

平成 21 年 4 月 14 日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19500141  
 研究課題名（和文） 人間上肢の運動制御における視覚情報と力感覚情報のメカニズムの解明  
 研究課題名（英文） Investigation of the relationship between the human upper limb movement and the detected vision-force information

研究代表者  
 黄 健 (HUANG JIAN)  
 近畿大学・工学部・准教授  
 研究者番号：10282956

## 研究成果の概要：

本研究では可操作度による拘束運動での制御手法を提案した。本手法では、アーム部分が協調的に動くことによって指部分の可操作度を目標値以上に制御するため、特異姿勢に強いロバスト性を実現した。また、Müller-Lyer 錯視刺激を与えた場合の上肢運動を測定し、認知上の錯視現象を確認でき、上肢運動にも大きな影響を与えたことを明らかにした。さらに、視覚情報の濃度の低下の場合運動精度が徐々に落ちる結果から、視覚情報の濃度と運動生成に必要な情報の取得率に何らかの関連があることを示唆し、今後の研究に有用な手係りが得られた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2008 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,800,000	1,140,000	4,940,000

## 研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：情報センシング，感性情報，上肢運動，視覚と上肢運動，力感覚と上肢運動，運動の冗長性

## 1. 研究開始当初の背景

高度な冗長性をもつ人間の四肢が多数の関節の運動をどのように決めるかという問題は、体の運動制御の不良設定問題であり、ベルンシュタイン問題として知られている。この運動制御の不良設定問題を解決するため、これまでさまざまなアプローチを試みた。従来に提案された運動モデルは、上肢部を独立な運動構成として自由空間での随意運動を物理的に、力学的にどのように生成したかを検討したものであった。しかしながら、作業中に手先の自由度の一部が拘束される

ことは多く、作業を遂行するため、体の感覚器からの情報を用いて運動制御を行うことが必要である。この場合、異なる感覚器からの情報の役割と関連、そして肢体の運動制御に及ぼす影響について、従来の運動モデルによって説明できない。

## 2. 研究目的

これまでの研究で得られた知見に基づいて、人間の体の感覚器からの情報の役割と相互関連、そして上肢運動に及ぼす影響についての問題に重点に取り組み、そのメカニズム

を説明することを目指す。

### 3. 研究方法

#### (1) 可操作度による運動生成

人間の四肢は肩、肘、腕、手、指の部分から構成されており、作業するときに必要なに応じて使い分けを自然的に行う。申請者は、運動しやすさを表す可操作度というパラメータに注目し、可操作度を用いて多数の自由度を有するアーム・指という機構の運動生成法を提案した。

#### (2) 視覚情報と上肢運動の関連

作業中は作業中常に移動先の情報を視線で観察しながら四肢の運動を行う。本研究では、作業者の視線がどのタイミングで環境情報を読み取っているのか、そして四肢運動をどのように準備しているのかという問題に取り組み、視覚情報の役割、運動制御への影響を調べ、その結果を検討してきた。

#### (3) 力感覚と上肢運動の関連

手先自由度の一部が拘束されながら四肢運動を行う場合、視線情報と力感覚の情報のそれぞれは四肢の運動制御に独立な役割をしているのか、情報融合が行われる場合どのように統合するのかは不明である。本申請では、四肢運動における視覚情報と力感覚情報のそれぞれの役割と関連について調べた。

### 4. 研究成果

#### (1) 可操作度による運動生成

人間が滑らかな動作を実現するには、手や腕の高い自由度を活かし、無意識に学習してそれらを協調させることが欠かせない。理論上、人間の動作の模倣には、ロボットの自由度を高めるほど実現しやすいため、近年、多指多関節を用いる複雑なロボットを中心に研究が展開されている。しかし、冗長ロボットの制御に特異点を回避する幾何的な運動学問題と衝突防止・近道発見の軌道生成問題はほとんどである。

これらの研究に対して、著者らは、多数の関節の協調動作による自然な運動および滑らかな接触作業を実現するために、指の可操作度を補償することによって自然な動きを実現するフィンガ・アームロボットの協調制御方法を提案する。

##### ① 自由空間での運動

これまでに提案した手法は人間の四肢運動特徴を起点に、軽量で細かい軌道に敏感なフィンガ部が目標位置追従の主役とさせ、フィンガの可操作度がある閾値を下回ると、その操作性を有効的に補償するためにアームを移動させる。この提案アルゴリズムを用いることにより上記の動きを非常にうまく実現することができた。このように、重いアームは低速かつスムーズに制御でき、フィンガは無理な姿勢が避けられると考えられる。

申請者は、フィンガ・アームから構成される上肢冗長ロボットにおいて、フィンガの可操作度を補償する複数のアルゴリズムを提案し、自由空間と拘束空間におけるそれぞれの特徴の比較と検証を行った。実験結果により、図1に示す「ヒューリスティック手法」は高い軌道追従性と可操作度の良い回復度合いが得られたが、拘束空間におけるアーム挙動の乱れが確認された。一方、フィンガ先行方式の「最急降下法」による実験結果からは非常に高い可操作度の回復能力が確認された。

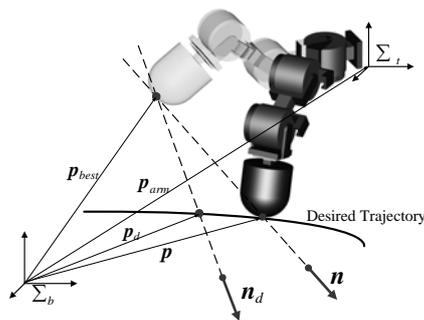


Fig. 1 The heuristic method for free movement

##### ② 拘束空間での運動

申請者は、これまでに6自由度アームロボットの先端に3自由度フィンガロボットを取り付けることで人間の四肢に近い冗長性を有する9自由度のフィンガ・アームロボットの協調制御アルゴリズムを提案し、自由空間での運動および拘束空間での静的な運動において、自然で滑らかな動きを実現してきた。しかしながら、従来の提案手法は自由空間において可操作度の制御を行うものであり、可操作度の制御とインピーダンス制御を同時に実現する手法はこれまでに提案されていない。これらの制御を同時に実現することができれば、これまで自由空間で実現してきた自然で滑らかな運動を接触作業へ応用することができる。そこで申請者は、従来の手法を拘束空間での動的な運動に発展させるという観点から、可操作度の制御と三次元空間でのインピーダンス制御を同時に実現するアルゴリズムを提案した。

提案手法は、ロボット手先のインピーダンス制御を遂行しながらより重要な部分であるフィンガロボットの可操作度を考慮するため、従来に用いた「ヒューリスティック法」と「最急降下法」のそれぞれにインピーダンス制御を取り入れ、拘束空間での運動を実現するものであった。具体的には、まず、冗長9自由度のフィンガ・アームロボットを用いてパッシブインピーダンス制御、アクティブインピーダンス制御のそれぞれの制御系を構成し、インピーダンス制御の両手法における問題について制御理論の観点から比較実験を行い、それぞれの制御系の特徴と効果を

検討した。

次に、図2に示すようにフィンガ可操作度の制御に最急上昇法を適用したインピーダンス制御手法を提案し、接触作業において可操作度の制御に最適化手法を用いることの効果について明らかにした。また、提案手法はフィンガ部で実現されるインピーダンス空間をアームとの協調運動によって、より拡張するものであり、その結果、タスク実行に重要な部分であるフィンガロボットの可操作度を最適化することにより、突発的な外乱に強く、効率的に特異点回避を実現できることを実証した。

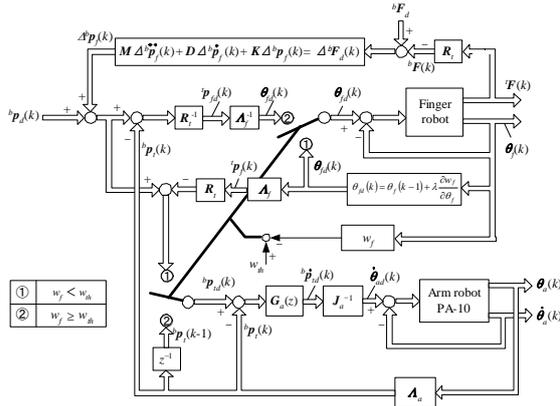


Fig. 2 Impedance control using SAM

(2) 視覚情報と上肢運動の関連の解明

① 錯視情報の影響

申請者は、人間の運動メカニズム解明の一端として、人間の視覚と運動の関係について注目した。視覚情報が運動に及ぼす影響を測定するための手段として、これまであまり研究されてこなかった錯視と運動の関係を利用し、脳の認識現象が人間の運動に影響を及ぼすかどうかを検証することとした。本研究では、Müller-Lyer 錯視を用いて実験を行う。Müller-Lyer 錯視は同じ長さの直線の両端に矢羽をつけたとき、外側に開かれた矢羽を描かれた直線の方が長く見えるというものである。Müller-Lyer 錯視は人間の網膜像に写った 2 次元の情報から過去の経験を元に奥行き情報を無意識に検出することによって生じるものとされている。言い換えれば、錯視現象は 3 次元の実空間を認識するために必要な脳の機能の一部を反映しているものとも言える。申請者はではモーションキャプチャシステムを用いてこの錯視現象が人間に及ぼす影響を明らかにした。

図3に示すように、被験者には図形の中央の線分を左から右に3回なぞってもらいその長さを記憶してもらった後、先ほど覚えてもらった長さ分指を動かしてもらった。図形の提示パターンは、Arrow、Feather、Normalの3種類の形状で、その基準となる長さは0.15mと0.30mの2種類存在する。これら6パターン

ンを各5回ずつ合計30回ランダムに表示し実験を行った。



Fig.3 Experiment scenery

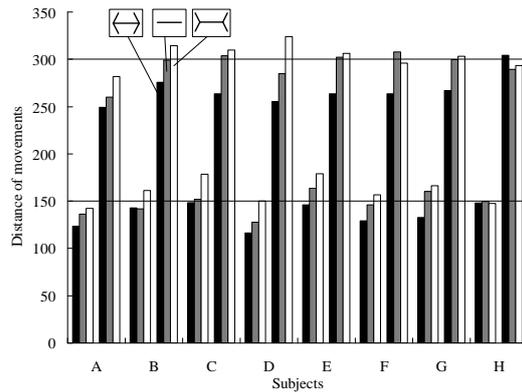


Fig.4 Distance of movements

図4は、6つのパターンにおける指先の平均移動距離を被験者ごとにまとめたものである。これを見ると、Hを除くほとんどの被験者において指先の移動距離に錯視の影響が生じていることが分かった。ArrowとFeatherを比較したときの錯視量は115~125%程度で、前章で得られた運動を伴わない場合のMüller-Lyer錯視の影響を、ほぼそのまま受けていることが確認された。その原因は事前に運動によって体に覚えさせた長さは、視覚情報により脳内に刻まれた偽りの長さ引きずられてしまうと考えられる。

② 視覚情報の濃度の影響

人間の運動は外部環境との相互作用の中で成り立っており、種々の感覚器から得られる情報に基づき、影響を受けている。中でも視覚は外部情報の87%を占めると言われており、知的情報を取得し知的運動を獲得するために最も重要な感覚器であり、運動との関連性を調べることもまた重要である。本研究では、人間上肢の運動における上肢運動と視覚情報との関連を調べた。具体的には、モーションキャプチャ (Pro-Tracker、ダイレクト (株)) と眼球運動測定装置 (EMR-8B、ナック (株)) を用いて指先の軌道追従実験を行った。具体的には、円軌道の提示の有無、図5に示すように提示される円軌道の情報濃度を徐々に減らしていく場合、手先の運動と

眼球運動を測定した。

その結果、視覚提示がある場合、視覚情報を用いて追従運動を行った場合、

- 1) 視線が指先より先行し、停留する
- 2) 指先を停留点の位置に合わせる

といったサイクルを繰り返しながら運動していることを明らかにした。また、精度を向上させようとする意識が働くと考えられ、体が硬くなり、視覚なしでの運動時の可操作度と運動速度に比べて可操作度や運動速度が低下する傾向が確認された。

また、図6に示すように軌道情報の濃度を低下させる場合、指先の位置と停留点に空間的なズレが生じていることが分かり、指先の運動を行うため、周辺視情報を用いて目標軌道を一定な方法で生成することを確かめた。その補間の方策に関しては、本研究で2通りの仮説を提案した。今後はこの仮説の検証とともにそれぞれの方策の有用性や視線動作パターンに変化が生じる条件などについて引き続き研究を行う予定である。

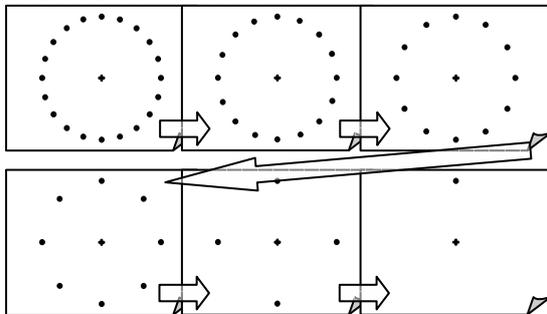


Fig.5 The provided visual trajectory

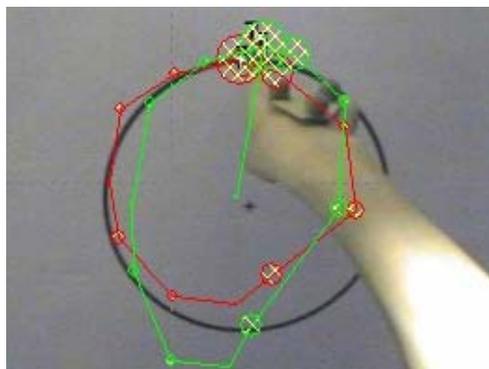


Fig.6 Eyemark trajectory

### (3) 力感覚と上肢運動の関連

申請者は、ハプティックインタフェース（力感覚提示装置）を用いた VR 技術を活用して、力感覚メカニズムの解明と遠隔力感覚通信の実現可能性についてこれまでに検討した。本手法は、VR 技術の特徴を活かして、自然環境では実現できない多様な環境条件を構築が可能なこと、同時に被験者の実験データを容易に取得できるので、従来の自然環境では実現できない実験条件で力感覚メカニズムに切り込んだことである。力感覚メカニズムについては、これまでの研究で瞬間的

に支持対象物が微小重量変化する時の弁別閾について、非常に興味ある結果が得られた。

これまでの研究成果に基づいて手の運動が新しい要素として加わった条件で、どのように力感覚が変化するかを解明を行った。具体的には、被験者の重さの知覚つまり評価値に影響を及ぼした要因を詳しく検討するため、図7に示すように被験者に物体の重さを瞬間的に負荷することにより生じる落ち込み変化のことに着目した。これは受け身型の実験で反射的な運動に強い影響を受けていると予想したためと考えられる。なお重さの比較には常に最初に持った基準物体を指標としているため、把持部位置の変化も基準物体を持った時の落ち込み量に対し対象物体の落ち込み量との比を取り、これを評価値と比較したことは原因と考えられる。したがって、この実験では、最初の試行段階では、反射運動の影響を受け、試行回数が増加するにつれ、その影響が消失し、大きさ重さ錯覚現象が出現することを明らかにした。したがって、本研究では手先運動の影響は力の弁別閾を劣化させ、さらに対象物の重量変化率は感度特性を鋭くする傾向にあることを明らかにした。

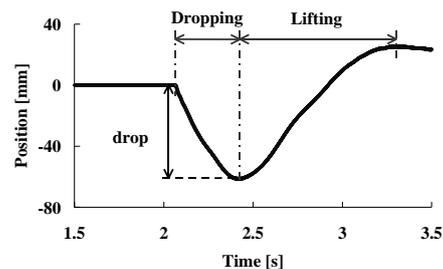


Fig.7 Change of position

### 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5件)

- [1] 小坂翔, 原正之, 黄健, 藪田哲郎, ミュラー・リヤー錯視による人間上肢運動の変化, 計測自動制御学会論文集, Vol.45 No.1, pp.69-71, 2009. (査読有)
- [2] 山田大輔, 中村裕介, 原正之, 黄健, 藪田哲郎, 可操作度を考慮したフィンガ・アームロボットの協調的インピーダンス制御, 日本機械学会論文集(C) Vol.74 No.748 (2008-12), pp.2994-3003. (査読有)
- [3] 黄健, 中村裕介, 山田大輔, 原正之, 藪田哲郎, 冗長ロボットの構造階層化を用いた運動制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.44 No.12, (2008-12), pp.1012-1014. (査読有)
- [4] ブイチョン クワン, 原田実, 黄健, 藪田哲郎, 可操作度を用いた上肢ロボット

の協調制御による自然な運動機能の生成, 日本機械学会論文集(C) Vol.73 No.733, pp.2551-2560, 2007. (査読有)

- [5] 大竹理香, 原正之, 黄健, 藪田哲郎, ハプティックインタフェースを用いた力感覚と錯覚現象の計測, 計測自動制御学会論文集, Vol.43 No.8, pp.699-701, 2007. (査読有)

[学会発表] (計 23 件)

・国際学会発表

- [1] M. Hara etc, Consideration of Weight Discriminative Powers for Various Weight Changes Using a Haptic Device, Proc. of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008), pp.3971-3976, 2008. (2008年9月25日, Nice, France) (査読有)
- [2] J. Huang etc, Control of a Finger-arm Robot by Employing the Steepest Ascent Method to Modulate the Finger's Manipulability, Proc. of 2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2008) (Poster Session). (2008年9月25日, Nice, France), (査読有)
- [3] J. Huang etc, Moving Distance Error of the Fingertip During a Memory Based Reaching Movement without Using Vision, 2008 IEEE International Conference on Distributed Human-Machine System (DHMS2008), pp.550-555, 2008. (2008年3月10日, Athen, Greece) (査読有)
- [4] J. Huang, etc, Measurement of Distance Error in Reaching Movement of the Human Hand without Using Vision, Proc. of 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp.4866-4869, 2007. (2007年8月27日, Lyon, France) (査読有)
- [5] M. Hara etc, Analysis of Human Weight Perception for Sudden Weight Changes during Lifting Task Using a Force Display Device, 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2007), pp.1808-1813, 2007. (2007年4月12日, Roma, Italy), (査読有)

・国内学会発表

- [6] 山田大輔 など, 可操作度を考慮したフィンガ・アームロボットのインピーダンス制御, 第26回日本ロボット学会学術講演会講演論文, 3C3-01, 2008. (2008年9月11日, 神戸)
- [7] 芦高直哉 など, 遠隔力感覚通信システムの構成法と基本評価, 第26回日本ロボット学会学術講演会講演論文, 3L2-02, 2008. (2008年9月11日, 神戸)

- [8] 反保紀昭 など, ハプティックインタフェースの減速機構が人間の力感覚に及ぼす影響の評価, 第26回日本ロボット学会学術講演会講演論文, 3L2-06, 2008. (2008年9月11日, 神戸)
- [9] 小坂翔 など, 人間の上肢の運動方向によるミューラー・リヤー錯視の影響, 第26回日本ロボット学会学術講演会講演論文, 3I3-04, 2008. (2008年9月11日, 神戸)
- [10] 野坂弘紀 など, 人間のマイクロ運動領域に及ぼす視覚情報の影響, 第26回日本ロボット学会学術講演会講演論文, 3I3-03, 2008. (2008年9月11日, 神戸)
- [11] 山田大輔 など, 可操作度の制御を用いたフィンガ・アームロボットのインピーダンス制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 2A1-H22, 2008. (2008年6月7日, 長野)
- [12] 野坂弘紀 など, 人間の上肢運動に及ぼす視覚情報の影響, ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 1A1-I07, 2008. (2008年6月6日, 長野)
- [13] 小坂翔 など, 上肢運動におけるミューラー・リヤー錯視情報の影響, ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 1A1-I05, 2008. (2008年6月6日, 長野)
- [14] 芦高直哉 など, 対話型遠隔力感覚通信における人間の感覚とサーボ構成の関係, ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 1A1-F18, 2008. (2008年6月6日, 長野)
- [15] 反保紀昭 など, ハプティックインタフェースのアクチュエータ機構が人間の力感覚に及ぼす影響の定量的評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会'08, 1P1-H18, 2008. (2008年6月6日, 長野)
- [16] 野坂弘紀 など, 人間上肢の随意運動の測定と解析, 第8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 (SI2007) 講演論文集, pp.1063-1064, 2007. (2007年12月20日, 広島)
- [17] 中村裕介 など, 可操作度を用いた冗長ロボットの運動制御, 第8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 (SI2007) 講演論文集, pp.985-986, 2007. (2007年12月20日, 広島)
- [18] 小坂翔 など, 運動空間の違いによる指先移動距離誤差の測定と解析, 第25回日本ロボット学会学術講演会講演論文 CDROM, 1E22, 2007. (2007年9月13日, 千葉)
- [19] 芦高直哉 など, 力感覚通信に用いるハイブリッド型マスタスレーブシステムの基本特性, 第25回日本ロボット学会学術講演会講演論文 CDROM, 1E21, 2007. (2007年9月13日, 千葉)
- [20] 中村裕介 など, 可操作度に最急降下法を適用したフィンガ・アームの運動制御,

- ロボティクス・メカトロニクス講演会'07,  
2P1-A03,2007. (2007年5月12日, 秋田)
- [21] 小坂翔 など, モーションキャプチャを用いた人間の  
上肢運動感覚の測定と解析, ロボティクス・メカ  
トロニクス講演会'07, 1A2-F01,2007. (2007年5月  
11日, 秋田)
- [22] 原正之 など, 力覚提示装置を用いた人間の  
重さ知覚精度の検証, ロボティクス・メカ  
トロニクス講演会'07, 1A2-F03,2007. (2007年5月  
11日, 秋田)
- [23] 芦高直哉 など, 人間の感覚面から見た  
遠隔力通信システムの基本特性, ロボ  
ティクス・メカトロニクス講演会'07,  
1A2-F04,2007. (2007年5月11日, 秋田)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

黄 健 (HUANG JIAN)  
近畿大学・工学部・准教授  
研究者番号：10282956

### (2) 研究分担者

なし

### (3) 連携研究者

藪田 哲郎 (YABUTA TETSURO)  
横浜国立大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号：30323926