なセンシング系をすべて口腔内に収める必要があることから，口腔内に挿入した棒を舌尖で操作し，その棒の動きを先端に取り付けたIMU(Inertial Measurement Unit) と呼ばれる 9 軸姿勢センサを用いて検出する方式を試みる．この時，IMU を頭部にも取り付けて，頭部の姿勢変化をキャンセルする計算方式を検討する．さらに，口の位置に一定の基準を与えるために，イヤーマフを頭部に装着し，耳部より伸びる支持部を口の前に固定するヘッドセット型口腔内インタフェースも開発し効果を評価する．

(2) ロボットの動作状態を人間の身体にフィードバックする仕組みのプロトタイプとして，これまでに人間の背中に振動で情報を提示する触覚ディスプレイを開発する．振動

源は振動周波数・波形を任意に提示することが容易に行えるボイスコイル型として振動の周波数や振幅に対する知覚の分解能，情報提示に適した振動パターンの検討を行う．次に，ロボットアームの関節に対応する振動子に各角度を同時に提示して，ユーザにロボットを見ながら知覚される振動との関係を学習した後に，ブラインド条件下でのロボットアームの状態把握実験を行う．

(3) 弾性体の屈曲・復元運動に運動制限機構を組み合わせた張力制御マニピュレータの開発では，つるまきばねを 3 本の紐で引っ張る構造に低温融解ハンダを用いた運動制限機構を組み合わせたマニピュレータを作成しその運動特性を検証する．特に紐の引張量と運動制限部位の相異によるマニピュレータの屈曲動作の変化の関係を明らかにして，マニピュレータ先端位置制御ついて検討する．

４．研究成果

(1)口腔インタフェース

IMU を用いた「しゃぶり棒」型のインタフェースをいくつか試作し，評価実験を行ったが，ここでは最終形として最も性能が良い結果が得られた図 1 に示すヘッドセット型について述べる．

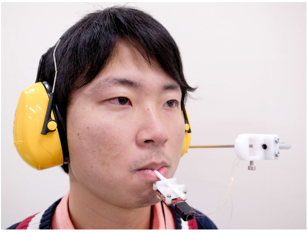

図 1 口腔インタフェース．

このインタフェースはイヤーマフ部，支持部，入力部の 3 つで構成されている．ユーザは黄色のイヤーマフを頭部に装着し，左耳側より伸びる支持部を口の前に固定する．舌尖動作を検出するための入力部は管状になっており，ユーザはこの管を口に咥え，舌尖で動かすことで操作する．管の姿勢変化を先端に取り付けられた IMU が検出することで，ユーザの舌尖の動きを認識し，インタフェースとして動作する．また，入力部の末端には気圧センサが取り付けられており，口腔内圧を検出できる．これにより，舌尖による 2 自由度とは別に，呼気による操作が可能である．

採用した IMU は，USB 接続によってデータの送受信，電源供給をおこなうため，インタフェースの動作時間の制約や入力部の重量増加を抑えることができる．センサに繋ぐケーブルは操作の妨げにならないように，支持部とイヤーマフを介して PC に接続した．実際にユーザが口で支える重量は 9.8 [g]である．また，この入力部は衛生的観点から交換可能な構造にした．IMU を用いた入力部姿勢の検出では，操作者の身体の動きと舌尖による入力操作の区別がつかないという問題がある．そこで，操作者の頭部の姿勢を別の IMU で検出し，入力部の姿勢と差し引きする姿勢推定手法を用いる．頭部の姿勢検出用 IMU はイヤーマフ右耳側内部に固定した．イヤーマフはユーザの頭部にしっかりとフィットするため，装着性が著しく向上した．また，姿勢推定手法のデータ更新周期は 10 ms と高速なため舌運動に対する遅延は感じられない．

試作したヘッドセット型口腔インタフェースの操作性を評価するために実験をおこなった．PC のマウス操作を口腔インタフェースでおこなうアプリケーションソフトウエアを作成し，カーソルを上下左右斜めの 8 方向に 300 ピクセル移動させ，目標点の 30 ピクセル角の領域に入れるというタスクをおこなった．実験参加者は 3 人で，10 分程度の練習の後，上述のタスクをおこなわせて操作の速さを記録した．図 2 にある被験者のカーソル操作の軌跡を示す．操作の平均速度は，109.4 [pixel/s]となりマウスと比べて遜色のない操作性が実現した．

この成果は、新しいインタフェース操作の手段としての舌の大きな可能性を示すものであり、日常生活あるいは生産現場での利用が考えられる。

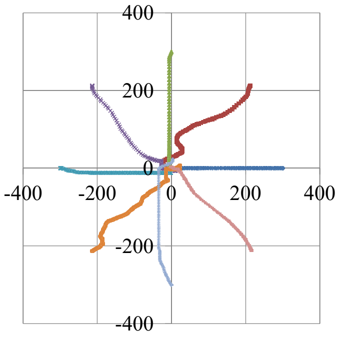

図 2 被験者の操作軌跡．

(2)振動ディスプレイでのアームの状態提示

ロボットの動作状態を振動によってフィードバックするハプティックディスプレイを開発した．さらに，このハプティックディスプレイが提示する情報からロボットの動作状態を把握して操作できるのかを評価するために，シミュレータ上で 2 関節ロボットアームを用いて物体を掴んで目標点まで運搬する実験を行った．

実験には，健常な 20 代男性 12 名が参加した．そのうち 10 名には，ハプティックディスプレイの使用経験があった．アームは各リンクの長さが等しい 2 関節のロボットアームである．アームの先端にはグリッパーがついており，物体を把持して 2 次元平面上で運搬することが可能である．グリッパーと物体の中心との距離がアーム長の 10%以下のとき物体を把持できる．ロボットアームの操作には，各関節の角度を指示する方法と，アームの先端位置を指示する方法の二種類を用い

た．いずれの方法も，ロボットアームへの指示はジョイスティックを用いて行った．

ハプティックディスプレイは，姿勢矯正ベルトにボイスコイル型振動子を両脇腹にひとつずつ，計二つ取り付けたもので，被験者の体の自由度を妨げないものとなっている．装着位置は背中想定していたが，予備実験で両脇腹の方が良い結果を得ので，最終的にこちらに統一した．ユーザの右脇腹の振動子からロボットアームの根元部分の関節の角度，左脇腹の振動子から中間部分の関節の角度を提示した．その際に，各関節の可動範囲を45 度ずつに分割し，それぞれの範囲に異なる周波数を割り当てることで関節の大まかな角度を表現し，関節の細かな動作は振動振幅の変化に対応させることで表現した．また，ロボットアームが物体の把持に成功した場合には，二つの振動子から 100Hz の振動を 1 秒間提示した．

はじめに，実験参加者に 10 分の時間を与え，振動と関節角度の対応関係を学習させた．その後，ロボットアームを参加者から隠し，物体と運搬先の目標点だけが表示された画面を参加者に提示する．この状態で，参加者に対して 3 分の制限時間内にグリッパーで物体を把持するように指示した．さらに，制限時間内に物体の把持に成功した場合には，参加者に対して物体を目標点まで運搬するように指示した．これを前述した二種類の操作方法について，物体の初期位置，目標点を変えて 10 回ずつ繰り返し行わせ，振動からロボットアームの状態を把握し，操作できるのかを評価した．

図 3 に実験結果を示す．二種類の操作方法

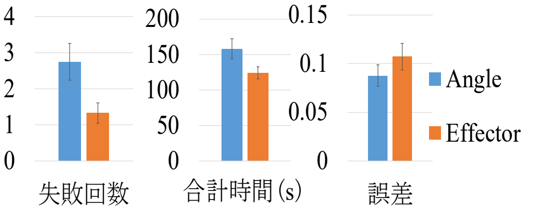

図 3 実験結果．

について，10 回中物体の把持に失敗した回数，タスクにかかった合計時間，タスク終了時の目標点からの位置ずれ誤差（アーム長を 1 に規格化した距離）の 12 人の参加者の平均値と標準誤差をあらわした．実験結果から，アームの先端位置を指示する方が，タスクにかかる時間が短く，物体把持の失敗回数も少なくなることが確認された．これは先端を操作する方がロボットアームを直感的に操作できることが原因ではないかと考えられる．一方物体運搬の正確さでは，二つの操作方法で有意差が認められなかったことから，一度物体を把持すれば，どちらの操作方法でも物体を目標点付近まで運搬できることが確認された．

最後に，ジョイスティックではなく，(1)に述べた口腔インタフェースによる実機制御の実験を行い，本研究の目的である第 3 の腕として自由度の拡張とブラインドでの状態把握が可能であることが確認できた．

(3)張力制御による軽量マニュピュレータ

図 4 に試作した張力制御マニピュレータの外観を，表 1 にその仕様を示す．マニピュレータは，本体となるつるまきばねにプラスチック製の円形のガイドパーツが 3 つ取り付けられた形をしている．ガイドパーツには，120°ごとに 3 本のナイロン製の紐が通されており，それらをサーボモータが引っぱることでマニピュレータを任意の方向に屈曲させる．

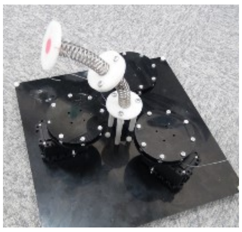

図 4　マニピュレータの外観

表 1　仕様

サイズ	115×35 mm
重量	40 g
ばね定数	0.64 N/mm
紐	ナイロン 6 号

また，このマニピュレータに屈曲を部分的に制限する運動制限機構を組み合わせて屈曲する部分に選択性を持たせれば，マニピュレータの曲がり方のパターンを増やすことができる． それには剛性を任意に変化させられる材料が適するが，熱応答性と硬化時の剛性の点から，はんだが最も適していた．図 5 は運動制限機構の働きを表す例である．

図 5　運動制限器機構概要.

次に，このマニピュレータの先端位置制御について検討した．マニピュレータを屈曲させるには，3 本ある紐のうち 2 本の紐を引っ張ればよい．また，屈曲によるばねの縮みは十分に小さいと仮定できるので，先端は球面を描くように移動すると考えられる．したがって，2 本の紐の引張量 l_1, l_2 に対するマニピュレータの屈曲方向 ϕ および根本から先端までの水平距離 r を求めれば，先端位置制御が可能になる．

図 6 に示すように，2 本の紐に働く張力の大きさをそれぞれ F_1，F_2 と置くと，マニピュ

レータの屈曲方向ϕはそれらの合力の方向でとして式(1)で与えられる.

$$\tan\phi = \frac{\sqrt{3}F_2}{2F_1 - F_2} \quad (0° \le \phi \le 120°). \tag{1}$$

マニピュレータの根本から先端までの水平距離 r は，合力の大きさ F に応じて決まるが，それらの間には，式(2)の関係があることが実験的に確かめられている．また，紐の引張量 l_1 または l_2 と水平距離 r の間に，式(3)の関係があることが確かめられている．

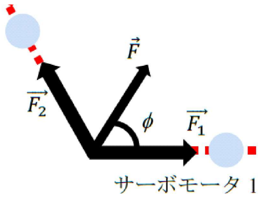

図 6 張力と屈曲方向の関係

合力の大きさFは，紐の張力 F_1, F_2 を用いて，式(4)であたえられる．
したがって，任意のϕ と r における各紐の引張量 l_1，l_2 が，式（1)～(4)を用いて求められ

$$F = \sqrt{F_1^2 - F_1F_2 + F_2^2}\ , \tag{4}$$

$$r = 2.88 \times l_1 (= 2.88 \times l_2). \tag{5}$$

る．マニピュレータには対称性があるので，どの紐を引っ張る場合であっても同様の方法で先端位置を制御することが可能である．

動作実験として，このマニピュレータを用いて，先端で任意の軌跡を描く実験を行った．具体的には，マニピュレータの先端が円軌道を描くように紐の引張量を制御し，その様子を真上から撮影した動画を解析した．図 7 に実験結果を示す．マニピュレータが実際に描いた軌跡の理論値からのずれは平均で 2.97 mm であり，マニピュレータの先端位置制御の正確性が確かめられ、新しい原理に基づくロボットアーム開発の見通しが得られた。

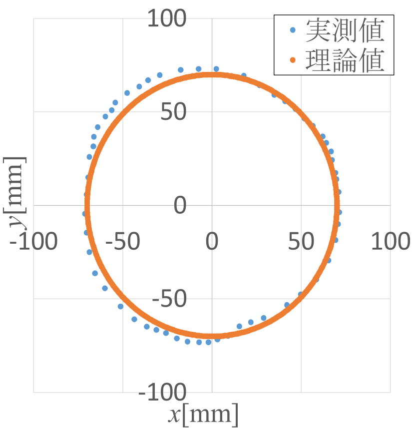

図 7　実験結果.

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計　０件）

〔学会発表〕（計１２件）

①松岡　大地，エンリケズ　ギエルモ，ヤップ　フェイ　イー，橋本　周司，"つる巻ばねを用いた張力制御マニピュレータの開発，" 2016 年電子情報通信学会基礎・境界講演論文集，pp.293，福岡，3 月 15 ‐ 18 日，2016.

②西尾　智彦，エンリケズ　ギエルモ，ヤップ　フェイ　イー，山口　友之，橋本　周司，"ハプティックディスプレイによるロボットアームの状態把握と操作，" 2016 年電子情報通信学会基礎･境界講演論文集，pp.288，福岡，3 月 15 ‐ 18 日，2016.

③小池宇織，ヤップ フェイ イー，エンリケズ ギエルモ，三輪貴信，橋本周司，"ヘッドセット型口腔内インタフェースの開発，"2016 年電子情報通信学会基礎・境界講演論文集，pp.289，福岡，3 月 15-18 日，2016.

④松岡大地，エンリケズ ギエルモ，ヤップ フェイ イー，橋本周司，"運動制限機構を用いた軽量マニピュレータの開発，"ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集 (ROBOMECH2015)，2A2-Q01，京都，５ 月 17-19 日，2015.

⑤西尾　智彦，エンリケズ　ギエルモ，ヤップ　フェイ　イー，山口　友之，橋本　周司，"ロボットの状態把握に適した振動提示方法の検討，" ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集 (ROBOMECH2015)，.1U1-U02，京都，５ 月 17-19 日，2015.

⑥小池宇織，エンリケズ ギエルモ，ヤップ フェイ イー，三輪貴信，橋本周司，"姿勢センサと大気圧センサを用いた口腔内インタフェースの開発と評価，"ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015 講演論文集 (ROBOMECH2015)，1A1-K06，京都，５ 月 17-19 日，2015.

⑦小池　宇織，エンリケズ　ギエルモ，ヤップ フェイ イー，橋本　周司．"姿勢センサと圧力センサを用いた口腔内インタフェースの開発"，2015 年電子情報通信学会総合大会基礎・境界講演論文集，pp.199，草津市，3　月 10-13 日，2015.

⑧西尾智彦，エンリケズ　ギエルモ，ヤップ　フェイ　イー，山口友之，橋本　周司．"振動型ハプティックディスプレイを用いたロボットアーム操作"，2015 年電子情報通信学会総合大会基礎・境界講演論文集，pp.202，草津市，3 月 10-13 日，2015.

⑨小池宇織，エンリケズ ギエルモ，ヤップ フェイ イー，三輪貴信，山口友之，橋本周司，"9 軸姿勢センサによる口腔内インタフェースの開発と評価，"ロボティクス・メカトロ

ニクス講演会 2014 講演論文集(ROBOMECH2014), 2A2-K04, 富山, 5月25-29日, 2014.
⑩西尾智彦, エンリケズ・ギエルモ, ヤップ・フェイ・イー, 山口友之, 橋本周司, ″ボイスコイル型振動子を用いたハプティックディスプレイの開発,″ ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集(ROBOMECH2014), 3P2-A08, 富山,5 月 25-29日,2014.
⑪松岡大地, エンリケズ ギエルモ, 橋本周司, ″運動制限機構を用いた軽量マニピュレータの開発,″ ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 講演論文集(ROBOMECH2014), .3P2-A08, 富山,5月25-29日,2014.
⑫西尾智彦, エンリケズギエルモ, ヤップフェイイー, 山口友之, 橋本周司, ″振動型ハプティックディスプレイの知覚精度,″ 2014 年電子情報通信学会総合大会基礎･境界論文集, pp.176, 2014.

〔その他〕
ホームページ等
http://www.shalab.phys.waseda.ac.jp/index-j.html

６．研究組織
(1)研究代表者
橋本　周司（HASHIMOTO, Shuji）
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号：６００６３８０６

(2)研究分担者
松本　友実（MATSUMOTO, Tomomi）
早稲田大学・理工学術院・助教（平成 26 年 3 月退職）
研究者番号：１０５７０９０５
（平成 25 年度まで）

酒井　幸仁（SAKAI, Yukihito）
福岡大学・工学部・准教授
研究者番号：６０４０９６５４

山口　友之（YAMAGUCHI,Tomoyuki）
筑波大学・システム情報工学研究科・助教
研究者番号：５０４２４８２５

中村　真吾（NAKAMURA, Shingo）
芝浦工業大学・工学部・助教
研究者番号：５０４２４８０９

(3)連携研究者
中村　真吾（NAKAMURA, Shingo）
芝浦工業大学・工学部・助教
研究者番号：５０４２４８０９
（平成 26 年度より研究分担者）

(4)研究協力者