画像センサによる三次元位置検出を用いた移動物体の軌道予測手法

竹森有祐*　　小林洋二**

A Trajectory Prediction Method of a Moving Object Using Position Detection in 3-D Space by a Vision Sensor

Yusuke TAKEMORI*　　Yohji KOBAYASHI**

ABSTRACT

In this paper, we propose a trajectory prediction method for a three dimensional trajectory of a table tennis ball bouncing on a table. We assume that a trajectory of the bouncing ball is separated into a linear trajectory on XY plane and a parabolic trajectory on XZ plane, and that the parabolic trajectory is attenuated in a fixed ratio in X and Z directions every bounce. After detecting position data of the bouncing ball by the stereo method or the direct linear transformation method using a vision sensor with two CCD cameras, we predict the ball trajectory by obtaining the attenuation ratio of the parabolic trajectories and parameters of the trajectories on XY and XZ planes by the least squares method. Finally, we report performance evaluation of the trajectory prediction by experiments where a manipulator hits the bouncing ball according to command of a hitting point predicted by the proposed method.

Keywords: vision sensor, trajectory prediction, parallel stereo, direct linear transformation method, manipulator

1. はじめに

近年，ロボット技術の高度化に伴い，工場の無人ラインなどの人がいない限られた環境だけでなく，人が生活する環境でタスクを行うロボットが現れてきている．そのようなロボットは，センサで取得した外界の情報によって周囲の環境を把握し，それに応じて早く正確に行動する必要がある．近年では，センサを用いて障害物を認識し，ロボットにそれらを回避させる研究[1]や，飛来する野球ボールの軌道を予測してその到達点を算出し，ロボットにバッティング動作を実行させる研究[2]などが行われている．これらの研究では，センサによって得られた情報から未知の動きをする物体の軌道を予測し，その予測結果に応じた指令をロボットに与えることによって，ロボットを動作させている．本稿では，未知の動きをする物体の一例として台上をバウンドしながら移動する卓球ボール（以下，球と呼ぶ）を取り上げ，画像センサを用いてその軌道を予測する手法を提案する．あわせて画像センサ，コンピュータ，マニピュレータを用いた性能評価実験の結果を報告する．

*　専攻科　機械システム工学専攻
** 機械工学科　教授

2. 軌道予測のための機器構成と動作

本稿で述べる軌道予測手法に用いる機器の構成とその配置を図 1 に示す．これらの機器の具体的な動作は以下の通りである．

(1) 台の上方に平行に設置された二つの CCD カメラで台上を跳ねる球を撮影し，平行ステレオ法[3]あるいは Direct Linear Transformation Method[4]（以下，DLT 法と呼ぶ．）によって球の三次元位置情報を取得する．

(2) 取得した球の三次元位置情報を用いてコンピュータで球の軌道を予測し，台のマニピュレータ側のエンドライン上方における球の到達位置座標を算出する．

(3) ラケットを取り付けたマニピュレータの先端を球の予測到達位置へ先回りさせたあと，マニピュレータの先端を前進させ，取り付けたラケットで打球動作を行う．

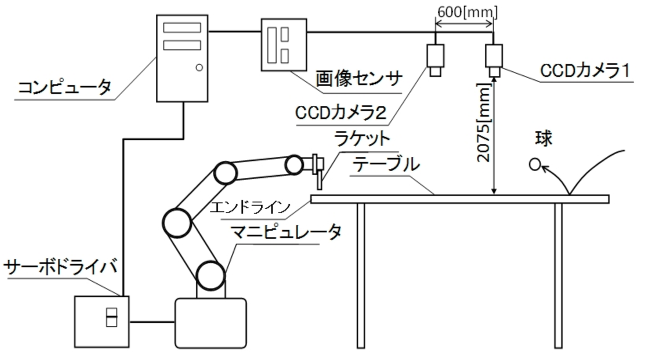


図 1　使用する機器の構成と配置．

3. 三次元位置検出手法

本稿では，平行ステレオ法と DTL 法の二つを用いて，卓球台の上を跳ねながら移動する球の位置を検出した．以下にそれぞれの手法について説明する．

3.1　平行ステレオ法　　平行ステレオ法とは，焦点距離などの特性が同じ二つのカメラを平行に設置して対象物を撮影し，得られた画像に生じる視差を利用して対象物の三次元空間における座標を導出する方法である．対象物を P とし，それを二つのカメラで撮影したときの，カメラ，対象物 P，画像の関係を図 2 に示す．このとき，対象物 P の三次元空間座標 (X,Y,Z) は次の式で求められる．

$$X=\frac{b(x_l+x_r)}{2d},\ Y=\frac{by_r}{d},\ Z=\frac{bf}{d} \tag{3.1}$$

上の式において，f はカメラの焦点距離，(x_l,y_l) および (x_r,y_r) はそれぞれ左右の画像に投影された対象物 P の画像内における座標，d は $d=x_l-x_r$ で定義される視差，b は二つのカメラ間の距離である．

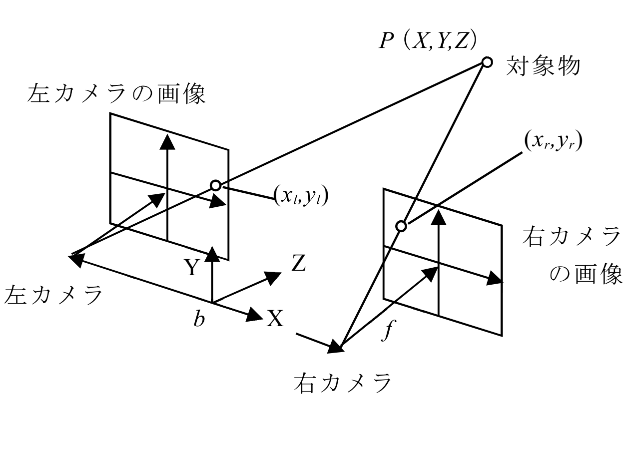


図 2　平行ステレオ法の原理[3]．

平行ステレオ法による位置検出では，カメラのレンズが曲面であるために生じる画像の歪みや，カメラを設置した時の水平・鉛直方向からのずれなどの要因により，対象物の検出位置に誤差が生じる．図 1 において予め位置を測定した台上あるいはその上方の複数の点で球を静止させ，それらの位置と平行ステレオ法によって検出した球の位置との誤差を調べた結果，その誤差は球の位置に依存することがわかった．そこでカメラで検出した球の座標 $(\hat{x},\hat{y},\hat{z})$ に対して以下の補正式を作成し，誤差の補正を行った．

$$z(\hat{x},\hat{z})=\hat{z}+\left(0.0004\hat{x}^2-0.7\hat{x}+321.1\right) \tag{3.2}$$

$$x(\hat{x},z)=\frac{10}{9}\left(\hat{x}+0.245z-90\right) \tag{3.3}$$

$$y(x,\hat{y})=\hat{y}+\frac{250-\hat{y}}{1-\dfrac{1}{0.00006x}} \tag{3.4}$$

3.2　DLT 法　　DLT 法は，カメラ画像内における対象物の二次元座標 (u,v) と，三次元空間内における対象物の位置座標 (X,Y,Z) を用いてカメラのキャリブレーションを行う方法である．この方法では，予め三次元空間 (X,Y,Z) にある対象物を撮影し，画像内での対象物の位置 (u,v) を求める．本研究では，台の長辺方向と短辺方向にそれぞれ 100 mm の間隔で格子点を設け，それらの上方 0～400 mm の位置に球を置き，球の位置 (X,Y,Z) と，画像センサによって検出されたカメラ画像内における球の位置 (u,v) を求めた．このとき，一つの組の (u,v) と (X,Y,Z) の関係は以下の式で表される．

$$u=\frac{XP_1+YP_2+ZP_3+P_4}{XP_9+YP_{10}+ZP_{11}+1} \tag{3.5}$$

$$v=\frac{XP_5+YP_6+ZP_7+P_8}{XP_9+YP_{10}+ZP_{11}+1} \tag{3.6}$$

上の式において $P_1,P_2,\cdots,P_{11}$ は，カメラの位置や姿勢，焦点距離などの情報を内包したカメラパラメータである．まず，これらのカメラパラメータを求める．式(3.5)，(3.6)を変形すると，

$$XP_1+YP_2+ZP_3+P_4-uXP_9-uYP_{10}-uZP_{11}=u \tag{3.7}$$

$$XP_5+YP_6+ZP_7+P_8-vXP_9-vYP_{10}-vZP_{11}=v \tag{3.8}$$

となる．さらに式(3.7)，(3.8)を行列とベクトルの形で表すと以下の式が得られる．

$$\begin{pmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -uX & -uY & -uZ \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -vX & -vY & -vZ \end{pmatrix}\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \tag{3.9}$$

ここでカメラ画像内の対象物の二次元座標(u,v)と，三次元空間における対象物の位置座標(X,Y,Z)の組の数をnとして，式(3.9)をn個並べると以下の式が得られる．

$$
\begin{pmatrix} u_1 & v_1 & u_2 & v_2 & \cdots & u_n & v_n \end{pmatrix}^T
= \begin{pmatrix}
X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_1X_1 & -u_1Y_1 & -u_1Z_1 \\
0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -v_1X_1 & -v_1Y_1 & -v_1Z_1 \\
X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_2X_2 & -u_2Y_2 & -u_2Z_2 \\
0 & 0 & 0 & 0 & X_2 & Y_2 & Z_2 & 1 & -v_2X_2 & -v_2Y_2 & -v_2Z_2 \\
\vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -u_nX_n & -u_nY_n & -u_nZ_n \\
0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -v_nX_n & -v_nY_n & -v_nZ_n
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_{11} \end{pmatrix}
\quad (3.10)
$$

ここで，Tは転置を表す．式(3.10)を$U = XP$で表すと，カメラパラメータのベクトルPは次式で求められる．

$$
P = \left(X^T X\right)^{-1}\left(X^T U\right) \quad (3.11)
$$

つぎに，式(3.11)で得られたカメラパラメータを用いて，二次元の画像データから三次元空間内における対象物の位置座標を算出する．式(3.5)，(3.6)を変形して次式が得られる．

$$
X(P_1 - uP_9) + Y(P_2 - uP_{10}) + Z(P_3 - uP_{11}) = u - P_4 \quad (3.12)
$$

$$
X(P_5 - vP_9) + Y(P_6 - vP_{10}) + Z(P_7 - vP_{11}) = v - P_8 \quad (3.13)
$$

さらに，式(3.12)，(3.13)を行列とベクトルの形で表すと次式になる．

$$
\begin{pmatrix} P_1 - uP_9 & P_2 - uP_{10} & P_3 - uP_{11} \\ P_5 - vP_9 & P_6 - vP_{10} & P_7 - vP_{11} \end{pmatrix}
\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}
= \begin{pmatrix} u - P_4 \\ v - P_8 \end{pmatrix} \quad (3.14)
$$

ステレオカメラのように視点が二つある場合には，一方の視点 A のカメラパラメータ$P_{A1}, P_{A2}, \cdots, P_{A11}$と画像内の対象物の二次元座標$(u_A, v_A)$，他方の視点 B のカメラパラメータ$P_{B1}, P_{B2}, \cdots, P_{B11}$と画像内の対象物の二次元座標$(u_B, v_B)$を用いて，式(3.14)は以下のように表される．

$$
\begin{pmatrix}
P_{A1} - u_A P_{A9} & P_{A2} - u_A P_{A10} & P_{A3} - u_A P_{A11} \\
P_{A5} - v_A P_{A9} & P_{A6} - v_A P_{A10} & P_{A7} - v_A P_{A11} \\
P_{B1} - u_B P_{B9} & P_{B2} - u_B P_{B10} & P_{B3} - u_B P_{B11} \\
P_{B5} - v_B P_{B9} & P_{B6} - v_B P_{B10} & P_{B7} - v_B P_{B11}
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}
= \begin{pmatrix} u_A - P_{A4} \\ v_A - P_{A8} \\ u_B - P_{B4} \\ u_B - P_{B8} \end{pmatrix} \quad (3.15)
$$

式(3.15)を$AE = B$で表すと，三次元空間内における対象物の位置座標(X,Y,Z)は以下の式で求められる．

$$
\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = E = \left(A^T A\right)^{-1}\left(A^T B\right) \quad (3.16)
$$

4. 球の軌道予測手法

4.1　サーチングエリアの設定

球の三次元位置検出を行うために，まず，サーチングエリアを設定する．サーチングエリアは，前章で述べた球の三次元位置検出を行う領域であり，台の上方に設置した二つのカメラの視野が重なる領域をサーチングエリアとして設定する．設定したサーチングエリアを図 3 に示す．球は図の右から左方向へ跳ねながら移動し，マニピュレータ側のエンドラインに到達する．

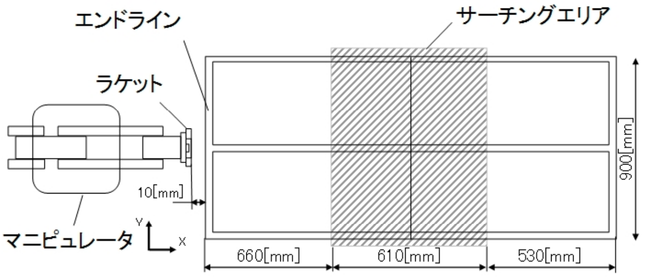


図 3　サーチングエリア．

4.2　予測到達位置計算

台上を跳ねながら移動する球がサーチングエリアに到達すると，画像センサは球の位置を検出する．コンピュータはその位置情報を用いて，以下に述べる手順で図 4 に示すように軌道を XY 平面と XZ 平面に分けて軌道予測計算を行い，マニピュレータ側のエンドラインの上方における球の予測到達位置を算出する．

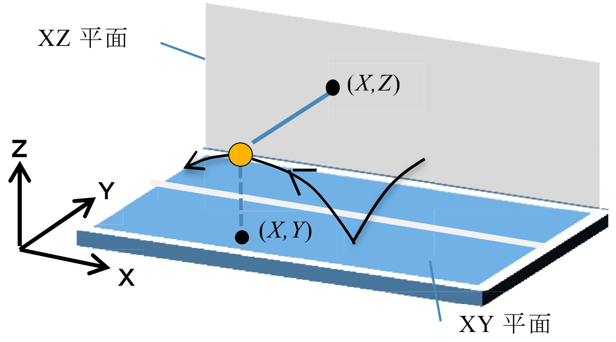


図 4　XY 平面と XZ 平面．

4.2.1　X Y 平面上の軌道予測

球は XY 平面上に直線状の軌道を描いて移動するものと考える．そして，画像センサによって検出した球の位置の X 座標と Y 座標の値から，一次の最小二乗法を用いて直線$y = ax + b$の係数a，bを式(4.1)，(4.2)で算出し，それらを式(4.3)に代入して Y 軸方向の予測到達位置y_kを算出する．なお，ここではサーチングエリアで取得した位置座標の個数をnとし，$\sum$は 1 からn個目までの総和を表す．

$$
a = \frac{n \cdot \sum (XY) - \sum X \sum Y}{n \cdot \sum X^2 - \left(\sum X\right)^2} \quad (4.1)
$$

$$
b = \frac{\sum Y - a \cdot \sum X}{n} \quad (4.2)
$$

$$
y_k = 1800a + b \quad (4.3)
$$

4.2.2　ＸＺ平面上の軌道予測　　球は XZ 平面上に放物線状の軌道を描いて移動するものと考える．このとき，図 5 に示すように，放物線は球の弾性と台面との摩擦の影響によってバウンドするごとに X 軸方向に e_x 倍，Z 軸方向に e_z 倍されていくものと仮定する．（以下では e_x，e_z を減衰率とよぶ．）そして，画像センサによって検出した球の位置の X 座標と Z 座標の値から，二次の最小二乗法によって放物線 $z=ax^2+bx+c$ の係数 a，b，c を求め，式(4.4)を用いて台上の高さ（$Z=0$）のときの X 座標，すなわち，最初の放物線において球が台と接触したときの X 軸方向の位置を計算する．

$$x_1=\frac{-b+\sqrt{b^2-4ac}}{2a},\quad x_2=\frac{-b-\sqrt{b^2-4ac}}{2a} \tag{4.4}$$

つぎに，式(4.5)で初期値を与え，式(4.6)，(4.7)を用いて $X_s(m)>1800$ になるまで繰り返し計算を行う．なお，ここで m は予測軌道において球が台と接触した回数である．

$$X_s(0)=x_2 \tag{4.5}$$

$$m=m+1 \tag{4.6}$$

$$X_s(m)=X_s(m-1)+(x_2-x_1)\cdot e_x^{\,m} \tag{4.7}$$

その後，式(4.8)，(4.9)により球が台のエンドラインに達したときの予測到達高さ z_k を算出する．

$$x=x_2-\frac{X_s(m)-1800}{e_x^{\,m}} \tag{4.8}$$

$$z_k=(ax^2+bx+c)\cdot e_z^{\,m} \tag{4.9}$$

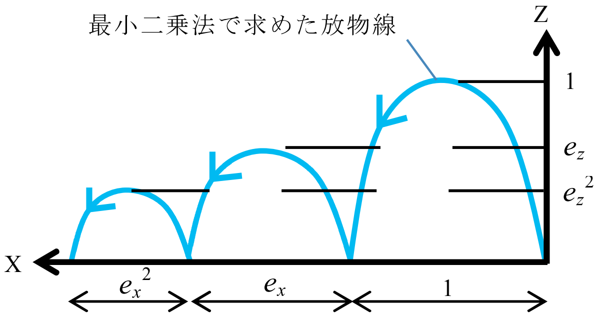


図 5　球の XZ 平面上の軌道のイメージ図．

4.3　減衰率の計算方法　　式(4.7)，(4.8)，(4.9)を計算するためには，球が台に接触したときの X 軸方向の減衰率 e_x と Z 軸方向の減衰率 e_z を求めておく必要がある．ここでは，以下の二つの方法で減衰率を求めた．

4.3.1　オフラインで計算する方法　　これは軌道予測計算を行う前に予め e_x，e_z を求めておく方法である．図 6 に示すように，固定した筒の上部から球を挿入して台上を跳ねさせ，実際の軌道を計測して減衰率を求める．これを 10 回行い，その平均値を計算して減衰率を求める．

4.3.2　オンラインで計算する方法　　これは軌道予測を行いながら，予測された軌道の計算結果を用いて e_x，e_z を求める方法である．図 7 に示すように最小二乗法で求めた一つ目の放物線の頂点の座標を H_1，二つ目の放物線の頂点の座標を H_2 とし，それぞれの放物線軌道で球がバウンドしたときの X 軸方向の距離を W_1，W_2 とすると，減衰率 e_x，e_z は式(4 .10)によって求められる．

$$e_x=\frac{W_2}{W_1},\quad e_z=\frac{H_2}{H_1} \tag{4.10}$$

この方法では，球がサーチングエリア内で台と一度以上接触する（バウンドする）ときに限り，減衰率 e_x，e_z を求めることができる．

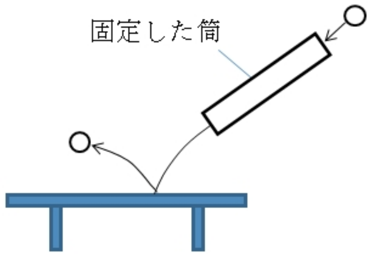


図 6　減衰率を測定する際の球の放出方法．

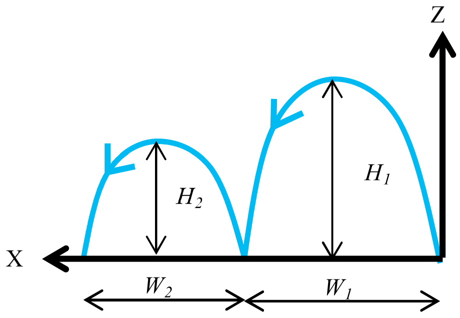


図 7　減衰率の計算に必要となる量．

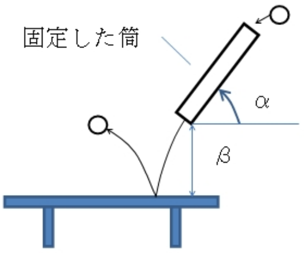
5. 性能評価実験

5.1　実験方法　　ここでは，提案した軌道予測手法の性能を評価するための実験方法について述べる．図 8 に示すように，固定した筒の上部から球を挿入し，台上へ放出して跳ねながら移動させ，提案手法によって求めた球の予測到達点を指令値としてマニピュレータへ送信し，打球動作を行う．このとき，マニピュレータが打球に成功/失敗する割合および予測到達点と実際の到達点の平均誤差を調べた．ここで，平均誤差とは，打球時のビデオ映像

から，ラケットと球の中心の距離を測って算出した誤差の平均値のことである．実験では，以下の三つの項目について評価を行った．

(1) 球の三次元位置検出の方法の違い（平行ステレオ法／DLT 法）による軌道予測精度の変化
(2) 減衰率の計算方法の違い（オンライン／オフライン）による軌道予測精度の変化
(3) 球の放出角度と高さの違いによる軌道予測精度の変化

なお，本実験では図 8 に示すように，台の面に対する筒の傾き α，球の放出高さ β をそれぞれ Case 1, Case 2 のように与え，一つの条件につき 50 回の試行を行った．



	α	β
Case1	37[°]	27[cm]
Case2	44[°]	48[cm]

図 8　球の放出角度と高さ．

5.2　実験の結果と考察

5.2.1　三次元位置検出の方法と軌道予測精度

平行ステレオ法と DLT 法を用いて三次元位置検出を行った場合の打球成功率と平均誤差を表 1 に示す．このとき，減衰率は 4.3.1 のオフライン計算によって求め，球の放出角度と高さについては図 8 の Case 1 に設定した．

表 1　位置検出方法の違いによる性能の比較．

平行ステレオ法	打球成功率[%]	100.0
	平均誤差[mm]	31.1
DLT法	打球成功率[%]	98.0
	平均誤差[mm]	28.4

この結果より，球の三次元位置検出に平行ステレオ法を用いた場合と DLT 法を用いた場合では，打球成功率，平均誤差ともに同等の数値を示していることがわかる．なお，DLT 法の打球失敗の原因は，跳ねながら移動する球が卓球台の継ぎ目に接触して軌道が大きく変化してしまったことであった．以上のことにより，平行ステレオ法と DLT 法はともに有効であり，この二つの手法を用いた場合の軌道予測精度は同等であるといえる．

5.2.2　減衰率の計算方法と軌道予測精度

減衰率 e_x， e_z をオフライン計算とオンライン計算によって求めた場合の打球成功率と平均誤差を表 2 に示す．なお，ここでは三次元位置検出の方法として平行ステレオ法を用い，球の放出角度と高さについては図 8 の Case 2 に設定した．

表 2　減衰率の計算方法の違いによる性能の比較．

オンライン	打球成功率[%]	70.0
	平均誤差[mm]	62.9
オフライン	打球成功率[%]	60.0
	平均誤差[mm]	77.5

この結果より，減衰率をオンライン計算によって求めた場合は，オフライン計算によって求めた場合に比べ，打球成功率において 10 %高い数値を示しており，平均誤差も約 15 mm 小さくなっていることがわかる．このときの誤差の分布図を図 9 に示す．誤差はいずれの場合も（マニピュレータを正面に見て）左側に偏った形で Y 軸方向に 150 mm，Z 軸方向に 300 mm の幅で生じている．打球成功率に差が生じた原因は，減衰率をオフライン計算によって求めた場合に比べ，オンライン計算によって求めた場合の方が，実際の値に近い減衰率であったためだと考えられる．また，誤差が左側に偏っている原因は，図 10 に示すように球が台上を斜めに横切る軌道となっていたため，真っ直ぐに前進して打球動作を行うマニピュレータのラケットの左半面に球が当たってしまったためであると考えられる．

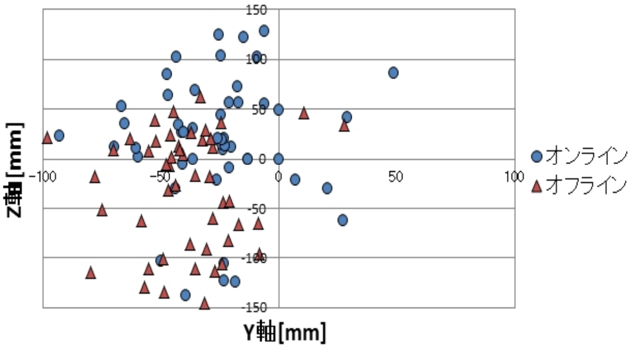


図 9　軌道予測誤差の分布図．

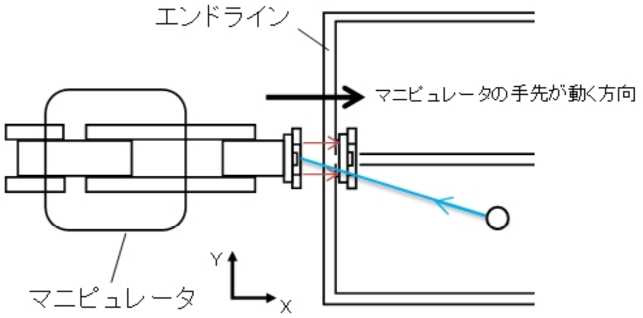


図 10　実験時の球の軌道とマニピュレータの動作．

5.2.3　球の放出角度・高さと軌道予測精度

球の放出角度と高さを変えたときの打球成功率と平均誤差を表 3 に示す．なお，ここでは三次元位置検出の方法として平行ステレオ法を用いた．

表 3　球の放出角度と高さの違いによる性能の比較．

		減衰率の計算方法	
		オンライン	オフライン
Case 1	打球成功率[%]	100.0	100.0
	平均誤差[mm]	27.6	31.1
Case 2	打球成功率[%]	70.0	60.0
	平均誤差[mm]	62.9	77.5

この結果より，Case 2 では減衰率の計算方法（オンライン／オフライン）にかかわらず打球成功率が大きく低下しており，平均誤差も約 60～80 mm と大きくなっていることがわかる．打球成功率が低下した原因として，マニピュレータはラケットを X 軸方向に真っ直ぐに押し出す形で打球動作を行うため，図 11 に示すように，Case 2 では Case 1 に比べて打球可能なインターバルが短くなり，打球タイミングにわずかなずれが生じた場合でも，打球に失敗してしまうことが考えられる．また，Case 2 において平均誤差が大きくなった原因は，実際の減衰率と計算に用いた減衰率の誤差がそれぞれのケースで同等であった場合，図 12 に示すように，実際の軌道と予測軌道の誤差は Case 2 の方が大きくなるためであると考えられる．

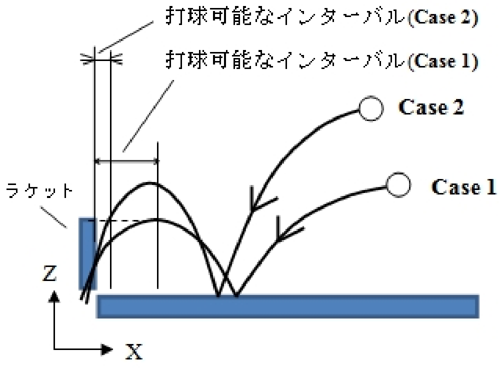


図 11　打球可能なインターバル．

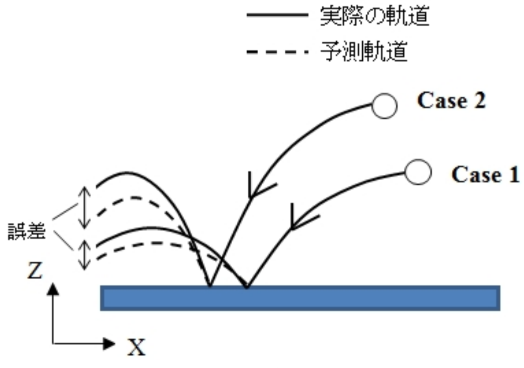


図 12　実際の球の軌道と予測軌道の誤差．

6. おわりに

本稿では，台上を跳ねながら移動する球の三次元軌道予測手法について考察した．本手法では，まず，二台の CCD カメラを用い，平行ステレオ法と DLT 法によって台上を跳ねながら移動する球の三次元位置を検出した．つぎに球の軌道を XY 平面と XZ 平面に分け，球は XY 平面に直線状の，XZ 平面に放物線状の軌道を描いて移動すると仮定し，それぞれ一次と二次の最小二乗法を用いて，球の軌道予測を行った．ここで，XZ 平面の球の軌道は，バウンドするごとに X 軸方向，Z 軸方向ともに，一定の減衰率で減衰すると仮定して，卓球台のエンドライン上方における三次元予測到達位置を算出した．提案した手法の性能評価を行うために，球の軌道予測結果にもとづいた指令値をマニピュレータに与えて打球動作を行わせ，打球成功率と平均誤差を求めた．その結果，まず，台上を跳ねながら移動する球の位置検出方法として平行ステレオ法を用いた場合と DLT 法を用いた場合では，同等の打球成功率が得られた．このことから，これら二つの手法を用いた場合の軌道予測精度は同等であることがわかった．つぎに，減衰率をオフライン計算によって求めた場合と，オンライン計算によって求めた場合の打球成功率を比較した結果，オンライン計算の方が高い精度の軌道予測が可能であることがわかった．最後に，球の放出角度と高さを変更した実験を行い，球の放出角度と高さが大きい場合には，打球成功率が低下することがわかった．この原因として，球の放出角度と高さが大きい場合の方が，マニピュレータが打球可能なインターバルが短くなるために，打球動作を成功させるために要求されるタイミングの精度が高くなることと，減衰率の誤差が存在した場合に予測軌道のずれが大きくなってしまうことの二つが考えられる．

参考文献

(1) 寺田善貴，田村雄介，淺間一：「移動ロボットの軌道生成のためのすれ違いにおける歩行者の行動パターンのモデル化」，第 24 回自律分散システム・シンポジウム資料，pp175-180, 2012.

(2) Taku senoo, Akio Namiki, Masatoshi Ishikawa: “High-Speed Batting Using a Multi-Jointed Manipulator”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp.1191-1196, 2004.

(3) 出口光一郎：「ロボットビジョンの基礎」，コロナ社，pp.34-35, 2000.

(4) 橋原孝博，小村堯，宮原満男：「3 次元映画撮影法の導入に伴う 16 mm 動作解析システムの確立に関する研究」，広島大学総合科学部紀要，Ⅳ. 6 巻，pp.33-41, 1988.