

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 5 月 18 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2011

課題番号：22760215

研究課題名（和文） 通信制約を考慮したハプティックネットワークの研究

研究課題名（英文） A Study on Haptic Network Considering Communication Constraints

研究代表者

名取 賢二（NATORI KENJI）

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：70545607

研究成果の概要（和文）：触力覚情報を伝達するハプティクスシステムをネットワーク化したハプティックネットワークの実現を目的とし、ネットワークで生じる通信制約に起因する諸問題を、ネットワーク化制御技術を用いて解決してきた。具体的には、対象システムを「制御システム」「システム結合体」「通信システム」という3つの観点から捉えることで、それぞれの観点における通信制約に起因する問題の解決を図ると同時に、システム全体の総合的な評価も行った。

研究成果の概要（英文）：For realization of a haptic network which is a networked haptic system that transmits tactile sensations, problems caused by communication constraints on networks have been resolved by using network-based control technologies. Specifically, three aspects of the networked haptic system as a control system, as a connected system, and as a communication system have been focused on independently. Then, problems caused by communication constraints in each aspect have been addressed. Furthermore, evaluation of the overall networked haptic system has been conducted in parallel.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学 電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：ハプティクス，ネットワーク化制御，通信制約，むだ時間，バイラテラル制御

1. 研究開始当初の背景

以下に詳述する2つの研究分野の背景から本研究課題の提案に至った。

(1) ネットワーク技術の急速な普及及び発展により、一般家庭における快適なネットワーク環境の実現のみならず、さまざまな研究分野においてネットワーク技術を導入する試みが注目を集めていた。特に制御システム

にネットワーク技術を導入したネットワーク化制御技術は、従来通信経路の配線等に必要であった人的及び物的なコストを著しく削減することが可能な点、高いアクセス性を有するシステム構築が可能な点などのさまざまな利点を有し、制御システム構築における有効な手段として認識され始めていた。このような認識は、国内のみならず国外においても広がっており、実際に学術誌における特

集記事 (“Special Issue on Technology of Networked Control Systems,” Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 1, 2007 など) や 関連国際会議 (IFAC Workshop on Estimation and Control of Networked Systems など) が盛んに企画されるようになっていた。また同時に、当該研究は制御工学とネットワーク工学、情報工学などが融合した学際研究分野であり、幅広い分野での応用可能性が期待されていた。

(2) 触力覚情報を計測・再現・伝達する技術であるハプティクスは、視覚情報や聴覚情報と同様に人間の感覚情報を通信する技術として高い注目を集めており、関連学術誌 (IEEE Transactions on Haptics) や関連国際会議 (World Haptics) の出現もあいまって、研究の急速な展開が見込まれていた。触力覚情報は、作用・反作用の法則に基づく双方向性の情報であるため、その実現には高度な実時間性を有するバイラテラル (双方向) 制御が必要である。したがって、特に遠隔地間でハプティクスシステムを構築する際には、通信経路で生じる通信遅延 (むだ時間) が深刻な問題となる。そこで研究代表者らは、通信外乱の概念と通信外乱オブザーバを用いたむだ時間補償法を提案し、その有効性を、実機実験を通して確認してきていた。しかし、ネットワーク上で発生する通信遅延 (むだ時間) は、さまざまな通信制約により時変かつ予測不可能な挙動を示すことが知られており、ハプティクスシステムをネットワーク化するためには、むだ時間補償法のみではその実現が難しいことが明らかとなってきた。

これらの背景から、研究代表者は、ハプティクスシステムをネットワーク化するために、ネットワークにおいて生じる通信制約に起因する諸問題をネットワーク化制御技術により解決するという着想に至った。具体的には、当該問題の原因である通信制約 (結合構造の変化・断絶、帯域制限・輻輳等) を陽に考慮した独立した3つの観点から対象システムを捉え、それぞれの観点においてネットワーク化制御技術を適切に利用して問題解決を試みることにした。そして、最終的にはそれらを統合したハプティックネットワークの実現を目指すことにした。

2. 研究の目的

本研究では、ハプティクスシステムのネットワーク化に関して、3つの独立した観点に基づいてそれぞれ研究を進行してきた。以下に、それぞれの観点における研究の目的について別々に述べ、最後に、それらと同時に進行してきたシステム全体の評価に関する研

究の目的について述べる。

(1) むだ時間を有する制御システムとしての観点における研究目的

この観点における研究では、特にむだ時間が時変のときの安定化などについて重点的に取り組む。ネットワーク構造の変化・断絶、輻輳・パケットロスなどにより、ネットワーク上で発生するむだ時間のほとんどはジッタ (むだ時間の揺らぎ) を有する時変むだ時間である。時変むだ時間が存在する場合、その制御システムではラプラス変換を行うことが不可能であり、周波数領域での安定性の検討が困難となる。そこで本研究では、その時変むだ時間を陽に考慮した時間領域でのモデル化を行い、時変むだ時間が制御システムに及ぼす影響について明らかにする。

(2) サブシステムが結合したシステム結合体としての観点における研究目的

ハプティクスシステムをネットワーク化するにあたり、制御器や制御対象、センサなど多数の要素が複雑に接続された大規模なシステムの制御及び管理を行う必要がある。そこで、この観点における研究では、システムを構成する制御器や制御対象、センサなどをそれぞれ1つのサブシステムとしてモデル化し、サブシステム間の結合状態・結合構造・通信遅延 (むだ時間) などを、グラフ理論を用いて表現する。そのようなモデル化および表現に基づき、結合構造の動的な特性について解析し、最適な経路選択方法や最適な制御器配置を明らかにする。

(3) パケットを送受信しあう通信システムとしての観点における研究目的

この観点では、パケット数やウィンドウサイズなどの、通信における主要なパラメータを状態変数として挙動のモデル化を行う。そのモデルに基づき、帯域制限などの通信制約が発生した場合のネットワーク状態や輻輳の挙動を解析し、輻輳の制限とパケットロスの回避を実現する輻輳制御方法などを明らかにする。

(4) システム全体の評価に関する研究目的

各観点を総合したシステム全体の評価については、まず従来から確立されている性能評価指標に基づいた基礎的評価を行う。さらに、その結果に基づきシステム全体の安定性評価指標や性能評価指標を提案し、その妥当性について検証を行う。

3. 研究の方法

本研究では、前述の3つの独立した観点における研究目的を達成するためにそれぞれの研究を独自に進めつつ、システム全体の評

価に関する研究を同時に行うという研究方法をとった。以下に、3つの観点の研究それぞれの研究方法及びシステム全体の評価に関する研究方法について詳述する。

(1) むだ時間を有する制御システムとしての観点における研究方法

まず、さまざまなタイプの時変むだ時間が存在する場合において、その時変むだ時間が信号伝達及び制御システムの性能にどのような影響を及ぼすかについて検討した。また、得られた検討結果に基づき、時変むだ時間が及ぼす影響の原因について考察し、検証を行った。同時に、従来から問題となっていたモデル化誤差が存在する場合のロバスト性についても検討を行い、モデル化誤差を低減させるための制御系の提案を行った。さらに、モデル化誤差が安定性に及ぼす影響についても、近似極計算を行うことにより詳細に解析を行った。

(2) サブシステムが結合したシステム結合体としての観点における研究方法

まず、システム全体がさまざまな要素が結合されたシステム結合体であるとの概念のもとで、グラフ理論を用いたモデリングおよび表現方法の検討を行った。ここでは、システム間の単純な情報の結合のみならず、結合もしくはネットワーク上で生じるさまざまな通信制約を同時に表現するモデル化手法の提案を行った。さらに、その表現に基づいて解析を行うことにより、各サブシステムにおける情報の集中度を明らかにし、最適な経路選択方法や最適な制御器配置方法について検討を行った。

(3) パケットを送受信しあう通信システムとしての観点における研究方法

通信における主要なパラメータの中から、状態変数として適切なものを選択し、ネットワークのモデル化について検討した。ここでは、多数のパケットがネットワーク上で同時に送受信される様子についての新しいモデル化手法を提案し、その手法に基づいて解析を行った。

(4) システム全体の評価に関する研究方法

まず、従来から広く知られているバイラテラル制御の性能評価指標である「透明性」に基づいて基礎的な性能評価を詳細に行った。さらに、安定性の評価指標として近似極計算による安定解析法について検討し、通常のフィードバック制御システムとバイラテラル制御システムそれぞれにおいてその手法を用いた解析を行い、制御器の設計方法について考察した。

4. 研究成果

研究の方法で述べたように研究を進めた結果得られた成果について、前述の3つの観点にわけて述べた後、システム全体の評価における成果について述べる。

(1) むだ時間を有する制御システムとしての観点における研究成果

まず、時変むだ時間が存在する場合の信号伝達に関する解析結果から、特定の種類の時変むだ時間により通信路に非線形性が現れることが明らかになった。また、時変むだ時間が制御システムの性能に及ぼす影響としては、時変むだ時間の種類によって異なる定常偏差が発生することが分かった。一方、安定性に関しては深刻な影響を及ぼさないことがわかった。これらの結果に基づき、定常偏差が発生する原因についての検討を行い、数値例を用いて検証を行った。

モデル化誤差が存在する場合のロバスト性については、定常特性の解析の結果、簡単なパラメータチューニングにより定常偏差を効果的に抑制することが可能な制御系を提案し、その効果について検証した。また、モデル化誤差が安定性に及ぼす影響についても、近似極計算によって実際に極の位置を観察することによって詳細に検討し、その性質を明らかにした。

これらの成果は、研究代表者らが既に提案している独自のむだ時間補償法を適用したシステムにおいて得られたものである。よって、これらの成果を踏まえた上で、時変むだ時間の影響について今後さらに詳細な検討を進めていくことで、時変むだ時間の影響を効果的に抑制するためのむだ時間補償法の改良が期待される。そのような改良が実現すれば、ネットワーク化制御の研究分野において非常に有効なむだ時間補償法となると考えられる。

(2) サブシステムが結合したシステム結合体としての観点における研究成果

システムを構成する多数のサブシステムの結合状態と、通信遅延、スループットという通信制約（性能）を同時に表現する方法として、グラフ理論を用いたシステム結合理論に基づいた新しい表現方法を提案した。提案した表現方法を用いることで、サブシステム間の結合状態と、その結合（通信路）で生じる通信遅延、結合（通信路）のスループットを同時にかつ簡潔に表現することが可能となった。さらに、提案した表現に基づいてその結合行列の固有値と固有ベクトルを計算することで、情報の集中度という指標に通信遅延やスループットがどのように影響するかを明らかにし、最適な経路選択や最適な制御器設計について検討を行った。

得られた成果のように、サブシステム間の結合状態のみならず通信制約についてもわかりやすい形で示すことが可能な表現方法は、今後さらに結合状態・結合構造等の解析や制御器設計を行うに当たり非常に有効であると考えることができる。

(3) パケットを送受信しあう通信システムとしての観点における研究成果

ネットワークの主要パラメータの中から状態変数を選択し、モデル化を行った。また、そのモデルに基づいて、輻輳の生じ方や輻輳に起因するパケットロスが起こるメカニズムなどについて解析した。ここでは、多数のパケットがネットワーク上で同時に送受信される様子を、他の物理システムとの相似性を利用してモデル化することにより、従来から存在する動的システムに対する解析手法を利用してネットワークの挙動を解析することができた。

本研究成果において、特に他の物理システムとの相似性を利用したモデル化手法については、一般的に広く用いられている動的システムの解析手法を利用可能であるという特長から、今後の研究においても幅広く用いられることが期待される。

(4) システム全体の評価に関する研究成果

まず、性能については従来から広く知られているバイラテラル制御の性能評価指標である「透明性」に基づいて、制御器のパラメータやむだ時間補償器の設計方法によって性能がどのように変化するかについて詳細な検討を行った。また、安定性に関しては、むだ時間要素を近似することによる近似極計算を用いて、極の変化の傾向およびその詳細について通常のフィードバック制御システムとバイラテラル制御システムそれぞれにおいて検討した。さらに、得られた安定解析結果に基づき、制御系設計の具体的な指針について検討した。

これらの成果のうち、通信遅延(むだ時間)を有するバイラテラル制御システムにおける極の位置に基づく安定解析については、当該分野における類似の例が少なく、安定解析法として有効なものとなると考えられる。

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 8 件)

- ① Kenji Natori, A Design Method of Time-Delay Systems with Communication Disturbance Observer by Using Pade Approximation, The 12th IEEE International Workshop on Advanced

Motion Control (AMC2012), 2012 年 3 月 25 日, Sarajevo (Bosnia and Herzegovina)

- ② 名取賢二, 通信遅延を有するバイラテラル制御システムの安定解析法の提案, 電気学会産業計測制御研究会, 2012 年 3 月 7 日, 横浜国立大学 (神奈川県)
- ③ 名取賢二, 通信外乱オブザーバを用いたむだ時間制御システムのモデル誤差が安定性に及ぼす影響に関する一考察, 第 54 回自動制御連合講演会, 2011 年 11 月 19 日, 豊橋技術科学大学 (愛知県)
- ④ Kenji Natori and Roberto Oboe, A Reduction Method of Steady-State Errors in Time-Delay Systems with Communication Disturbance Observer, The 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON2011), 2011 年 11 月 9 日, Melbourne (Australia)
- ⑤ 村上洋介, 名取賢二, 林洋一, 時変むだ時間下における通信外乱オブザーバのむだ時間補償性能に関する検討, 電気学会産業計測制御研究会, 2011 年 3 月 8 日, 千葉工業大学 (千葉県)
- ⑥ Yusuke Eguchi, Kenji Natori, and Yoichi Hayashi, Expression of System Connection Considering Communication Delays and Throughput for Control System Design, The 8th Edition of France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics (EAM2010, MECHATRONICS2010), 2010 年 11 月 22 日, 慶應義塾大学 (神奈川県)
- ⑦ Kenji Natori, Effects of Time-Varying Delays on Signal Transmission and Control System, The 8th Edition of France-Japan and 6th Europe-Asia Congress on Mechatronics (EAM2010, MECHATRONICS2010), 2010 年 11 月 22 日, 慶應義塾大学 (神奈川県)
- ⑧ 名取賢二, 通信外乱オブザーバを用いたむだ時間同定に関する一考察, 第 28 回日本ロボット学会学術講演会, 2010 年 9 月 22 日, 名古屋工業大学 (愛知県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

名取 賢二 (NATORI KENJI)
青山学院大学・理工学部・助教
研究者番号: 70545607