

「脳を創る」

平成11年度採択研究代表者

石川 正俊

(東京大学 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14年度は、平成13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。本年度は、前年度に引き続き、それぞれのグループごとに理論的なモデルの構築と実験システムの試作を行った。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) 石川グループ

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、3本指8自由度の軽量高速多指ハンドシステムを試作した。また、試作した高速ハンドを用いて落下球の捕球実験を行い、その性能を評価した。

(2) 岩田グループ

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。

(3) 金子グループ

前年度開発した超高速キャプチャリングシステムを高速アームに装着した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提案したDynamic Friction Closureについて、基礎実験装置による検証に成功した。

(4) 下条グループ

従来の感圧素材の欠点であった履歴特性の低減を目的として液状感圧ゴム素材を開発し、指等の自由曲面状にも感圧膜を構成可能な手法を開発した。また、配線数の低減を目的とした触覚情報処理チップの開発を行った。

(5) 阪口グループ

自分の能力にあった問題を選択しながら自己組織的に能力を拡張する学習システムを構築した。また、昨年度報告した「筋肉の特性を考慮した腕の運動制御のモデル」を進歩させたほか、運動中の3次元空間内での注視位置をリアルタイムに測定するシステムを構築した。さらに、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前年度に継続して行った。

(6) 石井グループ

人間の手の開閉運動を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、人間の手の動きの高速トラッキングシステムを開発した。さらに人間に勝つのに十分な能力を有するジェスチャー用高速ロボットハンドの開発を行った。

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

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高速マニピュレーションシステムを目標として、高速ロボット多指ハンドを開発した。

具体的には、ハンドの運動では大出力が必要であるのは瞬時であることに着目して、瞬時トルクが最大となるようにアクチュエータを新たに設計することで、従来の同レベルのアクチュエータでは不可能な高速かつ精密な動きを実現した。また、人間の手の構造、把握可能性を考察することでアクチュエータを適切に配置し、3本指8自由度の小型軽量高速ロボットハンドシステムを開発した。開発した三指ハンドを図1に示す。結果として、ハンド部の重量が約800g程度の軽量性と約0.1秒で各関節を180度も開閉できる高速性を実現することができた。

また、試作したロボットハンドを用いて落下球の捕球実験を行った。図2に落下球の捕球実験の結果を示す。1mの高さから落としたボールを視覚で認識することにより、指先で正確にキャッチしている。この場合、落下球は地面直前では秒速4m/sもの速度になるが、約100%に近い成功率を達成した。次年度以降は、ハンドによる動的で器用な操り動作の実現を目指す。また、13年度までに開発した感覚運動統合システムと統合し、ハンドとアームの統合システムに関する研究を行う予定である。

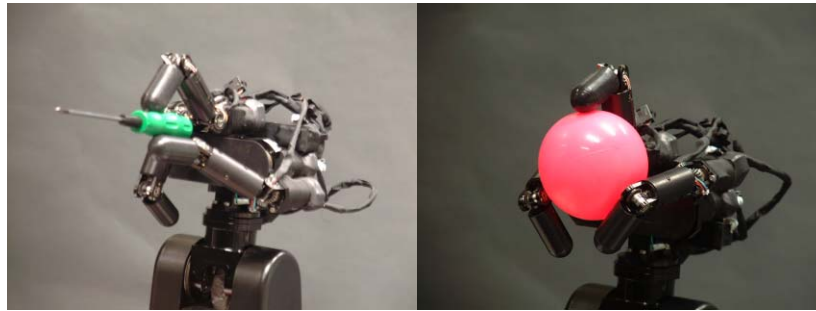


図1：高速多指ハンド

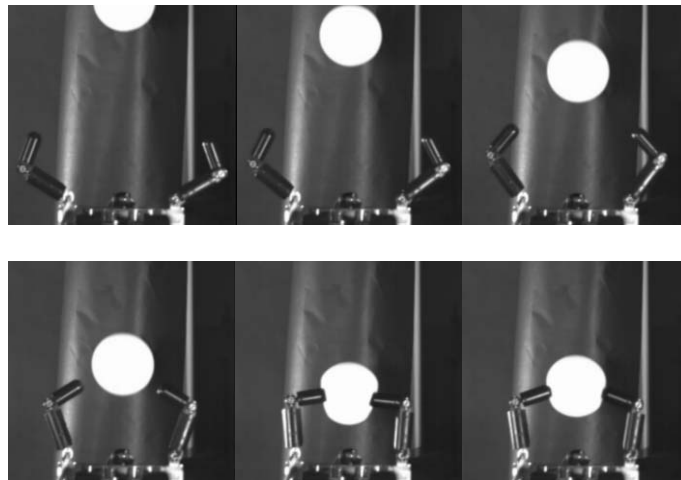


図2：捕球実験

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を構築することを目標とする。特に、神経ネットワークが学習によって最適な情報伝達経路を形成している点に注目し、状況に対応して動的に再構成可能な並列分散ネットワーク構造を持つ工学的脳を実現する。

感覚運動統合処理では、行うタスクの種類や環境の状態に伴って必要な通信速度や緊急度が変わり、従来のネットワークで処理するには負担が大きい。そこで、本研究では、通信速度を可変にできるネットワークを、CDMA方式通信によって実現する。特に通信回路をLSI化し、他の各計算要素と組み合わせることで、実際に可塑性を持つマルチプロセッシングシステムを構築する。最終的に、脳型処理アルゴリズムを実装して、その有効性を検証する。

これまでに、CDMAの拡散符号の割り当てを動的に最適制御するための送受信回路として、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。また、ネットワーク上で通信を行うための制御シーケンスの作成を行った。図3に開発した通信回路の概要を示す。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ーから構成した。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、以上の成果に加えて、マルチDSPボードを準備して、マルチプロセッシング環境の整備を行った。次年以降は、マルチプロセッシングシステムの構築を行っていく予定である。

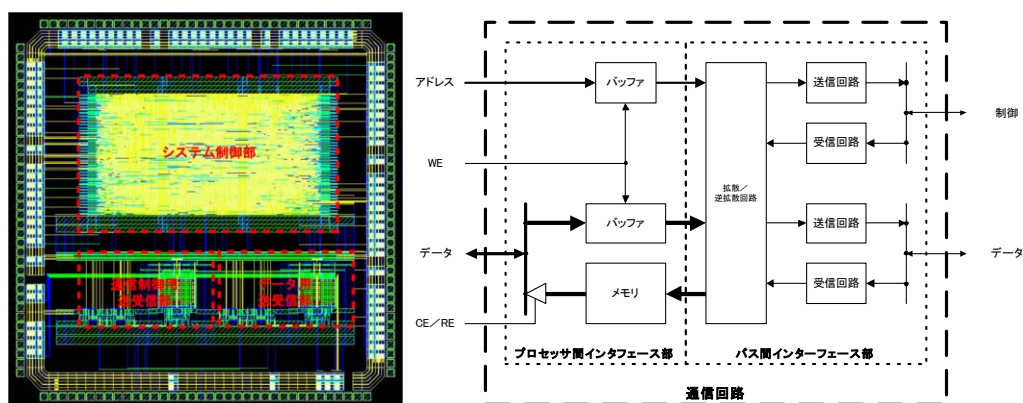


図3 CDMA方式通信回路

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14年度は、石川研究グループとの共同研究として、前年度開発した超高速キャプチャリングシステムを高速アームに装着した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提案したDynamic Friction Closureについて、基礎実験装置による検証に成功した。結果として、図4に示すように自然落下したボールを、高速ビジョンで認知し、高速アームで適した位置へ移動した後、高速ハンドで捕獲するという一連の捕獲動作を実現することに成功した。また、Dynamic Friction Closureの検証実験において、解析的に求めた運動エネルギーと移動距離の関係を、実験的に実証することに成功した。この中で、並進運動エネルギーと回転運動エネルギーについて、小さい方のエネルギーは大きい方が減少するまで保持されるという法則について解明した。

今後は、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について、捕獲成功率の向上を目指す予定である。一方、Dynamic Friction Closureの考察を行う上で獲得したエネルギー変移の法則に着目した把握戦略について考察する。



図4：高速ビジョン+高速アーム+高速キャプチャリングシステム

電気通信大学下条研究グループ：「手と脳」のための実時間触覚情報処理の研究

「手と脳」のための感覚運動統合理論に対応した触覚センサの開発と実時間触覚情報処理の研究を行う。具体的には、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14年度は、従来の感圧素材の欠点であった履歴特性の低減を目的として、液状感圧ゴム素材を開発し、ディッピング手法により触覚を必要とする指等の自由曲面状にも感圧膜を構成可能な手法を開発した。また、高密度型分布触覚センサを実装する場合の問題点であった配線数の低減、並びに触覚情報処理アルゴリズムの開発を目的とした触覚情報処理チップの開発を行っている。今回触覚チップの設計に基づきLSIを試作した。図5に試作した触覚情報処理システム概念図およびLSIを示す。現在、回路の動作試験を行っている。

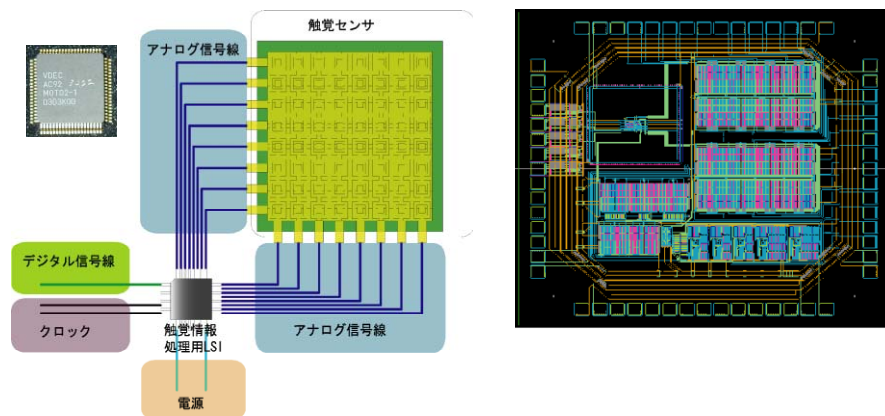


図5：触覚チップ

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

本年度は、計算アルゴリズム、手の運動メカニズム、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、自分の能力にあった問題を選択しながら自己組織的に能力を拡張する学習システムを構築した。このシステムは、問題を解決するための学習系と問題を選択するための学習系から構成され、前者が実現したパフォーマンスの向上率を後者の報酬として与えることにより、自分の能力と整合した問題を選択する機能をもつ。本研究では、具体的な例題を用いて提案したアルゴリズムの有効性を示した。次に、手の運動アルゴリズムに関しては、昨年度報告した「筋肉の特性を考慮した腕の運動制御のモデル」を進歩させたほか、運動中の3次元空間内での注視位置をリアルタイムに測定するシステムを構築した。これらはいずれもまだ完全な形ではなく、来年度以降もさらに開発を続ける計画である。このほか、昨年度より研究を開始した「運動安定化」の仕組みについて、神経信号路において信号のばらつきが生じるメカニズムに関して数値実験を行なった。その結果、神経活動のゆらぎは神経活動の活発化に従って増加するものの比例して増加するわけではないこと、また、膜電位に載る物理的ノイズが神経活動のゆらぎに与える影響は小さいことが明らかになった。前者の性質は、神経活動のゆらぎが神経活動に比例すると仮定してきた従来の計算理論モデルに対してその根拠が疑わしいことを示している。また、後者の結果は、神経活動のゆらぎを生み出す原因が、神経信号路上のノイズよりもむしろ入力信号のゆらぎにあることを示している。これらの結果はいずれも重要で、これまでの結果について論文投稿を準備しているほか、今後さらに深く検討する計画である。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継続しており、その結果を論文として投稿中である。

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

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システムを構築する。特に、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、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。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、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キャプチャシステムのための複数対象追跡実験を行った。さらに、人間に勝つのに十分な能力を有するジェスチャー用高速ロボットハンドの開発を行った。

3. 研究実施体制

石川グループ

- ① 研究分担グループ長： 石川 正俊（東京大学大学院情報理工学系研究科教授）
- ② 研究実施項目：「手と脳」における感覚運動統合システムの研究、「手と脳」における高速アームの研究

岩田グループ

- ① 研究分担グループ長： 岩田 穆（広島大学大学院先端物質科学研究科教授）
- ② 研究実施項目：「手と脳」における脳型情報処理

金子グループ

- ① 研究分担グループ長： 金子 真（広島大学大学院工学系研究科教授）
- ② 研究実施項目：「手と脳」における高速ハンドの研究

下条グループ

- ① 研究分担グループ長： 下条 誠（電気通信大学電気通信学部教授）
- ② 研究実施項目：「手と脳」における実時間触覚情報処理

阪口グループ

- ① 研究分担グループ長： 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 研究実施項目：「手と脳」における実時間感覚運動統合理論

石井グループ

- ① 研究分担グループ長： 石井 抱（東京農工大学工学部助教授）
- ② 研究実施項目：「手と脳」における実時間視覚情報処理

4. 主な研究成果の発表（論文発表および特許出願）

(1) 論文（原著論文）発表

- Akio Namiki, Takashi Komuro and Masatoshi Ishikawa: High-speed sensory-motor

fusion for robotic grasping, Measurement Science and Technology, Vol. 13, No. 11, pp. 1767-1778, 2002

- Akio Namiki, Takashi Komuro, Masatoshi Ishikawa: High Speed Sensory-Motor Fusion Based on Dynamics Matching, Proceedings of the IEEE, Vol.90, No.7, pp.1178-1187, 2002
- K. Katayama and A. Iwata: "A Pulse Coupled Neural Network Simulator using Programmable Gate Array Technique", IEICE Trans.
- INF. & SYST., vol. E86-D, NO.5, , May 2003.
- K. Katayama and A. Iwata: "A High-Resolution CMOS Image Sensor with Hadamard Transform Function", IEICE Trans. Fundamentals, vol. E86-A, NO.2, pp. , Feb. 2003.
- K. Katayama, M. Nagata, T. Morie and A. Iwata, "An Hadamard Transform Chip Using the PWM Circuit Technique and Its Application to Image Processing", IEICE Trans. Electron., vol.E85-C, NO.8, pp. 1596-1603, Aug. 2002.
- Makoto Kaneko, Mitsuru Higashimori, Reika Takenaka, Akio Namiki, and Masatoshi Ishikawa : The 100G Capturing Robot -- Too fast to see, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol.8 No.1, pp.37-44 (2003)
- 並木明夫, 石井抱, 石川正俊: 高速センサフィードバックを用いた把握行動, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.7, pp.47-56, 2002

(2) 特許出願

なし