

## MHアクチュエータを用いたコンプライアンス 可変型アームのヒトとの接触動作の評価

佐藤 満      清水俊治      井野 秀一      伊福部達  
泉 隆<sup>†</sup>      室 正彦<sup>††</sup>      脇坂裕一<sup>††</sup>

北海道大学電子科学研究所    †北海道東海大工学部    ††日本製鋼所室蘭研究所

我々は移乗介助用のロボットアームのアクチュエータとして水素吸蔵合金(MH)アクチュエータの利用を提案している。今回、2本のMHアクチュエータを相互に押し合うような形にした拮抗型MHアクチュエータを試作した。関節角度は2本のMHアクチュエータの内圧差にほぼ比例し、関節剛性は2本の内圧の和にほぼ比例し、それぞれ独立に変化させることができた。さらに、拮抗型MHアクチュエータを用いたコンプライアンス可変型ロボットアームを試作し、実際の介助作業を想定したヒトの身体との接触動作実験を行なった。アームのヒトの肘関節に相当する関節のコンプライアンスがほとんどない場合と高コンプライアンスの2つの状態で比較したところ、高コンプライアンスの方が接触力が小さく、ヒトと接触する場合のアームの関節コンプライアンスの重要性が示された。

## Evaluation of a Compliance Variable Robot Arm Using an MH Actuator at a Task of Human Body Contact

Mitsuru SATO, Shunji SHIMIZU, Shuichi INO, Tohru IFUKUBE,  
Takashi IZUMI<sup>†</sup>, Masahiko MURO<sup>††</sup> and Yuichi WAKISAKA<sup>††</sup>

Research Institute for Electronic Science, Hokkaido University

<sup>†</sup> School of Engineering, Hokkaido Tokai University

<sup>††</sup> Muroran Research Laboratory, Japan Steel Works, Ltd.

To realize compliant joint motion of a robot arm for a transfer aid of the disabled, an antagonistic metal hydride (AMH) actuator system was proposed. The joint stiffness of the AMH actuator was varied in proportion to the sum of internal pressure of both MH actuators. A robot arm using an AMH actuator having the variable compliance joint was developed. When the robot arm contacted to human body lying in supine posture, reaction force of body contact was measured. From the experimental results, it was supposed that in the case of high joint compliance reaction force from body was lower than in the case of low one (nearly 0 rad/(N·m)).

## 1. はじめに

高齢者人口の増加により、日常生活の基本的な動作にも介護を必要とする者の数が増大してゆることが予測されている。自立支援、介護支援の手段としてロボット技術の応用が期待される場所である。このようなロボットは本質的にヒトの生活環境でヒトと共存しなければならず、しかもヒトの身体と直接接触する必要がある。これらの条件は介助支援用ロボットの実現の上で大きな技術的課題となっている。これまでに寝たきりの者をベッドから抱き上げる目的のロボットがいくつか報告されているが<sup>1) 2)</sup>、いずれも広く普及するまでには至っていない。

このようなロボットの実現のために重要な点は高い安全性や操作性の良さ、機器自体の小型化など多くが挙げられる。その中でもヒトの身体との接点でいかに柔軟な動作を実現するかは最も重要な点である。産業用ロボットに見られるような高速性や高い精度は要求されないかわりに、ヒトの腕のように柔らかさと力強さを自由に調節できる特性が必要となる。

また、機械操作は必ずしも得意でない介護者や被介護者が機器を操ることになるため、誤操作の頻度も少なくないと考えられる。ヒトとアームとの不意な衝突といった事態の際の衝撃吸収まで考えると、すべての自由度の関節剛性を調節できるアームが望ましい。

このようなロボットアームのために我々は従来から開発してきた水素吸蔵合金 (MetalHydride : 以下MH) アクチュエータの利用を提案している。本報告ではまず、2本のMHアクチュエータを互いに拮抗するように配置した機構で関節の剛性 (コンプライアンス) を変化させることができることを示す。次にこの拮抗型MHアクチュエータを使用し、試作した関節コンプライアンス可変型ロボットアームを用いて実際の介護動作を想定したヒトの身体との接触動作を行い、関節のコンプライアンスの有無がヒトへ与える接触力をどう変化させるかを明らかにする。

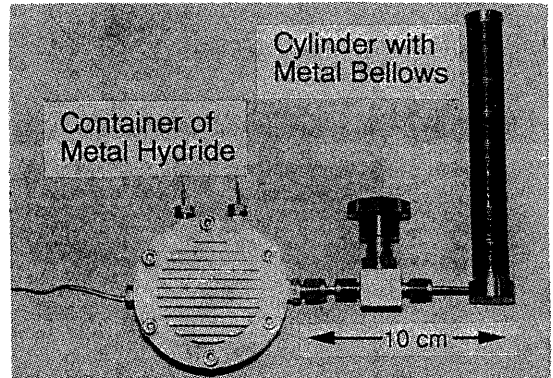


Fig. 1 Metal hydride (MH) actuator

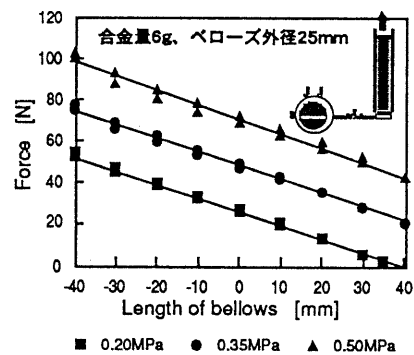


Fig. 2 Force-length characteristics of an MH actuator

## 2. MHアクチュエータの機構と静特性

MHは加熱すると水素を放出し、冷却すると水素を吸収する性質を持った合金である。これを加熱・冷却用のペルチエ素子と共にアルミ製の容器に密閉し、水素圧の変化を金属ベローズにて伸縮運動に変換することにより力を発生させる機構となっている。出力/重量比が大きいこと、コンプライアンスに富むことなどの利点を有する。MHアクチュエータの外形をFig. 1に示す。内部に封入したMHはCaNiMnAl合金であり、合金量が6g、ベローズは外径が25mm、ストロークが100mmのタイプのものである。

MHアクチュエータの出力は内圧とベローズの長さによって変化する。Fig. 1に示したMHアクチュエータの内圧を一定に制御したときの出力-ベローズ長特性をFig. 2に示す。出力とベローズ

長はほぼ線形の関係にあり、次式で近似される。

$$F = (aP + k_b)L + cP + d \quad (1)$$

ここで、 $F$ は出力、 $P$ は内圧、 $L$ はベローズのストロークの midpoint からの伸長量、 $a$ 、 $c$ 、 $d$ 、 $k_b$ は出力-ベローズ長特性より求まる定数であり、 $a+k_b$ がベローズ自体のバネ定数となる。

また、(1)式よりMHアクチュエータの剛性は

$$K = \frac{\partial F}{\partial L} = aP + k_b \quad (2)$$

と表される。(2)式よりMHアクチュエータは内圧によってバネ定数を可変にできるバネとみなせることがわかる。

### 3. 拮抗型MHアクチュエータの機構

MHアクチュエータはベローズの伸長方向に力を発生する機構となっているため、一軸の回転運動は2本のMHアクチュエータを拮抗型に配置することによって実現される。Fig. 3に試作した拮抗型MHアクチュエータの機構を示す。2つのアクチュエータの内圧を圧力センサからの信号でフィードバックし、それぞれ独立に圧力をPID制御する。

2つのアクチュエータの出力を $F_1$ 、 $F_2$ 、内圧を $P_1$ 、 $P_2$ 、アクチュエータ自体の剛性を $K_1$ 、 $K_2$ 、歯車の半径を $r$ 、角度を $\theta$ とすると軸回りのトルク $\tau$ は次式で示される。

$$\begin{aligned} \tau &= (F_1 - F_2)r \\ &= (K_1 + K_2)rL + c(P_1 - P_2)r \\ &= (K_1 + K_2)r^2\theta + c(P_1 - P_2)r \\ &= \{a(P_1 + P_2) + 2k_b\}r^2\theta \\ &\quad + c(P_1 - P_2)r \end{aligned} \quad (3)$$

また、(3)式で外部トルクが0であれば平衡点で $\tau=0$ であり、このときの関節角度は、

$$\theta = \frac{c(P_1 - P_2)}{a(P_1 + P_2)r + 2k_b r} \quad (4)$$

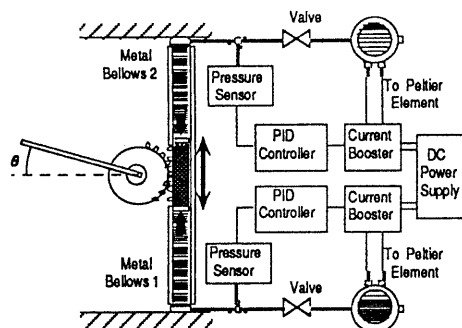


Fig. 3 Experimental setup of an antagonistic MH actuator system

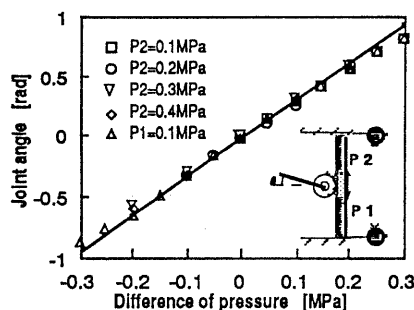


Fig. 4 Joint angle as a function of the difference of pressure of an antagonistic MH actuator system

と表される。ここで2本のMHアクチュエータの内圧とそのときの角度の実測値をFig. 4に示す。

(3)式のうち、 $a$ は $c$ 、 $k_b$ に比べ十分小さいため実測値は

$$\theta = \frac{c(P_1 - P_2)}{2k_b r} \quad (5)$$

という式で近似できる (Fig. 4の実線)。すなわち拮抗型MHアクチュエータの角度特性は2つのMHアクチュエータの内圧差にほぼ比例するといえ、角度制御性が良好であることがわかる。

### 4. コンプライアンス特性

一方、(3)式より軸回りの関節剛性 $K$ と関節コンプライアンス $C$ は

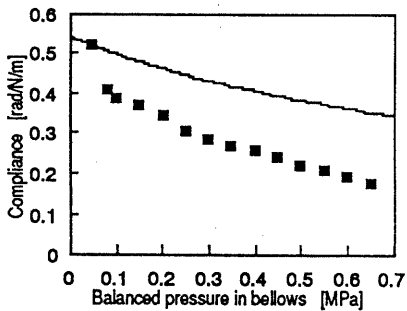


Fig. 5 Joint compliance as a function of Balanced pressure of an antagonistic MH actuator system

$$K = \frac{\partial \tau}{\partial \theta} = \{a(P_1 + P_2) + 2k_b\} r^2 \quad (6)$$

$$C = \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{1}{\{a(P_1 + P_2) + 2k_b\} r^2} \quad (7)$$

で表される。すなわち関節剛性は2つのMHアクチュエータの内圧の和に比例して変化する。

2つのMHアクチュエータの内圧が $P_1 = P_2$ となるように制御したときの関節コンプライアンスの特性の実測値をFig. 5に示す。内圧を $P_1 = P_2 = 0.05\text{MPa}$ から $0.65\text{MPa}$ まで変えることによりコンプライアンスの値を2.85倍程度変化させる

ことができる。なおFig. 5の曲線は(7)式で算出される値である。実測値と開きが認められるがこれはMHアクチュエータのベローズに座屈が生じ、ガイドの亚克力パイプとの間に摩擦が生じるためであると考えられる。

### 5. コンプライアンス可変型アームの試作

今回、拮抗型MHアクチュエータは介助支援用アームに応用することを目的としている。介助作業などあらゆる動作を行うヒトの腕はその状況に応じて各関節の粘弾性を巧みに調節している<sup>3)</sup>。介護作業のように腕をヒトの身体と接触させる場合は被介護者の身体に余計な力を与えないように関節のコンプライアンスを含む機械的特性を変化させている。ロボットアームがヒトの身体と接触する場合においても関節コンプライアンスを変化させることによって接触抵抗が変化することが予想される。

このようにロボットアームの関節コンプライアンスの有無が身体と接触する際、ヒトへ与える接触力をどう変化させるかを明らかにするために拮抗型MHアクチュエータを利用したコンプライアンス可変型ロボットアームを試作した。その機構をFig. 6に示す。

アームの概形はほぼヒトの上肢の形状・大きさ

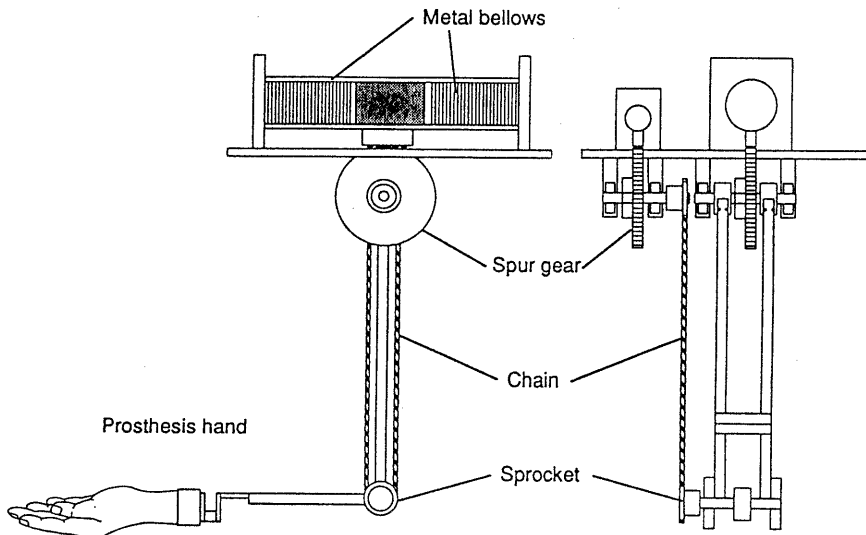


Fig. 6 Compliance variable robot arm using antagonistic MH actuators

に合わせるように設計した。拮抗型アクチュエータを2組使用し、ヒトの上肢の肩関節の屈曲-伸展、および肘関節の屈曲-伸展の2自由度の運動方向を駆動させた。肘関節の駆動用には前述したMH量6g、ペローズ外径25mmのタイプを、肩関節の駆動用にはMH量40g、ペローズ外径52mmの大型のMHアクチュエータを使用した。いずれの拮抗型MHアクチュエータともアームの外部に配置し、肘関節へはチェーンで回転を伝達する機構とした。また、肘関節駆動用の平歯車の軸には回転を完全に阻止するクランプを取り付け肘関節のコンプライアンスが0に近い状態を実現できるようにした。

ヒトの身体と接する手の部位には殻構造義手用部品である装飾用義手ハンドを利用した。この義手用パーツは塩化ビニール製で手首や指部には可動性はほとんどない。

## 6. ヒト身体との接触動作実験

上述したコンプライアンス可変型2自由度ロボットアームを使用して、実際の介護作業を想定したヒトの身体との接触動作実験を試みた。

### 6-1 実験方法

接触動作課題はベッド上で背臥位で寝ているヒトの下肢とベッドの間にアームのハンドを挿入するという動作とした。使用したベッドマットは病院の病棟用に用いられているものである。

Fig. 7に示すように、アームのハンドを挿入する部位は安静脱力した片側下肢の膝窩部とし、着衣は脱した素足で行った。ハンドは膝外側より挿入しハンドの先端が内側膝屈筋腱を越えるところまで挿入した。アームの肩関節のコンプライアンスは $0.03 \text{ rad/(Nm)}$ で一定とし、肘関節のコンプライアンスを $0.4 \text{ rad/(Nm)}$ の高コンプライアンスおよび肘関節駆動用の軸をクランプして、ほとんど $0 \text{ rad/(Nm)}$ に近い低コンプライアンスと2つの状態を設定し、一人につきそれぞれ3試行ずつ行った。身体との接触によって生じる力はアームのハンドの取り付け部の歪みゲージにより計測した。被検者は男性2名女性1名の3名で平均

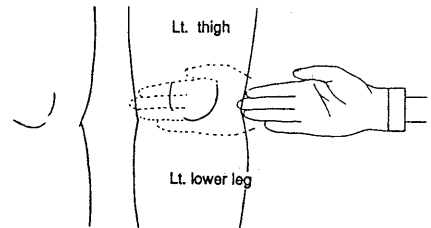
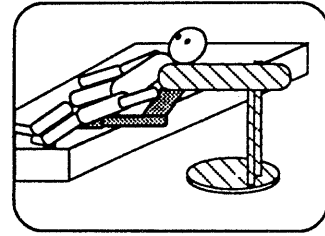


Fig. 7 Experimental condition of body contact task

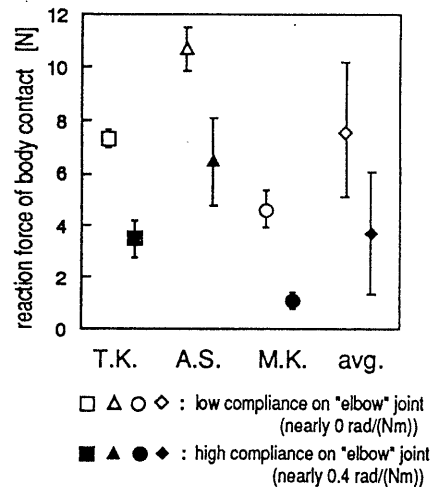


Fig. 8 Reaction force by body contact task of the robot arm in the cases of low and high compliance of the "elbow" joint

25.0歳である。

### 6-2 実験結果

肘関節のコンプライアンスが高い場合と低い場合でのアームのハンドと前腕の長軸方向にかかる接触抵抗力の大きさをFig. 8に示す。

各被検者ごとの接触力の全体的な大きさは差が

見られるものの、肘関節のコンプライアンスが高い状態とほとんどない状態の間では各被検者とも共通した差異が認められた。コンプライアンスの高い場合の方がコンプライアンスのほとんどない場合に比べ3.5~4.0Nほど接触力が小さかった。

ただし、被検者間の平均をとった値では同様な差が認められるものの、上述した理由により標準偏差は大きくなる傾向が顕著であった。

### 6-3 考察

ベッド上に臥床した身体の下にロボットアームを挿入するという作業課題は身体とベッドの間のもともとアームが入るだけのスペースがないところに、アームが能動的に挿入するのに必要な空間を作るということにはかならない。ハンド部に加わる力は身体とベッドを押しつけて空間を作る際の身体とベッドに加える力の反作用と考えることができる。今回計測したハンドに加わる前腕長軸方向の圧縮力はハンドが挿入される際、膝窩の皮膚およびベッドの表面に与えるせん断力を主に反映していると考えられる。

ある被検者からはこの皮膚が横に引っ張られるような感覚が実に不快であったとの内観報告を得た。しかし、肘関節を高コンプライアンスにしたときの試行ではコンプライアンスがない時に比べて明らかにこの感覚は少なかったとも報告している。このことから肘関節のコンプライアンスの大きい方が身体の接触している部位に与える力が少ないことがわかる。

また、今回は肩関節のコンプライアンスは一定であり、肘関節のコンプライアンスも2つの状態を比較したにすぎない。ヒトへ過剰な接触力を与えないための最適な肘関節のコンプライアンスの大きさ、あるいは肩と肘のコンプライアンスの組み合わせの最適な値の存在も予想され、その計測は今後の課題といえる。

ただし、今回の結果はコンプライアンスの違いの点では各被検者の傾向が同一であったが、全体的な数値の大きさは被検者ごとに差が見られた。

これは被検者の膝窩部の形状の違いや皮下脂肪などの軟部組織量の差による体表の機械的特性の違いに起因するものと考えられる。このことから、アームが接触する身体部位の粘弾性などの機械的特性の計測がロボットアームのヒトとの接触動作の評価のために重要な要素となることが示唆されたといえる。

### 7. おわりに

今回の結果により介護支援用ロボットなどヒトの身体と直接接触するロボットにおいて一般的な産業用ロボットのように関節剛性が非常に高いタイプは適しているとはいえず、コンプライアンスを可変にできるタイプが適していることが示唆された。

このことは少なくともヒトと親和性のあるロボットを指向する場合は動作の高速性や高精度を追求するロボットとは全く異なった側面から考えなくてはならないことを示唆している。この点を念頭に置いて、ヒトとロボットアームの接触、特にヒトの身体の特性和関連した研究を今後も継続する予定である。

なお、本研究は財団法人日本証券奨学財団の助成金を受けて行われた。ここに記して感謝する。

### 参考文献

- 1) 橋野賢：介助ロボット、日本ロボット学会誌 8 443/449 1990
- 2) 岡崎他：2本腕型看護介助ロボットの開発、第23回日本エム・イー学会大会論文集、pp350、1985
- 3) D.J.Bennett, et al: Time-varying stiffness of human elbow joint during cyclic voluntary movement, Exp Brain Res 88: 433-442, 1992