

# 高速度写真撮影手法による写真計測法

## —バイオメカニクスシネマトグラフィ—

安藤 幸司\*

### はじめに

「健全なる精神は、健全なる身体に宿る」、この古い諺の真意は他に譲るとしても、われわれはいつ、いかなるときでもこの五体を引きずり引きずられながら感覚し、認識し、思考し、行動している。この五体を自然の力に抗しながら働かせると1つの運動ができあがる。運動は、しかしながら、他が認識するには視覚以外に何らの手段ももち得ないもので、自然科学的見地からヒトの運動学を構築しようと試みる場合でも、視覚もしくは映像の果たす役割が大きな位置を占めることは異論のないところであろう。英語のなかの運動を表わす学術用語の多くに、Kine- (Kines(i)-) が用いられ、映画を表わす Kinema と同じ派生語になっているが、いずれもギリシャ語の Kinema (動く) の意から派生したもので、辞書で調べる限り Kinema から生まれた言葉はこの2種類である。

本稿は、映画撮影手法から生まれた高速度写真撮影手法の生いたちと、計測の一手段として今日まで至っているその経緯を運動学の立場から述べ、合わせて写真計測法の概要を紹介することにする。

### 写真計測と運動学……その胎動期

この世に写真が現れたのは、1839年でフランス人のタゲールによってもたらされた<sup>3)</sup>。わずか140年前のことである。このタゲレオタイプ法と呼ばれた写真術は、しかしながら、強い直射日光下で30分間もの露光時間を必要とした。この写真の出現は、当時の人々の興味をそそるには十分なものであったけれども、動きの速い物体を撮影するには程遠いものであった。動きの速いもの、連続した写真をはじめて撮

影し成功を取めたのは、19世紀後半アメリカの写真家エドワード・マイブリッジ (E. Muybridge) である。彼は、映画技術史のなかでまず最初に名をあげられる1人であり、人体および動物の動きを克明に撮影した最初の人でもある。マイブリッジに関する話は、とても興味深いので引用しておく。ことは、1872年、カルフォルニアで起こった。セントラルパシフィック鉄道の創始者の1人で元カルフォルニア州知事でもあったスタンフォードと彼の友人は、無類の競馬狂であったが、談たまたま疾走する馬の足に及んで大いに意見をたたかわすに至った。スタンフォードが、疾走する馬の足はその一瞬間全て地面を離れ宙に浮くと主張するのに対し、友人は、いついかなるときでも最低1つの足は地についているといひ張ったため、25,000ドルの賭けが行われることになったのである。スタンフォードはこれを写真によって証明しようとし、写真家マイブリッジを雇った。最初の試みは、露出時間が1/12秒のため像がぼけてしまって成功しなかった。彼はシャッターを改良して再度36km/時で疾駆する名馬クライデントをとらえた。けれどネガはひどい露出不足であった。当時のフィルムの感度もレンズも非常に暗かったわけであるが、そのなかの一枚は、まぎれもなく4本の足が宙を離れており、スタンフォードは見事この賭けに勝ったのである。彼は、その後、マイブリッジにさらに決定的な写真を撮らせる努力を惜しまなかった。そこでマイブリッジは、特別な馬場を設け土埃を防ぐために波状のゴムを敷き、片側には、長さ12mの暗室としても完全なカメラハウスを設けた。反対側には、番号付きの垂直線を記入した白い綿布のフェンスを立て、基底部分には地上からの高さを示すため、約10cmごとに水平線をひいたボール紙をつけた。カメラは走路と直角に12台設置した(これは、のちには24台となり30cm間隔で置かれた)。シャッターは、セントラルパシフィック鉄道のアイザックス

\*Koshi Ando—(株)ナック、写真計測グループ

が製作した電動装置で、走路と直角に張られた糸が疾走する馬によって切られると、シャッターが連続的に開く仕組みになっていた。この装置には、4万ドルの大金が当てられたとして評判になったもので、当時としてはおそろしく高速度の1/2000秒の露出時間を可能としていた。このようにして撮られた馬の姿態は、画壇に沈痛な論議を巻き起こした。彼の写真が、画家たちの描いてきたものが誤りであったことを明瞭に示していたからである。彼は、その後この成功によって人間の動きや動物の動きをいろいろな角度から撮影し、それを集大成して数々の本にまとめている<sup>6,7,13)</sup>。

1840年代に生まれた写真術は、第1次、第2次大戦を通じて大きな成長を遂げた。全ての科学技術がそうであったように、写真分野のなかの写真計測も大きな飛躍を遂げたのである。マイブリッジ以後、ジョージ・イーストマンがロールフィルムを発明し、トーマス・エジソンが映画カメラを発明してのち、いろいろな方面で映画が使われるようになった。特にスポーツ分野では、結果としての記録以外にプロセス(経過)を記録するものがなかったために、映画カメラは重要な記録装置となっていった。初期のカメラは、1秒間に16枚の連続写真を撮り続けることができた。このコマ速度は、しかしながら、映写速度を主体にして経験的に決められたものであったために、スポーツなどの速い動きをゆっくり見るには不十分なものであった。この方面には、1秒間に数百枚から数千枚の写真撮影ができる高速度カメラ(ハイスピードカメラ)が活躍した。カメラの撮影速度により、カメラのメカニズムは異なる。このことは後で述べることにし、この項では高速度カメラの開発における面白いエピソードを述べることにする。現在最もよく使われているハイスピードカメラ

は、ロータリープリズム方式と呼ばれるタイプのもので、1,000コマ/秒~10,000コマ/秒の撮影を可能にするカメラである。このタイプのカメラが商品化されたのは1932年で、イーストマン・コダック社とベル電話機研究所の共同開発によるものであった。「Eastman-ERP I タイプII」と呼ばれたこのカメラは、2,000コマ/秒の撮影ができ、このカメラを得たベル電話機研究所は、30年間懸案になっていた難問をわずかフィルム1ダースの使用で解決してしまったといわれている<sup>14)</sup>。興味あることに、このカメラがデビューしたのは、その年ロスアンゼルスで開かれたオリンピック大会であった。人々は、この猛スピードで撮影するカメラを「Kirby race timer camera(レース釣りのタイマーカメラ)」とニックネームをつけて親しんだ<sup>14)</sup>。筆者は、「レース釣り」と当時の人々のつけたニックネームが、ハイスピードカメラへの驚きをうまく表しているようで関心したものである。

### 写真計測の構成要素

このようにして、時代の要求に答えながら写真撮影技術は応用範囲を拡げ、科学技術分野にも写真による計測分野が確立されていくことになった。キネシオロジーの分野でもこの手法はよく用いられており、バイオメカニクスにおいては、映画撮影法を使った計測法が大きな位置を占め、この種の文献、書物の多くには、バイオメカニクス・シネマトグラフィ(バイオメカニクス映画撮影法)に関する多くの紙面が費されている<sup>8,12)</sup>。

図1に写真撮影および解析に必要な構成要素を示す。

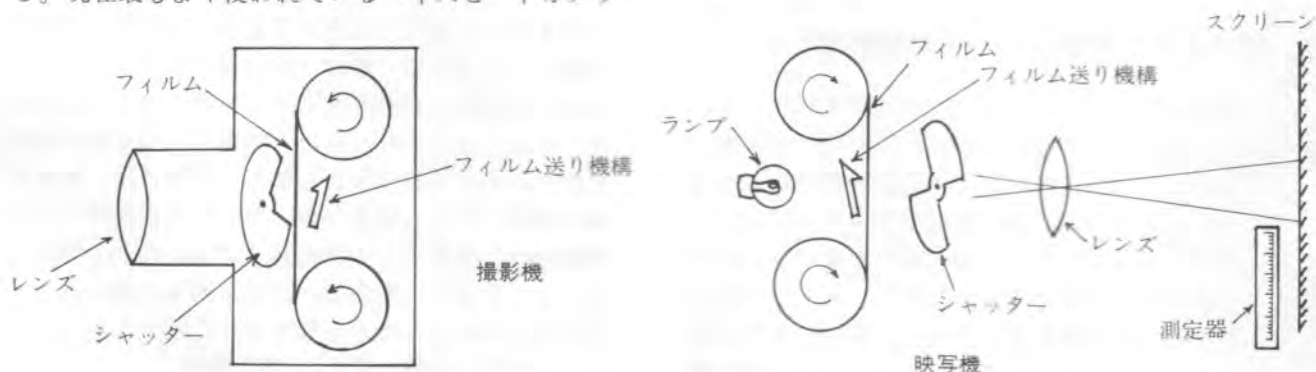


図1 フィルムカメラおよび映写機の機構図

## 1) フィルム

フィルムは、写真のなかで最も重要な働きをなすものの1つであり、レンズによって結像された像を瞬時に記録する記録媒体である。フィルムの種類は、非常に数多くのもので撮影用途に応じて開発されており<sup>1)</sup>、大きく分けてフィルムサイズと感光材料の2つのファクターによりフィルムの性能が決定される。表1、2にフィルムサイズとフィルム感材の代表的なものを示す。フィルムは、通常フィルムベースと呼ばれる0.1mm~0.13mmの厚さをもった支持体の上

に0.01~0.03mmの厚さの乳剤と呼ばれる感光剤が塗布されている。感光剤は、レンズを通して乳剤面に達した光量に応じて感光し、そのうち光量が少なくても十分反応を示すフィルムを高感度フィルムと呼んでいる。フィルムの感度と、情報密度の度合いを表す解像力との間には相関関係があり、感度が高くなればなる程解像力は低下する。したがって、光量が十分とれる撮影場所では、中感度フィルムを用いた方がきれいな写真を作ることができる。フィルムサイズを情報記録という点から見ると、記憶容量の

表1 フィルムサイズ

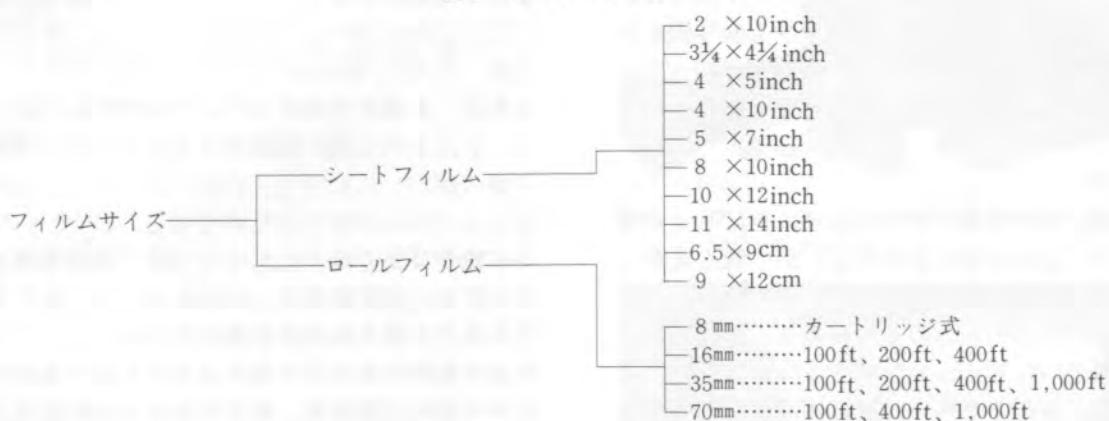


表2 16mm/35mmロールフィルムの種類

名 称	タイプ No サイズ	ASA		用 途
		昼 光	電 灯 光	
イーストマン プラスX ネガティブ	5231 35mm	80	64	黑白撮影
	7231 16mm			
" ダブルX "	5222 35mm	250	200	黑白撮影 高速度撮影
	7222 16mm			
" 4 X "	5224 35mm	500	400	黑白撮影 高速度撮影
	7224 16mm			
" エクタクロームVNF(D)	5239 35mm	160	-	カラー撮影用 (反転)
	7239 16mm			
" エクタクロームVNF	5240 35mm	-	125	カラー撮影用 (反転)
	7240 16mm			
" エクタクロームVNX	7250 16mm	-	400	カラー撮影、高速度撮影用 (反転)
フジカラー リバーサルRT-125	8427 16mm	-	125	カラー撮影用 (反転)
" " RT-500	8428 16mm	-	500	カラー撮影、高速度撮影用 (反転)

度合いを表すものといふことができる。代表的なシネカメラのイメージサイズ(画面サイズ)は、16mm幅のフィルムで7.4×10.2mm、35mm幅で18×24mm、70mm幅で56×56mmとなっており、面積比が、1:6:42の割合になる。このことは、同じ被写体を画面いっばいに写し込んだとき、同じ乳剤のフィルムでは面積比と同じ割合の記録密度が得られることを示している。現在のところ、最もよく使われているフィルムサイズは、16mm幅のロールフィルムであり、35、70mmフィルムは特殊用途に用いられている。記録密度が低いにもかかわらず、16mmフィルムが圧倒的に使われるのは、フィルムコストと扱いやすさの点にあるといえる。16mmフィルム用カメラも映写機も35mm、70mmのそれに比べて多くの機器が出回っており、幅広い撮影応用の対応が図られている。

2) レンズ

レンズは、被写体像をフィルム面に結ばせる結像作用をもつ。これは最も基本的な、かつ最も重要な機能である。レンズの性能を表すものにレンズの焦点距離とレンズの明るさの2つがあり、専門的には、さらにこの2つに加え、レンズの5収差とレンズの解像力を述べることが多い。被写体像に対してフィルム上の像は、写像とみなすことができ、理想の写像においては、5収差と解像力は関与しない。この写像を幾何学的にとらえると次下の関係式が成立する。

$$D = f \times \frac{(1+M)^2}{M} \dots\dots\dots(1)$$

- D: フィルム面から被写体までの距離(mm)
- f: レンズの焦点距離(mm)
- M: 撮影倍率(フィルム像/被写体像)

式(1)より、フィルムに写す被写体の大きさを一定とすれば(撮影倍率を一定とすると)、焦点距離の短いレンズ程(広角レンズ程)撮影距離が短くなるということがわかる。例えば、16mmフィルムフォーマット(10.2mm×7.4mm)で横方向5mの被写体を撮影するとき、f=25mmのレンズでは、12.3mの撮影距離を必要とし、f=100mmでは、49mとなる。レンズの明るさは、通常F値といういい方で使われ、この値の小さいレンズ程多くの光を集め得ることを示している。フィルム像の明るさを表す度合いのことを像照度と呼んでいるが、この像照度(E)とF値は次のような関係がある。

$$E \propto \left(\frac{1}{F}\right)^2 \dots\dots\dots(2)$$

これは、F値が2倍になると像照度は1/4倍になり、EはFの2乗に反比例することを示している。F値の値が、1.4、2.0、2.8、4.0、……と√2の倍数をとっているのはこのためである。

F値が与える働きのもう1つに、被写界深度があげられる。被写界深度というのは、撮影をする際どこからどこまでの撮影距離にピントが合っているかを表すものであり、F値が大きければ大きい程、すなわち絞れば絞る程、被写界深度は深くなる。またこの深度は、レンズの焦点距離にも影響を受け、広角レンズ程ある絞りに対する被写界深度は深くなる。例えば、撮影距離3m、F値5.6のとき、焦点距離25mmのもつ被写界深度は1.8m-9.1m(3m<sub>+0.6m</sub>)であり、同じ条件で焦点距離50mmとしたときは、2.6m-3.6m(3m<sub>+0.6m</sub>)となる。

レンズの5収差および解像力については、話が微視的かつ専門的になりやすく、撮影する上でよほどの特殊撮影をする以外は、市販のレンズで十分事足りるためあえて言及しない。ただし、収差のなかの

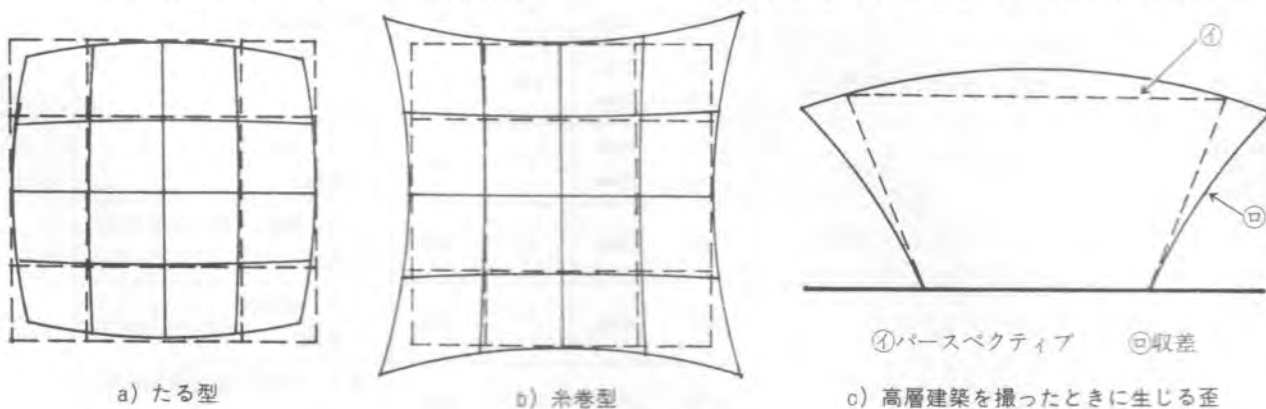


図2 レンズによる歪

歪曲収差を含め、像の歪は映像計測をする上で必要知識と思われるので記しておく。前にも述べたように、レンズは被写体を写像させる機能をもっているが、実際のレンズは完全な点対称とはならない。図2 a)、b)に示す如く光軸の周辺にいくに従って生じる歪を歪曲収差と呼び、レンズ固有の値になる。一般のレンズでは $-2\% \sim +1.5\%$ の歪曲収差をもっているも映写観賞においては無視できる値とみなしている<sup>10)</sup>。しかしながら、映像計測においては無視できない場合があるため、測定に関しては考慮が必要である。16mmフィルムカメラでよく使われている日本光学製のシネニッコールレンズの歪曲収差を表3に示す。また、歪曲収差によらない歪としてパースペクティブなものあげられる。これは、遠近感の誇張によってもたらされるものであり、広角レンズ程この歪は顕著になる(図2 c))。

### 3)カメラ

カメラ本体は、レンズとフィルムの中に介在するブラックボックスであるが、この機能の他にフィルムをレンズ焦点面に固定させる、適正露出を与える、一定の時間間隔で次々に写真を撮る等の機能をもっている。通常の映画カメラは、1秒間に24コマの写真を撮る。これは、映画カメラの創始者たちが実験的に求めた値であった<sup>11)</sup>。この値は、しかしながら、非常に速く運動する現象や逆に緩慢に推移するものに対して、その運動を見極めようという目的には不十分であり、目的に応じた撮影速度をもつカメラが必要であった。前者の目的に開発された100コマ/秒以上の撮影速度をもつカメラを高速カメラ(ハイスピードカメラ)と呼び、後者のような1秒間に1コマ、もしくは、それ以上の長時間に1コマ撮影するカメラを微速度カメラ(メモーションカメラ)と呼んでいる。

ハイスピードカメラは、その機構上大別して5つ

表3 シネニッコールレンズ(日本光学製)の歪曲収差

焦点距離	F値	歪曲収差
$f = 10\text{mm}$	1.8	$-0.5 \sim -1.5\%$
$f = 25\text{mm}$	1.4	$-0.2 \sim -1.4\%$
$f = 50\text{mm}$	1.8	$-0.15 \sim -0.3\%$
$f = 100\text{mm}$	2.8	$+0.02 \sim +0.03\%$

歪曲収差の-(マイナス)は、たる型、+(プラス)は、糸巻型を表わす。

のタイプに分けることができ、撮影速度も $10^2$ 、 $10^3$ 、 $10^4$ 、 $10^6$ 、 $10^7$ コマ/秒オーダーにほぼ対応している。バイオメカニクスの分野で用いられる撮影速度は、100~200コマ/秒がほとんどであるが、ラグビー、サッカーボールなどのキッキング、それにテニスラケットのインパクトの様子は一桁上の撮影速度が必要になる。この分野に用いられ最もよく使われ完成度の高いカメラに、フォトソニックス社製バイオメカ



写真1 フォトソニックス社製バイオメカニクス/500 16mm高速カメラ



写真2 フォトソニックス社製16mm-1PLカメラ



写真3 陸上競技会における高速カメラ撮影風景

ニクス/500がある(写真1)。このカメラは、フォトソニックス16mm-1PLカメラ(写真2)を基本ベースにバイオメカニクス用に改良されたものである。これら一連のカメラは、NCAA 陸上選手権をはじめ数々の国際競技に用いられ(写真3)、特に1976年のモントリオールオリンピックでは、バイオメカニクスカメラとしての正式認可を受け会期中18,000フィートに及ぶフィルムを回し、そのフィルムは今なお全世界のバイオメカニクス研究者らの手によって研究がなされている<sup>9)</sup>。フォトソニックス16mm-1PLカメラの設計思想は、航空機搭載用として米国空軍が採用していることからわかるように、極めて堅牢で小型軽量、しかも、撮影目的を十分にクリアする性能を有している。バイオメカニクス/500カメラは、10コマ/秒から500コマ/秒まで連続的に任意設定でき、その精度は設定スピードの±1%もしくは±1コマのいずれか多い方となっている。シャッターは、開角度可変のロータリーディスクシャッター(7.5°-160°まで可変)を採用している。ロータリーディスクシャッターとは、レンズとフィルムの間におかれた円板上のもので、ある一定角度の切り欠き部を持っている。この円板シャッターが回転し切り欠きの部分でシャッターの働きをなすものである。

シャッター開角度と撮影速度より露出時間が一意的に求まる。式(3)にその関係式を示す。

$$T = \frac{1}{R} \times \frac{\theta}{360^\circ} \dots \dots \dots (3)$$

- T : 露出時間(秒)
- R : 撮影速度(コマ/秒)
- $\theta$  : シャッター開角度(°)

例えば、シャッター開角度90°、撮影速度200コマ/秒としたとき、露出時間は1/800秒(1/200コマ/秒×90°/360°)となる。露出時間の働きは大きく分けて2つある。1つは、レンズの絞りと組み合わせて露光量を決定する働きであり、他のもう1つは、速い動きの被写体を静止させる働きである。フィルムには、適正露光量があり露光量は入射してくる光の強さと、レンズ口径(明るさ)、そして露光時間の積で求まる(4式参照)。

$$B \times \frac{(F)^2}{T} = \text{一定} \dots \dots \dots (4)$$

- B : 被写体輝度
- F : 絞り
- T : 露出時間(秒)

(4)式からわかるように、被写体が暗くてF1.0のような明るいレンズの入手が困難なときに露出時間を操作することが多い。しかし、この操作も次に述べる被写体の動きを静止できるものでなければならない。次に、物体の動きを止めて撮影するというものを説明する。図3に被写体-レンズ-フィルム上の像の関係を示す。連続に運動する被写体は、どんな

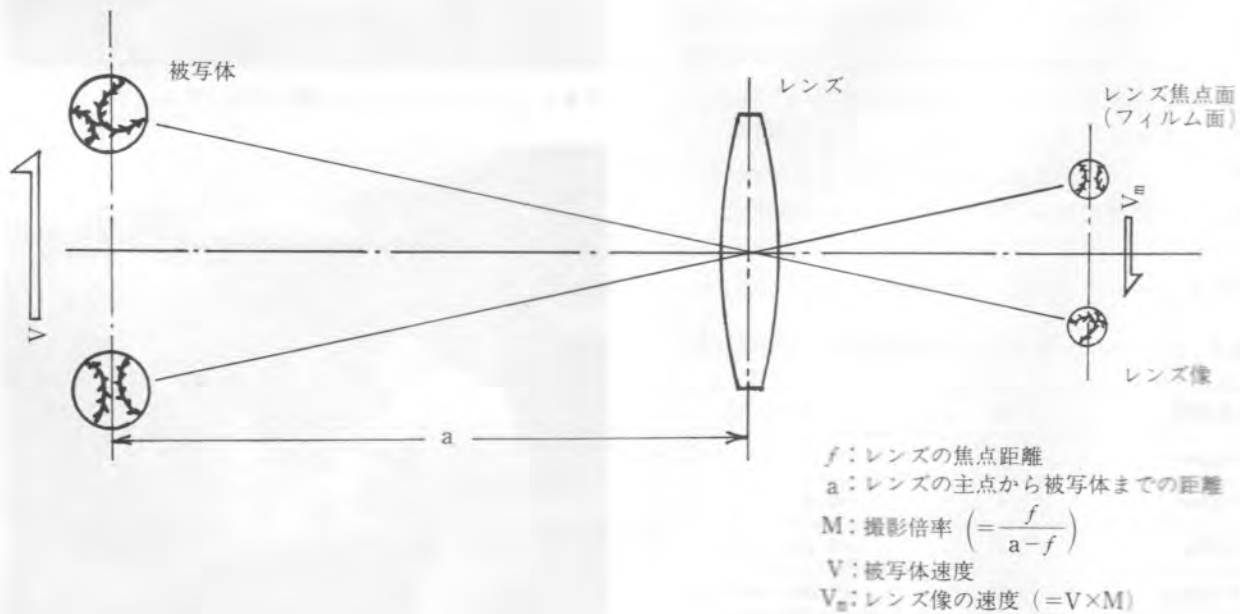


図3 物体とレンズ像の関係

に露出時間を短くしようとその露出時間内で移動し、完全に物体が静止する露出時間は存在しない。しかしながら、観点を変えてフィルム面で動く像の許される移動量に収めるにはどれだけの露出時間が必要かを問題にする。許される移動量とは、像のボケをも意味するので許容錯乱円と呼ばれるものと同一のものになる。この許容錯乱円は、撮影後拡大映写をする際、像のボケが肉眼の分解能以下になるようにして求められた値であり、16mmフィルムの場合、経験的に0.025mmと定めている。以上を式で表すと、

$$T = \frac{d}{V \times M} \dots\dots\dots (5)$$

T : 露出時間(秒)

V : 被写体の速度(m/秒)

M : 撮影倍率

d : 許容錯乱円(16mmフィルムは $2.5 \times 10^{-5}$ m)

になる。例えば、秒速10mで全力疾走する人間を側方からゴール直前の3mだけ撮影しようとする場合、必要露出時間は、

$$M = 10.2\text{mm}/3000\text{mm} = 1/294$$

$$T = 2.5 \times 10^{-5} \times 294/10 \\ = 1/1360(\text{秒})$$

となる。したがって、カメラの撮影速度を250コマ/秒にセットすれば、(3)式よりシャッター開角度は $66^\circ$ になる。

バイオメカニクス/500カメラは、この他に、カメラマガジンと本体が別になっており、撮影したフィルムと生フィルムがマガジンごと交換できるようになっている。このマガジンは、200フィート、400フィート、1,200フィートの3種が用意されており、日中装填が可能になっている。16mmフィルムは、100フィート当たり4,000コマ分の撮影ができるので、撮影速度で割れば記録時間を求めることができる。例えば、100フィートフィルムを用いて100コマ/秒で撮影すれば40秒間撮影できる。

また、このカメラには、タイミングパルスジェネレータが内蔵され、フィルムのエッジにタイミングパルスおよびイベントをマーキングするための2連式LED(発光ダイオード)タイミングライトを備えている。このタイミングライトは、一方のフィルムエッジにイベントマークを、もう一方にタイミングマークをとるという使い方をする。イベントマークは、例えば、ハイジャンプをするとき、きき足を踏み出した瞬間を床から圧力ピックアップで取り出したり、ボールがラケットに当たる瞬間を歪センサーなどで

取り出したりして、フィルムエッジにマーキングするものである。これは、フィルム解析時に測定時刻点とする上で便利なものである。内蔵のタイミングライトは、10、100、1,000Hzの繰り返し発光が選択でき、 $\pm 0.01\%$ の精度をもっている。これは $\pm 1\%$ で撮影するカメラのより以上の精度が要求される解析時や、現像されたフィルムが何コマの速度で回っていたかの確認に役立つ。

その他、このカメラの特筆すべきこととして、オプションにてフェーズロック(Phase Lock)機能をもっている。この機能は、2台もしくはそれ以上のカメラを完全に同期させて駆動できる機能であり、これによって広い範囲を数台のカメラで撮影したり、同一被写体を別方向からとらえる3次元撮影をすることができる。

#### 4)その他のカメラ

バイオメカニクスの分野では、さきに述べたカメラの他に様々な撮影目的のためにいろいろなカメラが使われる。35mmフィルムカメラもちろん使われるだろうし、2,000~5,000コマ/秒の高速度カメラも必要であるかもしれない。写真4に示すカメラは、フォトソニックス16mm-1VNカメラといって超小型のハイスピードカメラである。スーパー8mmカメラよりも小さくて、しかも画質は数段優れ、200コマ/秒の撮影が可能である。スカイダイビングや動きの激しいスポーツを撮影するのに適している。写真5に示すカメラは、国産唯一の16mm高速度カメラ、ナックE-10である。ロータリープリズム方式と呼ばれる撮影機構を有し、10,000コマ/秒までの撮影が可能である。野球のバッティングのインパクト時の様子を撮影するのに適したカメラである。



写真4 フォトソニックス社製16mm-1VNカメラ

## 5) フィルム解析装置

得られたフィルムを解析する手法の代表的なものは、特殊映写機を使った解析装置である。解析には通常、定性解析と定量解析の2つがあり、この2つの解析法を可能にするのがこの装置である。定性解析と定量解析の意味を説明する上で、分野は異なるが医学の分野で使われている心臓機能のX線撮影解析法が的を得ていると思われるので紹介する。心筋硬塞症で代表される冠状動脈疾患をX線高速度映画撮影法で検査する手法は、20余年の歴史を有し、動形態学的に把握する最も的確なものとして主要な



写真5 ナック社製ロータリープリズム方式16mm高速度カメラE-10



写真6 フィルム解析装置ナックスポータスModel 300

検査法の1つになっている。医師らは、ポンプ機能を有する心臓の繰り返すメカニズムを調べるために、得られたフィルムを何度も何度もゆっくり繰り返して見ていく。見ていくなかで疾患部を発見していくわけである。このような非常に複雑なメカニズムでしかも測定パラメータが多い研究とか未知の学問に使われる手法のうちで、人間の直感判断に負うところが多い分析手法を定性解析と呼ぶ。一方、X線映画で撮影されたフィルム像の1枚1枚を測定器にかけ、心臓の体積、容量変化を数値的に求めていく手法を定量解析と呼んでいる。あるいは、このことを説明するのに航空写真における偵察用と地図作成用の2つを考えれば定性、定量の意味がよくわかるかもしれない。近年、研究者達の定量解析を用いた研究が活発になるなかで、燃焼学に携わる技術研究者が、あるとき筆者に次のような述懐をしてくれた。「最近のガソリン、ディーゼルエンジンの希薄燃焼研究は、社会問題を負ってか相当の研究がなされており、極めて完成度の高い分野になってきている。しかし、燃焼自体が複雑な反応を経るので本当の意味ではまだまだこれからの分野である。いままで随分いろいろな測定機器を使ってきたが、燃焼メカニズムを正確に把握するには、一枚の写真だけでも圧力データだけでも不十分で、数十枚の写真を連続的に映写することによってはじめていままでも不明確だった現象が瞬時に体系化できることがある。……」筆者は、この研究者の言葉が多く暗示を含んでいるようで大いに合点するのであるが、論理性と定量性を重んずる研究者においてなおかつ定性判断の占める割合が多いのは非常に興味あるところである。

基本的な機器は図1に示す如くであるが、近年のエレクトロニクスの発達によって、フィルム像を測定し、演算処理、記録を行う部分に著しい進歩がみられている。ナック・スポータスModel 300(写真6)は、代表的なフィルム解析装置の1つである。このシステムは、次のような構成要素から成り立っている(図4)。フィルムを任意のスピードで映写し、しかもどのモードにおいても画面にチラツキの生じない特殊映写機、フィルム像を映し出すスクリーンおよび映写像からX-Y座標値を求めるためのディジタイザー、得られたデータを演算処理するためのCPU、そしてCPUで処理されたデータを出力するためのプロッター/プリンターおよびカラーモニターである。この装置には、グラフペンディジタイザーと呼ばれるペンタッチ方式のものを採用し、ペンの先か



ら発振する超音波をX-Y軸のセンサーで検知し、特殊映写機から送られるフィルムのフレーム番号と共にCPUに入力される。CPUへの指令は、グラフペンを使ってスクリーン上に設けられた“メニュー”と呼ばれるエリアで指示できるようになっている。プログラムの実行、演算処理、データの記録には、2枚のフロッピーディスクを用い、1枚をソフトウェア用、もう1枚をデータ記録用に使用しており、数々の実験データをフロッピーディスクによってファイリングすることもできるようになっている。

ここで基本的な数値解析の概略を記す。この装置が、フィルムから読み出すデータは(X、Y、F)である。予め知っておくべき値に総合倍率(M)とカメラ

の撮影速度(R)がある。総合倍率は、以下の式によって求めることができる。

$$M = \text{撮影倍率} \times \text{映写倍率}$$

$$= \frac{\text{フィルム像の大きさ}}{\text{被写体の大きさ}} \times \frac{\text{スクリーン像の大きさ}}{\text{フィルム像の大きさ}}$$

$$= \frac{\text{スクリーン像の大きさ}}{\text{被写体の大きさ}} \dots \dots \dots (6)$$

Rの逆数は、1コマ間の時間変位であるからコマ数分をかけると経過時間が求まる。これより、運動物体の同一ポイントを数コマにわたって測定していけば、その物体の変位を求めることができる。

$$\begin{aligned} (X_{i+1} - X_i) / M &= \Delta X \\ (Y_{i+1} - Y_i) / M &= \Delta Y \end{aligned} \dots \dots \dots (7)$$

$$\begin{aligned} \text{物体移動量} (\Delta l) &= \sqrt{(\Delta X)^2 + (\Delta Y)^2} \\ &= \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2} / M \end{aligned} \dots \dots \dots (8)$$

物体の移動速度(V)は、

$$\begin{aligned} V &= \Delta l \times R / (F_{i+1} - F_i) \\ &= \frac{R}{M \cdot (F_{i+1} - F_i)} \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2} \end{aligned} \dots \dots \dots (9)$$

物体の加速度(a)は、

$$\begin{aligned} a &= \Delta V / \Delta T \\ &= \{V_{(i+3)-(i+2)} - V_{(i+1)-(i)}\} \times 2 \cdot R / (F_{i+3} - F_i) \\ &= \frac{2 \cdot R^2}{M (F_{i+3} - F_i)} \sqrt{\frac{(X_{i+3} - X_{i+2})^2 + (Y_{i+3} - Y_{i+2})^2}{(F_{i+3} - F_{i+2})^2}} \\ &\quad \left\{ \frac{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2}{(F_{i+1} - F_i)^2} \right\} \end{aligned} \dots \dots \dots (10)$$

となる。このようにソフトウェアにはこの種に関するプログラムが組み込まれており、この他に、運動量解析、重心解析、FORCE解析、エネルギー解析もできるようになっている。また、写真7に示されるような輪郭図を重ね合わせてプロッターに描き出すこともできる。

上記のスポーツアスシステムが、いわば人間と機械のマン・マシン・システムであるのに対して、非常に膨大なデータを処理しなければならないとき、データ解析の自動化が必要になる。この要望に対応するものとして、フォトソニックModel 80(写真8)がある。この装置は、人間の目の代わりに“エレクトリック・アイ”を使用したもので、イメージ・ディセクタ・チューブと呼ばれる撮像管を用いている。この撮像管は、ITV(Industrial Television、一般に使

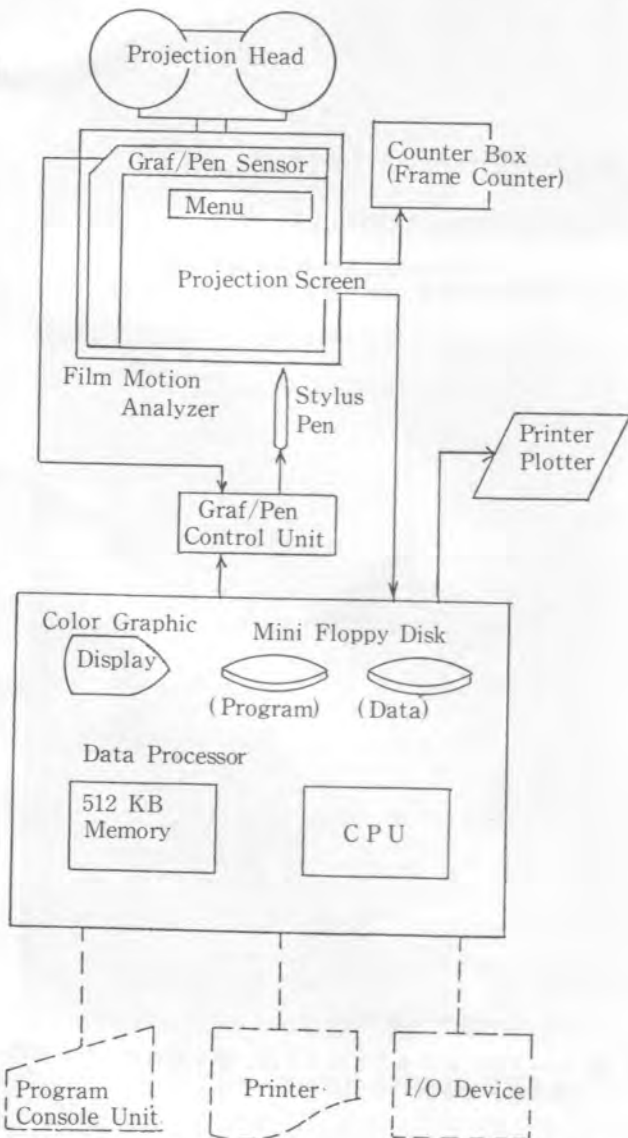
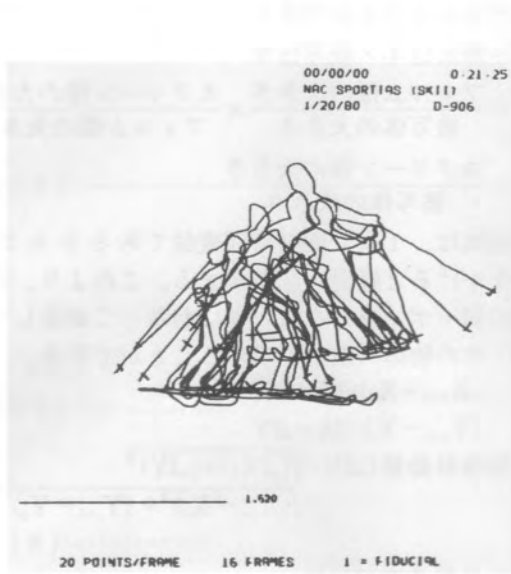
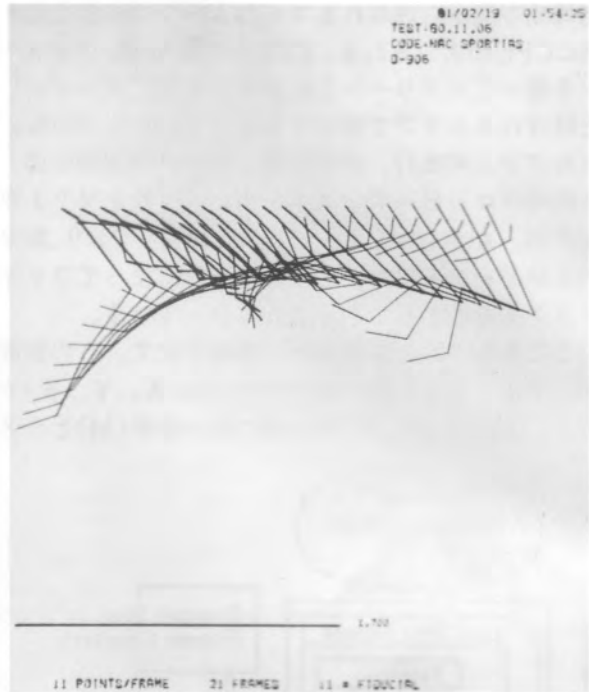


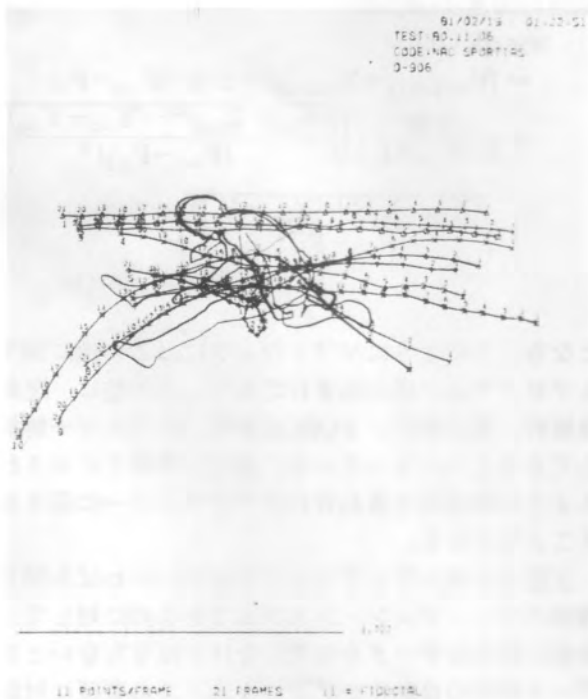
図4 ナックススポーツアスModel 300システムブロック図



a) スキーの輪郭図の重ね合わせ図



c) ハードルにおけるスケルトン図

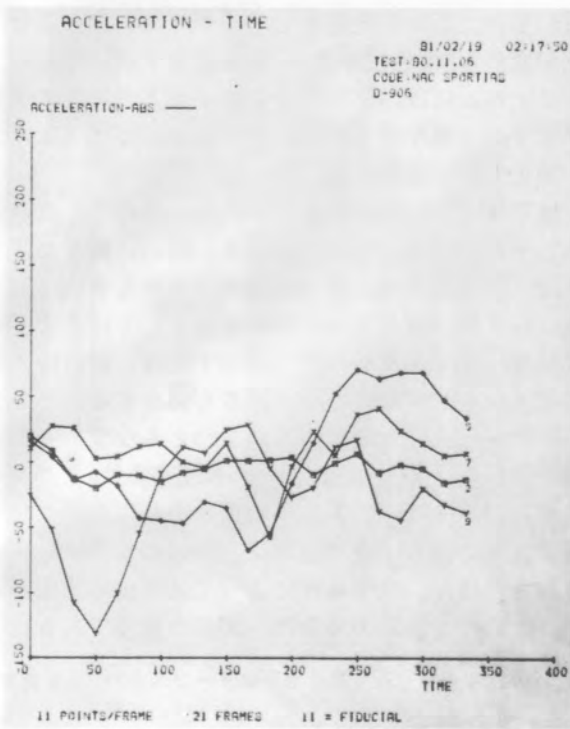


b) ハードルにおける頭、腕、足の部位の軌跡図

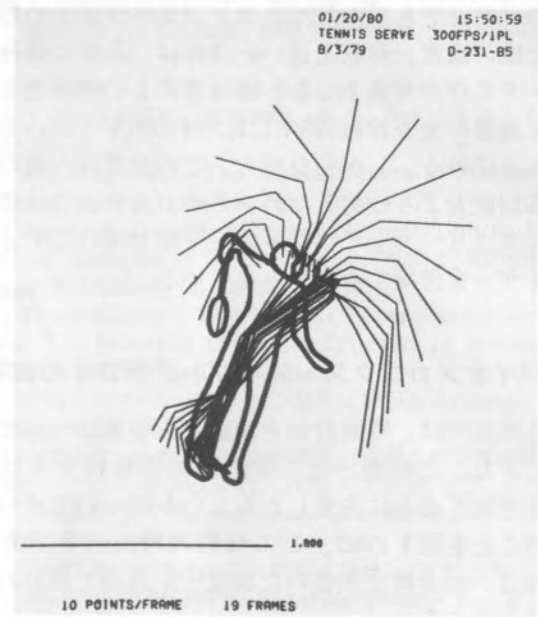


d) ハードルにおけるスケルトン図、腰を定点としたときの足の動きの分析

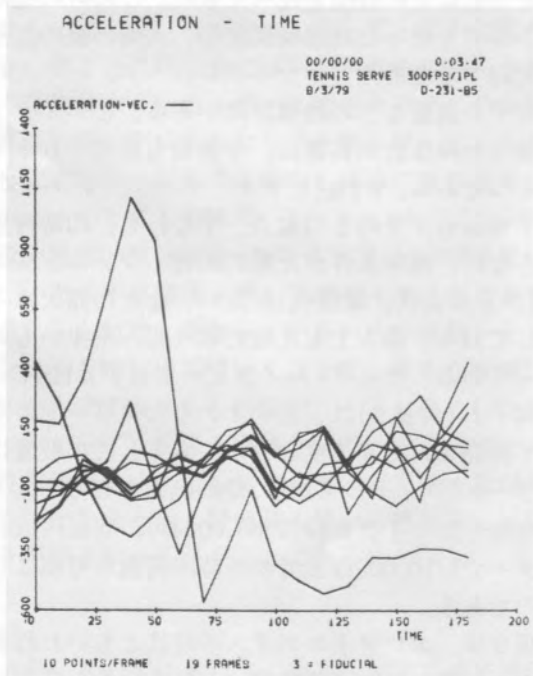
写真7 ナックスポータィアスによって得られたデータサンプル(a)~g))



e) ハードルにおける頭、腕、足先の加速度グラフ



g) テニスサーブにおけるスケルトン図



f) テニスサーブにおける各部位の加速度グラフ

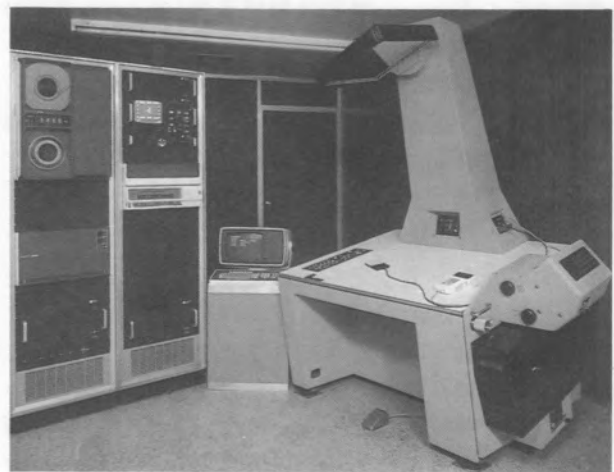


写真8 トータルフィルムディタイジングシステム  
フォトソニックス社製 Model 80

われるテレビのこと)装置にみられるような走査方式を用いておらず、コンピュータからの指示により自由に走査することができる(ランダムアクセス走査)。このメリットを活かして、コンピュータが予め指示した像の濃度、形状を追いかければ、非常に高速のデータ処理が可能となる。撮像管のもつ解像力も、ITV装置の走査線数525本に比べ4,096本と高いものをもっている。しかしながら、この装置は人間の眼の識別能力よりは劣るため、このシステムではテーブルスクリーン上でフリーカーソルを用いたディジタイザーを併用する形をとっている。

### バイオメカニクス・シネマトグラフィの実際

これまでは、写真計測を構成する要素について述べてきた。この項では、実際に撮影解析するに当たりどんなことに注意したらよいかについて述べる。このことを記すのに、この分野の第一人者である *Juris Terauds* 博士の書いた論文<sup>12)</sup>が適当と思われるので引用する。

**レンズ**——スポーツ撮影分野では、固定焦点のレンズは不経済である。ズームレンズはカメラと被写体間距離にわずらわされる心配がない。よく使われるズームレンズとして、アンジェニュー・ズーム12-120mmレンズがある。

**フィルム**——白黒フィルムは、もはや競技会等の場では用いられない。特性も、ハイコントラストなものがよく、露出時間も短くすることが多いので高感度のものがよい。時には増感現像(フィルム固有のASA感度を現像処理によって実上の上昇させること<sup>4)</sup>)も必要なので、増感時にも画質劣化のないフィルムであることが望ましい。また、いろいろな土地での競技会を想定し、一般的な現像処理を有するフィルムである方がよい。

**照明**——陸上競技においては、室外の場合が多いので太陽光が有力な照明光源となる。晴天時の真昼であれば、1,000コマ/秒までの撮影が可能である。ただし、太陽光は、時々刻々とその位置が変わるため、太陽-被写体-カメラの位置を考慮に入れないと必要撮影部位が影になったりする。競技者への精神的圧力が加わらない場合と程度においては、反射板、人工光を補助光として与えることも有効である。室内競技等の人工光が主照明光源となる所では被写体にムラなく照明を当てることと、光源前部に拡散板等を入れ、できるだけフラットな照明を当てるこ

とが望ましい。体育館などでは、水銀灯が使われる所が多い。これを光源としてカラー撮影する場合は色が変わる(演色性が悪い)から注意する。またカラーフィルムには、デーライトタイプとタングステンタイプの2種があるから、光源によってはフィルター補正する必要がある。

**被写体**——定量解析を行う場合、原則として運動体と平行にカメラをセットする。斜めに撮った被写体は、演算処理時の補正が面倒で誤差も多い。被写体に白と黒、黄と黒の市松模様状もしくは十文字のターゲットマークを入れて撮影すれば、解析時の測定ポイントが明確になり、誤差も減少する。

**解析**——人間も測定機器の1つとみなす。人間の眼の分解能は、0.073mmといわれている<sup>5)</sup>。したがってディジタイザー読み取り精度をそれ以上良くしても無意味である。映写倍率は、フィルム、レンズの解像力、撮影、現像条件によって適正倍率が変わるが、16mmフィルムの場合20~30倍が適当である。

### 今後の動向

バイオメカニクス・シネマトグラフィの今後はどうなるであろうか。上記までは、ハイスピードカメラを中心にその特徴を述べてきた。これらの他に、ストロボを使った高速瞬間撮影、人間の眼の注視点を記録するためのアイマークレコーダ、ハイスピードビデオ装置などの映像計測がある。ビデオテープを使った映像計測装置は、今後最も期待されるものの1つである。VTR(ビデオ・テープ・レコーダ)は、フィルムカメラのもつ欠点、すなわち、即時再生ができない、撮影条件が比較的困難、ランニングコスト(フィルム代、現像代)が高い、などの諸欠点を克服しており、素人でも比較的取り組みやすいものとなっている。ナック・ハイスピードビデオHSV-200システム(写真9)は、ビデオのもつメリットに着目して開発された高速度ビデオである。この装置は、カラー200フィールド/秒の録画能力をもち、ストロボ照明で20マイクロ秒(1/50,000秒)、回転円板シャッターで1/10,000秒までの短時間露出を可能にしたものである。

現在は、エレクトロニクスの時代ともいわれる。このエレクトロニクスの波は、いろいろな方面に押し寄せ、時間概念を変え、世界までも縮小させた。興味あることに、この波は、いろいろな分野を飲み込まずそれらの分野と“融合”した。メカニクス分



写真9 ハイスピードビデオシステム ナック社製HSV-200

野で生まれたメカトロニクス、オプティクス分野で生まれたオプトエレクトロニクス、フォトグラフィ分野で生まれたフォトリクス、等々……。この融合したもの同士が、再び融合し合って、その交代が限りなく繰り返された後には何が現れるであろうか。その交代は、メディカルやバイオメカニクスの分野が、高度に凝縮し完成されたものを腑分けしているのに対し、エレクトロニクスを中心にその逆を思考しているようでとても興味深い。

遠い将来、立体映像(ホログラフィー)が極度に発達し、思考する映像メディアがバイオメカニクス研究者たちと対話しながら、いろいろな仮想シミュレーションを映し出していくような、そんな映像計測手法が完成するかもしれない。そんな漠とした未来像に向かって、映像を媒体とした計測手法は、人間の視覚認識の一助として自らその姿を変えながら、いついかなるときも研究者の傍から離れることなく、よき伴侶となっていくことであろう。

#### 謝辞

本稿を著わすにあたり、東京大学宮下充正教授に多大なる御教授をいただいた。この場を借りて教授に厚く感謝の意を表するものである。

#### 文献

- 1) Eastman Kodak Company: 科学写真に使用するコダック乾板とフィルム, 日本版, 長瀬産業, 1973.
- 2) 林 一男, 久保島 信: カメラ及びレンズ, 写真技術講座1, 共立出版株式会社, pp.122-124, 1957.
- 3) 鎌田彌壽治: 写真知識, 印刷学界出版部, p.10, 1967.
- 4) カメラ事典, ベリかん社, p.306, 1977.
- 5) 久保田 広: 光学, 岩波書店, pp.349-351, 1964.
- 6) ライフ写真講座, 特殊撮影, タイムライフブックス, pp.14-15, 1971.
- 7) *Muybridge, E. : The Human Figure in Motion.* Dover Publications Inc., pp.viii-xii, 1955.
- 8) *Northrip, Longan, Mckinney : Introduction to Biomechanic Analysis of Sport.* 2nd ed., Wm. C. Brown Company Publishers, pp.222-289, 1979.
- 9) Photo-Sonics : The Official Biomechanics Cameras for The Montreal Olympics. Brochure of Instrumentation Marketing Corporation.
- 10) 写真レンズハンドブック, 写真工業出版社, pp.33-38, 1978.
- 11) 白井 茂, 山本豊孝, 八木信忠, 広沢文則: 映画撮影技術ハンドブック, pp.9-11, 1978.
- 12) *Terauds, J. : Biomechanics Cinematography.* Industrial Photography, pp.43-51, Feb., 1982.
- 13) 植村恒義: 瞬間, 共立出版株式会社, 1979.
- 14) *Waddel, J. H. : The Rotating-Prism Camera : An Historical Survey.* Journal of the SMPTE, 75 : 667, July, 1966.