

# 上肢動作を補助する人工筋肉「マッスルスーツ」の開発

小林 宏

福祉や医療の分野で、物理的に人間の動作を支援する機器が提案されているが、これらの機器のほとんどは、現在のところ「介護者」用に開発され、金属フレームとモータを用いている。結果としてこれらは、コスト、安全性、総重量、出力、人間との親和性の面から実用的な利用には限界がある。一方、筆者らが開発しているマッスルスーツは、日常生活での使用を考え、金属をほとんど使用しないため軽量で脱着が容易であり、着用により原理的にはあらゆる動きが可能となり、筋力の補助や反力の発生ができる筋力補助装置である。要介護者、動きが困難な身体障害者、肉体労働者、リハビリテーションなどに適用でき、今後、不可欠な技術になると考えられる。

キーワード：マッスルスーツ、ウェアラブルロボット、McKibben 型人工筋肉、パワーアシスト、上肢動作

## 1. はじめに

産業用ロボットはこれまで、人間を肉体的苦役から解放し、産業のめざましい発展と豊かな生活をもたらした。一方、超高齢化社会を迎え、今後求められるロボットは、生身の人間を支えるロボットであり、情報提供や精神的なサポートに留まらず、人間の動作を物理的に支援することが必要であると考えられる。

このような背景のもと、筆者らは、人間の動作を物理的に支援することを目的に、マッスルスーツの開発を行ってきた<sup>1)~3)</sup>。これは、ウェアラブルロボット、つまり着るロボット、人間が装着するロボット、という新しいロボットの形態であり、日常生活で人間の動作を支援するための技術である。

マッスルスーツは、日常生活での使用を考え、金属をほとんど使用しないため軽量で脱着が容易である。また、着用により原理的にはあらゆる動きが可能となり、筋力の補助や反力の発生ができる。そのため、要介護者、動きが困難な身体障害者の筋力補助、肉体労働者の姿勢保持や筋力補助、リハビリテーションなどに適用できる。

ところで、マッスルスーツが人間の動作を補助する他のロボットと異なる点は、装具のように「装着」するのではなく「着用」することである。これにより、関節の厳密な位置合わせが不要となり、マッスルスーツ内部で人間が動けるため、おおよその大きさが合っていれば所望の動きが実現できる。したがって、通常

の装具のようなオーダーメイドの必要が無く、既製の服のように S, M, L サイズで対応が可能となり、汎用性が高い。また着用者は筒の中に入っているような状態で面で力を受けるため、局所的な負荷を受けないという利点もある。

本稿では、マッスルスーツの概念と開発の現状、今後の予定を紹介する。

## 2. マッスルスーツのコンセプトと構成

### (1) マッスルスーツのコンセプト

マッスルスーツは、アクチュエータとして安価、軽量で出力質量比が非常に大きい McKibben 型人工筋肉（後述）を用い、それを服に取付けた構造となっている。

図-1 に示すように、人工筋肉を加圧することで人工筋肉が収縮し、人工筋肉両端が引張られることで、着用者の対応部位が動くという仕組みになっている。

このように、着用により自らが動けるようになるた

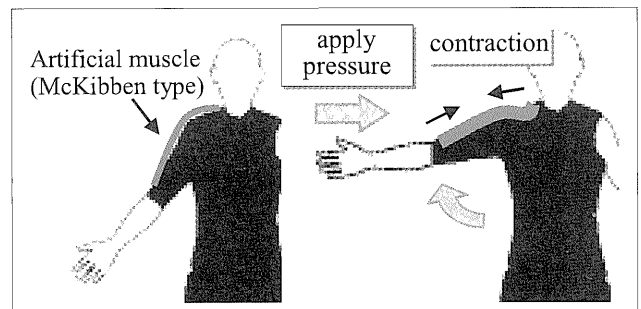


図-1 マッスルスーツの動作原理

め、例えば要介護者に適用した場合、要介護者が生きる活力を生み出すという精神的なサポートにもつながり、介護者の肉体的な負担も軽減されると考えられる。また、反力を発生することも可能であり、リハビリテーションにも利用できる。さらに、肉体労働者などの姿勢保持や筋力補助にも利用できる。マッスルスーツの特徴は、次のようにまとめることができる。

- ① 原理的には、着用によりあらゆる動作が可能となる筋力補助ウェアである。
- ② 軽量で柔軟性があり、大出力の McKibben 型人工筋と呼ばれる空気圧式アクチュエータを採用している。
- ③ 基本的に服にアクチュエータをとりつけるだけであり、軽量である。
- ④ 着用により、動きの不自由な高齢者や身体障害者が自らの意志で動けるようになるため、自立を促進する。
- ⑤ 動作に対する反力を発生させることにより、リハビリテーションにも流用できる。
- ⑥ 肉体労働者の筋力補助、姿勢保持に利用できる。

### (2) McKibben 型人工筋肉

図-2 に、McKibben 型人工筋肉の構造と動作メカニズムを示す<sup>4)</sup>。

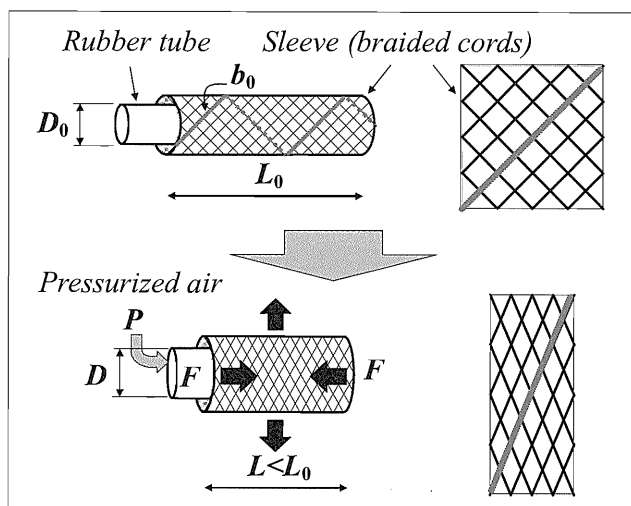


図-2 McKibben 型人工筋肉の構成と動作原理

ナイロン製の繊維コードを格子状に編んだスリーブでゴムチューブを覆い、スリーブの両端を固定する。チューブ内の圧力を上げるとチューブは半径方向に膨張し、このとき生じる円周方向の張力が繊維コードにより軸方向の強力な収縮力に変換される。

McKibben 型人工筋肉は、注入圧力、負荷、変位量の3つが制御パラメータとなり、ヒステリシスもあるため正確な位置や力制御には適していないと言える。

一方で、非常に大きな収縮力（例えば径 18 mm、長さ 400 mm、約 40 g の McKibben 型人工筋肉の場合、無負荷では 35% 程度の収縮率、20 kg の負荷でも 20% 以上の収縮率が得られる）と柔軟性は、人間を動かすためには利点であるといえる。つまり、空気のダンピング効果により、人間を「優しく」動かすことが可能となる。

### (3) システム構成

マッスルスーツの基本的なシステム構成を図-3 に示す。

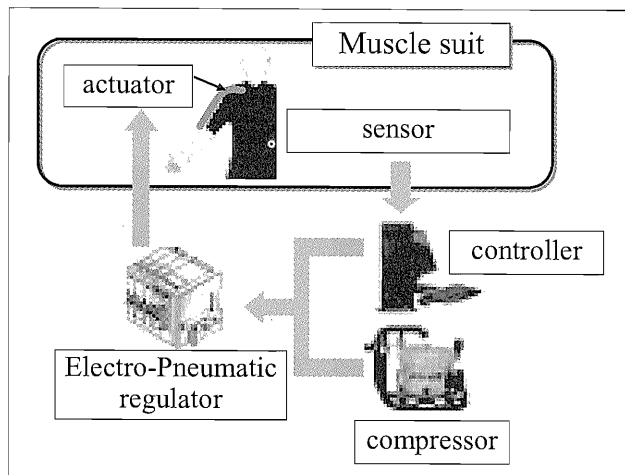


図-3 システム構成

図のように、マッスルスーツ、人工筋肉への空気圧を調整する電空レギュレータ、コンプレッサ、制御装置、センサからなる。センサとして、マッスルスーツにポテンショメータを埋込み、マッスルスーツの姿勢を計算している。

小型の実システムを図-4 に示す。総重量は 4,620

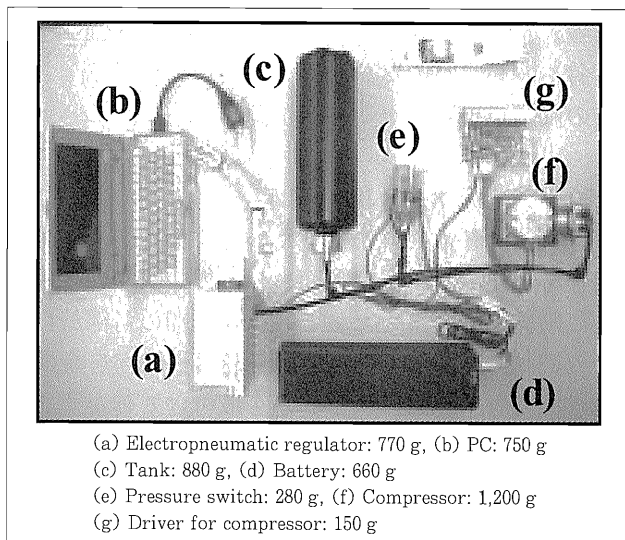


図-4 小型駆動システム

gであり、バッテリーだけで約1時間の連続稼働が可能である。この程度であれば、リュックザックなどに入れて持運びが可能であると思われる。PC、レギュレータ、コンプレッサは、さらなる小型、軽量化が可能である。

### 3. マッスルスーツの開発

#### (1) プロトタイプによる動作実験と問題点

人間サイズの人形を用いた動作実験(図-5)により、例えば外転(腕を横に上げる)は、鉛直下向きを0度とした場合、約40度程度しか実現できておらず、単純に服に人工筋肉を取付けて引張るというコンセプトでは十分な動作範囲が得られないことが分かった。

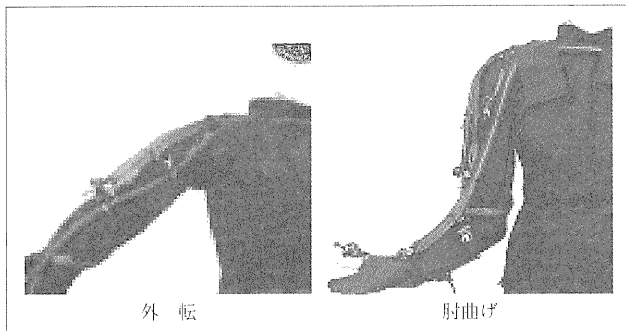


図-5 人間サイズの人形を使った動作例

これは服のずれやたるみが発生することが原因であり、また、人間の骨や関節を支柱として利用するためそれらに負担がかかり、それらの強度が衰えた高齢者や身体障害者は使用できないと考えられる。

このように単純構造のマッスルスーツでは、

- ① 服のずれやたるみによる可動範囲のロスがある。
  - ② 可動範囲に限界がある。
  - ③ 体への密着が必要であり、着心地、脱着が問題となる。
  - ④ 骨や関節に負担がかかる。
- などの問題点が明らかとなった。

#### (2) 鎧構造マッスルスーツ

これらの問題点を解決するため、すなわち、ずれや密着性の回避、及び骨や関節への負担の回避のため、新たに鎧構造を提案した。これは、人間の各部分に対応した筒状のABS樹脂できた非金属構造物を金属の関節で接続し、それに人工筋肉を取付けて動かすことで中に入っている人間を動かすというもので、動く鎧のようなものである。

図-6に手首と指を除き、上肢動作に最低限必要な6自由度を示し、図-7にそれを実現する鎧のような

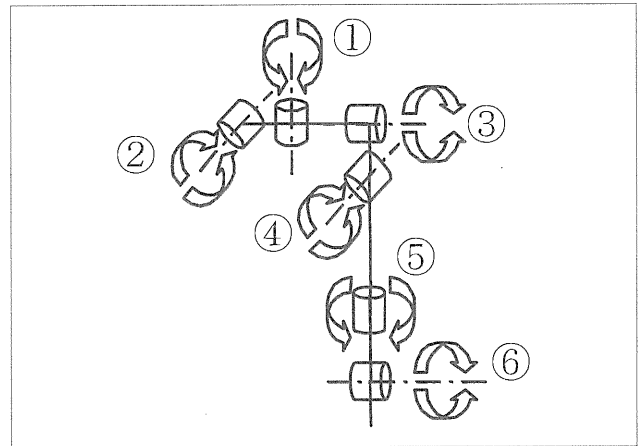


図-6 上肢動作に必要な自由度

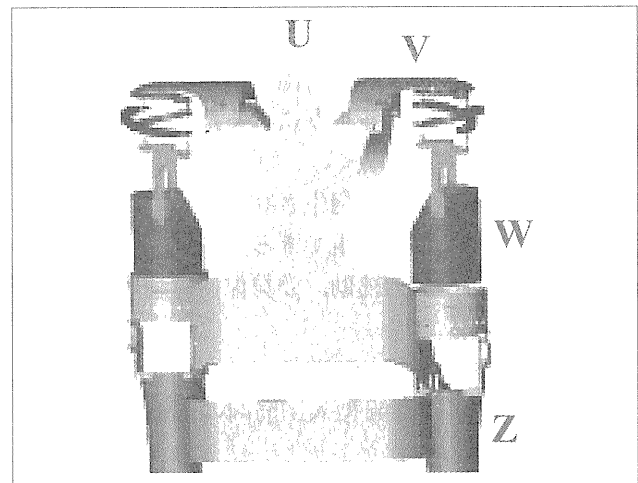


図-7 新マッスルスーツの構造

新構造マッスルスーツを示す。このマッスルスーツは約4.5kgであり、必ずしも軽いとは言えないが、着用できるレベルであると思われる。今後は炭素繊維強化プラスチック(carbon-fiber reinforced plastics; CFRP)などを用いて軽量化を模索する。なお、本報文中で示しているものは、身長170cm、体重60kg程度の平均的な成人男性用である。

#### (3) 各部の詳細

図-7に示す新構造マッスルスーツは、関節を除き基本的に塩化ビニール製であり、接続部、及び回転部のみ金属を使用している。それぞれの構造を順次説明する。

要素Uは厚さ3mmのジュラルミンでできている。これは試作が容易だったためであり、現在、RFPで制作中である。

図-8に示すように、前面が開くようになっている。これは、脱着を容易にするためである。また後頭部が盛りあがっているが、これは、アクチュエータ配置を容易にすると共に、腕を上へ引張り上げやすくするた

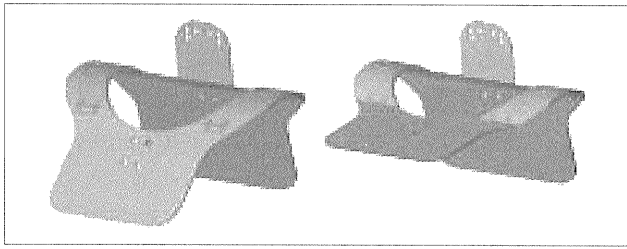


図-8 要素Uの構造とメカニズム

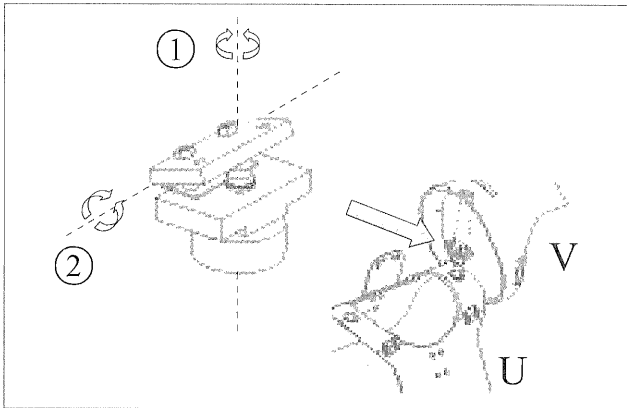


図-9 要素UとVの接続方法

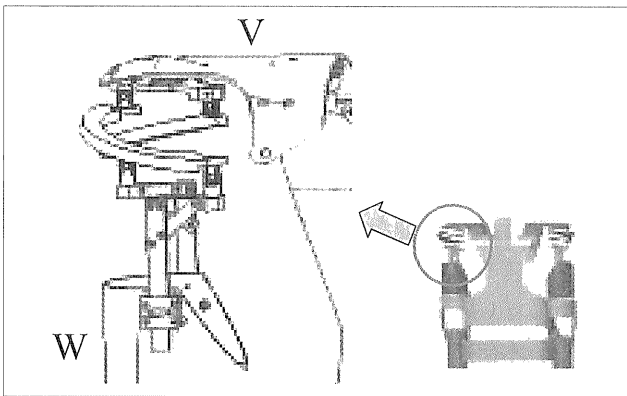


図-10 要素VとWの構造(疑似肩機構)

めの工夫である。

図-9に示すように、要素Uと要素Vは2自由度のコネクタにより接続し、回転1と2を実現する。ただし、回転1は鎖骨が30度程度前後するような役目をするだけであり、真横に挙げた腕を前方に回転させるようなことはできない。

そこで、図-10に示すような半円形のリンク両端にユニバーサルジョイントを設置し、それを2つ用いてVとWを接続する疑似肩機構により回転1, 3, 4を実現する。

図-11には、この機構の動作例を示す。半円形のリンク構造により、自在な動きが可能となる。

肘曲げを行う回転6は、図-12に示すように回転の1自由度を有する金属フレームを2つ用いて実現する。要素Zは、この金属フレームにより接続されて

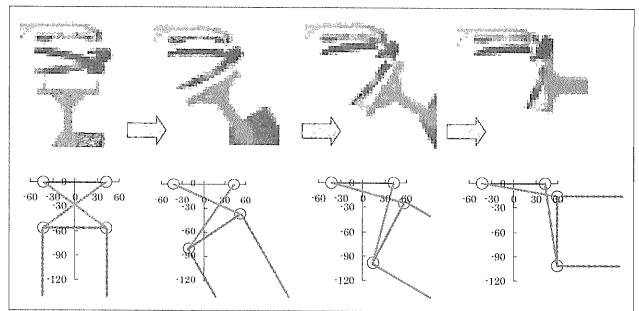


図-11 疑似肩機構の動作

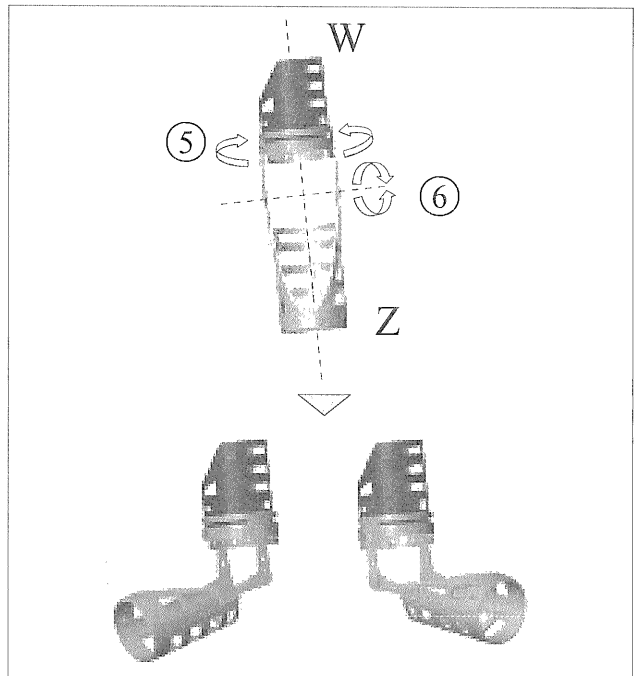


図-12 要素WとZの構造とメカニズム

いる2つの塩化ビニール要素からなる。回転5は、要素Wと要素Zの接続部分にニードルベアリングを用いて実現する。

(4) アクチュエータ配置

図-13にアクチュエータであるMcKibben型人工

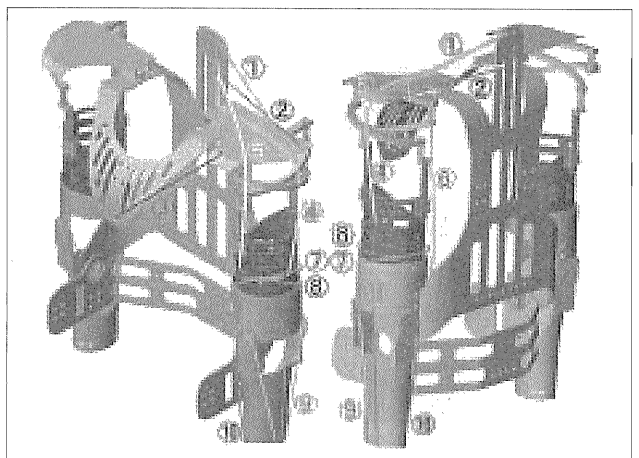


図-13 アクチュエータの配置

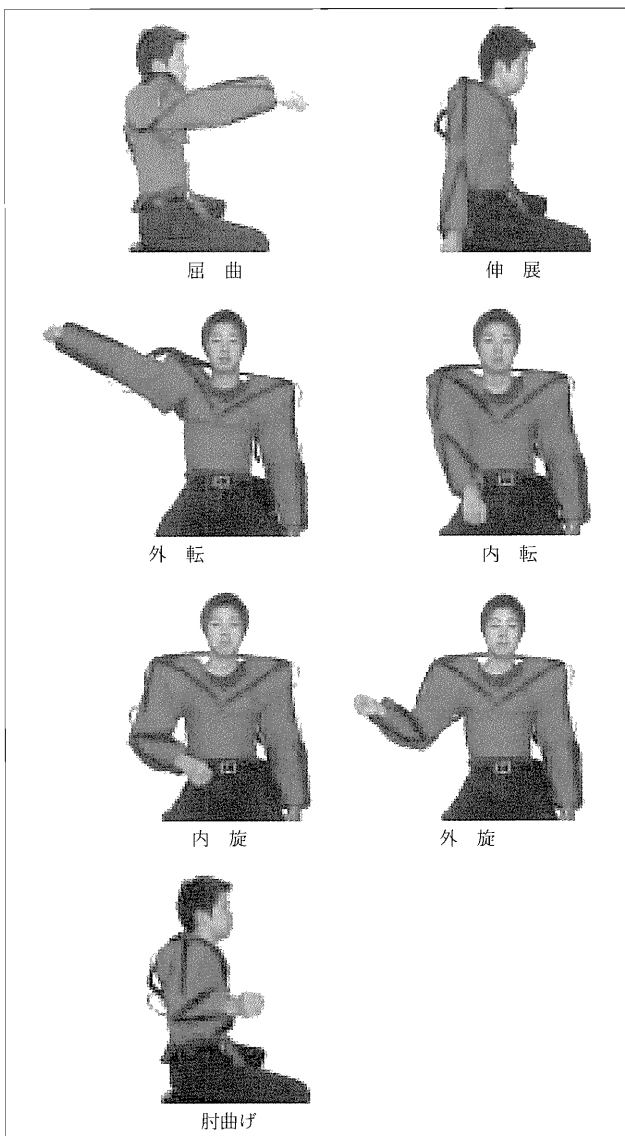
筋の配置を示す。図に示すように、片腕で11本を使用している。この配置は、試行錯誤により経験的に決定したものである。上肢の7動作を実現するために使用するアクチュエータ番号を表一に示す。

表一 各上肢動作実現に使用する人工筋

	動作	人工筋
肩 関 節	屈 曲	B, D, E
	伸 展	C, D, F
	外 転	A, B, C, D
	内 転	B, D, E
	内 旋	G
	外 旋	H
肘 関 節	肘 曲 げ	I, J

(5) 上肢7動作の実現

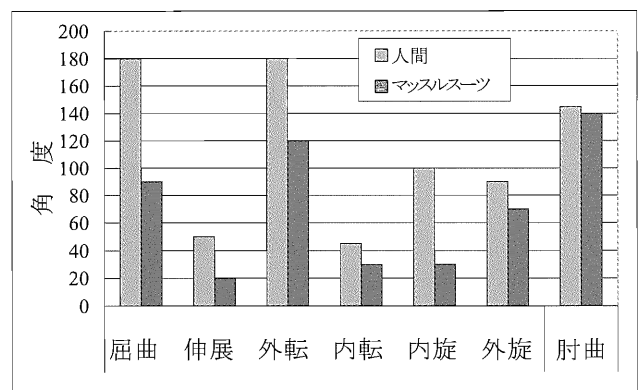
図一に、試作した新型マッスルスーツを実際に試着して実現した動作結果を示す。試着している被験



図一四 上肢全動作の実現

者は、身長 178 cm、体重 68 kg の男子学生である。体格にもよるが、165~180 cm 程度の男性であれば、着用し、動作を実現できた。適用範囲、サイズの問題は今後の課題とし、ここでは動作の実現についてのみ議論する。

図一五には、実現した動作範囲と人間の動作範囲を示す。肘関節の屈曲(肘曲げ)を除いて人間の動作範囲を満足していないことが分かる。一方、現在実現できた動作範囲により、外転、外旋、肘関節の屈曲により指先で頭部を上方より触ることができる。また、肩関節の屈曲、内旋、肘関節の屈曲により指先を口元まで運ぶこともできる。



図一五 実現した各動作の動作範囲

各関節の可動範囲がどこまで実現できれば良いかに関しては議論の余地があるものの、このようなことから、マッスルスーツの各関節の可動範囲は日常生活には支障のないものだと考えられる。

また、本研究では、上肢の全動作を実現することを目標にしていたため、上記のように人間の可動範囲を必ずしも満足できなかったが、同様の手法により、特定の部位に限れば人間の可動範囲を満たすことも可能であると考えられる。今後、使用状況に応じて検討してゆきたい。

6. ま と め

本稿では、着用により人間の動作を補助するマッスルスーツのコンセプトを説明し、これまでの開発により上肢の全7動作が実現できたことを示した。現在、着用者が思い通りにマッスルスーツをコントロールできるようにするためのインタフェース、及びその制御手法の開発を進めている。

また、具体的なタスクを定めて仕様を決め、できるだけ早く臨床応用に移行したいと考えている。現時点では、荷物の積降ろしなど、決まった作業範囲内にお

ける繰返し作業の補助をまず行う予定である。

J C M A

《参考文献》

- 1) H. Kobayashi, T. Matsushita, Y. Ishida and K. Kikuchi: New Robot Technology Concept Applicable to Human Physical Support—The Concept and Possibility of the Muscle Suit (Wearable Muscular Support Apparatus)—, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 14, No. 1, pp. 46-53 (2002).
- 2) H. Kobayash, A. Uchimura, Y. Ishida, T. Shiiba, K. Hiramatsu, M. Konami, T. Matsushita and Y. Sato: Development of Muscle Suit for Upper Body—Realization of Abduction Motion—, *Advanced*

*Robotics*, vol. 18, No. 5, pp. 497-513 (2004).

- 3) H. Kobayashi, Taichi Shiiban and Yujiro Ishida: Realization of All 7 Motions for the Upper Limb by a Muscle Suit, *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 16, No. 5, pp. 504-512 (2004).
- 4) C.P. Chou, B. Hannaford: Measurement and Modelling of McKibben Pneumatic Artificial Muscles, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, pp. 90-102, Feb. (1996).

【筆者紹介】

小林 宏 (こばやし ひろし)  
東京理科大学工学部機械工学科  
助教授  
工学博士

## 建設工事に伴う 騒音振動対策ハンドブック

「特定建設作業に伴って発生する騒音の規制に関する基準」(環境庁告示)が平成8年度に改正され、平成11年6月からは環境影響評価法が施工されている。環境騒音については、その評価手法に等価騒音レベルが採用されることになった等、騒音振動に関する法制度・基準が大幅に変更されている。さらに、建設機械の低騒音化・低振動化技術の進展も著しく、建設工事に伴う騒音振動等に関する周辺環境が大きく変わってきている。建設工事における環境の保全と、円滑な工事の施工が図られることを念頭に各界の専門家委員の方々により編纂し出版した。本書は環境問題に携わる建設技術者にとっては必携の書です。

■掲載内容：

- 総論 (建設工事と公害, 現行法令, 調査・予測と対策の基本, 現地調査)
- 各論 (土木, コンクリート工, シールド・推進工, 運搬工, 塗装工, 地盤処理工, 岩石掘削工, 鋼構造物工, 仮設工, 基礎工, 構造物とりこわし工, 定置機械 (空気圧縮機, 動発電機), 土留工, トンネル工)
- 付録 低騒音型・低振動型建設機械の指定に関する規程, 建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法, 建設機械の騒音及び振動の測定値の測定方法の解説, 環境騒音の表示・測定方法 (JIS Z 8731), 振動レベル測定方法 (JIS Z 8735)

■体 裁：B5判, 340頁, 表紙上製

■定 価：会 員 5,880円 (本体 5,600円) 送料 600円

非会員 6,300円 (本体 6,000円) 送料 600円

・「会員」本協会の本部, 支部全員及び官公庁, 学校等公的機関

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 (機械振興会館) Tel. 03(3433)1501 Fax. 03(3432)0289