

「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15年度は、平成14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

軽量高速多指ハンドアームシステムを用いて、動的で高速なマニピュレーションの研究を行った。具体的には、指の瞬間的な動作により、落下する物体の姿勢を瞬時に変化してから捕獲する、ダイナミックアクティブキャッチングの研究を行った。また、多関節ロボットアームを用いて、人間の投げるボールを視覚フィードバックに基づいて打ち返すバッティング動作の研究を行った。

2. 岩田グループ

前年度までに開発した、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を改良して、高速化を図った。また、シリアル接続を行うことでバスとして機能し、DSPからの書き込み／読み込み機能も加えたCDMAシリアル通信チップの試作を行った。

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対象にして、ワイヤ駆動方式の高

速ロボットハンドが対象物を捕獲する場合の Dynamic Preshaping 問題を定義した上で、目標指姿勢を実現するための機構パラメータの設計法について基本戦略を構築した。

4. 下条グループ

従来困難であった、法線・接線方向力が検出可能な触覚センサユニットの試作を行い、その動作を確認した。また、応答速度1msのビジョンとのダイナミック整合を目指し、高速応答触覚センサの開発を行い、応答速度0.4msで接触位置とその荷重を検出するセンサを開発した。

5. 阪口グループ

腕の運動軌道生成の計算理論に関して「終点分散最小化軌道」のパラメータ依存性を明らかにした。「終点分散最小化仮説」とは「脳は生体ノイズの存在の下で到達点のばらつきが最も小さくなる軌道を選択している」というもので、運動指令のばらつきが運動指令の大きさの2乗に比例していると仮定しているが、本研究では、その値が2より小さくなると軌道形状が実際の軌道と大きく異なることを明らかにした。

6. 石井グループ

人間の視覚及び動作を大幅に超える高速バッティングロボットの開発を行った。この高速バッティングロボットでは、バネの弾性エネルギーの瞬時放出によるフィードフォワード的な制御により、0.05sでの高速スイングを実現することができた。

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

従来システムでは困難であった高速で器用な操り動作を実現するために、前年度までに開発した高速多指ロボットハンドと高速ロボットアームを備えた感覚運動統合システムを用いて、様々な動的マニピュレーションの研究を行った。

まず、対象を高速にロボットハンドで捕獲するための新たな手法として、「ダイナミックアクティブキャッチング」を提案した。これは、指先などによって瞬時に力を与えることで、一瞬で対象の姿勢や位置を変えて安定な位置で把握するという捕獲手法である。瞬間的に対象の姿勢を変えることで、様々な位置や姿勢で落ちてきた対象を、ハンドに適した位置で安定に捕獲することが可能となる。提案した手法を、球と円柱のそれぞれに対して適用した。図1は、約1[m]の高さから落下する円柱を、3本指を用いてキャッチングしたときの連続写真である。傾いて落下する円柱を、3本指をうまく用いて回転させることにより、把握しやすい姿勢まで操作してから捕獲している。対象の3次元位置に加えて姿勢の情報も視覚によってフィードバックすることにより、このタスクは実現されている。

次に、スポーツ時に見られる人間の高度な視覚情報処理や運動技能をロボットで実現することを目指して、野球のバッティングタスクを多関節マニピュレータシステムにおいて実現した。具体的には、バッティングタスクを、バットを高速に振り切る動作とバット

の芯で正確に捉える動作に分離し、これを達成するようにセンサ情報と時間変数を陽に組み込んだハイブリッドな軌道生成を行った。この軌道は高速な視覚フィードバックによりリアルタイムに更新され、対象の予測が困難な場合でもタスクが実現される。結果として、ビジョンがボールを認識してからスイングを開始するまでに0.1s程度という非常に厳しい条件のもとでも、高速な視覚フィードバックによりマニピュレータはバットの芯付近で打撃に成功している。図2に打撃の瞬間の連続写真を示す。

次年度以降は、ダイナミックアクティブキャッチングの理論的な考察を行うとともに、ハンドとアームの統合に関する研究を行い、様々な動的マニピュレーションの研究を行う。

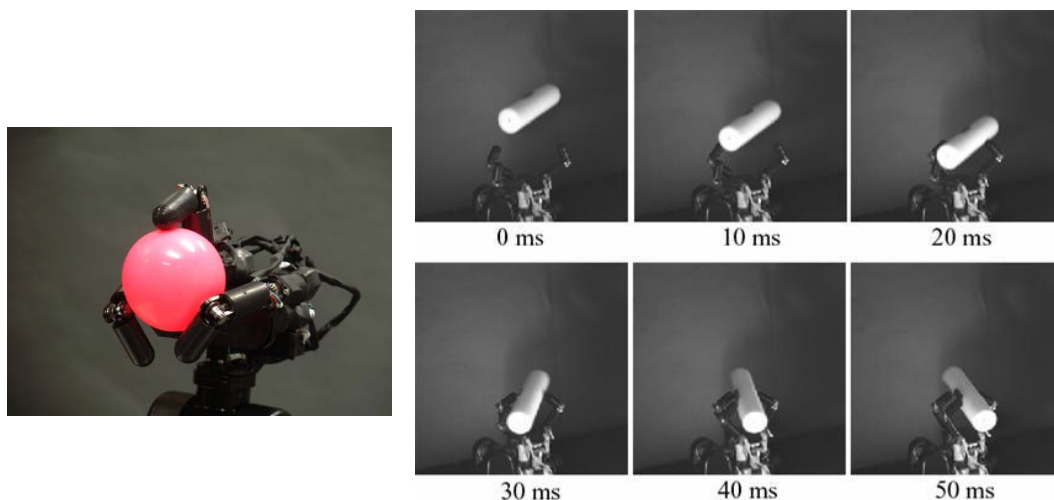


図1：高速多指ハンドと円柱のダイナミックアクティブキャッチング

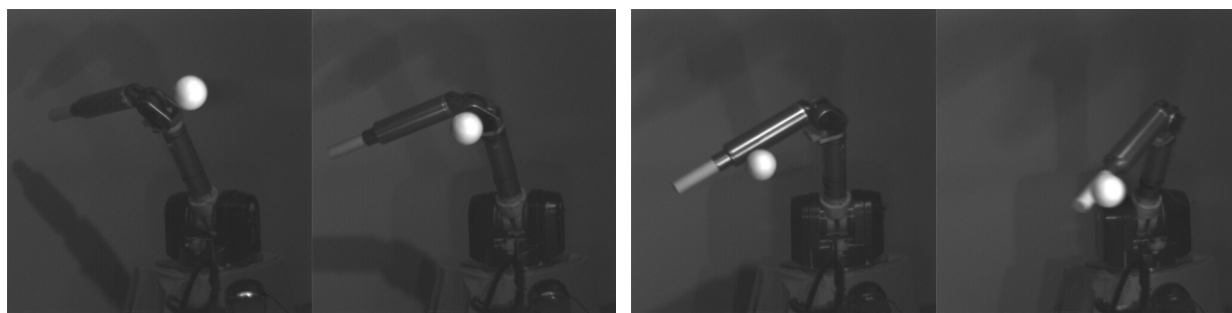


図2：高速バッティング

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。

脳型情報処理システムで扱うデータは、イメージセンサからの画像のように大容量なデータから小規模ながら即時性の必要なデータが存在し、これらを転送先の求められる制約（サンプリング（動作）周波数など）に合ったリアルタイム通信が必要となる。また、外界の

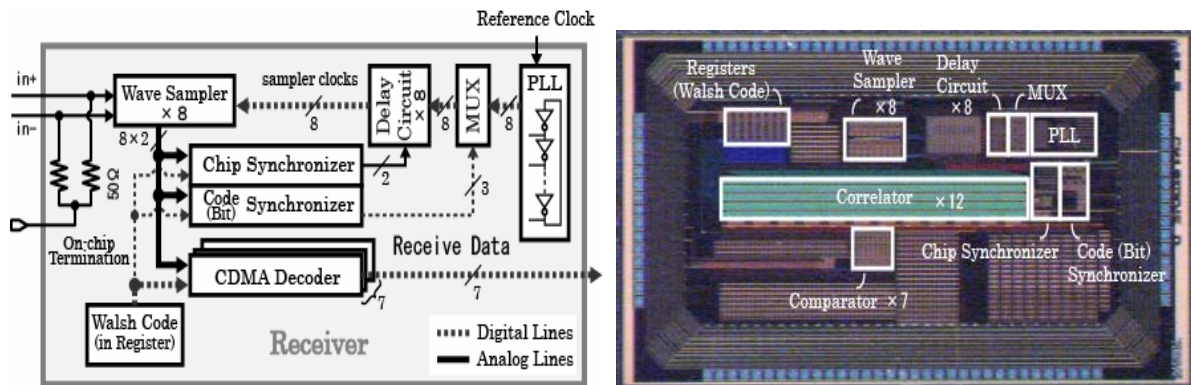
環境変化に伴ってデータパスが切り替わっても、全てのリアルタイム性を保持できる柔軟さも必要となる。更に、ロボット制御において伝送路の増加はアクチュエータ系への負荷といった物理的な問題をまねくため、少ない伝送路によるネットワーク構築が求められる。そこで、本研究では、有線による高速シリアル通信にCDMA方式による多重化を行った。

これまでバスラインを集中定数コンデンサと見なして多重化を行ってきたが、インピーダンス整合が困難であり多重反射の影響等のために伝送レートが100MHz程度に制限されることがわかった。そこで、各ノード間の接続をpoint-to-pointにし、これを1本のバスと機能させることで高速化を試みた。目標スペックは0.25umCMOS技術で多重数8、伝送レート2Gbpsとした。

まず、point-to-point接続によるシリアル通信を実現するにあたって、データを送信するタイミングとデータを受信するタイミングを合わせる同期システムが重要となる。そこで、コード同期とチップ同期の2種類の同期方式を提案し、それを導入した受信回路を設計、試作した(図3)。コード同期では送信波形の拡散タイミングと受信回路の逆拡散タイミングを一致させ、チップ同期では一致させたタイミングから外れないように監視する。測定により、2Gbpsの拡散波形から2つの同期が機能したのを確認した。図4(左下)にコード同期時のクロック波形を示す。ここでは、クロック波形の位相をシフトさせることで逆拡散のタイミングを探索する。そのため、位相の異なる波形が重なって見える。図4(右下)はコード同期からチップ同期へ移行したときのクロック波形を示す。ここでは、クロック波形の位相が1つに定まっている。図4(上中央)に、クロックの遅延時間を制御するコントロール電圧波形(Cnt+, Cnt-)を示す。コード同期時には固定値(1.9V, 0.7V)にしているが、チップ同期に切り替わると最適な遅延時間へと調整するように電圧が変化する。

送信回路においてはCML(Current Mode Logic)型のドライバを用いることにより高速化を図った。設計・試作を行い、現在(2004/4)測定準備に取りかかっている。また、設計した送信回路と受信回路を組み合わせ、(1)シリアル接続を行うことでバスとして機能、(2)DSPからの書き込み/読み込み機能を加えたCDMAシリアル通信チップの試作も行った。

今後は送信回路とCDMAシリアル通信チップの測定を行い、DSPボードを複数枚用いたマルチプロセッシングの環境整備を行い、脳型情報処理システムの構築とその有効性を示す。



(a) 回路構成図 (b) チップ写真
 図3 CDMAシリアル通信チップの構成及びチップ写真

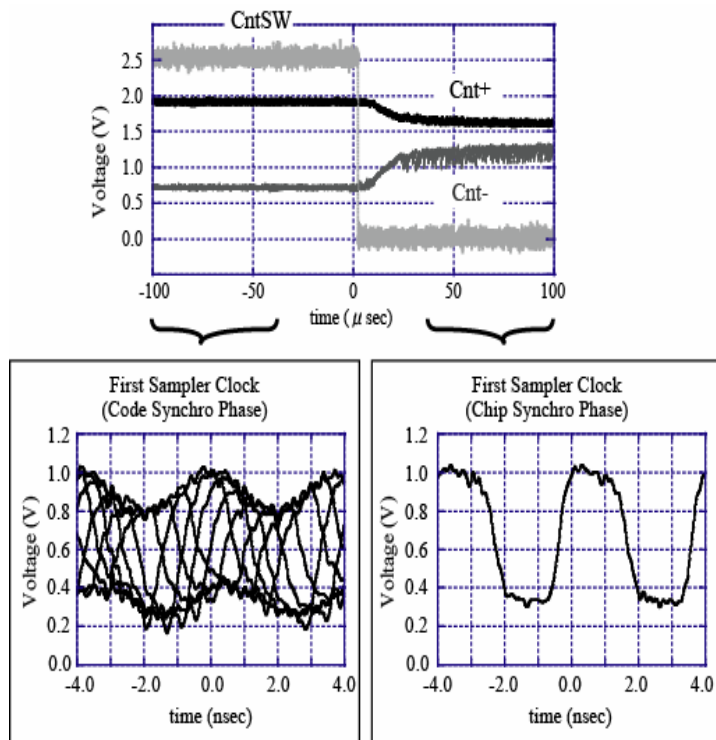


図4 測定結果

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15年度は、ワイヤ駆動方式の高速ロボットハンドが対象物を捕獲する場合の Dynamic Preshaping 問題を定義した上で、目標指姿勢を実現するための機構パラメータ

の設計法について基本戦略を構築した。図5に示すように、高加速度条件下における対象物の指姿勢生成を機構パラメータ（ワイヤリング、関節バネ配分、質量分布、等）の最適設計問題としてシミュレーションにより検証した。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、対象物の初期並進速度と初期回転速度から導出されるグリップ内での振る舞いを考察し、安定平衡状態と不安定平衡状態の存在を解明した。一方、石川研究グループとの共同研究として開発した軽量高速モータを用いることにより、器用性を兼ね備えた脚を持つジャンピングロボット（Jumping & Grasping Robot）のプロトタイプ開発を行った。モータの出力、重量、脚長、等の機構パラメータの関係を整理し、跳躍および把握実験に成功した。

今後は、構築したDynamic Preshaping 問題に対する最適設計戦略の検証装置開発、Jumping & Grasping Robot によるグラスピングのための最適ジャンプ戦略について考察する予定である。

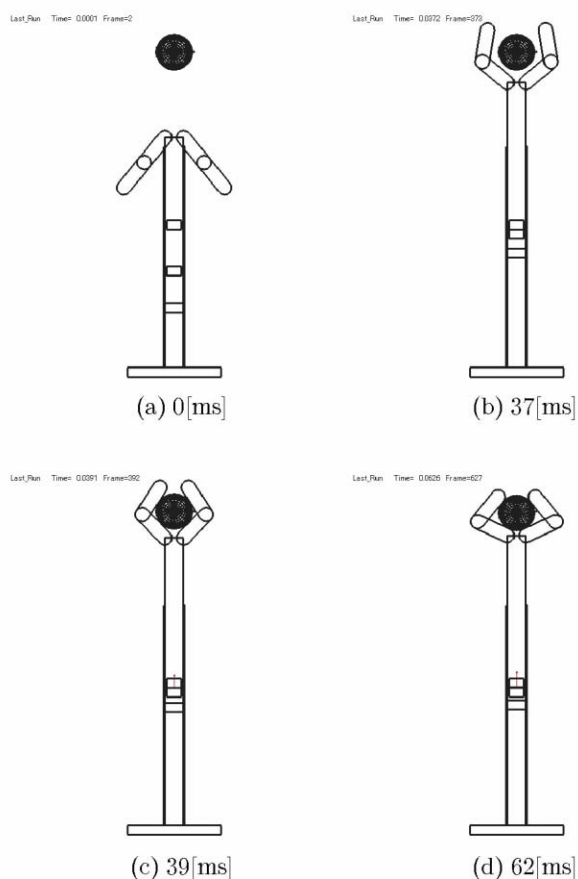


図5 高加速度条件下を想定したキャプチャリングシミュレーション

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

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、高速動作を行う多指ハンド上に実装可能な、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15年度は、開発した液状感圧ゴム素材の自由曲面にセンサを構成できる利点を生かし、従来は困難であった、法線・接線方向力が検出可能な触覚センサユニットの試作を行い、その動作を確認した。また、応答速度1msのビジョンとのダイナミック整合を目指し、高速応答触覚センサの開発を行い、応答速度0.4msで接触位置とその荷重を検出するセンサを開発した。図6左には高速ハンドに実装するセンサと、図6右にはその応答特性を示す。図6右は接触が生じて、後0.4ms後に接触位置が出力されている事を示している。

また、並行して触覚情報処理チップの開発も行い、昨年開発したLSIの動作試験を行い、その結果に基づき改良を行っている。

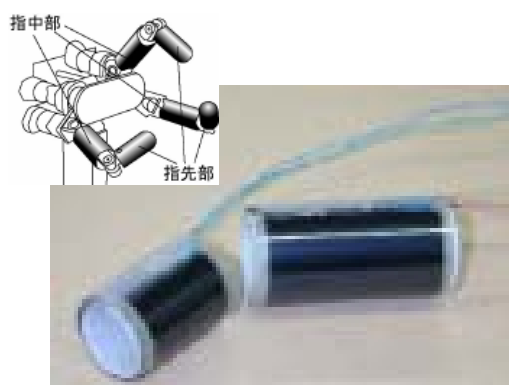


図6左：高速ハンド用触覚センサ

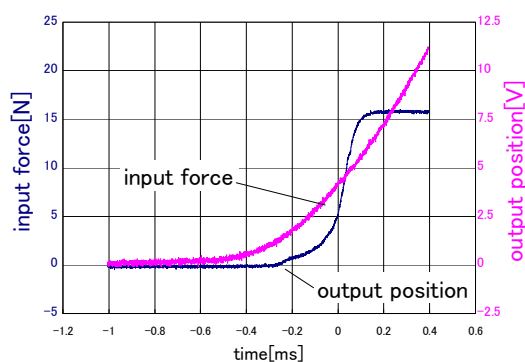


図6右：高速ハンド用触覚センサの応答特性

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

まず、腕の運動軌道生成の計算理論に関して「終点分散最小化軌道」のパラメータ依存性を明らかにした。「終点分散最小化仮説」とは「脳は生体ノイズの存在の下で到達点のばらつきが最も小さくなる軌道を選択している」というもので、単純な原理で広範囲の運動を説明できることから大きな注目を集めた。この仮説では、運動指令のばらつきが運動指令の大きさの2乗に比例していると仮定しているが、生理学データから推定されるべき乗数の値は報告ごとに異なり、必ずしも2ではない。本研究では、種々のべき乗数に対する軌道について数値実験を行ない、その値が2より小さくなると軌道形状が実際の軌道と大きく異なることを明らかにした。この結果は、今後この仮説の検証を行なう際に有用なものとなる。このほか、腕の運動モデルについては、筋肉の力学的特性を反映した運動モデルを用い、指令合成アプローチの能力を数値実験により調べるとともに、主動筋と拮抗筋の同時活性化がもつ機能的意味についても検討した。

人間の運動動作の計測については、昨年度に引き続き、手の動きと視線の動きの実時間

で同時に計測するための計測システムの構築を進めた。今年度は、推定誤差を生み出す要因を特定するとともに、ハードウェアの改良や校正方法の改善により大幅な性能改善を達成した。来年度はこの装置を用いて、実際に運動中の視線計測を行なう予定である。

その他、視覚・運動変換学習に関する行動実験、および、運動安定化に関する計算モデルおよびデータ解析、運動指令パターンの解析などについてもあわせて研究を行なった。

広島大学石井研究グループ：実時間視覚情報処理の研究

高速化した「手と脳」システムの実例として、人間の視覚及び動作を大幅に超える高速バッティングロボットの開発を行った。この高速バッティングロボットでは、バネの弾性エネルギーの瞬時放出によるフィードフォワード的な制御により、0.05sでの高速スイングを実現するものであり、1000fpsを超える2台の高速ビジョンを用いた実時間3次元軌道予測アルゴリズムを用いることにより、時速50km(=14m/s)以上で飛翔するピンポン玉の打撃に成功している。またmsレベルでの打撃制御を可能とすることにより、高速飛翔物体に対する ± 10 度の誤差程度での左右打ち分け動作を実現し、人間に比べ大幅に高速化した「手と脳」システムの有効性を検証した。

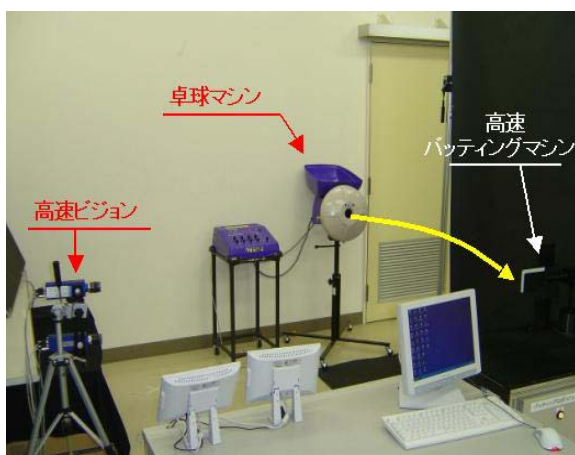


図7 バッティングロボットの実験環境

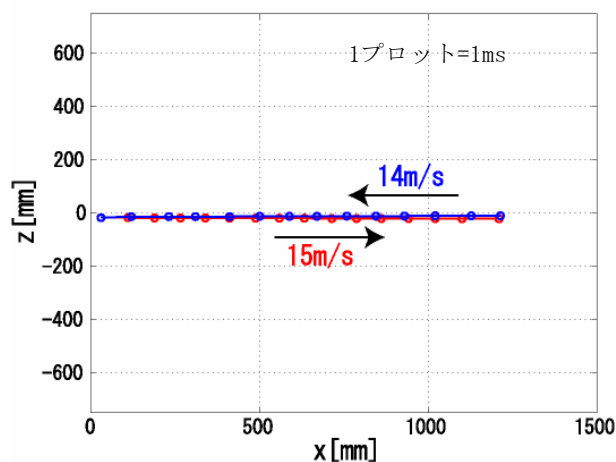


図8 打撃時のピンポン玉の運動軌跡

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（広島大学大学院工学系研究科助教授）
- 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) 論文発表

- Akio Namiki, Koichi Hashimoto, Masatoshi Ishikawa: Hierarchical Control Architecture for High-speed Visual Servoing, The International Journal of Robotics Research, October 2003, vol. 22, no. 10, pp. 873-888
- Koichi Hashimoto: A review on vision-based control of robot manipulators, Advanced Robotics, Vol.17, No.10, pp.969-991 (2003)
- 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)
- 下条誠, 仁木亨: 高速応答が可能な可搬型ハプティクスディスプレイの開発, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J87-D-II, No. 5, pp. 1-9, (2004)
Yutaka Sakaguchi: Visual field anisotropy revealed by perceptual filling-in, Vision Research, Vol.43, pp.2029-2038, 2003.

(2) 特許出願

H15年度特許出願件数：1件（研究期間累積件数：1件）