

## 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24年6月9日現在

機関番号： 32657  
 研究種目： 基盤研究（C）  
 研究期間： 2009 ～ 2011  
 課題番号： 21560274  
 研究課題名（和文） 双方向遠隔操作システムにおける  
 人間の通信遅延適応能力の評価手法に関する研究  
 研究課題名（英文） Evaluation of adaptation ability to transmission delay  
 in bilateral tele-operation system.  
 研究代表者  
 汐月 哲夫（SHIOTSUKI TETSUO）  
 東京電機大学・未来科学部・教授  
 研究者番号： 10162570

## 研究成果の概要（和文）：

双方向遠隔操作時における人間の通信遅延に対する適応能力を評価できるシステムとその評価手法を確立することを目的として実験的研究を行なった。特に、テレビ会議システムと連動できる実験装置を構築し、視覚と力触覚の混在する状況での通信遅延に対する人間の適応能力に着目した。ひとつの知見として、PID制御器モデルのパラメータの変化として遅延適応能力を評価できる可能性が確認された。

## 研究成果の概要（英文）：

The aim of the research is establishing an evaluation method for adaptation to transmission delay. According to the analysis of experimental data a PID model is obtained as a candidate for index of adaptation.

## 交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度			
2008年度			
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野： 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、双方向遠隔操作

## 1. 研究開始当初の背景

近年の情報通信ネットワークの発展はめざましく、黎明期の接続機能を保証する時代から、広帯域・大容量・低遅延・低損失という品質保証の時代を迎えている。さらに、組み込みシステムや無線通信技術の発達や IPv6 をはじめとするネットワーク管理・運用技術の発展により情報通信サービスの遍在性（ユ

ビキタス）とともに、実世界との相互作用が重要視される時代となった。このような技術的発展により、交換されるメッセージの表現形式は文字や記号、静止画・動画など視覚・聴覚によるものだけでなく、力触覚、嗅覚など五感によるメッセージ交換も可能となった。特に、力触覚通信についてはロボット工学の分野においてマスタ・スレーブシステムや遠隔操作システム開発の研究として取組

まれてきた。

このようなシステムの開発研究について平成8年に着手し、その問題点を明らかにするとともに、ロバスト制御理論を活用した制御系設計手法を提案するとともに、その有効性を検証すべく実験装置を製作して、インターネット上での実験を行なうことでその有効性評価の研究を進めてきた。

これらの研究では、力触覚伝達は本質的に操作者の操作力に対する反力の返信を含んでおり、制御工学的にはネットワーク上にフィードバックループを有するネットワーク化制御系(Networked Control System)を構成することが明らかにされた。特に、通信遅延に対して品質保証が困難であるベストエフォート型パケット通信システムであるインターネット(The Internet, TCP/IP)では安定なシステムの実現が困難であるとされていた。これに対してロバスト制御理論やむだ時間系に対する予測制御理論などがこの問題解決に有効であり、情報伝達にとまらぬ遅延や揺らぎに対して頑強なシステムを構成可能であることを理論的および実験的に証明した。

しかし、ロバスト制御理論を用いた提案手法は、遅延によって発生する閉ループ系の不安定化現象を高周波数帯域のゲイン低減によって補償するという保守的な構造であるため、制御装置が本来有するはずの性能を十分に発揮できないという問題がある。この問題に対しても、パケット通信プロトコルが有するタイムスタンプを活用した予測予見制御系を提案し、その有効性をシミュレーションおよび実験によりある程度の性能改善が可能であることを確認している。

このように、ネットワーク上に構成されたフィードバック制御系の安定性を保証することで力覚情報通信システムが実現可能であることは確認できた。しかし、ネットワークを介した操作入力端末から操作対象端末までの通信遅延そのものを無くしたり低減化することは因果律の関係から不可能であることが明らかになった。

## 2. 研究の目的

遅延をとまらぬネットワーク上に構成したフィードバック制御系は、本質的にその通信遅延をむだ時間として内在しており、マスタースレーブのような双方向通信機能が要求されるシステムにおいては各操作端末間の応答遅延は不可避である。この本質的遅延を克服して力覚情報通信を行なうには操作者自身による遅延補償が必要である。

日常生活において人間が遅延補償能力を獲得できることを経験的に知っている。例えば、自動車の運転においては道路や車の状況を把握し、短時間未来の状況を推測しながら現時点での適切な操作を決定し実行している。スポーツ競技や楽器演奏などでも同様の状況が観察できる。通信遅延が顕著なテレビ会議システムにおいても、遅延に応じた「間」を会話のなかに取りることによって円滑なコミュニケーションを実現している。

このように、人間は非日常であるネットワークを介した遠隔操作という作業に対しても、その遅延に適応して満足する作業を遂行することができると思われる。

本研究では、「人間は遅延に対する適応能力を有する」という仮説を適応能力の定量的評価実験により証明し、人間の遅延に対する適応メカニズムのモデルを得ることが目的である。すなわち、情報通信ネットワークを介して力触覚と動きを多地点で共有する双方向遠隔操作システムにおいて、通信遅延に対する人間の適応能力を評価し、遅延補償の適応メカニズムを解明する。すなわち、「人間は遅延に対する適応能力を有する」という経験的には知られている仮説を定量的評価実験により証明し、人間の遅延に対する適応メカニズムのモデルを得ることが目的である。特に、適応能力の限界、適応能力の個人差や分布、適応能力の決定要因などに着目した実験を行なう。さらに、人間の適応メカニズムに機械が協調してシステム全体の機能を最適化する人間調和型高臨場感実時間通信システムを構築することを目指す。

## 3. 研究の方法

研究の方法として、簡単な実験装置を用いて人間の上腕の軌道追従操作に着目し、操作者を線形システムと仮定してその適応・熟練過程をシステム同定理論のモデリング技術によって解明する方法をとった。簡単な実験装置を構築して多くの実験データを収集し、その解析を通して評価手法を探ることから始めた。

### (1) 実験装置の製作

実験装置としては、DC サーボモータ（ギアなし）とロータリエンコーダを備えた2つの回転円盤型操作端末、遅延シミュレータおよびIPプロトコルで通信できるネットワーク環境により構成した。2端末には対称位置制御型制御系をロバスト制御理論にもとづいて設計して実装し、双方向に力覚情報通信が実現できるように設計した。写真は製作した実験装置の外観である。

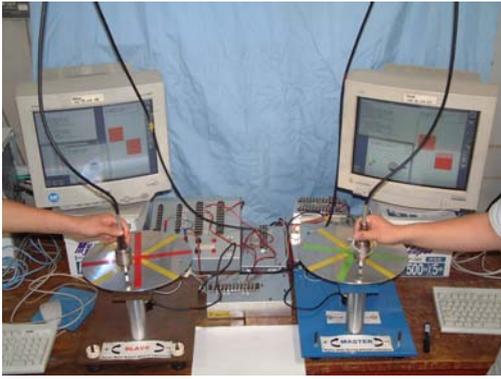


図1： 実験装置の外観

これまでに予備実験として視覚情報を伴わない力覚だけの通信実験装置を開発し、インターネットや同様の仕組みを持つコンピュータネットワークを介して、力情報のコミュニケーションすなわち力覚情報通信の可能性について検証し、その可能性と限界について研究を進めてきたが、そこで得られた成果として、ロバスト制御理論を活用することにより安定な力覚情報通信系が構成できること、通信遅延の揺らぎや大きさが事前情報として得られる場合には、それを克服したシステムが構築できることが理論的にも実験的にも確認できている。しかし、図1の双方向遠隔操作装置を同一の部屋に互いに直視できるように配置するとその操作性は格段に向上することが経験的にも実験的にも確認できる。すなわち、視覚情報の存在は遠隔操作システムにおいて大きな役割を果たしている。

#### 【平成21年度】

本研究の初年度では、力覚+視聴覚情報の通信装置を実現する。そのために、本研究で専有できる専用のTV会議システム1組を購入し(H21申請分)、自作の力覚情報通信装置と組み合わせて使用できる環境を整備した。実験装置の製作においてはこれまで提案してきた力覚情報通信機能、安定化制御機能、データ収集機、モニタリング機能とともに、本研究で提案する遠隔操作性評価アルゴリズムを、リアルタイムOSのプロセスとして実装した。特に、通信遅延を模擬する機能について、実際のコンピュータネットワークの特性を模擬できる工夫をした。さらに、現有の双方向遠隔操作システムの老朽化部を修復するとともに、UML2.1など今日のソフトウェア工学的手法を活用して、実験状況の提示機能、データ収集機能を強化するためのソフトウェア開発を行ない、実験環境の整備を行なった。製作した実験環境のもとで次のような実験を行なった。

(1) 上腕による軌道追従操作実験による熟達度評価： 回転円盤の回転操作における目標軌道追従能力を、オーバーシュートや安定

性に着目した評価手法、応答速度や立ち上がり時間に着目した評価手法などにより評価する実験を行なった。評価アルゴリズムと評価実験装置を上記遠隔操作実験システムに組み込み、学生を主体とした被験者による評価実験を多数行なって主観評価と客観的指標との相関を解析することにより、人間の遅延に対する適応学習能力の評価手法を検討した。

(2) 実験およびデータ収集 リアルタイムOSや組み込み用小型コンピュータに本アルゴリズムを実装し、学内のLANを介して接続可能な被験者との実験を行なった。当初はRT-Linuxを用いる予定であったが、諸事情によりRTAIを用いることとした。被験者の個体差に着目した実験、右手と左手の違い、学習と疲労に着目した実験を、通信遅延にもなう操作性の劣化を人間はどのようにして克服するのかという観点から実験計画を立てて実験を行なった。

(3) データ解析と適応モデルの構築： MATLABを用いた適応レベル判定解析を行なった。すなわち、各種信号処理アルゴリズムを駆使して機械や操作に馴染んだ程度を評価した。さらに、人間を動的システムとみなした場合のモデリングを行なう。特に、PID制御器としての構造や、予測+フィードバック系からなる2自由度モデルの仮説を検証するという観点からデータ解析を行なった。

#### 【平成22年度】

平成22年度はさらに下記の内容で研究をすすめた。

(1) 評価手法の改善 前年度のデータ解析にもとづき、目標値追従性能の評価方法、適応能力の評価方法等を再検討し、実験の方法、データ収集および解析方法について検討した。

(2) 多数の被験者による実験とデータ収集 学外とのインターネット接続による遠隔操作実験デモンストレーションと、適応能力実験(研究協力者：学外数名)

(3) データ解析と適応モデルの構築 人間の遅延に対する適応モデルについて精査する。特にフィードフォワード部分のパラメータ分離と逆システムの完成の検証方法について検討する。

(4) 人間の遅延適応能力を考慮した制御系設計の検討 通信遅延に対する人間の適応能力を前提に、フィードバック制御系のパラメータを人間の熟達レベルに応じて変化(順応)させるアルゴリズムを検討する。

#### 【平成23年度】

最終年度は以下のような観点からの考察を行なった。

(1) テレビ会議システムと双方向遠隔操作システムを組み合わせた視聴覚+力覚双方向遠隔情報交換システムで遠隔操作能力評

価実験を行なった。特に、インターネット上の多数の被験者に対して、年齢、健常/障害、利き腕、など異なる条件下のもとで遠隔操作実験を行ない、視覚情報と力覚情報の遅延に対する適応能力について評価実験を行なった。

(2) 収集したデータをもとに、人間の通信遅延に対する適応能力の評価手法提案について検討し、評価方法の確立を目指す。

(3) 収集したデータを元に、人間の遅延補償の適応メカニズムのモデルを提案する。特に、PID型モデルとフィードバック+予測システムの2自由度モデルに着目してモデリングの適合度を収集したデータをもとに検討する。さらに、その適応能力を考慮した遠隔操作システムを設計する。

(4) 遅延補償の適応メカニズムを考慮した人間協調型高臨場感システムの構築を検討する。

#### 4. 研究成果

本研究により以下の成果が得られた。

(1) 低品質ネットワークにおける各種リアルタイムアプリケーションのための人間の品質補償能力の定量的判定指標として、人間のPIDパラメータはひとつの候補として検討できることが明らかになった。すなわち、人間をPID制御器としてモデル化し、実験データをこのモデルにフィッティングすることにより学習モデルをPIDパラメータの変化として捉えた結果、遅延補償の熟達を比例ゲインの低下、Dゲインの増加で評価できるのではないかと推測をすることができた。被験者の個体差や実験条件の再現性など不確定要素が多く、結論を得るには至っていないが、より再現性の高い実験を目指して装置や実験方法の改良を行なうことにより明確な特徴が得られると考えられる。

(2) ネットワークシミュレータの開発：通信遅延を模擬する機能について、実際のコンピュータネットワークの特性を模擬できる工夫を組み込んだネットワークシミュレータ(ソフトウェア)をPCおよびマイコン上で開発した。

(3) ロバスト制御理論の双方向遠隔操作システムへの有効性検証実験：製作した実験環境を利用して力覚情報通信実験を行なった。特に、力追従性および安定性に着目した。また、ロバスト制御理論により系の安定性が改善されることの検証ができた。

(4) マルチモーダル通信の遅延補償補間特性：ビデオコミュニケーションシステムによる動画通信の遅延特性について、計測装置、計測手法を開発しながら通信遅延の実データを収集した。特に、遅延測定手法について自作の計測装置を各種考案し、その有効

性を確認しながら改良を重ねた。

(5) 情報通信分野と制御理論の融合研究として、リアルタイム性を有しないベストエフォート型のインターネットにおいても、力覚情報通信のようなリアルタイム性を要求するアプリケーションは、人間の遅延適応能力を含めて考えれば実現可能であることが検証された。

(6) 人間の制御系モデルとして一般的である2自由度制御系モデル(フィードバック+フィードフォワードモデル)におけるフィードフォワードの遅延補償機能の獲得メカニズムの関連についてひとつの知見が得られた。

(7) 人間と機械の協調による高臨場感通信システムの構築への足がかりのひとつが得られた。

(8) 少子高齢化が急速に進む我が国においては、機械が人間生活をサポートするという考え方は重要である。その際、人間は学習する動物であることを機械は知っておく必要がある。さもなければ機械は同じ動作の繰り返し、かえって人間に精神的ストレスを与える存在になってしまう可能性があるからである。この研究の成果は、人間社会に溶け込んで人間生活に必要なサポートを適時判断して提供することが可能であり、来るべき超高齢社会における人間と機械の共生を考える上で大きな示唆を与えることができる。

#### 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)

[学会発表] (計 1 件)

三宅雅俊, 上野雄貴, 汐月哲夫: 双方向遠隔操作システムの操作性と通信遅延に関する実証実験研究、ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012 in 浜松, 2A2-P04, 2012年5月29日

[図書] (計 2 件)

Shiotsuki, T.: An Application of Robust Control for Force Communication Systems over Inferior Quality Network, Chap11 in Challenges and Paradigms in Applied Robust Control, Ed. Andrzej Bartoszewicz, Intech, 373/390 (18pages) (2011)

汐月哲夫: 「線形システム解析」, コロナ社 (226頁)(2011)

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

汐月 哲夫 (SHIOTSUKI TETSUO)  
東京電機大学・未来科学部・教授  
研究者番号: 10162570