

バイオメカニクスとハイスピードビデオカメラの変遷

安藤 幸司*

I. はじめに

スポーツ分野で使われている高速度カメラ、とくに最近のビデオ技術とコンピュータ技術の発展と共に急進している高速度ビデオカメラについてその歴史と現状を報告する。映像計測の利点は、

- ① 記録形態が人間に理解しやすい映像である
- ② 非接触による計測が可能
- ③ 非常に膨大な情報量をもっている

の3点があげられる。高速度カメラは、他の映像機器と比べ時間分解能が高いため高速で推移する現象には必要不可欠の装置である。

II. ハイスピードカメラの発明

ハイスピードカメラは、一秒間に100枚以上の撮影ができるカメラを総称したもので、記録する機構によって約10種類のカメラが開発され、最高20,000,000コマ/秒に達するカメラも市販化されている。バイオメカニクス分野の対象である『人』の動きは、高速機械のように速いわけではないため100~500コマ/秒の高速度カメラが使われ、1980年代では16mmフィルムカメラ、1990年以降は、高速度ビデオカメラが主流になった。また、スポーツ工学分野では、ボールのインパクト等の解析に1,000~5,000コマ/秒の撮影速度の1桁高い高速度カメラが使われている。

高速度シネカメラの発明は、1932年、米国ベル電話機研究所とEastman Kodak社より2,000コマ/秒の高速度フィルムカメラが開発されたのに端を発する。このカメラは、間欠掻き落とし式カメラ(通常の映画カメラ)に見られるようなフィルムの間欠運動(かんけつうんどう=撮影フィルムを送って停

止させる35mmフィルムモータドライブカメラや、米国フォトソニックス社16ミリ高速度カメラ16-1PLのようなフィルム送り機構)がなく、フィルムを一定速度で送る方式をとっている。フィルム面への像の結像は、レンズとフィルムの間になされた回転プリズムを使って連続で移動するフィルム速度に合わせるようにして像を移動させ、フィルム上に到達する像が相対的に静止する仕組みになっている。この原理によって撮影速度を通常の映画カメラより一気に上げることができた。このカメラが開発された目的は、電話交換器に使うリレーの不安定な挙動解明のためであったが、処女撮影は当時(1932年)ロスアンゼルスで開かれたオリンピック100m走であった⁵⁾。高速度写真のそもそもの始まりが、1870年代のエドワードマイブリッジによる12台の乾板写真機を使った競争馬のギャロッピングの連続写真だったことを考えても高速度カメラとバイオメカニクスの結びつきは深い。

III. ハイスピードビデオカメラ

ハイスピードビデオの歴史は、わずか20年。米国Video Logic社が、同国Ampex社製の1インチ磁気テープ用垂直スキャン方式ドラムヘッドを使ったビデオテープレコーダを改造して120コマ/秒の白黒カメラを開発したのに始まる(図1)。当時、電気信号の記録は磁性体を用いた磁気テープが全盛で、音声記録用テープもオープンリールからカセット方式に替わったり、磁性体材料もメタルテープが現れた時代であった。遡って1953年、日本でNHKがテレビ放送を始めた時は、VTRの存在すらなかった。当時の放送は、生放送かフィルム映像をテレビ信号に変換するテレシネ装置を使った放送が中心で、ニュース、ドラマ等は全てフィルムカメラで収録し、生放送ドラマは緊張の連続であったと伝えられる。

* Kousi Andou — 株式会社ナック



図1 Video Logic社「インスター」ハイスピードビデオ

フィルムカメラは、消耗品(=フィルム)が高価であるため、無尽蔵に撮影し続けるわけにはいかず、スポーツ記録、ニュース取材では何度でも記録が行える磁気テープによる記録装置が望まれていた。ビデオテープレコーダの開発は、放送事業開始と同時に研究が進められ、1956年には、米国のAmpex社、米国RCA社、英国BBC研究所がその試作を発表している。当時はオーディオテープと同じ方式で映像を記録する方式を採用していたため、記録周波数が2桁も違う映像信号を記録する努力は大変なものであった。磁気テープを毎秒数メートルで走らせたり、磁気ヘッドを10個取り付け分割記録する方法をとったりしたが、当時の技術では高速でムラのないテープ送りが難しく、実用までには至らなかった。VTR実用化のメドが見ついたのは、磁気ヘッドを高速回転させ相対的な記録周波数特性を向上させた、米国Ampex社開発による4ヘッドドラム方式のVTR開発からである。この時使用された磁気テープは、2インチ巾(50.8mm、VHSテープの4倍)のオープンリールであった。この方式は、テープの走行面に対しほぼ垂直に回転ヘッドを走査(スキヤニング)させ、1つのヘッドの垂直に走査する時間がテレビ画面の1水平ラインに相当していた。1959年には東芝からスキヤニングを斜めに行うヘ



図2 VHS方式カラーハイスピードビデオ ナック HSV-200

リカルスキヤニング式ドラムヘッドを使ったVTRが開発され、回転ヘッドとテープの走査時間が1水平ラインから1フィールド画面になり画質が安定した。これに続きビクター、ソニー、松下、芝電などが一般向けの家庭用ヘリカルスキヤニング型VTRの開発に着手し、1970年後半には、1/2インチ巾のテープをカセットに入れたVHS、βフォーマット規格のVTRが市場に出た。これは双方一歩も譲らない販売戦略を敢行したため、一般ユーザまで巻き込む熾烈な競争となった³⁾。1980年、ナック社より世界で初めて1/2インチVHS方式によるカラー200コマ/秒高速度ビデオが開発された(図2)。1990年には、同社によりS-VHS方式による1,000コマ/秒のカラーハイスピードカメラが市販化された(図3)⁴⁾。ビデオカメラはフィルムカメラと違い、撮像面に結像した光学像を電子的に走査して電気信号に変換する。結像面を水平350画素(ピクセル)(白黒)、垂直262.5本とし、一秒間500枚の映像を走査、記録するには、

$$350 \text{ pixel/本} \times 262.5 \text{ 本/枚} \times 500 \text{ 枚/秒} \\ = 46 \text{ MHz (pixel/秒)} \dots\dots\dots (1)$$



図3 S-VHS方式カラーハイスピードビデオ ナック HSV-1000

の記録周波数帯域が必要である。さらにカラー信号を重畳させたり、輝度信号を8ビット程度のデジタル記録にするには79メガバイト/秒の電子回路設計が必要である。これらの技術は、演算処理回路、素子等の高速化、集積化により初めて可能になった。また、最近ではデジタル圧縮技術が確立し、半導体メモリも安価になったこととも併せてメモリによる映像の高速デジタル記録が可能になった。

IV. バイオメカニクスとハイスピードビデオカメラ

前項でも触れたようにバイオメカニクスと高速度カメラの結びつきは深い。被写体の運動速度は、一般科学研究対象の中では低い部類に属し、100コマ/秒～1,000コマ/秒程度の撮影速度をもつカメラが中心である。この分野では16mm映画フィルムを使った高速度カメラ(Photo-Sonics社製16-1PL)が多くの実績を上げている。しかしながらこの種のフィルムカメラは、フィルムの現像工程が必要であり即時再生ができにくい問題がある。また、フィルムカメラの撮影にはある程度の習熟が必要のため、誰が使用しても完成度の高い結果が得られるとは限らない。ひどい場合には、ビデオ装置より画質の悪



図4 ゴルフインパクトハイスピードカメラ撮影風景 (10,000コマ/秒)



図5 米国コロラドスプリングでのハイスピードビデオカメラを使ったトレーニング(1983年)

いものになる。教育現場などで多数の被験者を撮影してその場で再生しながら教育効果を高める場合には、ハイスピードビデオカメラが圧倒的に有利である。ビデオ装置の有利な点は、

- (1) 比較的簡単に一定品質の映像が得られる
- (2) 即時再生ができる

(3) 膨大な映像データが安価に得られる等である。映像からは、団体競技のフォーメーションプレー、運動部位のスティックピクチャ、速度、角度、角速度、変位、ひねり、3D(3次元情報)が抽出できるが、ビデオ映像からでは十分に引き出せない場合がある。理由は、記録されたビデオ画像の画質が十分でないため読み取り精度が上がらないからである。映像から運動部位関節ポイントを読み取る場合、低画質の映像からでは読み取りポイントを正確に特定することが困難で、あいまいな測定結果となりやすい。関節部位の計測では読み取りやすいようターゲットマーク(ランドマーク)を貼付することがある。この手法は、読み取りのバラツキを抑えられる反面、マークを皮膚表面に付けるため実際の関節部位とズレる場合がある。いずれにせよビデオ装置の特性を十分に理解した上で活用することが重要である。

V. テレビ技術の歴史と仕組み

あまりにも一般的になったビデオ・テレビ装置もほとんどの場合、歴史的な意味を考慮することなく使われている。人間の歴史を学ぶと同じことで、普段使用している分には何の問題もないが、テレビ技術を計測装置として取り入れたら、意図したとおりの映像や結果が得られない場合、その原理を良く理解しその上での考慮や対策が必要である。

V-1. NTSC (National Television System Committee)

第二次世界大戦後、アメリカでは通信技術が発達し、音声のみならず映像を無線を使って時間差なく、広範囲に送信できる「テレビジョン技術」およびその規格が確立した。このテレビ放送規格は、しかしながら不特定多数の一般個人を対象としていたのでいろいろな制約や利権争いがからみ、妥協を強いられながらの取り決めになった。この規格は、NTSC (National Television System Committee) 規格として有名なもので、約束の基本は、映像を送るための送信周波数とチャンネルの割り当て、送信・受信する映像および音声信号の規格であった。またこの規格は白黒テレビジョン放送をしていた1950年代からの古い資産を引きずったものであった。つまり、これはテレビジョン放送開始以来の白黒テレビを所有する受信者でも新しいカラー放送を問題なく受像で

きることを第一目標としたものであった。したがって、信号周波数帯域も古い規格のまま、送信チャンネルの割当の制約もかせられ、高解像力のカメラが開発されても送信周波数の関係上きめの細かい映像が送れないなど、基本的な問題点を打開することなく妥協をしいしい今日に至っている。このジレンマを解決するためNHK主導でハイビジョン(NTSCの約4倍の解像力をもつ新しい送信周波数帯域の送受信方式。垂直走査線がNTSCの525本に比べ1125本と多い)計画が1980年代後半より熱心に進められたが、これも利権がからみ世界的な規格となるに至っていない。NTSC規格に似た国際的な規格としては、イギリスなどヨーロッパ諸国が採用しているPAL(パル)規格、ロシアなど旧社会主義国が採用しているSECAM(セカム)規格がある。これらは、日米のNTSC方式と違う送受信方式なので、日本のテレビやビデオを欧州にもって行っても欧州のテレビでは何も映らないという悲劇が生まれる。

V-2. NTSC 規格の水平解像力

NTSC方式は、日本と米国、カナダ、韓国、台湾、メキシコ等で採用されている規格で、一秒間に30画面、一画面525本の走査線と決められている。送信周波数もFM変調した映像信号と音声信号を重畳させ90MHzから6MHzごとにチャンネルを割りふっている。したがって、チャンネル1(関東地区はNHK、東海地区は東海テレビ)は、90-96MHz、チャンネル2は96-102MHzという具合になる。この中で映像信号として割り当てられている周波数は4.2MHzである。また、少し詳しいことを述べると、NTSC規格では走査線1本の走査する時間が63.5 μ sと決められているため、おのずと水平方向の解像度が決ってしまう。

$$63.5 \mu\text{s} \times 4.2 \text{ MHz} \times 2 = 533 \text{ TV 本} \dots\dots (2)$$

(2)式は、一本の走査線を引く63.5 μ sの間に7.2MHzで振動する周波数成分が何個入るかを示していて、最後に2を掛けたのは、1Hzは映像でいうと白と黒の二つを表しテレビの解像力は白黒ペアで2本と数えるからである。このことから、放送局から送られてくる画像は、最も条件が良くて530本であることがわかる。通常は、いろいろな画質低下の要因があるため、300-350本の解像力が得られれば満足できる映像である。

V-3. 映像信号

カメラレンズで結像された像は、カメラ内部の信号で左上から右下に順次なぞるような形で映像信号に変換される。したがって、映像信号は一本の連綿と続くアナログ信号となる。実は、この連綿と続く1系統の信号であることが映像を電送する場合のキーポイントであり電波で信号を送信する原点である。これが逆にハイスピードカメラを開発する際、周波数の高帯域化が難しいため、高速化のネックになっている。映像信号は、0V～1Vのアナログ信号であり、その中の0V～0.3Vは同期信号に割り当てられ、0.3V～1.0Vが映像信号にあてられる。暗い被写体は低い電圧であり、明るい被写体は1V近い電圧となる。

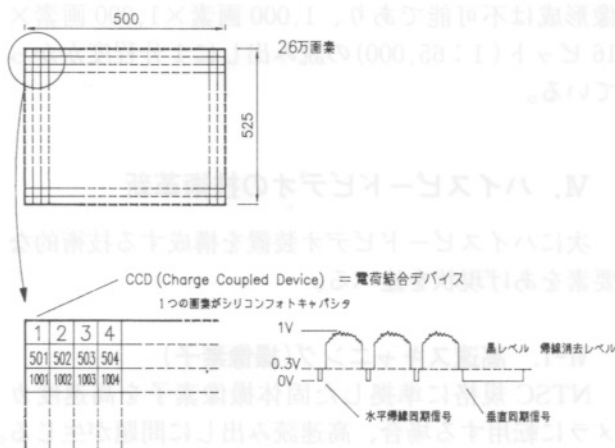


図6 NTSC テレビ信号(CCDカメラの取り出しと電気変換信号)

V-4. 撮像素子——CCD (Charge Coupled Device)

CCD 固体撮像素子は、光学像を電気出力に変換する撮像素子の中で最も一般的なものである。光に感度のあるシリコン板をIC集積化技術を使って細かなトンボの複眼のようなセルを作り、これに電気配線を施しテレビジョン規格に従い映像信号を作り出すものがCCD撮像素子である。シリコンの一つ一つのセルは、ピクセルとか画素と呼ばれ画素数が多いほどきれいな映像が得られる。撮像素子はCCDだけでなく、MOS、CID、CMDなどと呼ばれる固体素子を始め、イメージオルシコン、ビジコン、プランビコン、サチコン、カルニコン、ハーピコンなどの撮像管(電子管)も多種開発されている²⁾。

これらの中で、何故 CCD が有名になり撮像素子の代名詞となったのであろう。これは、大衆マーケットである8mmビデオに広く採用され、そこその画質と使い勝手の良さ、大量供給による低価格化で市場占有率が増えたためである。CCDカメラは、米国ベル電話機研究所が開発し、日本のSonyが1970年代後半に市販化したものである。そもそもの発端は、日本の航空会社の要求で航空旅客機に搭載して、離着陸時の機外の様子を客室へモニタする乗客サービスから市販化されたといわれている。当時は、画素数も少なく画質が悪いため放送業界はもとより、一般産業分野(当時、これを放送テレビと区別してITV=Industrial Televisionと称していた)でも受け入れ難く、振動、耐久性を重視する航空機搭載の強い要求がCCD固体撮像素子を育て上げたといえる。いずれにせよ取り扱いが簡単なことや、過度の光が入射しても素子を傷めないことから、開発当初は放送局業界よりも一般産業界で着実に顧客をつかみ、感度、解像度、価格などを向上させていった。同時代、日立からもMOSタイプの撮像素子が開発され市販化されたがCCD陣営に追いついて拮抗するまでには至らなかった。

V-5. S-VHSビデオの解像力

S-VHSビデオは、記録信号帯域を7MHzまで高め解像力アップを狙ったビデオ機器である。放送用としてではなく、アマチュアが個人でビデオ録画をする目的のため、NTSC規格にとらわれることなく開発された。映像信号の記録も全てを重畳して1本の信号線で処理する方法から、映像輝度信号、色差信号を別々に分けて記録再生することにより解像力を上げている。S-VHSの信号帯域から解像力を割り出すと最高890TV本になる。解像力が900本近くなるとかなりきめの細かい画像になる。しかし、トータル的に見るとS-VHSの解像力は400本前後になる。

V-6. NTSC規格のカラー情報

NTSC規格(テレビジョンシステム)は、妥協とごまかしの産物である。しくみと原理をよく理解して使わないと混乱をきたす。カラーテレビジョンは、白黒テレビジョンが全世界的に広まった後で開発されたため、白黒テレビ受像機をもっているユーザでも受信するカラー映像信号を白黒で見えるようにしなければならなかった。平たくいえばカラー映像信

号は、昔取り決めた白黒映像信号と基本的に同じにして白黒テレビでも何等问题なく受信するようにしなければならなかった。したがって、NTSC 規格のカラー信号はほとんどが白黒の映像信号と同じであり、この白黒輝度信号の中の比較的広い映像部分(ここは映像周波数としては低い周波数になる)に色の情報を伝える色差信号をのせている。色差信号はカラーテレビ受像機のみ分離、再現できる信号で、白黒テレビ受像機では検出せず干渉もしないものである。周波数でいうと 500 KHz までの輝度信号に色情報をのせ、輝度信号自体は 3.58 MHz までとし、これを映像信号としている。500 KHz の信号は解像力に直すと 63 TV 本になる。これ以上の細かい部分については、人間が色を感知せず光の強さだけを認識していることをうまく逆手にとって輝度情報だけを送っている。したがって、VTR や通常の CCD カメラを使ってカラー画像処理を行う場合、細かい部分のカラー情報を持ち合わせないため色情報を取り出すことはできない。カラー画像処理を行うためには RGB 方式のビデオカメラと RGB 3 系統の画像メモリを組み合わせたものでなければならない。

V-7. ビデオ信号のダイナミックレンジ

ビデオ信号の輝度レベル(明るさ検知の範囲)は、前にも述べたように 0.3 V~1.0 V である。この映像輝度信号をどこまで識別できるだろうか。世に出回っているデジタルメモリは、映像信号が 8 ビット ($2^8=256$) 256 階調程度と規定して製作されている。黒レベルの 0.3 V から白レベルの 1.0 V までの 0.7 V を 256 段階にわけると 1 階調当り 2.7 mV になる。これほど純粋にカメラも VTR もモニタも信号を大事に扱えるかどうかは疑問であるが、一般にビデオカメラの階調は 1:100 (7 ビット)といわれている。これを被写体に照らし合わせて考えると、10,000 ルクス程度の屋外においては 1,000~100,000 ルクス程度の明るさを映像に収めることができる。したがって、10,000 ルクス以下の明るさでは真っ暗になり、100,000 ルクス以上の被写体は真っ白になる(実際は、暗い部分と明るい部分の直線性を変えて人間の眼に近づけた方法を採用している)。これ以上のダイナミックレンジをもつカメラはないであろうか。CCD カメラを例にとって考えてみよう。CCD カメラは、シリコンの光反応で像を電気変換する。シリコンは光に良く反応し、シリ

コンフォトダイオードのダイナミックレンジは 1:100,000 程度ある。同じ構造であるのになぜ 1,000 倍も違うのであろうか。理由は、検出信号電圧と S/N 比 (Signal to Noise ratio) にある。出力電圧を NTSC 規格でなく別の方式にすればダイナミックレンジを広くすることが可能である。分光分析用に使われている CCD カメラ(時には CCD 面を液体窒素やペルチェ電子冷却によって長時間露光と微弱光検出を可能にしたものもある)には 16 ビット (1:65,000) ダイナミックレンジをもつものも市販されている。これらのカメラは、NTSC 規格から解放されているために出力電圧を高くとることができ、また、信号取り出し時間もゆっくりとれるため S/N 比が向上し、分解能を高くとることができる。勿論この種のカメラでは、1 秒間に 30 枚という画像形成は不可能であり、1,000 画素×1,000 画素×16 ビット (1:65,000) の読み出しに 1 分程度かかっている。

VI. ハイスピードビデオの技術革新

次にハイスピードビデオ装置を構成する技術的な要素をあげ現状を述べる。

VI-1. 高速スキャニング(撮像素子)

NTSC 規格に準拠した固体撮像素子を高速度カメラに転用する場合、高速読み出しに問題が生じる。NTSC 規格のビデオ信号は撮像素子からの信号取り出しが 1 つのシリアル信号になるため(=一筆描きのように撮像素子面を走査するため)高速走査が難しい。この問題を打開する方法として複数の取り出し口から映像信号を出す方式が考えられるが、撮像素子を新たに開発しなければならず多大な費用がかかる。また、並列読み出し手法は、米国 Eastman Kodak 社のパテントになっているため安易に開発できない事情もある。

VI-2. 周波数帯域

周波数帯域はビデオ装置を設計するものにとって大きなファクターである。電気信号を扱う計測装置についてその信号処理能力をデジタルオシロスコープで考えてみる。通常オシロスコープは、2~4 チャンネルのアナログ電気信号を受け、A/D 変換(デジタル処理)される。デジタル分解能を表示スケールに十分な 1:100 とし(7 ビット)、サン

プリングを10ナノ秒とすると信号処理周波数は、
 $7 \text{ ビット/サンプル} \times 10^8 \text{ サンプル/秒}$
 $= 700 \text{ M ビット/秒} \dots\dots\dots (3)$

となる。これは100 MHzの記録周波数に相当する。デジタルオシロスコープのメモリは、通常256 KW(4 Mビット)程度であるから10ナノ秒のサンプリングで約5.8ミリ秒の記録となり、10 μ 秒単位のサンプリングにすると5.8秒の記録が得られる。記録は、ICメモリ(RAM = Random Access Memory)を用いるため長期的な保存はできない。したがって、データを保存する場合は、1.4 Mバイトのフロッピーディスクやハードディスク等に転送する必要がある。長時間記録をする場合にはデータレコーダが用いられる。データレコーダは、多チャンネル(8~16チャンネル)、長時間(10分~1時間)の記録できる特徴がある反面、記録できる信号周波数帯域が100 KHz程度となる。周波数帯域の限界は、記録媒体である磁気テープと磁気ヘッドの周波数特性で決まるため、あまり高い周波数は期待できない。

ハイスピードビデオカメラ装置は、これら電子計測機器とは比べものにならないほど長時間記録と高い記録周波数帯域をもつ。(1)式にあるように周波数は46 MHzに達し、デジタル値になおすと630 Mビット/秒に相当する。この程度もしくはこれ以上の撮影速度をもつビデオカメラを開発するには、専用の高速読み出し撮像素子開発はもとより記録周波数の高い記録媒体が必要である。記録時間が短くても良い場合、半導体メモリの使用が現時点で最良の記録媒体である。

VI-3. カラー録画

高速度ビデオカメラの中でカラー録画ができるのはナック製ハイスピードビデオのみである。厳密に述べると、1982年、ナックが1/2"VHS方式のカラーハイスピードビデオ HSV-200 を発売した2年後、1984年ロスアンゼルスオリンピックを契機にSonyより1インチビデオテープを用いた180コマ/秒のカラーハイスピードカメラが開発された。日本でも大相撲中継やプロ野球中継に使われた。また、1992年にはハイビジョン規格のカラーハイスピードビデオが開発された。いずれも価格的にも運用上でも折り合いがつかず安定供給にはいたっていない。白黒ハイスピードビデオカメラは、1983年米国Eastman Kodak社の関連会社であるSpin Physics

社によって特殊1/2インチテープを用いた2,000コマ/秒のカメラが開発された。このカメラは、4~5年間販売を続けていたが使用するテープが特殊で高価なこととメカ部分に解決しなければならない問題があり、現在では販売が見合わされている。これに代わって半導体メモリによる白黒ハイスピードビデオが販売されている。

カラーハイスピードビデオは白黒ビデオに比べて情報量が多く、使用者の立場からいえば不可欠な要素である。しかし、開発する立場からいえばカラー撮像素子、カラー分離光学系、信号処理回路など白黒に比べ格段に高度な開発技術が要求される。世界で最初に開発されたカラーハイスピードカメラ、ナック HSV-200 および HSV-400 には、撮像素子に高感度、低残像プランビコン管(撮像管)をR.G.B.(赤、緑、青)3本使用していた。R.G.B.3管方式は解像力が向上する反面カメラサイズが大きくなる。解像力の劣化を最小限にとどめ、撮像素子1つでカラー情報まで取り出す方式(カラーフィルタ方式)は、市販の小型8mmビデオより使われ始め、高速度カメラでは1994年ナックよりMEMRECAM Ci(図7)で初めて市販化された。このカメラの撮像素子はCCD素子ではなくCMD(Charged Modulation Device、オリンパス工業の開発)素子を使用している。この素子はCCD素子に比べ高速走査が可能のため、ハイスピードカメラに適している。

VI-4. 記録媒体——ビデオテープ、ICメモリ、光磁気ディスク

1980年代前半、高速で大容量の記録媒体はビデオテープのみであった。当時の技術水準では、ICメモリを使った映像記録では莫大な実装基板と費用

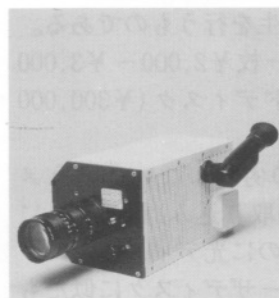


図7 小型一体型高速度カラーデジタルカメラ ナック MEMRECAM Ci



図8 データ圧縮技術を用いた高速度カラーデジタルカメラ ナック MEMRECAM C2S

がかかった。1990年代になってICメモリの高集積化と低価格化が可能になり、半導体メモリを用いたハイスピードビデオが開発されるようになった。半導体メモリは、デジタル記録が可能であるため再生画像の劣化がない。但し、電源をOFFにすると画像データが消えてしまうため、ビデオテープにダビングする必要がある。また別の録画に移りたい時も一旦ビデオテープにおとさなくてはならず、これがメモリ方式のジレンマになっている。長期保存用としてコンピュータに使われている磁気ディスク(ハードディスク)を考えてみる。磁気ディスクは、近年1Gバイト(8Gビット)程度のもので安価に市販されるようになった。このディスクで、白黒200コマ/秒、8ビット濃度、250ピクセル×265本の映像を2秒間コピーする場合、

$$8 \text{ bit/bixel} \times 250 \text{ pixel/本} \times 265 \text{ 本/コマ} \times 200 \text{ コマ/秒} \times 2 \text{ 秒} = 212 \text{ Mビット} \dots \dots \dots (3)$$

となり1Gバイト(8Gビット)の磁気ディスクに37回分の映像(総合75秒分)が記録できる。最近開発されたデジタル圧縮技術(JPEG、MPEG)を用いると見かけ容量が増えるため上記計算より10倍程度記録容量が増える。磁気ディスクは、高速取り込み/読み出しができないため(最大24Mビット/秒程度、映像では10コマ/秒程度)、磁気ディスクを直接アクセスして再生するのは得策ではない。再生には再度カメラのICメモリに移し変えて行う方法が良い。ナックMEMRECAM C²S(1995年開発、図8)は、記録方式にICメモリとJPEG圧縮技術を用い、96Mバイトのメモリで200コマ/秒、約20秒の撮影を可能にしている。

その他の記録媒体としては、最近開発された光磁気メモリがある。このメモリは、3.5インチ(φ89mm)の光ディスクに半導体レーザを使って128Mバイトのデジタル記録・再生を行うものである。メディア(光ディスク)は、一枚¥2,000~¥3,000程度で、1Gバイトのハードディスク(¥300,000程度)に比べ安価である。

デジタル記録はデータの劣化がないというメリットがある反面、データの取り込み/読み出しに時間がかかる。これを補うものに光ディスクレコーダがある。この原理は、レーザディスクに似たもので内蔵された半導体レーザによりφ30cmディスクに30コマ/秒の映像を2時間記録できるものである。但し、このディスクはレーザ光によって焼き切

るような形で記録されるためディスクメディア(約¥20,000~30,000)は、一回の記録のみとなり再録画はできない。また、記録方式もアナログ方式となっている。それでもデータの劣化は他のアナログ方式より格段に優れ、800本の解像力をもっている。アナログでありながら高解像力、大記録容量(換算容量1.3Gバイト/ディスク)をもつ光ディスクは、静止、サーチ、スロー再生等の使用上のメリットが大きい。

Ⅶ. ハイスピードビデオの新しい試み——MEMRECAM C²S

1994年6月ナックより新しいタイプのカラーハイスピードビデオが発売された(図9)。記録媒体に半導体メモリを用い1秒間に200コマのカラー映像を標準で1.92秒間録画でき、JPEGによる圧縮を起動させると録画時間を10~20倍に延ばすことができる。解像力も中心430本以上と初期HSV-200の2倍以上の性能をもち、ハイスピードビデオカメラの中でも最も高画質なものになっている。録画は半導体メモリを絶えず入れ換えながらストップ信号が入るまでエンドレスで録画を行う。録画をストップさせるには、操作ユニット、もしくは外部よりメイクコンタクト信号(信号線の両端をショートさせること、電気的にはTTLレベルのActive Low信号)により行う。映像記録のストップは記録時間軸の、最初、中間、最後のいずれかを選択することができる。本装置によりバッティング、スローイング、テニス・ゴルフのフォームチェックなど、選手の動きを記録し、ループモードで即座にスロー再生を行いフォームのチェックを何回も確認することができる。また、ワークステーション・大型画像処理装置と組み合わせ、本装置を自動画像処理装置の入力部として使用することも可能である。

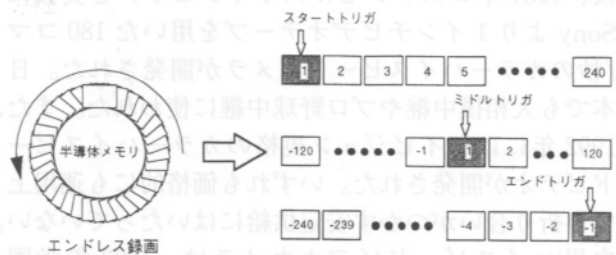


図9 半導体メモリを使った録画・ストップ

VIII. むすび

映像装置を使った運動解析、特にハイスピードビデオの現状と可能性について考察した。ハイスピードビデオは開発以来15年間に随分進歩した。われわれのハイスピードカメラに対するチャレンジは、撮影速度、画質、カラー録画、取り扱い勝手、画像処理であった。バイオメカニクス分野でのハイスピードビデオは、中速度、高画質映像による3次元解析と自動読み取り、解析手法の確立であろう。バイオメカニクス研究者はもっと複雑な動き、つまりひねりを含めた並進運動と回転運動の複合的な動きに注目を集めている。100 m 走を10秒で走り抜いて5/1000秒を云々する分野で、この違い(1/200)をハイスピードビデオ装置がどれだけ手助けできるかわれわれにはよくわからない。ただ、研究者が説

明してくれるハイスピードカメラの画像はとても説得力があるし、コンピュータ処理した情報が貴重なデータとなっていくことは間違いのないところであろう。自動車安全実験に高速度カメラの使用が規則で定められているように、スポーツ工学でも映像解析手法が発展し映像計測が確立されるに違いない。

文 献

- 1) 安藤幸司：映像解析最前線. Jpn. J. Sports Sci., 7 : 554-561, 1988.
- 2) 木内雄二：イメージセンサ. 日刊工業新聞社, 1978.
- 3) 澤崎憲一：VTR. コロナ社電子工学シンポジウム, コロナ社, 1971.
- 4) 田中, 安藤：ナックハイスピードカメラシステム HSV-1000/ウルトラナック. OPTRONICS, 12 : 73-78, 1991.
- 5) Waddell, J. : The rotating-prism camera: An historical survey. SMPTE, 75 : 666-674, 1966.