

# 研究終了報告書

## 「高速センシング・ロボットによる実時間インタラクションの創成」

研究期間：2017年10月～2021年3月

研究者：山川 雄司

### 1. 研究のねらい

本研究では、高速なビジョン、画像処理、アクチュエーションの基盤技術を駆使して、これらを統合するとともに、人間ロボット協調に最適かつリアルタイム処理が可能なアルゴリズムを新たに提案し、高速な認識行動(kHz オーダ)と低遅延(ミリ秒オーダ)を特徴とする人間ロボット協調システムを開発する。その上で、具体的な人間ロボット協調タスクを実現する。加えて、高速性と低遅延に依拠した実時間での実世界インタラクションによる人間とロボットとの新しい関係を創出し、従来とは異なる新たなインタラクションの理解に貢献する。

#### 高速ビジョンによる高速画像処理認識

感覚系の画像処理を高速化するために、1秒間に1,000枚の画像取得が可能な高速ビジョンを用いると同時に、高速画像処理を導入することにより、1ミリ秒での画像処理を目指す。特に、画像取得の高速性を活かすことで、アルゴリズムを簡略化し、画像処理の高速性を維持させる。また、人間の動作だけでなく、操作対象の特徴も認識することで、高い精度での画像処理認識を実現させる。これにより、学習や予測等を用いることなく、リアルタイムでの画像認識が可能となり、高時間分解能での画像認識を可能にする。

#### 高速ロボットの開発と制御

運動系のロボットを高速化するために、1秒間に180度の開閉運動が可能なロボットハンドを用いるとともに、機械系の限界を目指して新規駆動システムを開発する。人間を超える加速度・速度で動作するロボットを開発することにより、人間の動作に対する完全追従や協調動作等が可能になる。また、高速ビジョンからの情報をフィードバックし、リアルタイムでの視覚制御を実現する。さらに、人間との協調作業・動作に適した高速ロボット制御を実現する。

#### 高速な人間ロボット協調によるインタラクションと人間との新しい関係の創出

上述した要素技術を統合し、A「人間に完全追従する動作シンクロ」、B「人間とロボットとの統一物体の制御」、C「人間の運動を補助する動作支援」の3タスクに対して従来システムを凌駕する性能で実現する。特に、高速性(1ms 画像計測, 1kHz 視覚フィードバック)によって、人間の動作に対して低遅延かつ高速で追従し、協調動作誤差を最小限に抑える。これにより力学的インタラクションにおいて従来とは一線を画す人間とのインタラクションが実現され、人間ロボット協調における作業効率向上やストレスフリーが期待できる。

## 2. 研究成果

### (1) 概要

本研究では、高速ビジョンを基軸として、高速なセンシング技術を用いて、リアルタイムに人間の運動や操作対象物体の状態を認識し、それをロボットにフィードバックすることにより実時間での人間とロボットとのインタラクションを目指している。

高速なセンシング技術として、高速ビジョンによる対象の完全把握や高速画像処理認識による実時間計測、さらに機械学習と統合した画像計測を行っている。その情報を基に、人間の運動や操作対象物体の状態に対して遅延なく適切に動作するための高速なロボットシステムを開発している。加えて、本研究課題の具体的なアウトプットである人間とロボットとの実時間インタラクションの応用に取り組み、そのアプリケーションとして、A「人間に完全追従する動作シンクロ」、B「人間とロボットとの統一物体の制御」、C「人間の運動を補助する動作支援」の3つのPOCを設定し、その具現化に向けたシステム構築および手法提案に取り組んでいる。

A「人間に完全追従する動作シンクロ」では、人間の手の動作を高速ビジョンによって計測し、その結果をリアルタイムに高速ロボットハンドにフィードバックすることにより、高速・低遅延で、手の動作に追従する遠隔操作システムを開発する。

B「人間とロボットとの同一物体の制御」では、人間とロボットとが同じ物体(本研究では板状物体)を持ち、人間が物体を操作すると、その操作に協調してロボットハンドが制御されるものである。これにより、人間の行動に協働するとともに、意図しない物体の位置・姿勢を補正することが可能となる。

C「人間の運動を補助する動作支援」では、人間が手で持つことができる高速なロボットモジュールを開発すると同時に、そのモジュールの手先位置を高速高精度で制御することにより、人間の粗動動作にロボットの微動動作を加えることで、人間の手先運動を補助するだけでなく、拡張させるような機能(動作支援)を実現する。

### (2) 詳細

以下に示すように、高速なロボットシステムを開発するとともに、設定した3つのアプリケーションを実現しており、研究目的を予定通り達成している。

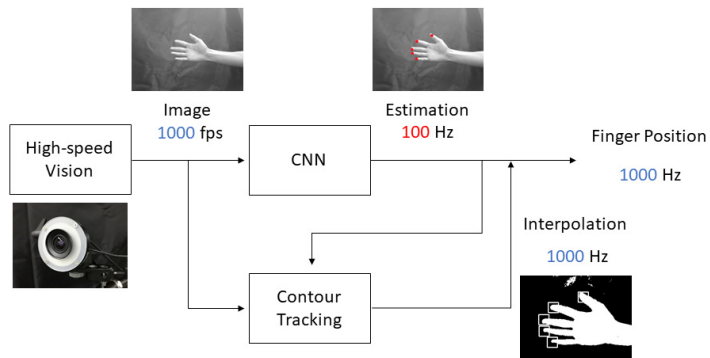
#### 研究テーマ A「人間に完全追従する動作シンクロ」

人間の手指の手先位置を高速に認識する画像センシングと、その手先位置情報に基づく低遅延高速遠隔操作の基本システムを用いて、人間の手指運動に低遅延で追従し、その動作にシンクロしたロボットハンドの遠隔操作を実現した。このシステムを用いて実機実験による評価を行った結果、人間の目の認識速度(30 ms)を超える性能(画像入力からハンド動作まで約20 ms)での遠隔操作を実現すると同時に、従来の低速な遠隔システムでは困難な動的な対象へのアプローチ(落下する物体の遠隔キャッチング実験)に対して、システムの有効性を確認した。また、その時のシステムに対する人間の学習効果についても検討した。



さらに、この基本システムに対して、画像センシングを強化し、より簡易なシステムで実現するための取り組みとして、機械学習と高速画像処理を統合した、人間の手指の手先位置認識

手法のフレームワーク(右図)を新たに提案した. 具体的には, 1,000 fps の高速カメラによって得られた画像に対して CNN によって指先位置を 100 Hz で推定するとともに, その指先位置情報も用いて同じ画像に対する指先追跡によって, 100 Hz の推定の間を 1,000 Hz



で補完するものである. これにより, マーカー等を用いることなく, 多少背景が乱雑な場合にもロバストかつ高速に指先をトラッキングすることに成功した. また, CNN 単体よりも高い精度で指先位置を計測できることを確認した(右表). 加えて, 低速な手の運動を精確に捉えるために, 画像ノイズの影響を排除可能にした上で, 微小な動きを認識するためのアルゴリズムを提案し, その有効性を確認した.

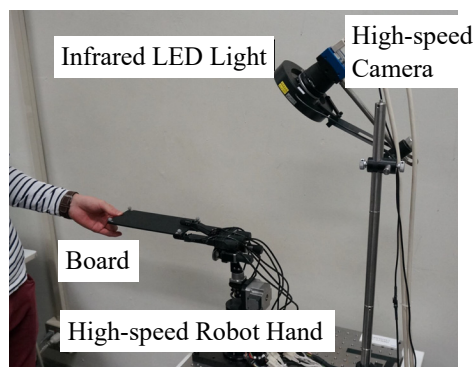
### 正確性

#### MSE

- 輪郭追跡&CNN 0.56 px
- CNNのみ 0.65 px

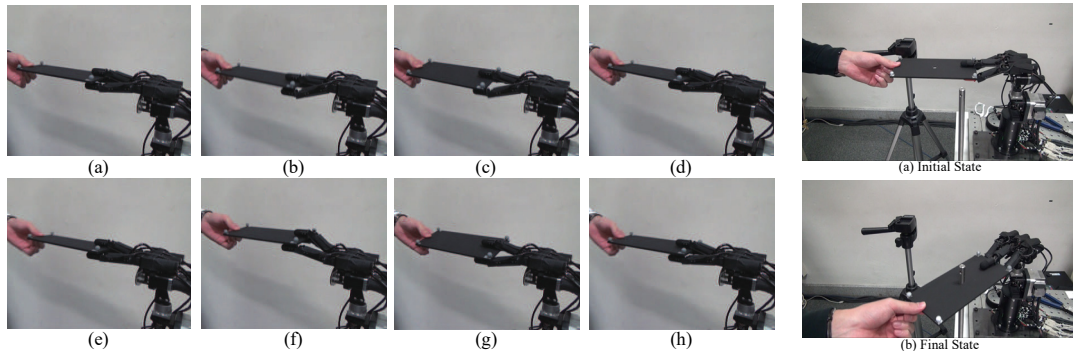
### 研究テーマ B「人間とロボットとの統一物体の制御

右図に示すように, 人間とロボットハンドとが同一物体(今回は変形しない板状物体)を持ち, 人間の操作によって板状物体の位置・姿勢が動的に変化するため, その変化を高速ビジョンシステムによって 1 ミリ秒ごとに認識し, その結果を基にロボットハンドを制御する人間ロボット協調システムを開発した. 高速ビジョンシステムでは, 板状物体のコーナーに取り付けた4つのマーカーをビジュアルトラッキングすることにより, リアルタイムに板状物体の位置・姿勢を高精度で計測する手法を提案している. 次に, その計測した板状物体の位置・姿勢からロボットハンドの逆運動学を解き, ロボットハンドの各関節角度を高速かつ高精度に制御することにより, 人間の操作に瞬時に対応できる動作を実現した. この制御方法において, 従来は人間のロボットのダイナミクスモデルが必要であったのに対して, 今回は幾何学的な計算のみで実現できる点が独創的な特徴として挙げられる.



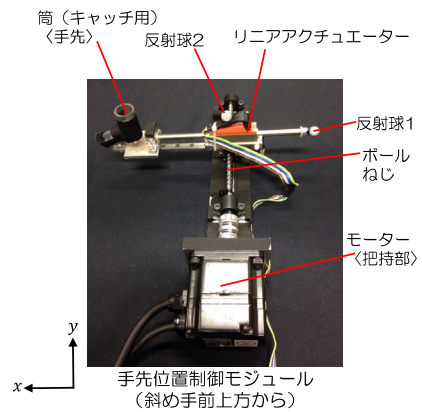
これらの提案手法を用いて, 人間が板状物体を上下運動させたことにより板状物体が傾いた場合には, ロボットハンドはその傾きを 0 度にするように, 人間が板状物体を回転運動させたり(物体を振るような動作), 左右に運動させた場合には, その運動に追従するように設定した. この設定で実験した結果の連続写真が次頁の図(左)である. これにより, 開発システムおよび提案手法の有効性が確認できた. また, 人間が板状物体を上下運動させたことにより板状物体が傾いた場合, ロボットハンドはその傾きを 0 度にするように制御されるが, 人間が高速かつランダムに上下運動させても, せいぜい 2.5 度程度に収まることを確認している. さらに, この人間ロボット協調システムを用いて, 精度が要求される協調ペグ・イン・ホールを実現した. そ

の結果を下図(右)に示す。ペグ・イン・ホールを実現するだけでなく、ペグ・イン・ホールした状態で人間が板状物体を上下運動させても、ペグと板状物体がかむことなく、スムーズに動かすこともできる。また、高速性によって、ロボットへの制御負担も軽減できることを確認した。



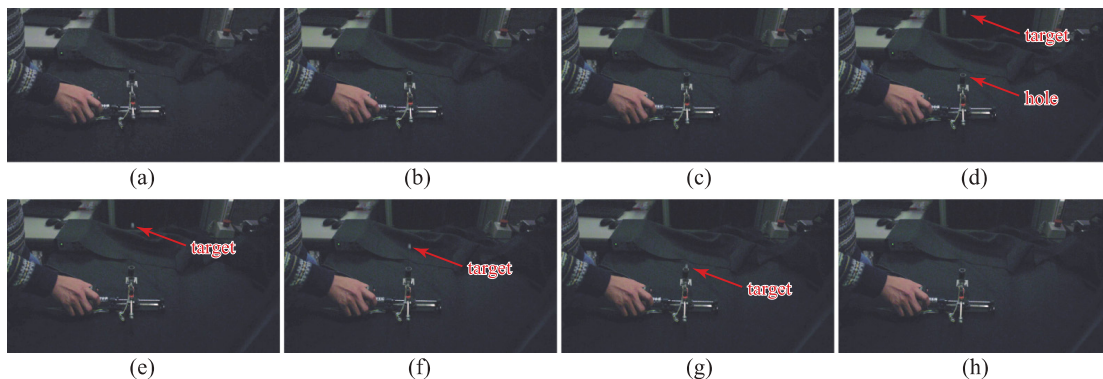
### 研究テーマ C「人間の運動を補助する動作支援」

右図に示すような人間が手で持ち運びでき、かつ人間の手先運動を超える高速なロボットモジュールを新たに開発した。本モジュールはサーボモータとボールねじによる前後方向の並進運動とリニアアクチュエータによる左右方向の並進運動が可能であり、2次元平面内の高速高精度な位置制御が可能である。本モジュールを人間が持ち、かつ上方に設置した高速カメラおよび高速画像処理技術を駆使することにより、人間の手先運動の低い速度と精度を補償する事ができ、人間の手先運動の高速化と高精度化を可能にするロボットモジュール



である。制御方法としては、本モジュールに設置した反射球を高速(1 kHz)にトラッキングすることにより、本モジュールの手先位置をリアルタイムに計測することができ、その位置情報をコントローラにフィードバックし、各アクチュエータを駆動させることにより、目標値に対して高速な視覚フィードバック制御が可能である。

本モジュールを用いた基礎実験として、円軌道と直線軌道に対する追従特性実験を行い、人間だけの軌道追従よりも精度の高い軌道追従が可能であることを確認している。さらに、人間だけでは実現が困難な落下する微小物体のキャッチング実験も行い、下図に示すようにキャッチングに成功している。



### 3. 今後の展開

それぞれの具体的なタスクに対して目標とする成果を創出することができた。今後は、この成果をベースにして、システム開発及び改良を続けるとともに、さらなる人間とロボットとのインタラクションの進化と深化を目指す。特に、人間だけで実現が困難なタスク等を見極めるとともに、人間とロボットとのインタラクションにおけるキーアプリケーションを見出し、そのタスクをロボットによる操作、協働、支援によって高速・高精度で実現することを目指す。

### 4. 自己評価

目標としていた3つのアプリケーション「人間に完全追従する動作シンクロ」、「人間とロボットとの統一物体の制御」、「人間の運動を補助する動作支援」を実現することが出来ているため、当初の達成目標を遂行したと考えており、十分な成果を創出したと評価できる。人とのインタラクションにおいて高速低遅延で実現している研究は少なく、独創的かつ挑戦的な取り組みであり、国際的にも高いレベルでのインタラクションを実現したと考えている。

アプリケーション実現に際して必要に応じて研究費を執行することもでき、成果に対する対外発表も適切に行うことができたと考えている。そのため、研究成果を広く世の中に配信できたと考えており、またメディア等でも配信することが出来た点は高く評価できると考える。加えて、得られた成果は社会実装フェーズへと繋がっており、その見通しが立てられた点も評価できる。

### 5. 主な研究成果リスト

#### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:14件

|  |
|--|
| 1. 山川雄司, 遠山渉, 黄守仁, 村上健一, 石川正俊: 人間の手先位置制御の高速高精度化を目指したモジュール開発と基礎検討, 日本機械学会論文集, Vol.84, No.858, Paper No.17-00364 (2018)  |
| 概要 人間の手先運動機能を拡張することを目標とした研究論文であり、実現するためのロボットモジュールの開発とロボットモジュールによる運動軌道のビジョンベースによる補償制御を行い、実機実験を通してその有効性を示した。さらには、人間だけでは困難な微小物体のキャッチングをロボットモジュールの動作支援を受けて、実現することが出来た。   |
| 2. Yuji Yamakawa, Yutaro Matsui and Masatoshi Ishikawa: Development of a Real-Time Human-Robot Collaborative System Based on 1 kHz Visual Feedback Control and Its Application to a Peg-in-Hole Task, Sensors, Vol.21, Issue 2, Article No. 663 (2021) |
| 概要 人間とロボットとが板状物体を把持して、その板状物体に対して協働作業することを目標とした研究論文であり、実現のための高速ビジョンによる板状物体の状態計測、ロボットハンドによる協働制御を行い、実験を通してその有効性を確認した。また、理論的にも協働制御の安定性を議論し、高速性が重要であることを見出した。加えて、協働制御中に精度が要求されるペグ・イン・ホールも実現した。  |
| 3. 山川雄司: 高速ビジョンと高速ロボットによる人間機械協調, 日本ロボット学会誌, Vol.35, No.8, pp.596-599 (2017)  |

概要 高速ビジョンと高速ロボットを用いた、人間を超える高速ロボットシステムによる人間機械協調を紹介している解説論文である。さきがけ研究に関連する研究開発についても紹介している。高速な画像認識とロボット制御により、人間の目には認識できない速度での協調動作を実現していることを示している。この高速性によって、人間の高速かつランダムな動作にも対応できることに言及し、システムの応答性と協調性を向上させることができることについて概説している。

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 1) 【受賞】2020年 インタラクシオン 2020 インタラクティブ発表賞(一般投票)(2020年3月)
- 2) 【メディア】TBS 未来の起源, 人間を超える超高速ロボット(2019年3月)
- 3) 【受賞】2018年 平成30年度東京大学卓越研究員(2018年11月)
- 4) 【メディア】robot digest, [気鋭のロボット研究者 vol.3]高速化が人との協調を変える／東京大学山川雄司講師【後編】(2018年11月)
- 5) 【受賞】2018年 船井情報科学振興財団 船井学術賞(2018年4月)