

冗長自由度制御によるビジュアルサーボシステム

倉爪 亮 (九州大学)

Visual Servoing utilizing Redundant Control

*Ryo Kurazume (Kyushu University)

Abstract— In this paper, we propose the new technique for the visual servoing based the redundancy operation. The key idea is the use of a "virtual link" which connects between the cameras and the target. This virtual link can be treated as the other mechanical links, and thus, the null-space operation developed for the redundant manipulators can be applied in the same manner.

Key Words: Visual servoing, redundant manipulator, virtual link

1. Virtual Link

図1に示すように、移動機構を有するマニピュレータの先端にカメラを取り付けたシステムを考える。ここでハンド(カメラ)の位置 $\mathbf{X}_h = (x_h, y_h)^T$ は次式で与えられるとする。

$$\begin{pmatrix} x_h \\ y_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_b + l_1 \cos \phi_1 + l_2 \cos(\phi_1 + \phi_2) \\ y_b + l_1 \sin \phi_1 + l_2 \sin(\phi_1 + \phi_2) \end{pmatrix} \quad (1)$$

またカメラからターゲットまでの距離 r と方向 θ が

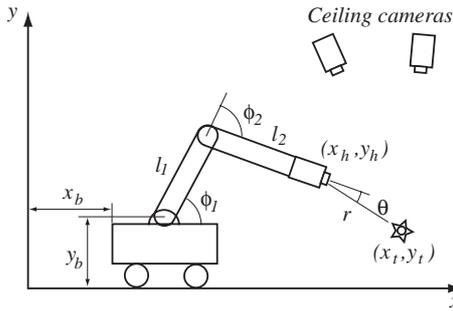


Fig.1 Model of visual servoing

測定された場合、ターゲットの位置は以下の式で得られる。

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_h + r \cos(\phi_1 + \phi_2 + \theta) \\ y_h + r \sin(\phi_1 + \phi_2 + \theta) \end{pmatrix} \quad (2)$$

従って式(2)に式(1)を代入することで、

$$\dot{\mathbf{X}}_t = \mathbf{J}_t(x_b, \phi_1, \phi_2, r, \theta) \dot{\Phi} \quad (3)$$

となる。ただし、 $\dot{\Phi} = (\dot{x}_b, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2, \dot{r}, \dot{\theta})^T$ 、 $\mathbf{J}_t \in \mathbf{R}^{2 \times 5}$ であり、 $\dot{y}_b = 0$ とした。この方程式は移動マニピュレータの制御変数 $\dot{\Phi} = (\dot{x}_b, \dot{\phi}_1, \dot{\phi}_2)^T$ 、ターゲット像の画像平面上での特徴量 $(\dot{r}, \dot{\theta})$ と、ターゲットの速度の関係を示している。従って、天井カメラや手先のカメラから $\dot{\mathbf{X}}_t$ が測定できる場合、次式が導かれる。

$$\dot{\Phi}_d = \mathbf{J}_t^\dagger \dot{\mathbf{X}}_t + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_t^\dagger \mathbf{J}_t) \xi \quad (4)$$

ここで、

$$\mathbf{J}_t^\dagger = \mathbf{W} \mathbf{J}_t^T (\mathbf{J}_t \mathbf{W} \mathbf{J}_t^T)^{-1} \quad (5)$$

で与えられる擬似逆行列である。

このシステムの特徴は、画像からの特徴を、関節角度など他の制御変数と同様に取り扱うことにある。従って、冗長マニピュレータ制御で提案されている様々な制御法をそのまま適用することができる。

冗長性は、以下のような目的で使用できる。

Task 1 ターゲット追跡。ポテンシャルフィールドを r と θ が減少するように設定する。

Task 2 ターゲットとの相対位置、姿勢を維持する。

Task 3 障害物を避けてターゲットを見続ける。

特に Task 3 はハンドとターゲットの間に仮想的なリンクを設定し、その障害物回避問題として取り扱うことができ、このようなリンクを "virtual link" と呼ぶことにする。この "virtual link" の考えを用いれば、視覚サーボシステムのエネルギー最小問題なども、従来の冗長マニピュレータ制御と同様に取り扱うことができる。例えばこの例では、アクチュエータの数は3であり、制御変数は5である。この制御変数のうち、2つは幾何学的整合性を保つために定められるため、制御可能な独立変数は3である。一方、例えば2自由度がターゲット追跡の実現に使われる場合には、残りの1自由度が障害物回避など、他の目的で使用できる。

2. ターゲット追跡と障害物回避の定式化

一例として、Task 1,3 を同時に実現するシステムを定式化する。

Task 3 は以下のように実現できる。

$$\delta \Phi = \mathbf{G} \mathbf{J}_H^T \mathbf{F}_H \quad (6)$$

ここで、

$$\mathbf{J}_H = \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial \Phi} \quad (7)$$

であり、 \mathbf{H} はマニピュレータのリンク上で最も障害物に近い点である。ただし、このリンクにはターゲットとハンドの間の "virtual link" も含まれる。 \mathbf{F}_H は \mathbf{H}

に加えらるる障害物からの擬似的な斥力である。また G はゲインであり、 F_H は

$$F_H = F_{max} e^{-\frac{L^2}{2\sigma^2}} \mathbf{v} \quad (8)$$

や

$$F_H = F_{max} \frac{1}{1+L} \mathbf{v} \quad (9)$$

など様々に設定できる。ここで P は障害物の位置、 $L = |\mathbf{H} - \mathbf{P}|$ 、 $\mathbf{v} = \frac{\mathbf{H} - \mathbf{P}}{|\mathbf{H} - \mathbf{P}|}$ である。

従って式 (6) を式 (4) に代入して、

$$\mathbf{G}\mathbf{J}_H^T \mathbf{F}_H = \mathbf{J}_t^\dagger \dot{\mathbf{X}}_t + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_t^\dagger \mathbf{J}_t) \xi_1 \quad (10)$$

となる。ここで ξ_1 は

$$\xi_1 = (\mathbf{I} - \mathbf{J}_t^\dagger \mathbf{J}_t)^\dagger (\mathbf{G}\mathbf{J}_H^T \mathbf{F}_H - \mathbf{J}_t^\dagger \dot{\mathbf{X}}_t) \quad (11)$$

と導かれるので、結局、制御システムは式 (4) から、

$$\dot{\Phi}_{1d} = \mathbf{J}_t^\dagger \dot{\mathbf{X}}_t + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_t^\dagger \mathbf{J}_t) (\mathbf{I} - \mathbf{J}_t^\dagger \mathbf{J}_t)^\dagger (\mathbf{G}\mathbf{J}_H^T \mathbf{F}_H - \mathbf{J}_t^\dagger \dot{\mathbf{X}}_t) \quad (12)$$

となる。

次に Task 1 である、ターゲット追跡を定式化する。式 (11) に代わりに次式を用いる。

$$\begin{aligned} \xi_1 &= (\mathbf{I} - \mathbf{J}_t^\dagger \mathbf{J}_t)^\dagger (\mathbf{G}\mathbf{J}_H^T \mathbf{F}_H - \mathbf{J}_t^\dagger \dot{\mathbf{X}}_t) \\ &\quad + \{\mathbf{I} - (\mathbf{I} - \mathbf{J}_t^\dagger \mathbf{J}_t)^\dagger (\mathbf{I} - \mathbf{J}_t^\dagger \mathbf{J}_t)\} \xi_2 \\ &= \mathbf{J}_1^\dagger (\mathbf{G}\mathbf{J}_H^T \mathbf{F}_H - \mathbf{J}_t^\dagger \dot{\mathbf{X}}_t) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_1^\dagger \mathbf{J}_1) \xi_2 \end{aligned} \quad (13)$$

ここで $\mathbf{J}_1 = \mathbf{I} - \mathbf{J}_t^\dagger \mathbf{J}_t$ であり、これより式 (12) は以下のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{\Phi}_d &= \mathbf{J}_t^\dagger \dot{\mathbf{X}}_t + \mathbf{J}_1 \{\mathbf{J}_1^\dagger (\mathbf{G}\mathbf{J}_H^T \mathbf{F}_H - \mathbf{J}_t^\dagger \dot{\mathbf{X}}_t) + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_1^\dagger \mathbf{J}_1) \xi_2\} \\ &= \dot{\Phi}_{1d} + \mathbf{J}_1 (\mathbf{I} - \mathbf{J}_1^\dagger \mathbf{J}_1) \xi_2 \end{aligned} \quad (14)$$

ここで選択行列 \mathbf{S} を導入する。これにより、ターゲット追跡の問題は次式の最小化問題と等価となる。

$$\min_{\xi_2} \Phi^T \mathbf{S} \Phi \quad (15)$$

ただし、 $\Phi = (x_b, \phi_1, \phi_2, r, \theta)^T$ 、 $\mathbf{S} = \text{diag}(0, 0, 0, 1, 1)$ である。従って Φ に $\Phi + \delta\Phi$ を代入すると、

$$\min_{\xi_2} (\Phi + \delta\Phi)^T \mathbf{S} (\Phi + \delta\Phi) \quad (16)$$

となり、 $\delta\Phi$ で微分すると、

$$2\mathbf{S}(\Phi + \delta\Phi) = 0 \quad (17)$$

となる。これに式 (14) を代入すると以下のようになる。

$$2\mathbf{S}\{\Phi + \dot{\Phi}_{1d} + \mathbf{J}_1 (\mathbf{I} - \mathbf{J}_1^\dagger \mathbf{J}_1) \xi_2\} = 0 \quad (18)$$

従って、

$$\xi_2 = -\{\mathbf{S}\mathbf{J}_1 (\mathbf{I} - \mathbf{J}_1^\dagger \mathbf{J}_1)\}^\dagger \mathbf{S}(\Phi + \dot{\Phi}_{1d}) \quad (19)$$

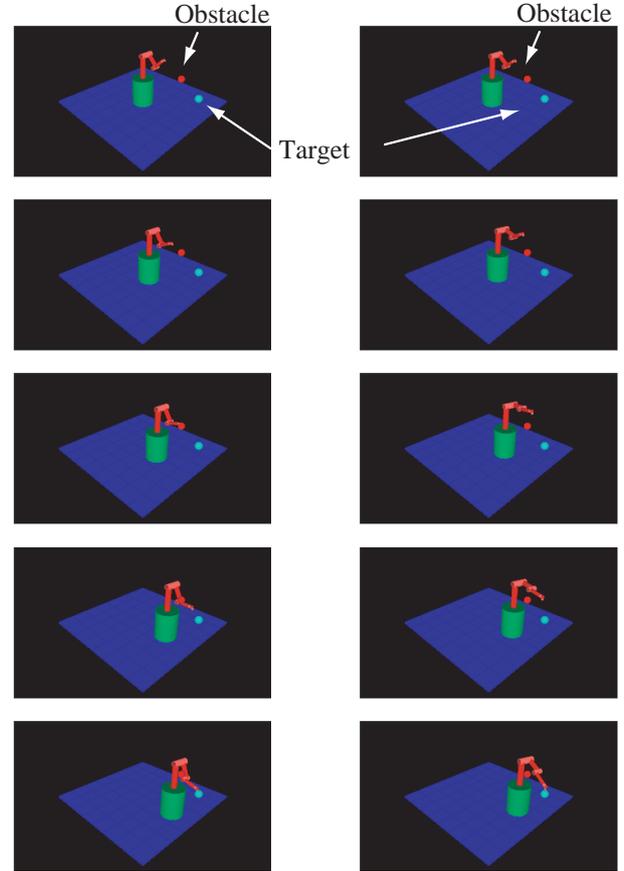
であり、結局、式 (11) から導かれる制御システムは、

$$\dot{\Phi}_d = \dot{\Phi}_{1d} - \mathbf{J}_1 (\mathbf{I} - \mathbf{J}_1^\dagger \mathbf{J}_1) \{\mathbf{S}\mathbf{J}_1 (\mathbf{I} - \mathbf{J}_1^\dagger \mathbf{J}_1)\}^\dagger \mathbf{S}(\Phi + \dot{\Phi}_{1d}) \quad (20)$$

となる。

3. コンピュータシミュレーション

図 2 は移動機構を備えた全 9 自由度の移動マニピュレータ (図 3) を用いたシミュレーション結果である。シミュレーションでは、カメラからターゲットまでの 2 つの方向と距離が測定可能であると仮定している。従って制御変数は 12 個である。左列はターゲット追跡の結果を示し、右列はターゲット追跡と障害物回避を同時に実現した結果である。



(1) Target tracking only

(2) Target tracking keeping visibility

Fig.2 Target tracking with and without keeping visibility

4. 実験

提案した手法の有効性を確認するため、9 自由度移動マニピュレータを用いて実験を行った。図 3 はスタンフォード大学ロボティクス研究所の移動ロボットマニピュレータ "Samm" である。このロボットは全方向移動ロボット (Nomad XR4000) 上に 6 自由度マニピュレータ (Puma 500) を搭載している。マニピュレータのハンドには 2 つの CCD カメラが取り付けられ、専用のハードウェアにより、テンプレートマッチング法を用いてターゲットの発見と追跡、ステレオ視によるターゲットの位置、方向の測定を行うことができる。

図 4 は実験結果の例である。"Samm" はターゲット (赤いバケツ) までの視線が遮られそうになると、ターゲットを見続けるためにカメラの位置を自動的に変化させている。

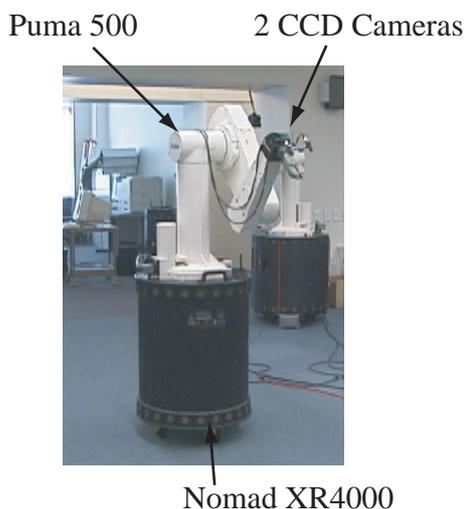


Fig.3 The mobile manipulator “Samm”

- 2) . Hollerbach, K. Suh: Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization, IEEE J. of Robotics and Automation, vol.RA-3, No.4, pp.309-316, 1897.



Fig.4 An example of experiments using the mobile manipulator “Samm”

5. まとめ

本稿では、冗長自由度制御法を応用した視覚サーボ手法を提案した。この手法では、カメラとターゲットの間に仮想的なリンク“virtual link”を設定し、このリンクを他の実在するリンクと同様に取り扱うことで、従来の冗長マニピュレータの制御手法を視覚サーボ系にそのまま適用することができる。例えば障害物を避けてターゲットを見続ける動作なども、冗長マニピュレータにおける障害物回避の手法を“virtual link”に適用することで容易に実現できる。

Acknowledgments

This study was performed at Stanford Robotics Laboratory, Stanford University, under guidance of Professor O. Khatib.

参考文献

- 1) Inchev, D. N., Redundancy resolution through local optimization: A review., J. of Robotic Systems, Vol.6, No.6, pp.769, 1989