

「脳を創る」

平成 11 年度採択研究代表者

石川 正俊

(東京大学大学院情報理工学系研究科 教授)

「感覚運動統合理論に基づく「手と脳」の工学的実現」

1. 研究実施の概要

本研究は、人間の優れた「手と脳」の基本的機能を工学的に実現可能とする新たな実時間感覚運動統合理論を提案し、本研究で設計・開発する視触覚を有する高速ロボットシステム上でその有効性を実証することを目的とする。特に、人間の「手と脳」の有する感覚運動統合機能と感覚系・運動系の持つ動特性の関連に注目し、センサ系とアクチュエータ系の動特性を考慮した実時間感覚運動統合理論を構築し、それに基づき工学的な「手と脳」システムを実現するものである。

このような研究方針のもとに、平成13年度は、平成12年度に引き続き、実時間感覚運動統合システム、能動的感覚運動統合学習理論、実時間視覚情報処理、実時間触覚情報処理、脳型情報処理 LSI、高速アーム、高速ハンドの各研究グループに分かれて研究を行った。特に、本年度は、前年度までの予備実験の成果や分析をもとにして、それぞれのグループにごとに理論的なモデルの構築と実験システムの試作を開始した。また、構築した理論モデルと試作システムに関して基礎的な検証実験を行い、その有効性を確かめた。各研究グループの研究実施の概要は以下の通りである。

1. 実時間感覚運動統合システムの研究

双眼・双腕を備えた実時間感覚運動統合システムの試作を行った。具体的には、腕、眼などの各システム構成要素を並列に制御するための制御システムに関する研究を行った。また、構築したシステムを用いて動的かつ高速に動く物体に対する高速把握実験を行った。

2. 能動的感覚運動統合学習理論の研究

実時間感覚運動統合理論の研究を行った。具体的には、人間の計算アルゴリズム、人間の運動メカニズム、および視覚表現メカニズムの三つの問題について、それぞれアルゴリズムの提案と心理実験および計算モデルの構築を行った。

3. 実時間視覚情報処理の研究

視覚システムの高速化に対応した高速なジェスチャー認識の研究を行った。具体的には、人間の手の開閉の運動特性を解析することで、認識アルゴリズムの理論的な考察を行った。また、ジェスチャー認識のためのターゲットトラッキングシステムを構築し、実験を行った。

4. 実時間触覚情報処理の研究

実時間触覚センサの研究を行った。具体的には、柔軟かつ薄く、ある程度の自由曲面に装着可高密度型面状触覚センサを試作し、ロボットハンド上に実装して把握状態の計測と性能評価を行った。

5. 脳型情報処理 LSI の研究

人間の脳の可塑性に対応した処理システムの実現を目指して、状況に対応して動的に再構成が可能な CDMA 方式通信ネットワークの研究を行った。具体的には、送受信回路などの基本回路を設計・試作し、動作を確認した。また、実験とシミュレーションによって性能評価を行った。

6. 高速アームの研究

人間のような軽量性と高速性を持つマニピュレータの実現を目指して、軽量マニピュレータの研究を行った。具体的には、超高出力軽量アクチュエータと軽量高速指モジュールを試作した。また、試作した指モジュールの性能評価を行った。

7. 高速ハンドの研究

高速で運動する動体を捕獲する場合の捕獲条件についてその理論的考察とシステムの研究を行った。具体的には、バネの蓄積エネルギーの利用した超高速キャプチャリングシステムの構築を行った。また動体の捕獲条件のための、Dynamic Friction Closure の概念を提案した。

2. 研究実施内容

東京大学石川研究グループ: 感覚運動統合システム・高速アームの開発

感覚運動統合システムの研究では、(1) 環境の動特性に対応するための高速センサフィードバック、(2) 環境の多様性に対応するための実時間センサフュージョン、(3) 環境の複雑性に対応するための階層並列構造、の3つの特長を備えたシステムアーキテクチャに基づくロボットシステムを開発し、それをを用いて実際に把握や操りなどのマニピュレーションを実行することで、感覚と運動の実時間における処理と統合の理論を実験的に導出することを目的としている。平成13年度では、平成12年度に引き続き、双眼と双腕を備えたマニピュレーションシステムの構築を進め、その基礎的な制御システムを作成した。また、最も基本的なアプリケーションとして動物体の把握タスクを対象として、並列センサフィードバックに基づく制御アルゴリズムを導出し、そのアルゴリズムを用いて実機上で把握を実現した。図1に把握実験の様子を示す。次年度以降は、把握以外のタスクの実験を通して、把握・操りのための階層制御アルゴリズムの構築を行う予定である。

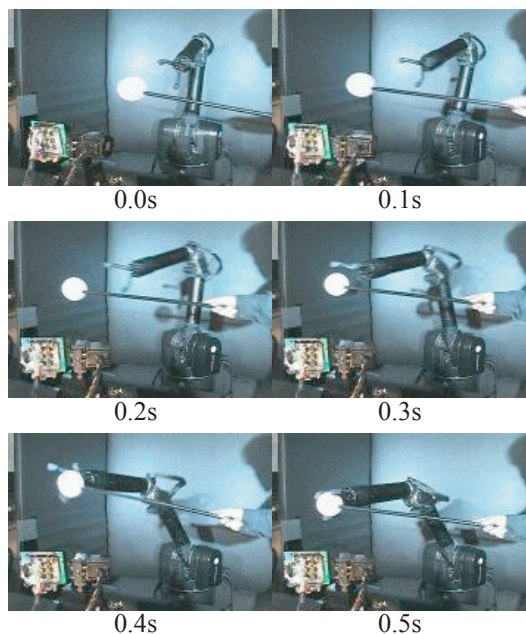


図1 把握実験

高速アームの開発では、従来の鈍重なマニピュレーションシステムを高速化し、人間と同様にアクチュエータとセンサを通して実時間でインタラクティブに環境と触れ合うことのできるマニピュレータの実現を目標としている。平成13年度は、金子研究グループと共同で、軽量アクチュエータとそれを用いた指モジュールの試作を行った。結果として、約100g程度の軽量性と約0.1秒で開閉できる高速性を実現することができた。次年度以降は、試作した指モジュールの精度、力制御性などの項目の評価を行うとともに、複数指と手首を備えた高速多指ハンドアームの開発を進める予定である。

広島大学岩田研究グループ:「手と脳」における脳型情報処理の集積化

人間の能力を超える脳型情報処理システムとして、感覚運動統合理論に基づいた工学的な「手と脳」を実現する。特に、神経ネットワークでは、学習によって最適な情報伝達経路を形成していると考えられている。そこで、ロボットのブレインにおいても、状況に対応して動的に再構成できるCDMA方式通信ネットワークとそのLSI化を実現する。

ダイナミクスの相互干渉に伴って必要な通信速度や緊急度が変わる。そこで、この拡散符号の割り当てを動的に最適制御する構成を考えた。通信回路のブロック構成は、プロセッサインタフェース、バスインタフェースから構成

した。前者は、データバッファリングの機能を持ち、様々なプロセッサへ即座に対応できるようにFPGAで実装できるIPコア化する。バスインタフェース部はスペクトル拡散された信号をバスラインへ送り出す。バスラインの信号をある拡散符号で逆拡散して受信する。スペクトル拡散を行うための拡散符号を生成するPN符号発生回路。接続情報を格納する共通メモリから構成した。

通信回路の概要を図2に示す。

平成13年度は、送受信回路 CMOSスイッチトキャパシタ回路による基本回路を設計・試作して、動作を確認した。チップの実装による伝送線路でのマッチングミスマッチによるリングングを抑える回路を導入して、約1mの距離まで同期式200MHzクロックで動作できることを、実験とシミュレーションで確認した。また、バスインタフェース部の論理設計を行い、0.35umCMOSで試作中である、また、通信制御シーケンスの作成、マルチDSPボード回路実装の準備を進めた。

広島大学金子研究グループ: 超高速キャプチャリングシステムの研究

本研究では高速ビジョンからの情報を利用することを想定した上で、世界最高加速度を実現する超高速キャプチャリングシステムの研究開発と、高速で運動する動体を捕獲する場合の力学的

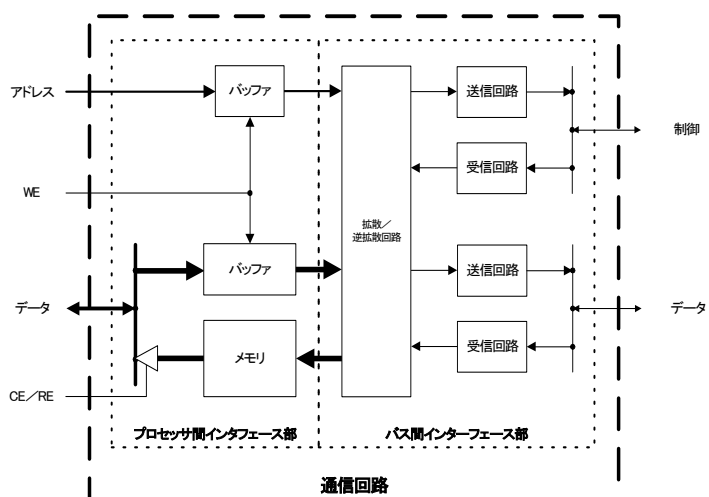


図2 CDMA方式通信回路

観点からの枠組を構築することを研究目的としている。

平成13年度は、超高速キャプチャリングシステムについては世界最高加速度90G(G:重力加速度)が実現できるシステムを設計開発し、検証実験に成功した。また高速運動物体を把握する際の力学的考察として、新たに Dynamic Friction Closure という概念を提案した。動体を平行グリップで捕獲する場合、動体が捕獲前に持っている運動エネルギーのため、動体はグリップ内で必ずすべり、場合によってはグリップから滑り出てしまうことが考えられる。Dynamic Friction Closure というのは、動体をグリップ内で完全に静止させることができるための条件を整理したものである。

結果として、図3に示すように自然落下してバウンドしたボールをわずか 50msec で捕獲することに成功した。また捕獲条件についても2次元モデルに対してはその全容をほぼ完全に明らかにした。今後は、試作した超高速キャプチャリングシステムを使った動体の捕獲実験、さらには Dynamic Friction Closure を確認すべき実験装置の開発とその動作確認実験を行い、解析結果と実験結果との比較考察を行っていく予定である。動体の捕獲については動体の位置情報あるいは速度情報を正確に把握できれば、捕獲成功率70%以上達成できる見通しである。

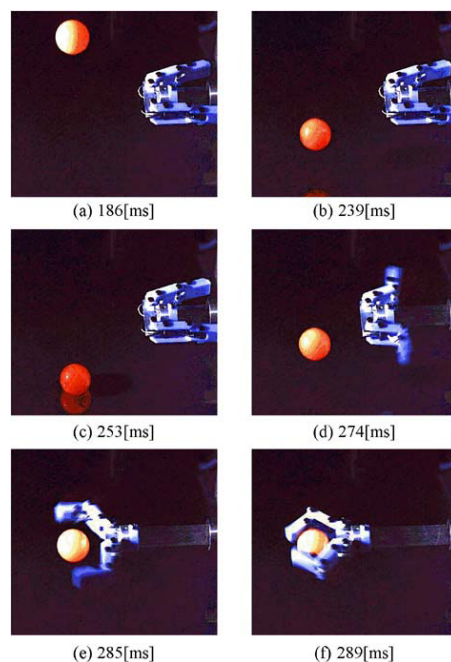


図3 超高速キャプチャリングシステム

茨城大学下条研究グループ:実時間触覚情報処理システムの開発

「手と脳」のための感覚運動統合理論に対応した、実時間触覚情報処理の研究を行う。特に高速かつ器用な操りを可能とするため、可動部を有する多指ハンド上に実装可能な、高密度空間解像度を持つ分布型触覚センサを構築し、高速多指ハンドに対応した実時間触覚情報処理アルゴリズムを開発する。

平成13年度は、試作したセンサを石川研にある4本指ハンドに実装し、把握実験を行った。ロボットハンドの指にセンサを装着する場合には指の表面に装着することが必要になる。そのため、柔軟で薄い高密度型面状触覚センサを2種類試作した。その仕様は、感圧点間隔 3mm、感圧部マトリクス 16x3=48 点(各指毎)、センサ厚 0.5mm、指先の寸法 44mm x 12mm である。感圧機構としては感圧導電ゴムとフレキシブル基板電極を組合わせた構造とした。また、このロボットハンドを被験者の手指動作に合わせてネットワーク経由で操作を行い、把握状

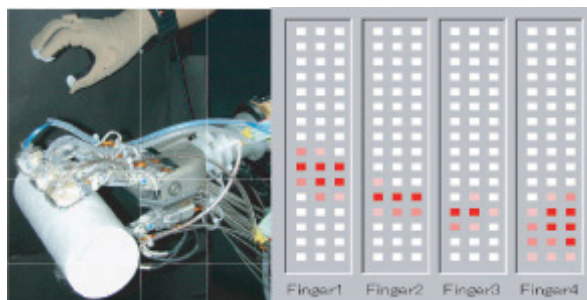


図4 触覚センサを用いた把握

態を計測できることを確認した。この試作センサは、柔軟であり薄く、ある程度の自由曲面に装着可能であるため、各種タイプのハンドにも実装可能と思われる。図4に実験の様子を示す。

また、新たな液状感圧素材の開発に関しては本年度は前年度までに試作したものに改良を行い、横方向電極配置型にも対応可能とすることを試みた。触覚情報処理チップ開発においては、本年度は主に試作環境の整備を行い、基本回路の検討と設計を行っている。

電気通信大学阪口研究グループ: 能動的感覚運動統合学習理論の研究

平成13年度は、計算アルゴリズムの提案、人間の運動メカニズムの研究、および視覚表現メカニズムの三つの問題について、それぞれ以下の研究を行なった。まず、計算アルゴリズムについては、信頼度の概念に基づき、強化学習における exploration-exploitation problem への一つの解決策を与えるアルゴリズムを構築したほか、昨年度までに行なった視覚運動変換の適応メカニズムに関する心理実験および計算モデルを論文の形でまとめた。また、強化学習を用いてダイナミクス整合を実現するアルゴリズムを提案した。次に、運動メカニズムの研究については、筋肉の特性を考慮にいた腕の運動制御のモデルを構成し、運動開始前に軌道を計画しなくても腕を滑らかに動かせることを示した。また、運動学習に関する新しい問題として「運動の安定化」の問題を提起し、それを解決するための方法について考察を始めた。最後に、視覚メカニズムの研究として、初期視覚における情報表現を探るために知覚的充填現象に関して心理実験を行ない、その結果を論文としてまとめた。また、昨年提案した、視覚的注意と構造知覚の相互作用に基づいて知覚の動的変化を再現する神経回路モデルについても論文をまとめた。

東京農工大学石井研究グループ: 実時間視覚情報処理の研究

本研究では、視覚システムの高速化に対応した高速なジェスチャー認識の実現を目指し、十分な視覚システムの高速化並びにロボットハンドの高速化、つまり「手と脳」システムの高速化により、人間の能力を上回るジェスチャー行動が実現可能となることを目指す。本年度はこのような目的に対して、人間の手の開閉運動を高速ビデオカメラで撮影し、指先動作における軌跡、速度、加速度などのプロフィールを解析した。また、その解析結果をもとに、人間のジェスチャーが終了する前に、「手と脳」システムがそのジェスチャーを認識し、それに対応した行動を実現するための条件を示し、また手の開閉運動を伴うジェスチャーに対して、「手と脳」システムの高速化が実現することにより、人間の能力を上回るジェスチャー行動が実現可能になることを示した。また、このような人間のジェスチャーなどの動きを、広範囲かつ高速に計測可能とする高解像度・高速視覚を用いたモーショントラッキングシステムのための複数対象追跡実験を行った。

3. 研究実施体制

(1) 東京大 石川グループ

- ① 石川正俊(東京大学大学院情報理工学系研究科 教授)
- ② 「手と脳」における感覚運動統合理論の研究

(2) 広島大 岩田グループ

- ① 岩田 穆(広島大学先端物質科学研究科 教授)
- ② 「手と脳」における脳型情報処理の集積化の研究

(3) 広島大 金子 グループ

- ① 金子 真(広島大学工学研究科 教授)
- ② 「手と脳」における多指ハンドの機構部設計

(4) 電通大 下条 グループ

- ① 下条 誠(電気通信大学電気通信学部 教授)
- ② 触覚センサとその情報処理アルゴリズムの研究開発

(5) 電通大 阪口 グループ

- ① 阪口 豊(電気通信大学大学院情報システム学研究科 助教授)
- ② 感覚統合と運動制御にかかわる心理実験と数理モデルの構築

(6) 東京農工大 石井 グループ

- ① 石井 抱(東京農工大学工学部 講師)
- ② 「手と脳」における実時間視覚情報処理の研究

4. 研究成果の発表

(1) 論文発表

- 並木明夫: マニピュレーション技術の新展開: ブレークスルーのシナリオ – 高速マニピュレーションの実現に向けて –, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No.2, pp.149-150, 2002
- 小室 孝, 並木明夫, 石川正俊: 多機能な目, 映像情報メディア学会誌, Vol.56, No.3, pp.356-359, 2002
- Iwata, T. Morie, and M. Nagata: Merged Analog-Digital Circuits Using Pulse Modulation for Intelligent SoC Applications, IEICE Trans. Fundamentals, Vol. E84-A, No. 2, pp. 486-496, 2001.
- 金子真, 佐嶋俊彦, 原田研介, 辻敏夫: 触覚微分器, 日本機械学会学会論文集(C 編), vol. 68, no. 666, pp. 447-453, 2002.
- Kensuke Harada, Makoto Kaneko, Toshio Tsuji: Active Force Closure for Multiple Objects, Journal of Robotics Systems, vol.19, no.3, 2002
- 原田研介, 川嶋大雅, 金子真: 重力平衡する対象物の転がりによる操り, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.2, pp164-172, 2002
- 白井達也, 金子真, 原田研介, 辻敏夫: 対象物の引き剥がし支援動作(DAM)の発見とロボットハンドへの応用, 日本ロボット学会誌, vol.20, no.1, pp57-64, 2002
- Makoto Kaneko, Naoki Kanayama, and Toshio Tsuji: Vision-Based Active Sensor Using a Flexible Beam, IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRNICS, vol. 6, no. 1, pp. 1-11, 2001.

- 金子真, 原田研介, 辻敏夫:Envelope Family 操りの十分条件, 日本ロボット学会誌, vol. 19, no. 7, pp. 63-73, 2001.
 - Sakaguchi, Y., Akashi, Y. and Takano, M.: Visuo-motor adaptation to stepwise and gradual changes in the environment: Relationship between consciousness and adaptation, Journal of Robotics and Mechatronics, 13, 601-613, 2001.
 - Sakaguchi, Y.: Target/surround asymmetry in perceptual filling-in, Vision Research, 41, 2065-2077, 2001.
- (2) 特許出願
なし