

ロボットのための高速視覚システム

High-Speed Computer Vision System for Robots

岡田 隆三 大明 準治 近藤 伸宏

■ OKADA Ryuzo

■ OAKI Junji

■ KONDOH Nobuhiro

ロボットが家庭のような複雑な環境において安定に動作するには、人間と同様に視覚情報が重要である。従来の視覚システムは、テレビの視聴を目的として定められた NTSC (National Television System Committee) 規格などのビデオ映像を用いていた。ビデオ映像は 30 フレーム/s 程度で、すばやい身ぶりの認識や急な侵入者の検出など、高速で移動する物体の取扱いが困難であった。

東芝は、1,000 フレーム/s という高速度画像(視覚情報)を用いて、高速に移動する物体を追跡するアクティブカメラシステムを開発した。このシステムは、視覚系の工夫により、一般家庭環境でも安定かつ高速に動作する点が特長である。

Visual information is important for robots working in complicated environments such as homes or offices. Conventional vision systems have used a National Television System Committee (NTSC) video image sequence that is standardized for watching image sequences. However, the NTSC video image sequence, whose frame rate is 30 frames per second, is insufficient for recognizing fast-moving objects such as swift gestures or abrupt intruders.

Toshiba has developed an active camera system that is capable of tracking a fast-moving object by using an image sequence with a high frame rate of 1,000 frames per second. This system achieves outstanding tracking performance even in ordinary home and office environments.

1 まえがき

近年のロボット研究の成果は目覚ましく、各研究グループがそれぞれ特色のあるロボットの開発を進めている。ロボットの用途は多岐にわたるが、FA (Factory Automation) 用途などで既に実用化されているものは、コントロールされた環境で高精度に動くものであった。今後は、家庭や災害現場など、コントロールできない複雑環境において、人間とインタラクションを取りながら活動できるロボットが求められる。

ロボットが複雑環境で活動するために様々なセンシング技術が用いられているが、人間と同様、視覚情報は多量の情報を含んでおりその重要性は明らかである。従来、ロボットの視覚情報としてビデオ映像が用いられているが、そのフレームレート(30 フレーム/s程度)は、ロボットの運動をつかさどるアクチュエータの制御周期(1 kHz程度)に比べて非常に遅いため、特に高速に動く物体への反応が問題となる。

そこで東芝は、ロボットの首の動きを模した二軸カメラ雲台(パン(水平方向)とチルト(垂直方向))を高速に移動する物体に追従させる問題を題材として、1,000 フレーム/s程度の高速度画像を処理する技術を開発し、一般室内環境において高速かつ安定に動作する視覚制御システム(アクティブカメラシステム、図1)を構築した⁽¹⁾。以下では、高速度画像の処理技術に重点をおいて、試作したアクティブカメラシステムについて述べる。

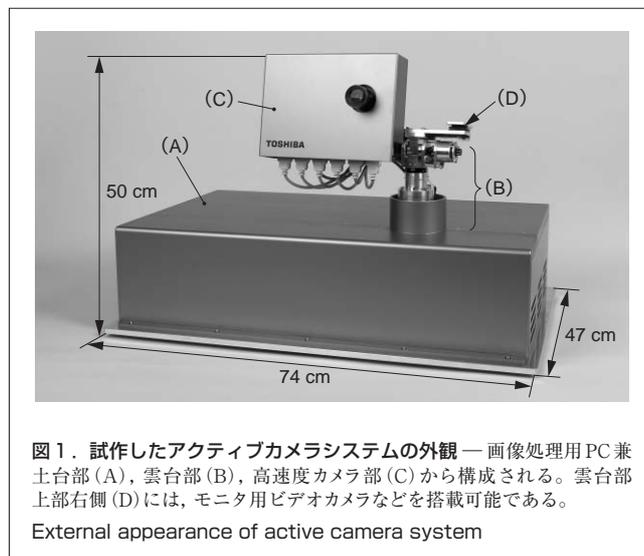
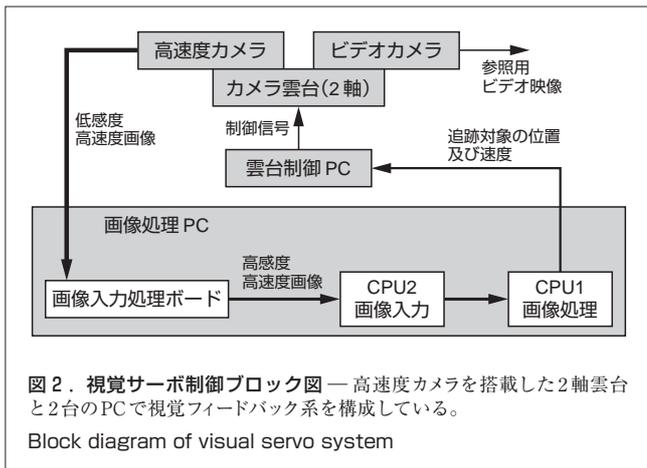


図1. 試作したアクティブカメラシステムの外観 — 画像処理用PC兼土上部(A)、雲台部(B)、高速度カメラ部(C)から構成される。雲台部上部右側(D)には、モニタ用ビデオカメラなどを搭載可能である。

External appearance of active camera system

2 アクティブカメラシステムの構成

試作したアクティブカメラシステムは、パン・チルト軸の2自由度を持つ雲台に、CMOS(相補型金属酸化膜半導体)視覚センサ(Micron社製MT9M413)を用いた高速度カメラを搭載している。なお、高速度カメラの画像はリアルタイムでモニタできないので、モニタ用ビデオカメラの台座を設けている。図2に示すように、高速度カメラから得られた高速度画像を、画像

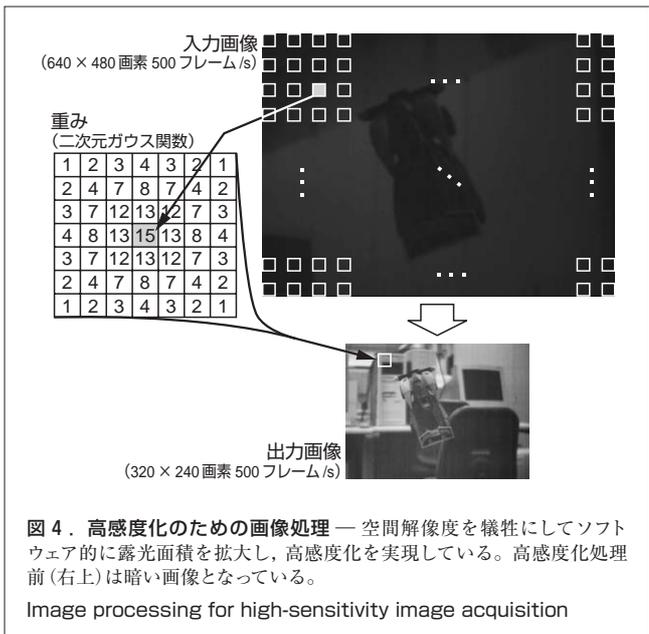


入力処理ボードを介して画像処理パソコン(PC) (Intel[®](注1) Xeon[™](注2) 2.4 GHz × 2, Linux^(注3))に入力し、追跡物体の重心位置・速度データを1 ms ごとに算出する。雲台制御PC(Pentium[®](注4) III 933 MHz, ART-Linux⁽²⁾)は、このデータを共有メモリボード経由で受信し、追跡物体が高速度カメラの画像中心に来るようにパン・チルト軸のモータを制御する。

以上のような構成で、従来は困難であった一般的な室内環境における高速移動物体の安定な追跡に成功した。典型的な動作例を図3に示す。一般的なオフィス内環境において、飛翔(ひしょう)体(2人が投げ合うぬいぐるみ)を追跡している例である。

3 視覚センサシステム

1,000 フレーム/sといった高速度撮影を行った場合、露光時間が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)。



センサそのものの感度を向上させることが根本的な解決法ではあるが、多大な開発費がかかる。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低解像度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って空間的な解像度は低下するが、仮想的に露光面積が拡大し、高感度の高速度画像を得ることができる。

4 追跡画像処理アルゴリズム

移動物体の安定な追跡のためにもっとも重要なのは、追跡対象の位置及び速度を算出する追跡画像処理アルゴリズムで、次のような性能が必要とされる。

- (1) 3章で述べた方法により画像を高感度化すると、図4のように、追跡対象だけでなく背景も鮮明に見えるため、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。
- (2) 蛍光灯下で追跡を行う場合、蛍光灯のフリッカによる画像の輝度値の変動が顕著に現れるため、照明変動に影響されずに追跡できる必要がある。

(注1), (注2), (注4) Intel, Xeon, Pentiumは、米国又はその他の国における、米国Intel Corporation又は子会社の登録商標又は商標。
(注3) Linuxは、Linus Torvalds氏の登録商標。

(3) PC上でリアルタイムに実行できる程度に計算量を少なくする必要があります。1,000フレーム/sの高速画像では、追跡処理が1msで終了する必要があります。

以上のような要件を満たすため、高速画像から高精度な速度情報を計算する独自の手法を開発し、この手法を応用して安定な実時間追跡アルゴリズムを構築した。以下では、この追跡アルゴリズムについて詳しく述べる。

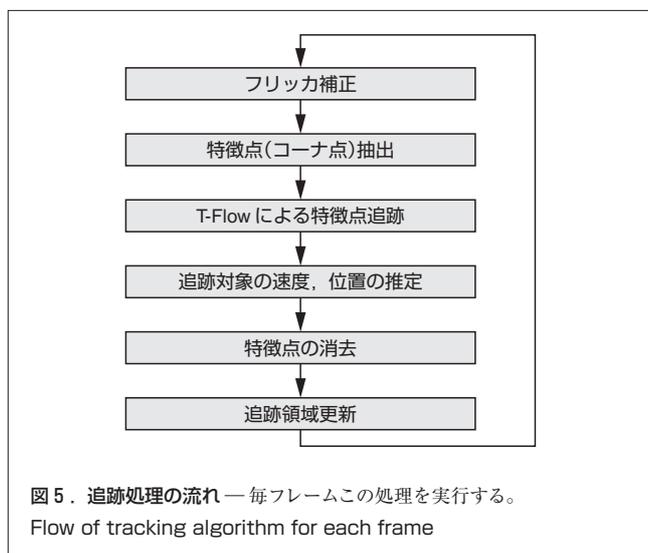
4.1 追跡対象の初期化

システムは初期状態で静止しており、視野の中に最初に入ってきた移動物体を追跡対象として追跡を開始する。蛍光灯のフリッカの影響も考慮すると、初期化アルゴリズムは以下のようなになる。

- (1) フリッカ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して、追跡処理を開始する。

4.2 各フレームにおける追跡処理

各フレームでの追跡処理の流れを図5に示す。まず、蛍光灯のフリッカの影響を除去するため、追跡領域周辺の輝度の平均値がフリッカ1周期の間一定となるように、毎フレーム画像を修正する。次に、追跡領域とその周辺の領域でコーナ点を抽出し、追跡特徴点として登録する。ここで、コーナ点とは、異なる方向を持った線の交点のことである。次に、各追跡特徴点について、画面内の速度情報を計算(4.3節参照)し、その結果を用いて追跡物体の画像内の運動を推定する。推定した対象物の運動とは異なる速度を持つ追跡特徴点は背景に属するか、追跡に失敗しているため除去する。最後に、追跡特徴点を囲むように追跡領域を更新し、次のフレームに備える。

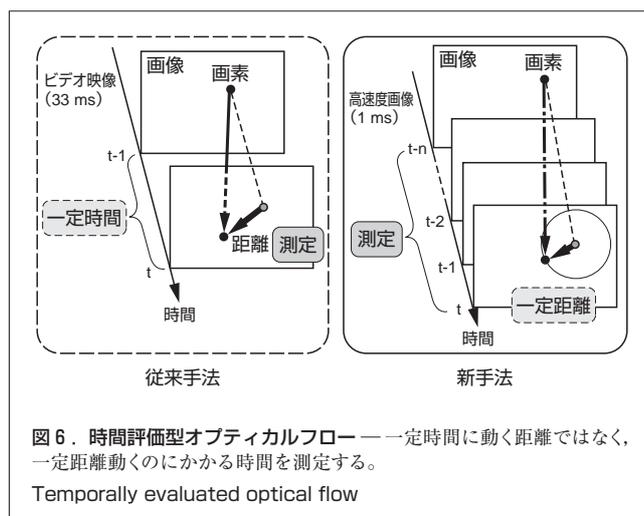


また、雲台制御のために、追跡特徴点の画像内の重心の位置と速度を求め、パン・チルト座標変換を行った後、雲台制御PCに送信する。雲台制御PCでは、前記のパン・チルト位置と速度から生成した、滑らかな目標値を1msごとにモータ制御系に与えている。

4.3 速度情報の計算

前記追跡アルゴリズムの性能は、追跡特徴点の速度の推定精度に大きく依存するため、高速画像を用いた高精度な速度推定手法を開発した⁽³⁾。

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た。しかし、従来手法では、極端に速い動きや遅い動きの検出が困難であった。そこで当社は、高速画像を用いて、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提案している(図6)。この手法により、広いダイナミックレンジで(速い動きから遅い動きまで)精度よく動きを推定することが可能となった。時間を計測するので、時間評価型オプティカルフロー(T-Flow)と呼ぶ。



5 追跡実験

図7は、カメラから2m離れた位置で、指示棒の先につけた玩具を人間ができる限り高速移動させたときのトラッキング結果である。図7(a)~(d)は、高速カメラ(矩形(くけい)内の+マークは特徴点)、図7(e)~(h)はビデオカメラ画像である。ビデオカメラ画像では、ぶれが生じていることから明らかなように、高速な動きであり、かつ、複雑な背景にもかかわらず、アクティブカメラシステムでは対象物の追跡ができています。

図8は、図3のデモの高速カメラ画像である。飛行体は回転しており、かつ、蛍光灯にもオーバーラップしているが、

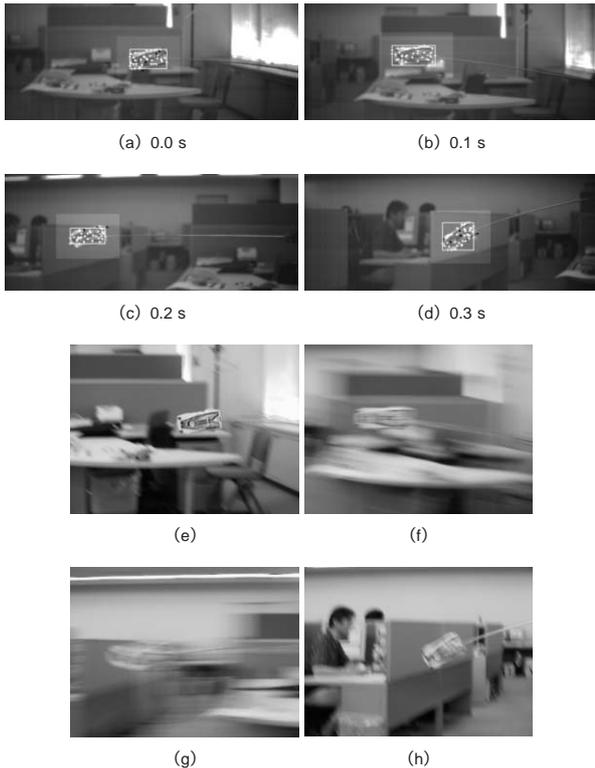


図7. 高速移動物体の追跡結果 — 追跡結果を重ね書きした高速度画像 ((a) - (d))とビデオ映像 ((e) - (h))である。
Results of tracking fast-moving object

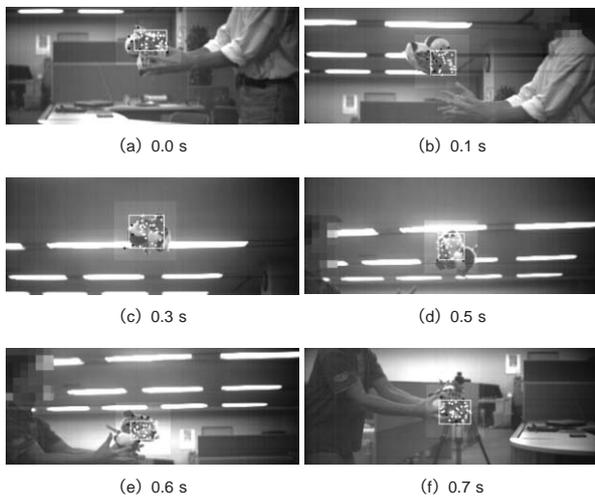


図8. 飛翔体の追跡結果 — 図3の追跡例についての高速度画像に追跡結果を重ね書きしている。
Results of tracking flying object

追跡に成功している。

このように、このアクティブカメラシステムは、複雑な背景の中を高速に移動する物体を安定に追跡することが可能である。ただし、3.2節で述べたように、線の交点であるコーナ点

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ルのように模様のない物体はコーナ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 あとがき

高速度画像を用いた独自の高精度な動き検出技術を応用して、ロボットの視覚システムへの展開が期待されるアクティブカメラシステムを開発した。このシステムは、一般的な室内環境において、高速に移動する物体を安定して追跡することが可能である。

今後の短期的な課題としては、ロボットへの搭載が可能となるようにシステムを小型化、省電力化することが挙げられる。また、現在の画像処理アルゴリズムは、動いているものにすばやく反応する脊髄(せきずい)反射的な行動である。長期的な課題としては、特定の物体だけを追跡するなど、更に高度な画像認識技術により高機能化を図っていくことが挙げられる。

文 献

- (1) R. Okada, et al. "High-speed Object Tracking in Ordinary Surroundings Based on Temporary Evaluated Optical Flow." Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003, p.242 - 247.
- (2) (株)ムービングアイ . ART-Linux .
< <http://www.movingeye.co.jp/mi6/mi6-top.html> > (参照 2004-06-25) .
- (3) 岡田隆三 ,ほか . 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 . J86-D-II ,1 ,2003 ,p.52 - 62 .



岡田 隆三 OKADA Ryuzo, Ph.D

研究開発センター マルチメディアラボラトリ研究主務, 工博。
画像処理の研究開発に従事。電子情報通信学会会員。
Multimedia Lab.



大明 準治 OAKI Junji

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリ主任研究員。
メカニカルシステム制御の研究・開発に従事。日本ロボット学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, 電気学会などの会員。
Advanced LSI Technology Lab.



近藤 伸宏 KONDOH Nobuhiro

semiconductor社 ブロードバンドシステム LSI事業推進部
ブロードバンドシステム LSI事業企画部。画像処理アプリケーションの開発業務に従事。
Broadband System LSI Div.