

カメラ奥行方向に移動する 3D 対象物の実時間ポーズトラッキング グ解析とビジュアルサーボ性能

○西村健太 (岡山大学大学院自然科学研究科) 須浪唯介 前田耕市 見浪護 矢納陽 松野隆幸

1. 緒言

ビジュアルサーボとは、視覚センサから得られる視覚情報をフィードバックループに組み込むことでロボットの動作を制御する方法であり、体的な手法として位置ベース制御 [1], イメージベース制御 [2], ハイブリッド視覚サーボリング [3] の 3 つに大別される。ビジュアルサーボは常に変化する環境や未知の環境で働くロボットへの適応が期待されている。

ビジュアルサーボの応用では、安定な閉ループシステムで安定なサーボ動作を保つ必要がある。ロボットのカメラがハンドに固定されている場合、対象物が速く動くと、マニピュレータ全体の運動特性に依存して対象物のスピードに追いつくことができない。このとき対象物はカメラの視界から消失し、制御系は暴走という危険な状態に陥る。よって、ビジュアルサーボシステムにおいては、カメラが動く対象物をカメラ視野内にとらえつづける能力である可追跡性を高めることが非常に重要である。

従来の研究 [4] では、画像の中心で対象物を捉えるためにカメラ自身の姿勢を変化させる自由度を与える「Eye-vergence システム」を提案し、対象物の位置/姿勢が既知の場合、位置/姿勢を時変にして、ハンドと対象物の関係から Eye-vergence システムの効果を確認した。しかし、Eye-vergence 運動学と動力学のメリットを実験で確認してない。

本論文では、提案した Eye-vergence システムの優位性を確認するために、正弦波周波数応答実験を行った。また、ビジュアルサーボ中の実時間における GA の挙動を調べることで、Eye-vergence 使用時の GA の追従可能性について調べ、GA が高い追従性能を持つことを確認した。

2. ハンドアイビジュアルサーボ

2.1 1-step GA に基づく実時間認識法

対象物の位置/姿勢をリアルタイムで認識するために、本研究では遺伝的アルゴリズム (GA) の一つの方法、“1-step GA 法” [5] を利用する。GA は収束を一定時間待つ必要があり、適合度関数が十分に高い値を示す時に対象物の認識を完了すると、その時点では周囲の状況が大きく変化している可能性がある。1-step GA ではカメラから新しい画像を入力する際、ビデオレート (33[ms]) で次の画像が入力されるまでの間だけ GA の進化を進め、その時点で最も高い適合度を与える個体をその時刻における位置/姿勢として出力する。この方法は対象物をリアルタイムで認識することができ、新しい入力画像に対する最適なモデルを出力でき、リアルタイムの認識結果として利用する。

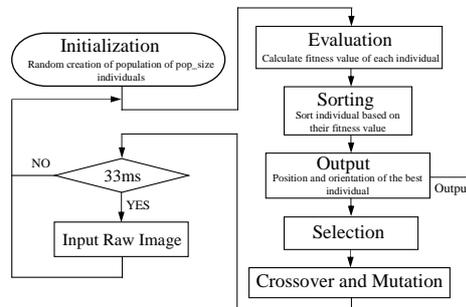


図 1 1-step GA フローチャート

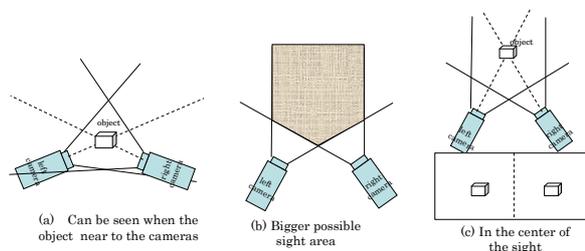


図 2 Eye-vergence システムのメリット

しかし、モデルの探索範囲は 3D 空間内で、6 個のパラメータがあるので、探索する時間が増して、認識効果が悪くなる。提案した MFF 認識法 [6] はマニピュレータの手先の移動から対象物の移動を予測できる。この方法を利用して、カメラは高速で移動する対象物を追従することができる。

2.2 Eye-vergence システム

Eye-vergence システムとは画像の中心で対象物を捉えるためにカメラ自身の姿勢を変化させる自由度を与えるシステムのことである。

カメラの姿勢を変えることが可能になるので、図 2 の (a)-(c) に示すように、対象物をよりよく観測することができる。(a), (b) は両眼可視領域が拡大すること、(c) はレンズの中心で対象物を観測することによってレンズ収差により発生する入力画像のひずみによる影響を避けられることを示している。最近の研究では、対象物を認識して一定の距離で追従する研究が多い [7], [8]。しかし、ビジュアルサーボの目的は手先を対象物に近づいて掴むなどの動作をすることである。この時、手先と対象物の間の関係は時変である。図 2 に示すような Eye-vergence システムでは、カメラがいつでも最適な角度で対象物を注視し続けることができる。

2.3 ビジュアルサーボコントローラ

2.3.1 ハンドビジュアルサーボコントローラ

提案したハンドアイビジュアルサーボのコントローラはハンドとアイ二つのコントローラを組み合わせている。ロボット手先の運動軌道を用いて、手先の目標速度 ${}^W\dot{\mathbf{r}}_d$ は、

$${}^W\dot{\mathbf{r}}_d = \mathbf{K}_{P_p} {}^W\mathbf{r}_{E,Ed} + \mathbf{K}_{V_p} {}^W\dot{\mathbf{r}}_{E,Ed}, \quad (1)$$

とPD制御を行う。ここでは、 ${}^W\mathbf{r}_{E,Ed}$, ${}^W\dot{\mathbf{r}}_{E,Ed}$ は Σ_E から Σ_W への座標変換を使って ${}^E\mathbf{T}_{Ed}$ と ${}^E\dot{\mathbf{T}}_{Ed}$ から求められる。 \mathbf{K}_{P_p} はバネ定数、 \mathbf{K}_{V_p} は粘性抵抗を表す行列である。ハンドの目標位置/姿勢は ${}^W\boldsymbol{\psi}_d^T = [{}^W\mathbf{r}_d^T, {}^W\boldsymbol{\epsilon}_d^T]^T$ とする。

ハンドの手先の目標角速度ベクトル ${}^W\boldsymbol{\omega}_d$ は、

$${}^W\boldsymbol{\omega}_d = \mathbf{K}_{P_o} {}^W\mathbf{R}_E {}^E\Delta\boldsymbol{\epsilon} + \mathbf{K}_{V_o} {}^W\boldsymbol{\omega}_{E,Ed}, \quad (2)$$

と与えられる。ここで、 ${}^E\Delta\boldsymbol{\epsilon}$ はクォータニオンの偏差 [5] であり、 Σ_E で表された対象物の姿勢誤差であり、“1-step GA”による認識結果から直接得られる。 ${}^W\boldsymbol{\omega}_{E,Ed}$ は Σ_E から Σ_W への座標変換を使って ${}^E\mathbf{T}_{Ed}$ から求められる。 \mathbf{K}_{P_o} はバネ定数、 \mathbf{K}_{V_o} は粘性抵抗を表す行列である。ハンドの目標位置/姿勢は ${}^W\boldsymbol{\psi}_d^T = [{}^W\mathbf{r}_d^T, {}^W\boldsymbol{\epsilon}_d^T]^T$ とする。

本研究で使用しているアームロボット PA-10(三菱重工製)は一つの冗長自由度を持っている。システムの不安定さを改善するため、第1リンクの角度 q_1 を0とすることで、手先の目標位置から各リンクの目標角度を逆運動学により計算できる。この方法を利用し、冗長性の問題を解決する。ロボットの目標関節角度 \mathbf{q}_d と角速度 $\dot{\mathbf{q}}_d$ は

$$\mathbf{q}_d = \mathbf{f}^{-1}({}^W\boldsymbol{\psi}_d^T) \quad (3)$$

$$\dot{\mathbf{q}}_d = \mathbf{K}_{p_a}(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) + \mathbf{J}^+(\mathbf{q}) \begin{bmatrix} {}^W\dot{\mathbf{r}}_d \\ {}^W\boldsymbol{\omega}_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

と求められる。ここで、 $\mathbf{f}^{-1}({}^W\boldsymbol{\psi}_d^T)$ は逆運動学を表し、 \mathbf{K}_{p_a} はバネ定数として与えられる。 $\mathbf{J}^+(\mathbf{q})$ は $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ の擬似逆行列であり、 $\mathbf{J}^+(\mathbf{q}) = \mathbf{J}^T(\mathbf{J}\mathbf{J}^T)^{-1}$ によって得られる。

また、ロボットへの入力トルクは次式によって与えられる。

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{K}_{SP}(\mathbf{q}_d - \mathbf{q}) + \mathbf{K}_{SD}(\dot{\mathbf{q}}_d - \dot{\mathbf{q}}) \quad (5)$$

上式の \mathbf{K}_{SP} はバネ定数、 \mathbf{K}_{SD} は粘性抵抗を表す行列である。

2.3.2 Eye-vergence ビジュアルサーボコントローラ

本論文ではEye-vergence ビジュアルサーボに対して二つのパンチルトカメラを使う。カメラは手先に取り付けて、回転させることができる。 q_8 は左右カメラ共通のチルト角を表し、 q_9 と q_{10} はパン角を表す。さらに q_8 は両方のカメラで共通である。

図3に示すように、 ${}^E x_{\hat{M}}$, ${}^E y_{\hat{M}}$ および ${}^E z_{\hat{M}}$ はハンド座標において検出された物体の位置を表す。また、カ

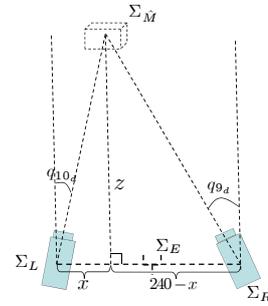


図3 パンチルトカメラシステム

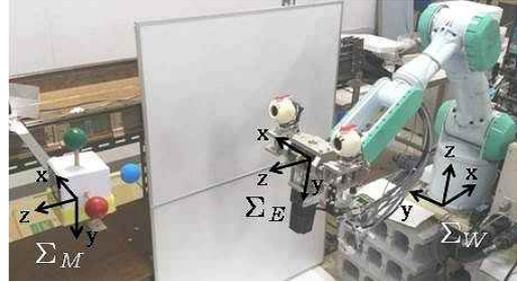


図4 対象物とビジュアルサーボシステム

メラジョイントの望ましい角度は以下によって計算される。

$$q_{8d} = \text{atan2}({}^E y_{\hat{M}}, {}^E z_{\hat{M}}) \quad (6)$$

$$q_{9d} = \text{atan2}(l_{8R} - {}^E x_{\hat{M}}, {}^E z_{\hat{M}}) \quad (7)$$

$$q_{10d} = \text{atan2}(l_{8L} + {}^E x_{\hat{M}}, {}^E z_{\hat{M}}) \quad (8)$$

ここで、 $l_{8L} = l_{8R} = 120[\text{mm}]$ はカメラの位置を表し、カメラの中心線を各カメラ座標の z 軸とする。

Eye-vergence ビジュアルサーボコントローラは

$$\dot{q}_8 = K_P(q_{8d} - q_8) \quad (9)$$

$$\dot{q}_9 = K_P(q_{9d} - q_9) \quad (10)$$

$$\dot{q}_{10} = K_P(q_{10d} - q_{10}) \quad (11)$$

と与えられる。ここで、 K_P はバネ定数を表す。

3. ハンドアイビジュアルサーボ実験

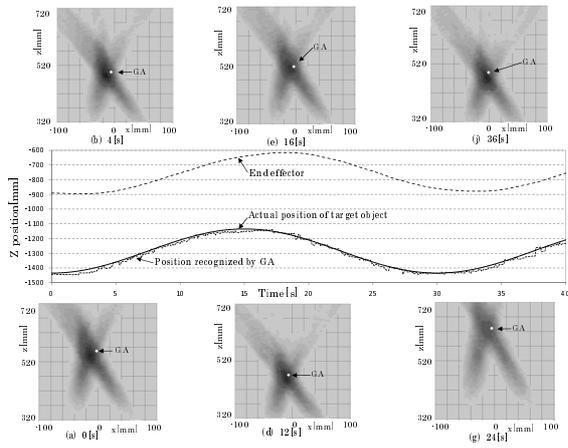
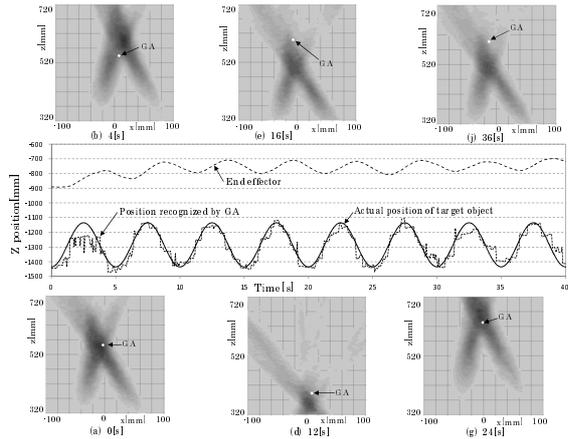
3.1 実験環境

提案したビジュアルサーボシステムの有効性を実機によって確認するために、アームロボット PA-10(三菱重工製)を利用する。PA-10の手先にはSONY製のステレオカメラ(ビデオレート 30[fps])を二台取り付け、復眼で対象物を観測する。

対象物は赤、緑、青のボールを組み合わせた3Dマーカであり、ボールの直径は40[mm]、ボールの中心とマーカの中心点の距離は100[mm]である。実験の対象物とマニピュレータの座標を図4に示す。

3.2 実験条件

ハンドの初期姿勢を Σ_{E_0} とする。一方、物体の初期位置は Σ_{M_0} として定義する。 Σ_W から Σ_{E_0} への同次変換行列、 Σ_W から Σ_{M_0} への同次変換行列は以下のよ

図5 位置3変数を探索 $\omega = 0.209$ 図6 位置3変数を探索 $\omega = 1.256$

うに与えられる。

$${}^wT_{E_0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -890[mm] \\ 1 & 0 & 0 & 0[mm] \\ 0 & -1 & 0 & 500[mm] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^wT_{M_0} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & -1435[mm] \\ 1 & 0 & 0 & 0[mm] \\ 0 & -1 & 0 & 500[mm] \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

対象物の移動は次式に示す。

$${}^{M_0}z_M(t) = 150 - 150 \cos(\omega t)[mm] \quad (14)$$

対象物と手先の関係は

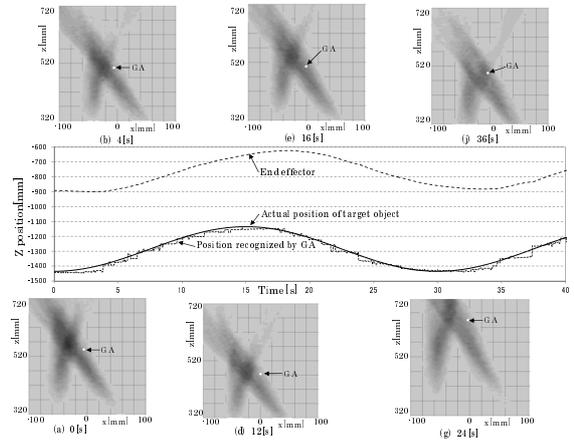
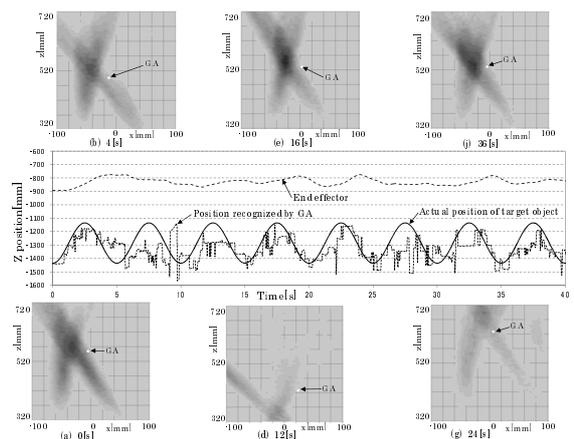
$${}^{Ed}\psi_M = [0, -90[mm], 545[mm], 0, 0, 0] \quad (15)$$

と与えられる。

以上の条件で式(14)の ω を $\omega = 0.209 \sim 1.256$ と変化させ、それぞれに対して、位置3変数を探索する場合、位置/姿勢6変数全てを探索する場合に分け、ハンドアイビジュアルサーボの周波数応答実験を行った。

3.3 Gazing point の定義

カメラの観測能力を調べるため、カメラの注視点を規定する。図3に示す左右カメラの視線方向が交わる

図7 位置/姿勢6変数を探索 $\omega = 0.209$ 図8 位置/姿勢6変数を探索 $\omega = 1.256$

点をカメラの注視点とし、これを Gazing point と呼ぶ。1-step GA による対象物の認識結果をもとに Gazing point を算出しているため、認識誤差が Gazing point に含まれる。

図3のように左右カメラのパン角回りの回転を q_{9_d}, q_{10_d} とおく。ただし $0 < q_{9_d} < \frac{\pi}{2}$, $0 < q_{10_d} < \frac{\pi}{2}$ とする。

$$\frac{z}{x} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - q_{10_d}\right) \quad (16)$$

$$\frac{z}{240 - x} = \tan\left(\frac{\pi}{2} - q_{9_d}\right) \quad (17)$$

となる。この2式を連立して、 x, z を求める。これらの結果より左カメラ座標系から見た Gazing point ${}^L P$ は、

$${}^L P = \begin{bmatrix} \frac{240 \tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_d})}{\tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_d}) + \tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_d})} \\ 0 \\ \frac{240 \tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_d}) \tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_d})}{\tan(\frac{\pi}{2} - q_{10_d}) + \tan(\frac{\pi}{2} - q_{9_d})} \end{bmatrix} \quad (18)$$

となり、これに世界座標系から左カメラまでの同次変換行列をかけることにより世界座標系からみた Gazing point が求まる。

3.4 実験結果

図5, 6は姿勢3変数 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ が既知で、位置3変数 x, y, z を探索する場合、図7, 8は位置/姿勢6

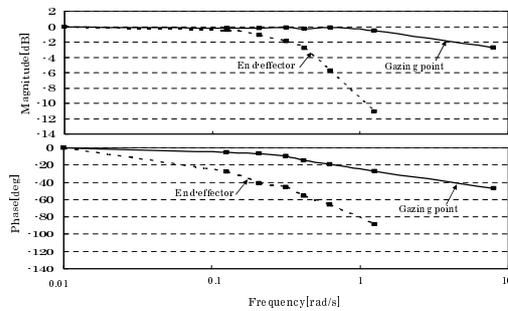


図9 位置3変数が未知、姿勢3変数が既知の場合の手先と Gazing point のボード線図

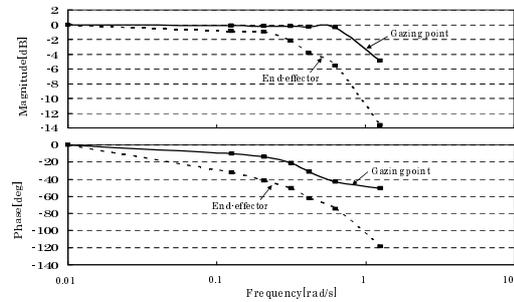


図10 位置/姿勢6変数が未知の場合の手先と Gazing point のボード線図

変数 $x, y, z, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ すべてを探索する場合において、手先と対象物の真値、GAによる認識結果を示し、0[s],4[s],12[s],16[s],24[s],36[s]における適合度の全探索を示したものである。全探索はハンド座標系 Σ_E から見て $-100 \leq x \leq 100, 320 \leq z \leq 720$ の範囲について行った。適合度が高くなればなるほど全探索グラフ中の色は濃くなり、対象物の真値へ近づく。式(15)に示される対象物とハンド手先の関係を保っている場合、全探索における適合度の最大値は $x=0, z=545$ に現れる。適合度の全探索にGAの挙動を白丸でプロットすることにより実時間におけるGAの挙動を示した。

図9, 10は本実験における手先と Gazing point のボード線図で、(a)が振幅周波数曲線、(b)が位相周波数曲線を示しており、横軸は周波数、縦軸はゲイン・位相である。

図5-図8のグラフより、GAの認識結果は手先に比べて、振幅の差、位相の遅れが共に小さいことがわかる。また、適合度の全探索における対象物の位置とGAの挙動をみても、手先は認識する自由度が増し対象物の速度が速くなるにつれ、目標関係を維持できなくなっていく、適合度のピークも $x=0, z=545$ に現れない。その点GAは手先に比べ適合度の最大値を探索追従出来ていることがわかる。図5, 6の全探索のグラフより、位置 (x, y, z) のみ探索する場合は1-step GAでトラッキングが十分であるといえる。しかし、図7, 8の全探索のグラフより、位置/姿勢 $(x, y, z, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ 6変数を探索する場合は1-step GAではトラッキングが不十分であった。

図9, 10より、 $\omega=0.1\text{rad/s}$ までは、手先と Gazing pointの可追跡性はほぼ等しいが、 ω が増加するにしたがって、手先の共振の振幅と位相は、Gazing pointよりも大きくなるのがわかる。 ω が 0.5rad/s より増加して行く場合、手先の振幅は減少していく。一方、Gazing pointにおいては、 ω が 1.256rad/s までの範囲ではカメラの視界に対象物を常にとらえ続けることができている。よって、Eye-vergenceシステムは高い安定性と可追従性を有することがわかる。

4. 結言

奥行き方向に移動する対象物に対するビジュアルサーボが実機実験をして、Eye-vergenceシステムと固定システムのカメラ注視点の結果を取り、振幅周波数曲線と位相周波数曲線を求めるとともに、適合度の全探索に

より実時間におけるGAの挙動を示した。実機実験の結果から周波数特性を比較し、Eye-vergenceシステムの可追跡性が優れており、Eye-vergence使用時においてGAが高い追従性能を持つという結論を得た。

参考文献

- [1] Wolfgang Sepp, Stefan Fuchs and Gerd Hirzinger, "Hierarchical Featureless Tracking for Position-Based 6-DoF Visual Servoing", Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robotics and Systems (IROS), pp.4310-4315, 2006.
- [2] Toshifumi Hiramatsu, Takanori Fukao, Keita Kurashiki, Koichi Osuka "Image-based Path Following Control of Mobile Robots with Central Catadioptric Cameras" IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe, Japan, May 12-17, 2009
- [3] Amei massoud Farahmand, Azad Shademan, Martin Jägersand, Csaba szepesvári "Model-based and Model-free Reinforcement Learning for Visual Servoing" IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe, Japan, May 12-17, 2009
- [4] Wei. Song, M. Minami, Fujia Yu, Yanan Zhang and Akira Yanou "3-D Hand & Eye-Vergence Approaching Visual Servoing with Lyapunov-Stable Pose Tracking", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.11, 2011.
- [5] W. Song, M. Minami, S. Aoyagi, "On-line Stable Evolutionary Recognition Based on Unit Quaternion Representation by Motion-Feedforward Compensation", International Journal of Intelligent Computing in Medical Sciences and Image Processing (IC-MED) Vol. 2, No. 2, Page 127-139 (2007).
- [6] W. Song, M. Minami, Y. Mae and S. Aoyagi, "Online Evolutionary Head Pose Measurement by Feedforward Stereo Model Matching", IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp.4394-4400, 2007.
- [7] Omar Tahri and Francois Chaumette, "Point-Based and Region-Based Image Moments for Visual Servoing of Planar Objects", IEEE Tran. on Robotics, vol. 21, no. 6, Dec 2005.
- [8] Tarek Hamel and Robert Mahony, "Visual Servoing of an Under-Actuated Dynamic Rigid-Body System: An Image-Based Approach", IEEE Trans. on Robotics and Automation, VOL. 18, NO. 2, APRIL 2002.