筑波大学体育科学系紀要 Bull. Health & Sports Sciences, Univ. of Tsukuba 10：167—175, 1987.

コンピュータを用いた3次元運動解析に関する基礎的研究

山田憲政・関岡康雄・小林一敏
宮下　憲・金子靖仙*

A basic study on three-dimentional motion analysis via computer graphics

Norimasa YAMADA, Yasuo SEKIOKA, Kazutoshi KOBAYASHI
Ken MIYASHITA and Yasunori KANEKO

The purpose of this study was to construct a three-dimenitonal human body motion analysis system via computer graphics.

This system has the advantage of analysis and evaluation of human motion from a viewpoint of three-dimentional perspective.

The major functions of this system are summarized as follows:

1) Data of two dimentional coordinates for the segment endpoints can be collected by using both 16 mm film analyzer and VTR. There are two major functions in this data collection: a) prediction of next data during dizitization, b) immediate feedback by stick picture during dizitization.

2) Three-dimentional coordinates for the segment endpoints are computed by using direct linear transformation technique.

3) Stick pictures in motion that are viewed from any user-controllable direction are displayed on the CRT by using coordinate transformation.

4) Any portion of stick pictures which is appointed by user can be expanded.

5) Relative angle between two rigid body segments which is appointed by user is calculated.

6) Eular's angle to specify orientation of a rigid body segment in reference to fixed coordinate system are calculated.

This system has been actually used for the motion analysis. In this paper, we intoroduce the results of analysis about hurdle running.

〔緒　　言〕

身体運動は，一般に３次元空間内の現象であり，運動を近似的に特定の２次元平面に投影し解析を行うことは，困難である場合が多い。

しかし，運動学における身体運動の解析の多くは，２次元的に行われているのが現状である。

その理由として，以下の３つのことが考えられる。

1）身体運動の中で，歩，走といった基本的な運動では，身体の各部位，特に上肢や下肢の運動は，近似的に１つの平面内の運動と仮定して十分な場合が多い。

2）運動の解析を２次元から３次元へ移行するときに，各種力学量の算出が複雑になる[7]。

3）運動中の身体各部位の位置の時間的変化を写真撮影により記録する場合，２次元であれば１台のカメラをその光軸が運動の行われる平面に垂直になるように設置し撮影を行えばよいが，３次元の場合，一般に２台のカメラを必要とし，フィルムスピードの同期等，複

＊筑波大学大学院修士課程体育研究科

雑な問題が生じる。

運動学の研究では，身体運動を視覚的にとらえる手段として，計測して得られた身体各部位の位置座標から，スティックピクチャーを時間の経過と共に描く方法が多く用いられている[13]。しかしこの場合２次元的解析であれば，撮影されたカメラのフィルム面への投影図しか得られないため，運動の形態によっては，隠れてみえない部位が生じたり，角度・距離などの変容が生じるなど，視覚的にその運動をとらえるには多くの問題がある。

本研究の目的は，身体運動の３次元的な運動学的解析において，情報処理等の分野で発達しているコンピューターグラフィクスの様々な手法を利用した解析システムを構築することである。

この際，３次元運動が容易に認識できるよう視点を任意に変えうるような方法や，見たい部位を拡大する方法等を用いた。また，身体各部位の姿勢を知るためオイラー角を求めスティックピクチャーと比較した。なお，本研究で対象とした運動は，特に３次元的な運動であるハードル走である。

〔３次元運動分析システムの内容について〕

３次元運動分析システムの概要を図１に示す。その概略を以下に説明する。

１）座標入力

写真を用いた座標測定では，フィルム面上の像は，空間的な立体像の１平面への投影像となる。従って，フィルム面の２次元平面上の座標から３次元座標を求めるには，一般に２台のカメラで同一の物体を撮影することにより可能になる[4]。

本システムでは，２次元座標の座標入力は，16 mmフィルムまたはビデオフィルムから行う。16 mmフィルムの場合は，デジタイザー上に投影し身体各部位の座標を読み取り，マイクロコンピュータにそのデータを取り込む。またビデオフィルムの場合は，ビデオ画像とコンピュータ画面をスーパーインポーズし，コンピュータ画面上に「＋」印を表示し，それを動かし読み取る身体各部位に重ね合わせ，トリガーボタンを押すことによりそのデータをコンピュータに取り込む。この場合，次のような工夫がなされている。

① データの予測

５フレーム目までは前のフレームの対応するポイント上に＋印が表示され，６フレーム目からは，前の５ポイントの座標を最少２乗法を用いて２次式に近似し，その２次曲線により予測される座標に＋印が表示される。このことにより，＋印を動かす距離が減少し，読み取り作業時間の軽減に役立つ。またコンピュータ画面上には，前のフレームの対応するポイントとの距離が常に表示される。

② データの修正

座標の読み取り中，あるいは終了後，読み取ったデータからスティックピクチャー又は指定したポイントの軌跡をコンピュータ画面上に表示し，ビデオ画像とスーパーインポーズすることにより，データの確認，及びデータの修正ができるようになっている。ビデオ画面とコンピュータ画面の同期は，キーボードから次のコマに進む命令をコンピュータに入力すると，コンピュータからビデオに対しコマ送りをする信号が出力され，自動的に行われる。なお，この外部同期機能を有さないビデオデッキの場合は，マニュアルでコマを進めることによりコンピュータ画面との同期を行う。

２）３次元位置データ算出

２台のカメラから得られた身体各部位の２次元座標は，指定されたフレームで同期され，フィルムスピードが異なる場合は，スプライン補間により指定されたフィルムスピードに統一され，DLT (Direct Linear Transformation)法を用いて３次元座標が得られる。

３）コンピュータグラフィクスを用いたスティクピクチャーによる運動の再生

３次元図形を平面に投影する方法は，遠近感を付けない軸測投影法によるもの，遠近感得をつける中心投影法によるものに分けられる[12]。本システムでは，軸測投影法を用いて，３次元の運動を２次元のCRT画面上に対応させる。その際，３次元運動が容易に認識できるように，視点を任意に変えられる方法を用いた[6]。図２に，立方体を軸測

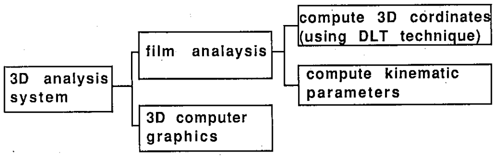

Fig. 1 Three-dimentional motion analysis system.

投影法によって平面に投影した図を示す。

図3に身体の軸と断面，そして視点の関係を示す。運動をする身体の初期状態の矢状面をXY平面，前頭面をYZ平面，水平面をXZ平面になるように静止座標系O－XYZを定める。身体の側方から視点を，左右方向へϕ，上下方向へθだけ回転した方向へ移したときの2次元図形を軸測投影法により得る。すなわち，Y軸まわりにϕだけ回転させ，x軸まわりに$-\theta$だけ回転させたO－xyz座標系における座標を求めればよい。まず，座標系O－XYZにおけるある座標を(X, Y, Z)，Y軸まわりにϕだけ回転した座標系における座標を(X1, Y1, Z1)とすると，以下の関係が得られる。

$$\begin{pmatrix} X1 \\ Y1 \\ Z1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (1)$$

次に，x軸まわり$-\theta$だけ回転した座標を(X2, Y2, Z2)とすると，以下の関係が得られる。

$$\begin{pmatrix} X2 \\ Y2 \\ Z2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 0 & \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X1 \\ Y1 \\ Z1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

(1)，(2)式より

$$\begin{pmatrix} X2 \\ Y2 \\ Z2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi \\ -\sin\theta\sin\phi & \cos\theta & -\sin\theta\cos\phi \\ \cos\theta\sin\phi & \sin\theta & \cos\theta\cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3)$$

(3)式より得られた(X2, Y2)をCRTの座標系に対応させることにより，視点を身体の左右方向へϕ，上下方向へθだけ回転させた方向においた図が得られる。ここで，図形を拡大や，座標変換をし，その結果をCRTに表示する場合，表示範囲をはみ出してしまうとエラーが発生する。そこで，はみ出した部分を取り去るクリッピングが必要になってくる(図4)。本システムでは，4ビットコードによる領域判定法[15]を用いてクリッピングを行う。

4）オイラー角の算出

オイラー角は，3次元空間の物体の姿勢表現に用いられるばかりではなく，この微分値を用いてオイラーの運動方程式を解くことにより，外部モーメントを求めるといった，動力学的解析にも用いられる。

オイラー角を図5に示すように静止座標系O－XYZに対する運動座標系o－xyzの回転角とし

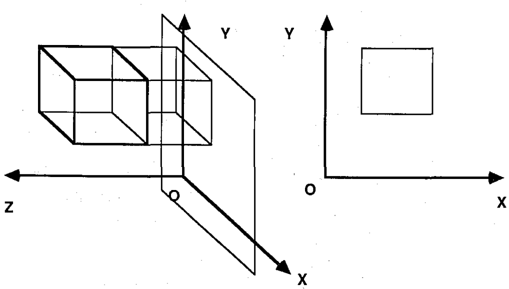

Fig. 2　Axonometric projection.

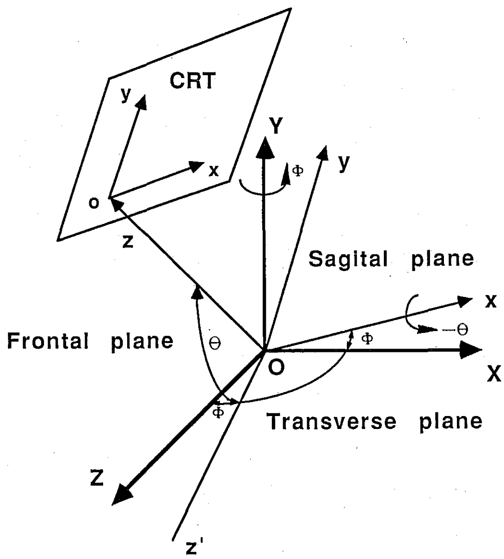

Fig. 3　Relationship between fixed coordinate system O-XYZ and view direction.

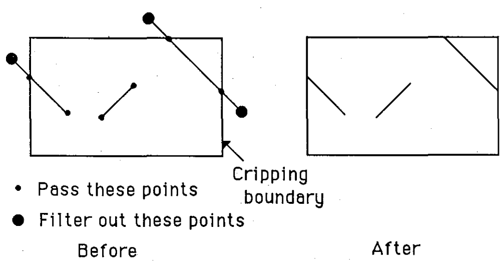

Fig. 4　Cripping.

て定義する[9]。ここで，各運動座標系の座標原点は，剛体の質量中心とし，y軸は，剛体要素の長軸方向に一致するように定める。さらに，z軸はその隣接する剛体要素が構成する平面に垂直となるように定める。

これより，静止座標系を運動座標系に変換するためには，図5に示した①—③の番号に従い，①まずX軸まわりに Θ だけ回転し，②次にY軸まわりに角 Ψ だけ回転し，③さらにx軸まわりに角 Φ だけ回転すればよい。このことから，静止座標系における座標 (X, Y, Z) は，(4)式によって，剛体内に固定した運動座標系における座標 (x, y, z) に変換することができる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = [\Phi][\Psi][\Theta] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{4}$$

ここで $[\Phi]$, $[\Psi]$, $[\Theta]$ は，変換行列であり，以下の形で与えられる。

$$[\Phi] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Phi & \sin\Phi \\ 0 & -\sin\Phi & \cos\Phi \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$[\Psi] = \begin{bmatrix} \cos\Psi & 0 & -\sin\Psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Psi & 0 & \cos\Psi \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$[\Theta] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Theta & \sin\Theta \\ 0 & -\sin\Theta & \cos\Theta \end{bmatrix} \tag{7}$$

これらの行列は，直交行列であり，逆行列と転置行列が等しい。そこで，次式が成立する。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [\Theta]^T[\Psi]^T[\Phi]^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \tag{8}$$

実際にオイラー角を求めるに当たっては，まず運動座標系を求める必要がある。図5に従い，まず $\overrightarrow{y_i}$ と $\overrightarrow{y_{i-1}}$ を算出し，$\overrightarrow{y_i}$ と $\overrightarrow{y_{i-1}}$ の外積によりz軸方向のベクトル $\overrightarrow{dz}$ が求まる（$\overrightarrow{y_{i-1}}$ は，運動座標系の定義により隣接する要素の長軸方向と一致する）。

$$\overrightarrow{dz} = \overrightarrow{y_i} \times \overrightarrow{y}_{i-1} \tag{9}$$

次に，$\overrightarrow{y_i}$ と $\overrightarrow{dz}$ の外積によりx軸方向のベクトル $\overrightarrow{dx}$ が求まる。

$$\overrightarrow{dx} = \overrightarrow{y_i} \times \overrightarrow{dz} = \overrightarrow{y_i} \times (\overrightarrow{y_i} \times \overrightarrow{y}_{i-1}) \tag{10}$$

x, y, z 軸，それぞれの方向をしめす単位ベクトル $\overrightarrow{e_x}$, $\overrightarrow{e_y}$, $\overrightarrow{e_z}$ は

$$\left.\begin{aligned} \overrightarrow{e_x} &= \frac{\overrightarrow{dx}}{|\overrightarrow{dx}|} = [x_1\ x_2\ x_3]^T \\ \overrightarrow{e_y} &= \frac{\overrightarrow{y_i}}{|\overrightarrow{y_i}|} = [y_1\ y_2\ y_3]^T \\ \overrightarrow{e_z} &= \frac{\overrightarrow{dz}}{|\overrightarrow{dz}|} = [z_1\ z_2\ z_3]^T \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

で算出される。

ここで静止座標系における任意の単位ベクトルを $\overrightarrow{p} = [p_1\ p_2\ p_3]^T$ とすれば，$\overrightarrow{p}$ を軸として反時計回りに θ だけ回転するときの変換行列は次式により与えられる[1]。

$$[R_\theta, P] = \begin{bmatrix} P_1^2V\theta + C\theta & P_1P_2V\theta - P_3S\theta & P_1P_3V\theta + P_2S\theta \\ P_1P_2V\theta + P_3S\theta & P_2^2V\theta + C\theta & P_2P_3V\theta - P_1S\theta \\ P_1P_3V\theta - P_2S\theta & P_2P_3V\theta + P_1S\theta & P_3^2V\theta + C\theta \end{bmatrix} \tag{12}$$

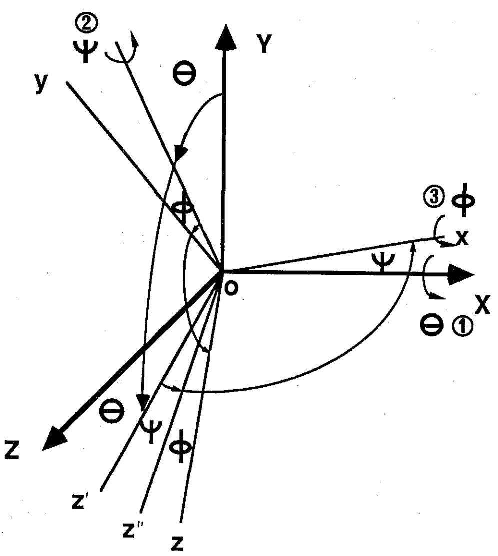

Fig. 5 Defintion of Euler's angles to specify orientation of a rigid body segment in reference to fixed coordinate sysem O-XYZ.

ここで

$$\left.\begin{array}{l} V\theta=1-\cos\theta \\ S\theta=\sin\theta \\ C\theta=\cos\theta \end{array}\right\} \tag{13}$$

である。

オイラー角の定義により，y軸をx軸回りに $-\Phi$ 回転すれば，y軸はXY平面に重なる。(12)式によりx軸まわりにy軸を $-\Phi$ 回転させると，

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [R_{-\Phi,x}] \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \tag{14}$$

変換後のy軸は，YZ平面に重なるので，X＝0とおくと，

$$\Phi=\tan^{-1}\{y_1/(x_2y_3-x_3y_2)\} \tag{15}$$

が得られる。同様に，x軸をy軸まわりに $-\Psi$ 回転すれば，x軸はX軸と一致する。よって変換後のY成分を0とおくと，

$$\Psi=\cos^{-1}x_1 \tag{16}$$

さらにy軸をx軸まわりに $-\Theta$ 回転すれば，y軸はY軸と一致する。よって変換後のZ成分を0とおくと，

$$\Theta=\tan^{-1}(-x_2/x_3) \tag{17}$$

が得られる。

以上から，図5におけるx, y, z軸の方向の各単位ベクトル $\vec{e_x}$, $\vec{e_y}$, $\vec{e_z}$ が求まれば，式(15), (16), (17)よりオイラー角が算出される。

なお，$\vec{y_i}$ と $\vec{y}_{i-1}$ が平行で，運動座標系が求まらない時や，運動座標系のx軸と，静止座標系のX軸が一致し，オイラー角が一意に求まらない時などの特殊な条件下では，前後の値からその値を補間する。また，剛体の姿勢は，同一直線上にない3個の構成質点の位置によって完全に定まるので，実験の際，身体へのマーキングを工夫することにより，運動座標系の算出が問題なく行われる。

ここで，体操競技のように，身体が運動中2－3回転するような場合には，オイラー角が不連続になり，その微分値を用いた角速度，外部モーメントなどの算出が不可能になる。このような場合には，回転方向，回転の回数をプログラム上で確認し，不連続が生じた時点で前の値に加算する方法を用いて，不連続が生じないように処理をしている。

各要素の回転速度をオイラー角の微分値で表現すると[10)]

$$\begin{bmatrix} W_x \\ W_y \\ W_z \end{bmatrix} = [\pi] \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\Psi} \\ \dot{\Phi} \end{bmatrix} \tag{18}$$

となる。ここで変換行列 $[\pi]$ は，

$$[\pi]=\begin{bmatrix} \cos\Psi & 0 & 1 \\ \sin\Psi\sin\Phi & \cos\Phi & 0 \\ \sin\Psi\cos\Phi & -\sin\Phi & 0 \end{bmatrix} \tag{19}$$

5） 3次元空間における角度の計算

3次元空間において角度を算出する際，X軸方向から見たある剛体要素のY軸に対する角度のように，3つのベクトルが与えられる場合と，2つの剛体要素間の相対角というような，2つのベクトルが与えられる場合とが考えられる。まず3つのベクトルが与えられた場合の角度の算出方法であるが，実空間に3つのベクトル $\vec{r'_1}$, $\vec{r'_2}$, $\vec{r'_3}$ があったとき，$\vec{r'_3}$ の方向から見た $\vec{r'_2}$ の $\vec{r'_1}$ に対してなす角度 θ を求めるとする。

まず，3つのベクトルの始点が，静止座標系の原点0と一致するように各ベクトルを平行移動させ，そのベクトルをそれぞれ $\vec{r_1}$, $\vec{r_2}$, $\vec{r_3}$ とする（図6）。

$$\left.\begin{array}{l} \vec{r_1}=[x_1\ y_1\ z_1]^T \\ \vec{r_2}=[x_2\ y_2\ z_2]^T \\ \vec{r_3}=[x_3\ y_3\ z_3]^T \end{array}\right\} \tag{20}$$

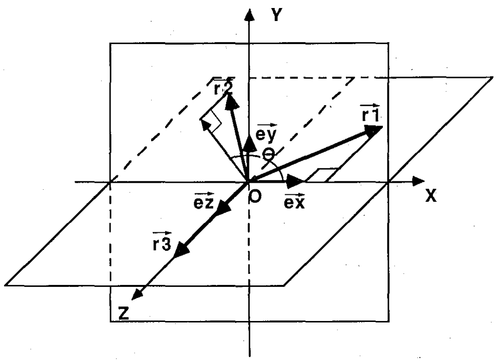

Fig. 6 Definition of θ that is determined by three space vectors. (angle between $\vec{r_1}$ and $\vec{r_2}$ in view of $\vec{r_3}$).

この時θを求めることは，$\vec{r_3}$の方向から見た$\vec{r_2}$の$\vec{r_1}$に対してなす角を求めることに他ならない。

まず，静止座標系O－XYZへの座標変換を行う。Z軸を$\vec{r_3}$の方向とし，$\vec{r_1}$と$\vec{r_3}$はXZ平面にあるとすると，$\vec{r_3}$と$\vec{r_1}$の外積は，Y軸方向のベクトル$\vec{Dy}$をつくる。

$$\vec{Dy}=\vec{r_3}\times\vec{r_1} \tag{21}$$

次に$\vec{Dy}$と$\vec{r_3}$の外積はX軸方向のベクトル$\vec{Dx}$をつくる。

$$\vec{Dx}=\vec{Dy}\times\vec{r_3}=(\vec{r_3}\times\vec{r_1})\times\vec{r_3} \tag{22}$$

$\vec{Dx}$, $\vec{Dy}$, $\vec{r_3}$から各軸方向の単位ベクトル$\vec{e_x}$, $\vec{e_y}$, $\vec{e_z}$を求める。

$$\vec{e_x}=\frac{\vec{D_x}}{|\vec{D_x}|},\ \vec{e_y}=\frac{\vec{D_y}}{|\vec{D_y}|},\ \vec{e_z}=\frac{\vec{r_3}}{|\vec{r_3}|} \tag{23}$$

これらのベクトルの座標系o－xyzにおける成分は，X, Y, Z各軸方向の方向余弦を与え，それにより座標系o－xyzから座標系O－XYZへの変換行列Rをつくることができる。すなわち，

$$\left.\begin{aligned}\vec{e_x}&=[l_1\ m_1\ n_1]^T\\ \vec{e_y}&=[l_2\ m_2\ n_2]^T\\ \vec{e_z}&=[l_3\ m_3\ n_3]^T\end{aligned}\right\} \tag{24}$$

$$[R]=\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1\\ l_2 & m_2 & n_2\\ l_3 & m_3 & n_3\end{bmatrix} \tag{25}$$

$\vec{r_2}$の座標系O―XYZの成分(X_2, Y_2, Z_2)は，変換行列Rを用いて

$$\begin{bmatrix} X_2\\ Y_2\\ Z_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} l_1 & m_1 & n_1\\ l_2 & m_2 & n_2\\ l_3 & m_3 & n_3\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_2\\ y_2\\ z_2\end{bmatrix} \tag{26}$$

として得られる。

$\vec{r_2}$の座標系O－XYZでのXY平面への写像は$(X_2, Y_2, 0)$であるから，求める角度θは，

$$\theta=\tan^{-1}(Y_2/X_2) \tag{27}$$

として得られる（ただし，$-\pi\leqq\theta\leqq\pi$）。

実空間における3次元ベクトルが2つしか与えられていない場合，すなわち$\vec{r_3}$が与えられていない場合，$\vec{r_2}$の$\vec{r_1}$に対してなす角度θを求めるためには，$\vec{r_1}$及び$\vec{r_2}$がXY平面上にあるような座標系O－XYZを考える。この時θは，$\vec{r_1}$と$\vec{r_2}$のなる角度の絶対値として計算できる(図7)。そこでまず$\vec{r_1}$をX軸方向のベクトルとすると，$\vec{r_1}$と$\vec{r_2}$の外積はZ軸方向のベクトル$\vec{Dz}$をつくる。

$$\vec{Dz}=\vec{r_1}\times\vec{r_2} \tag{28}$$

次に$\vec{Dz}$と$\vec{r_1}$の外積はY軸方向のベクトル$\vec{Dy}$をつくる。

$$\vec{Dy}=\vec{Dz}\times\vec{r_1}=(\vec{r_1}\times\vec{r_2})\times\vec{r_1} \tag{29}$$

X, Y, Z軸方向の単位ベクトルはそれぞれ，

$$\vec{e_x}=\frac{\vec{r_1}}{|\vec{r_1}|},\ \vec{e_y}=\frac{\vec{D_y}}{|\vec{D_y}|},\ \vec{e_z}=\frac{\vec{D_z}}{|\vec{D_y}|} \tag{30}$$

となる。

そして，式(24)から式(27)により，ベクトルが3つある場合と同じ手順でθが計算できる（ただし，$0\leqq\theta\leqq\pi$）。

本システムでは，このようにして，各剛体要素のオイラー角，静止座標系の各平面に投影したときの指定された軸となす角，そして指定された2つの剛体要素間の相対角が算出される。

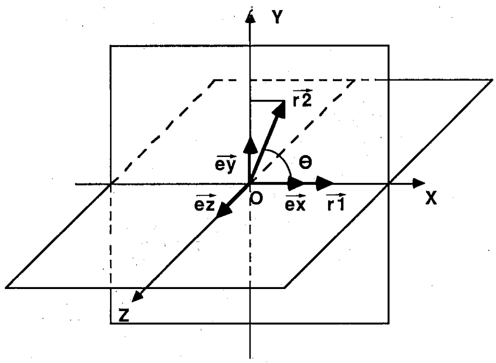

Fig. 7　Definition of θ that is determined by two space vectors (Relative angle between $\vec{r_1}$ and $\vec{r_2}$).

〔3次元運動分析システムの実際〕

この3次元運動解析システムにおいて，ハードル走を分析した。ハードル走の動作分析の研究は少なく[2,3,5,8,11,14]，また，いずれも3次元分析に至っていない。

コンピューターのCRT上に出力される主な図を以下に紹介する。なお，今回の分析に用いた被

験者は，現在日本記録保持者であるS選手である。

(3)式において，角 ϕ 及び角 θ に様々な値を入力した場合の，CRT上に出力されるスティクピクチャーを図８に示す。この図中の上図においては，$\phi=45^\circ$，$\theta=-45^\circ$，下図においては，$\phi=0^\circ$，$\theta=-90^\circ$ を入力している。この場合，1/12秒間隔で表示されている。また，踏切時の静止座標系の各平面に投影した３つの図と，任意の方向に視点をおいたときの図を，CRTを４つに区分して出力したものを図９に示す。図中の右上の部分が視点を任意に置いたときのものであり，この部分の図は，繰り返し角度を入力することにより変化するようになっている。また，側方に視点をおいた場合の，踏切付近の拡大図を図10に示す。

このように，運動の再生の際，視点を様々に変化させた図や，見たい部分を任意に拡大した図が表示されることにより，３次元運動を認識するのに役立つと考えられる。

これらの図から，踏切後，滞空中の踏み切り脚の運動範囲は広く，大腿と下腿のなす角度の変化が，非常に捉えにくいことがわかる。この滞空中の踏切足の運動は，宮下[8]らの，熟練者と未熟練者を比較したハードル走の実験的研究において，その動きの重要さが指摘されているが，実際に滞空中の大腿と下腿のなす角度は，正確には算出されてない。

そこで，(27)式により，踏切後，着地までの滞空中のこれらの間の相対角を算出した。その結果を図11に示した。離地時には約160度あった相対角が，約0.4秒後には45度前後まで減少し，その後着地まで再び増加している。

このように，ハードル走において重要視されているが，その動きが正確に捉えられなかった動きが，３次元解析により正確に捉えられたことにより，ハードル走の指導等に役立つと考えられる。

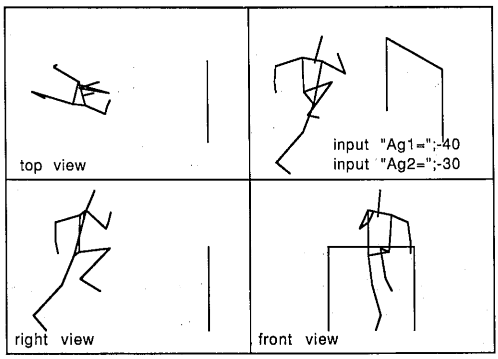

Fig. 9　Seick pictures in hurdling that are viewed from three fixed direction and one arbitrary direction.

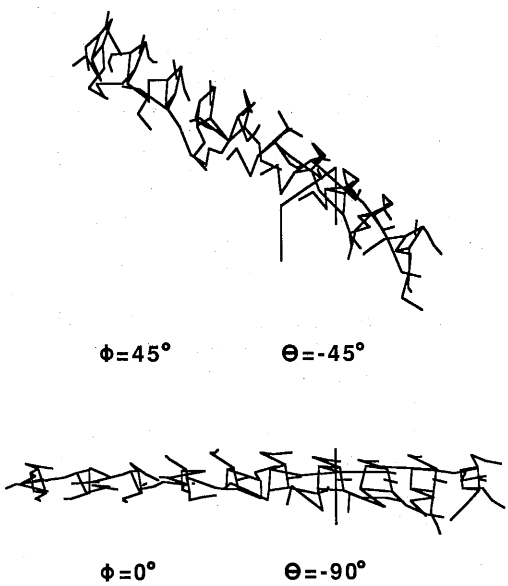

Fig. 8　Stick pictures of the hurdling.
ϕ, θ : refer to fig. 3.

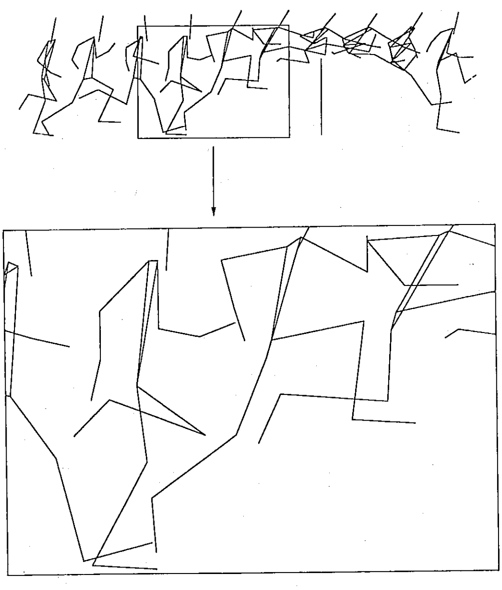

Fig. 10　Zooming of stick pictures.

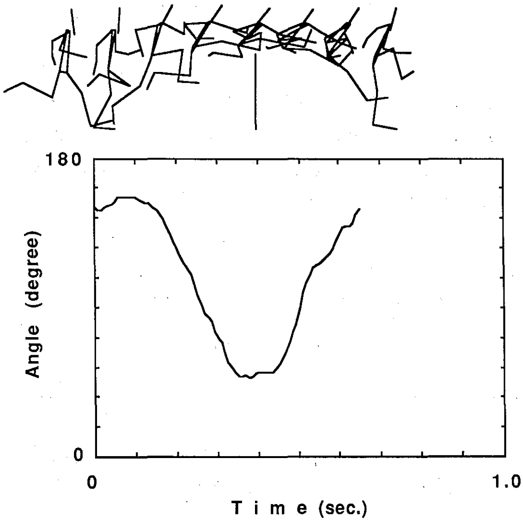

Fig. 11　Time courses of knee joint angle in hurdling.

次にこの踏切脚の大腿部のオイラー角の時間的変化を算出した。その結果を図12に示す。図中のDからEの区間が，離地後のハードルを越えている部分であるが，他の区間と比べ変動が大きいことがわかる。このことは，滞空中，踏切脚の大腿の姿勢の変動が大きいことを意味している。

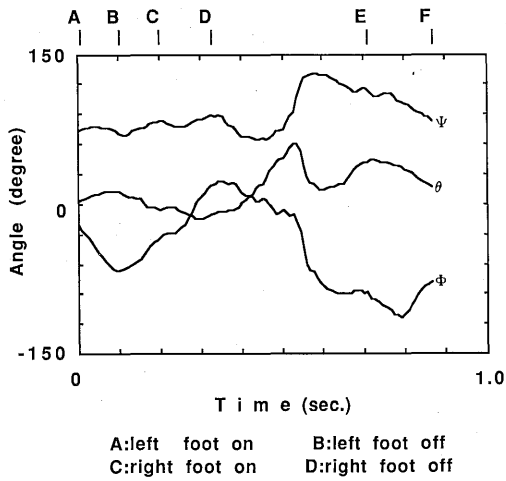

Fig. 12　Time courses of Euler's angles of thigh in hurdling.

〔まとめ〕

コンピュータグラフィクスを用いた3次元運動解析システムを構築した。その際，現在情報処理等の分野で用いられている手法を運動学の解析に応用し，システム化したばかりではなく，データの予測等，新しい手法を組み込んだ独自のシステムを構築した。

実際にこのシステムを用いて，3次元的にはほとんど分析されていないハードル走を分析した結果，2次元の分析では算出できない相対角が算出され，その角度の時間的変化とCRT上に出力される様々なスティクピクチャーとを比較することにより，3次元運動の認識に彼立つと考えられた。

引用・参考文献

1) D.F. Rogers（山口富士夫訳），コンピュータグラフィクス，日刊工業新聞社，1979. pp. 60-64.
2) 飯本雄二，小林一敏，菅原秀二「ハードリングの動作パターンの力学的考察」日本体育学会大会号，30：451，1979.
3) 飯本雄二，小林一敏「ハードルの高さと間隔を変えた場合の110mハードルについての力学的考察」東京体育学研究，6，123-132，1981.
4) 池上康男「写真撮影による運動の3次元的解析法」J. J. Sports Sci., 2-3：163-170，1983.
5) 磯　茂雄，石井喜八「110m障害走の記録向上の要因分析」日本体育学会大会号，36：620，1985.
6) 岩田一男，森脇俊男，川野常夫，三原毅史「荷役作業における作業者の運動解析と評価の研究（第2報）」精密機械，48-11：51-56，1982.
7) M. Brandy（高野政晴・吉田勝久訳），ロボットモーション，ホルトサウダース，1982. pp. 23-26.
8) 宮下　憲，押切由夫「ハードリングの実験的研究」東京学芸大学紀要，27：164-172，1975.
9) M. Vokobratovic（加藤一郎・山下　忠訳），歩行ロボットと人工の足，日刊工業新聞社，1980. pp. 55-85.
10) M. Vokobratovic（加藤一郎訳），ロボットの手，日刊工業新聞社，1979. pp. 45-50.
11) 尾形　貢，関岡康雄，杉山喜一「主観的にとらえた練習手段の有効性について—110メートルハードルの場合—」日本体育学会大会号，35：56，1984.
12) 佐藤義雄，入門グラフィクス，アスキー，1984. pp. 130-140.
13) 例えば，杉山喜一，永井　純，関岡康雄「長距離疾走フォームに関する分析的研究」筑波大学体育科学系運動学類運動学研究，1：83-91，1984.
14) T. Obens "Pressure distribution and velocity as

characteristics in hurdle running", in Winter, D. A., Norman, R.W., Wells, R.W., Hayes, K.C. and Patla, A.E., (Eds.), Biomechanics IX-B, Human Kinetics Publishers: Champain, 1985. pp. 364-369.
15) 吉川弘之，コンピュータグラフィク論，日刊技連，1977. pp. 169-174.