高速ビジョンを用いたロボット制御

並木 明夫[†]

キーワード：高速ビジョン，ロボットマニピュレーション

1. まえがき

高速ビジョンは、通常のビジョンセンサを超える高速度で画像取得と画像認識を行うシステムです¹⁾。画像処理が高速なことで遅れ時間が小さいことからロボットを含む自動制御機器への応用に適しています。近年、高速ビジョンの研究は進展しており、さまざまな分野で研究が進められています。本稿では、特に高速ビジョンをロボットマニピュレーションに応用した研究例について紹介します。

2. 高速ビジョン

高速ビジョンとは、画像センサによる画像取得から画像処理、画像認識までを高速度で行うことができる統合システムです。工業計測やエンタテインメント制作に用いられる記録用高速度カメラとは異なり、リアルタイムかつオンラインで画像処理結果を出力します。そのため、ロボットの眼として導入することで、ロボットの性能を飛躍的に向上させることが可能です。

2.1 高速ビジョンの特徴

高速ビジョンを用いると、ロボット側からは対象の運動や変形の速度が相対的に遅くなり、フレームレートを上げることであたかも静止しているかのように見えるようになります。これには次のような利点があります。

- (1) 高速に移動・変形する対象の追跡・計測が可能：人間の眼には見えないような高速動作でも計測可能となります。
- (2) ダイレクトな視覚フィードバック制御：ロボットにおいてフィードバック制御に用いられる角度センサや力覚センサでは、サンプリングレートは高速であり、1 kHz以上が望まれます。高速ビジョンにより、視覚についても同じレベルの速度でのフィードバック

ク制御が可能となり、ロボットの視覚刺激に対する反応速度を高めることができます。

- (3) 画像処理の簡略化・ロバスト化：フレーム間の画像の変化が微小になることを用いると、画像処理自体を簡略化することが可能です。例えば、特徴点探索を行う場合、前フレームでの検出位置の近傍のみを探索するだけで充分となります。また、短時間に多数回の画像計測が可能となるため、画像のノイズを統計的に除去することも可能です。

このような視覚認識の高速化とその利用方法は、人間における視覚情報処理とは異なるアプローチですが、人間以上の信頼性、繰り返し精度を求められるロボットシステムに適しています。

2.2 高速ビジョンの実装

高速ビジョンには次の三つの要素、①画像センシングの高速化、②カメラから処理装置への画像転送の高速化、③画像処理の高速化、が必要となります。1 kHzレベルでの高速化を実現するためには、通常のカメラやPCでの演算だけでは難しく、現状のところ開発されているシステムは、

- (1) 画像センサと並列演算装置を一体化させたビジョンチップ
- (2) 高速カメラとFPGA等による専用並列演算回路を用いたビジョンシステム
- (3) 高速カメラとGPUを用いたシステム

が開発されています²⁾。(1)の一体化が性能面では優れていますが、コストがかかります。(3)は最も構成しやすいものとなります。(3)または、特別に高速化が必要な場合は(2)とするのが現実的な構成手法と言えます。

3. 高速ビジョンを用いたロボットマニピュレーション

近年、セル生産化の流れもあり、ロボットマニピュレーションの知能化の必要性が高まっており、多様な対象の形状、位置、姿勢をリアルタイムで計測する能力が必要とさ

[†] 千葉大学 大学院工学研究科

"Robot Control by Using High-Speed Vision" by Akio Namiki (Chiba University, Chiba)

Figure 1 is a schematic diagram of the dynamic folding cloth mechanism. It shows a robotic arm with two grippers holding a cloth. The grippers are labeled with joint angles θ_w and θ_s . The grippers are mounted on a base with a height of 0.4 [m]. A coordinate system (x, y, z) is shown. A computer is connected to the system, receiving 'Torque and force inputs' and sending 'Cycle time: 1 ms' feedback. The computer also receives 'Image area' and 'Image center' data from a camera.

(a) Time = 0.0 [sec]

(b) Time = 0.05 [sec]

(c) Time = 0.1 [sec]

(d) Time = 0.15 [sec]

(e) Time = 0.2 [sec]

(f) Time = 0.25 [sec]

(g) Time = 0.3 [sec]

(h) Time = 0.35 [sec]

(i) Time = 0.4 [sec]

(j) Time = 0.45 [sec]

図2 動的布折り畳み実験

764 (124)

ロボットにとって、紐、布、紙のような柔軟物の操りは難しいタスクです。その理由の1つは、動作途中で形状が大きく変化してしまうことです。従来の生産ラインのように、視覚認識と操り制御を分けて順に行うというのでは対応できず、同次並列に行う必要があります、高速ビジョンが適しています。

高速ビジョンの導入途中ですが，紙の操り制御も実現されています(図3)⁷⁾．紙の認識を3次元ビジョンにより行うとともに，オクルージョンによる視覚情報の欠落を補うために，紙の物理モデルを用いた形状推定を行っています(図4)．現状では4つ折りまでを高精度で行うことが可能

Figure 4 consists of two side-by-side images. The left image shows a robotic arm with two grippers folding a piece of white paper on a dark surface. The right image shows a 3D visualization of a piece of paper on a checkered floor, with a coordinate system and some text in the top right corner.

映像情報メディア学会誌 Vol. 69, No. 7 (2015)

情報を元にリアルタイムで最適制御されており、その能力を最大限に活用されています。

ロボットの動作の高速性、巧緻性の検証のために、従来よりジャグリングを対象とした研究が行われてきました。ジャグリングでは、認識と操作の双方の高速性が要求され、高速ビジョンは大きなアドバンテージを持ちます。

図6 2ボールジャグリング

図7 けん玉による球のキャッチ

人と対戦を行うようなロボットシステムにおいても高速ビジョンは効力を発揮します。その一例として、エアホッケーロボットシステムが開発されています¹⁰⁾。図9に動作の例を示します。ロボットアーム自体の運動速度は人間よりも劣っていますが、高速ビジョンにより認識性能を人間よりもはるかに高くすることで、互角以上に対戦することが可能となっています。ロボットの動作は高速ビジョンの

図8 触覚装備ハンド(左), 剣を握った状態(右)

図9 エアホッケーロボット(連続写真を重ね合わせたもの)

このようなエンタテインメントロボットは、単に人間の動作に反射的に動くだけでなく、戦略に基づくインテリジェンスが求められます。高速ビジョンを用いることで、ロボット側の思考の時間に余裕ができます。本システムでも、対戦相手の動作も認識し、先の展開を予測することで最適な打撃位置、強さ、方向を選択しています。

3.4 マスタスレーブロボットへの応用

近年、危険作業用において、人間が直接操作するマスタスレーブロボットの必要性が高まっています。通常のマスタスレーブでは通信と動作の遅れのために、作業速度の高速化は困難でした。これに対して操作者の動きを予測するとともに、スレーブ側で操作制御と高速視覚フィードバック制御を統合することで、ロボットのリーチング動作の高速化を実現しています¹¹⁾。図10はボールキャッチングを行っている例であり、通常では遅れのためにこのような高速動作は難しいのですが、動作予測と視覚フィードバック制御によりスムーズなキャッチングが実現できています。高速ビジョンにより人間よりも高速に認識することで、人間の動作の先回りが可能となっています。

4. むすび

本稿では、高速ビジョンのロボットマニピュレーション応用を中心に紹介しました。自動化システムでは、画像の処理速度が大きなアドバンテージとなります。高速性に特化した高速ビジョンはビジョンシステムの1つのタイプとしての今後普及していくことが期待されます。

(2015年6月14日受付)

図10 マスタスレーブロボットによるボールキャッチング

〔文 献〕

- 1) 石川：「高速ビジョンとその応用」，応用物理，81，2，pp.115-120 (2012)
- 2) 並木，石川：「高速ビジョンの応用展開」，日本ロボット学誌，32，9，pp.766-768 (2014)
- 3) M. Ishikawa, et al.: "Ultra-High-speed Robot Based on 1 kHz Vision System", IEEE/RSJ Int. Conf. Intelligent Robots and Systems, pp.5460-5461 (2012)
- 4) 山川ほか：「高速多指ハンドと高速視覚フィードバックを用いた柔軟紐の結び操作」，日本ロボット学誌，27，9，pp.1016-1024 (2009)
- 5) Y. Yamakawa, et al.: "Dynamic High-speed Knotting of a Rope by a Manipulator", Int. Journal of Advanced Robotic Systems, 10 (2013)
- 6) 山川ほか：「高速多指ハンドシステムを用いた布の動的折りたたみ操作」，日本ロボット学誌，30，2，pp.225-232 (2012)
- 7) 横澤，並木：「冗長自由度ロボットハンドシステムによる紙の局所的折れ目を考慮した折り紙動作」，ロボティクスシンポジウム，pp.558-563 (2015)
- 8) 木崎ほか：「高速多指ハンドアームと高速ビジョンを用いたボールジャグリングシステム」，日本ロボット学誌，30，9，pp.102-109 (2012)
- 9) A. Namiki and N. Ito: "Ball Catching in Kendama Game by Estimating Grasp Conditions Based on a High-Speed Vision System and Tactile Sensors", Int. Conf. Humanoid Robots, pp.634-639 (2014)
- 10) A. Namiki, et al.: "Hierarchical processing architecture for an air-hockey robot system", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.1187-1192 (2013)
- 11) 根岸ほか：「マスタ・スレーブ制御における操縦者の意思を考慮した視覚フィードバックによる操作補助」，ロボティクスシンポジウム，pp.512-519 (2015)

並木 明夫 1999年，東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年，同大学リサーチアソシエート。2000年，科学技術振興機構CREST研究員。2004年，東京大学大学院情報理工学系研究科講師。2008年，千葉大学大学院工学研究科准教授を経て，現在に至る。多指ロボットハンド，視覚フィードバック制御，センサフュージョンの研究に従事。博士(工学)。