

令和元年5月21日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01537

研究課題名(和文) マルチモーダル入力と直感的フィードバックを有する実用安全指向型軽量肩義手システム

研究課題名(英文) Lightweight shoulder prosthesis for practical and safe use with multi-modal operation input system and intuitive feedback device

研究代表者

関根 雅 (Sekine, Masashi)

千葉大学・フロンティア医工学センター・技術専門職員

研究者番号：70769182

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：アクチュエータ、センシング、機構最適化を通じ肩義手システムを試作開発した。義手アームには安全性向上に繋がる軽量柔軟な空気ゴム人工筋肉と、その短所である可動域・出力を補助する電気モータとのハイブリッド駆動を採用した。日常生活動作データに基づき軽量性・出力・可動域・柔軟性を高バランスに保つ1kg以下の義手を実現。当該アームと筋電・加速度センサ等によるマルチモーダル入力装置により日常生活動作を再現できた。また健常手首が手で握られるような形態で、腕時計バンド型の直感的な把持(握)カフフィードバック用空圧駆動デバイスを開発し、被験者によるデバイス握力の認識テストを行い有用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人工筋肉駆動採用により、人工筋肉がもつ軽量性・柔軟性を義手に備えることで、使用者のみならず使用環境内の他人の安全性確保にも寄与できる。多機能肩義手の他開発例において、重量は3～6 kg程度のものがあるが、本義手では機能を絞り自由度を減らしてシンプル化させ、上記の人工筋肉を活用することでアーム本体重量を1 kg以下に抑えた。これは疲労による使用限界時間向上等の義手利便性改善に繋がる。またハンド把持動作と同様に手首を掴むような空気圧ゴムの力によるフィードバックデバイスは直感的に把持力を意識し易く低刺激で親和性も高い。把持力認識性及びデバイス使用時の安全性向上に繋がる。

研究成果の概要(英文)：The shoulder prosthetic system was developed by studying actuators, sensing and optimization of prosthetic mechanism. Soft and light pneumatic artificial muscle (PAM) which can contribute to safety use, and electric motors which can provide large movable range and output force were employed for actuators. Based on data of activities of daily living (ADL), the prosthetic arm which keeps lightweight (< 1 kg), force, work space and compliance with good balance was made. The prototype multi-modal operation input system including EMG sensors, etc. with the arm conducted one of the common ADL motions. Moreover, the watchband-type device for feedback of prosthesis hand grasping was developed. By wrapping around the wrist with a force proportional to the grasping force, the device is able to provide pressure and convey the force on prosthesis user's intact wrist intuitively. A recognition rate of the force by the device was investigated in tests of examinees and the validity was confirmed.

研究分野：機械工学、医工学、メカトロニクス・ロボティクス

キーワード：肩義手 ソフトアクチュエータ 力覚フィードバック マルチモーダル入力 空気圧人工筋肉 バックドライバビリティ 識別評価

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

義手は切断患者の日常生活動作(Activities of daily living, ADL)及び生活の質(Quality of life, QOL)を大きく回復できる。義手は切断レベルに応じて肩、上腕、前腕、手部義手等に分類されるが、広く実用化されている動力義手は手部や前腕義手である。一方、肘よりも高位の切断向け義手はサイズ・重量、制御機構が大規模複雑になり実用化が困難になる。中でも肩義手はその最たるもので、開発例は他義手に比べて非常に少ない。肩切断者をはじめとする高位レベル切断者のADL, QOL改善, 社会参加支援のためにも、有用な動力肩義手の開発を進めることには社会的な意義がある。

肩義手の開発例では多自由度筋電義手等があるが重量が約4 kg以上あり、切断者が望む義手重量や重いと感じる重量と比べれば非常に重く、1kg程度への軽量化が必要と考えられる。また動力肩義手開発例における駆動は電気モータによるものが多い。モータは大きな可動領域と出力を兼ね備えるが一般的には出力に対して重量が重い。さらに強い停動トルク・多段の歯車減速機構により低い逆可動性(バックドライバビリティ)をもたらす。これは柔らかさのない重い腕となることを意味する。

一方、肩切断者は残肢がないために残肢で義手を移動することや負荷を支えることは不可能であり、また義手を操作させるための残存部位からの信号や動作取得も困難である。そのため義手において腕本体の可動領域と出力、また使用者 義手の適切な動作指令形態、さらに安全確実なADL遂行のための義手 使用者の動作情報のフィードバック要素は重要な性質となる。

### 2. 研究の目的

アクチュエータ、センシング、機構最適化技術の研究開発を通じ、軽量肩義手システムを実現する。義手本体(アーム)には安全性向上に繋がる軽量・柔軟な空気ゴム人工筋肉(Pneumatic Artificial Muscle, PAM)と、その短所である可動域・出力をアシストするモータとのハイブリッド駆動を採用する。そしてADL動作に基づく最適機構設計により、評価指標である軽量性・出力・可動域・柔軟(安全)の各性質を高バランスに保つ重量1kg以下の軽量アームを試作する。操作入力は筋電・加速度センサ・力・機械スイッチ等を組合せたマルチモーダル入力装置を開発する。また使用者健常手首が手で握られるような形態の、直感的な把持力フィードバックデバイスの開発も行う。これらの各要素技術開発により、使用者負担を減らす実用安全志向型システムを構築する。

### 3. 研究の方法

#### (1) アーム開発

アームは5関節(自由度)を有する構造とし、関節レイアウトは肩2自由度、肘2自由度、ハンド把持1自由度とする。健常者の数種の両手ADL動作計測データから5自由度リンクモデルの各寸法を決定し、動作内手先軌道追従時のモデル各関節の所要角度・所要トルクを動力学方程式により計算する。これによりPAM/モータの各関節の適材適所配置、PAM使用本数を導出する。基本的には柔軟安全性、軽量性を考慮しPAM使用を前提とする。しかしながら所要角度・トルクを満たすために必要なPAM本数が多くなり、PAM関節を構成するための拮抗構造(プーリーを介して両サイドのPAMが互いに引き合いバランスをとる構造、図1参照)を構成する部品の全重量(PAM、プーリー、金具アクセサリ等)がモータ重量を大幅に超えてしまう場合や、PAM連結による全長増大によりレイアウトが難しくなる場合は当該関節にモータを採用する。ここでPAMはスキューズ社のPM-10P(100 N, 3 g)、モータは双葉電子工業社のRS405CB(4.7 Nm, 67 g)を使用する。また同時にPAMによる駆動効率を向上させるための要素技術開発も行う。

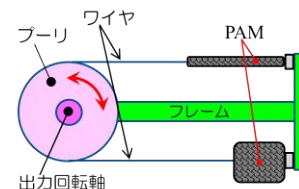


図1. 拮抗構造概略

#### (2) 把持力の直感的力覚フィードバックのためのデバイス開発

対象物の重さ、柔らかさ・脆さによらず安全で安定した把持を実現するために、視覚では補えない把持力情報を使用者に伝える必要がある。そこで把持力フィードバックのためのデバイスを開発する。ハンド(手)で直接健常側手首を掴まれるような形態により、力覚に把持力を直感的にフィードバックさせる腕時計バンド型のデバイスとする。このデバイスによる使用者への把持力伝達は、ゴム筐体を空気圧駆動で膨らませ膨張により健常手首を囲む(掴む)ように加圧することで実現する。ゴム・圧縮空気の構成により親和・安全性を備える。

#### (3) マルチモーダル入力システム開発

義手5自由度の操作のためのマルチモーダル入力システムを設計する。筋電・加速度センサ・力センサ・機械スイッチを使用し、腕以外の各部位に設置し当該部位の挙動により義手操作入力信号を生成する。

#### (4) 確認評価

上記の開発デバイスの有用性を被験者による動作実験により評価確認する。

### 4. 研究成果

#### (1) アーム開発

健常者の数種の両手動作(ペットボトルのドリンク動作等)の計測データを基に、所要角度・トルク、PAM 使用本数及び構成部品重量、配置レイアウトを総合的に判断、義手の仕様(寸法、各関節駆動方式)を決定し試作機に展開した。試作アーム及び各関節位置は図2に示す。肩: J1(PAM)-J2(モータ), 肘: J3(モータ)-J4(PAM), ハンド: J5(モータ)とした。重量はアーム本体が 830 g となった。

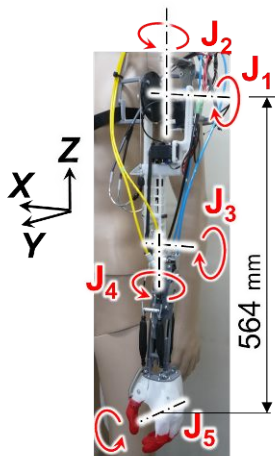


図 2. アーム

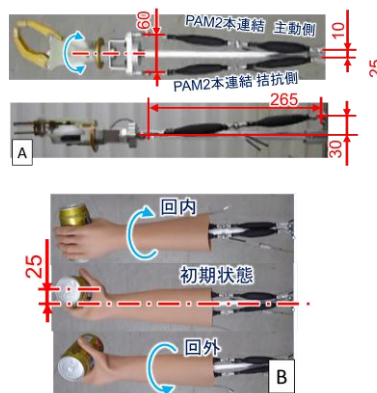


図 3. 回内回外動作機構 A)3 次元  
的 PAM 配置, B)回内/回外動作

また義手アームの要素技術開発として、前腕の回外筋・円回内筋の動きを参考にした PAM の 3 次元レイアウトによる回内回外動作機構を試作開発した。図 3 に示す。PAM による直線運動を回転運動に変換するには一般的には図 1 のようなプーリを用いた拮抗構造が必要だが、この 3 次元レイアウトではプーリを用いずに直線を回転運動に変換でき、関節部の軽量簡素化に寄与できる。図 3B のように 350 g の缶を把持したまま回内回外運動ができることを確認した。さらに PAM 拮抗構造と増速歯車列を組み合わせることで、通常トレードオフ関係にある出力トルクと可動域(角度)の関係性を向上できることを利用し、当該組合せを取り入れた関節駆動機構の評価実験用の装置を製作し、シミュレーション及び動作/衝突実験によりその評価を行った。歯車列を除いた機構に比べ、1)シミュレーションでは一般的にはトレードオフ関係にあたる可動域及び出力トルクを、ある数値以下の負荷トルク環境下において改善でき、2)動作実験においても同様の効果が見られ、3)衝撃実験でも衝撃力を緩和することを確認している。

#### (2) フィードバックデバイス開発

義手把持力(握力)に比例した力で健常腕側手首を締め付けるための腕時計バンドタイプのデバイスを試作した。図 4 に示す。これにより義手が使用者の手首を握るイメージができ、義手の対象物把持に合わせて同じようにバンド部により手首が握られれば義手の握力レベルを使用者に直感的にフィードバックが可能と考える。このバンド部は空気圧で駆動するエラストマ TPU (ThermoPlastic Copolyester)製のソフトアクチュエータである。圧縮空気およびエラストマによる固有粘弾・柔軟性が安全性向上に寄与でき、これはウェアラブルデバイスにおいて重要な性質である。このバンド部は 3D プリンティングにより一体型として造形した。これにより構造のシンプル化・軽量化につながる。基本的には、「握られる」イメージを連想させるためにバンド部の形状は示指(図右側)と拇指(図左側)を参考にデザインしている。また内部は空気室を連結させた構造で、外側は図 4 のように蛇腹形状になっており、空気圧をかけることでバンド全体がアコーディオンのように湾曲し、手首に巻き付く形状と成り得る。このような形状のソフトアクチュエータの開発例はあるが、フィードバック用ではなく、出力(本研究において握力に相当するもの)も人の握力に比べると非常に小さい。



図 4. フィードバック用  
デバイス

このデバイスを試作する際に可動域(手首への巻き付け角度、すなわち湾曲角度)と出力(手首への押圧力)を最大限発揮させるべく構造の最適化を試みた。デバイスの各部肉厚を蛇腹部 2 mm、底面部(手首に接する側)3 mm としてこれをベンチマークとし、探索的に肉厚を変えることで、動作実験において湾曲角度と押圧力を向上させる最適解(蛇腹部 1 mm、底面部 3 mm)を導出した。この際、実験では空圧 0.6MPa 時に出力及び湾曲角度がそれぞれ約 19 N、170° となった。十分な手首への巻き付け動作も確認できたが、出力は人の力に比べるとまだ小さいため、今後改良が必要と考える。

### (3) マルチモーダル入力装置

5 自由度肩義手のコントロールのために、図 5 のように筋電センサを大胸筋皮膚表面、加速度センサを左右の足指部(足首動作により加速度検出)、力センサを右足拇指(拇指でセンサを押圧)、機械スイッチ(スライダボリューム)を左足拇指(拇指でスライダを操作)に配置した。左足の加速度センサで肩関節 J1 と肘関節 J3 を操作するが、同時に操作するのではなく、筋電センサがスイッチとなり、この信号により左足加速度センサの操作対象を J1 又は J3 に切り替える。力センサにより J5 のハンド把持(開閉)、機械スイッチにより J4 の回内/回外動作を制御する。またオプションとして J4 制御を左足拇指機械スイッチの代わりに、頭部へ張り付けた加速度センサによる首動作のよる入力も設定した。

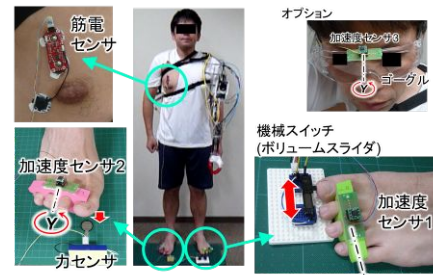


図 5 マルチモーダル型入力システム

### (4) 被験者実験

試作アーム及びマルチモーダル入力装置を駆使し ADL の再現実験を行った。図 6 のように健常者により立位にてペットボトルのドリンク動作を再現した。左腕が切断されたことを想定し左肩部にアームを装着した。ペットボトルまでアームを伸ばし(リーチング)、ハンドでボトルを掴んだ後に右手(健常側手腕を想定)で蓋を開け、口にボトルを近づけて水を飲むという一連の動作である。上記の胸部、両足先部に設置したマルチモーダル型センサを通じて当該各部位の動作により操作入力

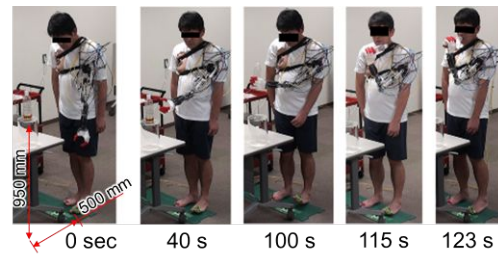


図 6 日常生活動作再現実験

(操縦)を行うことにより動作を再現できた。しかしながら、安全性を考慮し一つの動作を慎重に確認しながら行うために、各関節動作をゆっくりとした少ない移動量で行うようプログラムしたこともあり、動作完結までに 2 分以上要した。今後はよりスムーズに動作を行えるよう各センサの位置やモダリティの再考、制御アルゴリズムの改良が必要である。

さらにフィードバック用バンド型デバイスの握力識別率テストを行った。手首に装着したデバイスを作動させ入力空圧に対する締付レベルの識別率を確認した。テストではデバイスの押圧力最大約 15N を 3 段階(テスト 1)、5 段階(テスト 2)、7 段階(テスト 3)に分けレベルを設定し、その各テストにおいて、各段階のランダムレベルで 30 回被験者(健常者)の手首を握り、その際の正答率(握力レベルの識別率)を調査した。10 名の被験者に対して実施した。識別率はテスト 1 では 95%以上と高く、テスト 2 でも 70%以上であった。各段階とも最高レベルの力は同一で 2 kg 以下であり、成人の握力を考えれば実験において被験者に痛みを与えてしまう可能性は限りなく低く、実際のテストでも苦痛を訴える被験者はいなかった。この被験者テストは国立大学法人千葉大学における学内の研究倫理審査委員会からの承認を受け行った。

### < 引用文献 >

- L. Resnik, S. L. Klinger and K. Etter, The DEKA Arm: its features, functionality, and evolution during the Veterans Affairs Study to optimize the DEKA Arm, *Prosthetics and Orthotics International*, 38(6), 2014, 492-504.
- L. A. Miller, R. D. Lipschutz, K. A. Stubblefield, et al., Control of a Six Degree of Freedom Prosthetic Arm After Targeted Muscle Reinnervation Surgery, *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 89(11), 2008, 2057-2065.
- 岡本晋, 田村徹, 小池雅俊, 高橋功次, 片側前腕切断者における電動義手に対する意識調査, *国立身体障害者リハビリテーションセンター研究紀要*, 22, 2001, 55-61.
- 横山修, 高倉朋和, 伊藤良介, 石川義高, 高橋茂, 佐鹿博信. 肩義手に筋電義手を用いた 1 症例, *日本義肢装具学会誌*, 25(3), 2009, 156-159.
- J. Shintake, H. Sonar, E. Piskarev, J. Paik and D. Floreano, Soft Pneumatic Gelatin Actuator for Edible Robotics, *Proceeding of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2017, 6221-6226.

### 5 . 主な発表論文等

{ 雑誌論文 } (計 1 件)

Masashi Sekine, Ryohei Kokubun and Wenwei Yu, Investigating the Effect of a Mechanism Combined with a Speed-Increasing Gear and a Pneumatic Artificial Muscle, *Actuators*, Vol.7, 2018, pp.1-17, 10.3390/act7020022, 査読有

[学会発表](計9件)

関根雅, 川村和也, 俞文偉, 義手把持力フィードバック用空圧ソフトアクチュエータの肉厚と出力・可動域の関係性調査, 第16回千葉大学医工学シンポジウム, 2018

Masashi Sekine, Kazuya Kawamura and Wenwei Yu, Optimizing Body Thickness of Watchband-Type Soft Pneumatic Actuator for Feedback of Prosthesis Grasping Force, 4th International Symposium on Wearable Robotics(WeRob2018), 2018

Masashi Sekine, Yoshihiro Shimomura and Wenwei Yu, Multi-modal Operation Input System for Shoulder Prosthesis, 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'18), 2018

関根雅, 塩田耕己, 劉恩博, 川村和也, 俞文偉, 義手把持力フィードバックのためのウォッチバンド型柔軟アクチュエータの試作, ロボティクス・メカトロニクス講演会2018(ROBOMECH2018), 2018

関根雅, 肩義手用マルチモーダル操作入力及び把持力フィードバック装置構築の基礎検討, 第4回千葉大学技術職員交流研修会, 2018

Masashi Sekine, Kouki Shiota, Enbo Liu, Kazuya Kawamura and Wenwei Yu, Prototype wristband pneumatic device made from thermoplastic copolyester for feedback of prosthesis grasping force, Advanced Materials World Congress 2018(AMWC2018), 2018

関根雅, 塩田耕己, 劉恩博, 川村和也, 俞文偉, エラストマ3Dプリンティングによる力覚フィードバック用空圧駆動柔軟デバイスの試作, 第15回千葉大学医工学シンポジウム, 2017

Masashi Sekine, Kahori Kita, Hiroshi Kawahira and Wenwei Yu, Proposal of Device with Speed-Increasing Gear for Improving Trade-off Relationship in Pneumatic Artificial Muscle, The 2nd International Symposium on Wearable Robotics (WeRob2016), 2016

Masashi Sekine, Yoshihiro Shimomura, Kahori Kita, Tatsuo Igarashi and Wenwei Yu, Prototype of Mechanism for Prosthesis with Pneumatic Artificial Muscle in Imitation of Motion of Supinator and Pronator Muscle, 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC'16), 2016

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。