

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3月31日現在

機関番号：32612

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860055

研究課題名（和文） ヘテロジニアスハプティックネットワークにおける遠隔空間共有技術の研究

研究課題名（英文） Research on Remote-Space Sharing in Heterogeneous Haptic Networks

研究代表者

久保 亮吾 (KUBO RYOGO)

慶應義塾大学・理工学部・助教

研究者番号：00582199

研究成果の概要（和文）：ハプティック通信は遠隔地に触覚情報を伝送するための基盤技術である。本研究では、ハプティック通信における触覚デバイスの高度化およびネットワーク環境の多様化を考慮して、遠隔操作システムの制御系設計および評価を行った。遠隔操作システムとしては、1対1のバイラテラルシステムと1対多のマルチラテラルシステムを対象とした。また、ネットワーク遅延が制御性能に及ぼす影響を評価し、ネットワーク状況に応じた適切な制御系設計を実現するクラウド型ハプティック通信技術および高信頼ハプティック通信技術を提案した。

研究成果の概要（英文）：Haptic communication is a fundamental technology to exchange haptic information between master and slave devices. In this research, we designed and evaluated several teleoperation systems with consideration for the enhancement of haptic devices and the diversification of communication networks. We focused on a bilateral control technique for point-to-point teleoperation and a multilateral control technique for point-to-multipoint teleoperation. In addition, we evaluated the effect of time delay on control performance. A cloud-based haptic communication technology and a dependable haptic communication technology to achieve appropriate controller design according to any network conditions were proposed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,120,000	336,000	1,456,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,380,000	714,000	3,094,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：ハプティクス、遠隔操作、バイラテラル制御、マルチラテラル制御、制御通信、ネットワーク化制御、通信品質、むだ時間

1. 研究開始当初の背景

音声、映像をはじめとしたマルチメディア通信技術の発展に伴い、遠隔地間での空間共有を目的とした研究が盛んに行われている。

遠隔地間での空間共有は、ヒト、モノの移動を減らすことができるため、省エネルギー社会の実現に大きく貢献することが期待されている。また、メディア間連携などによる新

たなネットワークサービスの創出も期待されている。

空間共有を行う上で最も重要な感覚の1つである力覚ないし触覚の通信技術、いわゆるハプティック通信技術については多くの研究開発が進められているものの、医療用ロボットや宇宙用ロボットなど特定のアプリケーションを対象としたものがほとんどである。アプリケーションが特定されている場合には、あらかじめ各種アプリケーションに応じた通信品質（QoS: Quality of Service）の回線を用意することや、端末の構造を把握しておくことが可能であり、比較的容易に制御系の設計を行うことができると考えられる。

将来的にブロードバンド通信環境が整備されると、ユーザは各種のマルチメディア端末をあらゆる場面でネットワークに接続し、遠隔地間で空間共有を行う可能性がある。結果的に、通信回線や端末がユーザのアクセス形態や嗜好によって大きく異なるヘテロジニアス環境を生み出すことになる。ヘテロジニアス環境におけるハプティック通信では、通信環境や端末の構造をあらかじめ特定しておくことが難しいため、よりフレキシブルかつスケーラブルな制御構造、ネットワーク構造が必要となる。

2. 研究の目的

ハプティック通信技術は遠隔地に触覚情報を伝送するための基盤技術として幅広い応用が期待されているが、既往技術は医療用ロボットや宇宙ロボットなどの特定用途への適用を前提としており、通信環境や端末構造が単一ではないヘテロジニアス環境にはそのまま適用することができない。ヘテロジニアス環境におけるハプティック通信ではヘテロジニアスを吸収する制御構造やネットワーク構造の検討が必要となる。

そこで本研究では、ヘテロジニアス環境におけるハプティック通信技術の確立を目指し、通信遅延が制御性能に与える影響の評価を行った。また、ネットワークのQoSを考慮した柔軟な制御構造およびネットワーク構造の提案を行った。本研究の目的は、ヘテロジニアス環境におけるハプティック通信システムの性能評価指標を提示し、フレキシブルかつスケーラブルな制御構造およびネットワーク構造を明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究では、ヘテロジニアス環境におけるハプティック通信技術の確立を目指し、ハプティック通信システムの性能評価指標の提案、クラウド型ハプティック通信システムの提案、高信頼ハプティック通信のための制御構造の提案を行った。

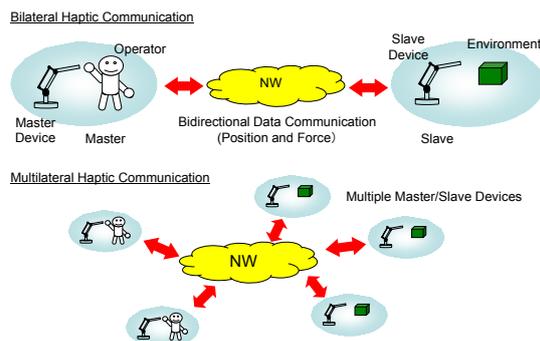


図1：バイラテラル/マルチラテラル遠隔操作

(1) ハプティック通信システムの性能評価指標

図1に示すように、1対1のハプティック通信システムであるバイラテラル遠隔操作システムの性能評価には、「透明性」と呼ばれる指標が用いられる。一方、多対多のハプティック通信システムであるマルチラテラル遠隔操作システムの性能評価指標についてはあまり検討されてこなかった。ヘテロジニアス環境においては、多数のハプティック端末が同時にネットワークにアクセスし、多数のハプティック端末間で力覚情報を共有する状況が増えると予想されるため、マルチラテラル遠隔操作システムに対する評価指標を定義することは重要である。そこで、本研究では、バイラテラル遠隔操作システムの評価指標である「透明性」の定義をマルチラテラル遠隔操作システムに拡張することを検討した。

①マルチラテラル遠隔操作

ハプティック通信においては、複数のハプティック端末間で位置情報および力情報を伝送し、再現することが求められる。例えば、人間が1台のマスタ側ハプティック端末を操作し、複数のスレーブ側ハプティック端末はマスタ側ハプティック端末に追従するように動作する。スレーブ側ハプティック端末が外部環境に接触した場合、環境反力をすべてのハプティック端末で共有することになる。

3台のハプティック端末を用いる場合、3台のハプティック端末間で位置情報と力情報を相互にやり取りし、全てのハプティック端末の位置を一致させ、かつ全てのハプティック端末に加わる力の和を0にすることを目標に制御系を構成することができる。1台のハプティック端末（マスタ端末）を人間が操作し、他の2台のハプティック端末（スレーブ端末）は物体に接触することを仮定する。このとき、操作者と物体との間で仮想的に作用反作用の法則が成り立つことになるため、操作者は物体の感触をあたかも直接接触して

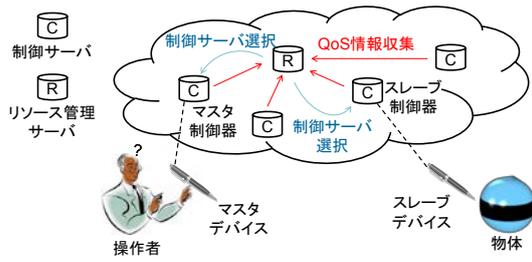


図2：クラウド型ハプティック通信システム

いるかのように感じることができる。しかしながら、通信遅延が存在する場合にはマスタの操作性が低下するという問題があった。このようなマスタ・スレーブ間での位置情報および力情報の伝送特性を評価するためには、何らかの性能評価指標が必要である。

②マルチラテラル遠隔操作システムの性能評価指標

本研究では、 n 台のハプティック端末間の位置情報および力情報の伝送特性を評価するための指標として、 $n \times n$ 次元のハイブリッド行列 H_n を定義した。特に、ハイブリッド行列の 1 行 1 列成分 (ハイブリッドパラメータ H_{11}) はマスタ端末の位置 x_1 からマスタ端末に加わる力 f_1 までの伝達関数を表している。つまり、マスタ端末を動かしたときに操作者が感じる力 (操作力) の大きさを表していると言える。ハイブリッドパラメータ H_{11} のゲインはできるだけ小さい値であることが望ましい。

(2) クラウド型ハプティック通信システム

ヘテロジニアス環境においては、ハプティック端末の高機能化、通信環境の多様化に対応するために、端末情報やネットワークの QoS 情報を統括管理し、制御系を柔軟に変更していく必要がある。そこで、マスタ・スレーブ間の位置・力伝送特性を考慮して適切な力覚通信用制御サーバを選択するクラウド型力覚通信サービスについて検討した。

従来のハプティック通信システムでは、ハプティック端末と制御器は一体化されており、ネットワークの QoS に関する情報収集や端末間のユーザ体感品質 (QoE: Quality of Experience) に関する情報交換が適切に行えないという課題があった。そこで、本研究では図 2 に示すようなクラウド型力覚通信システムを提案した。クラウド上には端末制御を行うための制御サーバおよび制御サーバとハプティック端末との間の QoS 情報を収集するためのリソース管理サーバが分散的に配置されている。ハプティック端末はサービス開始時にリソース管理サーバにアクセスし、QoS および QoE を考慮して適切に選択された

表1：マルチラテラル制御系の分類

	Case 1	Case 2
Logical Link (Position)		
Logical Link (Force)		

制御サーバがそれぞれのハプティック端末に割り当てられることになる。

(3) 高信頼ハプティック通信のための制御構造

ハプティック端末間の通信遅延が大きい場合には、マスタ端末を操作する際にスレーブ端末に引っ張られるような操作力を感じる。これは、通信遅延の影響によりマスタ・スレーブ端末間で位置情報が同期されていないことに起因する。本研究では、ハプティック端末間の論理的な情報結合に着目し、通信遅延を有するマルチラテラル制御系の分類を明らかにした。また、一部の物理リンクが切断された場合の制御系の再構築手法を提案し、制御系の性能評価を行った。

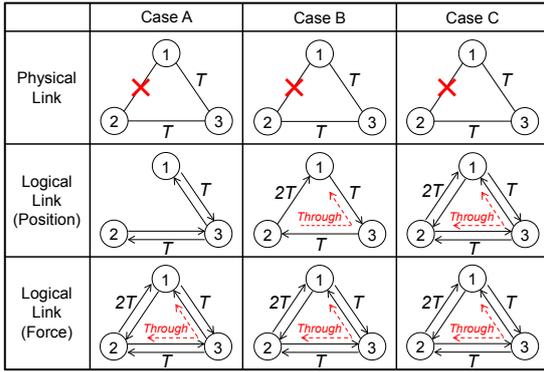
①情報結合による制御系の分類

表 1 に 3 台のハプティック端末を用いた場合の位置情報の情報結合に基づいたマルチラテラル制御系の分類を示す。各ノードは 3 台のハプティック端末を表しており、それぞれのハプティック端末間は通信遅延 T の物理リンクで接続されているものとする。Case 1 は本研究で提案した制御系の情報結合であり、Case 2 はバイラテラル制御系の拡張により実現した制御系の情報結合である。位置情報および力情報がノード間でやり取りされ、それぞれのノードに具備されている制御器によって制御参照値が算出される分散型の制御系となっている。ただし、Case 1 の場合、ノード 1 はノード 3 の位置情報をノード 2 を経由して取得しているわけではなく、ノード 2 がノード 3 の位置情報をもとに自身の制御を行った結果として出力されるノード 2 の位置情報を取得している。

②高信頼ハプティック通信技術

例えば、表 1 に示した装置間の物理リンクの中で、リンク (1, 2) のみが切断されたと仮定する。このとき、Case 1、Case 2 のいずれの場合であってもノード 1 とノード 2 はリンク (1, 2) を介して位置情報および力情報のやり取りを行うことはできない。そこで、迂回路を設定し、ノード 3 を介して情報交換を行

表2：リンク (1, 2) 切断時の制御系



う。表2にノード1とノード2との間の位置情報の情報結合に基づいたマルチラテラル制御系の分類を示す。Case A、B、Cのすべてにおいて、ノード1はノード3を介してノード2の力情報を取得し、ノード2はノード3を介してノード1の力情報を取得する。したがって、ノード1とノード2との間の情報結合に伴う通信遅延は $2T$ となる。

Case Aでは、ノード1はノード3がノード2の位置情報をもとに自身の制御を行った結果として出力されるノード3の位置情報を取得する。逆に、ノード2はノード3がノード1の位置情報をもとに自身の制御を行った結果として出力されるノード3の位置情報を取得する。Case Bでは、ノード1はノード2の位置情報をノード3を経由して取得する。Case Cでは、ノード1はノード2の位置情報をノード3を経由して取得する。逆に、ノード2はノード1の位置情報をノード3を経由して取得する。Case BおよびCにおいて、ノード1とノード2との間の情報結合に伴う通信遅延は $2T$ となる。

③性能評価

表2に示したCase A、B、Cそれぞれについて、通信遅延に起因して発生する操作力の大きさを比較した。1台（マスタ端末）を人間が操作し、他の2台（スレーブ端末）は物体に接触することを仮定する。ただし、通信遅延の変動は考えないものとする。位置制御にはPD制御器（Pゲイン：400、Dゲイン：40）を、力制御にはP制御器（Pゲイン：10）を用いた。

図3にハイブリッドパラメータH11のゲイン特性を示す。Case A、B、Cのそれぞれについて、通信遅延 T が0 msの場合と100 msの場合の結果をプロットしている。通信遅延が0 msの場合には、Case A、B、Cのいずれの場合であっても低周波数域でゲインが0 dB未満で十分に小さい値をとっているため、操作力を感じることはない。一方、通信遅延 T が100 msの場合、低周波数域において、Case

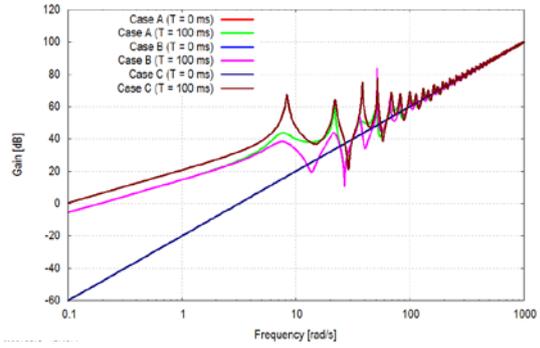


図3：性能評価の結果

Cと比較してCase AおよびCase Bのゲインが小さいことが確認できる。10 rad/s付近では、Case AよりもCase Bの方がゲインが小さく、Case Bが最も操作力を小さく抑えられる制御系であることがわかる。

4. 研究成果

本研究では、ヘテロジニアス環境におけるハプティック通信技術に関して、以下の成果を得た。

(1) ハプティック通信システムの性能評価指標

ネットワークを介した制御において大きな問題となる通信遅延の影響を定量的に評価するための指標として、1対1のハプティック通信システムであるバイラテラル遠隔操作システムだけでなく、1対多のハプティック通信システムであるマルチラテラル遠隔操作システムにおいても有効な評価指標を提案した。

また、ヘテロジニアス環境におけるハプティック通信を計算機上で模擬するためのシミュレーション環境の構築および理論計算を行い、ネットワーク区間の通信品質がハプティック通信の操作性に与える影響を解析した。さらに、2台のハプティック通信端末を用いたバイラテラル制御技術の基礎実験を行った。

ヘテロジニアス環境においては、多数の端末が同時にネットワークにアクセスし、多数の端末間で力覚情報を共有する状況が想定されるため、本研究で提案したマルチラテラル遠隔操作システムにおける「透明性」は非常に意義のある性能評価指標であると考えられる。

(2) クラウド型ハプティック通信システム

クラウド型ハプティック通信システムにおけるネットワークQoSおよびQoEを考慮した制御系の動的再構成方法を提案し、「透明性」に基づいて制御系の評価を行った。提案

手法を用いることで、QoS および QoE を考慮したより柔軟な制御系の設計が可能となる。

クラウド型の制御構造は、ハプティック通信システムだけでなくあらゆるネットワーク化制御システムに応用可能な技術であり、今後は、実システムの構築と性能評価を行っていく予定である。

(3) 高信頼ハプティック通信のための制御構造

ハプティック端末間でやりとりされる情報の種類、例えば位置情報と力情報、に基づいて制御構造の分類を行った。1 対多のハプティック通信システムであるマルチラテラル遠隔操作システムにおいて、制御構造の差異が制御性能に与える影響を解析し、特に通信遅延存在下においては位置情報の結合数が操作性に最も大きな影響を与えることを示した。また、無線通信を介した高信頼ハプティック通信の実現に向けて、通信断が発生した場合の制御器の再構成法を提案した。

ハプティック通信システムは人間が操作するシステムであり、その安全性は大きな課題である。通信遅延だけでなく、情報損失による制御系の不安定化、性能劣化を詳細に分析することは、実用化を行う上で非常に重要となると考えられる。今後は、特に情報損失が制御性能に与える影響について解析を行っていく予定である。

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4件)

①久保亮吾, 元井直樹, “高信頼ハプティック通信のための情報結合を考慮したマルチラテラル制御,” 電子情報通信学会総合大会, 2012年3月22日, 岡山大学.

②久保亮吾, “マルチラテラル遠隔操作システムにおける情報結合に基づいた制御器設計,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2012年1月27日, 奈良県新公会堂.

③久保亮吾, 名取賢二, “ネットワークロボティクスにおけるハプティック通信技術の現状と課題,” 電子情報通信学会高信頼制御通信研究会, 2011年1月11日, 大阪市立大学.

④Ryogo Kubo, Naoki Motoi, “An expression of transparency in time-delayed multilateral control systems,” The 8th edition of France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics, MECHATRONICS 2010, 2010年11月22日, 慶應義塾大学.

[その他]

ホームページ

<http://www.kbl.elec.keio.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

久保 亮吾 (KUBO RYOGO)

慶應義塾大学・理工学部・助教

研究者番号：00582199

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし