

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 25 年 6 月 6 日現在

機関番号：32508

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500095

研究課題名（和文）触知覚・運動モデルに基づく触覚通信の品質向上

研究課題名（英文）Qos control of haptic media communication based on sensory-motor models

研究代表者

大西 仁（OHNISHI HITOSHI）

放送大学・ICT活用・遠隔教育センター・准教授

研究者番号：40280549

研究成果の概要（和文）：

触覚通信において通信ネットワークの遅延やパケット損失が生じると、触覚デバイスの出力が乱れ作業効率が低下したり、ユーザに違和感が生じたりする。通信ネットワークの品質低下が起きてもその悪影響抑えるためには、ユーザの知覚や運動特性を考慮した制御が必要である。そこで、システムの物理的特性からユーザが感じている知覚状態を推定するモデルを構築し、知覚特性に基づく適応制御法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

When haptic information is transmitted over an information network that does not guarantee quality of service (QoS), the output quality of the media stream may deteriorate due to network delays and packet loss. This causes degradation of the user's quality of experience (QoE) and performance of the task. The characteristics of haptic perception need to be understood to effectively control QoS/QoE. We proposed models to qualitatively and quantitatively estimate the haptic perception of mechanical impedance and its application to adaptive control of a bilateral control system.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012 年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：認知科学

科研費の分科・細目：メディア情報学・データベース

キーワード：サービス品質 (QoS), 体感品質 (QoE), 定量モデル, 心理物理, 知覚, 触覚, 通信ネットワーク

1. 研究開始当初の背景

触覚デバイスは、情報を触覚モダリティで入出力する装置であり、仮想物体の形状、表面の凹凸などの手触り感、硬軟、質量やユーザの働きかけに対する反力等を表現す

ることができる。これらを通信ネットワークで結ぶことにより、機器操作、遠隔手術、技能的作業の支援や指導、といった触覚情報が重要な作業を遠隔で行うことができる。

使用する通信ネットワークの QoS (Quality of Service) の制約により、そのままでは意図通りの感覚を伝達できないことがあり、その場合 QoS 制御が必要になる。ここで注意が必要なのは、ヒトの知覚は信号の物理的な変化の通りには変化せず、複雑な過程を経た産物であることである。したがって、ヒトの知覚を考慮して QoS 制御を行うことが重要であるが、手を動かす作業時の触知覚のメカニズムに関する研究はあまりない。

我々はこれまでに心理物理学的方法と数理モデルを用いて、主に弾性の知覚について研究してきた。心理物理学的方法を用いることにより、被験者に刺激の大きさの大小判断をさせることにより、物理的刺激を受容して生じる感覚の大きさを客観的に測定できる。

Ohnishi and Mochizuki (2007) では、通信ネットワークを介して遠隔地の弾性体を押す状況を模擬し、通信遅延が弾性の知覚に与える影響を調べた。その結果、被験者が感じる弾性の大きさは遅延の増加に従って小さくなることが明らかになった。大西ら(2008) では、弾性の知覚がどの物理量からどのように構成されるか検討し、弾性は反力の時間平均として知覚されることを示した。

2. 研究の目的

触覚通信において、制御理論に基づいて系の安定化を図る研究、情報の流れに注目した QoS 制御の研究はあるが、ヒトの知覚・運動特性の考慮は不十分である。元々弾性、粘性などの機械的性質の知覚に関する研究が非常に少ない。本研究では、触覚通信時におけるヒトの知覚・運動特性を明らかにして、それを利用することにより、触覚通信における作業のパフォーマンス向上、触覚呈示装置の感覚表現力の向上の基礎を与えることを目的とする。

(1) 触知覚モデルの構築

弾性、粘性、慣性など機械的性質の知覚を統一的に説明できるような定量的モデルを構築する。また、機械的性質の知覚の定量的な説明に加え、弾性、粘性、慣性、摩擦の定性的な感じ分けを説明するモデルを構築する。これらのモデルを用いて、通信エラーなどで触覚デバイスの出力が乱れた時に、知覚にどのような影響が出るか定量的・定性的に予測できるようにする。

(2) 運動モデルの構築

触覚デバイスの出力が乱れた時に運動がどのように乱れるか分析し、その数理モデルを構築する。このモデルを用いて、触覚デバ

イスの出力が乱れた時に、運動がどのような影響が出るか定量的に予測できるようにする。

(3) 触覚呈示制御法の構築

知覚モデル、運動モデルに基づき、通信ネットワーク等の性能に制約がある場合に、なるべく意図通りの感覚が生じ、正しく作業ができるような触覚呈示制御法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 機械的性質の定性的知覚モデル構築

弾性、粘性、慣性、摩擦といった機械的性質の質的な感じ分けを説明・予測する数理モデルを構築する。目標位置に手を伸ばす到達運動では、手先の軌道は S 字型を描く。ばね、ダンパー、質量を押しした場合も似た軌道を描くが、反力は各々、押し込み距離、速度、加速度に比例することから、反力の時系列は異なるパターンとなる。反力の時系列を競合学習させることにより、機械的性質の知覚システムを自己組織的に構築しようというのがモデルの骨子である。

(2) 通信遅延の変動が機械的性質の知覚に与える影響の測定と知覚の定量モデル

遅延による弾性知覚への影響についてはすでに成果を発表しているが、実際の触覚通信においてよく使われるクライアント・サーバー・モデルを採用し、通信遅延および遅延の変動が弾性知覚に与える影響を心理物理学的手法で測定する。また、重さの知覚についても同様の測定を行う。さらに、物理量から機械的性質の知覚を定量的に予測する数理モデルを構築する。

(3) バイラテラル制御における遅延が知覚に与える影響、作業に与える影響、品質制御

力覚フィードバックを伴うマスター・スレーブ制御 (バイラテラル制御) において、遅延は作業の円滑さを損なう原因になる。バイラテラル制御においては、マスターおよびスレーブのマニピュレータのダイナミクスやスレーブマニピュレータと環境の相互作用が遅延の影響を増大させることが予想される。

そこで、遅延およびその変動が力の知覚に与える影響、運動制御に与える影響を測定し、それらをモデル化する。さらに、QoE を向上するための制御方式を検討する。

4. 研究成果

(1) 機械的性質の定性的知覚モデル構築

モデルの概要を図 1 に示す。図中の RNN モジュールは時系列を記憶する Elman の単純回帰ネットワーク (Simple Recurrent Neural

Network)で、各モジュールが特定の反力時系列パターンを記憶している。物理的的刺激が反力時系列として各モジュールに入力されると、各モジュールは次の時刻の反力の予測値を出力し、予測誤差が最も小さなモジュールが選択され、その反力パターンに相当する感覚が生じる。

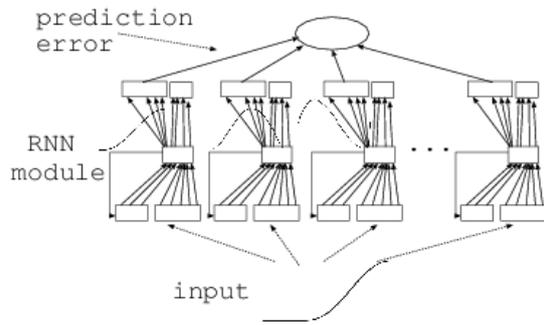


図 1: 機械的性質の定性的知覚モデルの概念図

選択されたモジュールは予測誤差がさらに小さくなるように重みを修正する。同時に選択されたモジュールの近傍のモジュールも、選択されたモジュールとの距離に応じて重みを修正する。選択されたモジュールから離れたモジュールは重みの修正幅を小さくする。このように学習を行うことにより、類似した反力パターンを記憶するモジュールが近くに集まるようになる。これは Kohonen の自己組織化マップと同じ方式である。

ばね、ダンパー、質量を押した時の機械インピーダンスの種類と大きさを予測の予測を試みた。運動時間は 200, 300, 400, 500, 600 (ms) の 5 種類、時間分解能は 1 ms とした。運動距離は全プロファイルの最長の距離を 1 とし、0.4, 0.6, 0.8, 1.0 の 4 種類最大反力は、全プロファイルの最大の反力を 1 とし、0.4, 0.6, 0.8, 1.0 の 4 種類とした。

モデルは 5×5 の上下端、左右端をつないだトーラス構造とした。各モジュールのユニットの数は、入力層および位置と反力の予測値を出力する出力層 64 個(位置と反力の各々 32 個)、機械インピーダンスの大きさの予測値を出力する出力層 32 個、中間層および文脈層 16 個とした。

学習は上記の 240 種類の位置および反力プロファイル中 120 種類をランダムな順序で入力することにより行った。

図 2 に 4000 回学習後の分類結果を示す。非学習データも含め、弾性、粘性、慣性はほぼ分離され、クラスターを構成していることが見て取れる。また、反力の異なるプロファイルは異なるモジュールに分類される傾向

があった。

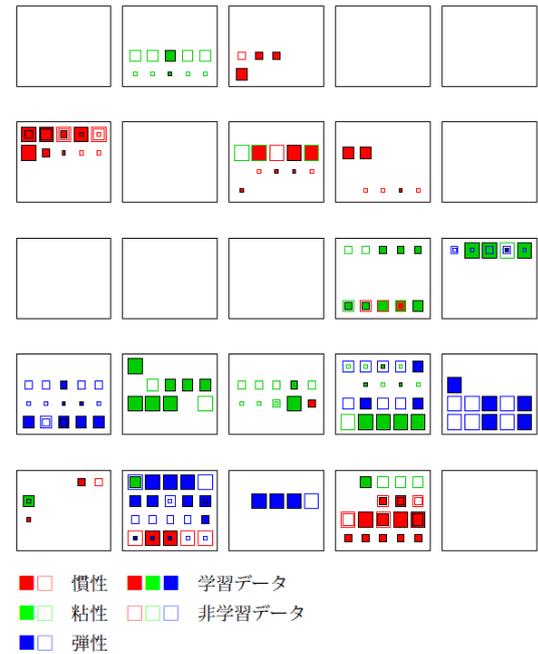


図 2: 選択されたモジュールの分布: 各セルの横軸は運動時間、縦軸は最大反力の大きさ、■□の大きさは運動距離を表す

現時点では、計算量の制約により反力の分解能が粗く、すなわち RNN のユニット数が少なく、分類も粗い。今後はユニット数を増やしたり、RNN の代わりに隠れマルコフモデル(HMM)を使用することにより分類能力を上げてモデルの検討を行う。自己組織化マップを用いることにより、遅延などの外乱により知覚が質的に変容したり(e.g. 弾性を粘性と感じる)、熟練工の鋭い感覚を説明できるようになる可能性があり、これらについても今後検討する予定である。

(2) 通信遅延の変動が機械的性質の知覚に与える影響の測定と知覚の定量モデル

反力の計算を図 3 に示すクライアント・サーバー・モデルに基づいて行うようにして、オブジェクトを持ち上げる作業における重さ(慣性)の知覚、ばねを押す作業における弾性の知覚を測定した。



図 3: クライアント・サーバー・モデル

このシステムにおいては、通信遅延量の増加に伴い反力が直線的に増加する。運動(オ

プロジェクトを持ち上げる、ばねを押す)の途中で遅延が変化した場合の、遅延変化後の機械的性質の知覚を測定した。

測定の結果、慣性、弾性とも、変化前の遅延が変化後の遅延より小さい場合は、変化後の機械的性質は実際より小さく知覚され、変化前の遅延が変化後の遅延より大きい場合は、変化後の機械的性質は実際より大きく知覚されることが明らかになった。これらの結果は、今回とは異なる反力計算の下で弾性の知覚を測定した結果を再現した。また、弾性知覚のモデルとして提案したモデル(1)~(4)式で、弾性、慣性とも、測定値と相関0.95程度の精度で推定することができた。

$$k_{\psi}^c = w_F F^c + w_X X^c + w_T T^c, \quad (1)$$

$$F^c = \frac{\int_0^D \lambda_F^{D-\tau} f^c(\tau) d\tau}{\int_0^D \lambda_F^{D-\tau} d\tau}, \quad (2)$$

$$X^c = \frac{\int_0^D \lambda_X^{D-\tau} \frac{d}{dx} f^c(\tau) d\tau}{\int_0^D \lambda_X^{D-\tau} d\tau}, \quad (3)$$

$$T^c = \frac{\int_0^D \lambda_T^{D-\tau} \frac{d}{dt} f^c(\tau) d\tau}{\int_0^D \lambda_T^{D-\tau} d\tau}, \quad (4)$$

ここで、 k_{ψ} は機械的性質の知覚量、 $f(\tau)$ は時刻 τ における反力、 x は位置、 D は運動時間(duration)、 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$)、 w ($0 \leq w \leq 1$)はパラメタである。すなわち、機械的性質は反力、ないしは反力の変化率の重み付き時間平均として知覚されるというものである。

(3) バイラテラル制御における遅延が知覚に与える影響、作業に与える影響、品質制御

① バイラテラル制御系

実験は図4に示すバイラテラル制御システムにより行われた。

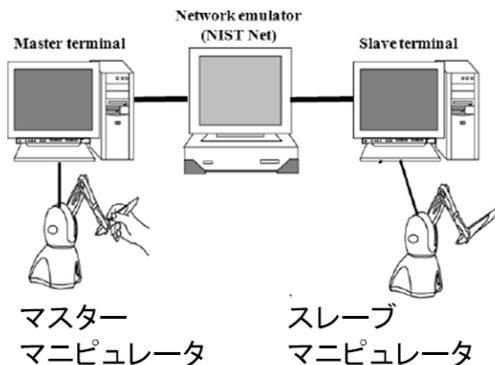


図4: バイラテラル制御システム

このシステムにおいて、時刻 t におけるマスターおよびスレーブ・マニピュレータの反力の出力 $f_M(t)$ 、 $f_S(t)$ は、以下の式で表わされる。

$$f_S(t) = k_S(x_M(t-d) - x_S(t)) + k_D(v_M(t-d) - v_S(t)) \quad (5)$$

$$f_M(t) = k_S(x_S(t-d) - x_M(t)) + k_D(v_S(t-d) - v_M(t)) \quad (6)$$

ここで、 M 、 S はマスターおよびスレーブ、 x 、 v はマニピュレータの位置および速度、 k_S は弾性係数、 k_D は粘性係数を表す。速度は位置の数値微分により求めるが、そのままでは振動が生じるので、カルマンフィルタを用いて振動を抑えた。カルマンフィルタを用いたPD制御により、スレーブを空中に浮かせて操作した場合でも、安定した作業を行えるようになった。

② 遅延および遅延変動の影響

バイラテラル制御系において、(2)と同様に運動の途中で遅延が変化した場合、知覚に与える影響を測定した。その結果、(2)と同様、変化前の遅延が変化後の遅延より小さい場合は、変化後の反力は実際より小さく知覚され、変化前の遅延が変化後の遅延より大きい場合は、変化後の反力は実際より大きく知覚されることが明らかになった。

また、(2)と同じモデルにより知覚される反力の大きさを推定した。その結果、測定値との相関が0.95程度の精度で推定することができた。しかし、条件によっては測定値と推定値の間に乖離があった。測定値はモデルの推定値より変化前の遅延の影響を受けており、モデルのパラメタ調整ではこの影響を十分に調整することができなかつた(図5)。

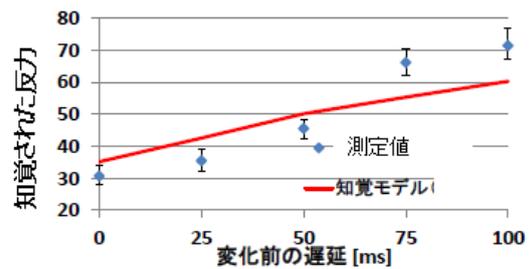


図5: 知覚された反力の測定値と推定値

この問題は(2)においても同様の傾向が生じていた。すなわち、モデルに修正が必要である。被験者が大きな遅延の変化、すなわち急激な反力の変化を小さな変化と同様にセンシングするというモデルの仮定に問題があると考えている。モデルの修正については現在検討中である。

③ 遅延および遅延変動が運動制御に与える影響

遠隔制御時の軌道を調べた。制御が成立する範囲では、遅延変化の大きさに関わらず、遅延変化後ほぼ瞬時に軌道の乱れはほぼ瞬時に解消されていて、遅延や遅延の変化による微妙な軌道の変化は認められなかった。

④触覚呈示制御法

藤本・石橋(2004)および松永ら(2012)では、通信に遅延変動を含むバイラテラル制御における適応制御法を提案している。様々な遅延量において、弾性係数 k_s を変化させて、被験者に作業のしやすさを評価させ、各遅延量に対して最も作業のしやすい弾性係数を設定するというものである。弾性係数の制御則は(7)式で与えられる。

$$k_s = \alpha / (\Delta T + 10\alpha) \quad (7)$$

ここで、 $\alpha (> 0)$ は定数で、 ΔT はフィルタリングされた遅延量である。すなわち、遅延量の増加に伴い弾性係数を小さくするというものである。これは、遅延により反力が大きくなることを弾性係数を小さくすることで抑え、反力を一定に保つ制御であると解釈できる。そこで、知覚モデルを組み込み、より合理的な適応制御を実現する。現在、①で述べたように知覚モデルの修正中であり、修正が終了し次第、適応制御系の構成に取り組む予定である。

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) 松永一希・大西 仁・石橋 豊, ネットワーク遅延の変動が力の知覚に及ぼす影響, 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会, 2013/01/25, 機械振興会館.

(2) 大西 仁・望月 要, 機械インピーダンスの触運動知覚特性, 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 2011/07/24, 富山国際会議場.

(3) 大西 仁・望月 要, 機械的性質の触運動知覚モデル (3), 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会, 2011/07/14, 小樽市民会館.

(4) 大西 仁・望月 要, 機械的性質の触運動知覚モデル (2), 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会, 2011/03/08, やすらぎ伊王島.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大西 仁 (OHNISHI HITOSHI)

放送大学・ICT 活用遠隔教育センター・
准教授

研究者番号：40280549

(2) 研究分担者

望月 要 (MOCHIZUKI KANAME)

帝京大学・文学部・教授

研究者番号：80280543