

# 日本拳法の突きにおける前腕の挙動

Experimental Analysis of Japanese Martial Arts Nihon-Kempo

Punch and Behavior of the Forearm

倉賀野 哲造

渡辺 優子

KURAGANO, Tetsuzo

WATANABE, Yuko

横倉 三郎

今福 一寿

YOKOKURA, Saburo

IMAFUKU, Kazuhisa

## 要旨

日本拳法の突きにおける衝撃力の時間的変化を計測した。被験者が突きを行う際にグローブの有無により衝撃力がどのように変化するかを観察した。突きの直進性、前腕の空間的な挙動および振動について観察し解析した。

## 1. はじめに

日本拳法の突きの実験を行い、動作と衝撃力を分析したので報告する。日本拳法は戦国時代の甲冑組討ちを源流とした柔術を基本にして「突き」(パンチ)、「蹴り」(キック)、「投げ」,「関節の逆をとる」などの「技」から構成されている総合格闘技である。フルコンタクトの格闘技であるが、防具の使用により安全性が確保されている。これらの「技」のうち「突き」について実験を行った。

日本拳法の「技」に関連する研究は報告されている<sup>1-4)</sup>。しかし、工学的な分析を試みている研究は数少ない<sup>5-7)</sup>。そこで今回、グローブを着装した正拳突き(その場の逆突き:右ストレート)を実際に行い、突きの衝撃力と手首、肘、肩の時間的な位置の変化を計測し、分析した。このような、生体の機能を力学的な観点から解明しようとする学問は生体力学(biomechanics)と呼ばれている<sup>8)</sup>。特に衝撃力の計測の際には、拳の保護の為、標的に緩衝材を貼り付けた為、衝撃力の絶対値とはかけ離れていると推測する。

今回は、被験者を限定し、被験者の突きにおける衝撃力の変化を計測した。

第2章では、実験設備と実験内容について述べる。第3章では、被験者が突きを行う際にグローブの有無が衝撃力にどのように影響するかを述べ、第4章では、前腕の挙動について述べる。まず、突きの直進性について述べ、次に、前腕の空間的な挙動および前腕の振動について述べる。

## 2. 実験方法

被験者は2人である。1人は日本拳法2段で一昨年の全自衛隊日本拳法選手権の優勝者で身長173cm 体重88kg 年齢26歳である。他のひとは日本拳法3段で昨年の日本拳法全日本選手権の優勝者で身長176cm 体重84kg 年齢27歳である。突きの衝撃力の計測にはKisler社製（スイス）のピエゾ式3成分センサからなるロードセルを用いた。

手首・肘・肩の位置の変化の計測には、腕の関節に白いマーカを貼り付けてNAC社製高速度ビデオカメラHSR-500Cを用い毎秒125frameで撮影した。衝撃力はTriasシステムを用いて視覚化し、撮影した動作のデータはFrame Diasを用いて視覚化した。

## 3. グローブの有無における衝撃力の差

被験者が突きを行う際、グローブの有無がどの様に衝撃力に影響するかを述べる。

軍手とグローブを装着し突きを行う場合と軍手のみ装着し突きを行う場合の2種類の突きを各3回ずつ、計6回衝撃力を計測した。0.001秒の時間経過を1コマとし衝撃力を計測した。グローブと軍手を装着した際の突きにおいて、計測した3回のデータの衝撃力が最大になる時のコマ番号を合わせる事により平均化した。これを図1に示す。

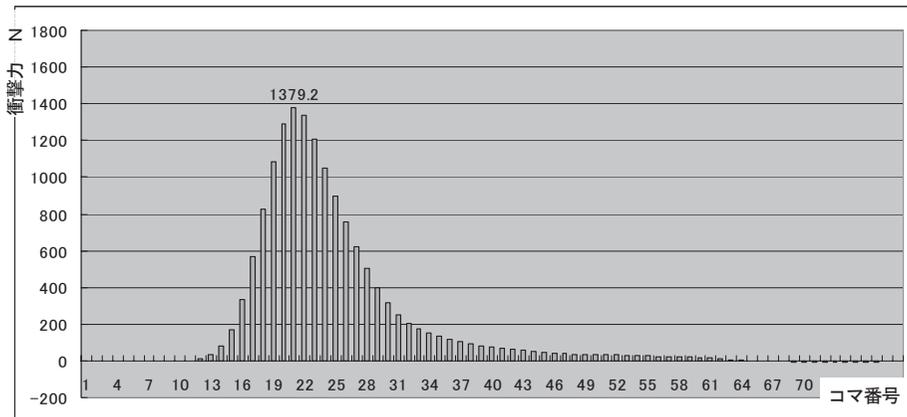


図1 グローブと軍手を装着した突きの衝撃力の平均

同様に軍手のみ装着した際の突きにおいて、計測した3回のデータの衝撃力が最大になる時のコマ番号を合わせる事により平均化した。これを図2に示す。

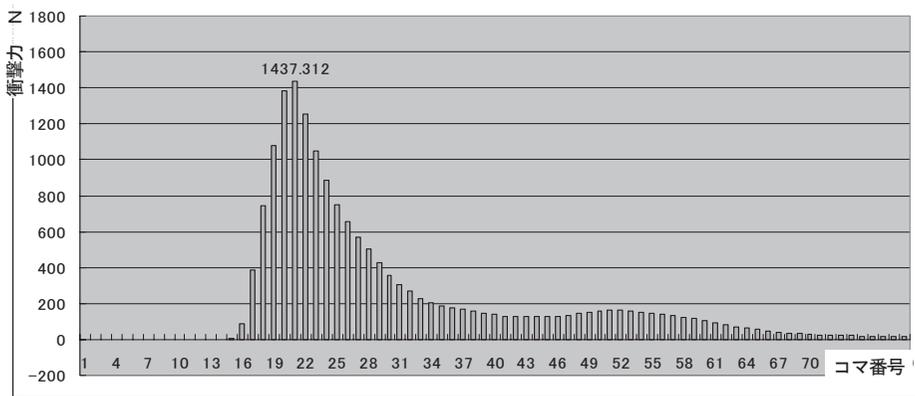


図2 軍手のみを装着した突きの衝撃力の平均

グローブと軍手を装着した突きの場合は標的にグローブが当たってから番号が 10 コマ経過(0.01 秒経過)すると衝撃力が最大になる。軍手のみ装着した突きの場合は番号が 7 コマ経過(0.007 秒経過)すると衝撃力が最大になる事が確認できる。

グローブと軍手を装着した場合と軍手のみを装着した場合の衝撃力を比較するために、図 1 と図 2 のグラフを重ね合わせた。これを図 3 に示す。菱形印を結んだ線はグローブと軍手を装着した突きの衝撃力の平均のグラフであり、四角印を結んだ線は軍手のみ装着した突きの衝撃力の平均のグラフである。

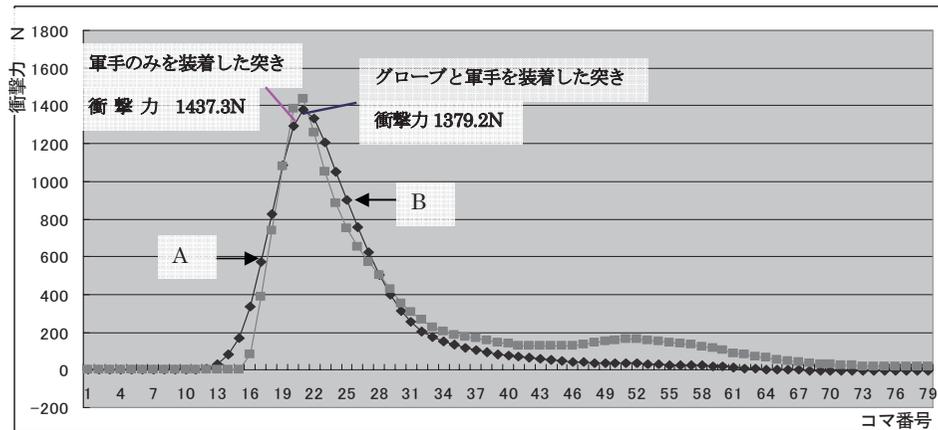


図3 グローブと軍手を装着した場合と軍手のみを装着した場合の衝撃力の比較

グローブと軍手を装着した場合と軍手のみを装着した場合の衝撃力を比較すると、軍手のみを装着した場合は図 3 の A で示すように短時間(0.007 秒)で衝撃力が最大になる鋭い突きであり、図 3 の B で示すように衝撃力が最大になった後も力積が急激にはおとろえない強い突きになっている事が視覚的に理解できる。さらに、第 2 の小さな衝撃力の増加が見られる。これは拳が標的に当たった後、右足の母指球を中心に体が回転して押し込みの力が働いた結果だと思われる。

グローブと軍手を装着した突きの際の衝撃力の平均は、衝撃力の最大値が 1379.2N をとり、軍手のみ装着した突きの際の衝撃力の平均の最大値である 1437.3N と比べて 100N 程度力が弱くなっている事が確認できる。グローブの緩衝効果により拳が標的に当たってから緩やかに衝撃力が強まり、最大値を過ぎてからも緩やかに弱くなっている。第2の小さな衝撃力の増加はグローブの緩衝効果により消されてしまったと考える事が出来る。これらの実験結果より、グローブの装着による緩衝効果ははっきり表れ、吉福のグローブの装着は衝撃力にはあまり関係がない<sup>9)</sup>という主張とは異なる結果が得られた。

#### 4. 前腕の挙動

日本拳法の指導の現場では真っ直ぐ突き真っ直ぐ戻ると指導しているが、実際の突きはどのような動きをしているか調べた。まず突きの動作における手首の直進性について述べ、次に前腕の空間的な挙動について述べ、最後に突きの動作の実際について述べる。

##### 4.1 突きの直進性

まず手首の動きを求め突きの直進性について調べる。次に前腕の長さの変化に着目し、前腕の空間的な挙動について述べる。

一台のカメラで一方向から撮影する事により手首の動きを計測している。計測した手首の位置を 0.008 秒ごとにプロットすると図4のようになる。図4では X 方向は被験者が標的に向かって進んで行く方向を示し、Z 方向が水月から標的に向かって拳が上昇していく方向を示している。

0.008 秒の時間経過を 1 フレームとした。図4の 1 フレームから 9 フレーム目までは手首の軌道が曲線軌道になっている。これは突きの動作のはじめに左足が前進し、歩幅が広がり体全体が下がりながら、拳が Z 軸方向に上昇する為だと考えられる。

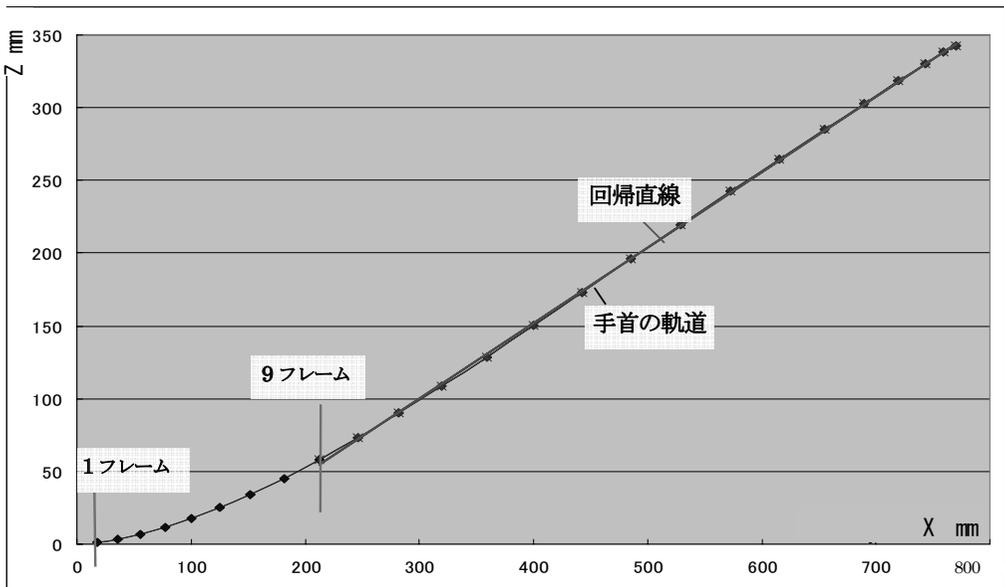


図4 側面から見た手首の軌道とその回帰直線

9フレーム以降の 0.008 秒毎の位置データに対してマイクロソフト社のソフトウェアであるエクセルを用いて回帰直線を求めた。

求めた回帰直線は

$$Z=0.5x - 55.6 \quad (1)$$

となる。求めた回帰直線は図 4 の位置データに重ねて表示している。位置データが回帰直線に乗っていることが視覚的に理解できる。詳細に調べるために回帰直線と 0.008 秒毎の位置データとの距離を算出する。

算出した距離をプロットすると図 5 のようになる。図 5 は横軸に 0.008 秒を 1 フレームとした時のフレーム番号、縦軸に回帰直線と 0.008 秒毎の位置データとの距離をとっている。最大値は 1.89mm であり、手首の水平方向の移動距離が約 600mm であるから 0.003% 程度しかずれていない事が確認できる。

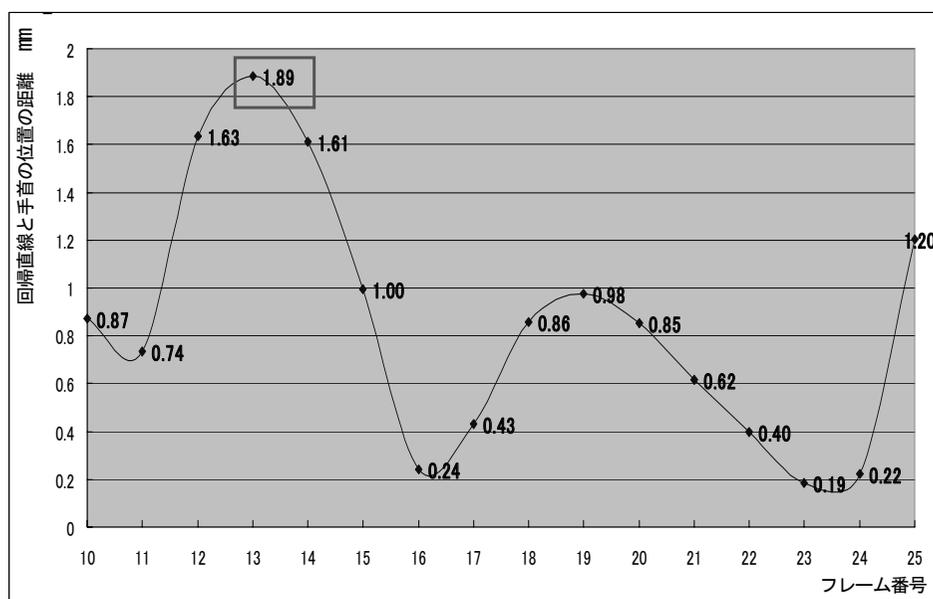


図 5 フレーム毎の回帰直線と手首の位置との距離

しかし、前腕の長さを 0.008 秒毎に棒グラフで示すと図6のようになる。図6を見ると前腕の長さが経過フレーム毎に変化している事が理解できる。

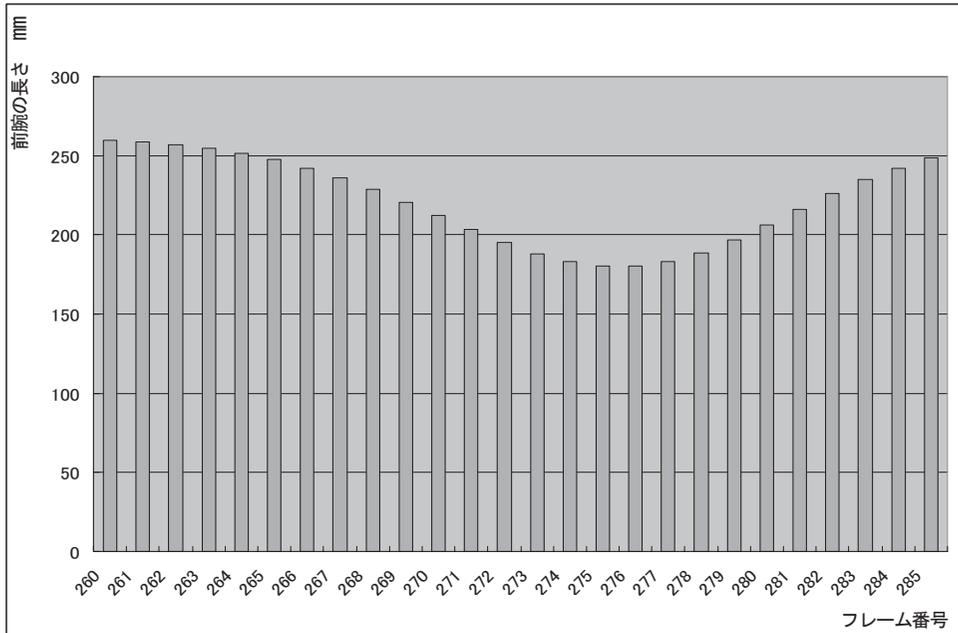


図6 前腕の長さの変化

しかし、前腕の長さは変化しない為、前腕が体軸まわりに回転し、奥行き方向に前腕が移動しているため、見かけ上長さが変化していると考えられる。そこで、前腕の長さの変化から、奥行き方向に動く前腕の挙動が算出できると考えた。

算出方法を以下に示す。

前腕ベクトルを図7に示す。  $P_0 P_1 P_2 P_3$  は肘の位置、  $Q_0 Q_1 Q_2 Q_3$  は手首の位置を示す。

$P_0 P_1 P_2 P_3, \dots, P_n$  と順に結んだものが肘の軌道を示し、  $Q_0 Q_1 Q_2 Q_3, \dots, Q_n$  と順に結んだものが手首の軌道を示している。また、手首の位置と肘の位置から求めた前腕ベクトルの長さを  $|a_0| |a_1| |a_2| |a_3|$  とする。

同様に、肘の位置の値  $P_i (i = 0, 1, 2, 3, \dots, n)$  において 0.008 秒経過後の位置  $P_{i+1}$  から  $P_i$  を引いて、肘の変位ベクトル  $c_i (i = 0, 1, 2, 3, \dots, n)$  とする。

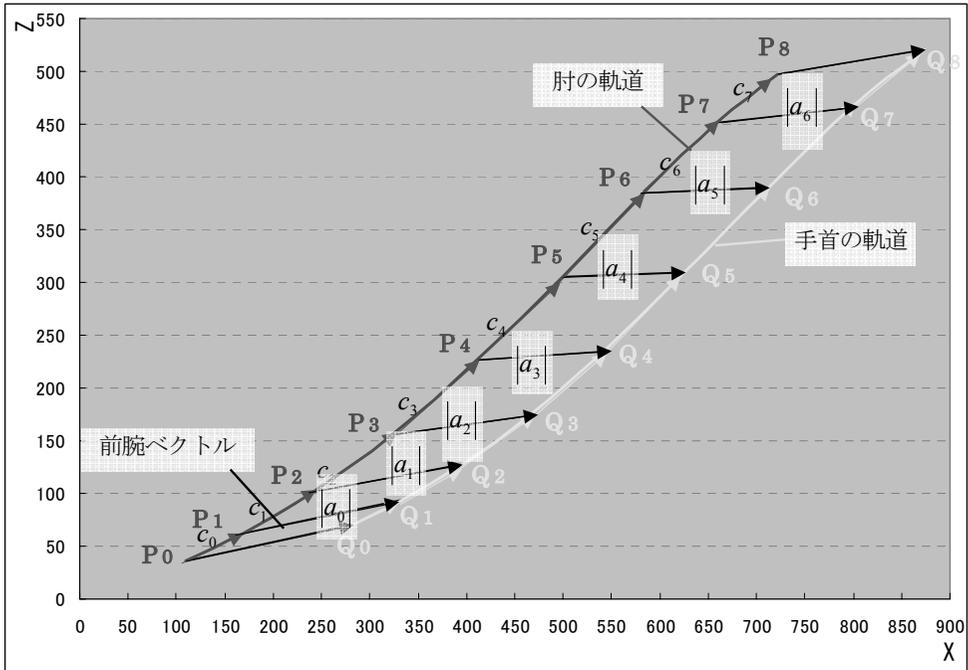


図7 X-Z平面における0.008秒経過毎の肘の変位ベクトル

図7の1番目である  $|a_0|$  を実際の前腕の長さとして  $|b|$  とし、フレーム2番以降  $|a_1|, |a_2|, |a_3|, \dots, |a_i|$  をフレーム毎に変動する前腕の長さとし、式(2)を用いて演算を行って、実際の前腕と変動する前腕との間の角度  $\theta_i$  を求める。これを式(3)に示す。また、実際の前腕の長さ  $|b|$  と、計測した前腕の長さ  $|a_i|$  の関係を図8に示す。

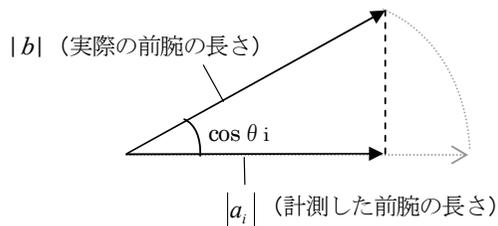


図8 前腕の実際の長さとして計測した長さの関係

$$\cos \theta_i = \frac{|a_i|}{|b|} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \cos \theta_1 &= \frac{|a_1|}{|b|} \\ \cos \theta_2 &= \frac{|a_2|}{|b|} \\ \cos \theta_3 &= \frac{|a_3|}{|b|} \\ &\dots \\ \cos \theta_i &= \frac{|a_i|}{|b|} \end{aligned} \right\} (3)$$

肘の変位ベクトル  $c_0, c_1, c_2, c_3$  からその大きさを算出し x 成分を取り出す。これを図9に示す。

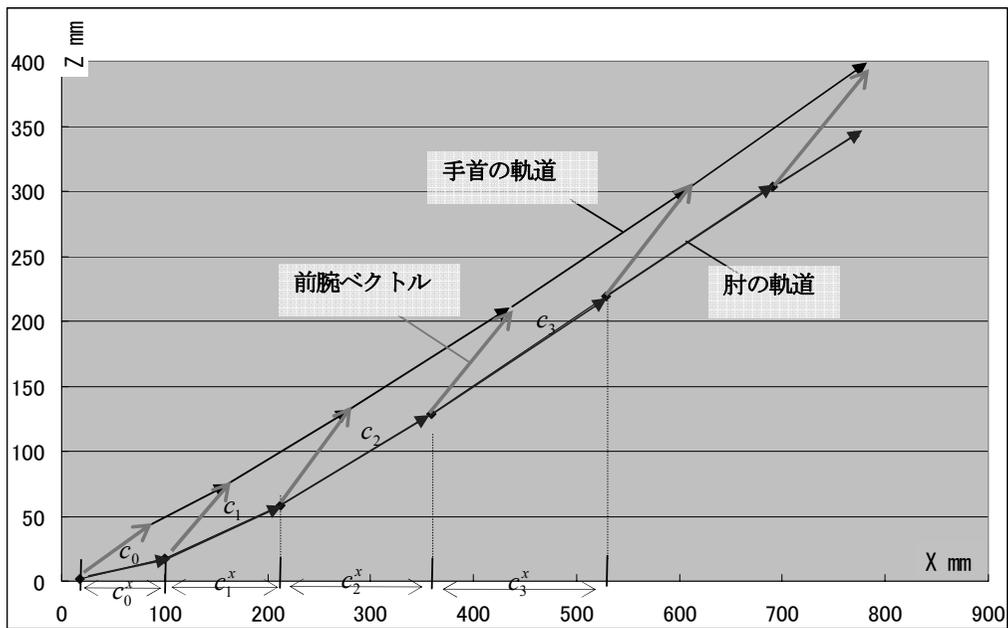


図9 肘の変位ベクトルから X 成分を取り出す概念図

取り出した  $c_i^x (i = 0, 1, 2, 3, \dots, n)$  と式 (3) で求めた  $\theta_i$  を使用し, 式 (4) を用いる事により奥行き方向の位置  $y_i (i = 0, 1, 2, 3, \dots, n)$  を求めることができる. これを式 (5) に示す.

$$y_i = c_i^x \tan \theta_i \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= c_0^x \tan \theta_0 \\ y_1 &= c_1^x \tan \theta_1 \\ y_2 &= c_2^x \tan \theta_2 \\ y_3 &= c_3^x \tan \theta_3 \\ \dots \\ y_i &= c_i^x \tan \theta_i \end{aligned} \right\} (5)$$

求めた  $y_i (i = 0, 1, 2, \dots, n)$  をプロットすることにより, 奥行き方向の肘の軌道を求める事ができる. これを図 10 に示す.

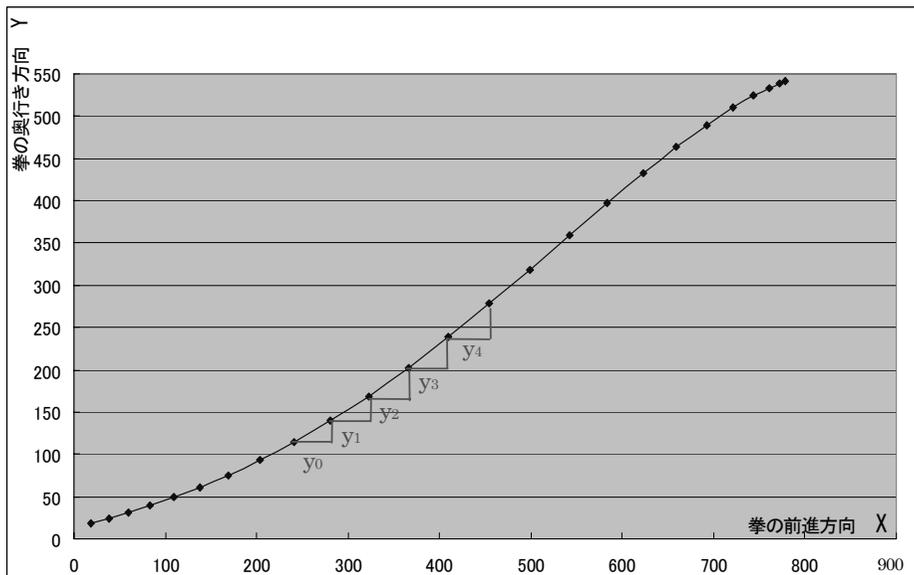


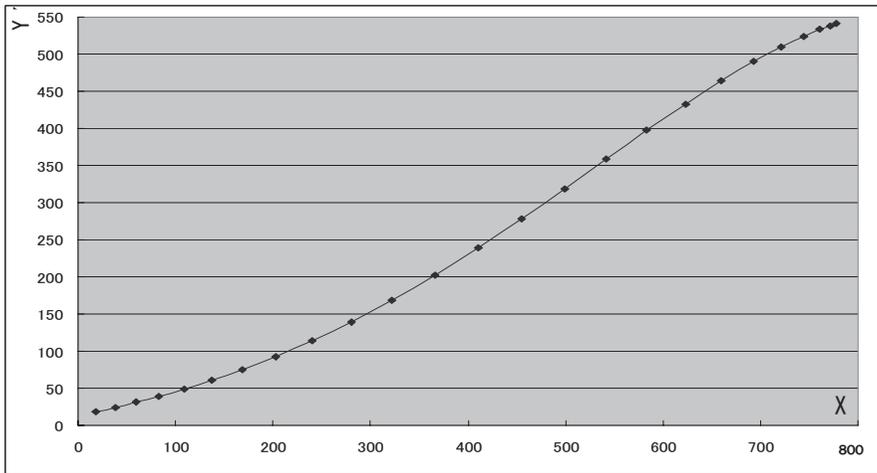
図 10 奥行き方向の前腕の軌道

奥行き方向の位置をプロットしたものを図1 1 (a)に、側面からの位置をプロットしたものを図1 1 (b)に示す。

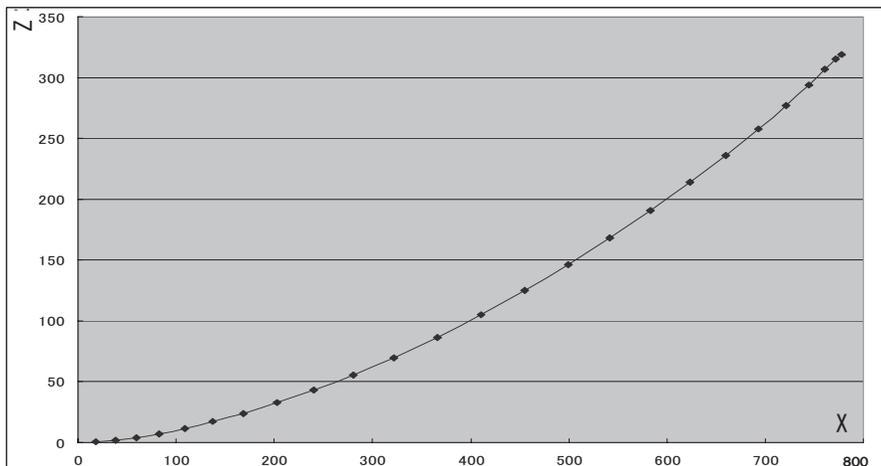
また、手首に対しても同様な解析を行った。手首の上面から見た動きを図1 2 (a)に、側面方向から見た肘の動きを図1 2 (b)に示す。

図1 1 (a)と図1 2 (a)から視覚的に理解できることは拳が水月から標的に向かって進むとき、まず体軸回りに回転しながら前進してゆき、全体としてS字のような曲線軌道を描いているという事である。

日本拳法の現場では「真っ直ぐ突き」、「真っ直ぐ戻れ」と指導しているが、実際には上面から見た場合にはS字の軌道になっている事がわかる。

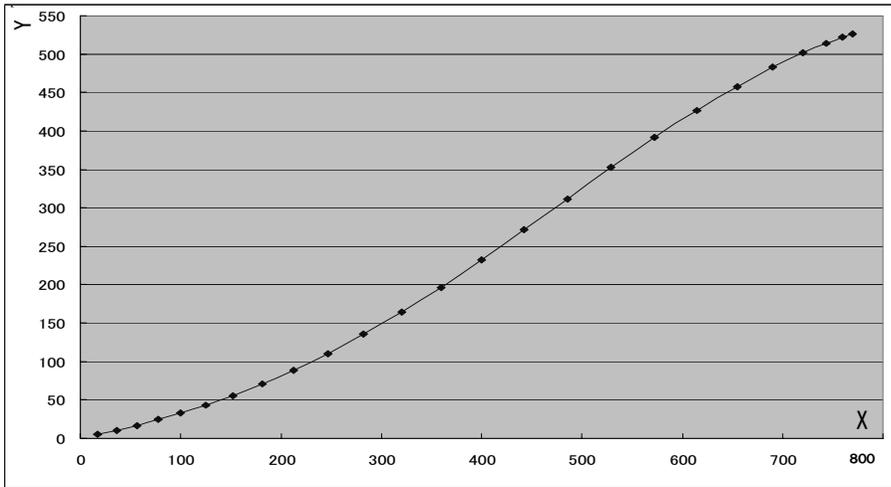


(a) 上面から見た肘の動き

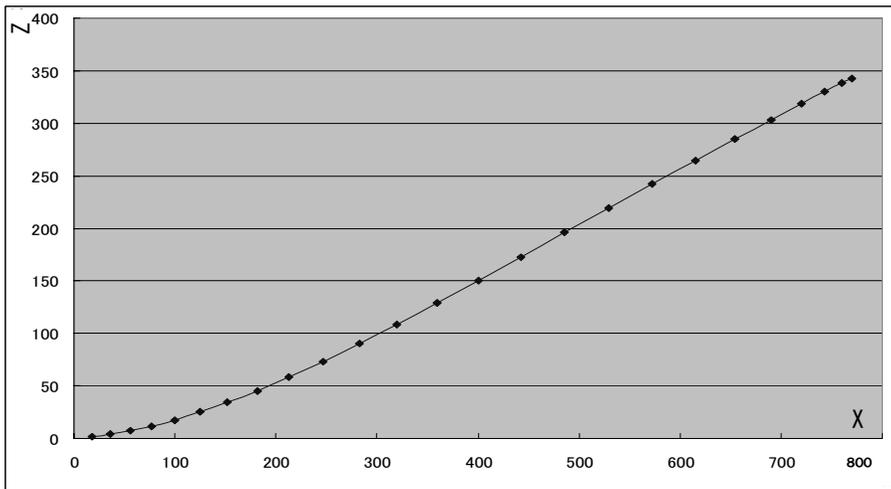


(b) 側面から見た肘の動き

図1 1 肘の動き



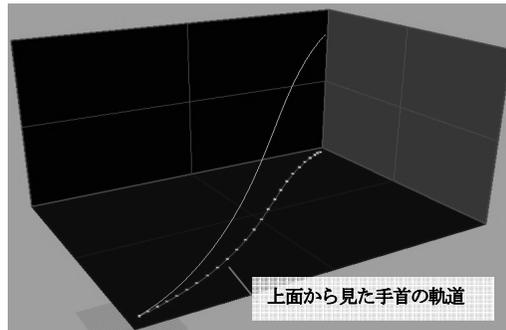
(a) 上面から見た手首の動き



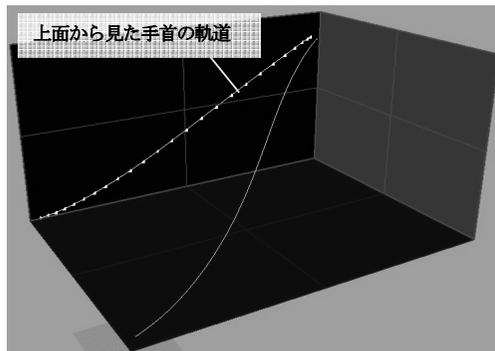
(b) 側面から見た手首の動き

図 1 2 手首の動き

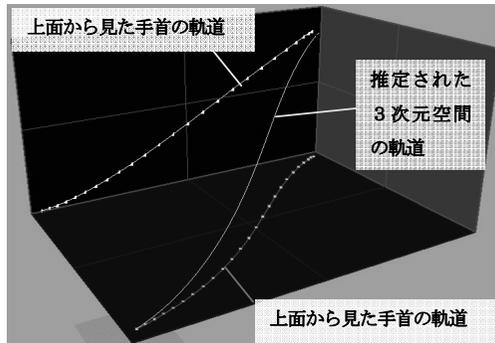
前腕の長さの変化を用いて X-Z 平面内の手首の位置より, X-Y 平面内の手首の位置を推定した. これらの位置データを用いると 0.008 秒毎の手首の空間的な位置が推定できる. 図 1 3 (a) に上面から見た手首の軌道と推定された 3 次元空間の軌道を, 図 1 3 (b) に側面から見た手首の軌道と推定された 3 次元空間の軌道を, 図 1 3 (c) に上面と側面から見た手首の軌道と推定された 3 次元空間の軌道を示す.



(a) 上面から見た手首の軌道と推定された3次元空間の軌道



(b) 側面から見た手首の軌道と推定された3次元空間の軌道



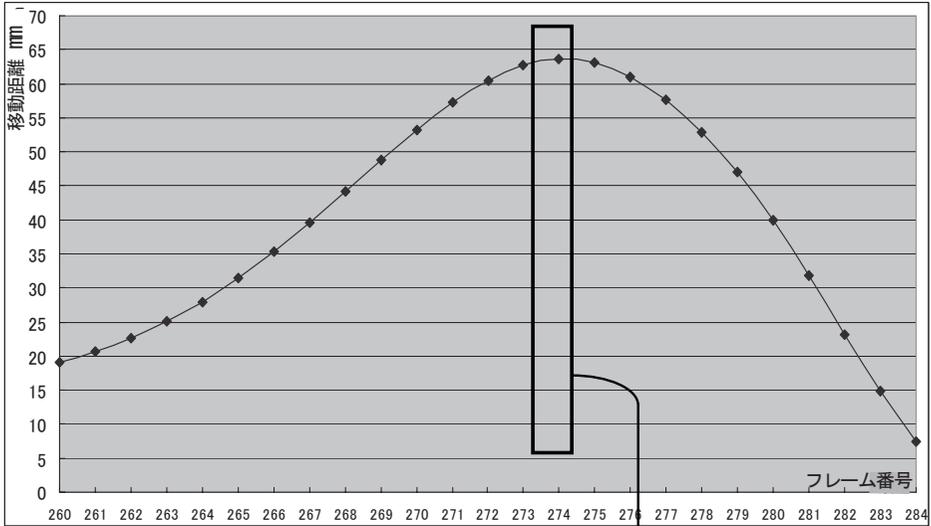
(c) 上面と側面から見た手首の軌道と推定された3次元空間の軌道

図13 側面および上面から見た軌道と推定された3次元空間の軌道

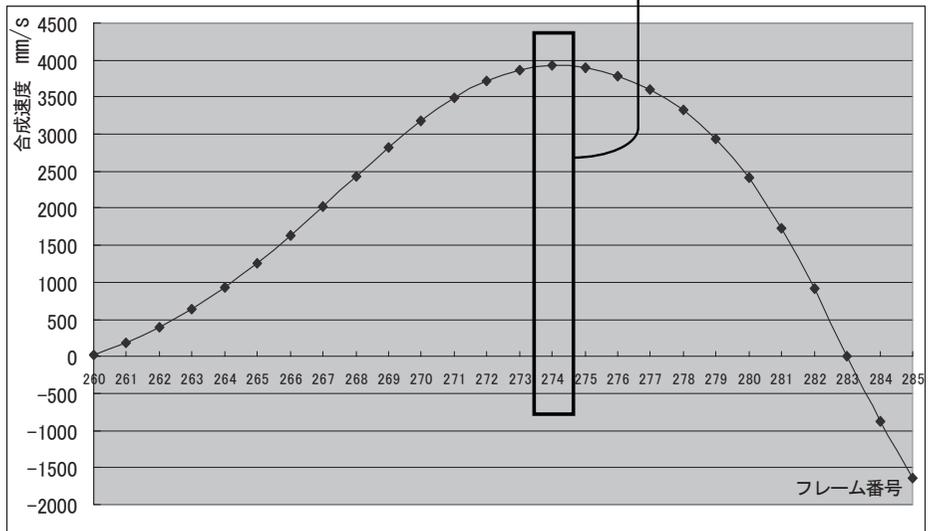
肘の空間におけるフレーム毎の移動距離を算出した。これを図14(a)に示す。276フレーム目で1フレームにおける移動距離が最大になっている。図14(b)のフレーム毎の肘の合成速度の変化と非常に似ている。当然のことではあるが合成速度が最大の時、肘の移動距離も最大になっているという事である。

さらに、図15(a)に手首の空間におけるフレーム毎の移動距離の変化を示す。図15(b)に手首のフレーム毎の合成速度の変化を示す。

これらの図から分かる事は合成速度が最大の時、空間内におけるフレーム間の移動距離も最大になっているという事である。

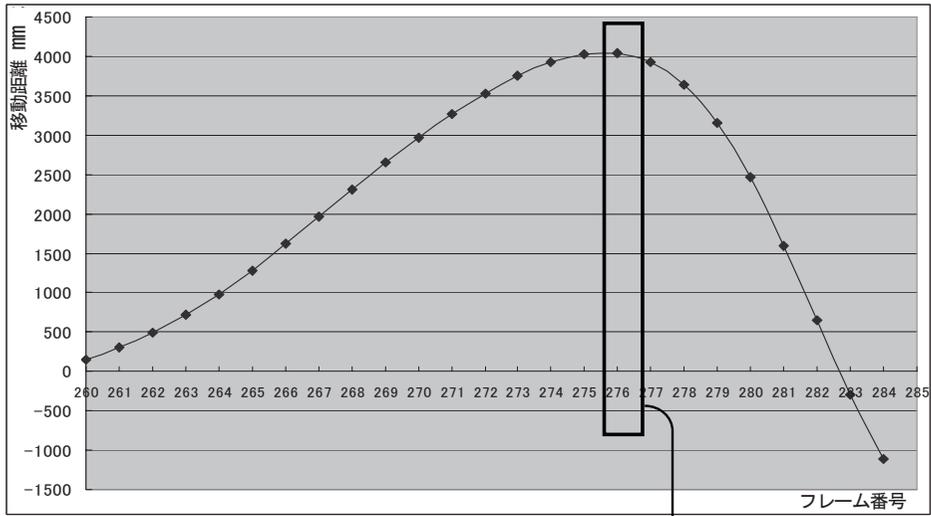


(a) 肘の空間的な移動距離 一致している



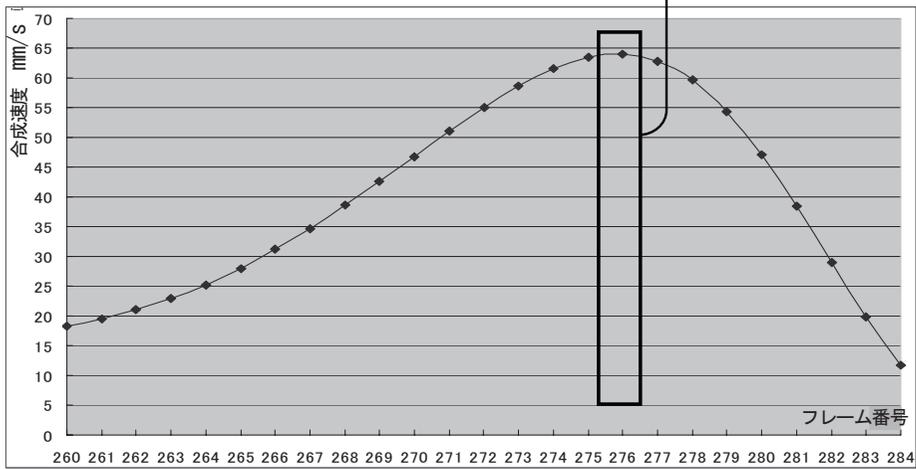
(b) フレーム毎の肘の合成速度

図14 肘の空間的な移動



(a) 手首の空間的な移動距離

一致している



(b) フレーム毎の手首の合成速度

図15 手首の空間的な移動

### 4. 3 突きの動作の実際

水月から標的に向う突きの動きは、まず左足が前進するため歩幅が広がり、体全体が下がる。拳の動作としては標的に向かって上昇しているため曲線軌道になる。その後は標的に当たるまで約 0.003% のずれしかない直線軌道になっている。

しかし前腕の長さの変化に着目し X-Z 平面における拳の軌道より X-Y 平面の手首軌道を推定すると S 字型の軌道である事がわかる。これは突きの際にはまず体軸の周りに拳が回りながら並進運動をする為であると推測する事ができる。

日本拳法の指導では「真っ直ぐ突き」、「真っ直ぐ戻れ」、そして足の母指球を中心に足首を回転させると指導している為、実際には図 1 3 (c) に示すような軌道になっている。すなわち、X-Z 平面から見ると直線軌道であり、X-Y 平面から見ると S 字型の軌道になっている事が分かる。

### 5. 前腕の振動

突きにおいて拳が水月の位置から標的にあたるまでの前腕の挙動を収集した実験データを用いて分析した。手首と肘の間の身体部分を前腕と言う。前腕には仮想的な支点が存在し、この支点が突きの動作の途中で手首と肘の間を移動するのではないかと考えた。この点を仮想支点と呼ぶ。

突きの動作中の仮想支点の挙動を実験データより解析した。

以下に解析方法を述べる。

ある時刻における手首と肘の位置データを用いて、前腕ベクトルとその大きさを算出した。前腕ベクトルは肘の位置ベクトルと手首の位置ベクトルの差である変位ベクトルである。これを図 1 6 に示す。

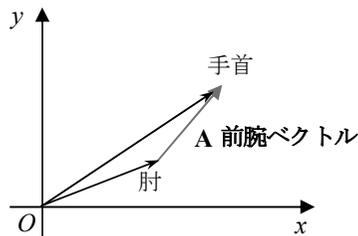


図 1 6 前腕ベクトルの算出

手首における速度を求め 0.008 秒経過毎の変化量を求めた。これを手首の速度の変位ベクトル  $w_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$  とした。これを図 1 7 に示す。

図 1 7 で示した速度ベクトルを原点に移動させて手首の速度の変位ベクトルの時間的変化を求めた。これを図 1 8 に示す。

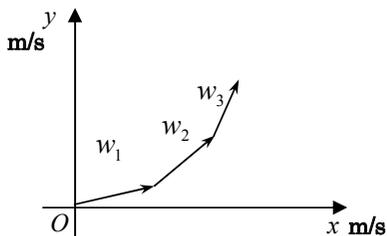


図17 手首の速度ベクトル

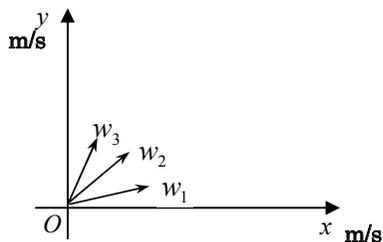


図18 手首の速度ベクトルの時間的变化

図18において $w_1$ と $w_2$ の差を求め手首の加速度ベクトル $a_1$ とした。これは速度ベクトルの微小時間における変化であるため加速度ベクトルであると考えられる。これを図19に示す。

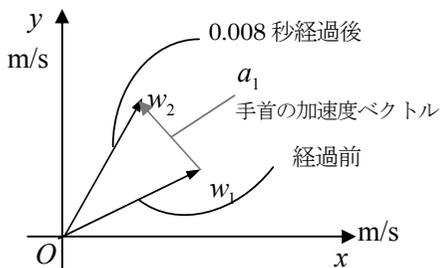


図19 手首の速度ベクトルの変化

同様に肘についても速度ベクトル $e_i (i=1,2,3,\dots,n)$ を求めた。これを図20に示す。

図20で示した速度ベクトル $e_i (i=1,2,3,\dots,n)$ を原点に移動させて肘の速度の変位ベクトルの時間的变化を求めた。これを図21に示す。

図21において $e_1$ と $e_2$ の差を求め、肘の加速度ベクトル $a_2$ を求めた。これを図22に示す。

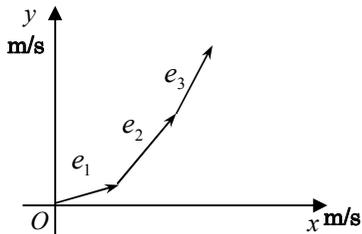


図20 肘の速度ベクトル

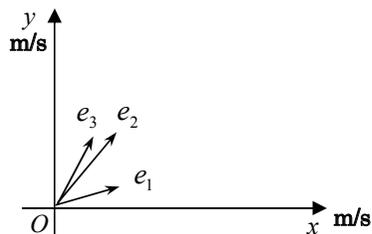


図21 肘の速度ベクトルのホドグラフ

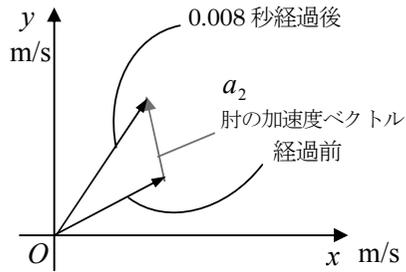


図 2.2 肘の速度ベクトルの変化

次に求めた手首の加速度ベクトル  $a_1$  と前腕ベクトル  $\mathbf{A}$  がなす角度  $\alpha$  を式 (6) により求める.

$$\frac{a_1 \cdot A}{|a_1| \cdot |A|} = \cos \alpha \quad (6)$$

ここから手首の加速度ベクトル  $a_1$  の前腕ベクトル  $\mathbf{A}$  に対する垂直成分  $a_{v1}$  を式 (7) より求める.

$$a_{v1} = |a_1| \sin \alpha \quad (7)$$

同様に肘の加速度ベクトル  $a_2$  と前腕ベクトル  $\mathbf{A}$  がなす角度  $\beta$  を式 (8) より求める.

$$\frac{a_2 \cdot A}{|a_2| \cdot |A|} = \cos \beta \quad (8)$$

肘の加速度ベクトル  $a_2$  の前腕ベクトル  $\mathbf{A}$  に対する垂直成分  $a_{v2}$  を式 (9) より求める.

$$a_{v2} = |a_2| \sin \beta \quad (9)$$

手首の加速度ベクトル  $a_1$  とこれの前腕ベクトル  $\mathbf{A}$  に対する垂直成分  $f_1$ , 肘の加速度ベクトル  $a_2$  とこれの前腕ベクトル  $\mathbf{A}$  に対する垂直成分  $f_2$  を前腕ベクトル  $\mathbf{A}$  と共に図 2.3 に示す.

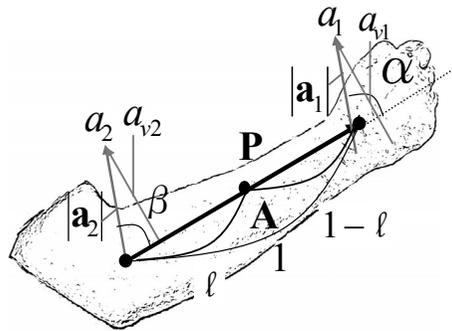


図23 前腕ベクトルの仮想支点の算出

図23においてPは仮想支点の位置を示し前腕ベクトル $\mathbf{A}$ の大きさを1に正規化して肘から仮想支点までの距離を $l$ としている。

力はニュートンの運動の第二方程式により、質量と加速度の積により表現される。これを式(10)に示す。

$$f = m \times a \quad (10)$$

具体的には手首と肘の位置においてそれぞれ質点の質量 $m$ が存在すると仮定すると式(11)、式(12)となる。

$$f_1 = m \times a_{v1} \quad (11)$$

$$f_2 = m \times a_{v2} \quad (12)$$

図23において手首の加速度 $a_1$ と前腕ベクトル $\mathbf{A}$ に対するベクトル成分 $a_{v1}$ は $m$ を1とすれば力 $f_1$ を表現していることになる。同様に肘の加速度 $a_2$ に対するベクトル成分 $a_{v2}$ も、 $m$ を1とすれば力 $f_2$ を表現していることになる。

仮想支点の位置をPとし、肘から仮想支点までを $l$ とし、前腕ベクトル $|\mathbf{A}|$ の大きさを1として正規化すると仮想支点 $l$ の回りには式(13)が成立する。

$$f_2 \times l = f_1 \times (1-l) \quad (13)$$

式 (13) に式 (11) と式 (12) を代入すると

$$m \times a_{v2} \times \ell = m \times a_{v1} \times (1 - \ell)$$

$$a_{v2} \times \ell = a_{v1} \times (1 - \ell) \tag{14}$$

となり式 (7) で求めた値と式 (9) で求めた値を式 (14) に代入することにより仮想支点の位置を算出する。

計算された仮想支点の位置を折れ線グラフにし、図 24 に示す。

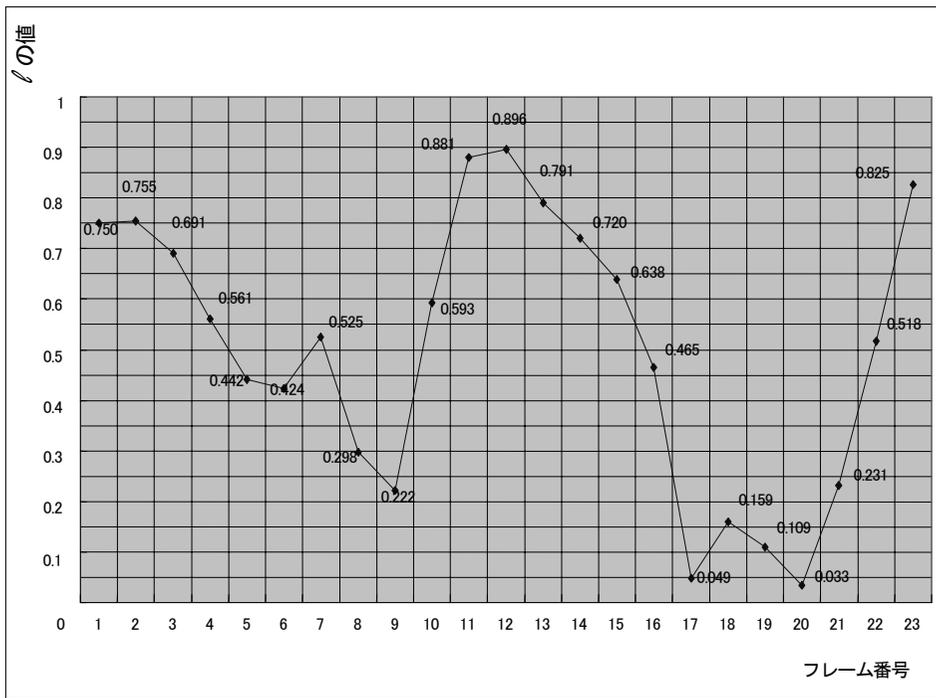


図 24 仮想始点のグラフ

この仮想支点のグラフは横軸をフレーム番号、縦軸を肘から仮想支点までの距離  $\ell$  の値としている。

突きの始めから終わりまでの時間は 0.2 秒である。

日本拳法の現場では突きの際に、「手首にスナップを効かせろ」と指導している。日本拳法は手の甲が床面に垂直である立て拳であるため「スナップを利かせた」際、手首から先の拳が下がり、その反動で肘が上がる。その為、仮想支点は手首の方へ移動し、前腕は手首の周りに回転する。別の言葉で表現すると肘があがる。

## 6. おわりに

突きの際のグローブの有無による衝撃力時間的变化を観察した。グローブがない場合は拳が標的に当たった後急激に衝撃力が増大し、その後も力積が残っていることが観察された。突きの直進性に関してはカメラ方向から見た場合、手首の軌道は直線軌道になっているが、空間的には肩と腰の回転により拳が回転運動をしながら並進運動をするためS字曲線の軌道になっている。

前腕の振動に関しては、前腕には動かない点が存在するものと仮定して、その点を仮想支点と命名して、その点の移動状態を解析した。標的に当たる直前に仮想支点は手首側に移動している事が解析された。これはスナップの効果であると推測された。

今後は、実験環境、測定方法を再検討し、被験者の数を増やし、試技の回数も増やして再実験する。

### 参考文献

- [1] 沢山勝, 土谷秀雄: 日本拳法の特質, 体育学研究, 12(5), pp.68. (1968)
- [2] 雑古哲夫: 日本拳法, 拳の技, 突きと打ちに関する考察, 関西大学文学論集, 52(4), pp.89-100. (2003)
- [3] 雑古哲夫: 日本拳法における組打技の考察, 身体運動文化フォーラム1, pp.63-68. (2006)
- [4] 西光哲治: 試合競技(日本拳法)における技術向上の一考察(その1) 日本拳法の歴史と技術指導の留意点, 芦屋大学論叢(48), pp.63-72. (2008)
- [5] 吉福康郎: 格闘技における衝撃力について, Jpn. J. Sports Sci., 6-4, pp.252-258. (1987)
- [6] 吉福康郎: 種々の格闘技の衝撃力Ⅱ-逆突き, 回し蹴り, 直撃の場合-, Jpn. J. Sports Sci., 5-8, pp.572-577. (1986)
- [7] 吉福康郎, 池上康男: 格闘技における打の動作, Jpn. J. Sports Sci., 3-3, pp.188-198. (1984)
- [8] 深代千之, 川本竜史, 石毛勇介, 若山章信: バイオメカニクスで読み解くスポーツ動作の科学, 東京大学出版会, pp.1. (2010)
- [9] 吉福康郎: 最強格闘技の科学, 福昌堂, pp.36.