

特集 I : スポーツ実践者への科学技術の貢献

より効率の高い動作を求めて

——スポーツサイエンスと高速度カメラ——

安藤 幸司*

1. はじめに

スポーツサイエンスでは、計測装置の一つとして画像計測が導入され、いろいろなカメラや解析手法が開発されて、バイオメカニクスとしての学問が確立されてきた。映像とスポーツ、人体計測は非常に密接な関係があり、著者も本誌に何度となく拙稿を寄せた^{1,2,3,4)}。1枚の銀塩写真から始められた画像記録も高速度フィルムカメラから高速度ビデオカメラ、デジタルメモリカメラ、VICONに代表される位置検出のイメージセンサーに至り、コンピュータの発展と共に計測手法形態も変わってきた。スポーツをとりまく環境も、ウェアもシューズも道具の素材も大きな進歩を遂げてきている。

最近になって筆者が気づいたことに、スポーツ分野に限らずあらゆる分野にあてはまることとして、科学的アプローチが最高性能のあくなき追求よりも、いかに安全に、快適に、且つ環境に適応した技術開発をするかに主眼がおかれはじめていることがある。自動車分野でも200-300 Km/hのスピード挑戦よりも、事故からパッセンジャー(搭乗者)を守る安全対策(パッシブセイフティ、アクティブセイフティ)に技術の粋が集められ、エンジンも高出力よりも低公害、低燃費(エコノミー、エコロジー)の模索が続けられている。スポーツ分野でも競技者に対し、より速く、より高く、より遠くの命題はあるもののスポーツ障害および障害への回避、障害からの復帰に関する研究が増えている。スポーツ選手が40歳代まで現役を続けているのもスポーツ医学の恩恵無くしては語れないだろう。

筆者は、高速度カメラの計測装置を通して現代科学の最先端で働く研究者のアプローチを幾度となく

つき合ってきた。彼らは映像を、

①現象が全くわからない場合の現象把握の特効薬的手段

②自らの理論をわかりやすく他者にわからせるための最上の手段

として使っている。①は宇宙開発などのジェミニ、アポロ、スペースシャトル計画に、②は三菱自動車が開発した筒内直噴エンジン開発(GDI)のコンセプト説明と実証に顕著に見ることができるといえる。

本稿では、ビデオを中心とした高速度カメラの計測装置としての性能を概括し、併せて3D計測で完成された領域に達したモーションキャプチャシステム(VICON)について現状を報告する。

2. アトランタオリンピックが果たした映像手法のブレイクスルー

オリンピックは世界最大のイベントであり、選手一人一人の意識もさることながらこれを盛り上げる付帯設備も最新鋭の機器が投入され、全世界を興奮のつぼみに落とし入れるに十分なお膳立てとなっている。オリンピックの状況を時事刻々伝える映像手段もオリンピックを目標として開発されたものが多い。1996年7月に開かれた米国アトランタオリンピックでも数々の最新鋭の映像機器が投入された。

【Sony ベータカム高速度ビデオ(スーパーモーション)】

高速度カメラをオリンピックに投入する事例はめずらしくない。1932年のロスアンゼルスオリンピックではベル電話機研究所から開発されたばかりの16mm高速度フィルムカメラが100m走競技に処女撮影として使われた⁶⁾。1984年にはSonyがUマチック方式の高速度カラービデオをロスアンゼルスオリンピックに投入し、1992年バルセロナでは、キヤノンがハイビジョン用のカラー高速度ビデオを投

*Koshi Andou —株式会社ナック

入した⁷⁾。4年後のアトランタでは、ソニーがベータカム方式によるカラー高速ビデオを持ち込み、水泳、陸上競技にその威力をいかんなく発揮した。撮影速度は1984年以来180コマ/秒と速度的な向上は見られない。しかしその間、ハイビジョンカメラを用いて解像力を上げる試みがなされたり、放送用業界標準のベータカムの使い勝手、互換性を有効に利用し高解像力180コマ/秒カラー録画のスーパーモーションの開発をしたりと、画質や機動性の充実が図られた。ベータカムとの互換性を保ったスーパーモーションの意義は大きい。ベータカムは、世界中の全てのカメラマンが自らの手足のごとく使うことができ、バッテリー、レンズ、編集装置、延長ケーブルなど既存のベータカムと互換がとれる機動力も持ち合せているため、待ったなしのスポーツではなにもものにも代えがたい利点である。それが例え1台3~4000万円の開発・製造コストがかかったとしても一大イベントの刹那刹那を切り取って行く装置であるならば妥協せざるを得ないことといえよう。

【大口径超望遠ズームレンズ】

今回のオリンピックで目立った撮影ショットの一つに競技者のズームアップショットがある。従来のズームアップショットよりももっと近寄ったプレストショット（上半身を画面いっぱい映し出すアングル）が目立った。競技中カメラは競技者に近寄ることができず50mから100m程度の距離をとることを余儀なくされる。この場合当然のことながら望遠レンズと呼ばれる焦点距離の長いレンズが使われるが、100m離れたところから1m程度の範囲を撮影しようとする、焦点距離850mm程度の放送用レンズが必要である。35mmステイルカメラ（ニコン、キャノン）では撮像サイズが異なるので $f=2300$ mmレンズに相当する。望遠レンズは焦点距離が長いので、遠いところの物体を撮像面に結像させるため色によりレンズを透過・屈折する度合いが変わるといふ色収差の問題が顕著になり、レンズ口径を大きくすればそれがよりいっそう大きくなる。しかも望遠レンズは前面のレンズをかなり大きくしないと光が集まらない暗いレンズになってしまう。レンズ口径を大きくし色収差の出にくい非球面レンズ製作のための研磨機、人工弗化（ふっか）カルシウム（蛍石）の実用化と高速コンピュータによる光線追跡光学設計により大口径ズームレンズができるよ

うになった。動きの速い競技を望遠レンズで追いかける場合、シャッタースピードとレンズの明るさ、競技場の明るさが大きな問題となり、できるだけ明るく色収差のない望遠レンズが欲しくなる。放送用のCCDカメラは、ISO感度換算で1600程度であるので、1/1000秒のシャッターとレンズ絞りF3.4の条件で、2000ルクスの照度が必要である。この明るさは、明るい曇天では十分満足できる値であるが、夜間照明ではかなり厳しい値である。プロ野球のマウンドの標準夜間照度が2000ルクスで外野が1000ルクスと言われ、この競技ではかろうじて撮影できる値であるが、サッカーの公式競技の照度は750ルクスであるのでこの照度での望遠撮影はつらい⁸⁾⁹⁾。これらの望遠ズームレンズは、日本のキャノン、フジノンが世界的に有名であり、9.5mm~665mm（70倍）ズーム、口径比F1.6-3.4が使用されている。またイクステンダーと呼ばれる光学アタッチメントを取り付けると明るさは半分になるが焦点距離が倍になる。ハイビジョンカメラは一般の放送用カメラより感度が10倍ほど暗いため夜間競技や室内競技では苦戦を強いられている。アトランタではこれら高性能の望遠レンズが選手の表情をシャープにとらえ、スーパーモーションとの併用では水しぶきの一つ一つでさえも感動的に切り取っていた。

【高速移動カメラ台車】

通常、カメラはしっかりと三脚に固定され、パンニング（カメラを左右、上下に振る）によって競技走者の全行程を追いかける。今回のオリンピックでは100m走競技の撮影に高速で移動できる台車を用意し、これにカメラを載せて等身大のショットをスタートからフィニッシュまでとらえていた。この手法は、水泳競技では随分前から取り入れられていたが移動速度が比較的に遅いため（1.6m/s）カメラサポーターがレール架台に載せたカメラを押しながら撮影していた。映画ではよくやる撮影手法である。移動が高速になるとレールをどんなに精度よく作ってもカメラに移動中の振動が伝わり、望遠レンズを装着したカメラではかなりの絵ブレを覚悟しなければならない。クッション材を入れても振動数は下げられるもののカメラは別方向を向いてしまい遠くのを精度よくピタリと追従できない。高速移動台車は1994年リレハンメル冬季オリンピックの室内スケートで使用され、15m/s程度で滑走する

スケート選手のスケータリングをフルショットでとらえ新鮮味あふれる映像を提供した。カメラに与えられる外部の外乱を補正しカメラの姿勢制御をする技術は、ロケット工学のロケットエンジンの姿勢制御で使うジンバル (gimbal) 技術が応用された。この制御技術を利用したカメラ追跡架台は、1960年代から宇宙開発、軍需研究に導入されていた。高速移動台車は、レールに乗せられたカメラ架台にジャイロを内蔵した3軸の姿勢制御装置とカメラのパン・チルト・ズーム・フォーカス機能を備え、100 m 程度の移動空間を高速度で移動しながら被写体をしっかりとブレなくとらえることができる。今回この高速移動架台が100 m 走に導入され、100 m 走者の走りを実にダイナミックにとらえていた。

【ハンディカメラポータ (スティディカム)】

Skycam に代表されるジンバル機構を用いた姿勢制御架台は、内部にカメラの方向を検知するジャイロと指示された方向に絶えずカメラを向けさせるための3軸サーボ機構が取り付けられているため高価なものである。バルセロナオリンピックでは Sky-Cam の他にマラソンや開会・閉会式にハンディカメラポータ (スティディカム) が多用された。スティディカムは高価なジンバル機構を使用せずメカニカルなバランス機構を取り入れ、カメラマンを「やじろべえ」の支柱としてカメラのバランスをとるのである。このハンディカメラポータは、放送用カメラを軽々と持ち運ぶことができ、走りながらでもカメラがブレることなく選手を追うことができる。オートバイの後部座席に乗ったカメラマンがスティディカムを装着してマラソン選手を追走したり、開会式・閉会式で選手の中に入って臨場感あふれるシーンを放送していた。

【デジタルカメラ】

デジタルカメラは、1980年代前半 Sony が「マビカ」の商品名で市販化し、Kodak が独自の高解像力 CCD 素子 (1 Kx1 K 画素、3 Kx2 K 画素) をニコンカメラ、キャノンカメラに搭載した1990年から一般的になり、1992年のバルセロナから多用されるようになった。精緻なカラーデジタル画像が通信衛星を介して瞬時に全世界に送られるようになった。放送用カメラにおいても業界標準である Sony のベータカムフォーマットでデジタルカメラが開発され1992年のバルセロナでデジタル放送録画が試みら

れ、今回のアトランタではパナソニックが提唱する放送用システム M フォーマットのデジタルシステムが試みられた。従来のビデオ録画は磁気テープに周波数変調してのアナログ記録が主流であったが、高密度テープにデジタル録画する技術が確立され、オリンピックなどのイベントを足がかりに新しい放送規格への試みが始められている。また日本放送協会が提唱するハイビジョン放送も大がかりな設備を当地に持ち込みハイビジョンの可能性を模索していた。

【Swatch の水泳着順判定】

バルセロナでの公式計時システムは SEIKO が行い水泳の着順判定には磁気テープ方式の200コマ/秒カラー高速度ビデオが使われた。高速度ビデオが使われるのはリレー競技のフライングをチェックするためである。バルセロナではスイスの Swatch 社が計時システムを担当し、映像機器のバックアップは100コマ/秒の高速度ビデオが使われた。この高速度ビデオは、自動車のフォーミュラワンレースのラップタイム計時のバックアップにも使われているもので、ヨーロッパの放送規格 (PAL、25 フレーム/秒、50 フィールド/秒) の走査線を半分に間引きし相対撮影速度を倍にしたもので、解像力は期待できない反面、安価なシステムを構築できる。

3. ハイスピードビデオカメラの総括

1) 日本でのハイスピードビデオの開発

前にも述べたように、世界で初めてハイスピードビデオが開発されたのは1972年のことである。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 (図1)。1981年、ナックが世界で初めての1/2インチ VHS 方式によるカラー200コマ/秒高速度ビデオを開発した。そして、1986年に撮影速度を2倍にした400コマ/秒の『HSV-400』を、1990年には 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を開発した。磁気テープ方式による高速度カメラの高速化は、現在の所、1000コマ/秒が最高で、それ以上の速度では記録処理時間が速い IC メモリを使用した方式をとっている。1994年に開発した MEMRECAM Ci は、画像読み出しが直接アドレスできる撮像素子=

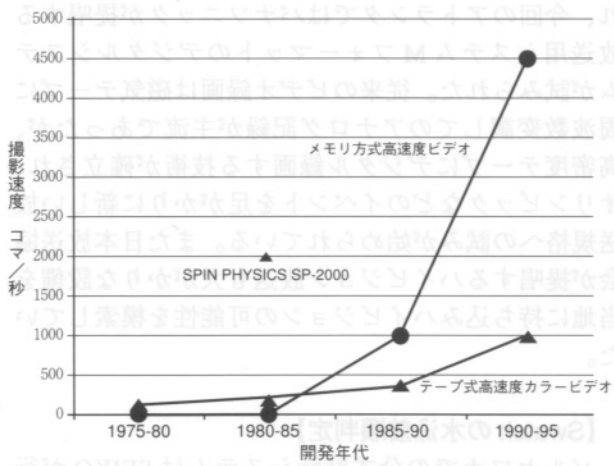


図1 高速度ビデオ撮影速度推定

CMD (Charged Moduration Device、オリンパス光学工業開発) を使い、記録媒体には IC メモリを採用したカメラ一体構造とし、2000 コマ/秒の撮影速度を得ている。このカメラの特徴は、非常にコンパクトな設計で、IC メモリ、デジタル回路を全てカメラ内部に収めていることである。1996 年には、小型軽量と使い勝手を重視した高速度カラービデオシステム (ナック HSV-500 C3、MEMRECAMC3) が開発された (図2、3)。このカメラの特徴は、カメラが従来のもよりコンパクトになり、カメラ撮像素子部でそのままデジタル処理され記録装置部までデジタルで転送される。記録装置は、長時間記録用の VHS テープを用いたものと (HSV-500 C3) と IC メモリを用いた装置 (MEMRECAM C3) のいずれかで記録される。磁気テープ方式は記録時間が長くとれ、録画時間を気にすることなく撮影を行うことができる。IC メモリは、解像力が高く、一度記録してしまえば画像の劣化がない。また、一日に一度起きるか起きないかという現象を延々待ち続ける撮影にはメモリタイプの記録が有効である。装置は DC バッテリー駆動対応として広い競技場でも電源を気にすることなく撮影ができるようになっている。

高速度ビデオの開発推移は、撮影速度の要因も強いが、使い勝手、コンパクト、カラーなどの性能面でのパラメータも強く働き、今までに述べたような機種のカメラが開発されてきた。今後の方向として撮像管 (チューブ) から固体撮像素子、テープからメモリー、白黒からカラー、高解像力、小型化へ進んでいくものと考えられる (図4)。

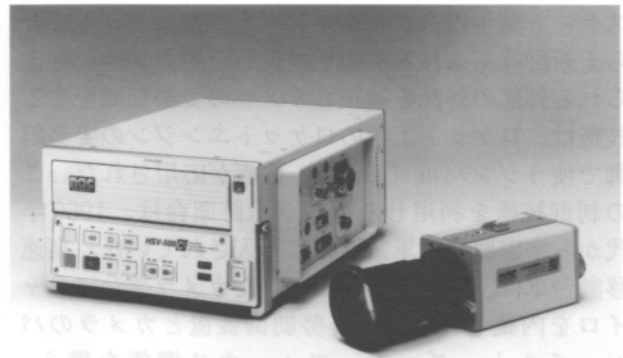


図2 テープ式小型ハイスピードビデオ(ナック HSV-500 C3)

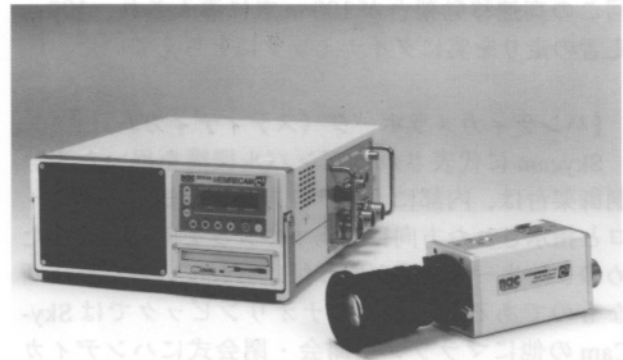


図3 メモリ式小型ハイスピードビデオ(ナック Memrecam C3)

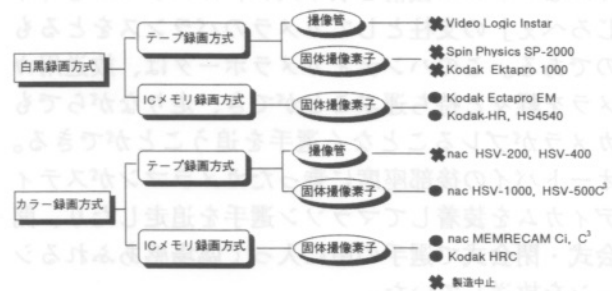


図4 ハイスピードビデオシステム構成

2) 米国でのハイスピードビデオシステム開発

米国では、1972年のVideo Logic社による高速度ビデオ以来、13年を経た1981年に、スピックス社 (Spin Physics社 = Kodak社 Motion Analysis Systems Divisonの前身) によって、新しいタイプの高速度カメラが開発された。このカメラは、撮像素子からの画像読み出しを数カ所から読み出して並列で記録する方式を採用したため、これまでにない高速度録画が可能になった。『SP-2000』と呼ばれたこのシステムは、白黒2000コマ/秒の撮影ができ、

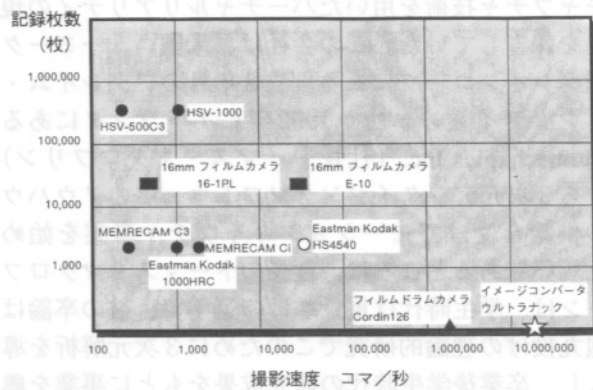


図5 高速度カメラ 撮影速度と記録枚数

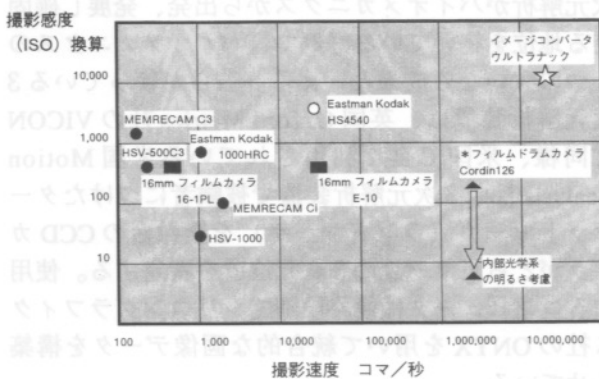


図6 高速度カメラ 撮影速度と撮影感度

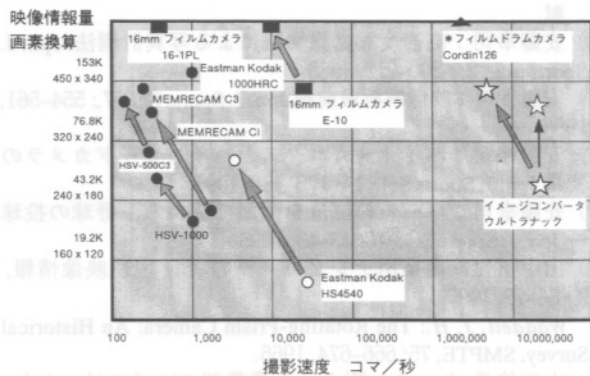


図7 高速度カメラ 撮影速度と一枚当たりの情報量

分割映像録画では12000コマ/秒の撮影が可能であった。このカメラは、従来のビデオカメラの常識を打ち破る画期的なもので、業界に一大センセーションを巻き起こした。これだけの高速撮影が可能になったのは、同社が専用の高速読み出し撮像素子を開発できたことと、並列信号を記録できる多チャンネルマイクロギャップ録画ヘッド及び高密度磁気テープの開発ができたことであった。同社は、この並列読み出しによる信号出力で特許を取得している。

Kodak社は、『SP-2000』の後継機種として、1986年にコンパクトなテープ式ビデオ『エクタプロ (= Ektapro) 1000』を発売した。また、同じ年には世界で初めて半導体メモリ記録方式を使った『Ektapro EM』を開発した。1993年には、新しい並列読み出し撮像素子によるICメモリ式高速度ビデオ『Ektapro HS4540』を発売した。このカメラは、4500コマ/秒の世界最高速の撮影速度を持ち、分割で40500コマ/秒の撮影速度まで可能になっている。1994年には、新しい並列読み出し式カラー撮像素子を使った1000コマ/秒のICメモリ高速度ビデオ『Ektapro HRC』を発売した。このカメラは、高解像力の固体撮像素子の採用により良好な画質の高速度画像が得られる。Kodak社は、テープ方式による高速度ビデオの生産を中止し、自ら開発した高速度カメラ用撮像素子を搭載してICメモリ式高速度ビデオのラインアップ体制を整えている。

3) 撮像素子の開発

NTSC規格 (National Television System Committee) は、米国、カナダ、日本、韓国で採用しているテレビジョン送受信の規格で1950年に骨子ができた。急激なテレビジョンの普及が災いして、技術が進歩しても広く出回った受像機の互換を保つため新しい規格を導入できず、抜本的な改良が望めないまま現在に至っている。この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、画像の読み出し時間に問題が生じる。NTSC規格のビデオ信号では、撮像素子からの信号取り出しが1つのシリアル信号であ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は、NTSC規格を離れ、複数の取り出し口から映像信号を並列に読み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、量産効果を望めないハイスピードカメラマーケットでは多大な開発コストを覚悟しなければならない。固体撮像素子は、1970年代にソニーが実用化に成功したCCDタイプと日立が同時期に完成したMOS型が主流でこの2種類が市場開拓を行い、Sonyが低価格高画質で主流の座を射止めた。CCD素子は高速シャッタ機能が可能、マイクロチップレンズを撮像素子に被せて高感度化を達成させた。MOS型素子も高速でスキヤニングできる利点から高速度カメラに使用されたが、市場規模はCCD素子に食われていった。放送分野とは別にコンピュータ分野、産業分野 (FA = Factory Automation) では放送規格にと

らわれない CCD 撮像素子が開発され独自の標準化を目指している。Sony の田中正俊氏は産業用テレビカメラの講演会で興味ある話を提供している⁵⁾。氏は講演の中で、「CCD 撮像素子の開発には多大の費用がかかり放送用の素子をそのまま産業用に移植したので、放送用規格が産業用ではネックとなった部分が多かった（例えば、画素数が水平 768 画素、垂直 525 画素と固定、読み出し速度が 30 コマ/秒、画素の大きさが 4 対 3 で正方形でないなど）。撮像素子は極端に小型化の方向にあり 1/6 インチまで登場してきているが、小さい撮像素子に見合う性能を持つレンズを製造できないためある程度の大きさで収斂する。Sony が近年開発したプログレッシブスキャン、正方形の CCD カメラはコンピュータ画面 (VGA640 x480 画素、SVGA1280 x1024 画素) に対応しデジタル出力にも対応しているので今後の産業分野にはある程度受け入れられるだろう。」とコメントされている。

4. 3次元計測

新しい計測手法として、3次元計測システムが確立し安定して供給されるようになった。このシステムの安定供給にはコンピュータ、それもパーソナルコンピュータの低価格化と高性能化を見逃すことはできない。2次元情報を得るカメラを複数台使って対象物の3次元位置を構築する技術は1970年代後半に台頭し、英国 Oxford Metrics 社の VICON システムが改良を重ねながら現在に至るまで充実したシステムを提供している。このシステムは最近「モーションキャプチャ」手法という名で親しまれ始め、ゲームソフト開発ではキャラクタの動きをモーションキャプチャシステムで取り込みキャラクタの肉付けを行うという作業が定着しだしている。1995年10月29日にNHKで放映されたNHKスペシャル『新・電子立国 第一回「驚異の画像～ハリウッドのデジタル技術～」』（相沢洋ディレクター）では、コンピュータの発展の事例の一つとしてモーション

キャプチャ技術を用いたバーチャルリアリティの現場を報告していた。この会社は、米国ニューヨーク州グレインコープにある創立8年目のアクレイム・エンタテイメント社で1992年にアトランタにある Biomechanics Inc. (社長トーマス・マクロフリン) から3次元デジタイジングソフトウェアのノウハウの供給を受けてモーションキャプチャ事業を始めた。興味あるところは、社長のトーマス・マクロフリンは、学生時代は重量挙げの選手で、彼の卒論は砲丸投げの理論的研究でこのために3次元解析を導入し、卒業後学生時代の研究成果をもとに事業を興し現在に至っていることである。「人の動き」の3次元解析がバイオメカニクスから出発、発展し確固たる地位を築いている好例で、バイオメカニクスの一つの大きい成果といえる。彼らが使っている3次元解析装置は、英国 Oxford Metrics 社の VICON と同様、米国で良く利用されている米国 Motion Analysis 社の3次元解析装置で被験者につけたターゲットマーカ (ランドマーク) を複数台の CCD カメラがとらえマーカの3次元位置を特定する。使用するコンピュータは最終段階でシリコングラフィクス社の ONYX を用いて統合的な画像データを構築させている。

文 献

- 1) 安藤幸司: 高速度写真撮影法による写真計測法. *Jpn. J. Sports Sci.*, 2, : 200-212, 1983.
- 2) 安藤幸司: 映像解析最前線. *Jpn. J. Sports Sci.*, 7, : 554-561, 1988.
- 3) 安藤幸司: バイオメカニクスとハイスピードカメラの変遷. *Jpn. J. Sports Sci.*, 14, : 175-183, 1995.
- 4) 安藤幸司: ボールの位置を画面で重ねる—野球の投球—. *Jpn. J. Sports Sci.*, 15, : 43-49, 1995.
- 5) 田中正俊: 産業用テレビカメラのトレンド. *映像情報*, 2, : 66-72, 1997.
- 6) Waddell, J. H.: The Rotating-Prism Camera: An Historical Survey. *SMPTE*, 75: 666-674, 1966.
- 7) 山下伸逸: キヤノン(株)カメラ事業部 DV プロジェクト, “高速カメラ”. *テレビジョン学会*, 502: 183-187, 1996.
- 8) 照明基準と照明設計のポイント. (財)日本規格協会, 1982.
- 9) 照明の省エネルギー技術. 電気書院, 1981.