

解説

行動獲得のためのリアルタイムビジョン

Realtime Vision for Behavior Acquisition

浅田 稔** 大阪大学工学部

Minoru Asada** Faculty of Engineering, Osaka University

1. はじめに

機械による視覚の実現を目指すコンピュータビジョンの研究分野では、従来、2次元画像からの3次元情報再構成問題が精力的に研究されてきており、そこでは、処理のリアルタイム性は、「好ましい」ものの「必然」とは考慮されていなかった。しかしながら、3次元再構成問題の困難さ、表現の妥当性の問題などから、近年、コンピュータビジョンの新しいパラダイムとして、「能動視覚」、「定性視覚」、「目的性視覚」が着目され、ロボットのタスク遂行プロセスにおける視覚の役割との関連が明確になりはじめた[1]。ここでは、ロボット自身の行動の影響も含めて「外界で何が起きているか?」を確認するためにリアルタイムビジョンが必要である。「何」が事前にモデル化され、画像内の特徴やその変化から、直接とるべきロボットの行動が分かっている時、リアルタイムビジョンは専用システムの一部として機能する。

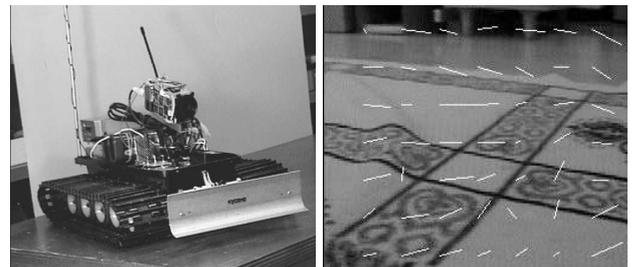
本稿では、「何」に対して十分な知識がなく、それゆえ取るべき具体的な行動指令が明確でない場合に、環境とのインタラクションをとりながら、自分の行動を決定していくプロセスにリアルタイムビジョンが大きな役割を果たしていることを、移動ロボットや視覚サーボの研究例を通して示す。いずれも、環境やロボットの構造に対する事前知識を前提とせず、視覚情報のみを通して、タスクを遂行する枠組を提案している。そしてタスク遂行過程において、必要なパラメータ推定を実施しており、従来必要とされてきた、カメラキャリブレーション、3次元情報の再構成を一切必要としないという特徴がある。

2. オプティカルフローを用いた行動獲得

オプティカルフローの抽出に関しては、コンピュータビジョンの分野では、これまで多大な論文が発表されてき

ているが、画像全体に渡って正確にフローを抽出することは、非常に困難で、また多大な計算時間を要する[2]。そのため、ロボットへの応用は、問題視されてきたが、東大の井上、稲葉グループ(本特集号の解説[3]参照)による局所相関によるリアルタイムトラッキングビジョンが開発されたことにより、時間をかけて正確に求める代わりに、多少ノイズがあっても、ビデオレート(33[ms])で連続出力できることが、ロボットの常動性を確保でき、タスク遂行に有効である事が示されて来た。ここでは、これにより算出したオプティカルフローを用いて、移動ロボットの行動学習問題を扱った例を紹介する[4]。

自律エージェントにとって、動的環境でタスクを遂行するためには、センサー系とモータ系は不可分である。生物学や生理心理学の分野では、動物実験などから、運動が知覚に本質的に関与していること[5]、自律的な運動無しに知覚が形成されないこと[6]が示されている。このことは、ロボットが自分の知覚を構成する際に、自律的な運動コマンドと得られるセンサ情報の関係を獲得することによって可能であることを示唆する。



(a) 移動ロボット

(b) 抽出されたフロー

図1 移動ロボットとフロー抽出の例

利用した移動ロボットでは、PWS(Power Wheeled Steering)システムで、左右に独立にモーターコマンドを送ることができる(図1(a)参照)。ここでは、運動コマンド

原稿受付 1994年12月31日

キーワード: Realtime Vision, Behavior Learning, Sensorimotor Apparatus, Visual Servoing

*〒565 山田丘2-1

*2-1 Yamadaoka 565, Osaka

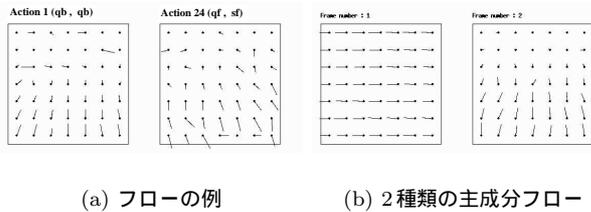


図2 フローパターンからの主成分運動の獲得

と視覚情報の密な結合を獲得するために、運動コマンドを左右モータに送る単純なボタンスイッチとし、トラッキングビジョンを用いて得られたオプティカルフロー(同図(b)参照)とこれらのスイッチ間の関係(sensorimotor apparatus)を得る。画像全体にフロー抽出用ウィンドウを設定し、得られるフローパターン(図2(a)参照)とそのとき左右のモータに送出したモーターコマンドの組合わせを集めて、相関関係を求める(フローパターンの主成分解析)ことにより、ロボットの行動を表現する。ロボットはPWSにより、基本的な運動成分として回転と直進を持つ。解析結果から得られる基本的な運動は図2(b)に示すように、回転と直進のフローパターンに対応している。そして、全ての運動コマンド(この場合25個)が、これら二つの主成分の線形和で表現できる。注意しなければならない事は、ロボット自身は、3次元運動の物理的意味は、理解しておらず、自分の運動とそれによる視覚情報の変化の対応を獲得したに過ぎないが、この関係を利用して障害物の発見・回避などの行動が獲得できる。図3に使用したシステムを示す。VxWorksをリアルタイムOSとし、ホストCPUにMC68040(33MHz)を用いている。パイプライン型汎用画像処理装置としてDatacube社のMaxVideo200を、またブロックマッチングによる視覚追跡装置として富士通製トラッキングビジョンを利用している。

3. 視覚に基づく強化学習による行動獲得

最近、反射的かつ適応的な行動を獲得できるロボットの学習法として、強化学習が注目を浴びている[7]。この学習法の最大の特徴は、環境やロボット自身に関する先験的知識をほとんど必要としないところにある。強化学習の基本的な枠組みでは、ロボットと環境はそれぞれ、離散化された時間系列過程で同期した有限状態オートマトンとしてモデル化される。ロボットは、現在の環境の状態を感知し、一つの行動を実行する。状態と行動によって、環境は新しい状態に遷移し、それに応じて報酬をロボットに渡す。これらの相互作用を通して、ロボットは与えられたタスクを遂行する目的行動を学習する。従来、コンピュータシミュレーションによるものがほとんどで、実ロボット、特に視覚

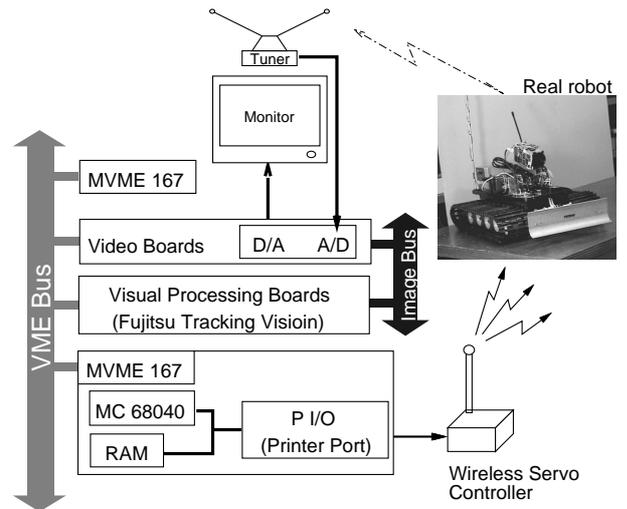


図3 システム構成図

を用いた強化学習による行動獲得研究は、視覚情報処理のコストの高さから敬遠されてきた。ここでは、視覚に基づいて環境の変動を知覚し、行動を決定する例として、サッカーロボットによるシューティング行動獲得の例[8]を示す。

この研究の最大の特徴は、世界に関する知識、例えば、ボールやゴールの3次元位置や大きさ、ロボットの運動学・動力学的パラメータなどの知識を一切必要とせず、ボールをゴールにシュートする行動を獲得することである。ロボットが利用できる情報は、TVカメラから得られるボールやゴールの映像情報だけであり、それらはロボットが選択した行動により変化する。ロボットの行動は前後進や回転であるが、それらの物理的意味もロボットは知る必要がない。

詳細は、文献[8]を参照して頂くとして、以下では、処理内容を説明する。利用したシステムは、先の例と同じであるが、今回はトラッキングビジョンを用いておらず、MaxVideo200による処理を中心としている。図4にパイプライン処理による流れを示す。まず色によるボール(赤)、ゴール(青)領域の抽出(図5参照)、画像縮小(面積1/16)、エッジ抽出、特徴点配列作成で、検出時間はパイプライン処理により33[ms]要する。また、状態識別、行動選択(学習結果得られる)はホストCPU上で行なわれ、約8[ms]要する。よって、サンプリング時間が約33[ms]、遅れが約41[ms]である。行動選択結果は無線コントローラからロボット本体に送信される[9]。行動の例を図6に示す。

4. 追跡視を利用した視覚サーボ

近年、視覚情報を利用したロボットアームの制御法として「視覚サーボ」に関する研究が盛んに行われている[10]。

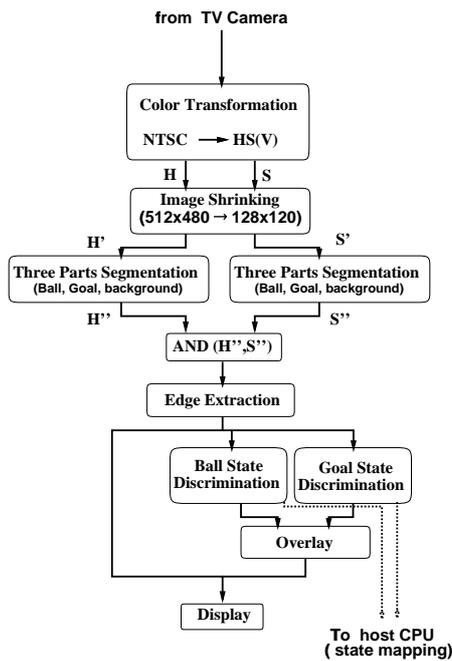
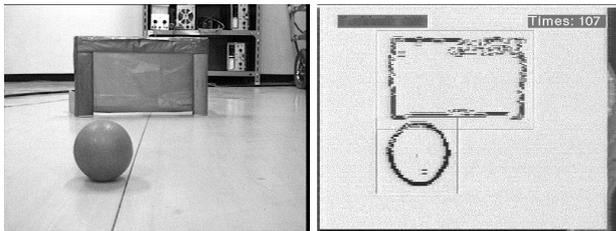


図4 画像処理の流れ



(a) 入力画像

(b) 検出結果

図5 ボールとゴールの画像処理結果

これらの研究では、視覚目標からのずれによるフィードバックによるサーボ系を構成しており、反射的な行動制御を主体としている。また、ほとんどのシステムが、ロボットアーム系やカメラ系の構造パラメータなどを既知としている。これに対し、細田ら [11] [12] は、以下の特徴をもつ汎用ビジュアルサーボ系を提案している。

- カメラパラメータやロボットアームの構造パラメータ等を一切必要とせず(よって、カメラの台数や、リンク数に依存しない)、画像上の特徴量と関節速度の関係(ヤコビアン)をオンラインで推定することにより、サーボ系を構成する。
- フィードバックのみでなく、フィードフォワードを考慮する事により、(1)系の安定化をはかる、(2)反射的な行動だけでなく、連続的な経路を追従させるような合

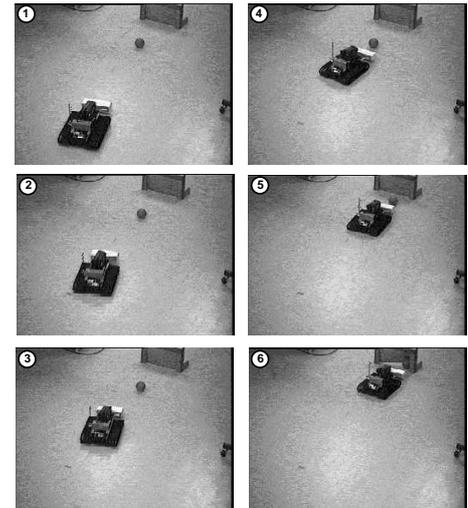


図6 シューティング行動の例

目的行動の制御も可能になる。

前者の意味は、ロボット自身のもつセンサー(この場合、視覚情報と関節速度情報)のみから、視覚目標に追従するための行動を獲得するために必要な情報を推定しながら制御を行う点で、先に示した二つの例のコンセプトと合致している。後者では、3次元空間で実現可能な軌道が画像情報として与えられたときに、オンライン推定で得られたヤコビアンを用いて予測制御することが可能であり、フィードバック項と合わせてシステムのパフォーマンスの向上に寄与している。連続軌道が与えられる事の意味は、単なるPTP制御による反射的な制御(よってフィードバック主体)ではなく、事前に目標となる一種の行動系列が獲得されているという意味で、合目的な行動(purposive behavior)の制御が可能である事を主張している。但し、「実現可能な軌道が画像情報として与えられる」ためには、teaching by showingによる方法などが考えられるが、より自律的な方法として、ステレオカメラ設定による2次元画面上の幾何学的拘束のみを用いて(よって3次元再構成しない)獲得する手法も同グループによって提案されている [13]。

図7にシステムの構成図を示す。基本的には先のシステム構成と同じで、MaxVideo200で二つのカメラからの入力画像を一つの画像に合成し(ここでは、手法の有効性を示すために、意図的に画像を引き延ばしている)、トラッキングビジョンを用いて、視覚目標を追跡している。実験結果を図8に示す。(a)ではカメラが環境に固定され、ロボットアームの先端に設定された視覚目標を追跡している。(b)に初期位置および目標位置を示す。(c)では、カメラがアーム先端に固定され、環境に設定された視覚目標を追跡する様子を示している。二つの異なる設定に対して、全く同一のプログラムで成功している。(d)に実験設定(c)の場合の

追従による誤差の変化を示す．縦軸が誤差[画素]，横軸が時間[s]である．ヤコビアン推定を行わない場合 (without estimation)，特異姿勢に達し，追従できないが，本手法 (with estimation) により追従している様子が分かる．ここでは，静止対象を目標としているが，未知の運動物体に追従する手法についても細田らによって提案されている [14] ．

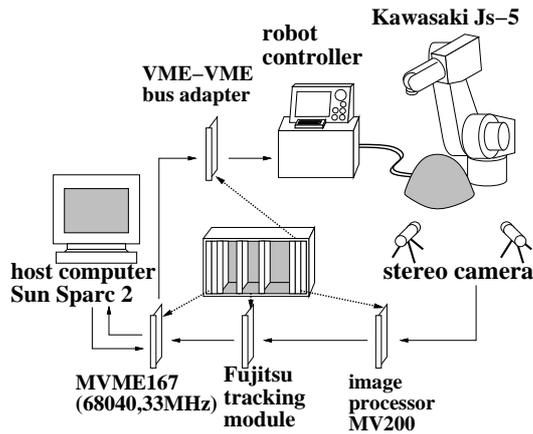
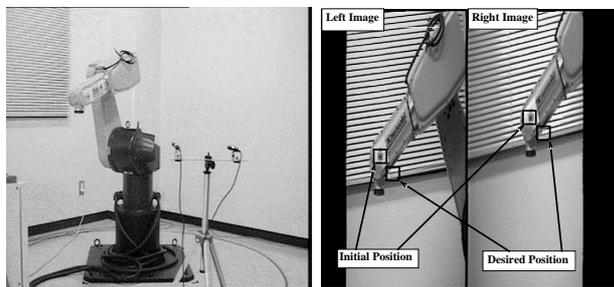
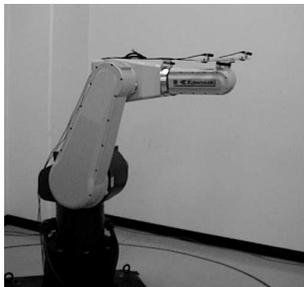


図7 実験システム

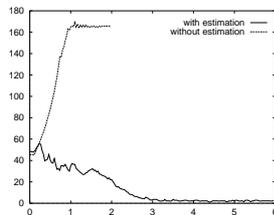


(a) カメラ固定の設定

(b) 入力画像と視覚目標



(c) カメラ可動の設定



(d) 追従結果

図8 追跡視による視覚サーボの実験

5. おわりに

ロボットの自律的な行動獲得にリアルタイムビジョンが欠かせないことを例を通して示した．より高度な作業に対する行動獲得では，視覚意外の情報との統・融合も必要である．但し，その時には，サイクルタイムの違いを考慮する必要がある．最後に，本稿を作成するに当たり，討論して頂いた本学細田耕博士に感謝する．

参考文献

- [1] Y. Aloimonos. "Introduction: Active Vision Revisited". In Y. Aloimonos, editor, *Active Perception*, chapter 0. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1993.
- [2] M. Tarr and M. Black. "Dialogue: A computational and evolutionary perspective on the role of representation in vision". *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 60:1, pp. 65-73, 1994.
- [3] 稲葉雅幸. "局所相関を用いたトラッキングビジョン". 日本ロボット学会誌, Vol. 13:3, pp. ??-??, 1995.
- [4] 中村, 浅田, 細田. "視覚を持つ移動ロボットの障害物回避行動の獲得". 第12回 日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 409-410, 1994.
- [5] G. A. Horridge. "The evolution of visual processing and the construction of seeing systems". In *Proc. of Royal Soc. London B230*, pp. 279-292, 1987.
- [6] R. Held and A. Hein. "Movement-produced stimulation in the development of visually guided behaviors". *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, Vol. 56:5, pp. 872-876, 1963.
- [7] J. H. Connell and S. Mahadevan, editors. *Robot Learning*. Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [8] 浅田, 野田, 依積田, 細田. "視覚に基づく強化学習によるロボットの行動獲得". 日本ロボット学会誌, Vol. 13:1, pp. 68-74, 1995.
- [9] M. Inaba. "Remote-Brained Robotics: Interfacing AI with Real World Behaviors". In *Preprints of ISRR'93*, Pittsburgh, 1993.
- [10] 橋本浩一. "視覚フィードバック制御 - 静から動へ -". システム制御情報学会誌 システム/制御/情報, Vol. 38:12, pp. 659-665, 1994.
- [11] 細田, 浅田. "構造やパラメータに関する知識を用いないビジュアルサーボ系の構成". 第4回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 37-42, 1994.
- [12] K. Hosoda and M. Asada. Versatile Visual Servoing without Knowledge of True Jacobian. In *Proc. of IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems 1994 (IROS '94)*, pp. 186-193, 1994.
- [13] 阪本, 細田, 浅田. "3次元再構成を行わない複数画像情報からの障害物回避軌道の生成". 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 329-330, 1994.
- [14] 細田, 浅田. "ビジュアルサーボ系による移動対象物の追跡視". 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 341-342, 1994.

浅田 稔

1982年大阪大学大学院基礎工学研究科後期課程修了．同年，大阪大学基礎工学部助手．1989年大阪大学工学部助教授となり現在に至る．この間，1986年から1年間米国メリーランド大学客員研究員．知能ロボットの研究に従事．1989年，情報処理学会研究賞，1992年，IEEE/RSJ IROS'92 Best Paper Award受賞．博士（工学）．電子情報通信学会，情報処理学会，人工知能学会，日本機械学会，計測自動制御学会，システム制御情報学会，IEEE R&A, CS, SMC societiesなどの会員（日本ロボット学会正会員）