空気圧駆動ディスクブレーキ機構を用いた 肩部姿勢保持用パワーアシストロボットの開発

竹 村 洸*・佐々木 大 輔*
横 山 和 也**・菊 谷 功**

Development of Wearable Power Assist Robot for Shoulder Using Disk Brake Mechanism
Driven with Pneumatic Soft Actuator

Hiroshi TAKEMURA*, Daisuke SASAKI*,
Kazuya YOKOYAMA** and Isao KIKUTANI**

The purpose of this study is to develop a wearable power assist robot to decrease a shoulder burden in ship-building work. The developed device is constructed with exoskeleton, disk brake mechanism and pneumatic artificial rubber muscles, which drive disk brake mechanism. This exoskeleton is constructed with multi-link mechanism and rotational joint for shoulder flexion / extension. The constitution of exoskeleton is different from a human joint. Disk brake mechanism is installed on rotational joint of exoskeleton. Pneumatic artificial rubber muscles apply driving force for this brake mechanism. By driving brake mechanism, this device can apply shoulder flexion torque to human. In this paper, the structure and principle of this device are discussed, and then frictional torque model of proposed brake mechanism is described, and is verified experimentally. Finally, effectiveness of this device is verified experimentally.

Key Words: power assist, wearable robot, pneumatic actuator

1. はじめに

総務省の統計では平成 27 年度には 65 歳以上の人口は約 3,300 万人となり、総人口の 26% を占めている¹⁾。社会全体の高齢化は労働人口構成の高齢化も意味しており、こうした状況において、作業の負担を軽減し労働力の減少を補う支援装置の実現が求められている。

これは造船業の現場においても同様であり、特に近年では技能者の減少、技能者全体における 60 歳以上の割合の増加など、高齢化の影響が散見される²⁾。また、近年では造船業を所轄する国土交通省でも造船の現場に支援装置を導入する取り組みが積極的に行なわれている²⁾。

このような状況において、本研究では造船業の現場における溶接作業に着目する。溶接作業では作業者は金属製の溶接トーチを把持し、肩を大きく屈曲させた状態を長時間保つと

いった、身体に負担がかかりやすい環境で作業を行なう必要がある。このことから、溶接作業においては肩の屈曲保持を支援し、負担を軽減する支援装置の開発が必要である。

現在、多くの企業や大学で作業時の負担を軽減する装置が開発されており、CYBERDYNE 社によって開発された HAL (Hybrid Assistive Limb) や、INNOPHYS 社が開発したマッスルスーツなどがすでに実用化されている^{3), 4)}。これらの装置は外骨格型のパワーアシストロボットと呼ばれ、剛性の高いフレームを介して支援を行なうことで、高い支援力を発生させることが可能である。このような外骨格が装着者の動作を阻害しないためには、外骨格は人体と同じ位置に回転軸をもつ構造であることが望ましい。しかし、たとえば本研究で対象としている肩周辺は複雑な動作を行なうため、完全に人体と同構造の関節を設けることは容易ではない。筆者らも人体と同じ位置に回転軸を有する外骨格による上肢の動作支援を目的とした装置⁵⁾の開発を行なったが、強度並びに可動域を確保するために外骨格が大型化していた。

本研究では、肩の屈曲保持の支援が可能な装置の実現を目指す。開発する装置は、肩屈曲・伸展軸用の回転関節と多関節リンク機構を組み合わせた人体と関節構造の異なる外骨格（以降、異構造型外骨格）を使用する。この異構造型外骨格により、簡便ながら肩の各動作を阻害せず、肩幅などの体格の異

* 香川大学工学部 高松市林町 2217-20

** ナブテスコ（株）東京都千代田区平河町 2 丁目 7 番 9 号

* Faculty of Engineering, Kagawa University, 2217-20 Hayashi-cho, Takamatsu

** Nabtesco Corporation, 2-7-9 Hirakawa-cho, Chiyoda-ku, Tokyo

(Received March 23, 2017)

(Revised August 28, 2017)

なる人間に対しても調整することなく使用できる。また、肩の屈曲保持には空気圧ゴム人工筋により駆動するディスクブレーキ機構を用いる。ブレーキ機構を用いることで、非制動時における屈曲・伸展方向への動作の抵抗が少ない構造となった。また、装着者が任意の位置で姿勢を保持できるという特徴がある。

本稿では、開発した支援装置の構造と動作原理について述べる。つぎに、構築したディスクブレーキ解析モデルの妥当性と装置のトルク特性について述べる。最後に、積分筋電位を用い装置の支援効果を確認、装置の有用性について述べる。

2. 肩部支援装置の構造と原理

2.1 装置構成

開発した装置の外観を **Fig. 1** に示す。開発した装置はディスクブレーキ機構、McKibben 型空気圧ゴム人工筋、体幹・上腕装具から成る外骨格で構成されている。外骨格およびディスクブレーキ機構の詳細は次節以降で述べる。機構は装着者の肩部背面の外骨格に取り付けている。ブレーキロータは外骨格に取り付けられた平歯車、シャフト、ねじ歯車を介して肩屈曲・伸展用の回転軸と接続されている。屈曲・伸展回転軸は三節リンク機構を介して上腕装具と接続される。ブレーキロータは各種歯車を介して、装着者の肩の屈曲・伸展と連動して回転する。ブレーキキャリパは後述のように、ブレーキロータの同心円上を自由に回転可能であり、**Fig. 1(b)** に示すように 2 種類の McKibben 型空気圧ゴム人工筋 A, B を介して体幹装具と接続されている。McKibben 型空気圧ゴム人

Fig. 1 Power assist robot

工筋 A は、ブレーキの制動および制動後に肩関節に屈曲トルクを加える目的で使用しており、長さ 205 mm、外径 22 mm である。McKibben 型空気圧ゴム人工筋 B は、人工筋 A による制動を解除した後、初期状態に復元するために使用しており、長さ 105 mm、外径 8 mm のものを 2 本使用する。

装置の重量は体幹装具が 0.8 kg、ディスクブレーキを取り付けた L 字状リンクが 2.3 kg であり、片腕支援時の構成についての総重量は約 3.1 kg である。また、装置は全高 282 mm 全長 255 mm 全幅 600 mm (L 字リンク左右取り付け時) で、装着者の肩幅が極端に広い場合は肩幅のスライド機構を伸長させることで全幅 720 mm となる。

2.2 外骨格の詳細構造

本研究で開発する装置は肩の屈曲方向への姿勢保持に特化し、ほかの方向への動作に関しては、支援は行なわないものの装着者の動作を阻害しないことを目的としている。以上の目的を実現する外骨格として、**Fig. 2** のような外骨格を製作した。

製作した外骨格は、同図 (a) のようにナイロン樹脂、アルミ合金製の体幹装具を身体背面に装着する。この体幹装具には体幹に対して平行な回転軸を設けている。この回転軸に L 字状リンクを取り付ける。L 字状リンクの先端は肩側面に位置し、屈曲・伸展用の回転軸が設けられている。**Fig. 2(b)** のように、屈曲・伸展用の回転軸と上腕装具間は三節リンク機構を介して接続されている。

製作した外骨格の屈曲・伸展軸は初期状態において人体の回転軸と一致している。内転・外転、肩すくめ動作に関しては人体の関節と軸が一致する回転関節は設けず、複数のリンク機構によってこれらの動作を行なうことが可能な人体とは骨格構造の異なる異構造型外骨格と呼ぶことのできる構造となっている。

従来の外骨格の多くは人体と同じ位置に回転軸をもつ構造である^{6)~8)}。これを以降同構造型外骨格と呼ぶ。同構造型外骨格の場合、人体の関節軸とロボットの回転軸がずれると人体の動作と装置の関節の動作に差が生じ、滑らかに動かすことができない、装着部に偏った力が加わるなどの問題が生じる。これを防ぐためには装着者の体格に合わせて回転軸の位置を厳密に調節する必要がある。しかし、たとえば人間の肩について考えると、肩関節は屈曲・伸展、内転・外転、内旋・外旋のほかに、肩をすくめるなど複雑な動作を行なう多自由

Fig. 2 Structure of exoskeleton

度関節であり、すべての回転軸を厳密に一致させることは容易ではない。その結果、重要度の低いと考えられる自由度は省略するという方法も取られている⁹⁾。さらに、肩幅などの体格が異なる複数の装着者に対して使用する場合は、その都度厳密に調整する必要もある。

これまでに開発された異構造型外骨格としては、Lockheed Martin 社の FORTIS がある。腰部から延びる身体から独立したアームによって工具を把持する腕を支援する構造であるため、アームの構造を検討する際に同構造型の外骨格のように人体の関節の回転軸を考慮する必要がない。しかし、その場合人体と異なる作業領域をもつアームが身体に装着されることになるため、狭所での作業などではアームの作業領域を考慮しなくてはならない。それに対して Honda 社が開発している体重支持型歩行アシスト¹⁰⁾は、一部省略はあるものの同構造型のように人体関節と同じ機械要素を有している。装置は両脚間に配置される下肢同様のリンク構造であるが、股関節の屈曲・伸展、内転・外転動作に対応する 2 つの回転機構や膝の回転軸は人間の回転軸とずれて配置されている、体格差に対応するため身体より長いリンクを使用しているため厳密には異構造型に分類できる。しかし、人体同様の回転機構で実現しているため、作業領域を身体から大きく逸脱させないためには装置の各回転軸は関節近辺に身体の外側に張り出す形で配置する必要があり、人体の構造と極端に異なった形態をとることは難しい。

本装置の外骨格は、体重支持型歩行アシストのように関節の回転軸を考慮した専用の回転軸によって Fig. 3(a), (b) の

ように屈曲・伸展が可能な構造である。体幹装具-L 字状リンク、屈曲・伸展用回転軸-上腕装具間を接続する複数のリンク機構により、上腕装具は回転運動に加えて並進運動も可能な構造である。この構造によって Fig. 3(c), (d) のように内転、外転動作を実現できる。また、上腕装具の取り付け部分に着目すると肩すくめ動作は、体幹に対して上腕装具が上下方向に平行移動している動作とみなせる。前述のように上腕装具の並進運動が可能な構造の本外骨格は別途機構を用いることなく Fig. 3(e) のように肩すくめ動作に対応することが可能である。内外転や肩すくめ動作に関しては装着型でありながらも FORTIS 同様の身体と全く異なる構造のため、身体に装着されない状態では本装置の外骨格には動作に対応する回転軸は存在しない。人体に装着することで初めて内外転や肩すくめ動作に対応する人体の関節を中心とした回転運動やそれに伴う並進動作を行なう構造である。内外転や肩すくめ動作などの機構を明確に設けないことで、屈曲・伸展用のアクチュエータの配置自由度が向上し、背面に装着することによる装置の小型化を実現した。

装着者の体格差については、本機構では肩幅の個人差を上述の肩すくめ動作と同様に肩幅方向への腕の平行移動とみなし、極端に肩幅の異なる場合は調整することなく使用可能である。内旋・外旋に関しては、機構の簡略化のため回転関節を設けず、装具と上腕間の滑りによって代用している。

2.3 ディスクブレーキ機構の構造

筆者らは、肩部用の支援装置としてドラムブレーキを搭載したパワーアシストロボットをこれまでに開発した¹¹⁾。このドラムブレーキ機構を用いたパワーアシストロボットで支援が可能であることを確認している。しかし、ドラムブレーキ機構による制動は、部材の食い込みなどの複雑な要因が大きく関係しており、単純な摩擦モデルは適用困難であった。そのため、制動力の確保のためにブレーキドラムの肉厚増加を招いていた。そこで、今回は解析モデルの構築が容易であり、構築したモデルをもとにブレーキパッドの材質や配置で制動力を調整することが可能なディスクブレーキ機構に着目した。

ディスクブレーキ機構の外観を Fig. 4, 構造を Fig. 5 に示す。ディスクブレーキ機構はアルミ合金、ABS 樹脂製であり、ブレーキパッドには ABS 樹脂上にウレタンゴムを貼付したものを用いる。Fig. 5(a) のようにブレーキキャリパ上部には人工筋を取り付けるレバーが取り付けられており、内

Fig. 3 Movement of exoskeleton

Fig. 4 Disk brake mechanism

部にはブレーキアーム、スライダ、スライダに力を伝達するピンが配置されている。スライダの両端には勾配を設けており、スライダが押下されたときにローラにより Fig. 5(c) のようにアームを滑らかに閉じる構造としている。キャリパは、Fig. 5(a) のようにキャリパベースによってブレーキロータのシャフトに取り付けているが、人工筋を取り付けていない状態では拘束されることなく Fig. 5(d) のようにブレーキロータの同心円上を自由に回転する。

ブレーキアームの回転軸にはブレーキ非制動時にブレーキパッドとブレーキロータの接触を防ぐためにコイルばねを備える。また、レバーにも同様の目的で引っ張りバネを備えている。

2.4 装置の動作原理

非制動時には人工筋 A は無加圧状態である。人工筋 B は制動状態に依らず常に加圧状態である。人工筋 A が無加圧の状態ではブレーキロータは拘束されず、装着者は肩を自由に屈曲・伸展させることが可能である。この状態から、人工筋

A を加圧すると人工筋 A は収縮し、それに伴って人工筋 B の発生力と釣り合う位置までレバーを押し下げながらキャリパが回転する。レバーが押下されるため Fig. 6 のようにアームが閉じ、ブレーキパッドがブレーキロータに押し付けられた段階で制動力が発生する。

逆に、人工筋 A 内の圧縮空気を排気し、発生力が減少することで、人工筋 B の発生力によってブレーキキャリパが初期状態に復元するとともにブレーキアームおよびキャリパベースに取り付けたばねの復元力によりパッドがブレーキロータから離れ、制動状態が解除される。

ブレーキキャリパを体幹装具に固定せず、自由回転できる構造にすることで制動時においても人工筋 A の柔軟性により装置に柔軟性を付与できる。また、制動後に人工筋 A の発生力を増加させることで状態保持だけでなく必要に応じて屈曲方向へのトルクを人体に加えることも可能な構造となっている。

3. ディスクブレーキのモデル化と検証

3.1 ブレーキモデル

ブレーキ作動時におけるキャリパ内部のアーム、レバーを介した力の伝達についてモデル化を行なった。アームについて、各寸法とかかる力を図示した概略図を Fig. 7 に示す。アームの回転軸、ローラの回転軸、パッドの圧力中心、スライダとローラの接点をそれぞれ O_a 、A、B、C 点とし、図中に黒点で表わす。このときパッドにかかる圧力は均等、パッドの圧力中心はパッドのブレーキロータとの接触面の中心にあると仮定する。アームは本来ブレーキロータの両側に 2 つ配置されているが、形状と動作原理からその動きやかかる力はブレーキロータに対して対称である。そのためここでは単純化のために片面だけのモデルを用いる。また、スライダがローラを介して 2 つのアームを押す力は両側に均等に力が加わるものとし、片方のアームに加わる力を F_p とする。

ブレーキが作動し、ブレーキパッドがブレーキロータに接触すると、アームに加わる力とパッドを押し付ける力 F_n は次式で表わされる。

$$F_n = \frac{L \cos \theta_a}{l_{a1}} F_p \quad (1)$$

ここで、 l_{a1} はアームの回転中心からパッドの圧力中心までの距離、 L はアームの回転中心からローラとスライダの接点

Fig. 5 Structure of device

Fig. 6 Principle of device

Fig. 7 Arm model

までの距離, θ_a はアームの回転中心とローラとスライダの接点を結ぶ直線とアームの回転中心とローラの回転中心を結ぶ直線とのなす角を表わす。

ブレーキが起動し, キャリパ内でブレーキパッドがブレーキロータに接触している状態におけるレバーの簡略図を Fig. 8(a) に示す。モデルではレバーの回転中心, レバーの屈曲点, 人工筋による力の作用点, レバーとピンの接触点をそれぞれ O_1 , P, Q, R, S とし, 図中の黒点で示している。ブレーキ機構の動作が理想的な状態であれば, Fig. 8(a) のモデルで表わすことができる。しかし, 実際はブレーキレバーに加える力が増加するに従ってキャリパ内部の弾性変形が発生する。そこで, キャリパ内部の変形をばね定数 k のばね要素と仮定し, その弾性変形によるブレーキレバーの回転角度を Fig. 8(b) のように θ としてモデルを構築する。なお, ばね定数 k は別途実験的に求め, レバーが押下されることによる力の作用点 S の移動は微小として無視する。また, 人工筋の力の作用点 R とレバーの回転中心 O_1 , は線分 O_1P の垂線上にあるものとし, 人工筋は線分 QR の延長線上に配置する。Fig. 8(a), (b) のモデルより, 人工筋の発生力 F_m とアームに加わる力 F_p との関係はつぎの式で表わされる。

$$F_p = \frac{l_{11} \sin(\theta_l - \theta)}{2l_{12}} F_m \quad (\theta = \frac{F_p}{kl_{12}}) \quad (2)$$

以上の (1), (2) 式を用いて, ブレーキの作動時における機構に働く力の解析を行なう。

3.2 モデルの検証

(1), (2) 式より求めた解析モデルの妥当性を実験によって確認する。実験装置を Fig. 9 に示す。実験ではディスクブレーキ機構からキャリパ部分を取り外し, 台座 (日本電産シンボ (株) 社製 FGS-50H) に固定する。台座に備え付けられた直動ステージにフォースゲージ (日本電産シンボ (株) 社製 FGP-100) を固定し, フォースゲージを介してブレーキレバーに力を加え, そのときにアームに生じる力をロードセル (A&D 社製 LCCA21N500) で測定する。フォースゲージによって測定される力をレバーの押し下げ力 (人工筋の発生力に相当) F_m , ロードセルによって測定された力をパッドの押し付け力 F_n として (1), (2) 式の計算値と比較する。モデルと同じ条件で実験を行なうため, ロードセルは 2 本のアームが平行になるときに接触するように配置した。また, 実験では, レバーに 400 N までの押し下げ力を加えた後, 0 N まで

Fig. 8 Lever model

減少させる。

押し下げ力を変化させたときの, パッドの押し付け力の変化を Fig. 10 に示す。グラフ中の横軸が押し下げ力, 縦軸がパッド部の押し付け力, 黒点が計算値, 実線が実測値である。グラフの結果から, 摩擦に起因するヒステリシスが存在しているものの, 理論値は実測値にほど近い値をとっており, このモデルが妥当であることが確認できた。モデルの妥当性を確認できたことで, パッドの材質や設計値の細かな変更で制動トルクを調節することが可能となる。

4. 肩部支援装置の支援性能

4.1 肩の保持に必要な要求トルク

支援装置を用いて, 肩を屈曲した状態で保持するために必要なトルクを上腕, 前腕の重量と重心位置, 作業でもつ必要があるトーチの重量から計算する。溶接作業時の作業者を模式化した図を Fig. 11 に示す。溶接作業では手に溶接トーチを把持し, 肩と肘を屈曲方向に曲げた状態で作業を行なう。そのため, 作業モデルでは上腕と前腕の姿勢はそれぞれ体幹, 上腕に対して 90° 曲げた状態とする。人体の重量分布, 寸法^{12), 13)}より, 装着者の全体重を一般成人男性の平均体重より 65.8 kg とし, 溶接トーチの重量 m を 2 kg と仮定すると, 装置が肩を保持するために必要なトルク (以降自重トルク) は 16.7 Nm

Fig. 9 Experimental system

Fig. 10 Comparison with measured value

となる。

4.2 摩擦トルクの測定

装置が肩の支援を行なうには、腕の自重トルクと釣り合う力を人工筋が発生する。そのときにディスクブレーキ機構による摩擦トルクが自重トルクを下回ると、ブレーキパッドとブレーキロータに滑りが生じるため肩の姿勢保持ができない。人工筋への供給圧力を増加させることで摩擦トルクを単純に増加させることは可能である。しかし、人工筋の発生力の増加は、同時に腕を屈曲させる回転トルクの増加も招く。つまり、ディスクブレーキ機構の摩擦トルクは腕自重トルク以上とならなくてはならない。また、その摩擦トルクを、回転トルクが自重トルク以下となるような人工筋の発生力で実現しなくてはならない。

そこで、ディスクブレーキ機構が発生可能な最大静止摩擦トルクを測定する。実験装置を Fig. 12 に示す。実験ではブレーキ機構に、前述と同じ直動ステージに固定したフォースゲージ（日本電産シンポ（株）社製 FGP-20）を用いて一定の押し下げ力を加えた状態で固定する。シャフトに取り付けた樹脂棒に垂直な力を増加させていき、ブレーキロータとブレーキパッドの間に滑りが発生するときの樹脂棒に加わる力を測

Fig. 11 Schematic picture of work model

Fig. 12 Experimental system

定、トルクに換算し、これを最大静止摩擦トルクとする。樹脂棒に加える力はフォースゲージ（日本電産シンポ（株）社製 FGP-50）を用いる。また、重力の影響を考慮して実験ではブレーキロータが地面に対して水平になるように配置した。レバーに加える力は、50 N, 100 N とする。また、実験に使用したブレーキパッドの外観を Fig. 13 に示す。

両押し下げ力に対する摩擦トルクを Fig. 14 に示す。グラフの縦軸がトルク、横軸が押し下げ力である。図中摩擦トルクを黒点、押し下げ力から求めるキャリパの回転トルクを実線、自重トルクを破線で表わしている。

自重トルクと回転トルクを比較すると、約 120 N までは自重トルクが計算上の回転トルクより大きく、それ以降は回転トルクが自重トルクを上回る。つまり、キャリパに加える力が 120 N 以下の場合には人工筋の発生力によって肩が屈曲方向に動作しない。

実験結果より、押し下げ力が 100 N において、ディスクブレーキ機構は図中破線で示す自重トルク以上の摩擦トルクを発生している。よって腕の自重トルクと釣り合うための力を人工筋が発生したとき、ブレーキロータとブレーキパッドの間に滑りが発生することなく、ディスクブレーキ機構は肩の姿勢保持が可能であることがわかる。

また、本実験より、肩の保持に必要な人工筋の発生力は 100 N～120 N であることがわかった。2.1 節で述べた人工筋 A は予備実験に基づいて一連の肩の支援を行なうために必要な性能をもつ寸法のものを選定した。

4.3 装着実験

実際に装置装着、未装着の場合について、装置の基本性能となる屈曲動作への支援効果を評価する。装着実験は Fig. 15

Fig. 13 Overview of brake pad

Fig. 14 Characteristic of friction

Fig. 15 Measured point of EMG

Fig. 16 Shoulder angle measurement equipment

に示した肩の屈曲動作の主動筋である三角筋の前方部分を対象とする。肩の屈曲には三角筋が関係しており、その活動量の大小で被験者への負担を評価できると考えた。筋電位は筋電計（メディエリアサポート企業組合製 Medi-104MT）を用いて測定する。測定した筋電位から、その絶対値の移動平均である積分筋電位（iEMG）を求め、装着、未装着時の iEMG の比較を行なう。iEMG の移動平均の時間は 10s とした。実験は実際の溶接作業に倣い、トーチの代替として 2kg の錘を右手に把持した状態で行なう。腕を自然に体側におろした状態を 0° とし、実験開始後に腕を 90° まで屈曲させ、150s 間維持する。このとき、腕の角度を検出するために、装置を未装着の場合に Fig. 16 に示す体幹装具、ゴニオメータ（バイオメトリクス社製 SG-110）を取り付けた器具を用いる。また、装置装着時には装具が体幹に対して前後方向に傾くことを防ぐため固定した状態で、屈曲・伸展軸に取り付けたポテンシオメータ（ALPS 製 RDC506002A）を用いて、腕の角度を測定する。人工筋 A には 500kPa、人工筋 B には 250kPa の圧力を加える。人工筋 B は実験開始当初から加圧し、装着者の肩角度が 90° になった状態から 1s 後に人工筋 A を加圧し、支援を開始する。実験は同一の被験者（22 歳，177cm，95kg）に対し、装着、未装着の実験を 1 セットとして同日に 1 セット測定し、3 日間で 3 セット行なった。また、同日の測定においても十分な休憩をとり、筋肉を休ませた状態で実験を行なった。

測定した iEMG とそのときの腕の角度を Fig. 17 に示す。iEMG を示したグラフ、角度を表わしたグラフ共に装着時のデータを破線、未装着時のデータを実線で表わしている。グラフより、上腕の角度を約 90° に維持した状態で装着時には

Fig. 17 iEMG and angle of shoulder

未装着時に比べて iEMG 値が減少している。また、初回の実験で特に顕著だが、未装着時には iEMG の値は時間とともに緩やかに上昇しているのに対し、装着時は緩やかに下降していることがわかる。以上の実験結果から、本装置は肩の姿勢保持に対して負担軽減効果があることが確認された。

5. おわりに

本論文では、溶接作業における肩部の負担軽減を目的に開発した支援装置の構造、動作原理並びにディスクブレーキモデル、摩擦トルク特性および装着実験などの性能評価について述べた。

開発した装置は、人体と関節構造の異なる外骨格を用いることで、簡便な機構ながら肩周辺の複雑な動作を行なうことが可能であり、空気圧ゴム人工筋により駆動するディスクブレーキ機構は装着者が任意の位置で姿勢を保持するのに十分な摩擦トルクを発生可能であることが確認できた。また、装着実験の結果より肩の姿勢保持に対して負担軽減効果があることから本装置の有効性が確認された。

しかし、実際に装置を装着して作業を行なう場合には、ディスクブレーキ機構の大きさ、重量が装着者にとって負担となることが予想される。よって、機構の軽量化、小型化が今後の重要な課題である。また、内転・外転動作などを含む実際の作業に近い複合動作における性能評価も行なう。

参考文献

- 1) 総務省統計局：人口推計（2014）
- 2) 国土交通省：第 3 回造船業・海洋産業における人材確保・育成

方策に関する検討会参考資料 (2015)

- 3) 原, 山海: 3次元骨格系モデルによる腰部支援用 HAL の動作支援評価, 生体医工学, **50**-1, 111/116 (2012)
- 4) 佐藤, 横矢, 渡邊, 梅原, 中村, 小林: 腰補助用マッスルスーツ (R) のフィールドテスト (物流の作業現場への適用), 日本機械学会論文集 (C 編), **79**-806, 3525/3538 (2013)
- 5) 佐々木, 則次, 高岩: 空気圧人工筋を用いた上肢用ウェアラブル型マッスルスーツ訓練装置の開発, 計測自動制御学会論文集, **49**-1, 166/175 (2013)
- 6) 石井, 山本, 兵頭: 完全独立型パワーアシストスーツの開発 (機構の改良と実用可能性), 日本機械学会論文集 (C 編), **72**-715, 857/864 (2006)
- 7) M. Sato, E. Yagi and K. Sano: Power Assist Control Calculated by a Human Model and Joint Angles for Walking Motion Using Pneumatic Actuators, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **25**-6, 915/922 (2013)
- 8) C. Liu, C. Zhu, H. Liang, M. Yoshioka, Y. Murata and Y. Yu: Development of A Light Wearable Exoskeleton for Upper Extremity Augmentation, *Proc. IEEE International Conf. Mechatronics and Machine Vision in Practice*, 1/6 (2016)
- 9) J. Huang, X. Tu and J. He: Design and Evaluation of the RUPERT Wearable Upper Extremity Exoskeleton Robot for Clinical and In-Home Therapies, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, **46**-7, 926/935 (2016)
- 10) Y. Ikeuchi, J. Ashihara, Y. Hiki, H. Kudoh and T. Noda: Walking Assist Device with Bodyweight Support System, *Proc. 2009 IEEE/RSJ International Conf. Intelligent Robots and Systems*, 4073/4079 (2009)
- 11) 長山, 佐々木, 平田, 高岩: ドラムブレーキ機構と空気圧人工筋を用いた肩部姿勢保持用パワーアシストスーツの開発, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2014) 講演論文集, 1545/1547 (2014)
- 12) 小原, 上野, 内田, 八田: 計測値のデザイン 人体を測る, 日本出版サービス (1986)
- 13) 厚生労働省: 厚生統計要覧 (2011)

横 山 和 也

日本電子専門学校メカトロニクス科卒業。1994～2005年産業機器・自動車系の製品および製造過程のさまざまな施策プロデュース・設計・製作とものづくりに関するトータルな業務に従事。2014年よりアシストスーツ研究開発に参加, 現在に至る。

菊 谷 功

2000年神戸大学大学院博士課程修了。博士 (工学)。1988年日本エヤーブレーキ (株) (現ナブテスコ) 入社。現在技術本部事業企画部主席技師。アシスト機器の研究開発に従事。IEEE, 日本トライボロジー学会, 日本機械学会会員。

[著 者 紹 介]

竹 村 洸

2017年香川大学工学部知能機械システム工学科卒業, 同年同大学院工学研究科入学, 現在に至る。

佐々木 大 輔 (正会員)

2003年岡山大学大学院自然科学研究科博士後期課程中退。岡山大学助手, 助教を経て, 2015年香川大学工学部知能機械システム工学科講師, 2016年同准教授, 現在に至る。博士 (工学)。空気圧ソフトアクチュエータを用いたウェアラブルロボットの開発に関する研究に従事。IEEE, 日本機械学会, 日本ロボット学会, 日本フルードパワーシステム学会などの会員。