サイバニックマスタームによる生体電位可変インピーダンス制御型 マニピュレーションシステムの提案*

平松 宏介^{*1}, 山海 嘉之^{*1}

Proposal for Manipulation System with Cybernic Master Arm Based on BES Variable Impedance Control

Kousuke HIRAMATSU ^{*1} and Yoshiyuki SANKAI

^{*1} Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
1-1-1, Tennodai, Tsukuba, 305-8573, Japan

This paper proposes a master-slave manipulation system that can reflect the intention of movement of an operator directly. The system uses the nerve action potential signal, which is transmitted to whole body from brain through nerve system. This is a new type of master-slave manipulation system, which consists of Cybernic master arm and slave arm. The Cybernic master arm uses joint torque estimation method based on Bioelectrical Signal (BES). The BES is detected at the surface of the human skin when human is going to move a body. In order to reflect the intention of movement, the system is controlled by BES Variable Impedance Control method. The control method can voluntarily express robot arm impedance based on BES which is provided from the intuitive motion of the operator. By using this control method, it is possible to install the properties of human muscles and arms to robot arms, and to control like own arms. In addition, operator can sinuously and intuitively perform the manipulation that adapts motion without the displacement output. For verification, we test the movement of the master-slave arm system through operating experiment. Then, we confirmed that the proposed system could voluntarily control robot arm impedance by the intuitive motion of the operator. In conclusion, we developed the system that can reflect the intention of movement by BES Variable Impedance Control method.

Key Words : Robot Suit HAL, Master-Slave, Impedance Control, Man-Machine Interface, Tele-Robotics, Manipulator

1. 緒 言

極限環境下（放射線環境下，水中，宇宙空間，災害現場等）において，人間が直接現場で繊細な作業をすることは難しい．そこで人の代わりに現場で働くロボットアーム・ハンドが必要であるが，それには小さな物を繊細にマニピュレートできることが求められる．このようなマニピュレーションは，手や腕，また視覚，触覚といった感覚器官との協調が重要な役割を果たす複雑な作業である．そのため，これをロボットで実現させる場合，システムに人間を組み込み，マスタスレーブ型マニピュレーションシステムを用いることで実現できると考えられる．現在まで，マスタスレーブ型マニピュレーションシステムに関する研究は，ロボット工学やバーチャルリアリティの分野において様々な形態で行われている．その代表的な例として，マスタ側のオペレータの技能的な操作をスレーブ側のロボットアームといった機械に伝達し，あたかもオペレータが遠隔地にいるような高度な臨場感をもってスレーブシステムを操作するレイグジスタンスに関する研究が挙げられる^{(1)~(4)}．このマスタスレーブ型マニピュレーションシステムは，オペレータが自分の腕と同じように思い通りにスレーブアームを動かせることが理想である．特に，原子力発電所の解体現場や作業現場においてマスタ側の柔軟かつ巧みな操作をスレーブ側

* 原稿受付 2011 年 9 月 8 日

^{*1} 正員，筑波大学 システム情報工学研究科（〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1）
E-mail: hiramatsu@golem.kz.tsukuba.ac.jp

にシームレスに反映し高度な作業を行えるマスタスレーブシステムが望まれている。このような高度な作業において柔軟で巧みな操作を行うためには、スレーブアームの手先を硬く・柔らかくするというようなインピーダンス特性を随意に調節できることや操作対象が未知の物体であっても臨機応変に対応できるということが必要となる。しかし、従来のシステムではスレーブアームのインピーダンスをオペレータが随意に操作することは難しく、巧みな操作が要求される高度な作業を行うことは難しい。これはマスタアームが人間の筋肉の特性を考慮せず、腕の変位情報から力または変位そのものを用いて操作するシステムであるところに原因が存在すると考えられる。人間の運動意思は神経を伝わり、筋を収縮させ、関節トルクを発生させた後、腕の変位となる。さらに人間の腕は体調や環境、筋肉の特性によって動的にインピーダンスが変化している。したがって、従来のシステムではマスタアームに人間の運動意思が伝わるまでに時間のずれが発生するだけでなく、人間の筋肉の特性を反映することができないために、変位として出力されない硬直動作やふんばる動作には適応できないという大きな問題も存在する。そのため腕の変位だけを利用するのではなく、人間の腕・筋肉の特性もロボットアームに反映することができれば、人間の腕と同じような動的性能をリアルタイムにロボットアームに持たせることが可能となり、自分の腕のような操作性を得ることができるようになると考えられる。加えて、人間のしなやかで巧みな操作だけでなく認知・予測能力を最大限利用することが可能となり、未知の場所での活動や物体の操作においてもアドバンテージが得られると予想される。

本研究では、ロボットアームに人間の腕・筋肉の特性をリアルタイムに反映し、自分の腕のようにマニピュレーション可能なシステムを構築するために、脳から運動ニューロンを介して伝達される微弱な生体電位信号(BES: Bioelectrical Signal)に着目する。この生体電位信号は身体を動かそうとする際に検出され、運動中だけでなく実際に動作が体の変位として現れない時点・場合であっても人間の関節トルクや関節剛性などのインピーダンスといった腕の内部状態を推定することが可能であると考えられる。そこで、生体電位信号による関節トルク推定法⁵⁾を組み込んだマスタアーム(サイバニックマスタアーム)を開発し、作業性を高めるために自由度が違う場合でも使用可能なマスタスレーブ型マニピュレーションシステムの構築を行う。さらに、生体電位情報に着目した随意制御可能な生体電位可変インピーダンス制御アルゴリズムを開発すると共に実システムに実装して動作実験を行い、インピーダンスの随意制御を確認する。

2. マニピュレーションシステムの構成

本研究におけるマスタスレーブ型マニピュレーションシステムは、オペレータが装着、操作を行うサイバニックマスタアームシステム、および実際に作業を行うスレーブアームシステムから構成されている。システムの概念図を図1に、システム構成を図2に示す。これらのマスタアーム、スレーブアームは双方向に通信を行い、オペレータのマスタアーム操作がスレーブアームの動作に反映されるようになっている。サイバニックマスタアームシステムと接続して使用するスレーブアームシステムは、ロボットアームの種類、自由度がマスタアームシステムと異なる場合であっても、通信データ形式、プロトコルに順守することによりペアリングが可能となっている。すなわち、作業内容や目的に応じてスレーブアームを選択できるシステムとなっている。本章においてマスタアームシステムおよびスレーブアームシステムについて述べる。

Fig. 1 Concept of master-slave manipulation system

Fig. 2 Manipulation system configurations

2・1 マスタアームシステム

2・1・1 システム概要

サイバニックマスタアームシステムに求められる主な仕様は以下の通りである。

- ・オペレータの運動を妨げることなく動作が可能な構造とする。
- ・オペレータの運動をアシストし、かつ力覚フィードバックが可能なように駆動力を発生させることができる。
- ・オペレータの運動意思を可能な限り読み取り、その意思に基づいた制御が可能であること。
- ・マスタアームとして動作可能なように、外部システムとの通信機能を有すること。

以上の点に着目し、サイバニックマスタアームは当研究室で開発を行っている上半身型ロボットスーツ HAL (Hybrid Assistive Limb) ^{(6)~(10)} の技術を基に構築した。オペレータが装着した状態でのサイバニックマスタアームの概観を図3に示す。

2・1・2 骨格系

人間の上腕には肩関節と肘関節がある。肩関節の運動は、解剖学的には、外転・内転、屈曲・伸展、水平外転・水平内転、外旋・内旋(回旋)の4つに分類されている。肩関節の外転・内転と屈曲・伸展は機構学においては同じ動作として扱われるため3自由度と考えることができる⁽¹¹⁾。また、肘関節は屈曲・伸展、回内・回外の2自由度を持つ。肘の回内・回外に関しては、手先の姿勢に関する自由度である。本研究では、手先位置において力覚フィードバックおよびオペレータへのアシストを実現するために必要となる、肩関節2自由度、肘関節1自由度を持つサイバニックマスタアームとする。図4にサイバニックマスタアームの関節構成を示す。このサイバニックマスタアームの各関節には力覚フィードバックおよびアシストトルクを発生可能なドライバー体型小型パワーユニット(型番 CD-PWUD-05-40N58, CYBERDYNE 社)が取り付けられている。なおパワーユニットには回転トルクを発生するモータを用いている。サイバニックアームは人間が装着するものであるため、外骨格構造とし、オペレータの体格の差によって装着性が悪化しないように、各部に調節機構を設けた。外骨格構造を用いることで、オペレータの運動性を可能な限り確保し、かつ力覚フィードバックやアシストといった動作の両立を実現することが可能となった。また、力覚フィードバックはハードウェアおよびソフトウェアの両面からオペレータに危険が及ばないように安全対策を施している。

2・1・3 計測制御系

制御系は、ホストコントローラおよび、通信・計測用マイコン、各種センサ(関節角度センサ、生体電位センサ、データグローブ)、パワーユニット、バッテリーで構成される。ホストコントローラへは、外部のパソコンからTCP/IPを用いて操作が可能となっている。生体電位信号計測部位を図5に示す。また、生体電位信号は当研究室で開発した計測ユニットおよび手法⁽¹²⁾を用いて計測している。センサによって計測された情報は、通信・計測用マイコンのA/Dコンバータによってデジタル化され、ホストコントローラへ送られる。ホストコントローラは、送られた情報を基にパワーユニットの出力を決定し、マイコンへ指令を送る。マイコンは指令された値をもとにパワーユニット制御用の信号を生成し、パワーユニットを駆動させる。また、計測データやその他の制御データはTCP/IPを用いて外部パソコンへ送られ、リアルタイムでモニタリングが可能となっている。また、マスタスレ

Fig. 3 System overview of Cybernic master arm

Fig. 4 Cybernic master arm configurations

Fig. 5 BES sensing position

Fig. 6 Master arm system configurations

ーブシステムとして動作できるように TCP/IP を用いて各種データの通信が可能となっている。計測制御系におけるサイバニックマスタアームシステムの構成を図 6 に示す。

2・2 スレーブアームシステム

2・2・1 システム概要

スレーブアームシステムに求められる主な仕様は以下の通りである。

- ・様々な環境下で実際に作業を行えるように、目的に応じて多様な自由度、構成のロボットアームが選択できること。
- ・マスタアームなどの外部システムとの通信機能を有すること。

以上の点に着目し、スレーブアームシステムの開発を行った。マスタアームおよびスレーブアームを相似系にするのではなく、異なった系においても動作可能なシステムを開発することにより、マスタアームの自由度以上または以下の関節を備えたスレーブロボットアームを使用することができる。すなわち、マスタスレーブ動作させる場合においても高い汎用性を備えたシステムにできると考えられる。

2・2・2 スレーブ用 7 軸ロボットアーム

本研究では図 7 に示す 7 軸ロボットアームをスレーブアームとして用いる。このロボットアームには、8 個のアクチュエータが取り付けられており、そのうち 3 つが旋回、4 つが屈曲伸展、最後の一つは先端に取り付けられている把持動作用グリッパの開閉動作を行っている。センサ系として各関節に関節角度センサを装備しており、各関節角度、角速度および角加速度を取得できるようになっている。また手先に 6 軸力覚センサを取り付け、手先に加わる並進および回転力を検出できるようにしている。制御系は、アーム本体に繋がるドライバコントロールボックスおよびホストコントローラから構成されている。また、マスタスレーブシステムとして動作できるように TCP/IP を用いて各種データの通信が可能となっている。スレーブアームシステムの構成を図 8 に示す。

Fig. 7 System overview of 7-Axis slave robot arm

Fig. 8 Slave arm system configurations

3. 制御手法

3・1 マスタスレーブ間の通信

マスタスレーブ型マニピュレーションシステムにおいては、マスタアームシステムおよびスレーブアームシステムの連係動作が重要である。そこで、マスタアームシステムおよびスレーブアームシステムの両システム間における通信方式および通信データの内容について以下に示す。

3・1・1 通信方式

マスタスレーブシステムのネットワーク化において使用するプロトコルは TCP/IP とする。TCP/IP には TCP (Transmission Control Protocol) と UDP (User Datagram Protocol) の 2 種類のトランスポートプロトコルがある。TCP はコネクション型のプロトコルで通常通信するホスト間で信頼性の高い通信を行うために使用する。TCP を用いた通信ではパケットごとに送信、応答確認が行われるため、送信パケット、応答確認パケット、または両方の消失により通信が一時停止していることがある。特に値が大きなデータは再送手続きが何度も行われていることもあり、この間はデータが届かず制御は停止する。データ転送サイクルはネットワーク上でパケットが往復する時間が限界となる。一方、UDP はコネクションレス型のプロトコルで、データが相手に届いたかは確認しない。送信側はただデータを送り出し、受信側は届いたデータだけを拾う。パケットの損失やデータの順序に関しては何の保証もしない代わりに、応答確認を行わないため、ネットワーク上での転送時間に制限されないという特徴がある。TCP を用いた通信と比較した場合、転送停止時間も小さく、また通常時のデータ受信時間も短いため⁽¹³⁾、本研究では通信に UDP を採用する。

3・1・2 通信データ

マスタスレーブ型のマニピュレーションシステムにおいて、マスタアームシステムとスレーブアームシステムとの間で双方向のデータ通信が必要となる。そこで、サイバニックマスタスレーブシステムおよびスレーブアームシステムの両者間における送受信データについて以下のようにする。

(1) 各関節角度データではなく手先位置座標データを用いる。作業に応じてスレーブアームを自由に選択できる汎用性を持たせるため、マスタアームと同じタイプ、同じ自由度のアーム以外に、他自由度のスレーブアームを選択できるようにする。マスタアームとスレーブアームが相似形であれば、各関節において 1 対 1 対応できるため、関節角度データによる通信で問題はない。ところが、異なるタイプ、異なる自由度のスレーブアームを使用する場合には各関節の対応付けにおいて問題が発生する。そこで、その問題を解決するために、関節角度データではなく、手先位置座標データを用いて制御を行うこととした。これによりスレーブアームの自由度が変わった場合であっても通信データにおける問題は起こらず、高い汎用性を持たせることができる。

(2) 絶対座標におけるデータではなく手先位置移動量ベースのデータとする。マスタアームからスレーブアームへ送信するデータは絶対座標値データではなく手先位置の移動量を送信データとして用いることで、万が一データの欠損、エラーが含まれ、受信側におけるエラー処理が出来なかった場合であっても、大きな移動量とはならないため、スレーブロボットの暴走を防ぐことが可能である。また、マスタアームおよびスレーブアームの移動量対応関係の比を、1:1ではなく1:2や2:1といったようにリアルタイムに変化させることが容易となる。これにより、細かな作業を行う場合であっても操作性を確保できる。

以上の2点に着目して通信データ配列を決定した。以下にそのデータ配列を示す。

{シンクロ用データ; X 移動量; Y 移動量; Z 移動量; X 回転量; Y 回転量; Z 回転量; グリッパ開閉データ; i インピーダンスデータ; エラーチェック検算用データ}

3・2 生体電位可変インピーダンス制御手法

人間の腕は体調や環境、さらに筋肉の筋張力によって動的にインピーダンスが変化している。したがって、ロボットアームを自分の腕のように動かすためには、ロボットアームのインピーダンスを動的に変化させる必要があると考えられる。そこで本研究におけるマスタスレーブシステムに実装する制御手法として、生体電位可変イ

ンピーダンス制御を新たに開発した．生体電位可変インピーダンス制御とは，オペレータの直感動作が随意的にロボットのインピーダンスとして表現できる新しい制御手法のことである．この制御手法を取り入れることで変位出力がない関節剛性を高めるといった動作の制御も可能となり，より直感的でしなやかな動作が行えるようになる．さらに，ロボットのインピーダンス調整をオペレータ自身が直接的に意識，かつ特別な操作を必要とすることなく行えるため，ロボットとオペレータをよりシームレスに接続することが可能になる．これにより，オペレータ，人間自身の予測能力や認識能力による物体認知といった知的処理をオペレータ自身に行わせることができるため，撃力に対する対応や物体接触前での予測対応といった様々な動作を実現できるようになる．以下に生体電位可変インピーダンス制御の手法について述べる．

生体電位可変インピーダンス制御ではオペレータの生体電位情報に着目して，ロボットアームの特性を随意に制御できるようにアーム剛性の仮想インピーダンスの算出を行う．はじめに，インピーダンス制御における手先位置での方程式は以下の式で表現できる．

$$P_n = \frac{F_{n-1} + \frac{M}{\Delta t^2}(2P_{n-1} - P_{n-2}) + D\frac{P_{n-1}}{\Delta t} + KP_0}{\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{D}{\Delta t} + K} \quad (1)$$

なお F は外力， M は慣性項， D は粘性項， K は剛性項といったインピーダンスとする．また P は位置， Δt はサンプリングタイムを表す．次に生体情報に基づいた剛性項に変更した生体電位可変インピーダンス制御式を以下に示す．

$$P_n = \frac{F_{n-1} + \frac{M}{\Delta t^2}(2P_{n-1} - P_{n-2}) + D\frac{P_{n-1}}{\Delta t} + K_{BES}P_0}{\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{D}{\Delta t} + K_{BES}} \quad (2)$$

ここで F_{BES} を生体可変剛性マトリクスと定義する．オペレータ自身の腕およびサイバニックマスタアームのインピーダンスを基に生体可変剛性マトリクスを随意に制御することでロボットの仮想インピーダンスを調節できる．生体可変剛性マトリクス K_{BES} については以下のように算出する．

$$K_{BES} = \begin{bmatrix} k_0 F_{BES0} + K_0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 F_{BES1} + K_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 F_{BES2} + K_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$F_{BES} = wE_f + (1 - w)E_e \quad (4)$$

式(3)における F_{BES} は生体電位情報とし， k は調整用ゲインとする．また， K はオフセット調節項とする．本システムにおいては3関節における生体電位情報を用いているため 3×3 マトリクスとしている．式(4)における w はバランスゲイン， E_f および E_e は屈曲伸展時における生体電位信号とする．生体電位可変インピーダンス制御を導入したバイラテラル制御手法におけるブロック線図を図9に示す．図9内の BES Variable Impedance Control Model が生体電位可変インピーダンス制御における仮想インピーダンスを実現する物理モデルとなる．このモデルにおけるインピーダンスをコントロールすることでマスタスレーブシステムの各アーム特性を自由に設定できるようになる．次にこの制御手法を取り入れたシステムのマスタスレーブ間における情報の流れについて述べる．マスタシステムにおける関節トルク情報をオペレータの生体電位情報より取得し，マスタアームを動作させる．その結果として得られたマスタアームの手先位置情報と生体電位情報から得られたインピーダンス情報をスレーブシステムに送信する．スレーブシステムは受信したインピーダンス情報をスレーブアームに適用し，手先位置情報および手先に取り付けられている6軸力覚センサにより得られた力情報を元にスレーブアームの手先位置の追従を行う．そして力情報および手先位置情報をマスタシステムに送信する．マスタシステムは受信した力情報からヤコビアンを用いて，手先力から各関節トルクへと変換する．それに加え位置偏差を用いて力覚フィードバックをオペレータに行う．さらに，マスタスレーブシステム内に人間を組み込み，オペレータの視覚フィードバックにより絶対位置のフィードバック制御を行うという新たな制御ループを構成したシステムとなっている．

Fig. 9 Bilateral control which introduced B.E.S Variable Impedance Control robot arm

4. 動作実験

4・1 実験目的

生体電位可変インピーダンス制御を用いた場合と、力センサだけを用いたインピーダンス制御の場合におけるスレーブアームの挙動の違いについて比較検証を行う。

4・2 実験方法

開発したマスタスレーブシステムを用いて以下の2つの実験を行った。なお、生体電位信号は体調や個人差の影響を受けやすいため、本実験では実験毎に事前に生体電位信号を計測しパラメータ調整を行った。

(1) 生体電位可変インピーダンス制御を用いた場合と、力センサだけを用いたインピーダンス制御の場合において、それぞれスレーブアームの手先に300gの錘をぶら下げる実験を行う。その時のスレーブアーム手先位置における行き過ぎ量、整定時間、加わる力の変化について比較を行う。なお、力センサだけを用いたインピーダンス制御における各仮想インピーダンスは、スレーブアーム自身が持つ初期のインピーダンスとは離れた値を設定する。各仮想インピーダンスの値は $M=0.01$, $D=0.01$, K は0.1, 0.25, 0.5, 1.0の4種類とし、剛性係数 K の変化による挙動の違いを分かりやすくするために D を小さな値とする。

(2) 生体電位可変インピーダンス制御を用いた場合において、スレーブアームの手先に質量は不明の錘をぶら下げる実験を行う。この錘は人間が見た場合には大体の質量の見当が付くものとする。その時のスレーブアーム手先位置における行き過ぎ量、加わる力の変化について検証する。

(3) 150mm 往復移動をしているステージに磁石で固定された物体を把持し、所定の場所へ移動させる。さらに移動させた物体をステージ上に戻すというタスクを行う。実験(3)におけるレイアウトを図10に示す。単位時間(3分)当たりにおける往復回数をサイバニックマスターム(CMA)(生体電位可変インピーダンス: $K=Variable$)、CMA(固定インピーダンス: $K=0.1$)、CMA(固定インピーダンス: $K=1.0$)、ジョイスティックをそれぞれマスタアームとして用いたマニピュレーションシステムにおいてカウントし、比較検証する。ステージの移動速度は50mm/s, 100mm/sとし、それぞれ5回の試行を行う。スコアを計測する前には各手法で十分に練習を行い作業への慣れによる影響を最小限にしている。

Fig. 10 System overview of experiment (3)

4・3 実験結果および考察

表1に実験(1)の各手法による手先位置における整定時間, 手先位置における行き過ぎ量, 手先位置に加わる最大力の結果を示す. 手先位置における挙動が, K の値によって変化していることが確認できる. また, K の値を小さくすることで, 錘が接触した瞬間において手先にかかる力が小さくなっている. これは, K が小さくなることで衝撃を和らげているためであると考えられる. 生体電位可変インピーダンス制御による実験(1)の結果を図11に示す. 図11において4秒付近で K の値を変化させている. それに伴い手先位置の挙動が大きく変化していることが分かる. 任意の位置, 時間において自由な K の値を生体電位情報から決定することで, アームの挙動を随意に変化させることができる. 力センサだけを用いたインピーダンス制御の場合, このようにインピーダンスを随意に変化させるのは難しい. 表1より生体電位可変インピーダンス制御の手先位置変位における行き過ぎ量, 手先位置に加わる最大力においてインピーダンス制御($K=0.1$)と同程度の数値を実現できている. さらに手先位置における整定時間は, インピーダンス制御($K=0.1$)と比較して, 短くなっている. なお, 手先位置変位と整定時間はオペレータのコントロールによって任意にコントロールすることが可能である. 次に生体電位可変インピーダンス制御における実験(2)の結果を図12に示す. 外力が加わった直後における K の値は小さく, 衝撃を緩和していることが確認できる. さらにその後 K の値を大きくすることで収束が早くなっている. このような突発的な外力に対して物体衝突前から任意のインピーダンスで待ち構えることができるのに加えて, その後の挙動についてもオペレータの意思で随意に制御可能なシステムとなっている. 突発的な外力の場合ロボットアームや衝突物体の破損に繋がる危険性があるため, そこに人間の予測対応能力を介在, 利用できるメリットは大きいと考えられる. 図13に実験(3)の結果を示す. CMA(生体電位可変インピーダンス: $K=Variable$)のシステムを用いた場合, 50mm/sおよび100mm/sのタスクにおいて各々9.8回, 12.8回と一番良好な結果となった. これは生体電位可変インピーダンス制御手法の随意制御によるアドバンテージが得られた結果であると考えられる. つまり生体電位可変インピーダンス制御を用いることで, 移動している物体への把持, 追従, 移動といった一連の動きが無理なく行えたためであると考えられる. さらにオペレータの主観として, 任意の位置でインピーダンスを随意に変更可能であるので, 衝突時の緩和や, 物体の引き離しにおいて随意的な操作を実現できた. CMA(固定インピーダンス)のシステムについては $K=0.1$ にした場合, 物体を把持した状態において追従動作は行えたが, 物体を持ち上げ下ろしする場合において手先が柔軟になりすぎ, 逆にコントロールが難しくなった. それに対し $K=1.0$ とした場合には, 手先が固くなりすぎたため, 移動物体に追従できず把持を失敗したり接触, 衝突時における過負荷が多くなってしまい合計15.6回とスコアが下がった. ジョイスティックを用いたシステムについては低速の移動物体には, 若干の慣れが必要ではあるが使用できた. しかし移動物体に追従させることは非常に難しく, 物体の速度を上げた場合においてはほとんど把持できなかったため, 合計7.8回と最低のスコアとなった. インピーダンス制御において, ロボット, 作業環境, 作業条件, 作業対象が変化する度に, 物理モデルのインピーダンス調整をする必要があり, 大変手間が掛かる. 今回の実験においても物体を把持することによりシステム全体としてのパラメータが変化し, 手先位置において振動が発生する場合が多々あった. それに対し, 生体電位可変インピーダン

スを用いた場合においては、自らインピーダンスを随意に変更することで振動をある程度抑えることができることも確認できた。

Table 1 Convergence time and peak displacement of tool position in experiment(1)

	Stabilization time of tool position [s]	Overshoot[mm]	Peak Force of tool position[N]
Impedance Control ($K=0.1$)	28.8	241	3.2
Impedance Control ($K=0.25$)	5.4	104	4.3
Impedance Control ($K=0.5$)	2.2	49	4.5
Impedance Control ($K=1.0$)	1.2	25	5.0
B.E.S Variable Impedance Control	3.3	235	3.2

Fig. 11 Result 1 of BES Variable Impedance Control

Fig. 12 Result 2 of BES Variable Impedance Control

Fig. 13 Result 3 of BES Variable Impedance Control

5. 結 語

臨機応変な対応が求められる極限環境下において、人間の運動意思を適切に反映させることで巧みな操作を行い高度な作業を行うことができる実システムが求められている。このようなシステムにおいて自分の腕のような感覚でロボットアームを操作するためには、ロボットアームが人間の腕と同じような特性を持つことが重要であ

と考える。そこで本研究では、ロボットアームに人間の腕・筋肉の特性をリアルタイムに反映することで自分の腕のようにマニピュレーション可能となるシステムを構築するために、生体電位信号による関節トルク推定法を組み込んだサイバニックマスタアームを開発した。また作業性を高めるために自由度が違う場合でも使用可能なマスタスレーブ型マニピュレーションシステムを構築した。さらに、生体電位情報に着目した随意制御可能な生体電位可変インピーダンス制御アルゴリズムを実現すると共に実システムに実装して動作実験を行い、インピーダンスの随意制御を確認できた。本研究の特色は、マスタスレーブ型マニピュレーションシステムにおいて生体電位信号を制御に導入した点にある。生体電位情報を用いて人間の腕の内部状態を取得しインピーダンス制御を行うことで、従来のシステムは実現が不可能であったオペレータの直感動作が随意にロボットのインピーダンスとして表現できるようになることは大変有益であり大きなインパクトを与えると考える。このシステムを用いることで、インピーダンス特性の異なるロボットであってもより自分の腕のように意識せず自由に操作が可能となり、臨機応変な対応が求められる極限環境下において有用な実システムの導入が期待される。

謝 辞

本研究の一部は、文部科学省グローバル COE プログラム「サイバニクス：人・機械・情報系の融合複合」ならびに、内閣府最先端研究開発支援プログラム「健康長寿社会を支える最先端人支援技術研究プログラム」の支援により行われた。

文 献

- (1) Susumu Tachi, Taisuke Sakaki, Hirohiko Arai, Shoichiro Nishizawa and Jose F. Pelaez-Polo, "Impedance Control of a Direct-drive Advanced Manipulator without Using Force Sensors", *Advanced Robotics*, Vol.5, No.2 (1991).4, pp.183-205.
- (2) S.Tachi, T.Sakaki, "Impedance controlled master-slave manipulation system.Part1.Basic concept and application to the system with a time delay", *Advanced Robotics*, Vol.6, No.4 (1992), pp.483-503.
- (3) R.Tadakuma, K.Sogen, H.Kajimoto, N.Kawakami and S.Tachi, "Development of Multi-D.O.F. Master-Slave Arm with Bilateral Impedance Control for Telexistence", *Proceedings of the 2004 International Symposium on Measurement, Control, and Robots*, (2004).
- (4) I.Yamano K.Takemura K.Endo T.Maeno, "Method for Controlling Master-Slave Robots using Switching and Elastic Elements", *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, (2002), pp.1717-1722.
- (5) Hayashi T., Kawamoto H. and Sankai Y., "Control Method of Robot Suit HAL working as Operator's Muscle using Biological and Dynamical Information", *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, (2005), pp. 3455-3460.
- (6) Junpei Okamura, Hiroshi Tanaka and Yoshiyuki Sankai, "EMG-based Prototype Powered Assistive System for Walking Aid", in *Proc. of Asian Symp. on Industrial Automation and Robotics*, (1999), pp.229-234.
- (7) Takao Nakai, Suwoong Lee, Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai: "Development of Powered Assistive Leg for Walking Aid using EMG and Linux", in *Proc. of Asian Symp. On Industrial Automation and Robotics*, (2001), pp.295-299.
- (8) Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai: "Power Assist System HAL-3 for Gait Disorder Person", in *Proc. of the 2002 Int. Conf. on Computers Helping People with Special Needs*, (2002), pp.196-203.
- (9) Hiroaki Kawamoto and Yoshiyuki Sankai: "Power assist method based on Phase Sequence and muscle force condition for HAL", *Advanced Robotics*, Vol.19, No.7 (2005), pp.717-734.
- (10) Suwoong Lee, Yoshiyuki Sankai, "Virtual Impedance Adjustment in Unconstrained Motion for Exoskeletal Robot Assisting Lower Limb", *Advanced Robotics*, vol.19, No.7, (2005), pp.773-795.
- (11) 舟久保 熙康, 中川 元, 竹内 泰男, 山口 隆男, 斎藤 之男, 河村 洋, "ヒトの腕の動作解析", *バイオメカニズム* 3, (1975), pp.97-103.
- (12) 新宮 正弘, 江口 清, 山海 嘉之, "バイオフィードバックを用いたポリオ経験者の筋神経系制御能力の改善とロボットスーツ HAL による麻痺肢動作支援", *日本機械学会論文集 C 編*, Vol.76, No.772 (2010), pp. 3630-3639.
- (13) Takeru Sakurai and Yoshiyuki Sankai, "Development of Motion Instruction System with Interactive Robot Suit HAL", *Proc. of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, (2009), pp.1141-1147.