

## 筋の収縮様式を考慮したテニスサーブ動作の動力的分析の定式化

小池 関也<sup>\*1</sup>, 原田 悠平<sup>\*2</sup>

### Formulation of Dynamic Contribution Analysis of Tennis Serve Motion in Consideration of Muscle Contraction Mode

Sekiya KOIKE<sup>\*1</sup> and Yuhei HARADA

<sup>\*1</sup> University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki, Japan

The purpose of this study was to formulate the dynamic contribution of estimated muscle force in consideration of muscle contraction mode. The upper body with a racket was modeled as a linked eleven-segment system. The analytical form of the equation for the system was obtained from the combination of 1) equations of motion for individual segments, 2) equations for constraint condition in which adjacent segments are connected by individual joint, and 3) geometric equations for anatomical constraint axes of wrist and elbow joints. Motion dependent term, which shows large contribution in generation of racket head speed, is converted into other terms by using a recurrent equation with respect to the generalized velocity vector in discrete time system. Individual muscle torques, which are generated by the muscle forces, are estimated by using a musculoskeletal modeling software (SIMM; MusculoGraphics Inc.). With the estimated muscle torques, the formula for muscle torque contribution to the generation of generalized velocity vector of the system in consideration of muscle contraction mode is derived.

**Key Words** : Tennis Serve, Muscle Contraction Mode, Dynamic Contribution, Musculoskeletal Model

#### 1. はじめに

テニスのサーブ動作は、多関節運動であるスウィング動作<sup>(1)</sup>により、高速となるまで加速されたラケットによって、狙いとするエリアへとボールを打撃する動作である。このようなスウィング動作における加速メカニズムには、多体系の動力的特性が大きく影響<sup>(2)~(7)</sup>しており、サーブ動作を動力的に分析した先行研究では、ヘッドスピードの獲得に対して、フォワードスウィング中盤から終盤にかけて関節トルクによる貢献が大きいことに加えて、インパクト近傍では、複数のセグメントの角速度の積和によって構成される運動依存項の貢献が特に大きくなることが報告されている。ここで、運動依存項を構成する各セグメントの角速度は、各関節トルクの入力によって生成されていると考えられる。著者は、上半身を対象とした系の運動方程式から一般化速度ベクトルに関する漸化式を導出し、この漸化式を用いて、運動依存項を関節トルク項、外力項および重力項に変換し、運動依存項の発生要因を定量化している<sup>(4)</sup>。その結果、運動依存項の生成には、系への外力の貢献は小さく、ラケット操作側腕の肩内外旋トルクおよび肘内外トルクといった関節トルクによる貢献が大きなことを示している。

関節の回転運動を発生させる関節トルクは、各関節を跨いで付着する各筋の筋張力と、各筋と関節軸とのモーメントアームとの外積によって作用する筋トルクの総和として得られる。すなわち、身体の動作は関節を跨ぐ筋の張力が生じさせる筋トルクによって生成されている。著者は、運動依存項を他の項へと変換する手法を利用して、サーブ動作におけるスピード獲得において大きな貢献を示す運動依存項について、その発生要因となる関節トルクを求めることにより、スピード獲得の要因を関節トルクへと変換し、関節トルクを筋の筋張力に分配して推定した筋トルクを用いて、ラケットスピード生成に対する筋張力の貢献を動力的に分析する手法を提案した<sup>(7)</sup>。ここで、筋の収縮様式における発揮可能な張力を比較すると、短縮性収縮時に比べて、伸張性収縮時の方が大きいことが知られている<sup>(8),(9)</sup>。したがって、各筋の素早く大きな張力発揮が要求されるスポーツ動作を対象と

<sup>\*1</sup> 正員, 筑波大学 (〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

<sup>\*2</sup> 筑波大学大学院 博士前期課程  
E-mail:koike@taiiku.tsukuba.ac.jp

した分析を行う場合、各筋の収縮様式に着目した分析が重要になると考えられる。しかしながら、先行研究では、筋の収縮様式についてまでは考慮されていない。

そこで本研究では、スウィング動作における対象部位のスピード獲得の要因となる関節トルクを、その関節軸を跨ぐ筋の張力による筋トルクへと分配し、さらに各筋の筋腱複合体の長さ変化から筋の収縮様式を判別することによって、筋の収縮様式を考慮した筋トルクについての動力学的貢献式の定式化を行う。

## 2. 対象とする筋群の選定

本章では、テニスサーブ動作におけるラケットのスピード獲得に対して、特に重要となる筋群を選定するための手続きについて示す。すなわち、ラケット-上半身系を、左右上肢、頭部、上部体幹およびラケットよりなる多体系としてモデル化した際の運動方程式を利用して、運動依存項を他項に置き換えた関節トルクの貢献を求め、この結果から関節トルクを筋トルクへと分配する際の筋群の選定法について述べる。

### 2・1 ラケット-上半身系の運動方程式

関節軸の解剖学的拘束自由度を考慮してモデル化したラケット-上半身系のモデル図を図1に示す。ここで、能動的関節軸の自由度数は、肩鎖関節では挙上下制および前後方回転の2、肩関節では内外転、水平内外転、および内外旋の3、肘関節では屈曲伸展および回内外の2、手関節では掌背屈および橈尺屈の2、頸部関節では、前後屈、左右屈、および左右回旋の3、そして体幹関節では、前後屈、左右屈、および左右回旋の3であり、系全体では合計24の自由度数を有するモデルとなっている。なお、ラケットと手との間に設けた仮想関節の自由度数は0とした。

各セグメントの並進および回転の運動方程式を、系を構成する全セグメントについてまとめると次式となる。

$$M\dot{V} = PF + P_{\text{ext}}F_{\text{ext}} + Q_{\text{act}}T_{\text{act}} + Q_{\text{psv}}T_{\text{psv}} + H + G \quad (1)$$

ここで、 $M$ は慣性行列、 $V$ は各セグメントの重心速度ベクトルおよび角速度ベクトルからなる一般化速度ベクトル、行列 $P$ 、 $P_{\text{ext}}$ および $Q_{\text{act}}$ 、 $Q_{\text{psv}}$ は、各関節作用力 $F$ 、系への外力となる下胴から上胴への関節力 $F_{\text{ext}}$ 、および能動的関節トルク $T_{\text{act}}$ 、受動的関節トルク $T_{\text{psv}}$ に対する係数行列、 $G$ は重力加速度を含むベクトルであり、 $H$ は各セグメントのジャイロモーメントによる項を表すベクトルである。

式(1)と、各セグメントが関節によって連結されているための幾何学的拘束条件式を時間微分した式

$$C\dot{V} + \dot{C}V = 0 \quad (2)$$

および、各関節の解剖学的な関節軸拘束式の時間による二階微分式

$$A\dot{V} + \dot{A}V = 0 \quad (3)$$

とを連立すると、系の運動方程式の解析式が次式として導出される。

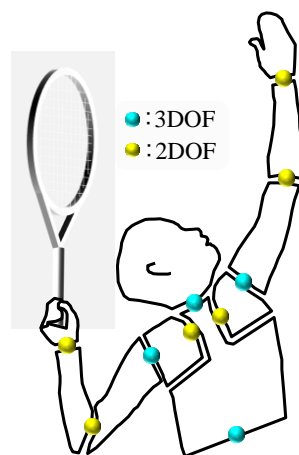


Fig.1 Upper body model with constraint joint axis

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_{Ta} \mathbf{T}_{act} + \mathbf{A}_{Fe} \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{A}_V + \mathbf{A}_G \mathbf{G} \quad (4)$$

## 2・2 一般化速度ベクトルに対する漸化式の導出

式(4)は、一般化速度ベクトル  $\mathbf{V}$  を用いて、

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_{Fe} \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{A}_{Ta} \mathbf{T}_{act} + \bar{\mathbf{A}}_V \mathbf{V} + \mathbf{A}_G \mathbf{G} \quad (5)$$

と書き換えることができる。ここで  $\mathbf{A}_{Fe}$  は外力項の、 $\mathbf{T}_{Ta}$  は総関節トルク項の、 $\bar{\mathbf{A}}_V$  は運動依存項の、 $\mathbf{A}_G$  は重力項の係数行列である。このとき、運動依存項以外の項を次式に示すベクトル  $\mathbf{A}_V$  を用いてまとめると、

$$\mathbf{A}_V = \mathbf{A}_{Fe} \mathbf{F}_{ext} + \mathbf{A}_{Ta} \mathbf{T}_{act} + \mathbf{A}_G \mathbf{G} \quad (6)$$

となり、系の運動方程式は次式のように表すことができる。

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_V + \bar{\mathbf{A}}_V \mathbf{V} \quad (7)$$

なお、ベクトル  $\mathbf{A}_V$  は、外力項、総関節トルク項および重力項からなる、系への入力項を意味している。

式(7)を、 $k$  を時刻とする離散システムによって表すと、

$$\dot{\mathbf{V}}(k) = \mathbf{A}_V(k) + \bar{\mathbf{A}}_V(k) \mathbf{V}(k) \quad (8)$$

となる。ここで、一般化加速度ベクトルを

$$\dot{\mathbf{V}}(k) = \frac{\mathbf{V}(k+1) - \mathbf{V}(k)}{\Delta t} \quad (9)$$

によって、差分近似すると、式(8)、(9)から、一般化速度ベクトルに関する漸化式

$$\mathbf{V}(k+1) = \Delta t \mathbf{A}_V(k) + \Psi_V(k) \mathbf{V}(k), \quad \Psi_V(k) = \mathbf{E} + \Delta t \bar{\mathbf{A}}_V(k) \quad (10)$$

を得る。なお、この漸化式(10)は、時刻  $k$  における入力項  $\mathbf{A}_V(k)$  と速度ベクトル  $\mathbf{V}(k)$  から、時刻  $k+1$  における速度ベクトル  $\mathbf{V}(k+1)$  が算出されることを表している。

## 2・3 評価量に対する各時刻の貢献

式(10)をまとめると、評価時刻  $k_{eval}$  における一般化速度ベクトル  $\mathbf{V}$  は、

$$\mathbf{V}(k_{eval}) = \Delta t \sum_{h=1}^{k_{eval}-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k_{eval}-h}^{k_{eval}-1} \Psi_V(j) \right\} \mathbf{A}_V(h-1) \right] + \left\{ \prod_{j=0}^{k_{eval}-1} \Psi_V(j) \right\} \mathbf{V}(0) \quad (11)$$

となる。ここで、式(6)および式(11)から、一般化速度ベクトルは次式として表すことができる。

$$\mathbf{V}(k_{eval}) = \mathbf{V}_{T,act}(k_{eval}) + \mathbf{V}_{F,ext}(k_{eval}) + \mathbf{V}_G(k_{eval}) + \mathbf{V}_{V0}(k_{eval}) \quad (12)$$

但し、

$$\mathbf{V}_{T,act}(k_{eval}) = \Delta t \sum_{h=1}^{k_{eval}-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k_{eval}-h}^{k_{eval}-1} \Psi_V(j) \right\} \mathbf{A}_{T,act}(h-1) \mathbf{T}_{act}(h-1) \right],$$

$$\mathbf{V}_{F,ext}(k_{eval}) = \Delta t \sum_{h=1}^{k_{eval}-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k_{eval}-h}^{k_{eval}-1} \Psi_V(j) \right\} \mathbf{A}_{Fe}(h-1) \mathbf{F}_{ext}(h-1) \right],$$

$$\mathbf{V}_G(k_{eval}) = \Delta t \sum_{h=1}^{k_{eval}-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k_{eval}-h}^{k_{eval}-1} \Psi_V(j) \right\} \mathbf{A}_G(h-1) \mathbf{G} \right],$$

$$\mathbf{V}_{V0}(k_{\text{eval}}) = \left\{ \prod_{j=0}^{k_{\text{eval}}-1} \boldsymbol{\Psi}_V(j) \right\} \mathbf{V}(0) \quad (13)$$

である。

各種スピードに関する評価量  $q_{\text{eval}}$  に対する各項の貢献は、抽出行列  $\mathbf{S}_{\text{eval}}$  および抽出ベクトル  $\mathbf{e}_{\text{eval}}$  を用いて次式のように抽出できる。

$$\mathbf{q}_{\text{eval}}(k_{\text{eval}}) = \hat{\mathbf{C}}_{T,\text{act}}(k_{\text{eval}}) + \hat{\mathbf{C}}_{F,\text{ext}}(k_{\text{eval}}) + \hat{\mathbf{C}}_G(k_{\text{eval}}) + \hat{\mathbf{C}}_{V0}(k_{\text{eval}}) \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{T,\text{act}}(k_{\text{eval}}) = \Delta t \mathbf{e}_{\text{eval}}^T(k_{\text{eval}}) \mathbf{S}_{\text{eval}}(k_{\text{eval}}) \mathbf{V}_{T,\text{act}}(k_{\text{eval}})$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{F,\text{ext}}(k_{\text{eval}}) = \Delta t \mathbf{e}_{\text{eval}}^T(k_{\text{eval}}) \mathbf{S}_{\text{eval}}(k_{\text{eval}}) \mathbf{V}_{F,\text{ext}}(k_{\text{eval}})$$

$$\hat{\mathbf{C}}_G(k_{\text{eval}}) = \Delta t \mathbf{e}_{\text{eval}}^T(k_{\text{eval}}) \mathbf{S}_{\text{eval}}(k_{\text{eval}}) \mathbf{V}_G(k_{\text{eval}})$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{V0}(k_{\text{eval}}) = \mathbf{e}_{\text{eval}}^T(k_{\text{eval}}) \mathbf{S}_{\text{eval}}(k_{\text{eval}}) \mathbf{V}_{V0}(k_{\text{eval}})$$

なお、このうちの関節トルク項は、各関節の各軸まわりのトルクによる貢献へと細分化することができる。

$$\hat{\mathbf{C}}_{T,\text{act}}(k) = \sum_{j\text{Axis}} \hat{\mathbf{C}}_{T,\text{act},j\text{Axis}}(k), \quad j\text{Axis} = 1, 2, \dots, n\text{Axis} \quad (15)$$

## 2・4 筋群の選定法

式(15)を用いて、インパクト時ラケットフェイススピードの生成に対する各関節トルクの貢献を算出した結果の一例を図2に示す。図中の shAA, shHAA および shIER は、それぞれ肩関節の内外転、水平内外転、および内外旋トルクの項、 elbFE および elbPS は、それぞれ肘関節の屈曲伸展および回内外トルクの項、 wriPD および wriRU は、それぞれ手関節の掌背屈および撓尺屈トルクの項、 neFE, neLR および neIER は、それぞれ頸部関節の前後屈、左右屈、および左右回旋トルクの項、 torFE, torLR および torIER は、それぞれ体幹関節の前後屈、左右屈および左右回旋トルクの項、 scED および scHAA は、それぞれ肩鎖関節の拳上下制および前方後方回旋トルクの項を表し、各項の英字表記先頭の文字 L および R はそれぞれ左右の別を表している。

同図から、インパクト時のラケットフェイススピード獲得に貢献している関節トルクは、ラケット操作側腕における 1) 肩関節の内外転、水平内外転および内外旋の各トルク、2) 肘関節の屈曲伸展および回内外の各トルク、3) 手関節の掌背屈および撓尺屈の各トルク、そして 4) 肩鎖関節の拳上下制および前方後方回旋の各トルクであった。

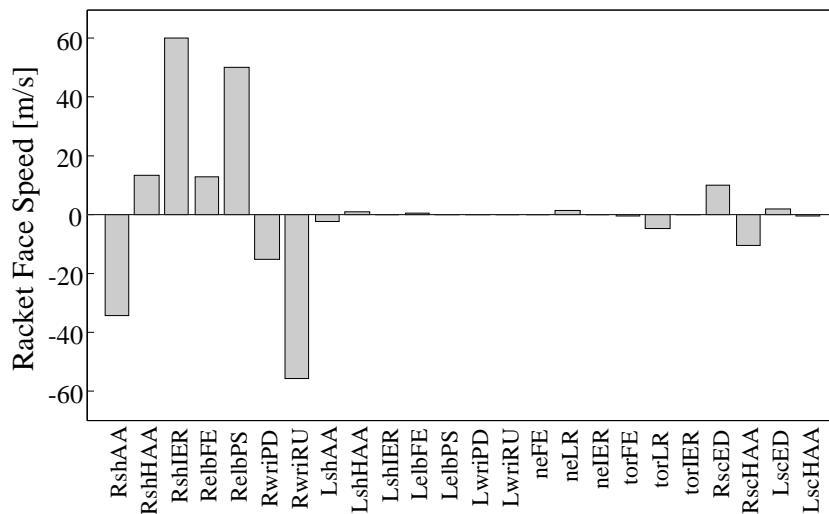


Fig.2 Contribution of joint torques to racket face speed at impact

すなわち、ラケット操作側腕の関節トルク項がインパクト時ラケットフェイススピードの大部分を生成することがわかる。なお、これらスピード生成に貢献する各関節トルクを、そのトルクパワーの符号から伸張性および短縮性の発揮様式別に区別すると、ラケットフェイススピード獲得には、右肩関節内旋トルクの伸張性のトルク発揮による貢献が大きく、また、右肩関節内旋トルクの伸張性のトルク発揮を発現させる右肩関節外旋角速度の生成には、右肩関節水平内転トルクの短縮性のトルク発揮による貢献が大きいという結果を得た。

以上の結果から、サーブ動作におけるインパクト時ラケットフェイススピードの生成・獲得には、ラケット操作側腕の各関節トルクが重要な役割を果たしていることが明らかとなったため、これらの各関節を跨ぐ筋を対象として、重要な関節トルクを、その筋トルクへと分配することにより、インパクト時ラケットフェイススピード生成に貢献する主要な筋の特徴を明らかにすることができると考えられる。

### 3. 収縮様式を考慮した筋張力の貢献式

本章では、前章にて選定された筋群の筋トルク、ならびに他の関節軸トルクを入力とする動力学的貢献式の定式化を行う。

#### 3・1 筋張力の推定

テニスサーブ動作におけるラケット操作側腕に関与する各筋の筋張力を推定するために、3次元筋骨格モデリングソフトウェア SIMM (Musculo Graphics 社製) を用いて、3関節7自由度(肩関節内外転, 肩関節水平内外転, 肩関節内外旋, 肘関節屈曲伸展, 肘関節回内外, 手関節掌背屈, 手関節撓尺屈)に対応する Hill タイプの筋腱複合体モデルを有するラケット保持腕の筋骨格モデルを構築する。このソフトウェアでは、各関節自由度に対する筋腱複合体の数の冗長性に起因する閉ループ問題については、筋活性度の二乗和を目的関数  $J$  とする最適化手法を用いて対応している。その際、制約条件として、①筋の筋張力とそのモーメントアームの外積によって求まる筋トルクの総和と逆動力学演算によって算出した関節軸トルクとの等式制約条件、および②筋活性度  $q$  についての不等式制約条件 ( $0 < q < 1$ ) を設定している。SIMM により、これら二つの制約条件を満足し、かつ目的関数が最小となるような筋張力を推定し、その際の各関節軸まわりのトルク生成に寄与する筋トルクが得られる。

#### 3・2 主要筋の筋トルクおよび他関節軸トルクを入力とした動力学貢献式の定式化

系の運動方程式である式(4)の右辺第一項における関節トルク項は、ラケット操作側腕の関節トルク  $T_{RA}$  およびラケット操作側腕関節以外の関節に関する関節軸トルクベクトル  $T_{else}$  を用いて、次式のように分割して表記することができる。

$$\mathbf{T}_{act} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_{RA}^T & \mathbf{T}_{else}^T \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{A}_{Ta} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{Ta,RA} & \mathbf{A}_{Ta,else} \end{bmatrix} \quad (16)$$

ここで各変数において、添字 RA はラケット操作側腕を表し、添字 else はラケット操作側腕以外の関節を表す。

ラケット操作側腕の関節トルクは、解剖学的関節軸トルク  $T_{jA}$  から構成され、さらにこれら各関節軸トルクは、その関節軸トルクに関与する筋トルク  $T_{m,iM,jA}$  の和として表すことができる。これらを式で示すと次式となる。

$$\mathbf{T}_{RA} = \begin{bmatrix} T_1 & \cdots & T_{jA} & \cdots & T_{nA} \end{bmatrix}^T, \quad T_{jA} = \sum_{iM}^{nM} T_{m,iM,jA} \quad (17)$$

このとき、系の運動方程式は次式のように表すことができる。

$$\dot{\mathbf{V}} = \mathbf{A}_{Ta,RA} \mathbf{T}_{RA} + \mathbf{A}_{Ta,else} \mathbf{T}_{else} + \mathbf{A}_{Fe} \mathbf{F}_{ext} + \bar{\mathbf{A}}_V \mathbf{V} + \mathbf{A}_G \mathbf{G} \quad (18)$$

$$\mathbf{A}_{Ta,RA} \mathbf{T}_{RA} = \sum_{iM}^{nM} \left( \sum_{jA}^{nA} \mathbf{A}_{Ta,RA,jA} T_{msl,iM,jA} \right) = \sum_{iM}^{nM} \mathbf{U}_{iM} = \mathbf{U}_{Msl} \quad (19)$$

$$\mathbf{U}_{iM} = \sum_{jA}^{nA} \mathbf{A}_{Ta,RA,jA} T_{msl,iM,jA} \quad (20)$$

ここで、 $n_M$ は、筋の数、 $n_A$ は、関節軸の数、 $\mathbf{U}_{iM}$ は、運動方程式の関節トルク項における筋  $iM$  の筋トルクの貢献を示している。

前章と同様に、式(18)の運動方程式を一般化速度ベクトルに対する漸化式へと変形すると、次式となる。

$$\mathbf{V}(k+1) = \Delta t \mathbf{U}_{Msl}(k) + \Delta t \mathbf{A}_{else}(k) + \boldsymbol{\Psi}_V(k) \mathbf{V}(k) \quad (21)$$

$$\mathbf{A}_V(k) = \mathbf{U}_{Msl}(k) + \mathbf{A}_{else}(k), \quad \mathbf{A}_{else}(k) = \mathbf{A}_{Ta,else}(k) \mathbf{T}_{else}(k) + \mathbf{A}_{Fe}(k) \mathbf{F}_{ext}(k) + \mathbf{A}_G(k) \mathbf{G} \quad (22)$$

図3(a)には、式(21)のブロック線図を示し、図3(b)には、式(19)および(22)を統合したブロック線図を示す。

式(21)から、評価時刻  $k_{eval}$  における一般化速度ベクトルは、

$$\begin{aligned} \mathbf{V}(k_{eval}) &= \Delta t \mathbf{U}_{MSL}(k_{eval}-1) + \Delta t \mathbf{A}_{else}(k_{eval}-1) + \boldsymbol{\Psi}_V(k_{eval}-1) \mathbf{V}(k_{eval}-1) \\ \mathbf{V}(k_{eval}-1) &= \Delta t \mathbf{U}_{MSL}(k_{eval}-2) + \Delta t \mathbf{A}_{else}(k_{eval}-2) + \boldsymbol{\Psi}_V(k_{eval}-2) \mathbf{V}(k_{eval}-2) \\ &\vdots \\ \mathbf{V}(2) &= \Delta t \mathbf{U}_{MSL}(1) + \Delta t \mathbf{A}_{else}(1) + \boldsymbol{\Psi}_V(1) \mathbf{V}(1) \\ \mathbf{V}(1) &= \Delta t \mathbf{U}_{MSL}(0) + \Delta t \mathbf{A}_{else}(0) + \boldsymbol{\Psi}_V(0) \mathbf{V}(0) \end{aligned} \quad (23)$$

と表される。この様子をブロック線図に表すと図4のようになる。

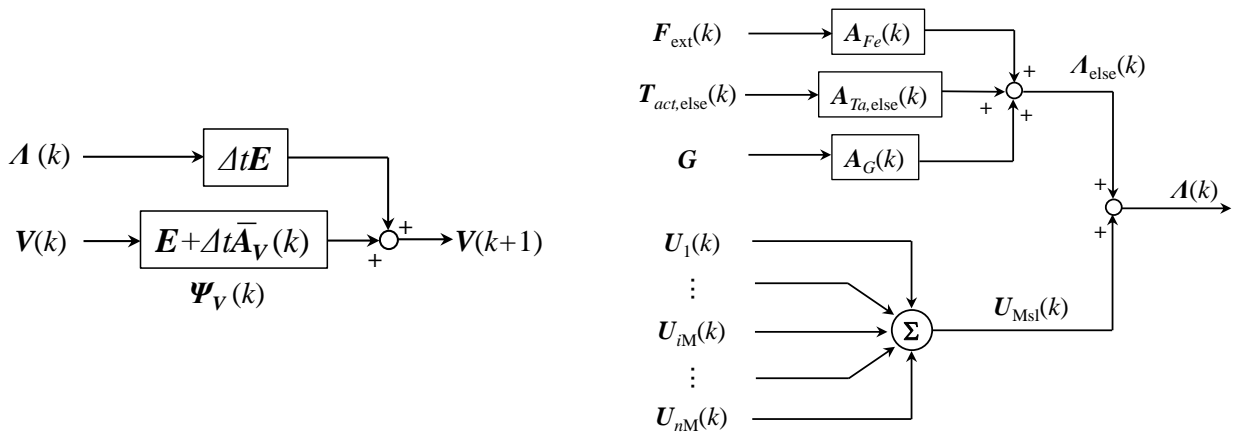
### 3・3 各時刻の収縮様式別の筋トルクによる貢献

式(23)をまとめると、式(12)と同様に、一般化速度ベクトルは次式として表すことができる。

$$\mathbf{V}(k_{eval}) = \mathbf{V}_{MSL}(k_{eval}) + \mathbf{V}_{else}(k_{eval}) + \mathbf{V}_{F,ext}(k_{eval}) + \mathbf{V}_G(k_{eval}) + \mathbf{V}_{V0}(k_{eval}) \quad (24)$$

$$\mathbf{V}_{MSL}(k_{eval}) = \Delta t \sum_{h=1}^{k_{eval}-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k_{eval}-h}^{k_{eval}-1} \boldsymbol{\Psi}_V(j) \right\} \mathbf{U}_{Msl}(h-1) \right] \quad (25a)$$

$$\mathbf{V}_{else}(k_{eval}) = \Delta t \sum_{h=1}^{k_{eval}-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k_{eval}-h}^{k_{eval}-1} \boldsymbol{\Psi}_V(j) \right\} \mathbf{A}_{T,else}(h-1) \mathbf{T}_{else}(h-1) \right] \quad (25b)$$



(a) Block diagram of recurrence formula with respect to the generalized velocity vector

(b) constitution of input terms

Fig.3 Block diagram of input terms in the recurrence formula regarding generalized velocity vector.

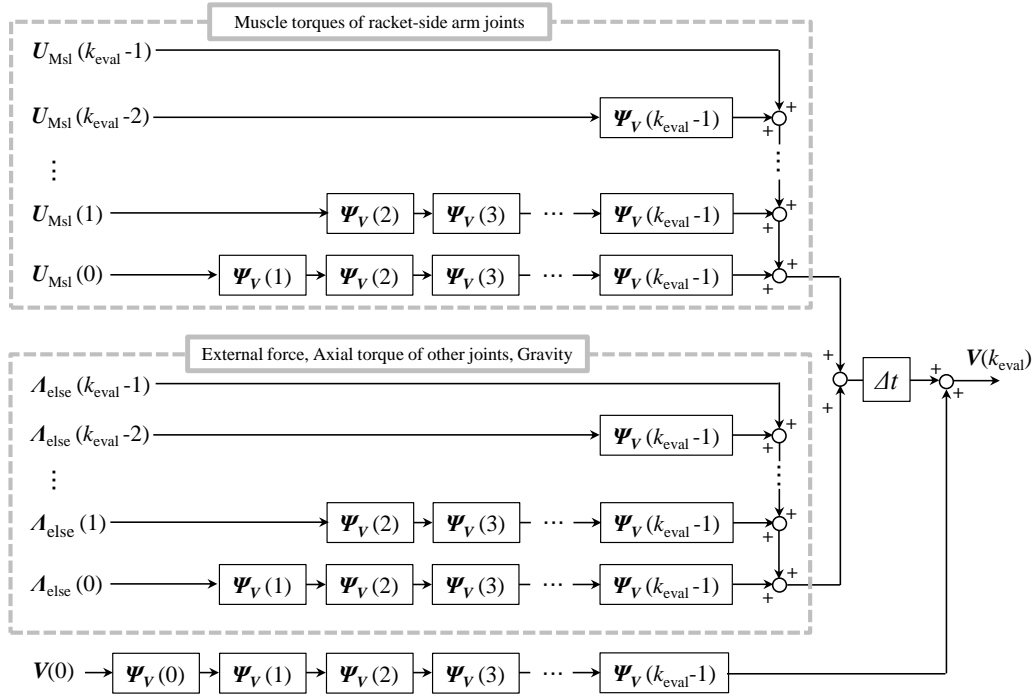


Fig.4 Block diagram of the contribution of muscle torque and other input terms to the generation of generalized velocity vector at time  $k_{eval}$

時刻  $k_{eval}$  の一般化速度ベクトル  $\mathbf{V}$  の生成に対する筋トルク項の貢献を算出する際、各時刻の筋  $iM$  における筋腱複合体の長さ  $l_{MTC,iM}$  を時間微分した  $\dot{l}_{MTC,iM}$  を用いて、各時刻の筋の収縮様式を区別して取り扱う。すなわち、 $\dot{l}_{MTC,iM} > 0$  であれば伸張性収縮 (eccentric: ecc)， $\dot{l}_{MTC,iM} < 0$  であれば短縮性収縮 (concentric: con) として、それぞれの筋トルクによる貢献を次式のように区別する。

$$\mathbf{V}_{msl,iM,ecc}(k_{eval}) = \Delta t \sum_{h=1}^{k_{eval}-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k_{eval}-h}^{k_{eval}-1} \Psi_V(j) \right\} \mathbf{U}_{iM,ecc}(h-1) \right], \quad (\dot{l}_{MTC,iM} > 0) \quad (26a)$$

$$\mathbf{V}_{msl,iM,con}(k_{eval}) = \Delta t \sum_{h=1}^{k_{eval}-1} \left[ \left\{ \prod_{j=k_{eval}-h}^{k_{eval}-1} \Psi_V(j) \right\} \mathbf{U}_{iM,con}(h-1) \right], \quad (\dot{l}_{MTC,iM} < 0) \quad (26b)$$

また、式(21)から、時々刻々の一般化速度ベクトルの生成に対する、伸張性収縮、短縮性収縮による貢献を分けて表すと次式となる。

$$\mathbf{C}_{V,Msl,ecc,iM}(k) = \Delta \mathbf{U}_{iM,ecc}(k) \quad (27a)$$

$$\mathbf{C}_{V,Msl,con,iM}(k) = \Delta \mathbf{U}_{iM,con}(k) \quad (27b)$$

さらに、評価量  $\mathbf{q}_{eval}$  に対する各筋トルクの貢献を、抽出行列  $\mathbf{S}_{eval}$  および抽出ベクトル  $\mathbf{e}_{eval}$  を用いて抽出する。

$$\mathbf{q}_{eval}(k) = \hat{\mathbf{C}}_{MSL,ecc}(k) + \hat{\mathbf{C}}_{MSL,con}(k) + \hat{\mathbf{C}}_{T,else}(k) + \hat{\mathbf{C}}_{F,ext}(k) + \hat{\mathbf{C}}_G(k) + \hat{\mathbf{C}}_{v0}(k) \quad (28)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{MSL,ecc}(k) = \Delta t \mathbf{e}_{eval}^T(k) \mathbf{S}_{eval}(k) \mathbf{V}_{MSL,ecc}(k)$$

$$\hat{\mathbf{C}}_{MSL,con}(k) = \Delta t \mathbf{e}_{eval}^T(k) \mathbf{S}_{eval}(k) \mathbf{V}_{MSL,con}(k)$$

ここで、筋の各収縮様式によって区別された筋トルクの貢献は、各筋の張力による筋トルクの貢献へと細分化することができる。

$$\hat{C}_{MSL, ecc}(k) = \sum_{i_M} \hat{C}_{MSL, i_M, ecc}(k), \quad i_M = 1, 2, \dots, n_M \quad (29a)$$

$$\hat{C}_{MSL, con}(k) = \sum_{i_M} \hat{C}_{MSL, i_M, con}(k), \quad i_M = 1, 2, \dots, n_M \quad (29b)$$

#### 4. おわりに

テニスサーブ動作におけるインパクト時のラケットフェイススピード獲得に大きく寄与する関節トルクは、上半身のすべての関節トルクではなく、その大半がラケット操作側腕の関節トルクであることから、本稿では、ラケット操作側腕については、その関節に関与する筋群の張力による筋トルクを入力とし、また、それ以外の関節については、その関節軸トルクをそのまま入力とするラケット-上半身系の運動方程式を導出した。さらに、この運動方程式を利用して、系を構成する全セグメント重心速度および角速度ベクトルからなる一般化速度ベクトルに関する漸化式を導出し、運動依存項を他項に変換することによって、スピード獲得に対する筋トルクの貢献を定量化した。その際に、各筋の筋腱複合体の長さ情報を利用して、筋張力の発揮様式を区別し、各時刻における各筋の発揮様式別の筋トルクの貢献を定量的に分析可能な貢献式の定式化を行った。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、平成 24・25 年度科学研究費(課題番号 24500726) の支援を得た。ここに記して謝意を表す。

#### 文 献

- (1). Elliot, B., Marshall, R. N. & Noffal, G. : Contributions of upper limb segment rotations during the power serve in tennis. *Journal of applied Biomechanics*, 11 : pp.433-442, 1995.
- (2). 小池関也, 石川優希, 増村雅尚, 阿江通良: バレーボール・スパイク動作時の手部速さ生成に関する順動力学的分析. *日本機械学会スポーツ工学シンポジウム講演論文集*, pp.228-233, 2007.
- (3). 小池関也, 石川達也: 受動的関節自由度を考慮した身体動作の順動力学的分析手法の定式化. *日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2009 講演論文集*, pp.349-354, 2009.
- (4). 小池関也, 石川達也: 身体動作の順動力学的分析における運動依存項の関節トルク項への帰着. *日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2009 講演論文集*, pp.355-360, 2009.
- (5). 小池関也, 石川達也, 阿江通良: テニスサーブ動作における上肢のラケット速度生成メカニズム—競技レベルの違いが順動力学的貢献に与える影響—. *日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2009 講演論文集*, pp.76-81, 2009.
- (6). 小池関也, 石川達也, 阿江通良: 身体運動の順動力学的分析(運動依存項の発生要因を考慮した貢献式の定式化). *日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2010 講演論文集 CD-ROM*, 2010
- (7). 小池関也, 石川達也, 藤井範久, 阿江通良: テニスサーブ動作におけるラケット速度生成に対する上肢筋張力の貢献. *日本機械学会 シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2010 講演論文集*, pp.66-71, 2010.
- (8). Hill, A. V.: The Heat of Shortening and the Dynamic Constants of Muscle, *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 126(843), pp.136-195, 1938.
- (9). Zajac, F. E.: Muscle and tendon: properties, models, scaling, and application to biomechanics and motor control, *Critical Reviews in Biomechanical Engineering*, 17(4), pp.359-411, 1989.