位置ベースステレオ視覚サーボを用いた
マニピュレータの高精度位置制御法*岩崎 正裕^{*1}, 辻内 伸好^{*2}
小泉 孝之^{*2}, 田中 雄一郎^{*3}High Accuracy Position Control Method for Robot Manipulator
Using Position-Based Stereo Visual ServoingMasahiro IWASAKI^{*4}, Nobutaka TSUJIUCHI,
Takayuki KOIZUMI and Yuichiro TANAKA^{**} Graduate School, Doshisha University,
1-3 Tatara Miyakodani, Kyotanabe-shi, Kyoto, 610-0321 Japan

In this paper, we present a new servo system to solve the visual servo control problem for 3DOF manipulator using fixed stereovision configuration. In order to accurately and quickly move the end-effector to the static/moving target on 3D-space, we propose a new position-based visual servoing method. One method is a servo system that uses the position of the endeffector by position sensor, it is effective for the high-speed tracking. The other method is a servo system that uses the position of the endeffector by vision sensor, it is effective for the accurate positioning. And, we apply the proposed servo system to the experimental system that consists of an off-the-shelf CCD camera, which has high resolution. As a result, experiments have shown that it decreases steady-state deviation for a static and moving target on 3D-space without deteriorating the tracking performance. And they also have shown that it is independent of errors in lens radial distortion and the declination between camera coordinate and manipulator coordinate.

Key Words: Manipulator, Position-Based Visual Servoing, Stereovision, Tracking Control, Off-the-Shelf CCD Camera, Eye and Hand System

1. 結 言

現在, 災害救助や原子力施設, さらに宇宙開発の分野など危険を伴う作業環境において, 人の代わりに作業を行う自律型ロボットが求められている. このようなロボットにおいては, 産業用ロボットとは異なり, 絶えず変化する外部環境を自律的に認識し, 状況に適応して作業を遂行していくことが要求される. そのため, 近年, 演算装置の急速な高速化を背景に, 外部環境を認識する手段として視覚情報を用いた実時間制御システムの構築とその応用に関する研究が盛んに行われている⁽¹⁾⁽³⁾.

視覚情報を用いた制御系は大きく分けて位置ベース法と特徴ベース法の二つに分けることが出来る. 位置ベース法は対象物の空間的位置を求めて, それを目標値としてマニピュレータを制御する. 特徴ベース法は画像情報から得られる特徴量を直接用いて, これが目

標となる特徴量と一致するように制御を行う⁽⁴⁾. 位置ベース法には対象物の位置/姿勢のみを画像情報から得て手先の位置/姿勢は各関節の角度から計算する方法 (EOL: Endpoint Open Loop) と対象物と手先位置/姿勢の両方を画像情報から得るもの (ECL: Endpoint Closed Loop) がある⁽⁵⁾. EOLを用いる場合, レンズの歪やカメラとマニピュレータとの相対的な位置誤差の影響などにより, 手先位置を対象物に正確に追従させることが困難である. 一方, ECLを用いた場合, 手先位置と対象物の画像上の誤差を制御系への入力とするため歪や座標系のずれなどの影響を受けずに手先位置を目標位置に収束させることができる. しかし, 画像情報をフィードバックに用いるため, 市販の画像装置を用いるとサンプリングレートの制限のために安定性の観点から応答性を高く設定できない. これに関して, 制御系をある状態で切替えることにより応答性と追従精度を両立している研究がある⁽⁶⁾. また, 最近では並列化された専用の画像処理チップが開発され, 移動物体の高速な追従が実現されている⁽⁷⁾. しかし, 現在開発されているものは画素数が少なく高い精度を得ることは困難である.

* 原稿受付 2002年5月20日.

^{*1} 正員, 同志社大学大学院工学研究科(〒610-0321 京田辺市多々良郡谷1-3).^{*2} 正員, 同志社大学工学部.^{*3} 新キャピラー三菱(株)(〒158-8530 東京都世田谷区用賀4-10-1) [元: 同志社大学大学院].

E-mail: ntsujiuc@mail.doshisha.ac.jp

以上より、本研究ではコストと位置決め精度を考慮して、汎用の画像装置を用いたビジュアルフィードバックシステムを構築し、上述のEOLとECLの利点を併せ持った新しい制御法を提案する。これにより、EOLの利点である高い応答性を保ったまま、ECLのような高い追従精度を達成する。また、提案手法は既存の位置制御法をそのまま適用できることから、本研究においては、制御系として、プラントのパラメータ変動や非線形摩擦などに対して優れたロバスト性を有するスライディングモード制御を適用する。

2. 実験システム

ここでは本研究に用いた実験システムの構成に関する説明を行う。ビジュアルサーボシステムにおいては、目的に応じてカメラとマニピュレータのレイアウトが異なり、画像処理やステレオ解析に関してもさまざまな方法が提案されている。

2.1 ロボットシステム カメラとマニピュレータの配置は大きく分けてアイ・イン・ハンド型とアイ・アンド・ハンド型の二つに分けることが出来る。前者はマニピュレータの先端にカメラを設置したもので、対象物の近くで撮影が出来るため高い位置精度を得ることが出来る。一方、後者はマニピュレータとは独立した位置にカメラを取り付けるタイプのもので、高い位置精度が得にくい反面、客観的に周囲の状況を確認することが出来る。本研究では人に代わって作業を行う自律型ロボットを対象としているため、人に近い構成であるアイ・アンド・ハンド型のシステムを用いる。本研究で用いたロボットシステムの外観を図1に示す。これより、頭部に2台のCCDカメラを設置し、5自由度のマニピュレータを左腕の位置に設置した。2台のカメラは200mmの間隔を隔てて平行に固定した状態で用い、その状態でマニピュレータが到達可能な作業範囲全体が見渡せるように広角のレンズ(3.5mm)を用いた。

2.2 画像処理システム 図2に本研究で用いた画像処理の手順を示す。まず、CCD画素上に投影された実画像を2値化する。さらに、物体抽出を容易にするため、2値化画像中の各連結成分をラベリングする。さらに、ラベリングしたデータから、真円度、矩形度、面積、縦横比などのパラメータごとに設定した範囲に含まれる番号の領域だけを抽出し、その領域の重心位置を計算することで物体位置の画素データを得る。

2.3 ステレオ解析 対象物体の3次元位置情報を獲得する手法であるステレオ解析について説明する。

ステレオ法は2台のカメラ画像の対応点から三角測量の原理により物体の位置を求める手法である。本研究では、2台の同じ特性を持ったカメラを水平方向に平行に配置したステレオ法であるベースラインステレオ(Base-Line Stereo)法を用いる。ベースラインステレオ法では、対象の空間座標位置を $O(X, Y, Z)$ 、点Oが左右それぞれのCCD画素上に投影される点を $P_l(x_l, y_l), P_r(x_r, y_r)$ とすれば、点Oは以下の式で与えられる。

$$X = \frac{b(x_l + x_r)}{2d}, Y = \frac{by_l}{d}, Z = \frac{bf}{d} \quad (1)$$

ただし、 $y = y_l = y_r$ 、 $d = x_l - x_r$ 、であり、 b は水平方向のカメラ間距離、 f はレンズ焦点距離を表す。また、 d は視差と呼ばれる。

Fig.1 Eye and Hand System

Fig.2 Image Processing Sequence

3. ビジュアルサーボシステム

本研究では画像情報を用いて3次元空間上にある対象物にマニピュレータの手先位置を追従させることを目的とする。そのため画像から計算された3次元空間位置によりロボットを制御する手法である位置ベース法を用いる。前述の通り、汎用の画像装置の使用を前提とすると、従来の位置ベース法(EOL, ECL)においては、位置精度と応答性に関してトレードオフの関係があるため、ここではそれぞれの特徴を生かした新しいサーボ系(以後,ROM: Reference Offset Method)を提案する。

以下においてマニピュレータ上に固定された空間座標系を X , 関節座標系を θ とする. 右下の添字は観測対象を表し, エンドエフェクタの場合は(e)とし, 目標とするターゲットの場合は(t)とする. 左上の添字はセンサの種類を表し, 画像センサの場合は(i), 各関節に取り付けられたエンコーダの場合は(e)とする. また, 指令関節角度は θ_d とする.

EOL において問題となるのは視覚情報に含まれる誤差であるため, この誤差を補正することにより高い精度を得ることが出来る. 図3に画像情報を基に計算される位置(実線)と実空間上における位置(破線)との間に存在する誤差を示す. ここで, 長方形の印はエンドエフェクタを表し, 丸印は目標となる対象物を表す. これより, 画像情報を基に計算される位置は実空間上における位置に対して誤差を生じ, その大きさと方向は座標上の位置に依存することがわかる. そのため, EOLにおいて画像情報を基に計算される対象物の位置情報をそのまま制御系の目標値に設定すると, 制御系において状態量が目標値に収束しても実空間上では偏差を生じることになる. そこで, この位置誤差を補正したものを新たな指令値として設定する必要がある.

いま, マニピュレータの機構パラメータが正確に分かっているものとする, マニピュレータに固定された座標系におけるエンドエフェクタの位置は正確に計算することが出来る. そのため, 画像情報から得られるエンドエフェクタの位置と比較することにより, その位置における誤差ベクトルを求めることが出来る.

$$\varepsilon_e = X_e - {}^iX_e \quad (2)$$

また, 対象物の位置における誤差ベクトルは,

$$\varepsilon_i = X_i - {}^iX_i \quad (3)$$

となる. ここで, X は実空間上の位置, iX は画像情報を基に計算される位置とする.

ROMにおいては画像情報より得られた対象物の位置 iX_i に対して, 式(2)より求めた ε_e を補正項として用いる. このとき, 式(2), (3)より新たな指令値は次式となる.

$$\begin{aligned} X_d &= {}^iX_i + \varepsilon_e \\ &= X_i - (\varepsilon_i - \varepsilon_e) \end{aligned} \quad (4)$$

図3に示すように初期状態において対象物とエンドエフェクタの位置が離れている際には指令値は正しく補正されないが, 両者が接近するにつれてそれぞれの位置での誤差の大きさおよび方向は近づいてくる. そのため新たに設定された指令値は式(4)より最終的に,

$$X_d = X_i \quad (5)$$

となり, エンドエフェクタは実空間上においても対象物の位置に漸近的に収束する. ROM のブロック線図

を図4に示す.

Fig.3 An error between the position calculated based on the image information and the actual position

Fig.4 Block Diagram (ROM)

4. 制御系の設計

本章では, マニピュレータの制御に用いる PD コントローラとスライディングモードコントローラの設計を行う.

4.1 PD コントローラの設計 PD コントローラの制御則は次式で表される.

$$u_i = (K_{Pi} + K_{Di} \frac{s}{1+0.01s})(\theta_{di} - \theta_i) \quad (i=1,2,3) \quad (6)$$

ここで, u は制御入力, i は各関節の軸番号である.

4.2 スライディングモードコントローラの設計

1 型のサーボ系を構成するために, 次式で表される変数 z を導入する.

$$z_i(t) = \int_0^t (\theta_{di} - \theta_i(t)) dt \quad (7)$$

ラグランジュ方程式により求められたマニピュレータの運動方程式において, 他の軸への干渉項と非線形項などをまとめて $h(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, t)$ とすると, 以下に運動方程式が得られる.

$$M_{oi} \ddot{\theta}_i + D_i \dot{\theta}_i + h_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, t) = \tau_i \quad (i=1,2,3) \quad (8)$$

ただし, M_{oi} は各軸における干渉項を除いた慣性項, D_i は各軸における粘性摩擦力を示す項, τ_i は各軸における関節トルクである. したがって, 各軸に対して独立な 1 自由度系のスライディングモードコントローラの設計が行える.

各軸の状態量を $x_i^T = [z_i \ \theta_i \ \dot{\theta}_i]$ とすると, 不確かさを含むシステムの状態方程式は次式で表せる.

$$\dot{x}_i = \mathbf{A}_i x_i + \mathbf{B}_i [u + h_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, t)] + \mathbf{E} \theta_{di} \quad (9)$$

$$\sigma_i = \mathbf{S}_i x_i \quad (10)$$

ここで,

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -D_i/M_{oi} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/M_{oi} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$\mathbf{S}_i$: 切換関数行列

である. システムの状態が式(10)に示す切換超平面上に拘束されている限り,

$$\sigma_i = \dot{\sigma}_i = 0 \quad (11)$$

が成立する.

ここで, SMCにおける制御入力として次式で表す線形入力と非線形入力の和を用いる.

$$u_i = u_{li} + u_{ni} \quad (12)$$

ただし, 非線形入力は次式とする.

$$u_{ni} = -(\mathbf{S}_i \mathbf{B}_i)^{-1} \{k_i \operatorname{sgn}(\sigma_i) + P_i \sigma_i\} \quad (13)$$

式(13)の非線形入力により, 式(9)の非線形および不確かさの項 $h_i(\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, t)$ を打ち消せるものとする. 式(9)-(11)より線形入力 u_{li} として次式の等価制御入力が得られる.

$$u_{li} = u_{eqi} = -(\mathbf{S}_i \mathbf{B}_i)^{-1} \mathbf{S}_i (\mathbf{A}_i x_i + \mathbf{E} \theta_{di}) \quad (14)$$

このとき, 等価制御系は式(9), (12)-(14)より次式となる.

$$\dot{x}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{B}_i (\mathbf{S}_i \mathbf{B}_i)^{-1} \mathbf{S}_i) (\mathbf{A}_i x_i + \mathbf{E} \theta_{di}) \quad (15)$$

5. 実験

5.1 実験装置 実験装置の構成を図5に示す. マニピュレータの各関節はACサーボモータ(松下電器産業株式会社製)によって駆動され, 関節角度の検出にはエンコーダを用いる. カメラには, 1/2型倍速プログレッシブスキャンタイプのCCDカメラ(JAI Corporation社製 CV-M40, フレームレート 60fps, 解像度 640×480 pixel)を使用する. また, ホストコンピュータへの画像入力には, カメラ2台からの同時画像取込が行える画像入力ボード(Leutron Vision社製 Picport Stereo H4-S)を使用する. ホストコンピュータには, PC/AT互換機(Pentium III 700MHz, OS: Windows 2000)を使用する. DSP及びA/D・D/A変換部には, dSPACE社製のシングルボードシステムDS1103(Power PC 400MHz)を用いる. 画像解析プログラムは対話型画像解析ソフトHALCONを使用する. カメラ, エンコーダより得たデータは, MATLAB/SIMULINKで作成しDSPに実装されたコントローラを用いてマニピュレータを制御する.

Fig.5 Experimental System Configuration

5.2 実験方法 実験は自然光の中で行い, ターゲットの誤認識を軽減するために比較的白い背景のもとで行う. また, ターゲットには, 直径 50[mm]の黒い球体を用い, エンドエフェクタ部の認識には, 40×20 [mm] (縦×横)の黒い長方形の物体を用いる. また, 画像取込時間を可能な限り短縮するために, フレームレート (=60[frame/s])の2分の1の時間で画像取込が行えるフィールドレート (=120[frame/s])で実験を行う. このときの解像度は, フレームレートでの解像度 (640×480 [pixel])の2分の1となる 640×240 [pixel]である. DSPにおける制御系のサンプリング周期は 1[ms]であり, 視覚情報のサンプリングは 20[ms]である. 提案サーボ系の位置精度と応答性を検証するために, 以下に示す2種類の実験を行う. 実験に用いた制御器のパラメータを表1に示す. なお, 各サーボ系の特徴を顕著にするため, レンズ歪みの補正は行わずに実験する.

Table 1 Parameters of Controllers

Controller	Symbol	Joint Number		
		θ_1	θ_2	θ_3
PD-EOL / PD-ROM	K_P	20.0	10.0	1.0
	K_D	0.500	0.300	0.010
PD-ECL	K_P	1.2	0.5	0.1
	K_D	0.030	0.005	0.003
SMC-EOL / SMC-ROM	ε	30	20	20
	k	50	30	30
	P	50	30	30

5.3 実験結果及び考察

5.3.1 ステップ応答比較 ここでは提案サーボ系の位置精度を検証するためにステップ応答を行い, 従来のサーボ系(EOL, ECL)と比較考察する. PD制御を用いた際のステップ応答の実験結果を図6-8に示す. 図中の実線は画像情報より得られるエンドエフェクタの位置を表しており, 破線はエンコーダから得られたエンドエフェクタの位置を表している. また, 点線はEOLにおいて用いられる指令値であり, これは画像情

報を基に計算される対象物の位置を表す。そのため、この値は実際の対象物の位置に対して誤差を生じている。それに対して、ROMで新たに用いられる補正指令値は鎖線により表される。図6はEOLを用いたときのステップ応答を表している。図より、エンドエフェクタの位置は指令値に収束しているにもかかわらず、画像上での対象物の位置とエンドエフェクタの位置は大きくずれていることが分かる。これより、与えられた指令値自体が実際の対象物の位置を正確に反映していないといえる。図7はECLを用いたときの応答である。これよりEOLに比べて位置の誤差は改善されているが、定常偏差が存在している。これはマニピュレータに存在する摩擦等の影響が考えられる。これらの影響は制御系のゲインをあげることで補償することが出来るが、ECLにおいてはサンプリングの関係でゲインを上げすぎると不安定になる恐れがあるため応答性と定常偏差とのトレードオフを考慮してゲインを選ぶ必要がある。図8は提案手法であるROMを用いた際のステップ応答を示している。これより、エンドエフェクタは補正された新しい指令値に追従しており、これにより結果的に画像上においてもエンドエフェクタは対象物に収束している。また、補正指令値は制御開始直後は正しく補正されていないが、エンドエフェクタが対象に近づくにつれて漸近的に正しい補正值へと収束している。ROMにおいてもわずかに誤差が生じているが、これも摩擦等による影響と考えられる。そこで、マニピュレータに存在する非線形摩擦やパラメータ変動に対して優れたロバスト性を示すことが知られているスライディングモード制御をROMに適用する。図9にステップ応答を示す。これより、エンドエフェクタは完全に対象物に収束している。図10に3次元空間上における対象物とエンドエフェクタの位置の誤差の大きさを示す。ただし図10中の iX_t 、 iX_e は、第3章で用いたものと同様である。また、 ${}^iX_t = [\dot{X}_t, Y_t, Z_t]$ 、 ${}^iX_e = [X_e, Y_e, Z_e]$ とすると誤差ノルムは次式で表される。

$$\|{}^iX_t - {}^iX_e\| = \sqrt{(X_t - X_e)^2 + (Y_t - Y_e)^2 + (Z_t - Z_e)^2} \quad (16)$$

これよりPD制御を用いたときの誤差はEOLが53[mm]、ECLが25[mm]、ROMが8[mm]となっている。そして、スライディングモード制御をもちたROMは1[mm]以下となっている。以上より、提案手法を用いることによりキャリブレーション等を行わずに従来法であるEOLやECLに対して位置制御時における定常偏差が減少することが示せ

た。さらに、スライディングモード制御と組み合わせることで1[mm]以下の位置精度を実現できた。

Fig.6 Step Response (PD-EOL)

Fig.7 Step Response (PD-ECL)

Fig.8 Step Response (PD-ROM)

Fig.9 Step Response (SMC-ROM)

Fig.10 Error Norm in 3-D Space

5.3.2 ランダム応答比較 提案手法の応答性を検証するためにランダムに運動する対象物体に対する追従制御を行う。ここでは、前述の結果より最も優れた位置精度を示したスライディングモード制御を用いる。従来法としてはECLよりもEOLの方が応答性を高く設定できるため、EOLを用いて制御系を構成する。図11にEOLを用いたときのランダム応答を示す。これより、X軸およびY軸においては高い追従性が示されているが、カメラの奥行き方向にあたるZ軸方向の追従誤差が大きいことが分かる。これは、式(1)より、ベースラインステレオ法において2台のカメラの視差より奥行きを求めているため、X軸方向の誤差が微小であっても、Z軸方向には大きく影響を与えるためである。一方、図12にROMを用いたときのランダム応答を示す。これよりX軸方向およびY軸方向においてEOLの場合に比べて追従誤差が改善されていることがわかる。さらに、奥行き方向であるZ軸方向の誤差はEOLに比べて大きく改善されていることが分かる。

さらに、時間遅れの平均値を計算すると、EOLの場合が約0.22[sec]、ROMを用いた場合は約0.21[sec]であることから、応答性も改善されていることが分かる。以上より、提案手法を用いることにより、ランダムに運動する対象物体の追従においても、従来法であるEOLに対して追従誤差と応答性を改善することができた。これより、提案サーボ系ROMは従来のサーボ系EOLおよびECLに比べて、高い位置精度を保持したまま、優れた応答性を示すことが実証された。

Fig.11 Trajectory on 3-D space (SMC-EOL)

Fig.12 Trajectory on 3-D Space (SMC-ROM)

6. 結 言

1. 市販の CCD カメラを用いたビジュアルサーボシステムを構築し, リアルタイムで 3 次元空間追従制御を行った.
2. EOL と ECL の組み合せた ROM を提案することにより, レンズの歪み補正やカメラ座標とロボット座標間のずれの補正を正確にしなくとも, 高い位置精度で高速追従制御を行うことができた.
3. 対象物体のランダムな動きに対して提案した位置サーボ系 ROM を用いることにより, 従来の位置サーボ系 EOL よりも, 追従誤差を減少させられることを明らかにした.

謝 辞

なお本研究の一部は, 文部科学省からの補助を受けた同志社大学の学術フロンティア研究プロジェクト「知能情報科学とその応用」における研究の一環として行った.

文 献

- (1) 加藤裕, 丸典明, 西川敦, 宮崎文夫, “ステレオ視によるマニピュレータのビジュアルサーボ”, システム制御情報学会論文誌, Vol.6, No.8, pp.360-367 (1993)
- (2) 相良慎一, 岩尾泰宏, 加藤了三: ビジュアルフィードバックを用いた宇宙ロボットのデジタル制御, 日本機械学会ロボメカ講演会講演論文集, pp.351-354 (1996)
- (3) 見浪護, 鈴木秀和, “GA と生画像を用いた魚へのビジュアルサーボイング”, 計測と制御, Vol.40, No.9, pp.641-650, (2001)
- (4) 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, Vol.38, No.12, pp.659-665 (1994)
- (5) E.Grosso, G.Metta, A.Oddera, G.Sandini, Robust Visual Servoing in 3-D Reaching Tasks, IEEE Trans. R. &A., 12-5, pp.732-742 (1996)
- (6) 木下敬介(ATR - HIP), 画像情報によるマニピュレータの制御方法, 日本国特許, 公開番号 9-290383 (1996)
- (7) 中坊嘉宏, 石川正俊, 1ms 高速ビジョンを用いたビジュアルサーボイング, 計測と制御, 40-9, pp.636-640 (2001)