

## 単眼カメラからの移動物体の3次元位置復元

## Recovery of 3D Location for Moving Object from Single View Camera

合田 裕 † 岩堀 祐之 ‡ 中村 剛士 † 河中 治樹 § 伊藤 英則 †  
Yutaka Goda Yuji Iwahori Tsuyoshi Nakamura Haruki Kawanaka Hidenori Itoh

## 1 はじめに

近年、テレビ放送では視聴者を楽しませるため様々な演出が取り入れられている。また、その多くがコンピュータを使用して演出される。テレビ放送にはニュースやドラマなど様々な分野があるが、スポーツの分野、特にスポーツのテレビ中継では視聴者をただ楽しませるだけでなく、現在の状況を分かりやすく視聴者に伝えるための演出が取り入れられている。この演出は、野球やサッカー、ゴルフなど人気のあるスポーツでよく見られる。また、演出だけでなく判定を行うシステム [1] もあり、実際にテニスの全米オープンなどでも導入されており、より正確な判定を行うことが可能となっている。

一般的に移動物体を3次元位置計測する方法は2つに分けられる。一つ目はレーザー光・音波などを対象に照射し、対象に当たるまでの時間などの情報を利用して計測を行う方法、もう一つは複数のカメラを使用する方法、中でも、カメラを2台並べて撮影した画像を使用して、一方のカメラで撮影された画像がもう一方のカメラで撮影された画像のどの部分に対応するかを面積相関の計算によって算出し、その対応関係を使用した三角測量により各点の3次元位置を推測するステレオ法がよく利用される [2][3]。

ボールの位置復元については複数のカメラを用いた方法 [4][5] や、一台のカメラでもカメラから移動物体の向かう方向を逐次計算する方法 [6] などがある。しかしながら、これらの方法では特殊な機材や複数のカメラ、また、移動物体をカメラで追いつける技術等が必要となるため経済的・人的コスト、複数のカメラを使用する場合は複数のカメラを同期させるようなシステム、さらに、移動物体の向きから求める場合では移動物体を常にカメラで追跡できるような専門技術が必要となるため有能なカメラマンが必要となる。このため、スポンサーが多い人気のある試合や有名な大会、資金力や技術力、多くの人員を確保できる団体でなければ導入することは難しい。

そこで、本研究では図1に示すように固定されたカメラ一台のみを使用し、単眼視点の画像から移動物体の3次元位置復元を行う手法について提案およびその評価を実施する。

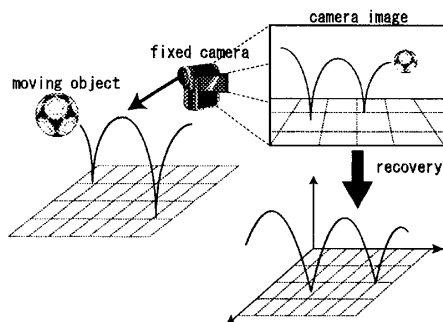


図1 提案手法

## 2 提案手法の概要

カメラ映像は基本的に2次元情報しか持たない。このため、1台のカメラだけでは奥行きが分からず移動物体の軌跡を3次元に復元することは困難である。そこで、カメラキャリブレーションより得られるパラメータから3次元空間の光線情報に基づく位置測定を行う手法 [7] を基に移動物体のカメラ映像における着地点から奥行き情報を獲得し3次元への復元を試みる。

このとき、地表面・背景面の世界座標はカメラキャリブレーションによって獲得されるものとする。なお、図2に示すように、世界座標系を  $X_w$ - $Y_w$ - $Z_w$ 、カメラ座標系を  $U$ - $V$ 、カメラ位置世界座標を  $C$ 、焦点距離を  $f$ 、観測不能ではあるが移動物体の世界座標を  $(x, y, z)$  で表す。移動物体を撮影した映像については当然ながらカメラ座標上の情報として獲得される。本提案手法の処理の流れを以下に示す。ここでは、移動物体は地表面  $B(z=0)$  でバウンドするものとしさらに世界座標系において連続する複数放物線軌跡を描くと仮定する。

1. 映像から背景差分法によってカメラ座標上の移動物体軌跡を獲得
2. 移動物体軌跡を画像処理によってサンプリングしカメラ座標上の点列  $(u_i, v_i) (i = 0, \dots, N-1)$  を時系列観測データとして獲得
3. カメラ座標上の点列から着地点候補を遺伝的アルゴリズム (GA) によって探索
4. 着地点候補に基づき、カメラ座標上の点列を分割
5. 分割後の各カメラ座標上の点列を非線形最適化によって2次曲線 (世界座標系においては  $Z_w$  軸正方向に凸の放物線) に近似
6. 求めた近似曲線を連結し移動物体の3次元軌跡を復元

なお、GAによる着地点候補の探索および世界座標系とカメラ座標系の関係式、分割後の最適化処理については以降の章において詳細を述べる。

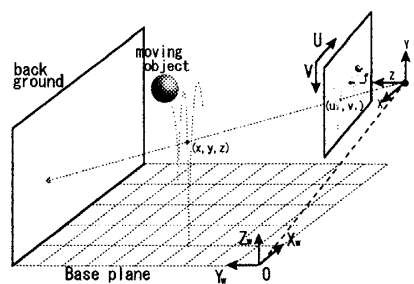


図2 光線情報による位置測定

## 3 3次元位置復元

## 3.1 着地点候補の探索

世界座標系において移動物体が唯一の放物線から構成される場合、その両端点が地表面  $B$  に接すると仮定すれば、カメラ座標系への射影である  $(u_i, v_i)$  から移動物体の3次元軌跡の推定は比較的容易である。しかしながら、ここでは移動物体がバウンドし、その軌跡が任意の数の放物線から構成されることから、カメラ座標上の点列から  $z=0$  に近い着地点候補を推定する必要

† 名古屋工業大学, Nagoya Institute of Technology

‡ 中部大学, Chubu University

§ 愛知県立大学, Aichi Prefectural University

がある。

着地点候補を探索するには、カメラ座標上の点列から複数個存在する着地点候補を見つけだす組み合わせ最適化問題を解く必要がある。ここで、全解探索だけでこの問題を解こうとすると非常に長い時間を費やしてしまう。そこで、本システムではGAを利用した探索を行う。表1にその探索時間例を示すが、GAを利用することにより、全解探索より探索時間を短くすることができる。この例で発見した着地点候補は全て実際の着地点と一致している。なお、ここではG世代(G=1000)を終了条件としている。

表1 実行時間の比較例

探索方法	時間(s)	発見した着地点候補数
全解探索	5459.91(未終了)	—
GA	25.08	3

カメラ座標点数:57個, 実際の着地点数:3個

GAにおける個体群の数をMとし、第i番目の個体を $gene_i(i=0, \dots, M-1)$ と表す。各個体は固定長Nの遺伝子座の配列で表され、第i個体の第j遺伝子座を $gene_i(j)$ とし次式で示すように着地点候補か否かのいずれかの情報を持つ。

$$gene_i(j) = \begin{cases} 1 & : \text{着地点候補} \\ 0 & : \text{非着地点候補} \end{cases} \quad (1)$$

また、着地点候補の遺伝子座番号についてはとくに $q_k(k=0, \dots, K-1)$ と表す。なお、Kは着地点候補数である。

$$q_k = \{j \in [0, N-1], gene_i(j) = 1\} \quad (2)$$

さらに、適応度関数を式(3)で表す。 $f_1$ は着地点候補 $(u_{q_k}, v_{q_k})$ と $(u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})$ を直線で結んだものと観測データである $(u_{q_k}, v_{q_k}), \dots, (u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})$ との距離を示すものである。一方、 $f_2$ は最適化した2次曲線(世界座標系では放物線)と観測データである $(u_{q_k}, v_{q_k}), \dots, (u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})$ との誤差を示し、Fが大きいほど適応度が高いものとする。

$$F = f_1 - f_2 \quad (3)$$

$$f_1 = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{j=q_k}^{q_{k+1}} \left( |v_j - L_{q_k, q_{k+1}}(u_j)| \times |v_j - L_{q_k, q_{k+1}}(u_j)| \right)$$

$$f_2 = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{j=q_k}^{q_{k+1}} \left( v_j - P_{q_k, q_{k+1}}(u_j) \right)^2$$

$P_{q_k, q_{k+1}}(u)$ :  $(u_{q_k}, v_{q_k}), \dots, (u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})$ を近似した最適化2次曲線

$L_{q_k, q_{k+1}}(u)$ :  $(u_{q_k}, v_{q_k})$ と $(u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})$ を両端点とする直線

### 3.2 世界座標系とカメラ座標系の関係

カメラ上での座標点 $(u_i, v_i)$ に対応する世界座標点を $(x_i, y_i, z_i)$ としたとき、世界座標点 $(x_i, y_i, z_i)$ とカメラ座標点 $(u_i, v_i)$ の関係は式(4)で表される。ここで、 $\alpha$ は比例パラメータ、 $\mathbf{R}^{-1}$ (式(5))は3行3列の回転行列 $\mathbf{R}$ の逆行列、 $f$ はカメラ座標における焦点距離、 $[t_x, t_y, t_z]^T$ はカメラの位置ベクトル $\mathbf{C}$ を表す。この式により、カメラ座標点 $(u_i, v_i)$ から世界座標点 $(x_i, y_i, z_i)$ を算出することが可能となる(式(6))。

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \alpha \mathbf{R}^{-1} \begin{pmatrix} u_i \\ v_i \\ f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R}^{-1} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_i = \alpha(R_{11}u_i + R_{12}v_i + R_{13}f) + t_x \\ y_i = \alpha(R_{21}u_i + R_{22}v_i + R_{23}f) + t_y \\ z_i = \alpha(R_{31}u_i + R_{32}v_i + R_{33}f) + t_z \end{cases} \quad (6)$$

移動物体が世界座標上を移動している。このとき、風などの影響が無い理想的な環境では移動物体は $Z_w$ 軸と平行な運動平面H上を移動し、その平面は式 $Ax + By + Cz + D = 0$ で表すことができる。ここで、 $(A, B, C)$ は運動平面の法線ベクトルである。このとき、この運動平面Hと $X_w$ - $Y_w$ 平面の交差する直線は式 $y = -\frac{A}{B}x - \frac{D}{B}$ で表され、 $\frac{A}{B} = A'$ 、 $\frac{D}{B} = D'$ とおくと、式 $y = -A'x - D'$ として表すことができる。ここで、カメラ座標より算出した $y$ の項(式(6))が等しいとすると、パラメータ $\alpha$ を算出できる(式(7))。

$$\alpha = \frac{-A'x_i - D' - t_y}{R_{21}u_i + R_{22}v_i + R_{23}f} \quad (7)$$

$\alpha$ を式(4)に代入することにより、世界座標とカメラ座標の関係式を表すことができる(式(8))。ただし、 $\mathbf{R}^{-1}[u_i, v_i, f]^T$ は式(9)とおく。

$$x_i = \frac{(-D' - t_y)R_1(u_i, v_i) + t_x R_2(u_i, v_i)}{R_2(u_i, v_i) + A'R_1(u_i, v_i)}$$

$$y_i = -A'x_i - D'$$

$$z_i = \frac{-A'x_i - D' - t_y}{R_2(u_i, v_i)} R_3(u_i, v_i) + t_z \quad (8)$$

$$\begin{aligned} R_1(u_i, v_i) &= R_{11}u_i + R_{12}v_i + R_{13}f \\ R_2(u_i, v_i) &= R_{21}u_i + R_{22}v_i + R_{23}f \\ R_3(u_i, v_i) &= R_{31}u_i + R_{32}v_i + R_{33}f \end{aligned} \quad (9)$$

### 3.3 放物線の係数の導出

移動物体は世界座標上で複数放物線の連続と仮定しているために各放物線の係数が必要となる。ここで、 $Z_w$ 軸に平行な平面 $H'$ 上での放物線運動(式(10))を考える。平面 $H'$ は移動物体の運動平面Hを $Z_w$ 軸まわりに $-\theta$ 回転させた面(式(11))とし、さらに、この平面 $H'$ は $X_w$ - $Z_w$ 平面に平行とする。式(11)では、平面 $H'$ 上の座標点 $(x_{H'}, y_{H'}, z_{H'})$ 、平面H上の座標点 $(x, y, z)$ とする。これにより、世界座標での放物線運動の式(式(12))が得られる。

$$z_{H'} = ax_{H'}^2 + bx_{H'} + c \quad (10)$$

$$\begin{pmatrix} x_{H'} \\ y_{H'} \\ z_{H'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) & 0 \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$z = a(x \cos \theta + y \sin \theta)^2 + b(x \cos \theta + y \sin \theta) + c \quad (12)$$

また、平面 $H'$ は法線 $(0, 1, 0)$ を持ち、移動物体の運動平面の法線 $(A, B, C)$ を $Z_w$ 軸まわりに $-\theta$ 回転させる事により得られる式(式(13))を連立させることにより法線 $(A, B, C)$ の値(式(14))が分かり、 $\cos \theta, \sin \theta$ も算出することができる。

$$\begin{pmatrix} \cos(-\theta) & -\sin(-\theta) & 0 \\ \sin(-\theta) & \cos(-\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$A = -\sin\theta \quad B = \cos\theta \quad C = 0 \quad (14)$$

$\cos\theta, \sin\theta$  を式 (12) に代入する。点の数が  $N$  個あるとすると、連立方程式 (式 (15)) で表すことができる。また、式 (16) はこれを行列にして表したものである。式 (16) に式 (8) を代入することにより式 (17) を得ることができる。ここで、線形最小二乗法を使用すると放物線の係数  $(a, b, c)^T$  を算出する。

$$\begin{cases} z_0 = a(x_0 B - y_0 A)^2 + b(x_0 B - y_0 A) + c \\ \vdots \\ z_{N-1} = a(x_{N-1} B - y_{N-1} A)^2 + b(x_{N-1} B - y_{N-1} A) + c \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{pmatrix} z_0 \\ \vdots \\ z_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x_0 B - y_0 A)^2 & (x_0 B - y_0 A) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ (x_{N-1} B - y_{N-1} A)^2 & (x_{N-1} B - y_{N-1} A) & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$\begin{pmatrix} z_0 \\ \vdots \\ z_{N-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0^2 & X_0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{N-1}^2 & X_{N-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} \quad (17)$$

$$X_i = B(x_i(1 + A'^2) + A'D')$$

### 3.4 放物線の最適化

GA での探索結果により軌跡を分割する着地点候補数  $K$  が分かることから、軌跡を構成する放物線は  $K-1$  とすることができる。ただし、軌跡の両端については一般にその端点が着地点でないことからここでは考慮しない。また、式 (8) より  $x_i$  は  $A'$  と  $D'$  の式で表すことができる。このことから、 $y_i$  と  $z_i$  も  $A'$  と  $D'$  の式で表すことができる。また、1つの放物線を式 (16) に代入することができる。ここで、係数  $(a, b, c)$  は線形最小二乗法で算出でき  $A'$  と  $D'$  の式で表すことができる。

放物線の数を  $K-1$  個とすると、算出した係数は  $(a_k, b_k, c_k)$  となる ( $0 \leq k \leq K-2$ )。最適化のときに使用する目的関数  $E$  は、式 (8) の  $z$  座標を表す式と放物線の係数  $(a_k, b_k, c_k)$  を使い二次方程式で算出した値の差が小さくなるような  $(A', B, D')$  を非線形最適化を使い求める。目的関数  $E$  は以下の式 (18) を使用する。ただし、着地点候補に関しては  $z$  座標は 0 である。

$$E(A', B, D') = \sum_{k=0}^{K-2} \sum_{i=q_k}^{q_{k+1}} (z_i - (a_k X_i^2 + b_k X_i + c_k))^2 \quad (18)$$

なお、非線形最適化には  $(A', B, D')$  の初期値が必要となる。ここで、放物線は 2つ着地点候補  $(u_{q_k}, v_{q_k}), (u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})$  を持ち着地点の  $z$  座標の値は 0 となるために、世界座標とカメラ座標の関係式 (8) の  $z$  軸に関して 2つの式 (式 (19)) ができる。これらの式より  $A', D'$  の初期値 (式 (20)) が決まる。また、 $A'$  は  $\frac{A}{B}$  であり、 $A^2 + B^2 = 1$  (式 (14)) より  $B$  の初期値 (式 (20)) も決まる。

$$\begin{aligned} z &= \frac{-A'x_i - D' - t_y}{R_2(u_{q_k}, v_{q_k})} R_3(u_{q_k}, v_{q_k}) + t_z = 0 \\ z &= \frac{-A'x_i - D' - t_y}{R_2(u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})} R_3(u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}}) + t_z = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$A' = \frac{R_2(u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})R_3(u_{q_k}, v_{q_k}) - R_2(u_{q_k}, v_{q_k})R_3(u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})}{R_1(u_{q_k}, v_{q_k})R_3(u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}}) - R_1(u_{q_{k+1}}, v_{q_{k+1}})R_3(u_{q_k}, v_{q_k})}$$

$$B = \sqrt{\frac{1}{A'^2 + 1}} \quad (20)$$

$$D' = \frac{T_3\{R_2(u_{q_k}, v_{q_k}) + A'R_1(u_{q_k}, v_{q_k})\}}{R_3(u_{q_k}, v_{q_k})} - A'T_1 - T_2$$

## 4 実験

### 4.1 シミュレーション

以下に示すようにデータ 1~4 について提案手法の有効性を確認する。図 4, 図 6, 図 8, 図 10 の破線は実験のために作成した世界座標系における移動物体軌跡であり、実線がその復元結果を表す。なお、図 3, 図 5, 図 7, 図 9 はカメラ座標系における移動物体の観測データに相当する。なお、カメラキャリブレーションについては実世界で得たパラメータを使用し、 $U$ - $V$  平面は  $720 \times 480 \text{ pixel}$  の平面に設定した。

#### ● データ 1

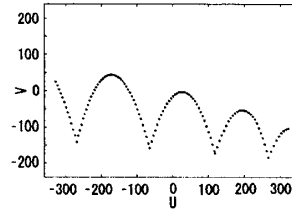


図 3 カメラ座標上の点列 1

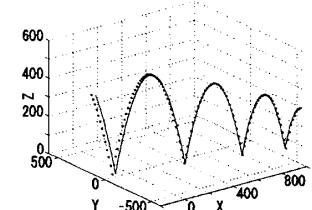


図 4 復元結果 [mm]

#### ● データ 2

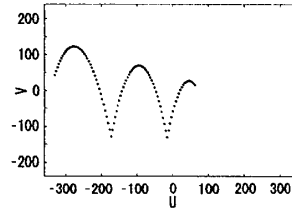


図 5 カメラ座標上の点列 2

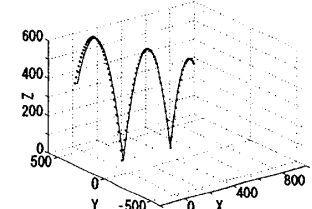


図 6 復元結果 [mm]

#### ● データ 3

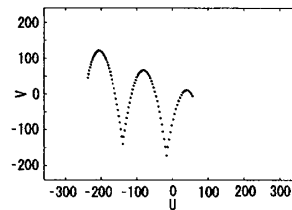


図 7 カメラ座標上の点列 3

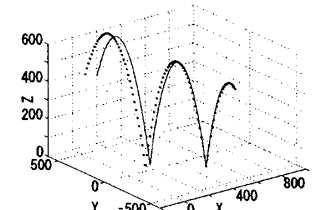


図 8 復元結果 [mm]

#### ● データ 4

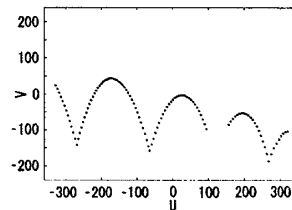


図 9 カメラ座標上の点列 4

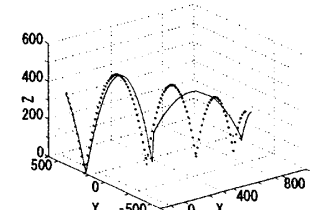


図 10 復元結果 [mm]

### 4.2 実画像

以下に示すようにデータ 5, 6 の実環境について提案手法の有効性を確認する。実映像については背景差分法を用いてその

軌跡を獲得した結果を図11と図13に示す。なお、シミュレーションデータではないため、今回は図12と図14には復元結果のみを実線で示す。使用したカメラのサイズは720×480pixelである。

● データ5

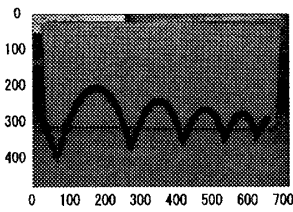


図11 移動物体軌跡 1

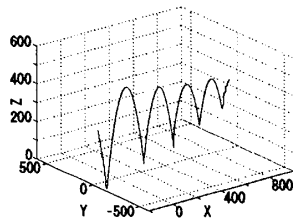


図12 復元結果 [mm]

● データ6

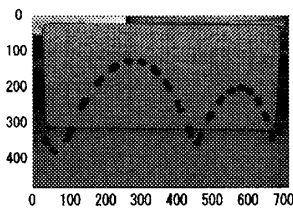


図13 移動物体軌跡 2

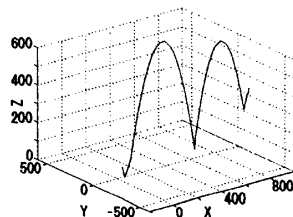


図14 復元結果 [mm]

5 考察

表2にデータ1~4のシミュレーションデータにおける平均誤差を示す。データ1~3については、その平均誤差および図4, 図6, 図8と視認することによって提案手法の有効性を確認することが出来る。一方、地表面付近の観測データの一部について大きく欠損した状況を想定したデータ4(図9)については、実線である復元結果と実験のために作成した世界座標系における移動物体軌跡を表す破線とを比較すると明らかに異なっている。これは着地点候補がGAによる探索で見えなかったためである。

実データであるデータ5, 6についてはシミュレーションのように平均誤差を算出することは今回出来ないが、その復元状況を観察した限り提案手法がある程度有効に働いたのではないかと推測される。

また、着地点探索ではGAは全解探索と比べると処理は短いがデータの数が増えるとGAでの処理の実行時間が増えることが分かる(表3)。本システムでは、2つの着地点に挟まれているデータ点を扱うため軌跡の端点であるデータはGA時、着地点でなくても着地点として扱う。ただし、本来着地点で無いので最適化のときは非着地点として扱った。

6 おわりに

本論文では、ボールの運動を対象として、GAと最適化手法を用いた単眼視点での3次元位置復元手法を提案した。移動物体の軌跡をもとに、GAを用いて着地点候補を探索し、一意に決定することができた。また、一つ一つの放物線運動に対して、2次曲線を仮定した最適化の方法を定式化することによって、運動平面上の放物線を非線形最小二乗法で決定する手法を開発し、シミュレーションならびに実験によって手法の有効性の評価を行った。放物線運動の制約条件を使って最適化を行う手法としてはその理論の妥当性と有効性を確認することができた。提案

表2 誤差の平均 [mm]

データ番号	データ数	平均誤差	標準偏差
1	122	13.3181	8.5238
2	99	8.1048	5.5342
3	99	32.3595	28.3295
4	112	78.5479	50.9871

表3 GAでの探索時間

データ番号	データ数	探索時間 [s]
1	122	75.1570
2	99	51.4840
5	330	307.828
6	616	1980.7

実行環境

Dell Optiplex GX620 Intel(R) Pentium(R) 4 CPU 3.20GHz  
3.19 GHz 1.00 GB RAM  
Windows XP Professional Version 2002 Service Pack 2  
Matlab 7.0.1

手法は単眼画像からの復元手法であるため、実用面においては、簡易なシステムが構成できるというメリットがある反面、3次元位置の復元精度に関しては、複数カメラでの方法に比べると若干の誤差は生じるという点もある。また、3次元位置に復元するまでにGA・最適化で時間をかなり費やしてしまうため、現状では、エンターテインメントやスポーツの判定など、正確で敏速な結果が必要となる場面ではまだ困難な問題もある。そのため精度と処理速度の向上をはかる手法の検討や、風などの影響を受ける環境の場合、着地点がない場合などの拡張が今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は中部大学研究費のサポートによる。ここに感謝申し上げる。

参考文献

- [1] Hawkeye Innovations Ltd. Hawk-eye. <http://www.hawkeyeinnovations.co.uk/>
- [2] 飯塚 健男, 中村 恭之, 和田 俊和:“ステレオカメラによるリアルタイム3次元位置計測システム”, MIRU2004 デモセッション, pp. 312, 2004.
- [3] 塩崎 智行, 村上 俊之:“多自由度能動ステレオビジョンシステムによる移動物体の3次元位置計測”, 電気学会論文誌D, Vol. 125, No. 6, pp. 561-567, 2005.
- [4] 石井規弘, 北原格, 亀田能成, 大田友一:“2視点からの映像を利用したサッカーシーンにおけるボールの位置推定”, 信学会 2007年総合大会講演論文集, D-12-41, 2007.
- [5] 山内結子, 加藤大一郎, 野口英男, 阿部一雄, 榎並和雅:“飛翔体の軌跡表示システム「ショットビュー」ゴルフボールの3次元位置の可視化”, 情報処理学会研究報告, Vol.95, No. 63, pp. 31-36, 1995.
- [6] 高橋正樹, 三須俊彦, 藤井真人, 八木伸行:“ゴルフ中継におけるティーショット軌道表示システム”, 電子情報通信学会総合大会, D-12-38, 2006.
- [7] 小川雄三, 藤吉弘巨:“実空間に対応したMaster-Slavingによる追尾カメラシステム”, 第9回画像センシングシンポジウム, June, 2003.