

ハイビジョンカメラによるゴルフボールの3次元位置計測用 追尾システムの研究(ズーム操作による精度向上)

Study of Tracking system for 3-D position of golf ball flight with HDV camera (Zooming operation effect)

○鳴川 敏喜 (福岡工大) 小山 純市 (福岡工大) 谷口 光太郎 (福岡工大)
阿部 宏和 (九州計測器(株)) 加藤 大一郎 (NHK エンジニアリングサービス)
内野 靖博 (NHK 報道局) 高木 市教 (NHK 放送技術局番組制作技術) 正 溝田武人 (福岡工大)

Toshiki NARUKAWA, Fukuoka Institute of Technology,
Wajiro-Higashi 3-30-1 Higashi-ku Fukuoka 811-0295
Junichi KOYAMA, Fukuoka Institute of Technology
Koutarou TANIGUCHI, Fukuoka Institute of Technology
Hirokazu ABE, Kyushu Keisokki Co., Ltd.
Daiichiro KATO, NHK Engineering service Inc.
Yasuhiro UTINO, JAPAN BROADCASTING CORPORATION
Ichitaka TAKAGI, JAPAN BROADCASTING CORPORATION Technical Operations & Engineering Center
Taketo MIZOTA, Fukuoka Institute of Technology

We are developing a system to confirm 3-D coordinate $(X(t), Y(t), Z(t))$ of golf ball flight trajectory by using video camera image. Information of tilt $\theta(t)$ and pan $\phi(t)$ angles of the camera are detected by two rotary encoder. The absolute distance $r(t)$ from the camera to a golf ball will be detected in relation to the number of pixel area of a golf ball on the screen. Zooming mechanism is included in this system and some trials were conducted to include zooming mechanism.

Keyword: golf ball, 3D trajectory, image analysis, pixel area, HDV camera

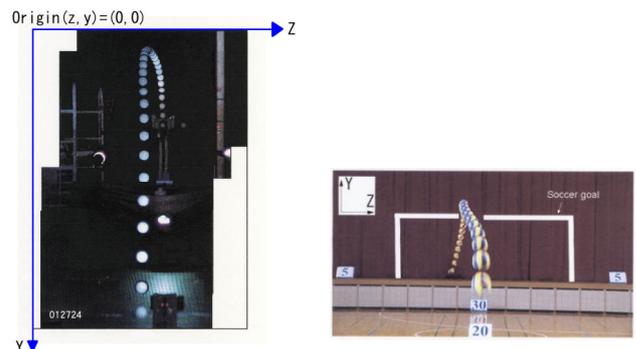
1. はじめに

ゴルフのTV中継を行う放送業界ではゴルフボールの弾道を、例えばCGなどで可視化し、番組内容を充実させ新たな視聴者を獲得したいという考えがある。そのため、これまでNHKは「トラックマン(デンマーク)」の導入を試みた。この装置はレーダー・ドップラー効果を利用してゴルフボールの飛行軌道を測定する実用的な装置である。しかし継続導入には利用料金(放送業界に対する権利料など)が非常に高価であることが壁となっている。また、ゴルフ用品店などで普及している室内測定装置(ミズノ(株)製「ピタゴラス」など)は、ゴルファーに非常に近い位置に測定装置を置くこと、測定の際フラッシュを焚くなどによりプレーの妨げとなる。そのためTV中継に適したゴルフボールの3次元飛行軌道データを検出する装置を開発する要望がある。

本研究室ではこれまでに、一台のビデオカメラから得た画像を解析し、軌道を計算する方法を野球ボール¹⁾とサッカーボール²⁾について成功させている(Fig. 1(a), (b))。その方法は、ボールまでの距離 $X[m]$ についてはビデオカメラからボールまでの直線距離と、画面に映るボールの直径(あるいは面積等)のピクセル数とを関連付けることで求める。ボールの飛行方向については、撮影した映像をストロボ画像化して、定めた座標原点から各々のボール重心までのピクセル数 (Z, Y) をカウントすることで実際の距離データに変換するというものである。しかし、従来の手法は直径が小さいもの(特にゴルフボール)に対しては困難であり、未完成である。

そこで本研究では、当該研究室が行ってきたビデオカメラを使用した画像解析方法を更に発展させ、リアルタイムでゴルフボールの軌道測定を行う機器の開発を試み、これまでに機器の設計・製作を行ってきた³⁾。

本研究では、ゴルフボールの大きさの変化を光学的に計算し、3次元位置情報を導く理論式の検証と、それを基にズーム操作を行った場合の手法について検討した。また、実際に室内での測定を行い、理想値との誤差について考察した。



(a) Camera image with Tilt · Pan (Knuckle ball) (b) Fixed camera image (Less spinning erratic ball)

Fig.1 Examples of trajectory analysis by video camera

2. 測定装置について

2.1 飛行軌道測定システムの構成

ゴルフボールの直径はおよそ 43[mm]で、野球ボール(72[mm])やサッカーボール(220[mm])に比べると小さい。それを測定するには画質の良い、超望遠レンズを装着したビデオカメラが必要となる。また、飛距離 300[m]、高さは 30[m]以上の空間を移動するゴルフボールを撮影するには、カメラをチルト・パンさせる必要がある。

それらを踏まえて、飛行軌道測定システムは次のもので構成される。

- (1) 望遠レンズ搭載のハイビジョンカメラ
- (2) カメラの方向角度を検出するロータリーエンコーダ等のセンサを含む自動駆動型カメラ雲台
- (3) 画像認識・測定用ソフトウェア
- (4) データ収集用コンピュータ
- (5) データローガー、画像入力端子増設用 PC カード

なお、(2)の雲台は将来モーターによる自動追尾を考慮した仕様で設計している。

2.2 測定装置(カメラ雲台)の概要

カメラ及び雲台本体の仕様を Table. 1, 製作した雲台の写真を Photo. 1 に示す. この雲台はカメラを搭載して可動する台座部分と機器類を取める土台部分とで構成される。

使用するカメラ「Canon XLH1」は広角端(×1倍)の水平画角が約 51.6[deg], 望遠端(×20倍)の水平画角が約 2.778[deg]のズームレンズを搭載するハイビジョンカメラである。

チルト・パン角度($\theta(t) \cdot \phi(t)$)を測定するためのロータリーエンコーダの仕様は Table. 2 に示すとおりである. この分解能は 40000[ppr], 1パルスあたりの角度は 0.009[deg]である. この角度の範囲は, 150[m]先であればゴルフボール直径の半分程度である。

Table.1 Specs of Camera and 2-way Head

Camera type	Canon XLH1
Camera size	226×220×496 [m m]
Camera weight	3.75 [kg]
Image sensor	1/3 CCD×3
Lens type	HD 20X zoom lens LIS
Wide Angle	51°36'×30°29'
Telephoto	2°46'×1°34'
Total pixels	1.67 [Mpixel]
Valid pixels	1.56 [Mpixel]
Head size	364×512×363 [m m]
Head weight	12.5 [kg]

Table.2 Spec of the encoder (Built-in multiplication circuit)

Type name	MEH-20-2500PST16
Supply voltage	DC5V ±10%
Detection system	Incremental
Output pulse number	2,500×16 (40,000)
Output phase	A, B, Z phase
Mass	70 [g]

2.3 画像認識・解析ソフトについて

ビデオ画面の中心を原点(Z_p, Y_p)=(0, 0)とした座標系を Fig. 2 に示す. この原点は, ビデオカメラの追尾角度($\theta(t)$, $\phi(t)$)より求めたカメラの光軸方向である. Fig. 2 のように, 実際にはボールが画面の中心からずれて映るため, ボールの重心座標($Z_p(t), Y_p(t)$)を読み取り, 測定値の修正を行う。

このことを踏まえて, 飛翔軌道解析において, データ入力・解析に使用するソフトウェアに要求する動作は次の通りである。

- (1) ハイビジョンビデオカメラの映像(16:9, 1440×1080pixel または 1920×1080pixel)をリアルタイムで取り込む。
- (2) (1)と同時間に, ロータリーエンコーダより検出したカメラの角度を取り込む。

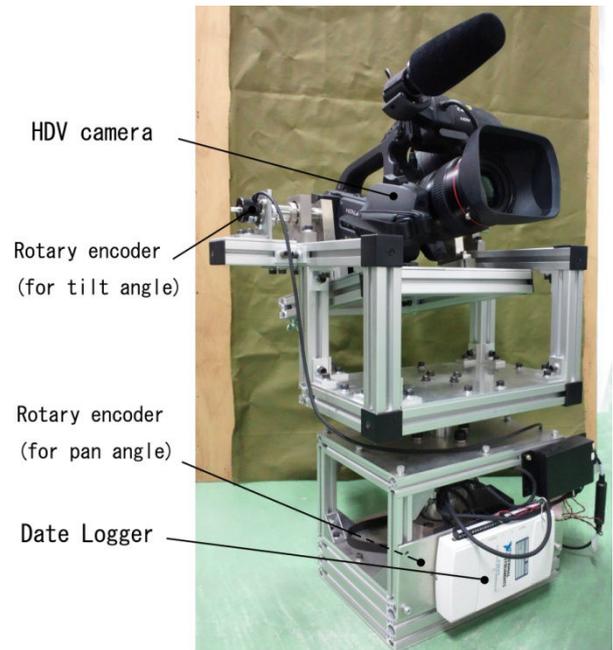


Photo.1 HDV camera and 2-way Head system

- (3) 映像内の, ゴルフボールの領域面積と, ボールの距離の関係を求める。
- (4) 映像の中心座標(0, 0)からゴルフボールの重心点までのピクセルのずれから, 重心位置($Z_p(t), Y_p(t)$)を求める (Fig. 2)。
- (5) (2), (3), (4)の情報より, 時刻 t のゴルフボールの 3次元空間座標($X(t), Y(t), Z(t)$)を計算する。
- (6) (5)の結果を, 撮影終了後十秒以内に出力できること。

上記の条件で製作されたソフトウェア(Photo. 2)は, 現在段階を踏んで開発中である. 現段階では×20倍時の測定に限定して(1)~(5)までの条件を達成している. 現段階での動作としては, その場で取り込んだ映像を指定した時間刻みで静止画像化し, それを解析するという手順を踏むため, 結果の出力には数分を要する. また, 画像一枚あたりの読み込み時間はおよそ 400[ms]~600[ms]である。

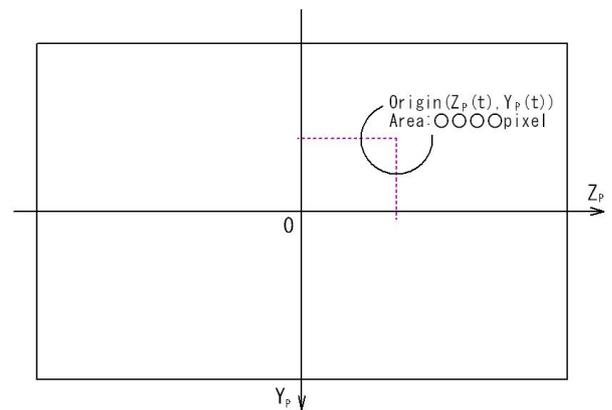


Fig.2 Coordinates in the video screen



Photo.2 Main window of analysis software

3. ゴルフボールの飛翔軌道計算方法について

3.1 飛翔軌道計算の流れ

ビデオカメラがゴルフボールの飛翔方向に向いていると仮定すると、基本的な測定手法としては以下の通りである。

- ① ボールの方向に向いているカメラの角度 ($\theta(t)$, $\phi(t)$) から、カメラの光軸ベクトルを検出する。
- ② ボールまでの直線距離をボールの面積ピクセル数から求める。
- ③ 画面上のボールの位置を検出してボールの位置ベクトルを求める。
- ④ 最終的にボールの3次元位置情報 ($X(t), Y(t), Z(t)$) を確定させる。

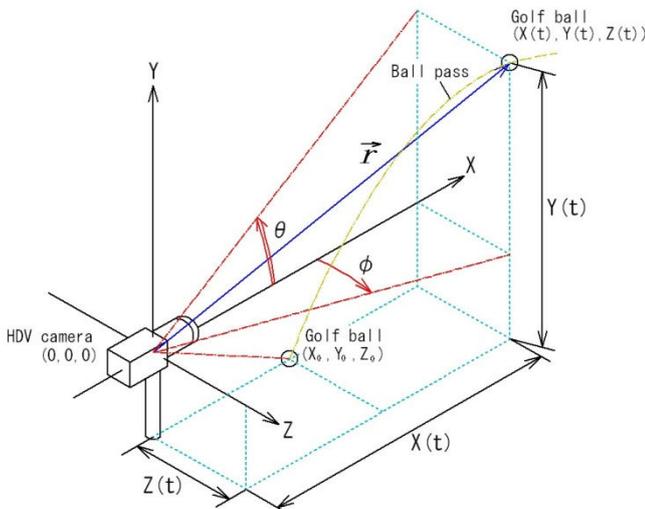


Fig.3 HVD Camera and ball position on spherical coordinate system.

3.2 ボールの大きさと距離 $r(t)$ に関する理論式

この項ではレンズの式を用いて、ビデオカメラで撮影したゴルフボールの大きさ(面積ピクセル A_p)を求め、それを用いてカメラからゴルフボールまでの直線距離 $r(t)$ を求める近似式を作るための手順を示す。

ゴルフボールとカメラレンズとの光学的な位置関係が Fig.4 の場合、カメラからゴルフボールまでの任意の距離 $r(t)$ [m]での水平方向撮影範囲 $W(t)$ [m]は次の(1)式で求められる。

$$W(t) = 2r(t) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad [\text{m}] \quad (1)$$

$W(t)$: 水平方向撮影範囲 [m]

θ : 使用されるレンズの水平画角 [rad]

$r(t)$: 任意に設定したカメラとボール間の直線距離 [m]

t : ゴルフボールの飛翔時間 [s]

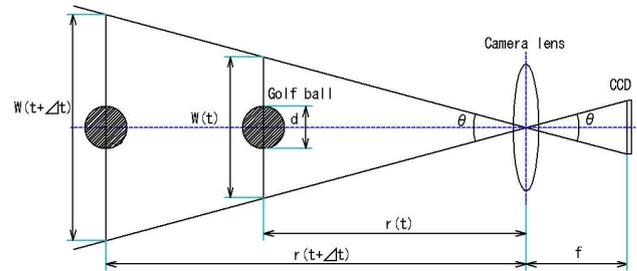


Fig.4 Optical relations with a golf ball and the lens

この撮影範囲に占めるボール直径の割合 $d_{\%}(t)$ [%]は、

$$d_{\%}(t) = \frac{d}{W(t)} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

$d_{\%}(t)$: 撮影範囲に占めるボール直径の割合 [%]

d : ゴルフボールの直径 (=0.042765) [m]

であり、ボールの面積ピクセル A_p [pixel]は

$$A_p(t) = \frac{\left\{W_p \times \frac{d}{W(t)}\right\}^2}{4} \pi \quad [\text{pixel}] \quad (3)$$

A_p : ゴルフボールの面積ピクセル数 [pixel]

W_p : 画像の水平ピクセル数 (=1920) [pixel]

π : 円周率 [-]

と予測できる。

また、カメラからボールまでの直線距離 $r(t)$ は、ボールの面積ピクセル数 A_p が $r(t)$ に対して Fig.5 の様な関係を取るため、下記の式で近似できる。

$$r(t) = aA_p^{-0.5} \quad (4)$$

係数 a の値はレンズの画角により変化する。例えば今回使用するカメラ(Canon XLH1)は望遠端 ($\theta_{x20}=2.7666666$ [deg]) ~ 広角端 ($\theta_{x1}=51.6$ [deg])の間で、 $a=1506.6627 \sim 75.2629$ と変化する。Fig.5でも示されるように、係数 a が大きいほど、面積ピクセル数 A_p の変化はより顕著になる。そのため、より長距離での測定に対応するにはより高倍率のレンズを使用することで対応できることがわかる。

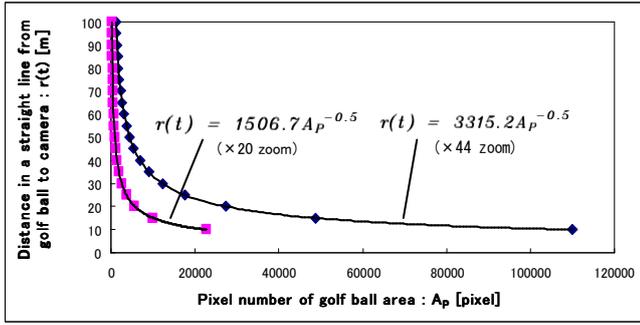


Fig.5 Relations of Pixel area of golf ball and the distance in a straight line

3.3 画面中心からのズレ ($Z_S(t), Y_S(t)$) [m]の計算

まず、ボール直径 d [m]と、ボールの面積ピクセル数 A_p [pixel]を使って 1 ピクセルあたりの実距離 $L_p(t)$ [m/pixel]を求める。

$$L_p(t) = \frac{d}{2 \times \sqrt{\frac{A_p}{\pi}}} \quad [\text{m/pixel}] \quad (5)$$

$L_p(t)$: 1 ピクセルあたりの実距離 [pixel]

次に、画面中心からボール重心までのピクセル数 ($Z_p(t), Y_p(t)$) [pixel]と、(5)式で求めた $L_p(t)$ を使って画面中心からのボール重心座標 ($Z_S(t), Y_S(t)$) [m]を求める。

$$(Z_S(t), Y_S(t)) = (Z_p(t), Y_p(t)) \times L_p(t) \quad [\text{m}] \quad (6)$$

$Z_S(t), Y_S(t)$: 画面中心からのボール重心座標 [m]

$Z_p(t), Y_p(t)$: 画面中心からボール重心までのピクセル数 [pixel]

3.4 ($X(t), Y(t), Z(t)$)座標の計算

画面内でのボールのズレを考慮した式は以下のようになる。カメラからゴルフボールまでの直線距離 $r(t)$ は、3.2項(4)式に画像解析によって測定したボールの面積ピクセル数 A_p を当てはめ計算する。

$$\begin{cases} X(t) = r(t) \cos \theta(t) \cos \phi(t) \\ Y(t) = r(t) \sin \theta(t) - Y_S(t) \\ Z(t) = r(t) \cos \theta(t) \sin \phi(t) + Z_S(t) \end{cases} \quad (7)$$

$X(t), Y(t), Z(t)$: ボールの位置座標 [m]

$r(t)$: カメラとボールとの直線距離 [m]

$\theta(t)$: チルト(上下)側角度 [rad]

$\phi(t)$: パン(左右)側角度 [rad]

4. 測定誤差の検討

装置を使用した場合に予想される最大測定誤差を、ゴルフボールの3次元飛翔軌道解析方法⁴⁾で仮定した軌道を基に最大倍率 20 倍と最小倍率 1 倍の場合で計算した。また、この作業にあたっては、以下の a)~c)のことを条件とした。

- 倍率 20 倍の場合はゴルフボールの着地点まで、倍率 1 倍の場合は 33[m]までとする。
- ゴルフボールの面積ピクセル数 $A_p(t)$ は 3.2 項に基づく数値で正確に測定されている。
- カメラの光軸角度 $\theta(t) \cdot \phi(t)$ それぞれの値に、0.3[deg], 0.1[deg]を交互に足してゆく。

a)については、倍率 1 倍では 37[m]以降の距離での面積ピクセル A_p の変化が非常に乏しくなるためである。また、c)はビデオカメラの画面中心からゴルフボールがずれていることを再現するためである。また、想定したゴルフボールの軌道は以下の初期条件による。計算された軌道は Fig. 6 に示す。

打出し角 θ_{B0} : 15 [deg]

横ブレ角 ϕ_{B0} : 6.7 [deg]

ボール回転軸傾き : 4 [deg]

初速度 U_{B0} : 53 [m/s]

ボール回転数 N_{B0} : 83.3 [rps]

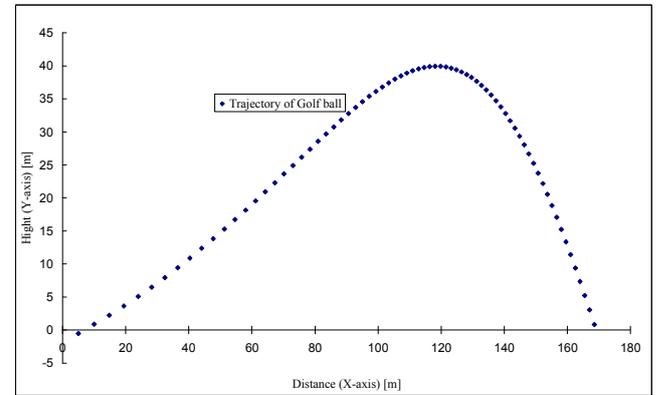
最頂点 : 39.99 [m]

飛距離 : 168.45 [m]

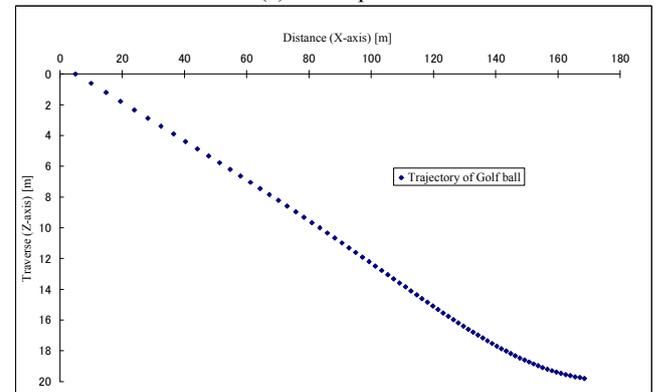
着地点横方向ズレ : 16.91 [m]

飛翔時間 : 7.4 [s]

ゴルフボールの初期座標 : (X_0, Y_0, Z_0) = (5.00, -0.50, 0.00) [m]



(a) X-Y plane



(b) X-Z plane

Fig.6 Golf ball flight trajectory with $\theta_{B0}=15$ [deg], $\phi_{B0}=6.7$ [deg] $U_{B0}=53$ [m/s], 5-iron

倍率 20 倍での計算結果を Table. 3 に、倍率 1 倍での計算結果を Table. 4 に示す。1 倍の場合には前述のように測定可能範囲が限られ、最大誤差も 1.5[m] であるが、20 倍では 1 [m] 以内である。また、 $X(t)$ は $Y(t)$, $Z(t)$ のような補正値を持たないため、どちらの倍率でも $Y(t)$, $Z(t)$ に比べ誤差が大きくなっている。

Table.3 Expected error (×20 zoom)

	X(t)	Y(t)	Z(t)
average[m]	0.0443	0.0016	0.0014
max.[m]	0.7410	0.0039	0.0042

Table.4 Expected error (×1 zoom)

	X(t)	Y(t)	Z(t)
average[m]	0.3315	0.0050	0.0065
max.[m]	1.5252	0.0119	0.0142

5. 屋内実験による測定結果

現段階での性能を検証するために、屋内で限定的な測定実験を行った。ゴルフボールとカメラの位置関係を Fig. 7 に示す。カメラを中心とした座標系であり、ゴルフボールの初期座標は $(X_0, Y_0, Z_0) = (8, 0, 0.75)$ [m] である。また、ゴルフボールは Z 軸方向に対して平行に移動させるために、ボールを移動させるレールを、測定を行うビデオカメラの光軸に対し直角に配置した。測定結果を Fig. 8 に示す。Fig. 8(a) は画像ごとの面積ピクセル数 A_p 、Fig. 8(b), (c) は $X(t), Z(t)$ 座標についてのグラフであり、それぞれ解析ソフト、手作業、理論値の 3 つのデータを記載している。ただし、角度データ $\theta(t)$, $\phi(t)$ は測定したものを共通で使用している。

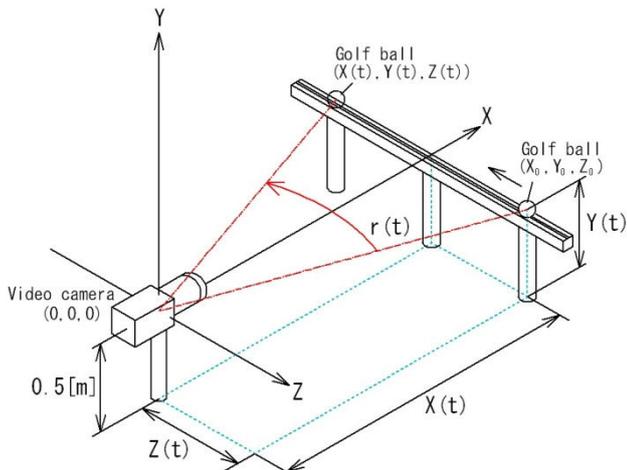
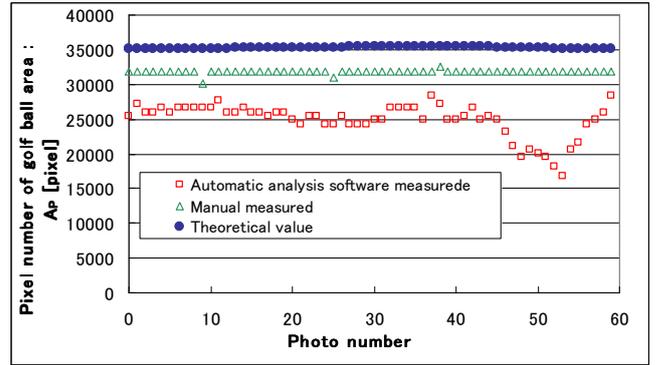


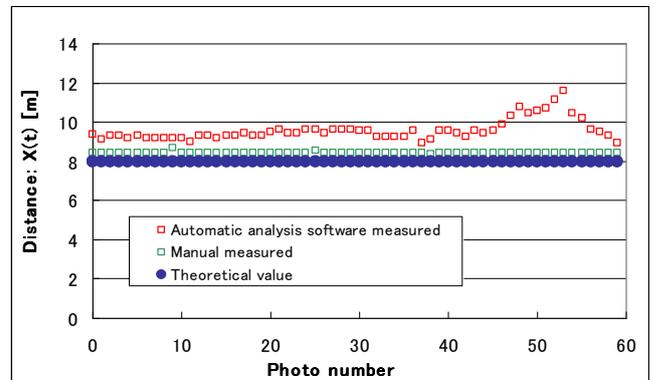
Fig.7 Position relations of a ball and camera

Fig. 8(a) に示すように、解析ソフトで検出した面積ピクセル数 A_p は理論値のものよりも少ない値が出ている。そのため、3.2 項の近似式によって直線距離 $r(t)$ は実際の値よりも長くなってしまふ。3.4 項 (7) 式の座標計算式は $X(t), Y(t), Z(t)$ の計算に直線距離 $r(t)$ が組み込まれている

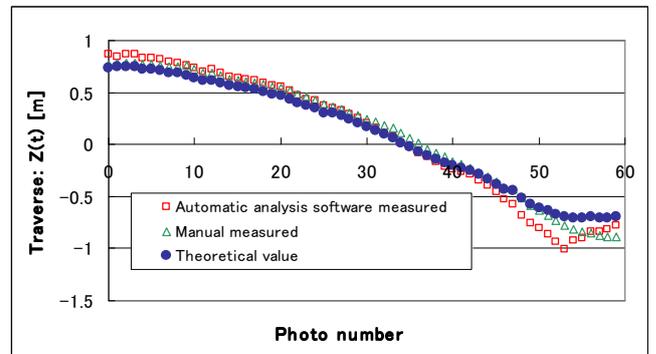
ため、Fig. 8(b), (c) の $X(t), Z(t)$ の結果に影響している。また、ボール重心座標 $Z_p(t), Y_p(t)$ の認識に誤差が生じると考えられるため、その対策を講じる必要がある。



(a) Pixel area of golf ball: A_p



(b) Distance: $X(t)$



(c) Traverse: $Z(t)$

Fig.8 Result of a measurement

6. おわりに

本研究では、ゴルフボールの軌道測定を行う機器の開発において、ゴルフボールの 3 次元位置情報を導く理論式の検証と、ズーム操作による手法の検討、及び限定的な測定を実際に行った。

この研究で得られた結論は次の通りである。

- 1) 画面に写るゴルフボールの面積ピクセル A_p を光学的に計算し、カメラとボール間の直線距離 $r(t)$ の理論式を構築した。これによって、画角(倍率)を変化させた場合(例えば撮影中にズームを行うなど)の検証が可能になっ

た。

- 2) 画面中心(カメラの光軸中心)からボールがずれた場合を考慮した, ゴルフボールの3次元位置座標計算式を構築した。また, 予想される測定誤差を計算したところ, 20倍ズームのレンズであれば, およそ160[m]の範囲で誤差は1[m]以内に収まると予測できた。
- 3) 実際の測定実験を行なった結果, ゴルフボールの面積ビクセル A_p に誤差が生じた。解析ソフトのボール認識率(特に影の影響)のバラツキのほか, ボール重心座標 $Z_p(t), Y_p(t)$ の認識の誤差も生じたと考えられるため, 対策を講じる必要がある。

7. 謝辞

この研究は, 文部科学省科学研究費補助金 基盤研究 (C) 課題番号【22500600】の補助のもとで行われた。

参考文献

- 1) 溝田武人, 河村良行: サイドスピン形ナックルボールの三次元飛しょう軌道画像解析による準定常横力について, 日本機械学会論文集, 73, 1983, 2007
- 2) 黒木康平, 溝田武人, 大屋裕二, 岡島厚, 今井義, 藤村龍平: 弱回転飛翔中のサッカーボールに加わるランダムな空気力の測定と煙法による後流渦の観察, ジョイントシンポジウム2009 スポーツ工学シンポジウム・シンポジウム: ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, 09-45, 94-98, 2009
- 3) 鳴川 敏喜, 長 元気, 井上 陽平, 中嶋 泰寛, 加藤 大一郎, 内野 靖博, 高木 市教, 溝田武人: ビデオカメラ撮影によるゴルフボール飛翔軌道測定システムの開発, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマンダイナミクス2010, pp.338-343, 2010
- 4) 鳴尾丈司: ゴルフボールの3次元飛翔軌道における空力学的研究, 福岡工業大学大学院工学研究科物質工学生産システム工学専攻 博士論文, 23-35, 2004