テンプレートに対する画像の平行移動・回転・拡大縮小変位を特徴量に用いる位相限定相関法に基づくビジュアルサーボの提案

○李 尭希 (東京大学大学院) 藤本 博志 (東京大学)

1. 研究背景

視覚情報を用いてロボットを制御するビジュアルサーボにおける重大な感心事として画像から何を制御量として取り出すかという問題がある。従来は，画像の中から目印となる特徴点を抽出し，それらの座標を用いて直接制御する手法が [1][2][3] などに紹介されている。また，テンプレート画像に対して現在の画像の相互情報量などの評価関数を最大化するように制御する手法も [4] などに示されている。特に特徴点を用いる手法は広く使われているが，特徴点の座標を直接用いる場合はカメラの動きと特徴点の座標を関連付けるイメージヤコビアンが時変となる。通常はこれを推定または定値で近似するが，固定値に近似する場合は目標値に十分近い領域でないと安定に収束できない。[2] また，主に回転が干渉することによりカメラが意図せぬ後退運動を行ってしまう問題も知られており，回転量と並進量とを別々に制御するようなイメージヤコビアンを用いる解決策が示されたが [5]，依然としてイメージヤコビアンは時変で推定を必要とする。
本稿では参照画像との拡大縮小と平行移動も含めた画像全体の変形パラメータを特徴量とすることで，直交 3 自由度と回転を合わせた 4 自由度の場合においてイメージヤコビアンを時不変にでき，かつ並進・回転・距離方向を非干渉化できることを示す。また，これらの画像変形パラメータを位相限定相関法を用いて高精度に取得し制御することについても提案し，他自由度ロボットアームを用いた簡易的な実験において変形パラメータを用いることの有効性とその精度を検証する。

2. イメージベースビジュアルサーボ（IBVS）[1] [3]

図 1 に示すように画像内の 2 次元の指令値を用いて 3 次元のロボットをコントロールする手法を広くイメージベースビジュアルサーボ（IVBS）と呼ぶ。例えば，2 次元画像上から抽出された個々の特徴点の座標の値を指令値としてロボットの 3 次元姿勢を制御するといったようになる。この時，2 次元画像上での特徴点の速度指令から 3 次元の速度指令を生成するが，その際変換行列となるイメージヤコビアンを必要とする。例えば，画像の特徴点の座標 $\boldsymbol{\xi}_i = [x_i, y_i]^T$ $(i = 1, 2, 3..., n)$ から 6 自由度のカメラの速度 $\boldsymbol{v} = [v_x\ v_y\ v_z\ \omega_x\ \omega_y\ \omega_z]^T$ までの変換行列 $\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{x}_i}$ は以下のようになる。

$$\dot{\boldsymbol{\xi}}_i = \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{x}_i}\boldsymbol{v}$$
$$\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{x}_i} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{Z_i} & 0 & \frac{x_i}{Z_i} & x_i y_i & -(1+x_i{}^2) & y_i \\ 0 & \frac{-1}{Z_i} & \frac{y_i}{Z_i} & 1+y_i{}^2 & -x_i y_i & -x_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

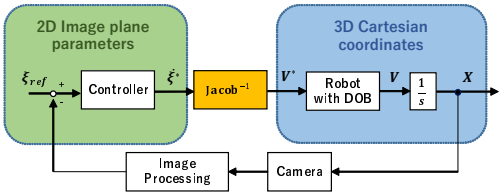


図 1　ビジュアルサーボ系のブロック線図

ここで Z_i は各々の画像上の点までの距離である。イメージヤコビアンはこれらを特徴点の数だけ統合した $\boldsymbol{L} = [\boldsymbol{L}_{\boldsymbol{x}_1}, \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{x}_2}, ..., \boldsymbol{L}_{\boldsymbol{x}_n}]^T$ で表され，これの擬似逆行列を用いて画像内速度指令からカメラの速度指令を生成する。式 (1) には時々刻々と変わる対象との距離 Z_i の情報を用いており，x_i や y_i なども時変でかつ誤差が乗るパラメータである。また，ヤコビアンをこのまま使用すると主に回転と並進の干渉により後のシミュレーションで示すようなカメラが後退する問題が生じてしまう。

3. 画像の変形パラメータを用いたビジュアルサーボ

本稿では従来の特徴点座標の代わりにテンプレートとして与えられる参照画像に対する現在の画像の変形パラメータを用いることを提案する。画像の変形パラメータのうち平行移動・回転・拡大縮小量の 4 つを用いることで，IBVS におけるイメージヤコビアンを時不変かつ各パラメータ間を非干渉に動かすことが出来る。ここではカメラは直交 3 自由度とヨー方向の回転の 4 自由度を持った 4 自由度マニピュレータに搭載されたと考え，2 次元のパラメータとの関係を表すイメージヤコビアンを導出する。

3.1 使用する画像変形パラメータ

何らかの画像処理を用いて現在の画像 $\boldsymbol{I}$ とテンプレートの画像 $\boldsymbol{I}^*$ との間の平行移動量 (ξ_x, ξ_y)，回転 θ，拡大縮小量 κ をもとにカメラの運動を制御する。この際，これらを用いた画像の変形を平行移動成分 $\boldsymbol{t}$，回転操作 $\boldsymbol{R}$，スケール変化操作 $\boldsymbol{s}$ とすると $\boldsymbol{I}, \boldsymbol{I}^*$ の間において次のような関係を仮定する。

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{s}\boldsymbol{R}(\boldsymbol{I}^* + \boldsymbol{t}) \quad (2)$$

平行移動成分の位置が回転・拡大縮小量を補正した際に独立に検出できるようになっていることに注意する。

3.2 イメージヤコビアンの導出

カメラが (X, Y, Z, Θ) の 4 自由度を持つロボットマニピュレータに搭載されるして，ロボットの動きと画像の変形パラメータ $(\xi_x, \xi_y, \kappa, \theta)$ の対応を求める。参照する画像におけるロボットの位置，すなわち目標位

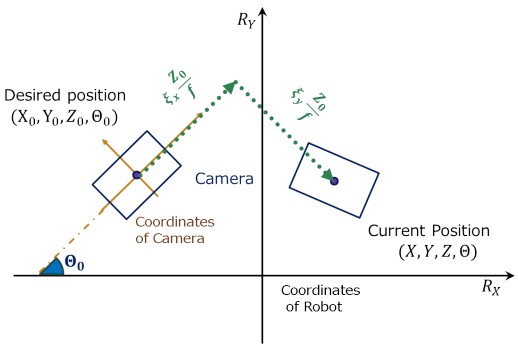


図 2 距離方向から見た 3 次元のカメラのフレーム位置と 2 次元の平行移動量の関係

置を $(X_0, Y_0, Z_0, \Theta_0)$ とおき，現在のロボットの位置 を (X, Y, Z, Θ) とする。ここで Z と Z_0 は対象との距離である。

ここで，テンプレート画像との回転・拡大縮小変位は平行移動量とは独立であるのでそれぞれがロボットの回転と距離の座標に対応し，次のように示される。

$$\theta = \Theta_0 - \Theta \tag{3}$$

$$\kappa = \frac{Z_0}{Z} \tag{4}$$

次に，平行移動量とロボットの並進量の対応を図 2 に示す。式 (2) の形より，参照画像から現在までの回転と距離の変位を補正した後の平行移動量は現在の回転角と距離の値とは独立に決定される。参照画像からの平行移動量はロボットの目標位置を基準にした並進であるため，目標角度 Θ_0 の影響を受けて次のようになる。

$$\begin{pmatrix} \xi_x \\ \xi_y \end{pmatrix} = \frac{Z_0}{f} \boldsymbol{R}(-\Theta_0) \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \end{pmatrix} \tag{5}$$

ここで，$\boldsymbol{R}(\phi)$ は 角度 ϕ の回転を表す 2×2 の回転行列で， f はレンズの焦点距離である。

イメージヤコビアンはこれら式 (3), 式 (4) と 式 (5) を時間微分した関係式から導かれる。ここで拡大縮小量 κ の代わりに，$1/\kappa$ を特徴量として用いることで，次のような式を得る。

$$\begin{bmatrix} \dot{\xi}_x \\ \dot{\xi}_y \\ (\frac{1}{\kappa}) \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \boldsymbol{J}_{const} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{Y} \\ \dot{Z} \\ \dot{\Theta} \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{J}_{const} = \begin{bmatrix} \frac{f}{Z_0}\cos\Theta_0 & \frac{f}{Z_0}\sin\Theta_0 & 0 & 0 \\ -\frac{f}{Z_0}\sin\Theta_0 & \frac{f}{Z_0}\cos\Theta_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Z_0} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

ここで式 (7) によると式 (6) におけるイメージヤコビアン $\boldsymbol{J}_{const}$ は時不変となる。$\boldsymbol{J}_{const}$ の形より，イメージヤコビアンが時不変である他，ロボットの並進，回転，距離方向の移動が非干渉化されて，それぞれ画像の平行移動・回転・拡大縮小と 1 対 1 対応している事もわかる。また，$\boldsymbol{J}_{const}$ は制御時には未知数である目標値における Θ_0 と Z_0 を含んでいるが，Θ_0 は式 (3) より直接推定可能であり，Z_0 に関してもある κ の変動とロボットの動きから推定できる。次のシミュレーションにおいてこの誤差に対する制御系の応答について考察を行う。

4. 位相限定相関法 (POC) に基づく画像の変形パラメータの検出 [6]

本稿ではビジュアルサーボに用いる制御量に参照画像と現在の画像の間の変形パラメータを用いるがその検出アルゴリズムとして位相限定相関法（Phase-Only Correlation，以降 POC）を用いることを提案する。POC は画像のマッチング技術の一つであり，一般に特徴点が取得しにくいと言われるような画像に対しても，2 つの画像の間の平行移動量や拡大縮小量，回転量を高精度かつ定量的に検出できる。紙面の都合上，アルゴリズムの原理やプログラムの詳細については [6] や [7] などに譲り，本章では POC に基づく平行移動量，回転，拡大縮小量の推定の概要について述べる。

大きさが等しい 2 つの画像をそれぞれ f, g とする。これらの画像を 2 次元離散フーリエ変換したものを F, G とおくとそれらを掛けあわせて得られる合成位相スペクトル R は次のように定義される。

$$R = \frac{F\overline{G}}{|F\overline{G}|} \quad (\overline{G}\text{: } G \text{ の複素共役}) \tag{8}$$

POC 関数 r は R を 2 次元離散フーリエ逆変換することにより計算でき，2 つの画像が図 3(a) と図 3(b) に示すように類似している場合，図 3(c) のように r はデルタ関数に近い極めて鋭いピーク値を持つ。相関のピークの中心からの座標変位は 2 つの画像間の平行移動量に対応する。

この平行移動量は窓関数とそれに合わせた関数フィッティングを用いることでサブピクセル精度に拡張することができる。また，周波数領域での振幅成分に着目し，これに対数極座標変換などの処理を行うと回転や拡大縮小量も変換した座標における並進量として扱うことが出来，式 (8) の手順で検出することができる。詳細は参考文献 [6][7] などに譲る。本稿ではこの手法に則って測定した xy 平行移動量と回転，拡大縮小量をもとに制御を行うことを提案する。

5. シミュレーション

問題設定の通りに 4 自由度ロボットマニピュレータをビジュアルサーボによって駆動した場合のシミュレーションを行った。

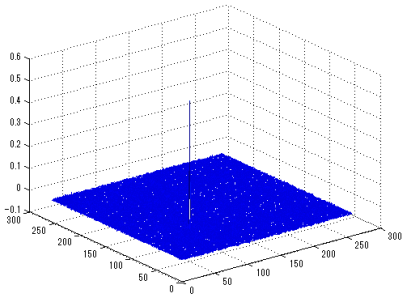
5.1 $\boldsymbol{J}_{const}$ の誤差に対する応答の変化

シミュレーションに用いた各パラメータを Table 1 に示す。図 4(a) と 図 4(b) にそれぞれ正確なイメージヤコビアンを用いた場合の制御量の時間応答とカメラの動きを示す。全ての要素が独立して制御されるため，対象の動きが直線的に制御できることがわかる。

図 4(c) と 図 4(d) には式 (7) の Z_0 が 1.5 倍された場合，

(a) 画像 f

(b) 画像 g



(c) POC 関数 r

図 3　POC 関数の概要

図 4(e) と図 4(f) は Θ_0 がずれた場合の応答を示す。
式 (7) より，Z_0 は並進と距離成分に対してかかっているのでゲインの振動として見ることが出来，図 4(c) の平行移動量はゲインが実質 1.5 倍になった時の応答として振動的になっている。
一方，式 (7) と図 4(f) から Θ_0 のずれはその分だけ軌道を曲げることがわかる。以上より $\boldsymbol{J}_{const}$ において Z_0 は大きく見積もった時に不安定化しやすく，擬似的に上がったゲインが安定限界を超えると不安定化する。Θ_0 の誤差については小さい値からでも軌道に影響を及ぼし，系が不安定化するのは 90 度以上回ってからということがわかる。

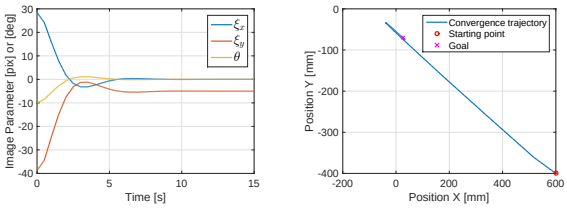
サンプリング時間	500ms
参照画像での姿勢 $(X_0, Y_0, Z_0, \Theta_0)$	(0,0,15,20)
初期姿勢 $(X_1, Y_1, Z_1, \Theta_1)$	(600,-400,20,30)
画像パラメータの指令 $(\xi_{xref}, \xi_{yref}, (1/\kappa)_{ref}, \theta_{ref})$	(0,-5,1,0)
コントローラ (K_p, K_i, K_d)	$(0.6, 0.001, 0.3)$

表 1　シミュレーション変数

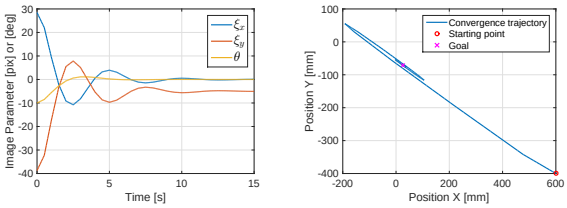
5.2　特徴点ベースの手法との比較

提案手法を用いた 3 次元軌道や応答と従来の手法を用いた軌道や応答を図 5 で比較する。回転変位が小さいケースを図 5(a)，5(c)，5(e) に，大きいケースを図 5(b)，5(d)，5(f) に示す。従来の特徴点ベースは式 (1) を元に組んだ特徴点を 2 個用いた場合とした。角度の目標値と初期値以外は Table 1 と同じ変数を用いてロボットの目標姿勢に異なる制御のアプローチを与えたときの時間応答と 3 次元的な軌道を評価する。
図 5(e)，5(f) でよく分かるように画像の変形パラメータを用いた場合は従来の単純な特徴点ベースにおいて軌道が不安定化するような，回転変位が大きいパターンにおいても安定した軌道で制御可能であることを示した。

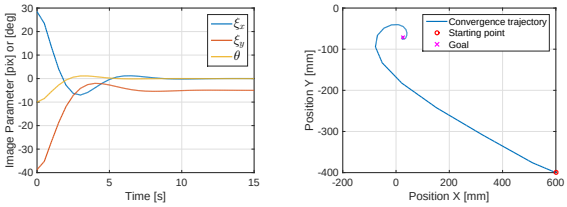
これを用いてシミュレーションした結果を図 5 に示す。なお，ケース 1 は角度の初期値と目標値 $(\Theta_{init}, \Theta_{ref})$ を $(30, 0)$ と設定したもの，ケース 2 ではそれらを $(130, 0)$ とおいたものとする。



(a) 時間応答　(b) 距離方向から見たカメラの 3 次元軌道



(c) 時間応答　(d) 距離方向から見たカメラの 3 次元軌道



(e) 時間応答　(f) 距離方向から見たカメラの 3 次元軌道

図 4 定常指令値に対する画像内の平行位置ずれ量と回転量の時間変化とその際のカメラの 3 次元的な移動の軌跡。(a)(b):式 (7) の値を正確に推定できた場合，(c)(d):Z_0 が 1.5 倍ずれている場合，(e)(f):Θ_0 が 10 度正にずれている場合。

6.　評価実験

評価実験として POC を用いて検出した拡大縮小量 κ のパラメータを用いた距離方向の制御を行う。イメージヤコビアンは定数かつ非干渉であるので距離は拡大縮小量のみを用いて制御することができる。

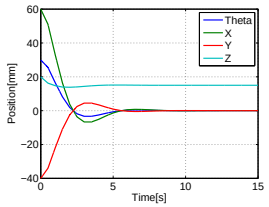
6.1　実験設備

実験装置としては，安川電機製の 6 自由度ロボットアームを用い，カメラは Logicool 製の Web カメラを用いた。ロボットアームは RTLinux 機の上で動作する専用システム RTLab を用いて C 言語で 4 自由度直交座標系で動くように制御し，画像処理は別に Windows の PC を用いた。両者の間はソケット通信でデータをやりとりしている。

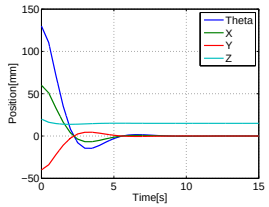
カメラで取得した画像は 256 ピクセル四方に切り取られ，C で書かれた POC のプログラムによって処理される。この時カメラに映る画像を図 6(a) に示す。

6.2　実験結果

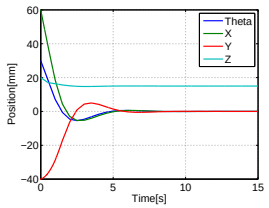
はじめに，初期姿勢においてカメラから参照画像を取得して保存し，対象とロボットアーム先端につけたカメラのレンズの中心までの距離をメジャーを用いて計測を行った。次にロボットアームを 100mm 後退させた後にビジュアルサーボを開始した。この時の収束値を Table



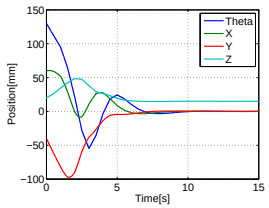
(a) ケース 1 におけるカメラの位置の時間応答（POC）



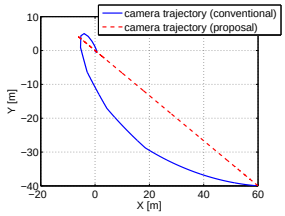
(b) ケース 2 におけるカメラの位置の時間応答（POC）



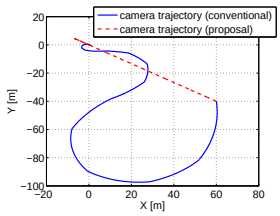
(c) ケース 1 におけるカメラの位置の時間応答（特徴点）



(d) ケース 2 におけるカメラの位置の時間応答（特徴点）



(e) Z 方向から見たケース 1 における両手法の軌跡（提案法：赤線，従来法：青線）



(f) Z 方向から見たケース 2 における両手法の軌跡（提案法：赤線，従来法：青線）

図 5 左側の図群 (a)(c)(e) は回転差が小さいケース 1 について，右の図群 (b)(d)(f) は回転変位が多いケース 2 についてのシミュレーションを表す。

2 に示す。対象との距離は初期距離のみ 414 ± 3[mm] と測って，以降はロボットアームの位置を用いて算出した。その時のカメラ画像から実際計測した拡大縮小量の動きを図 6(b) に示す。図 6(b) には実際にカメラ画像から測定した拡大縮小量と初期位置，ロボットアームの変位から計算した距離を用いて式 (4) から推定した拡大縮小量の値が示されている。

図 6(b) によると測定値と推定値は 8 秒付近で一度乖離しているが，この点付近に POC アルゴリズムを用いた拡大縮小量の測定の限界点があると思われる。それ以降は拡大縮小量は正しく算出されないものの，変位そのものは検出できるため，その後ゆっくり目標値に漸近していく。限界点付近での位置誤差は図 6(b) のデータより 5mm 前後であるため，距離に対して 1 %前後までは POC で検出した拡大縮小量を距離との対応の信頼性を持っていると言える。これからは 4 自由度の姿勢全てを制御して精度や過渡応答などを検証し，POC 以外の手法における精度なども検討していく予定である。

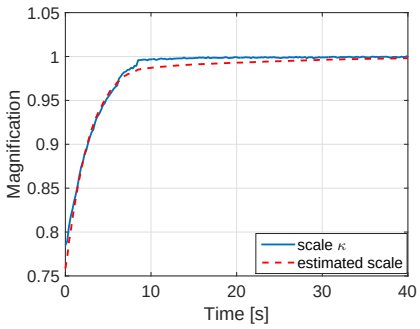
7. まとめ

4 自由度の特徴ベースビジュアルサーボにおいて特徴点の座標ではなく，参照画像と現在の画像の変形パラメータを特徴量に取ることで制御においてイメージヤコビアンを時不変にして並進と回転，距離方向の非干渉化ができるということを式により示した。また，実際の制御において必要なパラメータを POC を用いて高精度に検出することを提案し，先ずは距離方向の評価実験において精度などを確認した。今後は 4 自由度全ての方向に動かす実験を行って提案法の妥当性を検証するとともに，他の変形パラメータの抽出アルゴリズムについても評価と考察を行う。

	拡大縮小 κ	アーム変位 [mm]	対象間距離 Z[mm]
目標姿勢	1.00	0.00	414
初期姿勢	0.79	-100.00	514
最終値	1.00	0.75	414.75

表 2　距離実験後の各パラメータの収束値

(a) カメラの処理する画像



(b) 距離制御を行った場合の拡大縮小量の時間応答（青実線）と実距離から推定した拡大縮小量（赤点線）

図 6 距離制御実験において，(a):ロボットアームが初期位置にいる時のカメラの画像と (b):計測・推定した拡大縮小量の時間応答

参　考　文　献

[1] F. Chaumette and S. Hutchinson.: ”Visual servo control. Part 1: Basic Approaches.” *IEEE Robot. Autom.Magazine* pp.82-90,(2006)

[2] S. Hutchinson, G. D. Hager and P. I. Corke.:” A tutorial on visual servo control.” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(5), pp.651-670.(1996)

[3] 橋本浩一 :” ビジュアルフィードバック制御と今後 ”　日本ロボット学会誌，Vol.27, No.4, pp.400-404, 2009

[4] Dame, A. and Marchand, E.: ” Mutual Information-Based Visual Servoing ” *IEEE Transactions on Robotics*, 27(5), pp.958-969. (2011)

[5] E. Malis, F. Chaumette and S. Boudet.: ”2-1/2 D visual servoing,”*IEEE Transactions on Robotics and Automation*.(1999)

[6] K. Takita, T. Aoki, Y. Sasaki, T. Higuchi and K. Kobayashi. :”High-Accuracy Subpixel Image Registration Based on Phase-Only Correlation,” *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences* Vol. E86-A, pp. 1925-1934. (2003)

[7] 長嶋聖，青木孝文，常田るり子 :”位相限定相関法に基づく顕微鏡画像の倍率推定アルゴリズム”*IEICE Technical Report* (2005)