

# Analysis of Human Kinetic Chain using Digitized Video Pictures

Hideo SASAHARA and Keishi TANAKA

## Abstract

The purpose of this study is to develop a video motion analysis system and to analyze the human kinetic chain during tennis service movements. The video digitizer and frame buffer were used to transfer the video picture to the computer. Polynomial regression curves of velocity were calculated from coordinate data. Relationships between maximal, minimum and points of inflection of racket head velocity and maximum wrist joint velocity were examined to solve the differential equations from velocity curves. The results of this study show that in this investigation that the phenomenon of maximum acceleration of a racket head caused by the negative acceleration of the wrist joint was associated with human kinetic chain.

**Key Words:** Video Motion Analysis System, Human Kinetic Chain, Tennis Service, Polynomial Regression Curves

## ビデオ画像解析による運動連鎖の研究

笹原英夫  
田中啓之

### はじめに

ヒトの動きの中で特に「投げる」、「打つ」、「蹴る」において合理的でかつ、しなやかな動きを「むち打ち動作；Whip Like Action」と表現することがある。これを身体各部位の速度変化の関係から観察し、各部位の速度関係を「運動連鎖」として示し、理想的なモデルを提唱した例はある。しかしながら、これは概念図であり、実データからの考察は未だに行なわれていない。本研究の目的はビデオ画像データ処理システムを新たに開発し、それをを用いてヒトの動きを解析し、運動連鎖を力学量として考察することである。

### 方 法

#### 1. スポーツ動作の録画

対象となる動作はテニス・サーブとした。熟練した2名の被検者にスピン・サーブとフラット・サーブを行なわせた。これらの動作中の身体部位の空間座標を算出するための標尺を画面に写し込んだ後にカメラを固定し、動作を側方より録画した。

#### 2. ビデオ画像のデジタイズ

日本電気社製パーソナル・コンピュータ PC-9801RX を用い、ビデオ画像取込みのために、拡張スロット内にデジタルアーツ社製ビデオデジタ

イザ Hyper-Vision+ を挿入し、録画した画像を1ドット当たり24ビット(約1670万色)のデジタル・データとし、1画面を640×400ドットで構成した。動作における身体各部位の座標の特定を行なうために同社製フレームバッファ Hyper-Frame+ を用い画面表示させた。プログラム開発言語はマイクロソフト社製MS-Cコンパイラ ver. 5.1 を主として用い、入出力において高速性が要求される箇所は同社製マクロアセンブラ ver. 6.0 によって記述した。

以上のプログラム開発環境ならびに動作環境はオペレーション・システムであるマイクロソフト社-日本電気社製 MS-DOS ver. 5.0 上で稼動させた。また、常駐型の各種のデバイス・ドライバとプログラム本体およびリソース部分は可能な限り EMS, XMS 領域に退避させフリー・エリアの増大を計った。

表示画面に対してマウスによるカーソル・クリックを行ない、身体各部位のディスプレイ上の座標データを得た。これを画面に写し込まれたキャリブレーション用の標尺の座標から補正演算を行ない、実空間の座標データを求めた。得られた各部位の座標データを演算し速度の変化を求めた。

### 3. 運動連鎖の検討

ラケットの先端、手関節、肘関節の速度変化を曲線回帰した。それらを微分して加速度曲線の関係を検討すると共に、速度曲線の極大値、極小値、変曲点の各々の関係を検討した。

## 結果ならびに考察

### 1. 身体各部位の速度、加速度曲線の計算

時刻  $t$  における速度  $v_t$  は以下の通り計算できる。

$$v_t = \sqrt{(x_{t+\Delta t} - x_{t-\Delta t})^2 + (y_{t+\Delta t} - y_{t-\Delta t})^2} / 2\Delta t$$

ただし、 $x$ ,  $y$  は対象点の座標、 $\Delta t$  はサンプリング間隔。

以上によりラケット・ヘッド、手関節、肘関節の速度変化を算出し、各々について曲線回帰を行なった。一例を Figure 1 に示す。得られた回帰

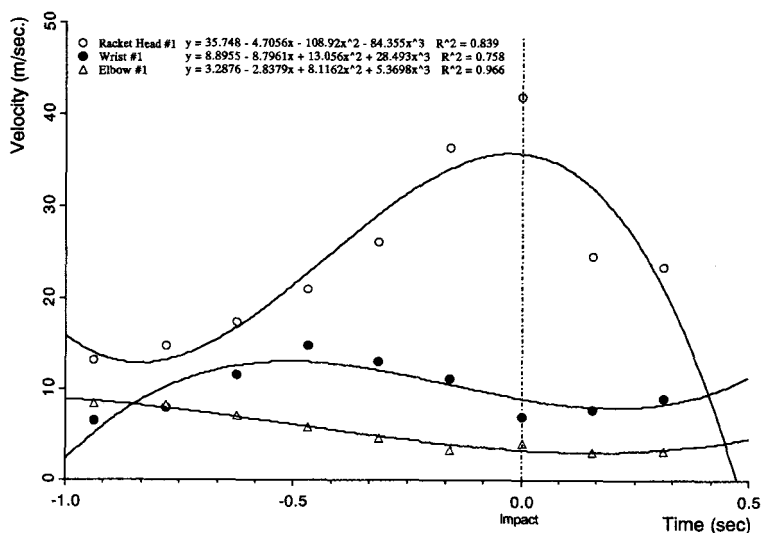


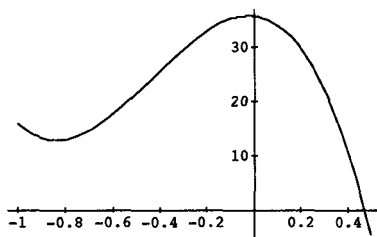
Figure 1. Variations of Velocity During Tennis Service Movement.

**List 1.**

$$y = 35.748 - 4.7056x - 108.92x^2 - 84.355x^3$$

$$35.748 - 4.7056x - 108.92x^2 - 84.355x^3$$

$$\text{Plot}[y, \{x, -1, 0.5\}]$$



-Graphics-

D[y, x]

$$-4.7056 - 217.84x - 253.065x^2$$

D[y, {x, 2}]

$$-217.84 - 506.13x$$

Solve[D[y, x]=0, x]

$$\{\{x \rightarrow -0.0221723\}, \{x \rightarrow -0.838634\}\}$$

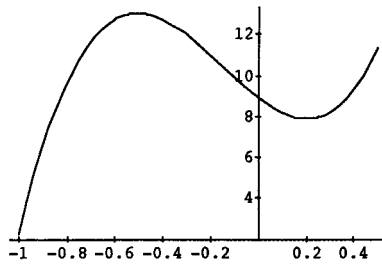
Solve[D[y, {x, 2}]=0, x]

$$\{\{x \rightarrow -0.430403\}\}$$

$$yw = 8.8955 - 8.7961x + 13.056x^2 + 28.493x^3$$

$$8.8955 - 8.7961x + 13.056x^2 + 28.493x^3$$

Plot[yw, {x, -1, 0.5}]



-Graphics-

D[yw, x]

$$-8.7961 + 26.112x + 85.479x^2$$

D[yw, {x, 2}]

$$26.112 + 170.958x$$

Solve[D[yw, x] = 0, x]

$$\{\{x \rightarrow 0.202553\}, \{x \rightarrow -0.508032\}\}$$

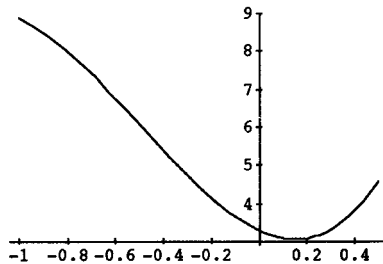
Solve[D[yw, {x, 2}] = 0, x]

$$\{\{x \rightarrow -0.152739\}\}$$

$$ye = 3.2876 - 2.8379x + 8.1162x^2 + 5.3698x^3$$

$$3.2876 - 2.8379x + 8.1162x^2 + 5.3698x^3$$

Plot[ye, {x, -1, 0.5}]



-Graphics-

Solve[D[ye, x] = 0, x]

$$\{\{x \rightarrow 0.151923\}, \{x \rightarrow -1.15956\}\}$$

Solve[D[ye, {x, 2}] = 0, x]

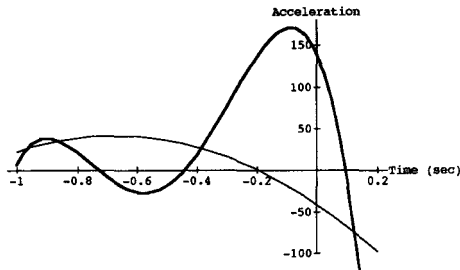
$$\{\{x \rightarrow -0.503818\}\}$$

**List 2.**

```

y=35.748-4.7056x-108.92x^2-84.355x^3
35.748-4.7056x-108.92x^2-84.355x^3
yw=8.8955-8.7961x+13.056x^2+28.493x^3
8.8955-8.7961x+13.056x^2+28.493x^3
ye=3.2876-2.8379x+8.1162x^2+5.3698x^3
3.2876-2.8379x+8.1162x^2+5.3698x^3
dy=D[y, x]
-4.7056-217.84x-253.065x^2
dyw=D[yw, x]
-8.7961+26.112x+85.479x^2
dye=D[ye, x]
-2.8379+16.2324x+16.1094x^2
Plot[{dy, dyw}, {x, -1, 0.2},
PlotRange->{-100, 180},
AxesLabel->{"Time (sec)", "Acceleration"},
PlotStyle->{{Thickness[0.005]}, {Thickness[0.001]}}]

```



-Graphics-

式の1次微分および2次微分より極大値、極小値、変曲点を求めた。Mathematica ver. 2.03 を用いた解法例を List 1 に示す。また、ラケット・ヘッドと手関節の加速度についてプロットした例が List 2 である。

**2. 運動連鎖の検討**

図2は友末(1990)による身体各部位の速度変化の模式図である。それによると(a)は身体各部位が最大速度に達したとき次の部位が加速を始める理想的な運動連鎖連鎖である。それに対して(b)は最大速度に達しないうち

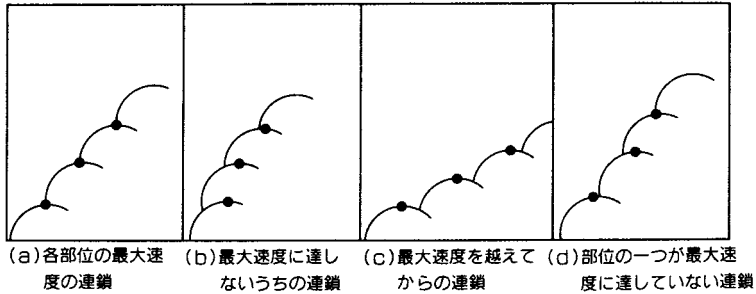


図2 身体各部位の速度変化の模式図(友末1990)

に次の加速が生じるものであり、結果として最終部位の最大速度は低いものになってしまう。(c)は最大速度を越えてからの連鎖であり、(d)は部位の1ヶ所が最大速度に達していないうちに次の加速が始まる連鎖のパターンである。これらも最終部位の最大速度は低いものになると考えられている。しかしながら、以上は概念図であり、ここで述べられている「次の部位の加速」とは明確に定義された力学用語ではない。

ここで、本研究ではまず、ラケット・ヘッドと手関節の速度変化の関係に着目した。Figure 3 は手関節の速度の極大値に対するラケット・ヘッドの極小値、変曲点、極大値(各々の値は平均値)である。フラット・サーブはスピン・サーブに対してラケットの動きが速いために短い時間で各相が出現するが、両者共に手関節速度の極大値はラケット・ヘッド速度の極小値と変曲点の間で、しかも変曲点に近いところにあることが分かった。しかしながら、この極小値と変曲点の間で変曲点寄りの領域を次の部位の加速が始まる点とするのは問題がある。すなわち、第一にスピン・サーブ、フラット・サーブの両者では出現する時相が必ずしも一致しているとは云い難いことであり、第二に加速が始まるのは極小値を越えたところであり、変曲点は加速が最大になる点であるからである。

そこで、次に両者の加速度について着目した。List 2 のスピン・サーブにおけるラケット・ヘッド(太線)と手関節(細線)の加速度と共に

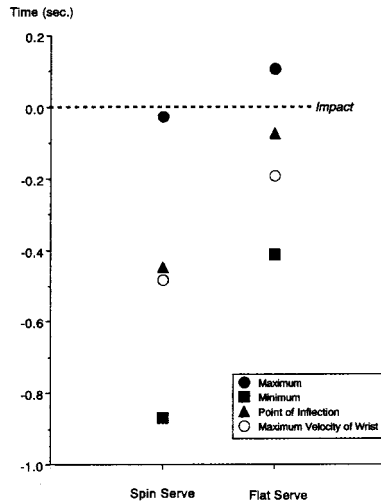


Figure 3. Timing Relationships between Maximum, Minimum and Point of Inflection of Racket Head Velocity and Maximum Wrist Velocity.

List 3 に示すフラット・サーブにおけるラケット・ヘッド（太線）と手関節（細線）の加速度を比較すると、ラケット・ヘッドが最大の加速度に達する以前に、手関節の加速度は負になることが共に認められる。言い替えば、手関節の加速度が負になることによって、ラケット・ヘッドに最大の加速度がもたらされる現象が運動連鎖であると云えよう。

以上のことから、本研究の条件下では運動連鎖に対して力学的な定義を提唱することができた。しかしながら、これは普遍的な定義にはなり得ない。なぜならば、対象となる被検者の例数が少ないためである。したがって、今後、例数を増やすことと共に、他の動作についても同様のことが云えるかどうか検討する必要がある。ところが、現方式でこれを継続するためにはいくつかの問題点がある。第一には画像データが膨大なものになることがあげられる。すなわち、本システムの方法で画像データを記憶させ

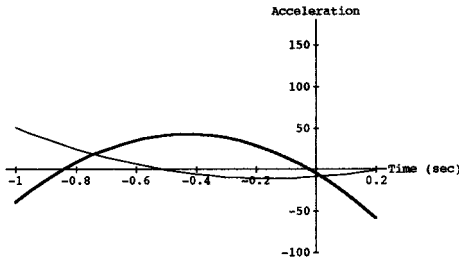


**List 3.**

```

y=47.017+139.2x-397.1x^2-1912.7x^3-2313.7x^4-888.72x^5
47.017+139.2x-397.1x^2-1912.7x^3-2313.7x^4-888.72x^5
yw=35.565-41.435x-122.42x^2-60.322x^3
35.565-41.435x-122.42x^2-60.322x^3
ye=10.94+3.0639x+32.399x^2+29.934x^3
10.94+3.0639x+32.399x^2+29.934x^3
dy=D[y, x]
139.2-794.2x-5738.1x^2-9254.8x^3-4443.6x^4
dyw=D[yw, x]
-41.435-244.84x-180.966x^2
dye=D[ye, x]
3.0639+64.798x+89.802x^2
Plot[{dy, dyw}, {x, -1, 0.2},
PlotRange->{-100, 180},
AxesLabel->{"Time (sec)", "Acceleration"},
PlotStyle->{{Thickness[0.005]}, {Thickness[0.001]}}]

```



-Graphics-

る場合、1画面につき 720 Kbyte 必要である。仮に対象動作を1秒間とすると、毎秒30コマの家庭用ビデオ・フォーマットで約 22 Mbyte、毎秒200コマのハイ・スピードビデオで 144 Mbyte 必要である。したがって、現在使用中のハード・ディスクでは実用に困難をきたすものである。この対策としては、画像の圧縮も考えられるが、データの精度が低下するため好ましいものとは言えない。そこで大容量のリムーバブル光磁気ディスクが常識的な低価格で販売されることを待ちたい。

第二に、動作の録画をするフィールドの設定が困難なことと共に座標入力に対して膨大な時間が必要であることがあげられる。このことに対しては以下に詳述する。すなわち、スポーツ動作の手軽なビデオ録画に対して、力学量の演算を目的とする録画には次のような手続きが必要となる。

#### (1) 対象空間のキャリブレーション

対象となる点の座標が画面上のどの点なのかを知るためには対象者の近くに標尺、鉛直線を示す紐と重りを設定し、カメラにキャリブレーション・ポイントを写し込まなければならない。したがって、一度設定したカメラは測定中は動かすことはできないために、カメラ1台では広範囲の正確な録画は困難である。また、カメラを複数台使用する場合はそれらの同期が必要となる。

#### (2) 測定対象点のマーキング

録画した画面上に明確かつ正確に対象点のマーキングが表示されないとデータ入力が困難になると共に誤差も増える。そのためには対象者の着衣は最小限に留め、皮膚上に直接マーキングを施すことが望ましい。この場合、防寒対策を始めとする複雑な手続きが必要となる。

#### (3) 光量の確保

測定点の画面上のブレを少なくするためにはシャッター・スピードは短いほどよい。そのためには強力なライトが必要である。しかしながら対象者に強い光をあてると動作の妨げになることが多い。

#### (4) 背景の設営

測定点を明確に録画するためには暗幕などを用いて対象者とコントラストをつけた背景を設営する必要がある。このことは特に屋外において、しばしば設営上の困難を伴う。

#### (5) 対象空間とカメラとの距離の確保

カメラのレンズ誤差による空間の歪みを少なくするためには現システムの分解能から計算すると対象空間の横幅に対して7倍以上の距離からの望遠録画が必要である。このことはカメラがセットできないフィールドの多

いことを意味する。

以上のような手続きが必要となるために、実際のスポーツ活動のフィールドに向いて気軽に録画することは困難である。

#### (6) 手動による座標入力について

座標入力に関してであるが、Figure 1 の入力を例にとると約3時間かかる。これは画面上のマーキングに対してマウスを用いてカーソルを合わせクリックする作業が熟練と忍耐を必要とするためである。

#### (7) 3次元解析に伴う困難さ

身体動作の中で解析を行なう上で重要な局面に身体の回転がある場合、カメラを1台で行なう2次元解析では情報量が不足してしまう。そこで2台以上のカメラを用いて3次元のデータを得ることは極めて重要であるといえよう。ところが、2次元解析に比べて3次元解析を行なう場合、録画を行なう場所の設定、座標データの入力に要する時間は筆者らの経験では3倍以上になってしまう。

したがって以上の事項から考えると、現在の方法では大量のデータ処理は不可能であるため本システムの手軽かつ、巾広い運用は困難である。

今後の課題として座標の自動読み取り方式を現在検討している。これは対象点を色の集合として認識させ、それによって次画面を推測させ、座標を特定するものである。例えばボールなどのように単純かつ明確な対象物の場合は現時点においてもある程度認識できるが身体運動に対して色の集合が複雑であり、かつ変化が大きいためには未だ不可能な状態である。色、形の自動認識に対するアルゴリズムをより検討する必要があるものと考えられる。

## ま と め

本研究はビデオ画像解析システムを開発すると共にそれを用いてヒトの動きの中でも運動連鎖を検討することを目的とした。従来、概念図として、ある部位が最大の速度に達した時にそれに続く部位の加速が始まる状態が

理想的な運動連鎖であると説明されてきたが、本実験データの検討によると、運動連鎖とはある部位の加速度が負になることによって、次の部位の最大加速度が得られる現象であると考えられた。このことを普遍的な定義とするためにはより多くの例を検討する必要があるが、大量の画像データを高速かつ正確に処理するためにはハード、ソフト共に大幅な改善が必要となり、今後の課題を残すこととなった。

本研究は平成3年度広島経済大学特定個研ならびに第6回マツダ研究助成の援助を得て遂行された。関係各位のご協力を深謝致します。

## 文 献

- 1) SASAHARA, H., TOMOSUE, R., ODA, N., and YANAGIHARA. E.,: Rebound Velocity Characteristics of Wide Body Tennis Rackets. XIIIth International Congress on Biomechanics. Book of Abstracts 125-126 Dec.1991
- 2) SUGIYAMA, K., MIURA, A., SASAHARA, H., and USUI, S.,: The Effects of Difference in The Thickness of Racket Frame and The String Tension on Tennis Ball-Racket Impact. XIIIth International Congress on Biomechanics. Book of Abstracts 131-132 Dec.1991
- 3) 友末亮三. テニスのパワーアップトレーニング. 大修館書店. 1990