

# ボールの位置を画面で重ねる

## ——野球の投球——

安藤 幸司\*

### I. はじめに

1980年代前半プロ野球中継で放送されたなかで、投手の投げる球筋をストロボの多重露光のように表示していた映像技術があった。もちろん広い球場なのでストロボの使用など不可能なのだが、ボールの球筋が良くわかって興味深かった。この種の映像が放映されると、職業柄どのような手法で撮影されたものかと試合よりもそちらの方に興味が注がれた。今回、スポーツと計測技術の特集にあたりボールの位置を重ね合わせる手法についての課題を与えられたので、ボールの軌跡を記録し、分析する方法について考えてみることにする。飛翔体の軌跡は、野球に限らず球技全般にわたって興味深いテーマである。これら関連するテーマを以下にあげる。

1. 野球の投球
2. テニス・バレーボールのサーブ
3. サッカー、ラグビーのゴールキック
4. ゴルフボールの打ち出し
5. やり投げ、ハンマー、円盤などの投てき
6. アーチェリーなどの矢の飛行経路
7. フォーメーションプレーにおけるボールの追跡

これらを見てみると、一口にボールの位置計測といっても、1/10,000秒単位の情報がほしいゴルフボールから、数秒にわたるフォーメーションプレーのボール追跡まで時間的に幅広いことがわかる。また、空間的にもアーチェリーのような長い飛行経路を観察したい場合もある。スポーツとはいささか分野を異にするミサイルなどの弾道計測は、ボールの位置計測と似た部分がある。弾道計測は未曾有の開発費用をかけた科学技術で、コンピュータもこの弾道計算のために開発されたといわれている。この計測手法の一部はスポーツ分野にも応用されており、

\*Kohshi Ando ——株式会社ナック

ボールの軌跡を研究する分野から眺めても示唆に富んだものといえる。弾道計測では、飛翔体(ひしよ)の以下の項目を求める。

- a. 姿勢—ヨーイング、ピッチング  
→弾丸、ミサイルの飛行姿勢研究は正しく飛ぶための大事なファクタ
- b. 空間位置の特定  
→理論通りに飛んでいるかどうかを検証
- c. 飛翔速度  
→飛翔体の運動量、威力の検証
- d. スピン(回転)—ローリング  
→弾丸は回転エネルギーも大事なファクタ

ロケット、大型ミサイルなどはそれ自体にジャイロなどのセンサーを取り付けてテレメーターによる無線でデータを送信しているが、小型飛翔体ではこれができないため映像による計測が中心になっている。ボールの位置研究でも飛翔経路、スピン、速度などを計測する関係上、弾道計測と同様に映像でのデータが重要である。

本論では、ボールの飛翔・スピン計測を映像を用いた場合について、弾道計測で行われている手法を交えながら述べてみる。

### II. ボールの動きをとらえる手法

#### II-1. ボールの速さと映像サンプリング時間

ボールの動きをとらえる場合、映像をどのくらいの時間間隔で記録するかが重要な問題となる。高速度カメラを使う場合は撮影速度(コマ/秒)がこれに相当し、一枚の画面に多重露光をする撮影では露光間隔がこれに該当する。最も直感的でわかりやすい算出の仕方は、カメラがねらっている撮影範囲にボールがどのくらいの時間分写っているかのおよその検討をつけ、その1/10を必要最低時間間隔とするやり方である。これはボールを10画面わたって

撮影することに相当する。この場合、ボールのおおよその速度を知っておく必要がある。例えば、毎時100～140キロのスピードで18メートルの距離を進む野球のボールは、0.65秒～0.46秒でこの距離を通過する。この通過時間を10等分した0.065秒～0.046秒、つまり15コマ/秒～21コマ/秒が必要最低速度である。通常のビデオカメラは毎秒30コマの画像が得られるのでこの条件にかなうことになる。もっとも、一般のビデオカメラを計測用には、以下の点に注意しなければならない。

- (1) 短時間露光が得られるビデオカメラを使用すること。通常のビデオカメラの露出時間は1/30秒なのでボールが静止せず流れた像となる。ちなみにビデオカメラの露出時間内に毎時140キロのボールは1.3メートル進む。これは、当然のことながら撮影範囲の水平方向7.2%に相当するため、画流れになる。
- (2) 18メートルの撮影範囲をカメラに収める場合、カメラの解像力に限界があり空間分解能が劣化する。通常のCCDカメラは水平方向500～700画素であるため、撮影範囲18メートルを水平にとると分解能は25mm～36mm程度となり、ボールは2画素の大きさにしかならない。計測には厳しい条件となる。

II-2. 撮影エリアと撮影レンズおよび倍率変動、ピント範囲

撮影範囲を決める要因は、撮影レンズの焦点距離と撮影距離、それに撮像面のイメージサイズである。イメージサイズとは記録面の大きさのことで、16mmフィルムで10.2mm×7.4mm、2/3インチCCDカメラで8.8mm×6.6mmのサイズである。スポーツ分野のような撮影エリアが広い撮影では、光学レイアウトの関係は近似的に以下の式の適用を受ける。

$$L : S = D : f \quad \dots (1)$$

$$S \times D = L \times f$$

L : 被写体の撮影エリア (mm)

S : 撮像面のイメージサイズ (mm)

D : 撮影距離 (mm)

f : レンズ焦点距離 (mm)

(1) 式は、レンズを仲立ちとして被写体とイメージの倍率比が撮影距離とレンズ焦点距離の比に比例していることを表している。つまりレンズを挟んだ被写体の仮想三角形と像の三角形の相似を利用している。これをもとに、前項で述べた18メートルの撮

影エリアを2/3インチCCDカメラで撮影した場合の最適なレンズ焦点距離を求めると、

$$L = 18,000 \text{ mm (投球距離)}$$

$$S = 8.8 \text{ mm (カメラのイメージサイズ)}$$

の条件より、(1)式は

$$2,045.5 = D/f$$

となり、使用するレンズの焦点距離と撮影に必要な撮影距離が特定される。

f(レンズ焦点距離) D(撮影距離)

10 mm 20 m

25 mm 50 m

50 mm 100 m

野球放送で投球をとらえているカメラアングルは、センターバックスクリーンか、バックネット後方である。このカメラアングルでは、ボールがカメラ光軸と同じ方向に進行するためカメラ俯角の補正や、倍率補正、フォーカス範囲(被写界深度)を考慮に入れなければならない(図1参照)。ボールの大きさを像から測定し実際の寸法に照らし合わせて撮影倍率を計算すれば、撮影倍率とレンズ焦点距離をもとに撮影距離を逆算することができる。

$$D = f(1 + M)^2 / M \quad \dots (2)$$

D : 撮影距離(mm)

f : レンズ焦点距離(mm)

M : 撮影倍率

(=像寸法/ボールの実際寸法)

フォーカスが合う撮影距離範囲を被写界深度(ひしゃかいしんど)と呼ぶ。被写界深度は、ピントを合わせた位置(図1の中心点D<sub>2</sub>)から振り分けてフォーカスの合う近点D<sub>n</sub>、遠点D<sub>f</sub>の範囲をいう。被写界深度の計算はパラメータが多く複雑な計算を必要とする。計算のパラメータは、レンズ焦点距離(f)、撮影距離(D)、レンズ絞り(F)を用い以下の式となる。

$$D_n = D_2 \times (H + f) / (H + D) \quad \dots (3)$$

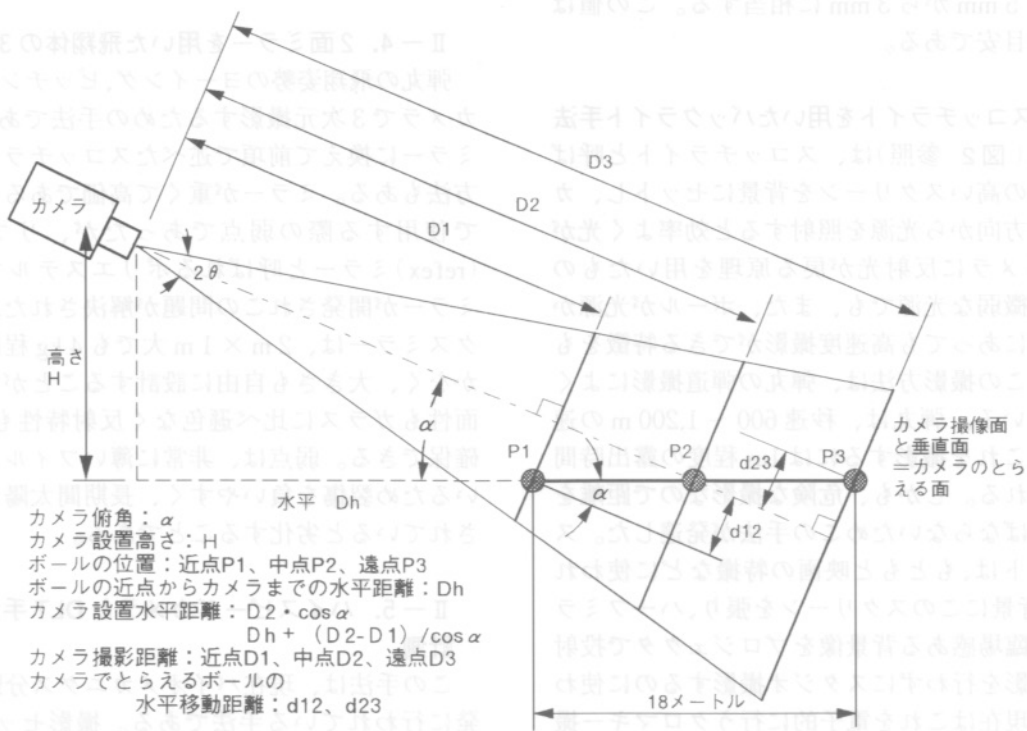
$$D_f = D_2 \times (H - f) / (H - D) \quad \dots (4)$$

$$H = f^2 / d \times F \quad \dots (5)$$

H : 過焦点距離(mm)

d : 定数0.025mm(許容錯乱円)

過焦点とはレンズを無限遠に合わせたときフォーカスの合う近点をあらわす。上式より、被写界深度は、レンズ焦点距離が短いほど(=広角レンズ)、レンズ絞りを絞るほど、撮影距離が遠いほど広がる(D<sub>n</sub>とD<sub>f</sub>の差が大きくなる)。図1をもとにして野球球場のバックネット裏から18メートルのマウンド間のボールを撮影することを考える。ホームペー



カメラ俯角： $\alpha$   
 カメラ設置高さ： $H$   
 ボールの位置：近点P1、中点P2、遠点P3  
 ボールの近点からカメラまでの水平距離： $Dh$   
 カメラ設置水平距離： $D2 \cdot \cos \alpha$   
 $Dh + (D2 - D1) / \cos \alpha$   
 カメラ撮影距離：近点D1、中点D2、遠点D3  
 カメラでとらえるボールの  
 水平移動距離： $d12、d23$

図1 カメラを俯瞰位置からボールをとらえた位置関係図

スからカメラを設置する水平距離  $Dh$  を 30 メートルとし、カメラの設置高さ  $H$  を 6 メートルとする。カメラの俯角は、

$$\alpha = \tan^{-1}(6,000/48,000) \quad \dots(6)$$

$$= 7.125 \text{ deg} \quad \dots(7)$$

となる。撮影距離  $D_2$  を 18 m の中間として、カメラからボール  $P_2$  までの水平距離を  $30 + 9 = 39$  (m) とすると、

$$D_2 = 39,000 / \cos \alpha \quad \dots(8)$$

$$= 39,304 \text{ mm}$$

となる。通常、カメラレンズのフォーカシングは、10 m 以上では  $\infty$  であるから 39 m の撮影距離は被写界深度に入っている。これを確かめるためにレンズを選んで(5)式に代入してみる。

18 m の投球距離を画面の縦位置におさめるため見かけ上の撮影エリアを求める。

$$d_{12} + d_{23} = 18,000 \times \sin \alpha \quad \dots(9)$$

$$= 2,233 \text{ mm} \quad \dots(10)$$

撮影距離  $D_2 = 39,304$  m および縦方向の見かけ上の撮影エリアを 3 m とすると、必要レンズは(2)式より、

$$M = 6.6 \text{ mm} / 3,000 \text{ mm} = 1/454.5 \quad \dots(11)$$

$$f = 39,304 \times M / (1 + M)^2$$

$$= 86 \text{ mm} \quad \dots(12)$$

となる。カメラレンズの絞りを  $F = 2.0$  として、以上のパラメータを(5)式に代入すると、

$$H = 86^2 / (0.025 \times 2)$$

$$= 148,258 \text{ mm} \quad \dots(13)$$

となり、(3)(4)より

$$D_n = D_2 \times (H + f) / (H + D)$$

$$= 31.09 \text{ m} \quad \dots(14)$$

$$D_f = D_2 \times (H - f) / (H - D)$$

$$= 53.45 \text{ m} \quad \dots(15)$$

を得る。(14)(15)式の結果は、レンズセッティングがボール投球距離が被写界深度内に入っていることを示している。カメラに写るボールの大きさを遠い所 ( $P_3$ ) と近い所 ( $P_1$ ) の倍率で調べてみると、 $D_3 (= 48.374 \text{ m})$  と  $D_1 (= 30.233 \text{ m})$  より、

$$M_1 = 1/349.5 \quad \dots(16)$$

$$M_3 = 1/560 \quad \dots(17)$$

となり約 60% の違いとなる。ボールの大きさを約 80 mm とすると、この撮影倍率での CCD 撮像面上の大きさの違いは、画素数にして 10 画素から 17 画素に相当する。また、この例題での撮影レイアウトから、CCD カメラ 1 画素当たりの被写体の大きさ

を調べると5 mm から3 mm に相当する。この値は誤差要因の目安である。

II-3. スコッチライトを用いたバックライト手法

この手法(図2 参照)は、スコッチライトと呼ばれる反射率の高いスクリーンを背景にセットし、カメラと同一方向から光源を照射すると効率よく光が反射されカメラに反射光が戻る原理を用いたもので、比較的微弱な光源でも、また、ボールが光源から遠い位置にあっても高速度撮影ができる特徴をもっている。この撮影方法は、弾丸の弾道撮影によく用いられている。弾丸は、秒速600~1,200 mの速度をもち、これを撮影するには1 $\mu$ s程度露出時間が必要とされる。しかも、危険な撮影なので距離を置かなければならないためこの手法が発達した。スコッチライトは、もともと映画の特撮などに使われたもので、背景にこのスクリーンを張り、ハーフミラーを介して臨場感ある背景像をプロジェクタで投射してロケ撮影を行わずにスタジオ撮影するのに使われていた。現在はこれを電子的に行うクロマキー撮影法が一般的である。このスコッチライトは、VICON装置のようなモーションキャプチャ装置のランドマーク(反射マーカ)用にも用いられている。反射効率が通常の白色光の1,000倍程度ありカメラと同一軸で光を投射すればかなり離れた場所からでも強く反射するので高速度撮影が可能である。ボールの飛翔経路を長くとりたい場合は、図2のような装置を経路に沿って何か所かに配置して撮影を行う。

II-4. 2面ミラーを用いた飛翔体の3次元計測

弾丸の飛翔姿勢のヨーイング、ピッチングを一台のカメラで3次元撮影するための手法である(図3)。ミラーに換えて前項で述べたスコッチライトを使う方法もある。ミラーが重くて高価であることが現場で使用する際の弱点であったが、リフレックス(reflex)ミラーと呼ばれるポリエステルフィルムのミラーが開発されこの問題が解決された。リフレックスミラーは、2m×1m大でも4kg程度の重さしかなく、大きさも自由に設計することができる。鏡面性もガラスに比べ遜色なく反射特性も90%以上確保できる。弱点は、非常に薄いフィルムでできているため裂傷を負いやすく、長期間太陽光下にさらされていると劣化することである。

II-5. ハイスピードカメラとDLT手法の3次元計測

この手法は、現在バイオメカニクス分野で最も活発に行われている手法である。撮影セッティング、解析にばう大な労力がかかる反面、得られるデータ量は多い。

III. ボールの位置を画面で重ねる方法

高速度カメラは、画像の取り込みを速くして、ボールのような高速で推移する現象を通常のカメラの10倍~100倍の速度で撮影する事が可能である。高速度カメラでは、基本的に一枚の画像に現像をダ

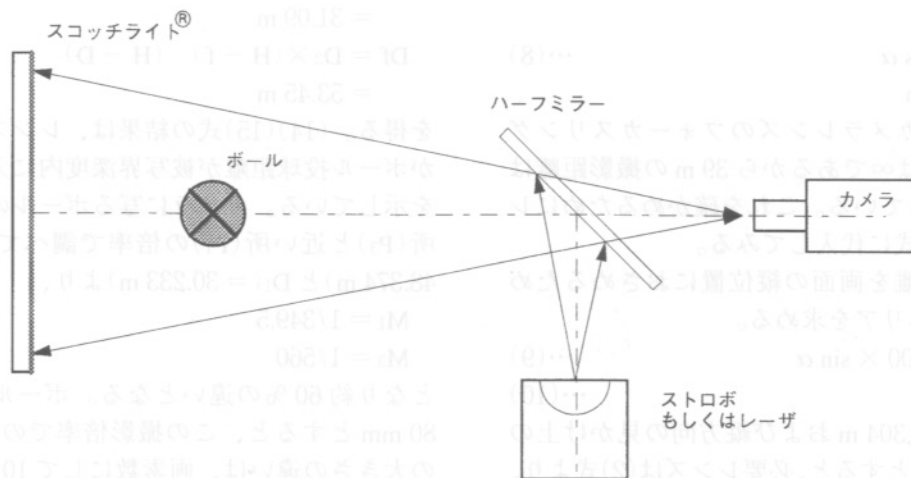


図2 スコッチライト®ハーフミラーを用いたバックライト撮影

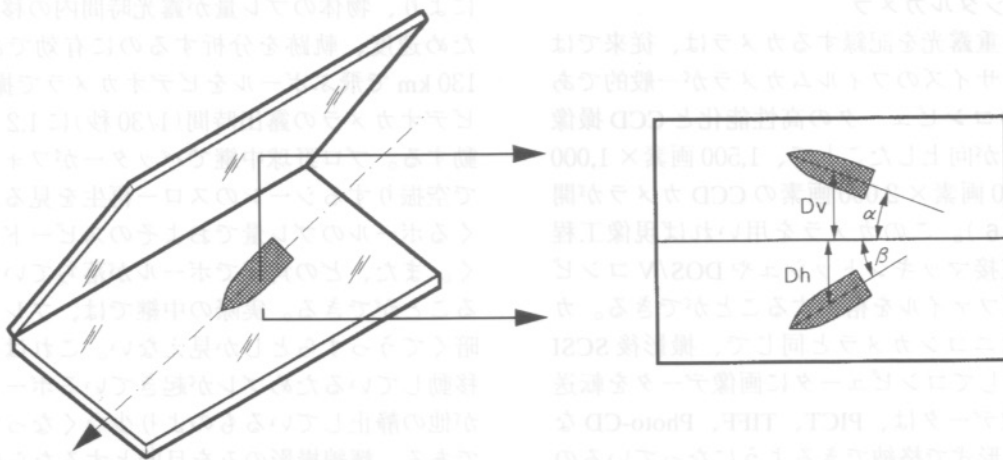


図3 2面ミラーを用いた飛翔体の3次元同時測定

ばらせることはない。また、高速度カメラは高価で低速域から高速域まで他種類の高速度カメラを取りそろえることが不可能な場合、一枚の画像の中に多重露光を行う方法は有効な手段である。

### Ⅲ-1. ストロボによる多重露光

最も簡便で、高画質な多重露光手法がストロボによる方法である。ストロボは、1930年代前半、マサチューセッツ工科大学のハロルド・エジャートン(H. Edgerton)博士によって発明された。博士の偉大な所は、彼が発明家であったばかりでなく自ら発明したストロボを駆使して興味ある写真をたくさん撮ったすぐれた写真家でもあったことである。ラグビーボールのキックの瞬間写真や、棒高跳び選手のポールをクリアする多重露光写真は、一枚の写真から多くの事柄を読みとることができる。エジャートンの撮影は、多くの写真家がそうであるように決定的な写真を得るまで辛抱強く何度も何度も撮影を繰り返したといわれる。使用したフィルムカメラも、ほとんどの作品が8×10インチ(フィルムサイズが20.3cm×25.4cmのシートフィルム、ほぼA4サイズ)の大判カメラや、4×5インチのリンホフを使っていた。日本でのストロボスコープは菅原研究所が国産化に力を入れ、目的に応じて数多くのストロボを開発している(図4、5)。ストロボは、繰り返し発光が電子的に決められるため時間情報精度が高い。また、露光時間もストロボの発光時間で決められ100 $\mu$ s～20 $\mu$ s程度の発光幅で200Hz程度の繰り返しが可能である。ストロボの問題点は、露出がス



図4 ストロボスコープ(菅原研究所提供)

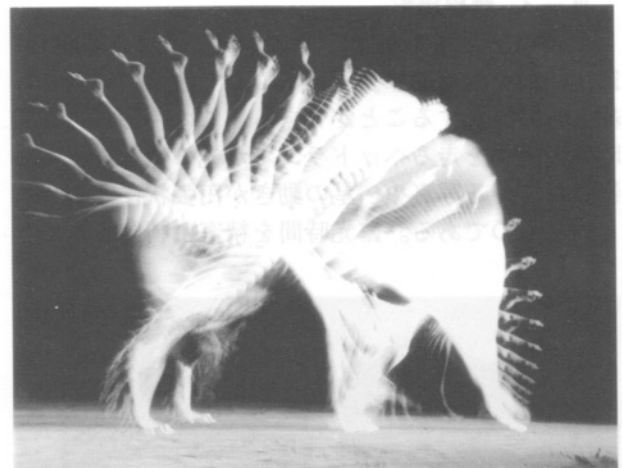


図5 ストロボスコープによる撮影例(菅原研究所提供)

トロボ発光で決められるため屋外撮影や明るい室内では不向きなことである。

Ⅲ-2. デジタルカメラ

ストロボ多重露光を記録するカメラは、従来では35 mm ライカサイズのフィルムカメラが一般的であった。最近のコンピュータの高性能化と CCD 撮像素子製造技術が向上したことで、1,500 画素×1,000 画素や、3,000 画素×2,000 画素の CCD カメラが開発された(図6)。このカメラを用いれば現像工程を省いて、直接マッキントッシュや DOS/V コンピュータに画像ファイルを格納することができる。カメラの操作はニコンカメラと同じで、撮影後 SCSI ケーブルを介してコンピュータに画像データを転送できる。画像データは、PICT、TIFF、Photo-CD などのファイル形式で格納できるようになっているので DTP(印刷)や一般のアプリケーションに流用しやすくなっている。カメラ本体にも 30 枚程度の画像が蓄えられるハードディスクドライブが内蔵され操作性は一般のフィルムカメラと変わらない。デジタルスティルカメラは画像の転送、通信上便利が良いので、即時性を争う報道カメラマンの受けがよく、ロスアンゼルスオリンピックから使われはじめ、バルセロナオリンピックでは質・量とも最も充実したものとなった。4年の歳月を経て、さらに使いやすく、高画質になっている。一枚の画像が 4.5 MB ~ 18 MB の情報なので高性能のコンピュータを用いないと処理に時間がかかる。

Ⅲ-3. 輝線撮影

飛翔物体を光源などで非常に明るくできる場合、露出時間を積極的に長くすることで物体の移動を輝線として撮影することができる。この手法は、夜間時高速道路を走るヘッドランプが光の帯となって撮影されている写真や、星の動きが円弧状に写る写真と同じものである。露光時間を精密に制御すること



図6 Kodak デジタルカメラ

により、物体のブレ量が露光時間内の移動量となるため速度、軌跡を分析するのに有効である。毎時 130 km で飛ぶボールをビデオカメラで撮影すると、ビデオカメラの露出時間(1/30 秒)に 1.2 メートル移動する。プロ野球中継でバッターがフォークボールで空振りするシーンのスロー再生を見ると、飛んでくるボールのブレ量でおおよそのスピードの検討がつく。また、どの角度でボールが落ちていったかを知ることができる。実際の中継では、ブレたボールは暗くてうっすらとしか見えない。これは、ボールが移動しているためブレが起きているボールの露光量が他の静止しているものより少なくなっているためである。輝線撮影のみを目的とするならば

- i) 周囲の明るさを落としボールの軌跡に照明をあてる。
- ii) ボールは反射の良い材質を選ぶ
- iii) 周囲は、反射の高い材質を避けるなどの工夫が必要である。

Ⅲ-4. ハイスピードカメラと画像処理を用いた方法

この方法は、『SPORTIAS』、『VICON』、『ARIEL』、『Image Express』などの市販ソフトに見られる手法で、予め高速度カメラで対象を撮影しておき、コンピュータを使ってターゲットマークを読み込み、この数値データをもとにコンピュータ画面上でスティックピクチャを重ね合わせるものである。最も一般的な手法であり大量のデータを取得することができるが、システム構築の費用が高く結果を出すまでの時間もかかる。

Ⅲ-5. 画像メモリによる多重録画

この手法は、1980年代始めに日本テレビがプロ野球中継に取り入れたものである。この手法は、テレビカメラでとらえた映像信号を一旦フレームメモリに受け、特定の形態をもつ物体だけをメモリ内に残し、次に送られてくるビデオ信号に重ね合わせていく手法である(図7)。抽出できる特定の形態は、輝度の高い物、丸い物体、前の画面と引き算をして移動している物体などであり、野球のボールでは、丸くて輝度の高い白いボールという条件でフィルタをかけ、かつ投球の経路以外をマスクングして検出能力を高めている。この装置は、1/30 秒間で処理を行うため、即座に表示することができる。但し、この装置の基本設計が 1/30 秒のビデオ信号をペー

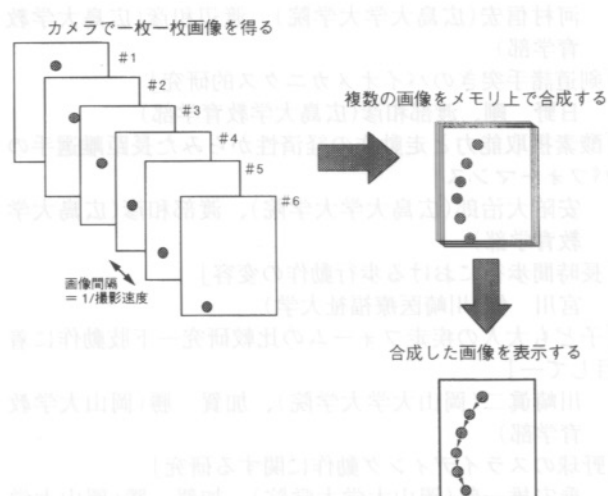


図7 ビデオカメラによる多重露光の原理

スにしているため、多重露光のサンプリングは30 Hzとなる。この周波数は、野球の投球に使うと、20ショット程度のボールを重畳(ちょうじょう)する計算になる。したがって、撮影エリアをせばめて、相対的に像スピードが増すと通常のビデオレートではコマ不足になり威力を発揮しない。これ以上のサンプリングをするには、高速度カメラで一旦撮影し、再生時にこの装置を利用する事が考えられる。ひとつの画面に多重露光された映像からは、ベクトル、トラジェクトリー、速度、角速度等のデータを得ることができる(図8)。

### Ⅲ-6. CCD電子シャッターと画像メモリ方式による多重露光

前項の画像メモリによる多重露光装置が30 Hzであるのに対し、本装置(図9)はより周波数の高い500 Hz ~ 500,000 Hzまでの多重露光を可能にしたビデオカメラである。『Flashcam』と呼ばれるビデオカメラは、カメラ内部にデジタルメモリ、電子

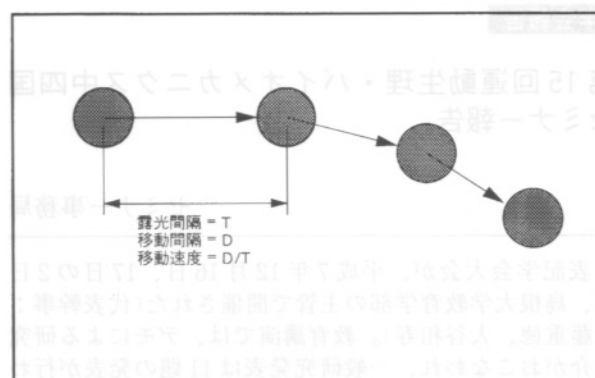


図8 多重露光像からの分析

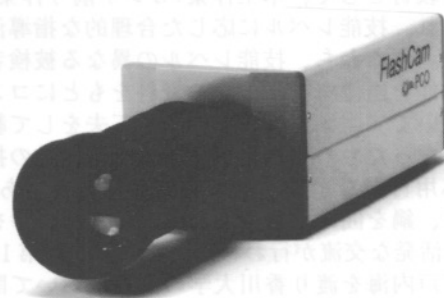


図9 多重露光カメラ「フラッシュカム」

シャッターを内蔵し、露出設定時間 1us ~ 999us、繰り返し間隔 1us ~ 999us、多重露光設定回数 1 ~ 10 発の設定が可能である。外部からトリガ信号(TTL)をもらうことで予めセットされたタイミングで一連の多重露光を行うことができる。多重露光された映像は、内蔵のデジタルメモリからアナログビデオ信号として出力され、また、内蔵のセントロニクスポートからは、この映像をデジタルデータとして出力することが可能になっている。このカメラは、ゴルフのインパクトや、サンプリング周波数が高い高倍率撮影に効果がある。