解 説

1,000 fps 高速度画像処理のアクティブカメラへの応用 —通常照明・複雑背景での非特定移動物体トラッキング—

Application of 1,000 fps High Speed Image Processing to Active Camera System
—Tracking of Unspecified Moving Object under Ordinary Illumination and Cluttered Background—

大 明 準 治* (株) 東芝 研究開発センター

Junji Oaki* *Corporate Research and Development Center, Toshiba Corporation

1. は じ め に

ロボットビジョンに期待される機能として、移動物体の発見と追跡（トラッキング）がある。トラッキングを目的としたアクティブカメラは、カメラが能動的に動作（パン・チルトなど）するもので、見掛け上の広視野・高分解能を実現し、移動台車にも搭載できるポータビリティも備えている。アクティブカメラによるトラッキングでは、画像から移動物体の位置（重心など）を算出し、カメラの中心に常に移動物体が見えるようにカメラ駆動用モータへ周期的に指令を出す必要がある。ビジュアルサーボ系の一種になるが、この周期が速いほど動きの速い移動物体を追跡できるわけである。しかし一般のカメラでは、ビデオレートと呼ばれる 1 秒間 30 フレーム（30 [fps]）の画像しか得られず、高速な移動物体は即フレームアウトしてしまう。移動物体の数式モデルが構築できれば、モデルを用いた予測制御をすることで追跡可能になるが、ランダムに動く物体には適用困難である。ここで高速というのは、撮像された画像上でのことであり、カメラと物体との距離に依存する。例えば、人間の手を振る動きであってもカメラに接近すればビデオレートでは追跡できない。

本稿では、ビデオレートをはるかに上回る 1,000 [fps] 高速度画像処理を応用したアクティブカメラシステムを紹介する。具体的には、通常の室内照明・複雑背景での高速移動物体（サッカーボールや人間など）を色や形の先見情報なしで追跡できる。高速度画像は、スポーツ中継や科学番組で馴染み深いですが、LSI 技術の発展で可能になったリアルタイムでの「高速度画像処理」の歴史は比較的浅い。1,000 [fps] 画像処理は、石川らのビジョンプロセッサ（並列型）が著名である（例えば文献 [1]）。我々は、CMOS センサ（撮像）+ FPGA（高輝度化）+ PC（トラッキング処理）の集中型でアプローチしている。いずれにしろ、高速度画像処理で

はビデオレートの延長線上にないアルゴリズムを使用でき、高速から低速な移動物体まで追跡できるだけでなく「対象の先見情報がいらなくなる」等の付加価値が得られるということが大きなポイントになる。

2. 試作したアクティブカメラシステムの概要

アクティブカメラ（試作 2 号機）のデモイメージを図 1 に示す。通常照明・複雑背景（典型的なオフィス内環境）において、非特定移動物体（サッカーボール）をトラッキングしている例である。サッカーボールの色や形の先見情報は与えておらず、模様（テクスチャ）を追跡している。

図 2(a) に試作 1 号機の外観を示す（モータ駆動用 PC とインタフェースは別置）[2] [3]。組み込んだ 1,000 [fps] 高速度カメラ [4] が多機能指向で、ボードが大きくケーブルも

図 1 通常照明・複雑背景での非特定移動物体トラッキング

原稿受付 2005 年 2 月 14 日

キーワード: Robot Vision, High Speed Image Processing, Active Camera, Object Tracking, Optical Flow

*〒 212-8582 川崎市幸区小向東芝町 1

*Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa

(a) 試作 1 号機

(b) 試作 2 号機

図 2 アクティブカメラシステムの外観

かさばるので、アクティブカメラには必ずしも適していなかった。そこで、不要な部品を廃してケースに入れ、ケーブルもスリム化した小型高速度カメラを再設計した。これをベースに開発した試作 2 号機の外観が図 2(b) である。共通のレンズ部を比較すると分かるように、パン・チルト雲台を小型化でき、ポータビリティと運動性能を向上できた。あわせて参照用ビデオカメラ (30 [fps]) も超小型タイプに変更している。また、従来分かれていた画像処理用 PC と雲台制御用 PC を小さな筐体 1 台に統合し、モータ駆動用のインタフェースも PC の筐体に内蔵したので、非常にシンプルな外観となった [5]。

3. ビジュアルサーボ系と視覚センサの高感度化

図 3 にビジュアルサーボ系のブロック図を示す。試作 1 号機では LinuxPC (画像処理) と ART-LinuxPC (モータ制御) を共有メモリボードで結合して使っていたが、試作 2 号機では RT-LinuxPC1 台 (Xeon 3.2 GHz × 2) に統合した。図 3 の破線内が試作 2 号機 (Ver.2) で統合された部分である。なお、統合化ソフトウェアについては開発中で、本稿の実験では小型化カメラに 2 台の PC を組み合わせた Ver.1.5 と呼ぶべきシステムを用いている。

1,000 [fps] といった高速度撮影を行った場合、露光時間

図 3 ビジュアルサーボ系 (試作 1, 2 号機) のブロック図

図 4 高感度化のための画像処理

が 1 [ms] と短いため、一般的な室内環境では光量不足となり、真っ暗な画像しか撮影することができない (図 4)。そこで、高解像度の高速度画像にフィルタリング処理を行い、ソフトウェア的に露光面積を広げることにより高感度の高速度画像を取得する手法を開発した。図 4 に示すように、視覚センサからの入力 は 640 × 480 画素の高速度画像である。この画像から縦横それぞれ 1 画素おきに画素をサンプリングし、サンプリングした各画素とその周辺の画素に関して二次元ガウス関数に従う重み付き和を計算する。つまり、サンプリングとノイズ (高周波成分) 除去効果のあるガウス関数のフィルタリング処理により、空間的な解像度は低下するが、仮想的に露光面積は拡大し、高感度の高速度画像を得ることができる。この高輝度化手法は FPGA に実装しており、視覚センサからの画像を PC に取り込む PCI64 インタフェースボードに搭載した。

4. トラッキングアルゴリズム

すでに述べた方法により画像を高感度化すると、図 4 の

ように背景までも鮮明に見えるようになる。そのため、複雑かつ激しく変化する背景から追跡対象だけを区別する必要がある。また、蛍光灯下で追跡を行う場合、フリッカーによる画像の輝度値の変動の補正をする必要がある。さらに、1,000 [fps] の高速度画像ではPCでの追跡処理が1 [ms] で終了する必要がある。そこで、(1) 追跡物体の周辺しか処理しない、(2) 速度情報の計算では近傍しか探索しない、(3) 追跡特徴点数を40点に制限する、といった計算量削減を行う。

4.1 初期化アルゴリズム

静止中に視野に最初に入ってきた移動物体をトラッキング対象とする。(1) フリッカー1周期の間に撮影された画像の平均画像を背景として記憶する。(2) 現在の画像を含む最新のフリッカー1周期分の画像に関する平均画像を計算し、背景画像との差分を計算する。(3) 差分が大きい領域が見つかったら、その領域を初期の追跡領域とする。

4.2 1 [ms] ごとのアルゴリズム

図5に1 [ms] ごとの追跡処理の流れを示す。まず、蛍光灯のフリッカーの影響を除去するため、追跡領域周辺の平均輝度値がフリッカー1周期の間一定となるように、毎フレーム画像を補正する。次に、追跡領域とその周辺の領域でコーナー点(異なる方向を持つ線の交点)を抽出して追跡特徴点(40点)として登録し、各点の速度情報を計算する(後述)。追跡物体全体の画像内運動を図6(写真は文献[2][3]で使ったぬいぐるみ)のようなアフィンモーションを仮定して推定し、異なる速度を持つ追跡特徴点を除去する。最後に、追跡領域を更新し、並行して、追跡特徴点の画像内の重心の位置と速度を求め、パン・チルト座標変換を行い、(追跡開始時の位置偏差を考慮した)滑らかな目標値を1 [ms] ごとにモータ制御系に与える。

4.3 速度情報の計算アルゴリズム

画面内の速度場をオプティカルフローと呼び、従来はビデオ映像を用いて、あるフレームの各画素が次のフレームでどこに移動したかを画像から計測して求めている。しかし、極端に速い動きや遅い動きの検出が困難であった。本

図5 1 [ms] ごとの高速度画像処理 (サッカーボールのトラッキング)

システムでは、文献[6]で提案された時間評価型オプティカルフロー (T-Flow) と呼ぶ、各画素が一定の距離動くのに要する時間を計測するという手法を用いている(図7)。この高速度画像ならではの手法により、高速から低速まで精度よく動きを検出することが可能となった。

5. トラッキング実験結果とアルゴリズムの改良

図8は、図1で紹介したデモの連続高速度画像である。追跡領域の白枠が刻々変化し、近傍のフリッカーも除去されている。サッカーボールは高速で移動・回転しており(図1のビデオカメラ画像ではぶれている)、複雑な背景かつ、蛍光灯にもオーバーラップしているが、追跡に成功している。その他、試作1号機で失敗しがちであった床にバウンドするボールなど急激な運動変化が伴う場合は、雲台の運動性能の向上および、トラッキングアルゴリズムにおいて正しい不連続データと少数のノイズデータとを識別する改造によって、安定したトラッキングができるようになった。

もともと1,000 [fps] ビジュアルサーボ系には、モータのエンコーダサーボ周期の目標値を発生させる目的があるが[1]、トラッキングの観点からは、従来の30 [fps] とはまったく異なる画像処理になり、高速から低速な移動物体まで追跡できるだけでなく「先見情報がいらなくなる」付加価値が得られることが、本稿のシステムで明らかになった。

ただし、すでに述べたように線の交点であるコーナー点の動きに基づいて追跡対象を背景と分離し、追跡を実現しているため、以下の制限がある。(1) 真っ白なバレーボー

図6 動き推定と特徴点消去の原理

図7 時間計測に基づく高速から低速まで安定な速度推定

図8 回転しながら飛ぶサッカーボールのトラッキング

ルのように模様のない物体はコーナー点が存在しないため追跡できない。(2) 追跡対象が静止して背景との速度差がなくなり、かつ追跡対象周辺の背景に多くの特徴点が存在すると追跡が不安定になる場合がある。(3) 他の物体が追跡対象とカメラの間を横切るなどして追跡対象がカメラから隠されると、隠したほうの物体の追跡をしてしまう。

6. おわりに

本稿で紹介した1,000 [fps] アクティブカメラシステムは、

動く模様があれば何でも追従するというエンタテインメント性が先行している(社外向け展示会でマジックだと思う人がいたし、TV生中継でも人を追従して楽しんでもらえた)。認識を加味した実用的なアプリケーション開発が今後の課題であり、さらに小型化や省電力化、ズーム機能の搭載などを進める必要がある。雲台に併設した30 [fps] ビデオカメラと機能を分担することによって、移動ロボットビジョンや、スポーツ中継、監視など様々な応用が考えられる。監視では、多数の固定カメラを据え付けるのが基本であるが、カメラが動くこと自体に抑止力があるという考え方もある。また、アクティブカメラは、視覚センサ自体の位置が動くために複雑なビジュアルサーボ系を構成しており、制御理論的にも興味深い対象である。最後に、岡田隆三氏をはじめとする開発メンバに感謝いたします。

参考文献

- [1] 中坊, 石井, 石川: “超並列・超高速ビジョンを用いた1 ms ターゲットトラッキングシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.3, pp.417-421, 1997.
- [2] R. Okada, et al.: “High-speed Object Tracking in Ordinary Surroundings Based on Temporary Evaluated Optical Flow,” Proc. IROS2003, IEEE/RSJ, pp.242-247, 2003.
- [3] 岡田, 大明, 近藤: “ロボットののための高速視覚システム”, 東芝レビュー, vol.59, no.9, pp.29-32, 2004. <http://www.toshiba.co.jp/tech/>
- [4] 高速度カメラ, (株) 画像技研, <http://www.gazogiken.co.jp/>
- [5] 大明, 岡田, 園浦, 近藤: “一般環境下における高速移動物体トラッキング—1000 fps アクティブカメラの小型化—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 CDROM, 1P1-H-12, 2004.
- [6] 岡田, 谷口, 小野口: “時間評価型オプティカルフローの検出”, 電子情報通信学会論文誌, vol.J86-D-II, no.1, pp.52-62, 2003.

大明準治 (Junji Oaki)

1985年千葉大学大学院工学研究科電気工学専攻修了(修士)。同年(株)東芝入社, 総合研究所エネルギー機器研究所計測制御G配属。メカニカルシステムの同定・制御・コントローラ実装の研究開発に従事。同社研究開発センター LSI 基盤技術ラボラトリー主任研究員を経て, アドバンスド・マスク・インスペクション・テクノロジー(日本電気との合併会社)に現職出向中。65 nm ルール半導体マスク欠陥検査装置の画像処理アルゴリズムを担当。1999年より, 長岡技術科学大学機械系非常勤講師。共著書に「わかりやすいロボットシステム入門」(オーム社)。計測自動制御学会, 日本機械学会, 電気学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)