

# 解説

## 視覚と行動の密な統合を目指すロボットビジョン

浅田 稔

大阪大学工学部電子制御機械工学科 〒565 吹田市山田丘2-1

(1995年12月31日受理)

### Towards Advanced Robot Vision Based on Tight Coupling between Perception and Action

Minoru ASADA

Department of Mechanical Engineering for Computer-Controlled Machinery,  
Faculty of Engineering, Osaka University,  
2-1, Yamadaoka, Suita 565

#### 1 はじめに

コンピュータビジョンの目的は、人間と同じように視覚を通して環境を知覚・判断し行動するための情報を獲得することである。従来、この解釈は、Marr<sup>[1]</sup>の視覚の計算理論に従い、2次元の画像データから環境の3次元的な幾何学的構造を定量的に再構成することとされ、多くの研究者がこの問題に取り組んできた。しかしながら、再構成させる記述の一般性を強く求める故に、環境に大きな制約を強い、手法自体も安定性を欠く物であった。この反省から、Aloimonosら<sup>[2]</sup>は、「視覚は孤立したシステムとして存在するのではなく、環境に働きかけるシステム全体の一部として機能する。」と主張し、能動視覚 (Active Vision)、定性視覚 (Qualitative Vision)、合目的視覚 (Purposive Vision)などを提案し、コンピュータビジョンのパラダイムシフトを引き起こした。ここで、気をつけなければいけない事は、

- 視覚は孤立して存在しえず、環境に働きかける運動機能を伴う全体としてのシステム、すなわちロボットの視覚機能として存在する、
- 環境に働きかける理由はある目的を達成することで、そのための情報獲得が視覚に要求される、

という点で、コンピュータビジョンの目的を別の側面から言い替えただけであるが、従来の研究の視点からは、あまり考慮されなかった点である。

本稿では、視覚と行動という観点から、人工視覚<sup>1</sup>の研究を眺め、視覚と行動の密な統合によるロボットビジョンシステムの新しい流れを紹介する。まず、次節では、視覚と行動の関係から、人工視覚研究を三種類に分類する。それらは、1) 環境の3次元の幾何学的構造の定量的な表現の再構成を規範とするもの、2) 定性的な環境の構造表現を規範とするもの、3) 環境やロボット自身の構造やモデルを与えず、ロボット自らが環境との相互作用で、タスク遂行に必要な情報を獲得するものである。そして、3) に属する具体的な研究例として、視覚サーボに関する研究、ステレオ視差情報及び運動情報に基づく移動ロボットの行動学習を紹介する。

#### 2 視覚と行動の関係と内部表現

視覚と行動の関係を調べる時、それは、視覚と行動の機能を有する全体システムすなわちロボットの内部表現に

<sup>1</sup>機械による視覚機能の実現を目指す研究は、コンピュータビジョン、マシンビジョン、ロボットビジョンと称され、それぞれの定義に多少の差異はあるものの、本質的には違いが少ないと見なし、共通の核となる部分を本稿では、人工視覚と呼ぶ。

も言及せざるえない。以下では、この関係とそのとき利用されている内部表現を含め、これまでの研究を三種類に分類する。図1に、模式図を示す。

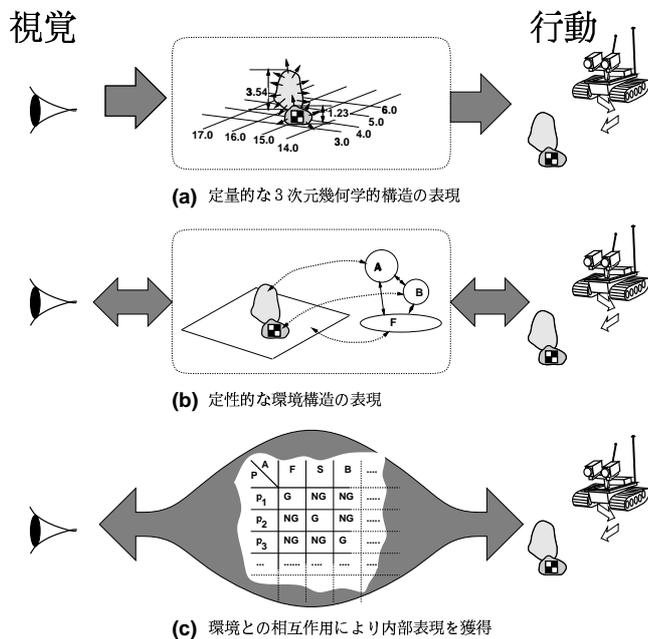


図1: 視覚と行動の関係と内部表現

- 定量的な3次元再構成を規範とするもの(タイプA)

従来のロボティクス分野では、視覚を始めとする感覚系と手先、脚などを制御する行動系とは、個別に研究がなされてきた。それらを結ぶ表現として、行動系にどのように使われるかに依存しない、一般的で洩れのない記述、すなわち2次元画像から再構成された環境内の定量的な3次元構造の記述が、有効であると確信されて来た。そして、ロボットの行動は、再構成された環境記述に基づき計画され、手先などの効果器の環境内での位置や速度として表現されてきた。ロボットが持つ内部表現は、環境の3次元構造のコピーであり、それにのっとり種々のタスクが遂行できると期待された(図1(a)に示すように、情報の流れは、一方向)。しかしながら、元来、再構成問題は不良設定問題であり、これを扱うために、「滑らかさ」などの環境に対する条件を強いること、また解の安定性を確保するために、多くの繰り返し演算を必要とし、多大な計算時間を必要とすること、などの欠点が指摘され、更にタスクに必要な記述に変換する手続きも必要であるため、実世界でロボットが利用することが困難であることが分かった。そこで、Alomonosら<sup>[3]</sup>は、視覚部の運動が制

御できたり観測できることを用いて、これらの問題が解決できることを示し、「能動視覚」として提案した(能動視覚については、解説<sup>[4, 5]</sup>などを参照)。但し、その効用として、再構成問題の単純化が強調され、ロボットの内部表現としては、定量的な3次元記述に変わりなく<sup>[6]</sup>、行動系は視覚部に限定され、その目的は、旧来と変わりなかった。

- 定性的な環境構造を規範とするもの(タイプB)

Aloimonosは、より広い意味で能動視覚を捉えるために「定性視覚」「合目的視覚」を提案した<sup>[2]</sup>。これは、観測者の視覚部が運動機能を有することで、視覚を孤立したシステムとして考えるのではなく、運動機能を有する全体、すなわちロボットの枠組で再考するものである。精密で画一的な3次元再構成記述ではなく、ロボットが遂行すべきタスクや目的に直結した記述を直接画像情報から得ることを目的としている。入力(視覚情報)から出力(モーター制御命令)への直接マッピングにより、明示的に環境の3次元構造を記述する必要がない。移動ロボットへの応用が盛んで、その多くが、環境内の指標(道路のエッジや、建物の柱など)をベースに、操舵系への制御入力を決定していくものである<sup>[7, 8]</sup>。また、環境を特定することにより、ロボット自身の位置決めを単純化したものなどもある<sup>[9]</sup>。内部表現は定性的な環境記述であり、具体的な制御パラメータを予め決定しているものと、実環境で適応させているものなどがあり、情報の流れは、双方向と考えられる。
- 環境との相互作用により内部表現を獲得するもの(タイプC)

上の二つでは、環境構造やタスクに遂行に必要な情報を事前に人間側が用意し、それを内部表現として用いている。これに対し、環境との相互作用を通して、内部表現を自己組織化していくタイプが考えられる。視覚を用いた研究例はまだ少ないが、知能ロボットの自律性を獲得する上では、重要なタイプと考えられる。獲得される内部表現は、タスクやロボットの能力(視覚および運動能力)及び機構に大きく依存した表現となる。サッカーロボットがボールをゴールにシュートするタスクに対して、強化学習を用いた例が報告されている<sup>[10]</sup>。その中で環境の構造は明には表現されず、状況と行動の組合せに対する行動価値関数の形で内部表現が獲得される。

以下では、筆者らのグループで実験したタイプCの研究例を示す。いずれも、環境やロボットの構造に対する事

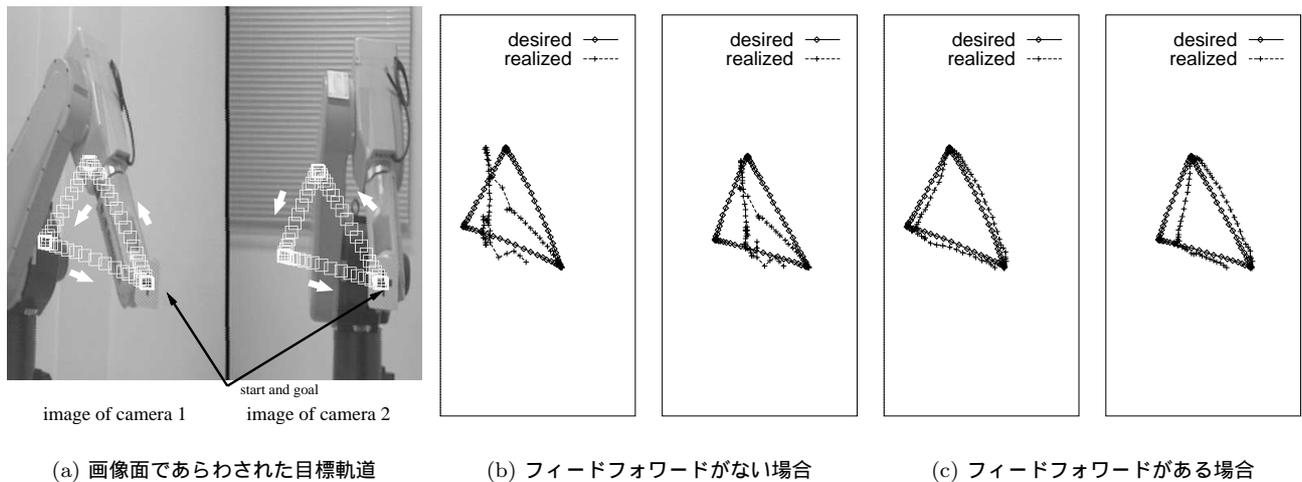


図 2: 目標軌道及び実験結果

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。

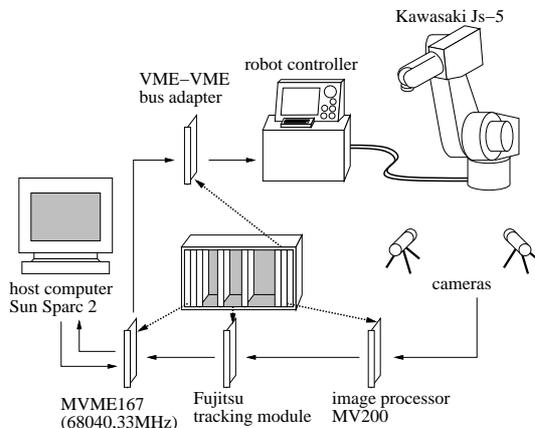


図 3: 実験システム

### 3 追跡視を利用した視覚サーボ

視覚と行動の最も直接的な統合例として、視覚情報を利用したロボットアームの制御法、すなわち「視覚サーボ」に関する研究がある<sup>[11]</sup>。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おり、タイプAに分類される。これに対し、細田ら<sup>[12]</sup>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)反射的行動だけでなく、連続的な経路を追従させるような合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、タイプCに属すると考えられる。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。

図3にシステムの構成図を示す。二つのカメラからの入力画像を一つの画像に合成し、実時間で対象物を追跡

するトラッキングビジョン<sup>[13]</sup>を用いて、視覚目標を追跡している。実際に人間がロボットを動作させ、その画像を取り込むことによって目標画像の系列を得ている。目標軌道を図2(a)に示す。軌道は12[s]間にわたって与えられており、図には0.2[s]ごとの軌跡を表示している。画像上の目標軌道と実際の軌道を図2(b,c)に示す。フィードフォワード項がない場合に比べ、フィードフォワード項を持つ制御則が軌道追従誤差を小さくすることができることが確認できた。

#### 4 両眼立体視による視差及び運動情報に基づく移動ロボットの行動獲得

見掛けの速度分布であるオプティカルフローの抽出に関しては、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<sup>[14]</sup>。そのため、ロボットへの応用は、問題視されてきたが、局所相関による実時間追跡視(以後、トラッキングビジョンと略記)<sup>[13]</sup>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。Nakamura and Asada<sup>[15]</sup>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。そこでは、床面、障害物、目標物を追跡する視覚行動が、トラッキングビジョンで実現され、ロボットを駆動する二つのモーターへの制御命令と結合されて、障害物回避や目標物への到達行動が獲得された。

ここでは、両眼立体視による視差及び運動情報を用いた行動学習の例を紹介する<sup>[16]</sup>。学習法としては、強化学習の1つであるQ学習を用いている。Q学習では、先ずロボットが識別可能なロボットの環境の状態を表す状態空間と環境に対してロボットのとることのできる行動の集合を用意する。現在の状態において、ロボットの取った行動により、ある確率で次状態に遷移し、この状態と行動に対して、評価として報酬が環境からロボットに与えられる。この報酬の積算(行動価値関数)を評価、更新することによって学習を進める。このアルゴリズムは動的計画法の概念から導かれ、アルゴリズムの収束性が証明されている(Q学習の詳細については、文献<sup>[17]</sup>を参照)。

図4は、ステレオ視覚移動ロボットが、目標物に到達する行動をQ学習により獲得する場合の内部表現(図中のStereo Sketchに相当)を模式的に表したものである。障害物を回避しながら目標物に到達するタスク(図1の「行動」参照)を想定した場合、障害物によって目標物が隠さ

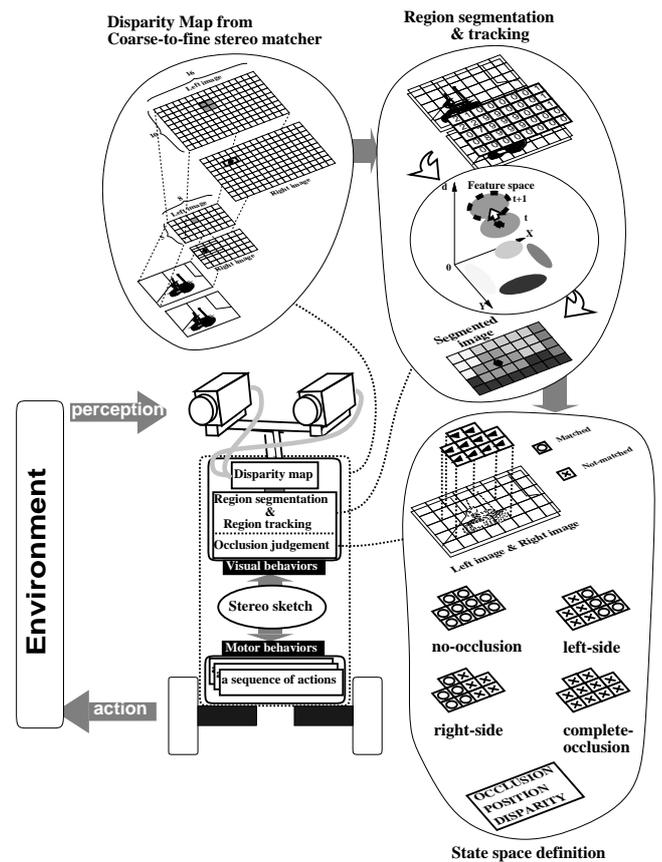


図4: 視差及び運動情報による目標物到達行動の獲得

れる状態を画像から識別するために、視覚行動として、1)粗密探索法<sup>[18]</sup>によるステレオ視差の獲得、2)オプティカルフローの抽出、3)視差による領域分割及びフローを考慮した領域追跡を準備した。これらの視覚処理によって得られる目標領域の隠蔽情報(「目標物の「左側が隠された」、「右側が隠された」、「全て隠された」など)を基に環境の状態空間を構成した。すなわち、障害物を明に記述せずに、障害物を回避して目標物に到達する行動をQ学習によって獲得した。

図5(a,b)は、提案した学習法による目標物到達行動の例(コンピュータシミュレーション)を表している。同図(a,b)の下部に、初期位置でのロボットへのステレオ入力画像を、左右画像をオーバーラップさせて表示している。目標物体と障害物の相対的配置を変えても、ロボットは、障害物に衝突することなく目標物に到達することに成功している。同図(a)の例では、一端、目標物のよく見える位置まで後退してから、障害物を避けて目標物に到達するという行動が学習により獲得された。同図(c)に、実際の実験に用いた移動ロボットを示す。

図6に、実ロボットが障害物を回避して目標物に到

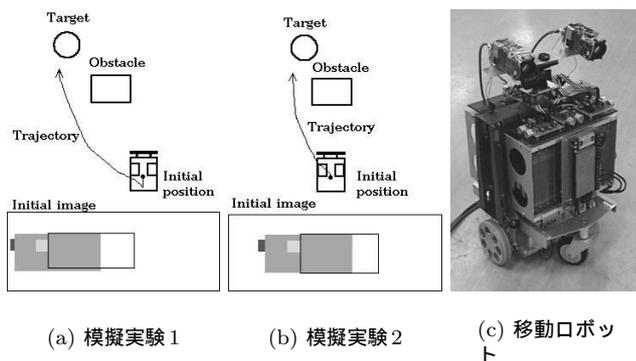


図 5: シミュレーションと実際に利用したロボット

達している様子を示す。この図では、6つの時刻での画像処理結果と環境の様子(左右のカメラからの画像)を示している。目標物は、電気ストーブ(大きな長方形領域:画像パターンとして最初に指定)で、ロボットが近づくにつれてサイズが大きくなって追跡できる視覚行動が実現されている。左にある箱が障害物であるが、明には記述されず、「目標物の左側が隠蔽された(小さな長方形領域の塊)」などの状態として認識される。図では分かりにくいですが、2段目あたりでは、後退の動作が取られている(若干、画像上でのサイズが小さくなっている)。これは、目標物を見失わないための「視覚のための行動」と解釈できるが、学習は、「行動のための視覚」との区別を明につけることなく、ロボットの能力や状況に応じて必要な行動を生成したと考えられる。

## 5 おわりに

人工視覚を環境に働きかける全体システム、すなわちロボットの視点から眺め、これまでの研究を三つのタイプにわけ、環境との相互作用によりタスクに必要な情報を自ら獲得していくロボットビジョンの例を先端研究として紹介した。これは、平成7年度から始まった文部省科学研究費重点領域研究「感覚と行動の統合による機械知能の発現機構の研究」(代表:井上博允(東大))と主旨を同じくするものである。

ロボティクスの世界では、MITのBrooks<sup>[19]</sup>が、従来の熟考型の知能ロボットから、行動規範型のロボットを提唱し、昆虫型のロボットを始めとして多くのロボットを生み出した。視覚を用いた例は少ないが、彼らが提案したサブサンプリングアーキテクチャは、個々の行動モジュール及び、モジュール間の切替えをプログラマが設計し、ロボットに埋め込んでいる点で、タイプBに属す

と考えられる。但し、それらを強化学習によって実現する研究<sup>[20]</sup>も実施しており、タイプCの研究も含めて、人間型ロボットを開発中である。

タイプCの内部表現は、ロボットの構造やタスク及び獲得手法に強く依存している。紹介した汎用視覚サーボでは、画像上の指標の移動速度と関節角速度の関係(イメージャコビアン)が内部表現で、それを環境との相互作用(試行錯誤)によって推定している。正しいヤコビアンを求めている訳ではなく、タスク遂行に十分なパラメータを推定している点に注意する必要がある。ステレオの移動ロボットの例では、視覚行動とモーター行動を結びつける強化学習の結果(LUT)が内部表現に対応する。この他にも2足2腕型ロボットの視覚誘導型鉄棒運動では、GAを用いてNNの荷重係数及び閾値の最適化が行われており<sup>[21]</sup>、NNが内部表現に対応していると考えられる。

強化学習やNNを用いた学習では、入力をどのように決定するかが、非常に重要な問題となっている。これまで紹介してきた例では、いずれもプログラマが用意している。これを自律的に行おうとする試みもある。サッカーロボットの例<sup>[10]</sup>では、ボールやゴールの位置と大きさなどでプログラマが状態空間を与えたが、野田ら<sup>[22]</sup>は、ロボットが自身の行動に基づいて状態空間を自律的に構成する手法を提案し、実機で検証している。構成された状態空間は、プログラマが用意したものとは大きく異なり、シュート率も向上した。Satoら<sup>[23]</sup>も同様に、全方位画像型の移動ロボットにおける状態空間の自律的構成法を提案し、注視点の候補をロボット自身の経験から抽出している。この問題は、「状況の分節化」と呼ばれているAIやロボティクスの基本問題<sup>[24]</sup>で、どこを注視すればよいかは、ロボットの能力やタスクに大きく依存することを示しており、今後の研究の発展が望まれる。

## 参考文献

- [1] David Marr. W. H. Freeman and Co, 1982.
- [2] Y. Aloimonos. "Introduction: Active Vision Revisited". In Y. Aloimonos, editor, *Active Perception*, chapter 0. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1993.
- [3] Y. Aloimonos, I. Weiss, and A. Bandyopadhyay. "Active Vision". In *Proc. of first ICCV*, pp. 35-54, 1987.
- [4] 久野他. 小特集「アクティブビジョン」. 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 492-514, 1995.
- [5] 喜多. 「人間に学ぶアクティブ・ビジョン・システム」. 情報処理学会誌, Vol. 36, No. 3, pp. 264-272, 1995.
- [6] R. Brooks. "Foreword". In A. Blake and A. Yuille, editors, *Active Vision*. The MIT Press, 1992.

- [7] E. D. Dickmanns. Expectation-based dynamic scene understanding. In A. A. Blake and A. Yuille, editors, *Active Vision*, chapter 18. The MIT Press, Cambridge, 1992.
- [8] G. Sandini. "Vision during action". In Y. Aloimonos, editor, *Active Perception*, chapter 4. Lawrence Erlbaum Associates, Publishers, 1993.
- [9] I. Horswill. "Analysis of adaptation and environment". *Artificial Intelligence*, Vol. 73, pp. 1–30, 1995.
- [10] 浅田, 野田, 俵積田, 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.
- [11] 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.
- [12] K. Hosoda and M. Asada. Versatile Visual Servoing without Knowledge of True Jacobian. In *Proc. of IROS'94*, pp. 186–193, 1994.
- [13] 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. 327–330, 1995.
- [14] 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.
- [15] T. Nakamura and M. Asada. Motion Sketch: Acquisition of Visual Motion Guided Behaviors. In *Proc. of IJCAI-95*, pp. 126–132, 1995.
- [16] 中村, 浅田. ステレオ視覚を持つ移動ロボットの目標到達行動におけるオクルージョン回避行動の獲得. 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 461–462, 1995.
- [17] C. J. C. H. Watkins. *Learning from delayed rewards*. PhD thesis, King's College, University of Cambridge, May 1989.
- [18] W. E. L. Grimson. "A computational theory of visual surface interpolation". In *Proc. of Royal Soc. London B298*, pp. 395–427, 1982.
- [19] R. A. Brooks. "A robust layered control system for a mobile robot". *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. RA-2, pp. 14–23, 1986.
- [20] P. Maes and R. A. Brooks. "Learning to coordinate behaviors". In *Proc. of AAAI-90*, pp. 796–802, 1990.
- [21] 長阪, 稲葉, 井上. GAとNNを用いた二足二腕型ロボットによる視覚誘導型鉄棒運動. 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 655–656, 1995.
- [22] 野田, 浅田, 細田. 強化学習によるロボットの行動獲得のための状態空間の自律的構成. 第5回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 145–150, 1995.
- [23] R. Sato, H. Ishiguro, and T. Ishida. State-space construction considering robot properties. 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 453–454, 1995.
- [24] 國吉. 「実世界エージェントにおける注意と視点-情報の分節・統合・共有-」. 人工知能学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 507–514, 1995.

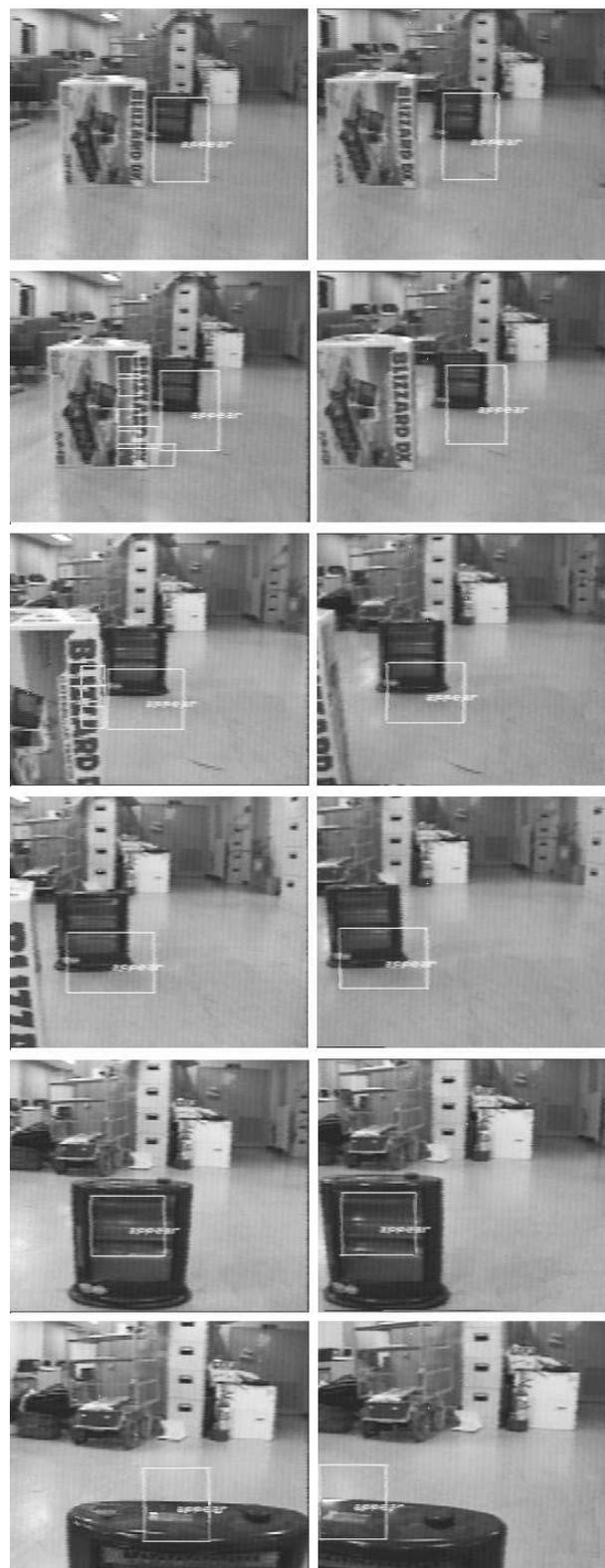


図 6: 障害物を回避しながら目標物に到達したロボット