

能動ステレオ視による移動点の実時間追跡

吉田 靖夫*, 谷口 武**, 青木 孝志***

Real-time Moving Point Tracking Using Active Stereo Vision

Yasuo YOSHIDA*, Takeshi TANIGUCHI** and Takashi AOKI***

(RECEIVED JUNE 15, 1998)

This paper addresses real-time moving point tracking using active stereo vision. The moving point's position is estimated by two camera data and gazing target is calculated from geometric inverse kinematics. Using the estimated moving point's position and the calculated gazing target, command velocities are generated by digital integral servo control. Experiments and simulations are performed for various moving point trajectories such as the straight line, circle and triangular cone. The system can track a 3-D moving point in real-time.

Keywords : active stereo vision, inverse kinematics, digital integral servo control, trajectory

1. 結 言

視覚は、人間にとって最も大切な感覚である。視覚情報の処理や解析のみを対象とした画像処理の研究分野では、多くの研究成果が発表されてきたが、多大の時間で情報処理して詳細な情報を再構成しなければならない。ロボットの作業では、外界でなにが起こっているかを即座に把握する必要があり、認識の結果は行動に反映されなければならない。このため高速で距離画像が得られるデバイスが開発されつつあるが、ロボットが種々のタスクを遂行するためには、時間をかけて得られるシーン全体の詳細な情報よりも、迅速かつ必要な情報のみが得られれば良いという背景がある^{1,2)}。視覚による追跡機能に関しては、1台のカメラによる2次元移動点の追跡³⁾は可能であるが、3次元の場合は2台のカメラが必要であり、両眼の視線の交点に対象を定める注視制御⁴⁾がある。注視制御は、観測対象を常に視野の中心で捉えることを可能とし、注視領域の画像処理が集中できること、両眼視差特徴が明確になる

ことなどの利点がある。これを用いて、カメラでマニピュレータ手先光源と目標位置光源を捕らえ、逆運動学にてマニピュレータ手先を目標位置に動かすビジュアルサーボ⁵⁾や、左右カメラ画像で対象の垂直エッジを抽出し、それらが重なる水平視差無しの注視制御⁶⁾による追跡を行った研究がある。

これらの研究では、2次元ホログラム平面内の移動点追跡を行っており、注視制御を用いた3次元移動点追跡を実際に行った報告はこれまで見受けられない。ここでは、種々の軌道で3次元移動する光源の追跡と位置計測を注視制御を用いて行い、1次元、2次元との比較検討を行う。即ち、3自由度ステレオビジョン装置を用いて、カメラ情報と駆動角度から移動点の3次元位置を推定し、注視目標を幾何学的逆運動学により求め、ディジタル積分形サーボによる指令速度を算出したシステムを作成し、実験とシミュレーションを行う。

2. 実験装置

試作したアクティブステレオビジョン装置を図1に示す。また、本装置の座標系を図2に示す。基準座標系を{0}とし、{0}が θ_1 回転した駆動座標系を{1}とする。また、カメラの回転軸が z 軸、カメラの光軸が x 軸で

*機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

**アロン化成 (Aronkasei Co., Ltd.)

***工業物理学科 (Department of Engineering Physics)

ある上下カメラの駆動座標系を $\{2\}$, $\{3\}$ とし, 各々の回転角は θ_2, θ_3 である。レンズの主点 R_1, R_2 から光源移動点 T までの光軸方向の距離を a_1, a_2 とし, その光軸位置を原点とし, y - z 平面内に移動点 T を含む移動点座標系を $\{2t\}$, $\{3t\}$ と置く。カメラの主点から光軸に沿って移動点座標系と反対側の焦点距離 f の位置にカメラ座標系 $\{2c\}$, $\{3c\}$ を置き, y - z 面をカメラ画像面とする。高さ $h_0=0.48\text{m}$, $h=0.25\text{m}$, 幅 $b=0.15\text{m}$, レンズまでの長さ $r=0.07\text{m}$, 焦点距離 $f=12.5\text{mm}$ である。

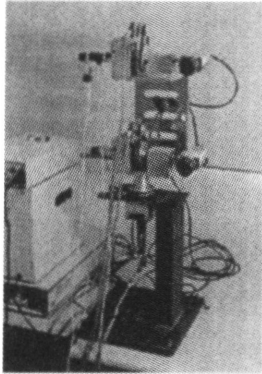


図1 能動ステレオカメラ実験装置

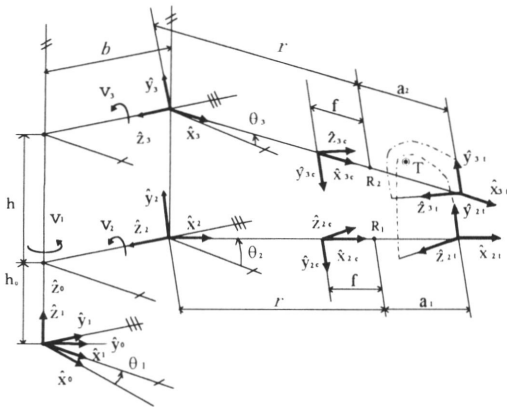


図2 モデル座標系

3. 追跡アルゴリズム

制御方法には、イメージャコピアンを用いてカメラ駆動速度をカメラデータ変化から求める方法があるが、複雑な計算を必要とし、3次元位置などの物理量が直接明らかには表せない。ここでは、移動点の3次元位置をカメラデータより求め、逆運動学によりカメラ駆動角の目標値を計算した後、これらの偏差から積分形サーボを用いて駆動速度を求めるシステムとした。な

お、光源位置が定点の場合は、レギュレータ制御の方が良いことは実験によって確認している。

3.1 移動点の3次元位置

カメラ座標系 $\{2c\}$, $\{3c\}$ で表した移動点 T の位置の画像位置を,

$${}^{2c}P_T = [0 \quad y_{2c} \quad z_{2c}]^T, \quad {}^{3c}P_T = [0 \quad y_{3c} \quad z_{3c}]^T$$

とする。座標系 $\{2t\}$, $\{3t\}$ で表した移動点 T の位置は,

$${}^{2t}P_T = \frac{a_1}{f} [0 \quad y_{2c} \quad z_{2c}]^T, \quad {}^{3t}P_T = \frac{a_2}{f} [0 \quad y_{3c} \quad z_{3c}]^T$$

となる。これらを $\{2\}$, $\{3\}$ の座標系に変換し, $\{2\}$, $\{3\}$ の相互関係から, 距離 a_1, a_2 が求まる。基準座標系 $\{0\}$ で表した移動点 T の3次元位置は a_1 をもとにすると次式となる。

$$\begin{bmatrix} {}^0x_T \\ {}^0y_T \\ {}^0z_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(c_2^2x_T - s_2^2y_T) - s_1(b - {}^2z_T) \\ s_1(c_2^2x_T - s_2^2y_T) + c_1(b - {}^2z_T) \\ s_2^2x_T + c_2^2y_T + h_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで, ${}^2x_T, {}^2y_T, {}^2z_T$ は駆動座標系 $\{2\}$ 上の移動点 T の座標である。

$$\begin{bmatrix} {}^2x_T & {}^2y_T & {}^2z_T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} r + a_1 & \frac{y_{2c}a_1}{f} & \frac{y_{3c}a_1}{f} \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

また, (2)式中の距離 a_1 は上下のカメラの画像データと焦点距離によって決まる。

$$a_1 = \frac{h \left(c_3 - \frac{y_{3c}}{f} s_3 \right) - r \left(\frac{y_{3c}}{f} (1 - c_{23}) + s_{23} \right)}{\frac{y_{2c} - y_{3c}}{f} c_{23} + \left(1 + \frac{y_{2c}y_{3c}}{f^2} \right) s_{23}} \quad (3)$$

なお, (1)~(3)式においては下記の表示としている。

$$c_i = \cos \theta_i, s_i = \sin \theta_i \quad (i=1, 2, 3) \\ c_{23} = \cos(\theta_2 - \theta_3), s_{23} = \sin(\theta_2 - \theta_3)$$

以上は下のカメラの距離 a_1 をもとに計算したものであるが, 同様に上のカメラの距離 a_2 を基にしても3次元位置を求めることができる。

3.2 目標角度

2つのカメラの光軸の交点が移動点 T と一致するときの角度を目標角度 $\theta_{1d}, \theta_{2d}, \theta_{3d}$ とし, 幾何学的逆運動学により移動点 T の3次元位置(1)式の ${}^0x_T, {}^0y_T, {}^0z_T$ で表すことができる。 θ_{1d} は2つのカメラの光軸が

つくる平面内に移動点Tが入るようにして求める。

$$\theta_{1d} = A \tan 2 \left(\sqrt{({}^0x_T)^2 + ({}^0y_T)^2 - b^2} / b \right) - A \tan 2 ({}^0x_T / {}^0y_T) \quad (4)$$

次に、 θ_{2d} 、 θ_{3d} はカメラの光軸の交点を移動点に一致させて求める。

$$\theta_{2d} = A \tan 2 ({}^{21}y_T / {}^{21}x_T) \quad (5)$$

$$\theta_{3d} = A \tan 2 ({}^{21}y_T - h / {}^{21}x_T) \quad (6)$$

ここで、

$${}^{21}x_T = c_{1d} {}^0x_T + s_{1d} {}^0y_T$$

$${}^{21}y_T = {}^0z_T - h_0$$

である。

3.3 制御方法

次の線形化方程式を考える。

$$\ddot{\theta}_i = u_i \quad (i=1,2,\dots) \quad (7)$$

θ_i を目標角 θ_{id} に追従するような積分形のサーボコントローラにより、フィードバック角加速度 u_i を得ることができる。タイムステップは $k=1, 2, \dots$ とする。

$$u_{ik} = K_0 e_{ik} + K_1 s_{ik} + K_2 \dot{s}_{ik} \quad (8)$$

ただし、

$$e_{ik} = \theta_{idk} - \theta_{ik} \quad s_{ik} = e_{ik} - e_{i,k-1} \quad \dot{s}_{ik} = \dot{e}_{ik} - \dot{e}_{i,k-1}$$

K_0 、 K_1 、 K_2 は、積分形のゲインであり、離散形の極指定により求める。即ち、 T をサンプリングタイムとし、連続時間極を $\bar{s}_1 = \sigma$ 、 $\bar{s}_2 = \sigma(1+j\bar{k})$ 、 $\bar{s}_3 = \sigma(1-j\bar{k})$ とすると、離散時間極は $\bar{z}_i = \exp(\bar{s}_i T)$ 、($i=1\sim 3$) と指定できる。駆動指令角速度 $v_i (= \dot{\theta}_i)$ は、(7) 式を積分する。

$$v_{ik} = v_{i,k-1} + u_{ik} T \quad (9)$$

以上の制御フローを図3に示す。なお、速度偏差においては、目標角速度はゼロとしている。目標角速度は光源の3次元位置からデカルト速度を計算し、ヤコビアンを用いて目標角速度を得ることができるが、実験においては不安定となったためである。

4. 実験結果

実験は、産業用ロボットマニピュレータ手先に取り付けた光源に、直線（1次元）、円（2次元）、三角錐（3次元）の軌道を与え、これらを追跡した。

4.1 直線軌道

基準座標系{0}にて、 $x=1\text{m}$ 、 $y=0.15\text{m}$ 一定とし、 $z=0.2\text{m}$ から 0.7m 上方へ 0.1m/s の速度で移動する光源の直線軌道を追跡した。はじめに光源をモニタ内にとらせるため初期角度は、 $\theta_1=0\text{ deg}$ 、 $\theta_2=-6\text{ deg}$ 、 $\theta_3=-30\text{ deg}$ とした。

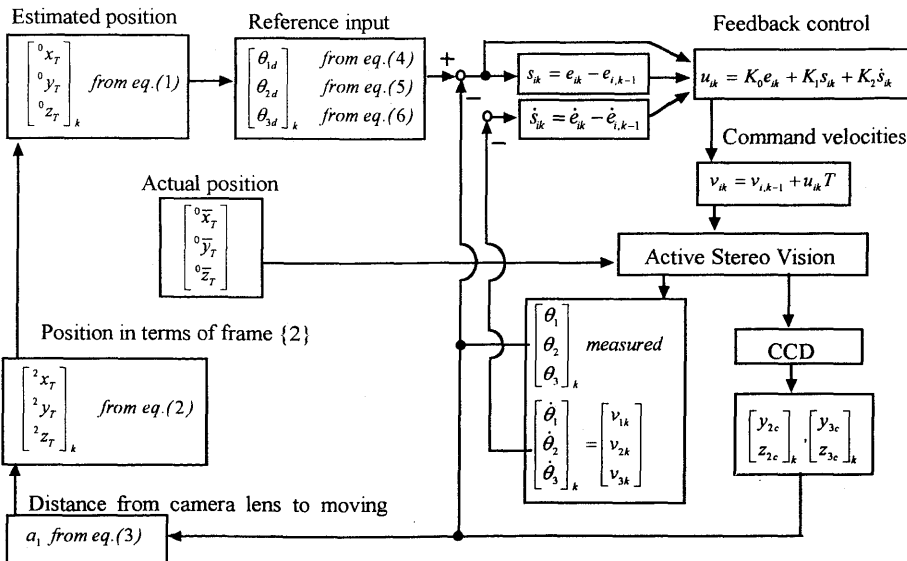


図3 制御フロー

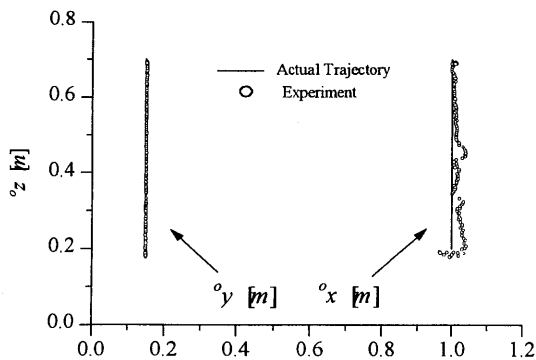


図4 直線軌道追跡

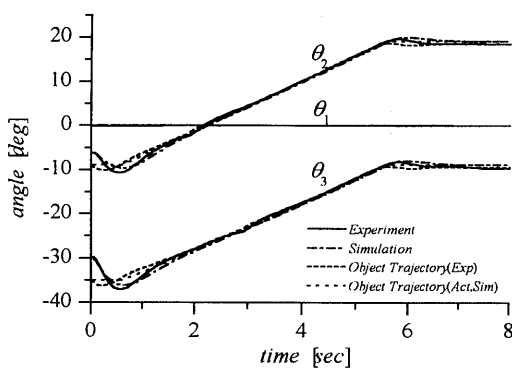


図5 直線軌道追跡時の関節角度

図4は3次元位置の測定結果で、実線は与えた軌道、丸印は計測値を示す。カメラに垂直な $y-z$ 面内では計測誤差はほとんどないが、奥行きの $x-z$ 面内では3.5%の誤差を生じている。図5は各駆動角度の応答結果で、実線は計測値、1点鎖線はシミュレーション、点線は目標角度である。初期値から目標値へ変化する初めの1.5秒間以外は、追従していることがわかる。速度は0.1m/sの他にも実施し、0.5m/sまで計測可能であった。なお、極指定に用いた値は、 $\sigma = -5$, $\bar{k} = 0.1$ であり、サンプリングタイムは $T = 0.05s$, ルンゲクッタシミュレーションのきざみ時間は0.01sとした。これらの値は以下の実験でも同様である。

4.2 円軌道

図6は、 $x = 1m$ の平面上に、 $y = 0.15m$ $z = 0.6m$ を中心に、半径0.15mで時計回りに23deg/sの速度（周速度0.06m/s）で移動する円軌道の追跡結果を示す。初期角度は $\theta_1 = 0deg$, $\theta_2 = 20deg$, $\theta_3 = -10deg$ である。前半は軌道に良く追従しているが、後半に少し軌道との誤

差が見られる。また、奥行きの円面外の位置誤差は直線軌道と同程度である。図7は、関節角度を示し、 θ_1 は初期角0 deg から-20 deg 程度の変化の後、目標角に変動しながら追従しているのが分かる。

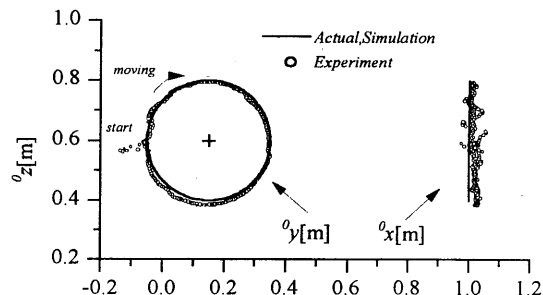


図6 円軌道追跡

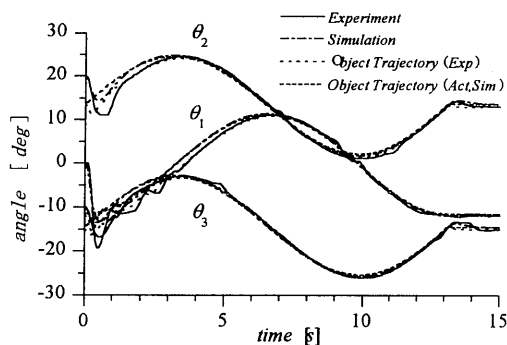


図7 円軌道追跡時の関節角度

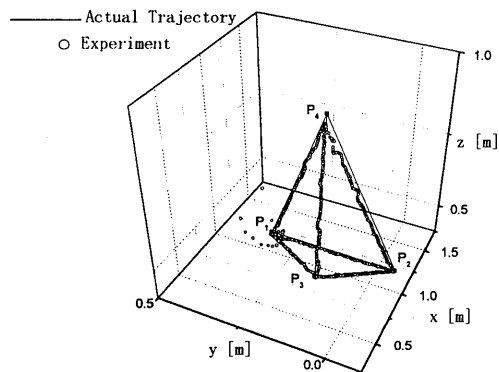


図8 三角軌道追跡 (立体図)

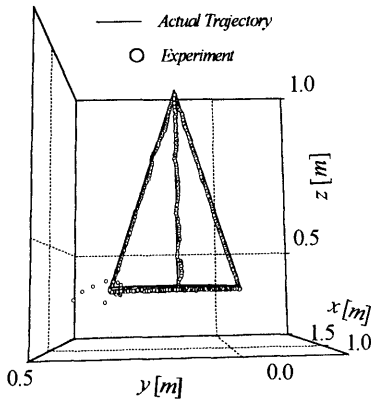


図9 三角錐軌道追跡 (正面図)

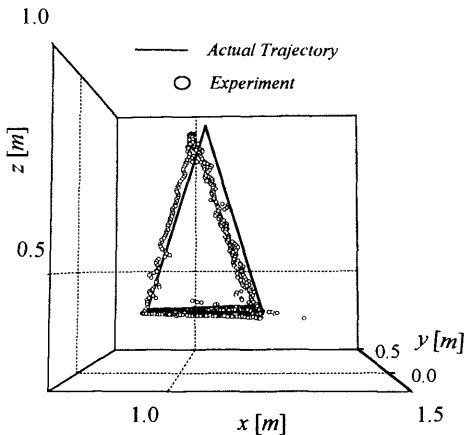


図10 三角錐軌道追跡 (側面図)

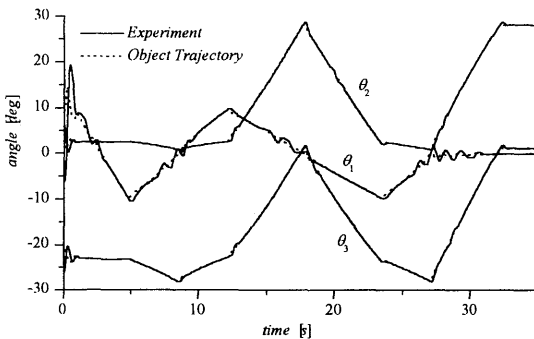


図11 三角錐軌道追跡時の関節角度

4.3 三角錐軌道

図8は、三角錐の各頂点を $P_1 = (1.2\text{m}, 0.35\text{m}, 0.4\text{m})$, $P_2 = (1.2\text{m}, -0.05\text{m}, 0.4\text{m})$, $P_3 = (0.9\text{m}, 0.15\text{m}, 0.4\text{m})$, $P_4 = (1.05\text{m}, 0.15\text{m}, 0.9\text{m})$ とし、 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3 \rightarrow P_1 \rightarrow P_4 \rightarrow P_2$ の順で移動し、速度が 0.1m/s である軌道の追

跡を示す。初期角度は $\theta_1 = 4\text{ deg}$, $\theta_2 = 0\text{ deg}$, $\theta_3 = -24\text{ deg}$ を与えた。光源の3次元位置が計測可能であることが分かる。図9は正面図でほとんど誤差を生じずに追従していることが分かる。図10は側面図で1次元、2次元の時と同程度の誤差が奥行き方向に生じている。図11は、関節角度を示し、 θ_1 に少し変動が見られる以外は、直線的に追従しているのが分かる。

5. 結 言

試作したアクティブステレオビジョン装置を用い、3次元移動点の追跡と位置計測について実験とシミュレーションを行った。

- (1) 注視制御を用いた三角錐軌道3次元移動点の追跡結果は、直線軌道1次元、円軌道2次元の追跡結果と同程度の精度で得られた。
- (2) 3自由度の角度と画像データから移動点の3次元位置を推定し、幾何学的逆運動学と極指定によるデジタル積分形サーボによる注視追跡システムを作成し、この制御システムが有効であることを示した。
- (3) サーボシステムは推定移動点位置から算出した推定移動点速度をカメラの目標角速度に用いると不安定となったため、目標角速度はゼロとしたが、目標角速度を考慮したシステムによる精度向上は今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) ロボットビジョン特集号, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.2, 1992
- 2) リアルタイムビジョン特集号, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.3, 1995
- 3) Visual Tracking of a Moving Target by a Camera Mounted on a Robot: A Combination of Control and Vision: N.P.Papanikolopoulos, P.K.Khosla, T.Kaneda, IEEE T. on Robotics and Automation, vol.9, no.1, pp.14-35, 1993
- 4) 大森隆司: 視覚系をモデルとした両眼立体視システムの試作, 計測自動制御学会論文集, vol.23, no.5, pp.525-531, 1987
- 5) 満田隆, 丸典明, 富士川和延, 宮崎文夫: 逆運動学の線形近似に基づくビジュアルサーボ, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.5, pp.743-750, 1996
- 6) 喜多伸之, S.Rougeaux, 國吉康夫, 坂根茂幸: 仮想ホロボタを用いた実時間両眼追跡, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.683-690, 1995