解 説

高速ビジョンと高速ロボットによる人間機械協調

Human-Machine Cooperation Using High-speed Vision and High-speed Robot

山 川 雄 司* *東京大学大学院情報理工学系研究科

Yuji Yamakawa* *Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

1. は じ め に

様々なロボットの研究開発が盛んに行われており、近年では産業界だけでなく人間社会にもロボットが導入されつつある。人間とロボットとが共存・共生・協働するためには、人間とロボットが相互に作用しあう人間機械協調システムが必要であり、今後重要なロボット技術である。本解説論文では、人間機械協調の分野における人間の感覚運動系とインタラクションするシステムに着目する。

従来の人間機械協調システムは速度面において十分とは言いがたく、二つの要因が挙げられる。一つめはロボットの多くが人間を目標に開発されているためロボット自身が低速である。二つめはカメラを用いた画像処理認識を導入するとカメラのフレームレートである 30 [fps] がボトルネックとなりさらなる低速化につながる。そのため、システム全体が低速となり、ロボットや機械が人間に協調するのではなく、人間がロボットや機械に協調する形となっているのが現状のようである。この問題を解決するには、予測や学習を用いる方法も考えられるが、高速ビジョン・高速画像処理・高速ロボットを導入することがシンプルかつ効果的である。

筆者の研究室では、リアルタイムビジュアルフィードバックに基づく高速ロボットを開発し、機械システムの限界を目指して高速性を追求している。システムの構成要素すべてのダイナミクスを合わせる「ダイナミクス整合[1]」という設計概念をベースに、画像処理を含めて 1 [kHz] のサンプリングレートでの高速なロボットシステムを開発している。人間を超える高速ロボットであり、これを適用することで、ロボットや機械が人間に協調する形へと転換でき、人間機械協調のあるべき姿に近づくことができる。結果として、図 1 に示すようにシステム応答性の高速化による量的変化によって、協調性等における質的变化に貢献することを目指しており、人間とシステムとが相互作用（インタラ

図 1 Concept of high-speed human-machine cooperation

クション) する場面において、“システムが人間の視覚認識速度よりも高速に認識・行動し、人間が認識できない遅延レベルと高サンプリングレートで人間とシステムとの相互作用を実現する”インタラクションシステムの基本設計思想を「ダイナミックインタラクション」として提案している。

本解説論文では、この高速ロボットシステムを用いた人間機械協調の一例として勝率 100%じゃんけんロボットを取り上げるとともに、近年研究を進めている人間との協調作業、作業支援、運動機能拡張について簡単に述べる。

2. 高速ロボットシステム

人間を超える、特に人間の目には見えない速度で反応・動作する高速ロボットについて説明する。本システムの基本構成は、高速ビジョン、高速ロボットハンド[2]とリアルタイムコントロールから構成されており、すべての要素を 1 [kHz] で処理・制御している。

2.1 高速ロボットハンド

従来のロボットハンドは、人間の手のように器用で柔軟な把握や操りの実現を目標とし、速度や加速度などの運動性能はあまり考慮されていなかった。本研究では、人間を超えるロボットシステムを目標としていることから、ダイナミクス整合[1]に基づいて、機械システムの速度限界を目指し、小型で高出力のアクチュエータから設計・開発し、2 自由度の手首を有する 3 本指の軽量高速ロボットハンドを開発している[2]。

原稿受付 2017 年 6 月 30 日

キーワード: High-speed Vision, Visual Feedback, High-speed Robot, Human-machine Cooperation

*〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1

*Bunkyo-ku, Tokyo

アクチュエータとしては、バックラッシレスかつ軽量のハーモニックドライブ®をベースに、瞬時高出力が可能な小型モータを開発している。従来市販品に対し約 1.5 倍以上の巻線密度を持たせることにより、瞬時トルク／重量比に関して従来市販品の約 3.5 倍以上の能力を達成し、0.1 秒で 180 度の開閉運動が可能である。

2.2 リアルタイムコントローラ

高速ビジョンからの画像処理結果を受信し、高速ロボットハンドを制御するためのリアルタイムコントローラとして、本システムでは dSPACE 社製モジュラシステムを用いている。汎用プロセッサと多数の I/O を専用の高速バスによって接続することで、ビジョン情報入力、ロボットハンドの軌道生成およびアクチュエータへの出力等の様々な計算処理を、1 ミリ秒のサイクルタイムで実行できる。

2.3 システムの高速性

構築した高速ビジョンと高速ロボットによるシステムが人間よりも十分に高速であることを示すために、人間の視覚系および感覚運動系の応答時間を調査した。その結果、人間の視覚は約 30 ミリ秒の応答時間、感覚運動系は約 200 ミリ秒の応答時間であることが分かった。以下の勝率 100%じゃんけんロボットでは、1 ミリ秒での画像認識、1 ミリ秒での制御処理、約 20 ミリ秒での動作完了と、システム全体として約 22 ミリ秒の応答時間であることから、人間の目を超えるシステムであることを確認している。

3. 勝率 100%じゃんけんロボット

第 2 章において概説した高速ロボットシステムを用いた人間機械協調の一例として、勝率 100%じゃんけんロボットについて述べる [3]。これまでに三つのバージョンを開発しており、それぞれについて解説する。

3.1 バージョン 1 [4]

勝率 100%じゃんけんロボットのシステム構成は図 2 に示すようなもので、人間が出した「手」に対して、ゲー・チョキ・パーを認識すると、それに勝つ「手」を高速ロボットハンドが出す。高速ロボットハンドは 3 本指のため、図 3 に示すように、3 本指を伸ばしているときに「パー」(図 3(a))、1 本指だけ曲げているときに「チョキ」(図 3(b))、3 本指を曲げているときに「グー」(図 3(c))とした。

人間が出した「手」の認識手法は指の本数をカウントする、じゃんけんに特化したアルゴリズムを提案することにより、高速な画像認識を可能にしている。また、「手」の誤認識を避けるために、開発システムが人間の目よりも高速であることを利用して、手が画像内に収まっていることを確認してから画像認識を行っている。さらに、人間の手の若干の変化も画像から捉えることができ、それにロボットハンドが反応して動作することも避けるために、一度判定した「手」の結果は、手が画像内から消えるまで保持する

図 2 Janken robot system (1st and 2nd versions)

図 3 Hand shape of robot hand

図 4 Experimental result in 1st version

ようにした。これまでの人間の「手」の認識には、手の画像面積やマーカの位置関係から判定する方法等があり、手の大きさの個人差による誤認識やマーカの設置などと様々な問題点が存在したが、本手法では手が撮像できれば高速かつ比較的簡単に「手」を判定することができる。

得られた「手」の認識結果をイーサネットを通してリアルタイムコントローラに送信し、その「手」に勝つようにロボットハンドの「手」を決定し、図 3 に示したゲー・チョキ・パーを実現するための指の関節角制御を行っている。

実験結果の一部を図 4 に示す。また、実験動画は web から見る事ができる [5]。このじゃんけんロボットは、人間が出した「手」を認識し、人間の視覚認識ができない時間内に、ロボットが人間の「手」に勝つように「手」を出すメカニズム、すなわち「高速な後出しじゃんけん」であるが、人間の視覚認識前に後出しが完了するため、人間はその後出しを認識できない。

図 5 Experimental result in 2nd version

図 6 Improvement of Janken robot in time sequence

3.2 バージョン 2

バージョン 1 は、人間には認識できないレベルであるが完全な後出しであった。これは「手」の誤認識を避けるために結果として生じたものであるが、さらなる高速な人間機械協調を目指すには、同時出しもしくは先出しが鍵になると考え、「手」の認識アルゴリズムとロボットハンドの改良を行った。

「手」の認識アルゴリズムでは、逐一「手」を認識するように変更し、かつ一度の判定結果ではノイズの影響等により誤認識が起こるため、数回の判定結果を用いて「手」認識を確定するようにした。ロボットハンドでは、アクチュエータのトルクを 1.5 倍に改良し、さらなる高速化を図った。なお、システムの基本構造はバージョン 1 と同じである。

実験結果の一部を図 5 に示す。また、実験動画は web から見る事ができる [6]。これらの改良により、バージョン 2 では人間の「手」の認識タイミング次第で同時出しになったり、ロボットハンドの「手」の運動が人間の「手」の動作を超える場合もあり先出しを可能にした (図 6)。また、途中で「手」を変更しても即座に対応できる。

3.3 バージョン 3

これまでの勝率 100%じゃんけんロボットバージョン 1・2 では、人間の手がカメラの画角内に収まるように手を出す必要があり、人間機械協調システムとして協調性に欠ける部分があった。そこで、ガルバノミラーを用いて高速に視線を制御するアクティブビジョンシステムの“1 ms オートパン・チルト [7]”とロバストな対象トラッキングを実現した“るみぺん 2 [8]”を用いることにより、一度人間の手をトラッキングし始めると、どこに手を出してもじゃんけんができるシステム (バージョン 3) へと拡張した。これに

図 7 Janken robot system (3rd version) [10]

図 8 Experimental result in 3rd version

より、常に人間の手の中心が画像中心となるような映像制御に成功している。バージョン 3 のシステム構成を図 7 に示し、実験の様子を図 8 に示す。図 8 において、右図は高速ビジョンによって撮像した人間の手である。また、バージョン 3 の実験動画は web から見る事ができる [9]。

加えて、これまでの「手」の認識手法 [4] では腕・手の姿勢によって、「手」を誤認識する可能性が残っていた。そこで、手のトラッキングに加えて、「手」の認識方法も改良した [10]。これにより、従来よりもロバストな「手」認識を可能にし、かつ処理時間も短縮することに成功した。

以上のシステム拡張により、手をどこに、どのように出してもじゃんけんができるようになり、また手を上下に高速に振りながらじゃんけんすることも可能となり、システムの協調性を向上させている。

3.4 展示会への出展やメディア報道

勝率 100%じゃんけんロボットは、国際ロボット展 2013、人とくるまのテクノロジー展 2014、DIGITAL CONTENT EXPO 2014、NEDO FORUM 2015 へ出展した実績もあり、各展示会において来場者に体験していただくとともに、大きな反響を得ている。展示会においても誤動作することはほぼなく、様々な環境にも対応可能なロバストな高速ロボットシステムであることが確認できている。

また、本じゃんけんロボットは新聞・メディア等にも数多く報道されており、動画投稿サイトでは 500 万回以上の再生回数に到達しており [5] [6] [9]、世界中から注目されている高速ビジョンと高速ロボットによる人間機械協調技術である。

(a) Cooperation

(b) Assistance

(c) Enhancement

図9 Other applications

4. 人間機械協調のさらなる応用展開

勝率 100%じゃんけんロボットは高速な協調動作を示す一つのデモンストレーションであるが、今後は人間との作業実現に近い応用が考えられる。

例えば、人間とロボットが同一物体を把持し、一緒に搬送することを想定したものとして、板の位置姿勢制御が行われており [11], 人間が高速かつランダムに板を上下運動させても、ロボットは常に板が地面に対して水平となるように制御している (図 9(a)). また, Dynamic Compensation [12] を利用した人間の作業支援に関する研究開発も進められており [13], 人間のみでは実現が困難な $50\text{ }\mu\text{m}$ のペグと $70\text{ }\mu\text{m}$ のホールのペグインホールの作業を支援している (図 9(b)). さらに、人間の運動機能を拡張することを目指して、人間の手先位置を高速高精度で補償する人間拡張システムの開発も進めており [14], 位置合わせが困難な落下する微小物体のキャッチングを可能にしている (図 9(c)).

このように高速ビジョンを用いた高速な認識と高速ロボットによる高速な反応動作は、作業工程や生産ラインの在り方を変える技術と期待できる。

5. ま と め

本解説論文では、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の例として勝率 100%じゃんけんロボットを紹介した。また、筆者が研究開発を進めているそのほかの人間機械協調のタスク例も簡潔に述べた。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、システムの応答性と協調性を向上させたと考えられる。

このような高速な人間機械協調システムは、人間の目や認識行動を超えるものであるため、人間がシステムに合わ

せる従来の人間機械協調とは異なる性能を生み出している。特に、人間だけでは困難とされるタスクに対してシステムを用いることによりタスクを実現可能にするため、人間の作業、動作への協働、アシスト、拡張が期待できる。

参 考 文 献

- [1] A. Namiki, T. Komuro and M. Ishikawa: "High Speed Sensory-Motor Fusion Based on Dynamics," Proc. IEEE, vol.90, no.7, pp.1178–1187, 2002.
- [2] A. Namiki, Y. Imai, M. Ishikawa and M. Kaneko: "Development of a High-speed Multifingered Hand System and Its Application to Catching," Proc. 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2666–2671, 2003.
- [3] <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/fusion/Janken/index-j.html>
- [4] 山川雄司, 石川正俊: "勝率 100%じゃんけんロボットの開発", 画像ラボ, vol.24, no.6, pp.1–8, 2013.
- [5] Janken (rock-paper-scissors) Robot with 100% winning rate, <https://www.youtube.com/watch?v=3nxjjztQKtY>
- [6] Janken (rock-paper-scissors) Robot with 100% winning rate: 2nd version, <https://www.youtube.com/watch?v=ZVNnoOcohaU>
- [7] 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊: "アクティブビジョンの高速化を担う光学的視線制御システム", 日本ロボット学会誌, vol.29, no.2, pp.201–211, 2011.
- [8] T. Sueishi, H. Oku and M. Ishikawa: "Robust High-speed Tracking against Illumination Changes for Dynamic Projection Mapping," Proc. IEEE Virtual Reality Conference (VR2015), pp.97–104, 2015.
- [9] Janken (rock-paper-scissors) Robot with 100% winning rate: 3rd version, <https://www.youtube.com/watch?v=Qb5UIPeFCIM>
- [10] K. Ito, T. Sueishi, Y. Yamakawa and M. Ishikawa: "Tracking and Recognition of a Human Hand in Dynamic Motion for Janken (rock-paper-scissors) Robot," Proc. 2016 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE2016), pp.891–896, 2016.
- [11] 山川雄司, 久野和生, 石川正俊: "高速ロボットハンドシステムの人間機械協調動作への応用", 日本機械学会論文集, vol.82, no.844, Paper no.16-00352, 2016.
- [12] 黄守仁, 山川雄司, 妹尾拓, ベリストロムニクラス: "高速ビジョンに基づく動的補償および産業用ロボットへの応用", 日本ロボット学会誌, vol.35, no.8, pp.591–595, 2017.
- [13] N. Bergström, S. Huang, Y. Yamakawa, T. Senoo and M. Ishikawa: "Towards Assistive Human-Robot Micro Manipulation," Proc. 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.1188–1195, 2016.
- [14] W. Tooyama, S. Huang, K. Murakami, Y. Yamakawa and M. Ishikawa: "Development of an Assistive System for Position Control of a Human Hand with High Speed and High Accuracy," Proc. 2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.230–235, 2016.

山川雄司 (Yuji Yamakawa)

2006 年東京大学工学部機械工学科卒業。2008 年東京大学大学院情報理工学系研究科システム情報学専攻修士課程修了。2008–2011 年日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2011 年同専攻博士課程修了。同年同研究科創造情報学専攻特任助教。2014 年同研究科システム情報学専攻助教。高速ロボットによる人間機械協調、柔軟物体の高速マニピュレーション、高速センサネットワークシステム、空調制御システムの解析・制御、電動車いす入力装置の開発と制御、高速高精度質量計測システムの開発などの研究に従事。博士 (情報理工学)。(日本ロボット学会正会員)