

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 26 日現在

機関番号： 14101  
 研究種目： 基盤研究 (C)  
 研究期間： 2010 ~ 2012  
 課題番号： 22560246  
 研究課題名 (和文) 人間の重量知覚特性を考慮したパワーアシストシステムの制御  
 研究課題名 (英文) Control of power assist system considering weight perception of human operator

## 研究代表者

池浦 良淳 (IKEURA RYOJUN)  
 三重大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号： 20232168

研究成果の概要 (和文) : 人間の重量知覚特性を考慮したパワーアシスト装置の制御手法を開発するため、まず、垂直 1 自由度に拘束されたパワーアシストシステムでは、自由度を拘束することによる影響が存在することを示した。次に、物体が床から離れるまでの床からの反力を測定及び解析し、物体を持ち上げる瞬間の力をパワーアシストシステムにより制御することによって、重量知覚を制御できることを示した。

研究成果の概要 (英文) : The control method for power assisting devices was developed considering the weight perception of human operators. It was shown that restricting degrees of freedom for the motion of to the carried object effects to the weight perception and we can control the weight perception by controlling the reaction force from the floor.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011 年度	900,000	270,000	1,170,000
2012 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：制御工学，人間工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：人間機械システム

## 1. 研究開始当初の背景

パワーアシストシステムについて、操作のし易さを決定する操作性の向上はシステムが現場に受け入れられるかどうかを左右する重要な要素といえる。しかしながら、操作性は人間の感覚によるところが大きく、その評価はアンケート調査などの主観的なものに限られ、客観的な評価は難しいとされてきた。そのため、システム的设计には主観評価と設計変更、試作改良の膨大な試行錯誤の繰り返しが必要となっている。現状の高齢社会

においては、衰えた筋力を補助するパワーアシストシステムを普及させることは急務であり、人間の操作感覚に合致したパワーアシストシステムの制御系設計手法を確立することが必要といえる。心理学の分野では、把持した物体の重量知覚特性（重さを感じる特性）が様々に解析されている。重量知覚特性は、物体の重量のみに決まるのではなく、サイズや質感によって異なることが知られており (A.M.Gordon [1991])、例えば、同じ重量でも物体のサイズによって重量知覚特性

が異なるシャルパンティエ効果はよく知られているところである。また、重量知覚特性は、物体を持ち上げる瞬間の力のピークに関係していることも知られている (E.C.Chang[2006])。

このような確立された人間の特性をパワーアシストシステムの制御系設計に適用することにより、システムの格段の操作性向上が期待できる。しかしながら、心理学で得られた知見をそのままパワーアシストシステム操作時の特性に当てはめることはできない。それは、物体の運動特性がパワーアシストシステムにより、単独のものとは変化しているためである。

研究代表者はこれらの観点のもと、2007年より簡易的なパワーアシスト装置により研究を始めている。そして、心理学で知られている人間の重量知覚特性がパワーアシスト装置で操作した際にも同様に現れることを検証している (S.M.Mizanoor Rahman [2009])。さらに、パワーアシスト装置の制御系の遅れにより、重量知覚特性が異なることを発見しているが、簡易的な装置ではその検証まで至っていない。

## 2. 研究の目的

人間の重量知覚特性を基づいたパワーアシストシステムの制御系設計手法を確立することが本研究の目的であり、前述した研究課題を解決することが必要となる。そこで、3年間の研究期間内に以下のことを明らかにすることを目的とする。

- (1) パワーアシストシステム操作時では、操作物体はシステムにより自由度が拘束される。このような拘束は重量知覚特性に影響を与えるかについて調べる。
- (2) パワーアシスト装置で重量知覚特性を制御するための知見を得る。

## 3. 研究の方法

### (1) 自由度拘束の重量知覚特性への影響

力を加える方向の自由度の制限の有無によって重さの感じ方が変わるのかを主観評価により検証した。

### ①実験装置

図1に実験装置を示す。外観が同じで重量が910g、外径が42mm、高さが152mmの物体を2つ用いる。両方とも中は空洞になっており、片方の物体には円等軸のシャフトと組み合わせて用いる直線案内のリニアブッシュを中に設置し、力を加える方向を上下だけに拘束できる構造となっている。以下物体に力を加える方向を上下だけに拘束している場合を拘束有り、何も制限していない場合を拘束無しとする。



(a)持ち上げ物体

(b)拘束棒

図1 実験装置

### ②実験方法

被験者は平均年齢22歳の健常男子10名である。土台は被験者の肘の角度が90°になるように上下に動かせる。まず、右手で2つの物体を何回も交互に5cmほど持ち上げる。この際、物体を握る強さや持ち上げる速度は特に指示していない。何回も交互に持ち上げてもらい2つの物体の重さの感じ方がどちらかが軽いか重いか、または、どちらも同じ重さかをこれ以上重さの感じ方が変化することがなくなったと感じるまで続けてもらう。2つの物体の持ち上げ方は、わしづかみと親指・人差し指・中指の3本指で物体をつかみ持ち上げることとする。実際には重量物運搬の際、3本指を用いることはあまりないと考えられるが比較のために行う。さらに物体の上部・下部・重心部を持つという持ち上げ方を考慮し、計6種類で実験を行う。実験回数は前述の6種類の持ち上げ方で重さを比較することを1セットとして1セットごとにインターバルを間に15分入れて合計3セット行う。

### (2) 重量知覚特性を制御するための知見獲得

パワーアシスト装置で重量知覚特性を制御するための知見を得ため、特に物体を持ち上げる瞬間の台からの反力を測定、解析を行った。

### ①実験装置の構成

実験に用いるACサーボモータによるボールねじ駆動型一自由度パワーアシスト装置を図2に示す。物体へ加えた力を計測するための力センサがボールねじ可動部に取り付けられている。力センサには実験で用いる物体が取り付けられるようになっており、実験では被験者がこの物体を把持し持ち上げ動作を行う。持ち上げ物体の外観を図3に示す。寸法は幅50mm、奥行き50mm、高さ120mmである。また、初期に物体を置いてあるテーブル部分のロードセルにより、物体がテーブルに置かれてから持ち上げるまでの反力の推移を測定する。本実験システムの構成図を図4に示す。

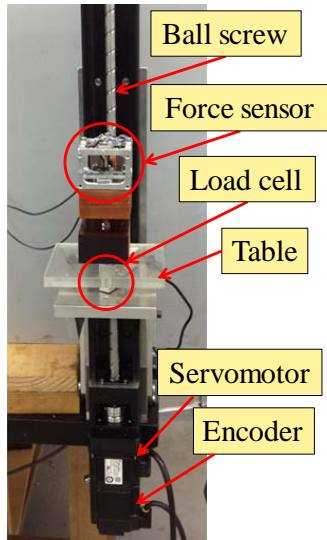


図2 実験装置

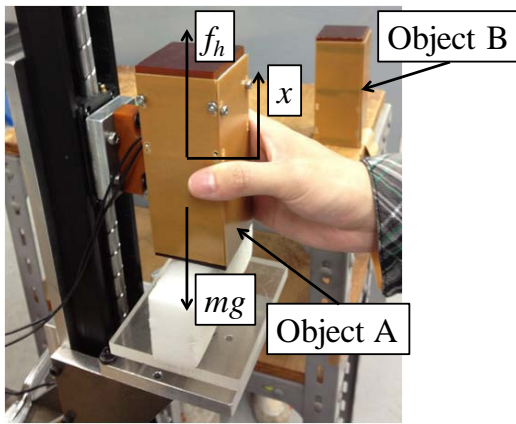


図3 実験環境

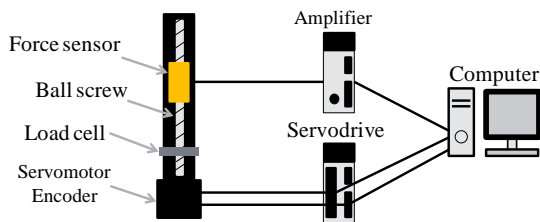


図4 システム構成

②実験装置の制御アルゴリズム

図3の記号はそれぞれ、人間が加える力  $f_h$  [N], 物体の質量  $m$  [kg], 重力加速度  $g$  [m/s<sup>2</sup>] を表す。装置のみに注目し、座標  $x$  を上下方向にとると運動方程式は、

$$m\ddot{x} = f_h - mg$$

となる。両辺に存在する質量  $m$  に注目すると、左辺の  $m$  は慣性力項の質量であり、右辺の  $m$  は重力項の質量である。実際に物体を持ち上げる際はこの2つの  $m$  は同じとするのが普通であるが、本研究では慣性力と重力では物体

を持ち上げたときの感性が異なるのではないかと考えたため、重力加速度  $g$  を変化させ  $ag$  ( $a$ : 変数) とし、運動方程式を

$$m\ddot{x} = f_h - mag$$

と置き換え、慣性力項の質量を  $m = m_1$ , 重力項の質量を  $ma = m_2$  とおくことによって、以下のように書き換え、

$$m_1\ddot{x} = f_h - m_2g$$

2つの質量値を別々に取り扱って制御を行う。 $m_1$ ,  $m_2$  はコンピュータ上で値を変更でき、様々な組み合わせで実験することができる。また、図5にシステムのブロック線図を示す。 $K$  がゲイン、目標速度が  $\dot{x}_d$ , 入力人は人が加える力  $f_h$ , 出力が変位  $x$  (加速度の2回積分) であり、位置は速度制御のサーボモータによって制御され、位置フィードバック制御されている。

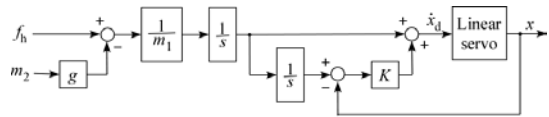


図5 制御システムのブロック線図

③実験方法

物体を持ち上げる際の力の加え方や重量の感じ方を検証するために、パワーアシスト装置に取り付けられた図3の物体Aを右手で把持した状態でしばらくの間テーブルの上に置いたまま保持し、実験者の合図に合わせて被験者がテーブル上の物体を（実際に物体を持ち上げるように）自然に持ち上げる。その後、物体Aの重量をどの程度に感じたかを調べるため、物体Aとサイズが同一で質量0.5kgであるフリーな状態の図3の物体Bを持ち上げることによって被験者が感じた重さを調べる。

物体Aの質量  $m_1$ ,  $m_2$  は同じ値に設定し、質量決定は0.5kgから始め、0.1kgずつ物体Aの質量 ( $m_1$ ,  $m_2$ ) を変化させ、重量の感じ方(物体Aと物体Bを比較して重いか軽いか)に変化が表れる質量を調査する。

重量変化を感じた物体Aの質量が分かれば、軽いと感じた方の質量から-0.1kg, -0.2kg, 重いと感じた方の質量から+0.1kg, +0.2kgの質量の物体がテーブルから離れる際の反力の推移を順番はランダムで測定する。また、物体Bの反力の推移の計測も同時に行っている。

4. 研究成果

(1) 自由度拘束の重量知覚特性への影響

表1に主観評価の結果を示す。ここでの軽い・重いは物体を持ち上げる際に拘束有りと拘束無しの物体の重さを比較して拘束有りの方をどう感じたかを答えた人数を表して

ある。同じというのはどちらの物体も同じ重さを感じた場合である。また、物体の上部をわしづかみで握り、持ち上げた場合をわしづかみ（上）などと表すこととする。

表 1 主観評価結果

(a)1 回目

Order	Handgrip (Position)	Light	Heavy	Equal
1	Grab (Top)	5	0	5
2	Grab (Center)	4	0	6
3	Grab (Under)	4	0	6
4	Three fingers (Top)	4	0	6
5	Three fingers (Center)	5	0	5
6	Three fingers (Under)	9	0	1

(b)2 回目

Order	Handgrip (Position)	Light	Heavy	Equal
6	Grab (Top)	2	0	8
5	Grab (Center)	2	0	8
4	Grab (Under)	4	0	6
3	Three fingers (Top)	3	0	7
2	Three fingers (Center)	8	0	2
1	Three fingers (Under)	9	0	1

(c)3 回目

Order	Handgrip (Position)	Light	Heavy	Equal
1	Grab (Top)	3	0	7
3	Grab (Center)	2	0	8
5	Grab (Under)	4	0	6
2	Three fingers (Top)	3	0	7
4	Three fingers (Center)	7	0	3
6	Three fingers (Under)	7	0	3

表 1 より 3 本指（重心）や（下）の場合、拘束有りの方が軽く感じるという被験者が多かった。わしづかみ（上）、（重心）、（下）と 3 本指（上）の場合は比較したとき同じと感じた被験者が多くなる結果となった。

以上の結果より、持ち方については、物体を持つ指の本数が少なくなれば少なくなるほど拘束有りの方が軽く感じるという結果になり、持つ位置に関してはわしづかみの場合はあまり違いがみられなかったが、3 本指の場合は物体の下部を持って持ち上げる際に拘束無しの場合、物体のバランスが悪くなり重く感じる事が分かった。以上より、手と持ち上げ物体の接地面積当たりに大きな把持力が必要になると、拘束有りの場合に軽く感じると思われる。これをふまえて、次に把持力測定実験を行うこととした。

(2) 重量知覚特性を制御するための知見獲得

図 6 に実験結果の一例を示す。グラフの縦軸は、物体を持ち上げた際の物体がテーブルから離れる際の正規化された反力[-]を表し、横軸は時間[sec]を表す。また、実線がパワー

アシスト装置を用いずに物体を持ち上げた際の物体が地面から離れる際の反力の推移を表したものであり、破線がパワーアシスト装置を用いた物体持ち上げ時の物体がテーブルから離れる際の反力の推移を表したものである。通常は、質量に重力加速度を掛けた値が反力となるが、異なる質量でも比較をしやすいするため測定時の質量と重力加速度で割ることにより正規化している。また、物体を持ち上げる瞬間の反力の推移を比較するために、パワーアシストの有無における両方の反力の値が最大値から 0 に下がった時点（図 6 中の実線の丸で囲んだ部分）を一致させている。また同様に、物体を持ち上げる瞬間の反力の推移を検証するため、図 6 中の点線で囲った部分を拡大したものを図 7 に示す。

被験者は持ち上げでの重量の感じ方に関して、パワーアシスト無しの場合(0.5kg)と比較して、パワーアシスト有りの場合の 0.7kg は軽く感じ、0.8kg は重く感じたという結果であった。しかし、図 7 に示すようにほぼ同じ重量と感じたパワーアシスト無しの場合と、パワーアシスト有りの 0.7kg の場合の物体を持ち上げる際の反力の推移がほぼ同じになっていることが確認できる。パワーアシスト有りの場合に軽く感じた質量ではパワーアシスト無しの場合と比較して反力の推移が最大値から 0 になるまでの時間が短いことが分かる。よって、反力が最大値から 0 になるまでの時間に依存して、パワーアシストの有無による重量知覚の違いが発生したと考えられる。他の被験者においても同様の結果が確認できている。

以上より、人の重量知覚特性は、物体を持ち上げる瞬間のテーブルからの反力を制御することにより、変更することが可能であることが示された。

今後は、その制御手法を開発することが課題となる。

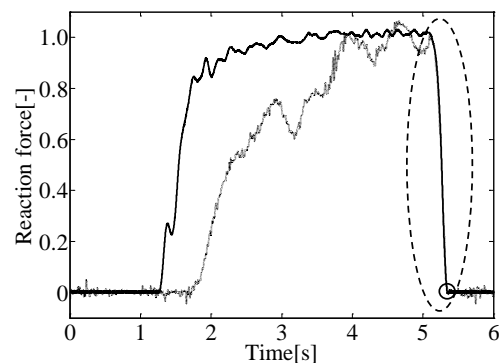


図 6 実験結果の一例

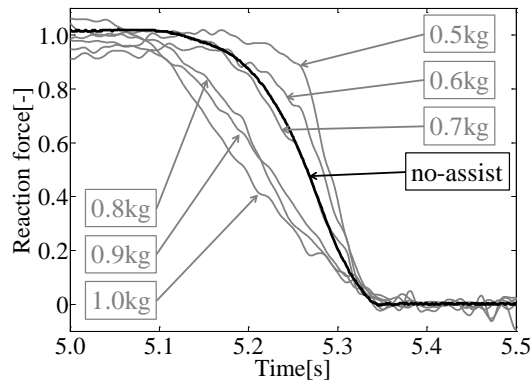


図7 実験結果

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- (1) S.M. Mizanoor Rahman and Ryojun Ikeura, Improving interactions between a power-assist robot system and its human user in horizontal transfer of objects using a novel adaptive control method, *Advances in Human-Computer Interaction*, 査読有, Vol.2012, No.745216, pp.1-12, 2012  
DOI: 10.1155/2012/745216
- (2) S.M. Mizanoor Rahman and Ryojun Ikeura, Weight-perception-based novel control of a power-assist robot for the cooperative lifting of light-weight objects, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 査読有, Vol.9, No.118, pp.1-13, 2012  
DOI: 10.5772/50894
- (3) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura, Soichiro Hayakawa and Haoyong Yu, Manipulating objects with a power assist robot in linear vertical and harmonic motion (Psychophysical-biomechanical approach to analyzing human characteristics to improve the control), *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 査読有, Vol.6, No.5, pp.399-414, 2011  
DOI: 10.1299/jbse.6.399
- (4) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura, Haoyong Yu, Towards developing a human-friendly power assist robot for manipulating heavy objects (Special focus on manoeuvrability and object's surface friction), *International Journal of Biomechanics and Biomedical Robotics*, 査読有, Vol.1, No.4, pp.191-205, 2011  
<http://www.inderscience.com/jhome.php?jcode=ijbbr>
- (5) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura,

Soichiro Hayakawa and Hideki Sawai, Design and control of a power assist system for lifting objects based on human operator's weight perception and load force characteristics, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 査読有, Vol.58, No.8, pp.3141-3150, 2011

DOI: 10.1109/TIE.2010.2087291

[学会発表] (計 25 件)

- (1) 石橋伸祐, 池浦良淳, 早川聡一郎, 澤井秀樹, パワーアシスト装置を用いた物体持ち上げ動作における重量知覚特性(重量知覚における反力の影響), 日本機械学会東海支部第 62 期総会講演会, 2013/3/19, 津
- (2) S.M. Mizanoor Rahman and Ryojun Ikeura, A human-characteristics-based novel control method for harmonic manipulation of objects with a power assist robot, *The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 2012/9/9, Paris, France
- (3) S.M. Mizanoor Rahman and Ryojun Ikeura, Investigating the factors affecting human's weight perception in lifting objects with a power assist robot, *The 21st IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, 2012/9/9, Paris, France
- (4) S.M. Mizanoor Rahman and Ryojun Ikeura, Weight-perception-based novel control for cooperative lifting of objects with a power assist robot by two humans, *The Fourth IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*, 2012/6/25, Roma, Italy
- (5) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura and Haoyong Yu, Lifting and lowering objects manually and with a power assist robot (Analysis of human features to develop biomimetic control), *The 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2011/12/10, Phuket, Thailand
- (6) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura and Haoyong Yu, Novel biomimetic control of a power assist robot for horizontal transfer of objects, *The 2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2011/12/10, Phuket, Thailand
- (7) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura, Shinsuke Ishibashi, Soichiro Hayakawa, Hideki Sawai and Haoyong Yu, Lowering objects manually and with power-Assist (Distinctions in perceived heaviness, load forces and object motions), *The 4th International Conference on Human System Interaction*,

- 2011/5/19, Yokohama, Japan
- (8) 石橋伸祐, 池浦良淳, 早川聡一郎, 澤井秀樹, 物体持ち上げ動作における重量知覚特性, 日本機械学会第 22 回バイオフィロンティア講演会, 2011/10/7, 津
- (9) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura, Soichiro Hayakawa and Hideki Sawai, A critical look at human's bimanual lifting of objects with a power assist robot and its applications to improve the power-assist control, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 2010/12/16, Tianjin, China
- (10) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura, Ishibashi Shinsuke, Soichiro Hayakawa and Hideki Sawai, Manipulating objects in harmonic motion: distinctions between power-assisted and manual manipulation, The 8th France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, 2010/11/23, Yokohama, Japan
- (11) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura, Masaya Nobe and Hideki Sawai, Harmonic motion analysis and control for manipulating objects with a power assist robot based on human characteristics, The 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2010/9/27, Tokyo, Japan
- (12) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura and Hideki Sawai, Worst-cases prediction by human in lifting objects with a power assist robot system: Effectiveness of a novel control

strategy to improve the system performances in worst-cases, The 2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, 2010/9/27, Tokyo, Japan

- (13) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura, Masaya Nobe and Hideki Sawai, Two complementary techniques for motion control of power assist system for lifting objects based on human characteristics, 2010 IEEE International Conference on Control Applications, 2010/9/9, Yokohama, Japan
- (14) S.M. Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura, Masaya Nobe and Hideki Sawai, Controlling a power assist robot for lifting objects considering human's unimanual, bimanual and cooperative weight perception, 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2010/5/5, Anchorage, Alaska, USA

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.ss.mach.mie-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

池浦 良淳 (IKEURA RYOJUN)

三重大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号： 20232168