

機関番号：12701
 研究種目：基盤研究(B)
 研究期間：2008～2010
 課題番号：20300075
 研究課題名(和文) バーチャルリアリティ技術を活用した力感覚メカニズムの解明と力感覚通信への展開
 研究課題名(英文) Analysis of Force Sensation by use of Virtual Reality and its Application to Force Telecommunication System
 研究代表者
 藪田 哲郎 (YABUTA TETSURO)
 横浜国立大学・工学研究院・教授
 研究者番号：30323926

研究成果の概要(和文)：

本研究は、ハプティックインタフェース(力感覚提示装置)を用いたバーチャルリアリティ技術を活用して、遠隔力感覚通信技術の実現可能性と、人間の力感覚メカニズムの解明を目的としたものである。遠隔力感覚通信技術については、その構成法および制御アルゴリズムを提案し、その基本特性を明らかにした。また、力感覚メカニズムについては、バーチャルリアリティ技術の特徴を活かした実験を行い、人間の運動と視覚に強い関連があることを明らかにしている。

研究成果の概要(英文)：

This research aims at clarifying both force sensation mechanism and an interactive force telecommunication system by use of virtual reality technology obtained by a Haptic Interface which is a force presentation device. Results show a possibility of the interactive telecommunication system by clarifying fundamental characteristics obtained by proposed system designs and control algorithms. As for the force sensation mechanism, the results show upper limb movement strongly affected by visual information even if the limb is trained under blind condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2009年度	4,800,000	1,440,000	6,240,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	13,900,000	4,170,000	18,070,000

研究分野：マシンインテリジェンス

科研費の分科・細目：情報学・感性情報学/ソフトコンピューティング

キーワード：力感覚、ハプティックインタフェース、コミュニケーション、触知覚メカニズム、学習、人間計測、マニピュレータおよびフィンガのアドミタンス/インピーダンス制御

1. 研究開始当初の背景

ハプティックインタフェースは力感覚提示装置として、VR（バーチャルリアリティ技術）のツールとして非常に興味を持たれている。一方、現在のマルチメディアサービスは、音声から映像（または文字情報）と発展ってきており、次のサービスとして、視覚、聴覚に加えて、力感覚（触覚）のサービスが期待されはじめています。しかし、遠隔力感覚通信については、ハプティックインタフェースを用いた応用については活発に研究がなされていたが、その機構および制御技術の観点からの研究が殆ど進んでいなかった。また、ハプティックインタフェースについては、そのVR技術の特徴を活かすことで、通常の実環境では実現できない条件下で、人間の知覚メカニズムを解明することができるが、これらの観点からの研究例はほとんど見られなかった。

2. 研究の目的

本研究では、上記に示したハプティックインタフェース技術を用いた力感覚メカニズムの解明と、遠隔力感覚通信の基本特性の解明を主目的としている。さらに、これらの問題に関連する人間の上肢運動と視覚の関連の解明、人間の指の柔らかさと動きを人工的に構築するロボットシステムの構築、VR技術および遠隔力感覚通信等のマシンインテリジェンス技術の将来のキー技術となる「学習分野」分野についても研究を進めた。

3. 研究の方法

(1)遠隔力感覚通信システム（図1）については、ロボット分野で発展したマスタースレーブ制御方式を発展させて、二人のオペレータが操作する構成とし、そのハードウェアおよび制御アルゴリズムを検討した。さらに、力感覚に与える影響の最も大きい機構と考えられる減速器に注目して、力感覚に及ぼす感性評価を行った。

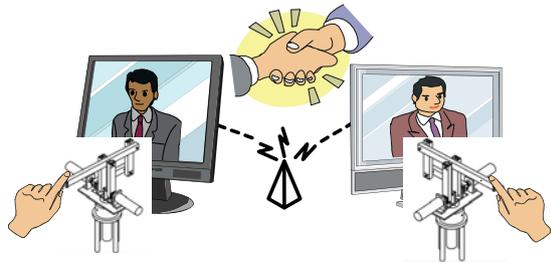


図1 遠隔力感覚システム概念図

(2)力感覚メカニズムの解明については、遠隔力感覚通信システムを用いた文字情報伝達、さらにはハプティックインタフェース単体で用いた時に、通常の実環境では構築できない条件を被験者に与えることで、人間の力感覚の知覚メカニズムの解明に迫った。

(3)人間の運動メカニズムの背後にある、人間の上肢運動に及ぼす視覚の関連解明については、上肢運動測定用のモーションキャプチャシステムと視線の動き計測する眼球計測装置を用いて実験を進めた。具体的には、上肢が対象図形を追従運動する時に、対象図形の情報を欠落させた条件下で、上肢と視線運動の関連から行動計画の遷移状態を調べた。さらに、ミュラー・リヤー錯視を用いて、上肢運動と視線の関連問題を検討し、上肢運動の背後にある視線の影響の抽出を目指した。

(4)力感覚メカニズムに関連して、人間の指の動きと柔らかさをロボットシステムで構築できるかどうかを検証した。具体的には、フィンガの可操作度を保証しながらアドミッタンス制御ができる制御アルゴリズムを構築し、フィンガ・アームシステムで、その特性評価を行った。

(5)学習分野については、強化学習を用いて生物型ロボットの行動形態の獲得に取り組み、特に、動的な運動効果の大きい大車輪ロボットを対象として、学習による行動形態獲得の研究をすすめた。

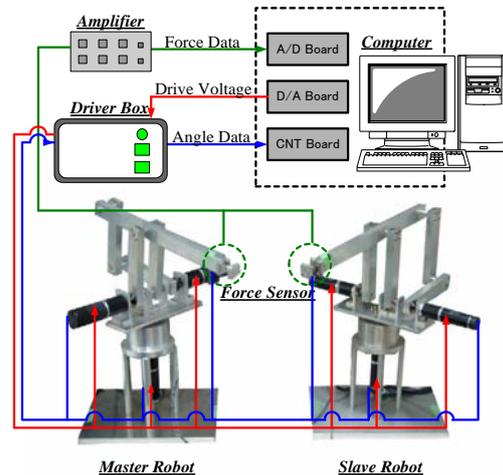


図2 遠隔力感覚システム実験装置

4. 研究成果

(1)遠隔力感覚通信システム：

本研究では、ロボット技術を用いられているマスタースレーブシステムの構成法をハプティックインタフェースを用いて図2に示すような遠隔力感覚通信システム用に構

築し、システムの基本的な問題を解明した。サーボ系の問題点を解明するために、位置サーボ型と力サーボ型を用いて、サーボ系の問題点を明らかにした。特に、サーボ系の問題点については、最初の直感と反し、力サーボ型のみでは力感覚通信に要求される機能を実現することができなかった。これは、操作端の位置同期をとることで抗力を得なければ、操作者の力を発生することができないためであり、本システムの構築には、位置サーボ機能も重要であることを明らかにしている。

そのため、遠隔力感覚通信システムとして、それらを組み合わせたコンプライアンス型とハイブリッド型の制御則を用いて検討を進めた。コンプライアンス型は、操作者の間に仮想ダイナミクス介することで、位置と力情報の関係を設定するものであり、ハイブリッド型は位置と力情報を重みづけして足し合わせる手法である。

この二つの位置追従、力追従のどちらに対しても良好な特性をえることができ、実際に被験者に操作させた場合にも、良好な力提示をすることができた。しかしながら、力感覚や操作感についての定性的な評価は、ハイブリッド型に比較してコンプライアンス型の方が高く得られた。

また、図3に実験風景を示すが力感覚通信では、音声および映像通信と比較して、操作者間のインタラクティブ性が強く、操作者の位置関係認識の問題が密接に関係することが明らかになった。



図3 実験風景

ハプティックインタフェース（力感覚提示装置）の機構で、最も力感覚に影響を及ぼすものは減速器である。この機構の影響を明らかにするために、代表的な機構として、プラネタリアギア、ハーモニックドライブギア、ワイヤ駆動、減速器なしのダイレクトドライブの4つの駆動システムを対象にして、SD法を用いて力感覚の感性評価を行った。力感覚の評価対象としてバネ要素を対象にして、実在のバネとハプティックインタフェースの仮想バネとの力感覚の差を評価とした。また、制御方式は、インピーダンス制御とアドミッタンス制御を用いた。インピーダンス制御は、仮想ダイナミクスを用いて、位置（速

度、加速度）の入力時の順ダイナミクス計算を行って力出力を計算し、その結果をサーボ系から出力するものである。アドミッタンス制御は、力入力を与えられた時の逆ダイナミクスを計算して、位置出力を求めて、その結果をサーボ系から出力するものである。

評価結果としては、機構としては減速比の高いハーモニックドライブ機構で、制御方式としては、アドミッタンス制御が好印象で実在のバネとの類似度が高いという結果が示された。しかし、バラツキもあり、人がバネに対する類似度を判断する場合、その力感覚に親近感を抱いているかどうか重要な要素であることが明らかになった。また、減速比によって、減速機構の位置・力特性が大きく変化し、中途半端な減速比では、サーボ系と減速器のお互いの特性を相殺することを明らかにし、上記の結果は高減速比で、位置制御特性を強くしたハードウェアに位置出力タイプのアドミッタンス制御を使用したもので、良好な結果が得られたものと推定される。

(2) 力感覚メカニズムの解明：

上記の遠隔力感覚通信システムを用いて、力情報を介した図形教示について研究を進めた。このシステムを用いることで、被験者は教師の運動を、力感覚を介して受け取ること、図形教示を視覚情報なしでPassive（受け身的に）に教示を受けることができる。最も単純な図形として直線の長さ教示を行い、教示後に被験者に受け取った長さを再現させた。再現条件として、目を開けた状態で視覚情報がある場合と、目を閉じた視覚情報がない場合で明らかな有意差が認められ、全ての被験者が目を開けて視覚情報がある場合に、直線を長く描く傾向にあった。これは、実験条件に依存している可能性もあるので、教示直線の方向の影響、ハプティックインタフェースの機構の影響を排除するために、機構が異なるシステムを用いて、方向についても変化させて再現実験を行ったが、同様な結果が得られた。これは、手の運動計画に視覚の影響が大きいことを示唆するものである。一方、被験者が直線を見て、それを追従することで記憶するActive教示では、直線の長さの再現時に目の開閉にともなう視覚情報の有無における有意差は認められなかった。両結果を比較すると、人間が手の運動を記憶する時には、手の運動のみならず視覚情報についても存在してとして処理しているようであり、視覚情報が入力時にあると問題は生じないが、視覚情報がない場合は、その影響が出力時の目の開閉による有意差として現れるようである。また、この有意差は、教示におけるPassive性とActive性の差にも影響を受けているのかもしれない。この結果は、

運動記憶時にも視覚情報の影響が強く介在していることを実験的に示す興味ある結果である。

また、前記の結果は教師を介した図形教示であったが、ハプティックインタフェース教師システムとして、図形表示時の描画補助制御アルゴリズムの特性を検討した。具体的には、円図形描画時の補助教示システムにおけるインピーダンス制御とアドミッタンス制御の比較検討を行ったものである。インピーダンス制御は、位置誤差に対応した復元力を生み出すもので、操作者が図形を描画した時に仮想ダイナミクスのパネ剛性が大きくなると復元力が大きくなる。一方、アドミッタンス制御は、操作者の操作力に対応する目標位置修正を行うもので、操作端を動かす駆動力的に働くものである。この仮想パネは運動の大きさを左右するパラメータとして逆数的に作用し、仮想パネ係数が小さい時には、操作端が大きな運動をするのでパワーアシストされたような感覚となる。実験結果から評価すると、インピーダンス制御は目標値に修正する拘束力のような感覚となり、アドミッタンス制御は操作端を目標値に動かすパワーアシスト的な感覚となり、両者方式とも、仮想パネを変化させて調整した場合、正確性と操作性はトレードオフの関係となることを明らかにした。

(3) 人間の四肢運動と視覚情報の関係の解明：

人間は外界からの情報取得の多くを視覚に依存しており、それゆえ視覚情報は運動に大きな影響を与える。この問題を解明するために、四肢が図形追従運動を行う際の対象図形の情報濃度を変化させた時に、四肢運動と視線運動の関連の解明、ミュラー・リアー錯視問題における四肢運動に与える視覚情報の影響解明の二つ観点から検討を進めた。

四肢追従運動の対象図形の情報濃度の変化については、対象図形を正確な円情報から、順次、一部の円図形情報を欠落させていくことで、視線と四肢の動きから軌跡追従運動が、どのような変化していくかを調べたものである。

対象図形の情報が豊富にあり、全体像がイメージ出来る時は、視線は対象図形を追従しながら、視線を目標値として、指が追従するような運動を示す被験者が多い結果が得られた。この運動は、対象図形を目標値とするフィードバック制御を行っているようである。続いて、次第に対象図形の情報を欠落させていくと、上記の運動のプロセスで、欠落部分については視線がショートカットするような動きをするようになる。さらに、対象図形の欠落が大きくなり、対象図形の全体像がイメージできなくなると、視線は図形の特

徴点に停留し、視線と関係なく内部モデルを用いてフィードフォワード的に指の運動が行われる例が多くなる。

この視線の動きを観察することで、円図形情報が少なくなるに際して、フィードバック的な運動から、フィードフォワード的な運動の遷移を明らかにすることができた。すなわち、対象図形情報が多い場合では、図形を視線が追従することで、サブゴールを作る教師信号有のフィードバック的な運動となり、対象情報が少なくなると図形を教師信号とはできず、内部モデルを用いた教師信号無のフィードフォワード的な運動となっていく。また、上肢運動も、フィードバック的な場合は、目標値に追従するような動作であり描画時間は長くなるが、図形描画精度は向上する。一方、フィードフォワード的になると教師信号がない状態なので、描画時間は速くなるが、図形の描画精度が悪くなる。

この研究結果は、視線の動きと上肢の運動を対応させることで、対象図形の情報量の大小で、教師信号有のフィードバック的な運動から教師信号無の状態でも内部モデルを用いたフィードフォワード的な運動に遷移する可能性を明らかにした。

一方、錯視は人間が認識する知覚と実際の図形の物理特性にギャップを与えるため、それらを用いた人間の動特性の研究が幅広く行われている。本研究では、ミュラー・リアー錯視図形を上肢運動と視覚情報の入力情報とし、四肢運動を動作出力とした場合の軌跡を測定し、その軌跡から得られた錯視量の変化を観察することで、記憶駆動条件（情報を一時的に記憶し、その情報をもとに動作を行う）下で、視覚情報が人間の四肢運動計画にどのように関連しているかを解明することを試みた。実験結果は、記憶駆動条件下における人間の四肢運動は、視覚的な入力と運動的な入力を統合的に判断して運動計画づくりあげており、具体的には運動計画は視線情報との関連で得られる運動感覚に依存していることが推定される結果が得られた。この結果は、項目(2)の力感覚を介した図形表示における視覚情報の影響と同様な結果を示唆しており、興味ある結果となっている。

(4) マルチフィンガ・アームロボットシステムを用いた人間との相互作用時の人間の指のような動きと柔らかさの実現：

このようなアルゴリズムを構築するために、人間を模して突き指をしないような指の姿勢を保持するために、フィンガの可操作度を保証しながら、フィンガに柔らかさとしてインピーダンス制御（アドミッタンス制御）を施したものである。研究対象としたロボットシステムは、フィンガはトルク制御および位置（速度）制御機能を有するシステムで、

また、アーム（マニピュレータ）は位置（速度）制御機能を有するシステムである。この制御機能の特徴から、フィンガシステムを主システムとして用いて、アームシステムをフィンガの可操作度を保証する従システムとして構築した。

人間との相互作用時におけるフィンガの柔らかさを実現する力制御機能には、インピーダンス制御とアドミッタンス制御を用いて比較検討を行った。指の可操作度の保証については、可操作度最大ベクトル方向にフィンガの指先を動かす頂点探索法と、最適化アルゴリズムを用いて、局所的に可操作度を最大化するファイナガ姿勢を探索する局所最適化法を用いた。これらの手法を組み合わせで比較検討を行った。

アドミッタンス制御をベースにした手法は、フィンガおよびアームは位置制御機能を用いており、両者の制御機能の整合性もよく、フィンガの可操作度を保持しながら、定量的には所用の剛性と粘性を実現でき、定性的にも、人間の指との接触している力感覚を与えるフィンガの運動を実現することができた。ロボットとの接触運動をしている操作者には、人間の指との接触感を感じることができた。

一方、インピーダンス制御をベースにした手法は、フィンガはトルク制御機能、アームは位置制御機能を用いた構成であり、両者の制御機能の相性が悪く、前記の手法で組み合わせでは構成できない制御構成も存在し、制御系が構成できても、センシングのタイミング遅れの問題も発生し、剛性および粘性の誤差が大きくなる例も見られた。

この手法を、複数可操作度を総合評価する評価関数を作成し、指1本から複数の指に拡張した。複数の指でも、可操作度を保持しながら仮想ダイナミクスを実現することができた。このアイデアは可操作度を人工的なアルゴリズムで保証するものであるが、システムの構成が複雑になれば、アルゴリズムの構成も複雑になってゆく。しかし、人間は複数指を有する複雑なシステムになっているが、このような人工的なアルゴリズムの拡張ではなく、より自然なアルゴリズムで実現されており、その基本的なアルゴリズムの検討に研究を進めた。

人間においては、指と腕では異なったダイナミクスを有しており、このダイナミクスの差が指と腕の自然な動きを実現していると予想して、フィンガとアームにそれぞれ異なる仮想ダイナミクスをアドミッタンス制御で付与することで、その実現を図った。フィンガの剛性をアームの剛性よりは大きく設定することで、指の可操作度を保持しながら、指の柔らかさを実現する仮想ダイナミクスを与えることができた。この自然なアルゴリ

ズムは、人工的な上記のアルゴリズムと比較して、指の可操作度を完全に閾値以上に保証はできないが、非常にシンプルな構成で人間の指の動きと柔らかさを実現しており、今後の人間との対応において興味ある結果を示すことができた。

(5) 「学習」を用いた生物型ロボットの行動形態の獲得：

この分野については、強化学習を用いた大車輪ロボットの行動形態獲得については研究をすすめた。大車輪ロボットは動的な運動が大きく、通常のロボットではマルコフ性が保証できない問題となる。強化学習はマルコフ性の保証が必要であるが、大車輪ロボットの非マルコフ性の影響は確率的な挙動として現れることを解明し、この確率的挙動を克服して学習する手法を考案した。また、大車輪運動には、運動初期の励振モードと大車輪運動を実現する際の大車輪モードの二つの行動指針が存在することを明らかにし、本研究では両モード共通の報酬をロボットの姿勢変化から探索して求めた。さらに、この報酬を用いると大車輪運動は実現できるが、確率的挙動のために停滞ループが存在し、成功するためにはそれを脱出する必要ためには確率的挙動に依存し、大車輪達成時間にバラツキが存在することを明らかにした。これらの結果は、動的な運動効果の大きい強化学習を用いた行動形態の獲得には、確率的な観点からの検討が必要であることを明らかにしている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計6件）

- ① 堀貴之、山田大輔、黄健、杉内肇、藪田哲郎、複数可操作度総合評価によるマルチフィンガ・アームロボットのアドミッタンス制御、日本機械学会論文集C、査読有、Vol. 76、No. 763、2010、pp. 655-664
- ② 坂井直樹、川辺直人、原正之、豊田希、藪田哲郎、強化学習を用いたスポーツロボットの車輪運動の獲得とその行動形態の考察、計測自動制御学会論文集、査読有、Vol. 46、No. 3、2010、pp. 178-187
- ③ 芦高直哉、原正之、反保紀昭、黄健、藪田哲郎、遠隔力感覚コミュニケーションにおける基礎的なシステム構成法と感覚面からの基本評価、日本機械学会論文集C、査読有、Vol. 75、No. 752、2009、pp. 1000-1008
- ④ 小坂翔、原正之、黄健、藪田哲郎、ミューラー・リヤー錯視による人間上肢運動変化、計測自動制御学会論文集、査読有、Vol. 45、No. 1、2009、pp. 69-71

- ⑤ Jian Huang、Daisuke YAMADA、Yusuke NAKAMURA、Masayuki HARA、Tetsuro YABUTA、Cooperative Impedance Control of a Finger-Arm Robot by Regulating Finger's Manipulability、Journal of System Design and Dynamics、査読有、Vol.3、No.5、2009、pp.756-767
- ⑥ 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、査読有、Vol.74、No.748、2008、pp.2994-3003

〔学会発表〕（計6件）

- ① Nozomi TOYAD、Ryouhei YAMAMOTO、Jian Huang、Tetsuro YABUTA、Analysis of Eye Movement during Generation of a Trajectory using Human Upper Limb、Proc. of IEEE Robio、2010、pp.89-91
- ② Masayuki HARA、Naoto KAWABE、Naoki SAKAI、Jiang Huang、Hannes Bleuler、Tetsuro YABUTA、Consideration on Robotic Giant-swing Motion Generated by Reinforcement Learning、Proc. of IEEE IROS、2009、pp.4206-4211
- ③ Masayuki HARA、Sho KOSAKA、Jian Huang、Hannes Blueier、Tetsuro YABUTA、Muler-Lyer Illusion Effect on a Reaching Movement in Simultaneous Presentation of Haptic/Kinesthetic Cues、Proc. of IEEE IROS、2009、pp.1253-1258
- ④ Jian Huang、Daisuke YAMADA、Takayuki HORI、Masayuki HARA、Tetsuro YABUTA、Integration of Impedance Control and Manipulability Regulation for a Finger-Arm Robot、Proc. of IEEE ICRA、2009、pp.4006-4012
- ⑤ Masayuki HARA、Naoya ASHITAKA、Noriaki TANBO、Jian Huang、Tetsuro YABUTA、Consideration of Weight Discriminative Powers for Various Weight Changes Using a Haptic Device、Proc. of IEEE IROS、2008、pp.3971-3976
- ⑥ Jian Huang、Sho KOSAKA、Hironori NOSAKA、Tetsuro YABUTA、Moving Distance Error of the Fingertip During a Memory Based Movement without Using Vision、Proc. of IEEE DHMS、2008、pp.550-555

〔図書〕（計1件）

- ① Jian Huang、Masayuki HARA、Tetsuro YABUTA、Controlling a Finger-Arm Robot to Emulate the Motion of the Human Upper Limb by Regulating Finger Manipulability、INTEC、“Motion Control” edited by Federico Casolo、2010、pp.297-314

〔その他〕

ホームページ等

<http://yabsv.jks.ynu.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藪田 哲郎 (YABUTA TETSURO)

横浜国立大学・工学研究院・教授

研究者番号：30323926

(2) 研究分担者

黄 健 (KOU KEN)

近畿大学・工学部・准教授

研究者番号：10282956