

注視に基づくロボットの視覚

Robot Vision Based on Gaze Control

石黒 浩*
Hiroshi Ishiguro

* 京都大学工学部情報工学教室
Dept. of Information Science, Kyoto University.

1995年3月27日 受理

Keywords: active vision, gaze control, attention, object recognition, environmental recognition, dynamic world, intelligent robot.

1. はじめに

近年のロボットの視覚研究において、視覚センサを能動的に運動させ、物体や環境の一部への注視を繰り返すことで、実時間で頑強な視覚機能を実現しようとするアプローチが数多く見受けられるようになってきた。これらの研究は、能動視覚(active vision)と呼ばれる。本稿では、能動視覚の基本的な考えを述べ、その能動視覚の特徴である注視行動を取り入れた研究を紹介する。

従来の受動視覚(passive vision)は、以下の二つの問題を持つ[Aloimonos 93a].

1. 受動視覚では、与えられた画像から必要とするすべての情報を獲得しなければならないが、与えられる画像がそのタスク達成に必要なすべての情報を含む保証はない。
2. 仮に、必要なすべての情報を含む画像が与えられたとしても、画像全体にわたって詳細な解析を行うのは困難である。

これらの問題を解決するためには、カメラの能動的な動きにより、タスクが必要とする情報を探索する必要がある。さらに、得られる画像中の重要な情報のみに、動的に計算資源を割り当てる手法を確立しなければならない。このような能力を持つ視覚システムの実現を目指しているのが能動視覚の研究である。

[1] 能動視覚

能動視覚は、Bajcsy[Bajcsy 88]によって、その基本的なコンセプトが提案され、Aloimonos[Aloimonos

88]やBallard[Ballard 89]らが定義した。

Aloimonosは最初、能動視覚を以下のように定義した。

観測者がセンサの幾何的パラメータを制御するという目的を持つある種の活動に従事するとき、その観測者は能動的(active)である[Aloimonos 88].

すなわち、センサの幾何的パラメータのいくつかを、正確なカメラ運動(カメラの運動は既知とする)に置き換えることにより、従来解きにくかったビジョンの問題(shape from X , X にはcontour, texture, shading, motionなどが入る)を、解きやすくするものがAloimonosが研究初期に定義した能動視覚である。

これに対し、BallardはAloimonosの能動視覚よりもより広い研究枠組みとして、人間の視覚行動からヒントを得たAnimate Visionを提唱した[Ballard 89]. Animate Visionでは、タスクの文脈に応じて視線を制御する注視制御(gaze control)に重点が置かれている。

ある目的のもとに環境内を探索する、観測者の注視点の動きを想像してみよう(図1参照). 人間は、与えられた目的を達成するため、環境内のさまざまな物体への注視を繰り返しながら、必要とする視覚情報を得る。このような視覚システムの利点は、必要な情報のみを、実時間で入手できることである。これらの利点により、複雑で動的に変化する環境においても、頑強で高速な環境や物体の認識が可能となる。

Ballardは、このようなAnimate Visionには以下の三つが必要であるとしている。

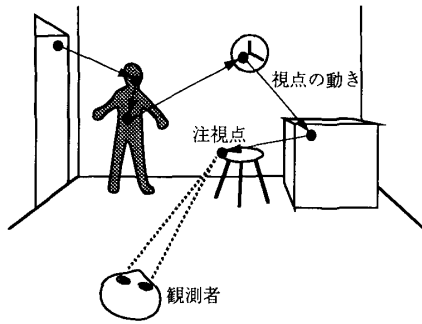


図1 環境を探索する視点の動き

- ・視覚タスクを単純化するための視覚的順序づけ (visual sequentialization) (中心窩を持つ網膜を利用するため)
- ・動き (animate motion) を補償するための注視制御 (gaze control)
- ・世界の予測不能性 (world's unpredictability) を補償するための学習

また, Aloimonos も先の定義に基づく研究枠組みを拡張して, Purposive Vision [Aloimonos 93a, Aloimonos 93b] を提案している. Aloimonos の Purposive Vision も Ballard の Animate Vision も目指すものは同じと考えられるが, Purposive Vision では, 定性的な情報 (正確な計測を必要とせず, 非常に自由度の小さい空間上で表現される情報) を獲得するモジュールの集合として, システムを構築するところに重点を置いている.

ほかにも, Eklundh, Sandini ら [Aloimonos 93c, Aloimonos 92] 多くの研究者が能動的視覚の研究を行っているが, その基本的な考えは, 空間的, 情報量的, 情報の質的に制約された視覚センサに能動的な視覚パラメータの制御を取り入れることにより, 実時間で頑強な視覚情報処理を可能とするシステムを開発しようというものであり, そのシステム開発における基本的なアイデアとして, どの研究も以下の二つを重視している.

- ・視覚パラメータの能動的な制御により問題を単純化して解く複数のモジュールをもとにシステムを構築する.
- ・人間の視覚機能をまねる (非均一な網膜を持つ視覚をタスクの文脈に応じて制御する).

〔2〕 能動視覚における基本問題

このような能動視覚における基本的な問題は以下の2点と考えられる.

1. システムを構成する各モジュールにおいて, 視覚パラメータの能動的な制御により視覚の問題がどれだけ単純かつ頑強に解けるようになるか.

2. システム全体として, タスクの文脈に応じてどのように視覚パラメータを制御すればよいか.

1の問題に関しては, 数多く報告されている (例えば, [Ballard 93] にまとめて紹介されている). そのなかでも, 初期の能動視覚の技術の特徴づける, 特定の対象を注視する技術 (対象の注視) をもとにした研究成果の報告が多い.

2の問題に関しては, 視線制御により注視対象を動的に変更する方法 (注視対象の選択) が必要となる. しかし, これまでの研究では, タスクの文脈を生成することが容易な場合 (例えば, 計測によるモデル獲得) や, タスクの文脈が与えられた場合において, 注視対象を連続的に選択する方法や, 人間がタスクの文脈を与える際に, どのような表現を介して与えればよいかという考察はなされているものの, 直接タスクの文脈とは何かという問題を取り上げている技術的な研究はないと見られる.

また, それ以外に, 視覚から得られる情報を選択的に利用する方法 (視覚情報の選択) に関する研究が必要である. 1や2の問題に関するこれまでの研究では, 制御される視覚パラメータは, 主に視線方向や視覚系の運動であったが, それら以外にも, 視覚から得られる情報の選択も重要である. しかし, これに関してもほとんど研究例がない.

次章以降では, 能動視覚研究のなかでも特に, 注視行動の効果を従来の研究 (ロボットの誘導や物体・環境モデルの獲得と利用など) に取り入れた例を中心に紹介しながら, 残された課題を考える. まず, 対象の注視に関するいくつかの基本的な研究を紹介する. 次に, 注視対象の選択に関する現状における研究成果と期待される研究を紹介する. ただしここでは, タスク達成のために何らかの方法により視線の動きを計画実行しているという意味で, タスクの文脈を扱っている研究と, タスクの文脈を人間がシステムに教示する研究を紹介する. 今後の研究の進展に伴い, タスクの文脈とは何か, いかに関与されるかといった本質的な議論がなされていくと期待する. そして, 最後に, 視覚情報の選択について示唆を与えるいくつかの研究を紹介し, 筆者の考えを多少なりとも述べる.

なお, 能動視覚の要素技術としては, 上記のほかに, ハードウェアなどに関するものも重要であるが, それらについては, 1991年米国シカゴで開催された能動視覚に関するワークショップ [Swain 91] で, きめ細かに議論されている.

2. 対象の注視

特定の対象に対してカメラ姿勢を一定に保つ技術は、注視制御(Gaze stabilizationの意味)と呼ばれ、能動視覚の重要な一要素である。

2.1 注視制御

特定の物体や特徴に対してカメラ姿勢を一定に維持する研究は、マニピュレータの視覚サーボ(Visual servo)の研究として、近年特に注目を集めている。多くの研究は、多間接のマニピュレータの先端に取り付けられたカメラを利用しており、対象をつねに画像中心で捉えるためのマニピュレータの制御方法を議論している。

これらの研究では、物体投影の画像中心からのずれを入力とするフィードバック制御により、注視制御を実現している。制御方法には、PID制御[Weiss 87]や、画像処理による遅れ時間を克服するための種々の予測制御が用いられる[Brown 90]。このような技術は、制御工学における研究成果を反映させることで、ほぼ完成された感がある。また、マニピュレータ以外に、移動ロボットを用いた注視制御の研究[宮脇 93]もある。

上記の注視制御に関する基本的な技術が、完成されてきている一方で、今後さらなる成果が期待されるのが、視覚情報をもとにマニピュレータの制御則を獲得する研究である。Hosodaら[Hosoda 94]は、視覚情報をもとに多自由度マニピュレータのヤコビ行列を推定する研究を行った。マニピュレータの周辺のさまざまな位置に提示される対象に、注視を繰り返す間に、徐々に正確なヤコビ行列を獲得するというのである。

ロボットの構造は完全に解析されているとは限らない。また、ロボットの構造が途中で変わるかもしれない。そのような場合においても、適切な視覚センサの運動制御を実現する方法として、興味深い。

なお、上述の研究では、すべて画像上に投影される点、または、画像面上で見え方が変化しない、2次元パターンを追跡するものである。ここでは紹介していないが、注視対象には、点だけではなく、直線や曲線など連続的なパターンや、見え方の変化する3次元構造を持つ物体も含まれる。

2.2 注視による局所的な環境モデルの獲得

能動視覚が提案された当時、その象徴的な研究として、注視制御による局所的な環境構造の復元が取り上げられた。Ballard[Ballard 88]や Aloimonos

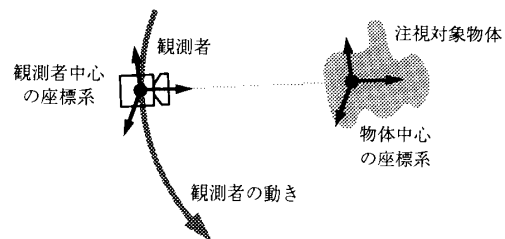


図2 観測者・物体中心座標系

[Aloimonos 88]は、正確に運動制御できるマニピュレータの先端に取り付けたカメラを、物体を中心とした円弧運動させることにより注視制御を実現し、そのカメラから得られる物体のオプティカルフローから、注視点を中心とする環境の局所的な構造を求めた(図2参照)。

従来の研究では、カメラは環境内を自由に運動するという設定に従っていた。そのため、オプティカルフロー(カメラの運動に伴って観測される、画像面上の特徴点の動き)から得られる、環境内の物体とカメラの運動を関係づける方程式は非線形となり、すべてのパラメータを独立に求めることはできない。これに対し、上記のような注視制御を用いると、構造を求める式が線形になるだけでなく、直接物体中心の座標系で構造が推定できる、注視により十分大きなオプティカルフローが得られる(位置決め精度が高くなる)といった利点がある。

3. 注視対象の選択

注視対象のタスクに応じた連続的な選択は、能動視覚を特徴づける重要な課題である。アプローチは大きく以下の三つに分かれる。

1. 計測を目的とした研究。より高速で、正確で、広範囲のモデル獲得を基準とした注視対象の選択が行われる。
2. モデルをもとにした物体認識やロボットの誘導における注視行動計画。あらかじめ与えられたモデルと、観測中の物体との効率的な照合を基準とした注視対象の選択が行われる。
3. 人間の注視対象の選択戦略を、直接ロボットに教示する研究。

以下では、それぞれのアプローチにおけるいくつかの研究を紹介する。なお、計測や幾何モデルをもとにした物体認識における注視点選択基準は、[Abbott 92]に詳しくまとめられている。

3・1 モデル獲得における注視計画

〔1〕 環境の局所地図群の獲得

前章で述べたように、注視制御を用いれば、環境の局所的な構造を注視点を中心として正確に復元することができるが、これをロボットの移動中に繰り返すことにより、環境モデルを獲得することができる[Stemaszyk 91]。まずロボットは、ある観測点で得た粗い距離画像から、環境内のコーナや、再観測を要する複雑な部分を注視対象として抽出する。次に、ロボットは移動しながら、その回転運動可能なカメラにより、注視対象への注視を繰り返し、環境の部分的な幾何モデルを獲得する。結果として、注視点の位置関係を維持した環境の粗い構造と、そのなかで特に詳細に調べべき対象を中心とした複数の局所地図からなる階層的な環境モデルが獲得される。

これは、注視制御の利用として、当然考えられるべきアプローチであるが、今のところ、アイディアの提案と部分的な実験に留まっている。今後、実際のロボットにおけるインプリメントにより、その有効性が実証されていくことが期待される。

〔2〕 環境の全体地図の獲得

環境の正確なモデルを獲得するには、環境に対する正確なロボットの運動を実現しなければならない。ロボットを誘導するための能動視覚として、Ishiguroら[Ishiguro 92]が提案した全方位画像を利用した誘導法がある。この方法は、ロボットの前後に位置する特徴点が、全方位の視覚センサ上でつねに180度の間隔で観測されるように、ロボットの移動を制御するもので、これにより、ロボットは二つの特徴点間を正確に直線運動することができる。また、特徴点間の方位角度間隔を任意に設定することで、ロボットの正確な円弧運動を実現する方法に拡張できる[Krotkov 89]。

Ishiguroらの研究では、このようなロボットの制御をもとに、次のように環境のモデルを獲得する。まず、二つの観測点で得られた全方位画像をもとに、基線距離の長い正確なステレオを実現し、局所モデルを獲得する。次に、未観測の空間に向かうようにロボットを誘導し[Xie 90]、再び局所モデルを獲得する。得られた二つの局所モデルは、ロボットが環境に対して正確な運動を行っていることから、正確に統合することが可能である。このように、局所地図の獲得と統合を繰り返すことにより、徐々に広範囲の環境モデルを構築することができる。

このように、計測を目的とした場合、タスクの達成度を表す明確な指標(予測される計測の精度や、未観測

領域の存在[Abbott 92])が存在するため、その注視行動計画は比較的容易に立てられる。

3・2 モデルをもとにした注視行動計画

ロボットが一般的なタスク(前節で述べた計測を目的とするものではない)を達成するために、環境内から注視すべき対象を自動的に選出していくことは難しく、能動視覚の今後の大きな課題である。現状では、これら一般的なタスクに対する注視対象の選択は、あらかじめ与えられた環境・物体・タスクモデルに基づいている。

〔1〕 ナビゲーションにおける注視行動計画

屋内環境を移動するロボットにとって、交差点やコーナは非常に重要な意味を持つ。これらの交差点やコーナを視覚により追跡し、ロボットを誘導する研究(例えば[Onoguchi 93])も、能動視覚の一つであろう。ロボットは、あらかじめプログラムされたルールにより、交差点を検出し、注視対象となるエッジを決定、それらをカメラで注視しながら、ロボットを誘導する。

屋外環境、特に道路環境を移動するロボットにおいても同様のアプローチが見られる。例えば、Dickmannsら[Dickmanns 89]による研究がある。この研究では、注視点選択に関する議論はさほどなされていないが、あらかじめ組み込まれたルールにより、道路境界や、前方の車の適切な部分を注視しながら、実時間でロボットを誘導するという方法は、実用的な自律走行システムを実現するうえで欠かせないものである。

〔2〕 幾何モデルに基づく物体認識

CADモデルに基づく物体認識における観測計画も、注視点選択問題に深く関わるものである。観測計画において考慮すべきは、カメラの移動可能な経路を探索することと、認識過程において必要となる情報を適切に得る視点を探索することの2点である。

これに関する研究は、近年のロボット関連の国際会議で数多く報告されているが、そのなかの興味深い研究の一つに、Bichinsonら[Bichinson 94]による物体のアスペクトグラフを利用した研究がある。ある視点で得られた画像を解析し、画像に映しだされた物体のアスペクトを得る。そのアスペクトが、あらかじめ用意された多数の物体のアスペクトグラフのどのアスペクトに対応するかを、カメラを動かしながら、予想されるアスペクト変化によって検証し、物体を特定するという方法である(彼らはこの探索に物体のアスペクトグラフを統合した拡張アスペクトグラフなるものを用いている)。

幾何モデルを用いているとはいえ、能動視覚におけ

る能動的視覚探索を象徴する研究の一つとして評価できる。

3.3 人間の注視対象の選択戦略の教示

前節では、計測を目的とした注視計画や幾何モデルに基づく注視計画を紹介したが、これらとはまったく違ったアプローチとして、人間の注視点選択戦略をロボットに教示する興味深い研究がある。

〔1〕 行為理解における注視点選択

國吉[國吉 91]らは、人間の行為をロボットにまねさせるために、その人間の行為理解のための視線制御システムを作成した。彼らは、人間の腕によるマニピュレーション、特に、物体をつかむ、放す、物体を積み上げるなどの行為を理解するためには、環境や物体のどの部分を注視すべきかを慎重に検討し、注視している部分の状態変化(物体間の接触や離脱)と注視点移動の文脈から、人間がどのような行為を行っているかを実時間で認識するシステムを実現している。この研究は、人間の注視点選択戦略を取り入れたシステムの一例である。

〔2〕 オンラインでの注視点の教示

上述のシステムに埋め込まれたルールをもとにした注視点選択に対し、移動ロボットに同乗した人間が、適切な注視対象をオンラインで教示するという研究がある[柴田 93]。開発されたロボットはハイパースクータと呼ばれ、インタフェースとして、トラックボールとモニタを備えている。同乗する人間は、それらを用いて、ロボットが環境を移動する際に注視すべき対象を直接教示する。教示が終わると、ロボットは、それら教示された注視対象を環境内で探索しながら自律的に移動する。

注視対象の選択は、タスクに依存する非常に難しい問題である。人間のノウハウをロボットに教え込むことで、注視点選択問題を解決しようとするこれらのアプローチは、今後の展開が大いに期待される。ただし、人間とロボットの機構の間には大きな相違があり、必ずしも人間の注視点選択戦略がロボットにとって最適であるとは限らない。この機構面におけるギャップを埋める何らかの解決策が必要である。

4. 視覚情報の選択

これまでの能動視覚では、視線制御による能動的な情報収集を中心とした研究が行われてきた。しかし、カメラから得られるさまざまな情報のうち、タスクに必要な情報のみを動的に選択することも、能動視覚の

重要な一研究要素である。注意の対象となる情報の例として以下のものがあげられる。

- ・画像の解像度の選択
- ・詳しく観測すべき距離(または視差情報)の選択
- ・画像の輝度の選択

しかし、これらの問題に取り組んだ研究はほとんどないため、示唆を与えるであろういくつかの研究を紹介する。

〔1〕 解像度の選択に関する研究例

実際のロボットのタスクにおいて、どれほどの画像の解像度が必要かを検討した研究がある。Horswill [Horswill 93]は、研究室のあるフロアを動き回るロボットを開発する際に、実時間でロボスタな処理を実現するロボットの視覚について考察し、そのなかで、経験的にではあるが、取り込むべき画像の解像度をどのくらいまで粗くできるか検討している。

解像度の選択に関して、なにがしかの方法を確立するには至ってはいないが、その重要性は、彼の実験結果から十分にうかがえる。彼は、解像度の慎重な選択を含めた、画像処理アルゴリズムの単純化により、これまでのロボットにはないくらい高速でロボスタな視覚によるナビゲーションを実現している(そのロボットは、人間を発見し、MITの彼の研究室のあるフロア内を案内する)。

〔2〕 解像度に応じたモデルに関する研究例

また、Bobickら[Bobick 92]は、画像の解像度の変化が、画像認識におけるモデルにまで影響を及ぼすことを提案した。彼らは、同じ物体であっても、画像(彼らの場合は距離画像)解像度が異なれば、物体のモデルの構造までも異なることを提案し、さらに、カメラの運動に伴う物体の認識過程では、それら、解像度の異なるモデル間での情報の流れが大切であることを示した。

例えば、木に向かって歩いていく人の視覚に映し出される映像を想像してみよう(図3参照)。遠い位置では、木は固まりとしてしか見えないが、徐々に近づくにつれて、木を構成する1本1本の枝の形が現れてくる[Bobick 92]。

従来の幾何モデルに基づく物体認識では、画像の解

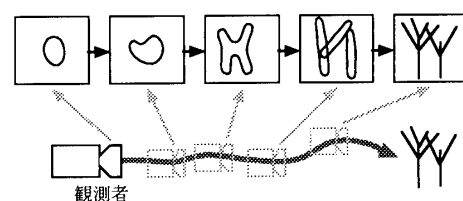


図3 解像度の変化に伴う構造の変化

像度とは無関係に、個々の物体に対するモデルが準備されていた。これに対して、解像度に応じたモデルを用いるアプローチでは、より頑強な認識結果が期待できる。また、この研究をさらに発展させると、カメラ運動に伴うモデル変化に基づく認識が可能となると考える。人間は物体の見え方そのものよりも、その見え方の変化により、物体を認識しているといわれるが、能動視覚研究においても、このようなアプローチが必要ではないだろうか。

5. おわりに

本稿では、筆者が考える能動視覚について三つの要素に分類し、これまでの研究成果と今後の課題を議論した。

能動視覚は、単なる視覚に閉じた問題ではなく、動的で複雑な環境で行動するロボットの身体やそのタスクまでも含んだ情報処理を考える枠組みである。“能動視覚とは何か”を明らかにするには、“ロボットのタスクとは何か”、“タスクの文脈とは何か”、“ロボットのメカは視覚情報処理とどのような関係にあるか”といった問題に対して何らかの解答を示さなければならないであろう。これらは、コンピュータビジョンや知能ロボット研究の重要かつ基本的な問題である。

謝 辞

本稿の内容は、[石黒 95]で議論したものである。執筆において、草稿の不備を指摘していただいた CV 技術評論・将来展望ワーキンググループのメンバの方々に感謝します。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Abbott 92] Abbott A. L.: A survey of selective fixation control for machine vision, *IEEE Control Systems*, pp. 25-31 (Aug. 1992).
- [Abrams 93] Abrams, S., Allen, P. K. and Tarabanis, K. A.: Dynamic sensor planning, *Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 605-610 (1993).
- [Aloimonos 88] Aloimonos, Y. and Weiss, I.: Active vision, *Int. J. Computer Vision*, pp. 333-356 (1988).
- [Aloimonos 92] Aloimonos, Y. (ed.): Special issue on purposive, qualitative, active vision, *CVGIP: Image Understanding*, Vol. 56, No. 1 (1992).
- [Aloimonos 93a] Aloimonos, Y.: Active vision revisited, Y. Aloimonos (ed.), *Active Perception*, pp. 1-18, Lawrence Erlbaum Associates, Pub. (1993).
- [Aloimonos 93b] Aloimonos, Y., Riylin, E. and Huang, L.: Designing visual systems: Purposive navigation, Y. Aloimonos (ed.), *Active Perception*, pp. 47-102, Lawrence Erlbaum Associates, Pub. (1993).
- [Aloimonos 93c] Aloimonos, Y. (ed.): *Active Perception*, Lawrence Erlbaum Associates, Pub. (1993).
- [Bajcsy 88] Bajcsy, R.: Active perception, *IEEE Proc.*, Vol. 76, No. 8, pp. 996-1006 (Aug. 1988).
- [Ballard 88] Ballard, D. H.: Eye fixation and early vision: Kinetic depth, *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 524-531 (1988).
- [Ballard 89] Ballard, D. H.: Reference frames for animate vision, *Proc. Int. Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp. 1635-1641 (1989).
- [Ballard 93] Ballard, D. H. and Brown, C. M.: Principles of animate vision, Y. Aloimonos (ed.), *Active Perception*, pp. 245-282, Lawrence Erlbaum Associates, Pub. (1993).
- [Bichinson 94] Bichinson, J., et al.: Active object recognition integrating attention and view point control, *Proc. European Conf. Computer Vision* (1994).
- [Bobick 92] Bobick, A. F. and Bolles, R. C.: The representation space paradigm of concurrent evolving object descriptions, *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, Vol. 14, No. 2, pp. 146-156 (1992).
- [Brown 90] Brown, C. M.: Gaze controls with interactions and delays, *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 20, No. 1, pp. 518-527 (1990).
- [Dickmanns 89] Dickmanns, E. D. and Christians, T.: Relative 3D-state estimation for autonomous visual guidance of road vehicles, *Intelligent Autonomous Systems 2* (ed. by T. Kanade), Vol. 2, pp. 683-693 (1989).
- [Horswill 93] Horswill, I. D.: *Specialization of perceptual Processes*, MIT Ph. D thesis (1993).
- [Hosoda 94] Hosoda, K. and Asada, M.: Versatile visual servoing without knowledge of true Jacobian, *IEEE/RSJ Int. Conf. Robots and Systems*, pp. 186-193 (1994).
- [石黒 91] 石黒 浩, Stelmaszyk, P., 辻 三郎: 注視制御による局所地図の獲得, 信学誌(D-2), Vol. J74-D-II, No. 7, pp. 926-932 (July 1991).
- [Ishiguro 92] Ishiguro, H. Yamamoto, M. and Tsuji, S.: Omni-directional stereo, *IEEE Trans. Patt. Analy., Machine Intell.*, Vol. 14, No. 2, pp. 257-262 (1992).
- [石黒 95] 石黒 浩: CVCV-WG 特別報告: コンピュータビジョンにおける技術評論と将来展望(III)ー能動視覚(Active Vision)ー, 情処学研報(コンピュータビジョン研究会), (May 1995).
- [Krotkov 89] Krotkov, E.: Mobile robot localization using a single image, *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 978-983 (1989).
- [國吉 91] 國吉康夫, 井上博允, 稲葉雅幸: 人間が実演してみせる作業の実時間視覚認識とそのロボット教示への応用, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 3, pp. 295-303 (1991).
- [宮脇 93] 宮脇一路, 李 仕剛, 石黒 浩, 辻 三郎: 移動ロボットの能動的視覚によるカメラ運動の制御と物体/環境認識への応用, 情処学論, Vol. 34, No. 10, pp. 2202-2211 (1993).
- [Onoguchi 93] Onoguchi, K. and Watanabe, M.: Qualitative navigation using target tracking, *Proc. JSME Int. Conf. Advanced Mechatronics*, pp. 866-871 (1993).
- [Sandini 90] Sandini, G. and Tistarelli, M.: Active tracking strategy for monocular depth inference over multiple frames, *IEEE Trans. Patt. Anal., Machine Intell.*, Vol. PAMI-12, No. 1, pp. 13-27 (1990).
- [柴田 93] 柴田智宏, 松本吉央, 稲葉雅之, 井上博允: 視覚を持

ち教示と自律走行可能な車の開発, ロボットメカトロニクス講演会'93論文集(1993).

- [Stelmaszyk 91] Stelmaszyk, P., Ishiguro, H. and Tsuji, S.: Mobile robot navigation by an active control of the vision system, *Proc. 12th Int. Joint Conf. Artificial Intelligence*, pp. 1247-1253 (Aug. 1991).
- [Swain 91] Swain, M. J. and Stricker, M. (eds.): Promising directions in active vision, Univ. Chicago Tech.

Report, CS 91-27 (1991).

- [Weiss 87] Weiss, L. E., Sanderson, A. C. and Neuman, C. P.: Dynamic sensor-based control of robots with visual feedback, *IEEE J. Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 5, pp. 404-417 (1987).
- [Xie 90]: Xie, S.: View planning for mobile robot, *Proc. Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 748-754 (1990).

著者紹介



石黒 浩(正会員)

1986年, 山梨大学工学部計算機科学科卒業。1988年, 同大学院工学研究科修士課程修了。1991年, 大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了, 工学博士。同年, 山梨大学工学部電子情報工学科助手。1992年, 大阪大学基礎工学部システム工学科助手。1994年, 京都大学工学部情報工学科助教授。知能ロボットの視覚研究に従事。電子情報通信学会, 情報処理学会, 日本ロボット学会, IEEE各会員。