

全身の運動方程式に基づく高速スポーツ動作の動力学的分析

小池 関也

筑波大学大学院 人間総合科学研究科 准教授

Abstract The purpose of this study was to propose a forward dynamical analysis method for sports motion considering degree of freedom in each joint based on the equation of motion of the whole body. The human body was modeled as a system consisting of 15 rigid segments connected with joints, and the system was divided into two kinds of units. The one is the unit which consist of two segments whose joint have less than three degree of freedom, and the other is the unit which have only one segment. We use the former kind of unit to model adjacent segments such as upper / fore arm segments and thigh / shank segments, because these joints have passive joint axis. On the other hand, we use the latter kind of unit to model segments connected to other segments with 3 DOF joint. By simultaneous solving equations of motion of the units and constraint equations of acceleration at connecting points of the units, we obtain the equation of motion of the whole body. We calculated contributions of joint torques, motion-dependent torque, and gravity to speed of throwing object or hand using the whole-body's equation of motion. In the results obtained from the proposed dynamic analyses of Javelin throwing, Javelin speed was mainly generated by joint torques. Shoulder internal/external rotation torque, elbow flexion/extension torque and shoulder horizontal abduction/adduction torque showed large contribution to Javelin speed for all subjects, but these ratios were different between subjects. And in the results obtained from the dynamic analyses of volley ball spike motion, the total joint torque and motion dependent torque were mainly contributed to hand speed. And motion dependent torque was more contributed to increase the hand speed just before the impact. Joint axial torques which contributed to hand speed was likely to vary with the spike form of each subject. The contribution of motion dependent torque and amount of torso angular movement were significantly related. Therefore, torso angular movement is an important factor for generating high hand speed.

1. 緒言

スポーツ動作は、関節によって連結された身体各セグメントが、主に関節の発揮トルクによって駆動されることにより発現する、一般に複雑かつ高速な運動であり、これらの動作は全身の運動方程式により支配されている。スポーツ動作では、この筋の収縮により発揮される関節トルクだけではなく、遠心力やコリオリ力等の運動依存トルクや、重力によるトルクによっても回転運動が生じるため、これらを巧みに用いて高いパフォーマンスを実現しているものと考えられる。このように複雑な運動を捉えるためには、運動方程式によって表される、身体のダイナミクスを考慮した分析が求められる。

これまでに Putnam(18),(19), 平島ら(12), および内藤ら(16)等によって、運動方程式に基づくスポーツ動作の分析が行われている。しかし、これらはいずれも下肢や上肢といった、身体の部分に対しての分析にとどまっている。また、運動方程式の導出方法も代数的手法のため、全身への拡張が困難な非常に煩雑なものとなっている。一方、金子ら(4)は、7セグメントよりなる平面リンクモデルにおいて、各セグメント同士の動力学的平衡条件ならびに幾何学的平衡条件を利用して、系の運動方程式を導出し、走動作における地面反力に対する支持脚の各関節トルクの貢献を定量化している。これにより、煩雑

な代数式の導出を行うことなく、動力学的な分析を可能としている。しかし、身体全体をモデル化していないこと、および各関節の3次元的な変量を取り扱っていないことにより、その適用範囲は限られている。

このため小池ら(6)は、身体のセグメント毎に導出した運動方程式と、各セグメントの連結点である関節の加速度拘束式とを連立することにより、全身の3次元運動方程式を求め、この方程式に基づく動力学的分析を、跳躍動作を例として行っている。この手法は、運動方程式の導出が容易であるという利点を有し、疾走や跳躍動作等の、全身における順動力学的分析を可能としている。しかし、すべての関節が関節軸自由度3と仮定されており、肘や膝関節の内外反軸のような、受動的関節軸によって生じる関節軸自由度の違いが考慮されていない。このため、例えば野球の投動作における肘関節の内外反軸トルクのような受動的トルクであっても、あたかもその軸で能動的に発揮しているかのように扱うことになる。

そこで本研究では、関節軸自由度を考慮した全身の運動方程式に基づく、順動力学的分析手法を提案する。具体的には、まず、関節軸自由度に応じて身体各セグメントをユニット化し、ユニット毎の運動方程式を導出する。ついで、連結点の加速度拘束式を導出し、ユニット毎の運動方程式と連立することにより、全身の運動方程式を導出する。そして、この運動方程式を用いて、スポーツ動作の順動力学的分析を行う。なお、スポーツ動作として、陸上競技のやり投げ動作、ならびにバレーボールのスパイク動作を取り扱い、身体各関節軸トルク、運動依存トルクおよび重力の、各種目におけるパフォーマンスに対する貢献度を算出し、各種動作における動力学的な特徴、および被験者毎の特徴を明らかにする。

2. 全身の順動力学的分析手法の定式化

本章では、身体各関節の関節軸自由度を考慮した全身の動力学的分析手法について述べる。具体的には、関節軸自由度に応じて身体各セグメントをユニット化し、ユニット毎の運動方程式を導出した後、連結点の加速度拘束式と連立することにより、全身の運動方程式を導出する。そして、この運動方程式を用いて、動力学的貢献度を算出する。

2.1. 関節軸自由度に応じた全身のユニット化

まず、身体-用具系を剛体多セグメント系と仮定し、関節軸自由度に応じて、一つのセグメントを1ユニット、あるいは二つのセグメントを1ユニットとして部分的にモデル化する。具体的には、まず、該当する全ての関節の関節軸自由度が3と見なせる、手部、足部、頭部、あるいは下胴部では、1セグメントを1ユニットとしてモデル化する。他方、肘関節や膝関節の内外反軸のような、受動関節軸を有するために関節軸自由度が2以下である関節によって連結される、上腕-前腕、大腿-下腿等では、2セグメントを1ユニットとしてモデル化する。図1に一例として上肢および用具のモデル図を示す。

2.2 各ユニットの運動方程式の導出

2.2.1 一つのセグメントを1ユニットとする場合

図2に示す1セグメント1ユニットにおける、並進および回転の運動方程式はユニット番号を k とすると、それぞれ、

$$m_k \ddot{\mathbf{x}}_k = \mathbf{f}_{k,P} - \mathbf{f}_{k,D} + m_k \mathbf{g} \quad \dots(1)$$

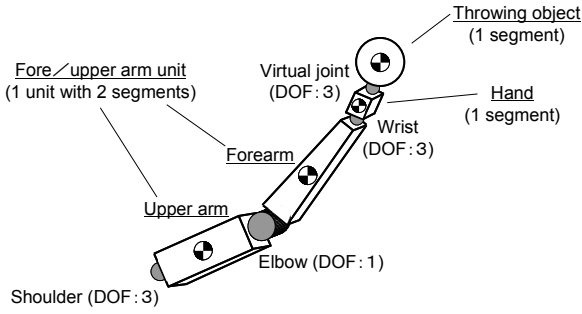


Fig.1 Model of upper limb

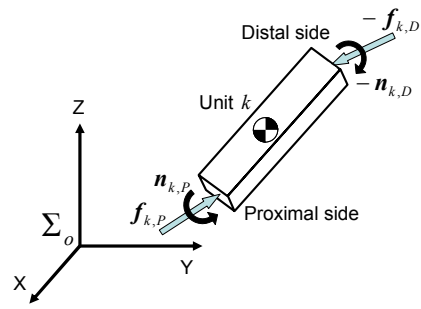


Fig.2 Model of unit with one segment

$$\hat{I}_k \dot{\omega}_k + \omega_k \times (\hat{I}_k \omega_k) = P_{k,cgP} \times f_{k,P} - P_{k,cgD} \times f_{k,D} + n_{k,P} - n_{k,D} \quad \dots(2)$$

と表される. ここで, m_k および \hat{I}_k は, ユニット k の質量および基準座標系から見た慣性行列, x_k および ω_k は, ユニット k の重心位置ベクトルおよび角速度ベクトル, $f_{k,P}$ および $f_{k,D}$ は, 近位のセグメントがユニット k に作用させる関節間作用力ベクトル, およびユニット k が遠位のセグメントに作用させる関節間作用力ベクトル, $n_{k,P}$ および $n_{k,D}$ は, 近位のセグメントがユニット k に作用させる関節モーメントベクトル, およびユニット k が遠位のセグメントに作用させる関節モーメントベクトル, g は重力加速度ベクトルである. また, 添字の D および P はユニットの遠位端および近位端を示しており, 例えば, $P_{k,cgD}$ はユニット k の重心から遠位端へ向かうベクトルを表す. なお, 用具等を持たない手部や頭部等には遠位のセグメントがないため, $f_{k,D}$ および $n_{k,D}$ は $\mathbf{0}$ となる. なお, 地面と接する足部の $f_{foot,D}$ および $n_{foot,D}$ は, 地面反力ベクトルおよびフリーモーメントベクトルであり, $P_{foot,cgD}$ は足部ユニット $foot$ の重心から圧力中心点へ向かうベクトルを表す.

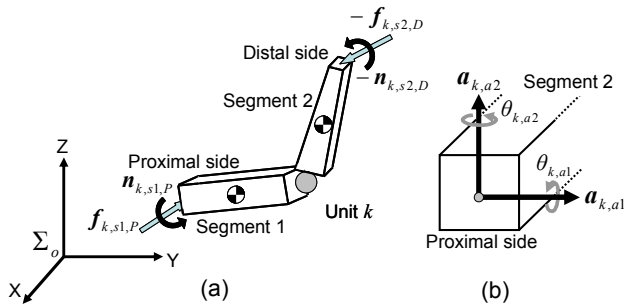


Fig.3 Model of the unit consisting of two segments

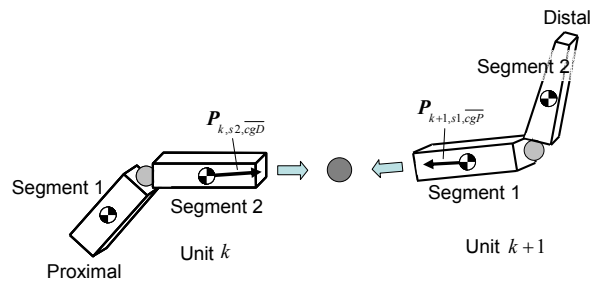


Fig.4 Connecting point of the adjacent unit

導出したセグメントの運動方程式(1), (2)は行列形式で表記すると, 下式として記述できる.

$$M_k \dot{V}_k = P_k F_k + Q_k N_k + H_k + G_k \quad \dots(3)$$

$$V_k = \begin{bmatrix} \dot{x}_k^T & \omega_k^T \end{bmatrix}^T$$

$$F_k = \begin{bmatrix} f_{k,P}^T & f_{k,D}^T \end{bmatrix}^T, \quad N_k = \begin{bmatrix} n_{k,P}^T & n_{k,D}^T \end{bmatrix}^T$$

ここで、 \mathbf{M}_k は慣性行列、 \mathbf{P}_k および \mathbf{Q}_k は、関節間作用力ベクトルにより構成されるベクトル \mathbf{F}_k 、および関節作用モーメントベクトルにより構成されるベクトル \mathbf{N}_k の係数行列、 \mathbf{H}_k はジャイロ効果によるモーメントベクトルにより構成されるベクトル、そして、 \mathbf{G}_k は重力により構成されるベクトルを示す。

2.2.2 二つのセグメントを1ユニットとする場合

2セグメントからなるユニットのモデル図を図3に示す。このときのユニットにおける各セグメントの運動方程式を、一方のセグメントの重心位置・姿勢、ならびに両セグメント間の関節角度を状態変数として用いることによって導出する。なお、添字 k はユニット番号を、添字 $s1$ および $s2$ は、ユニット内の近位セグメントおよび遠位セグメントをそれぞれ示す。

まず、ユニット k における遠位セグメントの角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_{k,s2}$ および角加速度ベクトル $\dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,s2}$ は、近位セグメントの角速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}_{k,s1}$ を用いて、

$$\boldsymbol{\omega}_{k,s2} = \boldsymbol{\omega}_{k,s1} + \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{k,a1} & \mathbf{a}_{k,a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{k,a1} \\ \dot{\theta}_{k,a2} \end{bmatrix} \quad \dots(4)$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,s2} = \dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,s1} + \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{k,a1} & \mathbf{s}_{k,a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_{k,a1} \\ \ddot{\theta}_{k,a2} \end{bmatrix} + \boldsymbol{\omega}_{k,s1} \times \left(\begin{bmatrix} \mathbf{a}_{k,a1} & \mathbf{a}_{k,a2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{k,a1} \\ \dot{\theta}_{k,a2} \end{bmatrix} \right) \quad \dots(5)$$

と表される。ここで、 $\mathbf{a}_{k,ai}$ ($i=1, 2$)は、両セグメント間の関節における関節軸単位ベクトル、 $\theta_{k,ai}$ ($i=1, 2$)は、関節軸 $\mathbf{a}_{k,ai}$ 回りの角変位を示す。なお、関節軸自由度1のユニットでは、 $\mathbf{a}_{k,a2}$ および $\theta_{k,a2}$ は0として消去する。

次に、ユニット k における遠位セグメントの重心位置ベクトル $\mathbf{x}_{k,s2}$ 、速度ベクトル $\dot{\mathbf{x}}_{k,s2}$ 、および加速度ベクトル $\ddot{\mathbf{x}}_{k,s2}$ は、近位セグメントの重心位置ベクトル $\mathbf{x}_{k,s1}$ を用いて、それぞれ、

$$\mathbf{x}_{k,s2} = \mathbf{x}_{k,s1} + \mathbf{P}_{k,s1,cgD} - \mathbf{P}_{k,s2,cgP} \quad \dots(6)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{k,s2} = \dot{\mathbf{x}}_{k,s1} + \boldsymbol{\omega}_{k,s1} \times \mathbf{P}_{k,s1,cgD} - \boldsymbol{\omega}_{k,s2} \times \mathbf{P}_{k,s2,cgP} \quad \dots(7)$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_{k,s2} = \ddot{\mathbf{x}}_{k,s1} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,s1} \times \mathbf{P}_{k,s1,cgD} + \boldsymbol{\omega}_{k,s1} \times (\boldsymbol{\omega}_{k,s1} \times \mathbf{P}_{k,s1,cgD}) - \dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,s2} \times \mathbf{P}_{k,s2,cgP} - \boldsymbol{\omega}_{k,s2} \times (\boldsymbol{\omega}_{k,s2} \times \mathbf{P}_{k,s2,cgP}) \quad \dots(8)$$

と表される。

・遠位セグメントの運動方程式

まず、並進の運動方程式は、

$$\mathbf{f}_{k,s2,P} = m_{k,s2} \ddot{\mathbf{x}}_{k,s2} + \mathbf{f}_{k,s2,D} - m_{k,s2} \mathbf{g} \quad \dots(9)$$

となる。ここで、 $\mathbf{f}_{k,s2,P}$ および $\mathbf{f}_{k,s2,D}$ はそれぞれ、近位セグメントが遠位セグメントに作用させる関節間作用力ベクトル、および遠位セグメントが、さらに遠位のセグメントに作用させる関節間作用力ベクトルである。

つぎに、回転の運動方程式は、

$$\hat{\mathbf{I}}_{k,s2} \dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,s2} + \boldsymbol{\omega}_{k,s2} \times (\hat{\mathbf{I}}_{k,s2} \boldsymbol{\omega}_{k,s2}) = \mathbf{P}_{k,s2,cgP} \times \mathbf{f}_{k,s2,P} - \mathbf{P}_{k,s2,cgD} \times \mathbf{f}_{k,s2,D} + \mathbf{n}_{k,s2,P} - \mathbf{n}_{k,s2,D} \quad \dots(10)$$

となる。ここで、 $\mathbf{n}_{k,s2,P}$ および $\mathbf{n}_{k,s2,D}$ はそれぞれ、近位セグメントが遠位セグメントに作用させる関節モーメントベクトル、および遠位セグメントが、さらに遠位のセグメントに作用させる関節モーメントベクトルである。

式(10)に式(4), (5), (8), および(9)を代入することにより, 2セグメント間の関節作用力ベクトルの消去, ならびに説明変数の置き換えを行い, さらに, 代入により得られた式の両辺に, $[\mathbf{a}_{k,a1} \ \mathbf{a}_{k,a2}]^T$ を掛けることにより遠位セグメントの運動方程式を得る.

・近位セグメントの運動方程式

まず, 並進の運動方程式は,

$$m_{k,s1}\ddot{\mathbf{x}}_{k,s1} = \mathbf{f}_{k,s1,P} - \mathbf{f}_{k,s1,D} + m_{k,s1}\mathbf{g} \quad \dots(11)$$

となり, 回転の運動方程式は,

$$\hat{\mathbf{I}}_{k,s1}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,s1} + \boldsymbol{\omega}_{k,s1} \times (\hat{\mathbf{I}}_{k,s1}\boldsymbol{\omega}_{k,s1}) = \mathbf{P}_{k,s1,cgP} \times \mathbf{f}_{k,s1,P} - \mathbf{P}_{k,s1,cgD} \times \mathbf{f}_{k,s1,D} + \mathbf{n}_{k,s1,P} - \mathbf{n}_{k,s1,D} \quad \dots(12)$$

となる. ここで,

$$\mathbf{f}_{k,s2,P} = \mathbf{f}_{k,s1,D} \quad , \quad \mathbf{n}_{k,s2,P} = \mathbf{n}_{k,s1,D} \quad \dots(13)$$

である.

式(11)に式(8), (9)および(13)を代入し, 状態変数を置き換えることにより, 近位セグメントの並進の運動方程式が導出される. また, 式(10)の変形により下式を得る.

$$\mathbf{n}_{k,s2,P} = \hat{\mathbf{I}}_{k,s2}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,s2} + \boldsymbol{\omega}_{k,s2} \times (\hat{\mathbf{I}}_{k,s2}\boldsymbol{\omega}_{k,s2}) - \mathbf{P}_{k,s2,cgP} \times \mathbf{f}_{k,s2,P} + \mathbf{P}_{k,s2,cgD} \times \mathbf{f}_{k,s2,D} + \mathbf{n}_{k,s2,D} \quad \dots(14)$$

式(12)に式(4), (5), (8), (13)および(14)を代入することにより, 近位セグメントの回転の運動方程式が求まる.

導出した近位および遠位のセグメントの運動方程式は, 下式として表現できる.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_k \dot{\mathbf{V}}_k &= \mathbf{P}_k \mathbf{F}_k + \mathbf{Q}_k \mathbf{N}_k + \mathbf{H}_k + \mathbf{G}_k \quad \dots(15) \\ \mathbf{V}_k &= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}_{k,s1}^T & \boldsymbol{\omega}_{k,s1}^T & \dot{\theta}_{k,a1} & \dot{\theta}_{k,a2} \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{F}_k &= \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{k,s1,P}^T & \mathbf{f}_{k,s2,D}^T \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{N}_k &= \begin{bmatrix} \mathbf{n}_{k,s1,P}^T & \tau_{k,a1} & \tau_{k,a2} & \mathbf{n}_{k,s2,D}^T \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

ここで, 各関節軸の発揮トルク $\tau_{k,ai}$ ($i=1, 2$)は,

$$\tau_{k,ai} = \mathbf{a}_{k,ai}^T \mathbf{n}_{k,s1,D} \quad \dots(16)$$

である. また, \mathbf{H}_k はジャイロ効果によるモーメントベクトルやコリオリ・遠心力等の, 運動依存力により構成されるベクトルである.

最後に, 導出した各ユニットの運動方程式を全身についてまとめると, 下式のように表すことができる.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}\dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{P}\mathbf{F} + \mathbf{Q}\mathbf{N} + \mathbf{H} + \mathbf{G} \quad \dots(17) \\ \mathbf{V} &= \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T & \mathbf{V}_2^T & \mathbf{V}_3^T & \dots & \mathbf{V}_n^T \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{F} &= \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1^T & \mathbf{F}_2^T & \mathbf{F}_3^T & \dots & \mathbf{F}_n^T \end{bmatrix}^T \\ \mathbf{N} &= \begin{bmatrix} \mathbf{N}_1^T & \mathbf{N}_2^T & \mathbf{N}_3^T & \dots & \mathbf{N}_n^T \end{bmatrix}^T \end{aligned}$$

2.3 全身の運動方程式の導出

まず, 隣り合うユニットが関節により連結するための加速度拘束式を導出する. 導出される関節の加速度拘束式は, 近位のユニットが1セグメント1ユニットの場合と2セグメント1ユニットの場合により異なる. ここでは例として近位のユニット, 遠位のユニットともに2セグメント1ユニットの場合を記述する. 図4にユニット連結のモデル図を示す.

近位のユニットを k , 遠位のユニットを $k+1$ とすると, まず, 関節の位置拘束式は,

$$\mathbf{x}_{k,s2} + \mathbf{P}_{k,s2,cgD} = \mathbf{x}_{k+1,s1} + \mathbf{P}_{k+1,s1,cgP} \quad \dots(18)$$

と表される。上式の2階微分により加速度拘束式,

$$\ddot{\mathbf{x}}_{k,s2} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{k,s2} \times \mathbf{P}_{k,s2,cgD} + \boldsymbol{\omega}_{k,s2} \times (\boldsymbol{\omega}_{k,s2} \times \mathbf{P}_{k,s2,cgD}) = \ddot{\mathbf{x}}_{k+1,s1} + \dot{\boldsymbol{\omega}}_{k+1,s1} \times \mathbf{P}_{k+1,s1,cgP} + \boldsymbol{\omega}_{k+1,s1} \times (\boldsymbol{\omega}_{k+1,s1} \times \mathbf{P}_{k+1,s1,cgP}) \quad \dots(19)$$

を得る。ここで、式(18)に式(4)、(5)および(8)を代入することにより、関節の加速度拘束式を導出する。なお、近位のユニットが1セグメント1ユニットの場合の加速度拘束式は、状態変数の置き換えが必要ないため、式(18)と同様の形となる。

導出した各ユニットの連結点の加速度拘束式は、下式のようにまとめることができる。

$$\mathbf{C}\dot{\mathbf{V}} + \mathbf{D} = \ddot{\mathbf{j}} \quad \dots(20)$$

ここで、 \mathbf{C} は $\dot{\mathbf{V}}$ の係数行列、 \mathbf{D} は求心・コリオリ加速度ベクトルにより構成されるベクトル、 $\ddot{\mathbf{j}}$ は $\mathbf{o}_{3 \times 1}$ および圧力中心点の加速度ベクトルにより構成されるベクトルを示す。

式(16)および(19)より、ユニット連結点における関節間作用力ベクトルおよび外力ベクトルにより構成されるベクトル \mathbf{F} が次式として求まる。

$$\mathbf{F} = -(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{N} + \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} + \mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{G} + \mathbf{D} - \ddot{\mathbf{j}}) \quad \dots(21)$$

そして、算出された式(20)を式(16)に代入することにより、全身の運動方程式が下式として求まる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{A}_N \mathbf{N} + \mathbf{A}_V + \mathbf{A}_G \quad \dots(22) \\ \mathbf{A}_N &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q} \\ \mathbf{A}_V &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} + \mathbf{D} - \ddot{\mathbf{j}}) + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{H} \\ \mathbf{A}_G &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1} + \mathbf{M}^{-1} \end{aligned}$$

ここで、 \mathbf{A}_N は関節作用モーメントベクトルの係数行列、 \mathbf{A}_V はコリオリ・遠心力、ならびにジャイロ効果による回転モーメント等の運動依存力に関するベクトル項、そして \mathbf{A}_G は重力ベクトルの係数行列を示す。

2.4 動学的貢献度の算出

ここでは、動学的貢献度の一例として、投動作を考え、投擲物体の速さ生成における、身体各関節軸トルク、運動依存力、および重力の貢献度を算出することにする。

まず、関節軸自由度3の関節 j における関節作用モーメントベクトル \mathbf{n}_j を解剖学的な関節トルク \mathbf{T}_j に変換する。なお、各関節の関節作用モーメントベクトルは逆動力学計算により算出する。 \mathbf{n}_j と $\boldsymbol{\tau}_{j,ai}$ ($i=1, 2, 3$)の関係は解剖学的関節軸を表す単位ベクトル $\mathbf{a}_{j,ai}$ ($i=1, 2, 3$)により構成される行列 \mathbf{R}_j を用いて、

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_j &= \mathbf{R}_j^T \mathbf{n}_j \quad \dots(23) \\ \mathbf{T}_j &= [\tau_{j,a1} \quad \tau_{j,a2} \quad \tau_{j,a3}]^T, \quad \mathbf{R}_j = [\mathbf{a}_{j,a1} \quad \mathbf{a}_{j,a2} \quad \mathbf{a}_{j,a3}] \end{aligned}$$

と表すことができる。よって、すべての関節における解剖学的関節トルクにより構成されるベクトル \mathbf{T} は、下式として表現できる。

$$\begin{aligned} \mathbf{T} &= \mathbf{R}\mathbf{N} \quad \dots(24) \\ \mathbf{T} &= [\mathbf{T}_1^T \quad \tau_{1,a1} \quad \mathbf{T}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{T}_n^T]^T \\ \mathbf{R} &= \text{block diag} \{ \mathbf{R}_1^T \quad 1 \quad \mathbf{R}_2^T \quad \dots \quad \mathbf{R}_n^T \} \end{aligned}$$

また、式(24)より、式(22)は下式のように変形することができる。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} &= \mathbf{A}_T \mathbf{T} + \mathbf{A}_V + \mathbf{A}_G \quad \dots(25) \\ \mathbf{A}_T &= -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P}(\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{P})^{-1}\mathbf{C}\mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{R}^{-1} + \mathbf{M}^{-1}\mathbf{Q}\mathbf{R}^{-1} \end{aligned}$$

ついで、式(25)を時間積分することにより、 V が以下のように求まる。

$$V = \int A_T T dt + \int A_r dt + \int A_G G dt \quad \dots(26)$$

投擲物体の速度を抽出するための行列 S を上式の両辺に掛けることにより、物体の速度に対する各項の貢献度が下式のように算出できる。

$$\dot{x}_{obj} = C_{TT,obj} + C_{H,obj} + C_{G,obj} \quad \dots(27)$$

$$S = \text{diag}\{ 0, \dots, 0, 1, 1, 1, 0, \dots, 0 \}$$

$$C_{TT,obj} = S \int A_T T dt, \quad C_{H,obj} = S \int A_r dt, \quad C_{G,obj} = S \int A_G G dt$$

ここで、 $C_{TT,obj}$ 、 $C_{H,obj}$ および $C_{G,obj}$ はそれぞれ、投擲物体の速度に対する、総関節トルク、運動依存力、および重力の貢献度を示す。

さらに、総関節トルクの貢献度 $C_{TT,obj}$ を分解することにより、各関節軸トルクの貢献度 $C_{T,j,obj}$ を算出することができる。 $C_{TT,obj}$ と $C_{T,j,obj}$ の関係は次式の通りである。

$$C_{TT,obj} = \sum C_{T,j,obj} \quad \dots(28)$$

3. やり投げ動作の分析

やり投げ競技は、やりをより遠くへ到達するように投射する競技であり、その競技記録はやりの初速、投射角、姿勢角等の投射初期条件、ならびに、飛翔中の風向や風速等の外的条件により決定される。これらのパラメータの中でも、やりの初速は競技記録との間に著しく高い有意な正の相関関係があるため、やりに大きな初速を与えることが競技記録向上には最も重要であると報告されている(5)(10)。しかしながら、これまでに行われているやり投げに関する研究は、前田(7)(8)の報告のように、やりへの作用力や飛翔特性について取り扱っている研究や、野友ら(17)、村上ら(10)、伊藤ら(5)の報告のように、競技記録と競技者の動作的特徴との関係を取り扱っている研究が多く、実際に競技者が身体の各関節によって、どのようにやりの速さを生成しているのかについて、そのメカニズムに注目した研究は見当たらない。

やり投げ以外の投動作においては、投擲物の速度に対する身体各部のキネマティクスのな貢献度を算出した研究がいくつか行われている。まず、宮西ら(9)は、野球の投球動作において、ボール速度に対する、上腕および投球腕各関節の回転運動による幾何学的貢献度を算出している。また、田内ら(20)(21)は、砲丸投げおよび円盤投げにおいて、下肢一体幹—上肢モデルから、各部位の相対速度を算出し、砲丸あるいは円盤速度に対する身体各部位の幾何学的貢献の様相について述べている。しかし、これらはいずれも運動学的な関係から、身体各部位の貢献度を算出したものであり、その動作が何に起因しているかについては明らかにされていない。

一方、内藤ら(16)は、野球のピッチング動作において、投球腕—体幹モデルに関して導出した運動方程式を用いて、ボール速度に対する、投球腕各関節トルク、運動依存トルク、重力および体幹の運動の貢献度を算出し、運動依存トルクがボール速度生成に貢献することを明らかにしている。しかしながら、主として投球腕を対象とした分析であり、全身の動力学については考慮されていない。また、その手法を全身へ適用するには、煩雑な式の導出が必要となる。

そこで本節では、前章にて提案した順動力学的分析手法を用いて、やり投げにおけるやり速さ生成に対する関節トルク、運動依存トルクおよび重力の貢献度を算出し、やり速さの生成因子を明らかにし、被験者毎の特徴について検討する。

3.1 モデル化

まず身体-やり系を16セグメントの剛体リンクによってモデル化し、関節軸自由度を考慮した全身の運動方程式の導出法について概説する。ついで、この運動方程式を利用して、やり速さに対する総関節トルク、運動依存トルク、および重力の貢献度を導出する。そして、総関節トルクの貢献から、各関節軸トルクの貢献度を算出する方法について述べる。

やり速さ方向の単位ベクトルは、次式として表すことができるため、

$$\mathbf{e}_{\text{Jav}} = \dot{\mathbf{x}}_{\text{Jav}} / |\dot{\mathbf{x}}_{\text{Jav}}| \quad \dots (29)$$

このベクトルの転置を式(27)の両辺に掛け、さらに時間積分することによって、やりの速さ s_{Jav} に対する、各項の貢献度を次式のように算出する。

$$s_{\text{Jav}} = C_{TT} + C_H + C_G \quad \dots (30)$$

$$C_{TT} = \mathbf{S} \int \mathbf{A}_T \mathbf{T} dt, \quad C_H = \mathbf{S} \int \mathbf{A}_V dt, \quad C_G = \mathbf{S} \int \mathbf{A}_G G dt$$

ここで、 C_{TT} 、 C_H 、および C_G はそれぞれ手部速さに対する総関節トルク、運動依存トルク、および重力の貢献度を表す。

さらに、総関節トルクの貢献度 C_{TT} は、各関節軸トルクの貢献度 $C_{T,j}$ に分離することができ、

$$C_{TT} = \sum C_{T,j} \quad \dots (31)$$

である。

3.2 やり投擲実験

大学陸上競技部のやり投げ競技者10名(男子6名、女子4名)を被験者として、実験棟内にて、後述するやり緩衝装置へ向けてやり投げ動作を行わせた。その際、被験者の身体各代表点(47点)およびやり(6点)に反射マーカを貼付し、光学式3次元動作自動分析装置(Oxford Metrics社製、VICON 612, 9-camera, 250Hz)を用いて、動作中の各マーカの3次元座標値を得た。同時に、ブロック脚接地をフォースプラットフォーム(Kistler社製、1000Hz)上で行うように指示することにより、ブロック動作時における地面反力、および圧力中心点を計測した。

昇降式やり緩衝装置は、高さ約6m、幅5.8mのアルミ製フレームの上辺より垂らした2枚のシートによって、やりを緩衝する構造になっている。なお、やりの先端および後端には、ポリアセタール製円筒を介して発泡樹脂製球を装着し、シートの破れを防ぐとともに、安全性を確保している。

3.3 データ処理および局面分け

実験により得た3次元座標値を、バターワース型デジタルフィルタを用いて、遮断周波数10-20Hzで平滑化した。また、動作データはスプライン関数を用いて1000Hzのデータに内挿補間し、地面反力データとの同期を行った。

本研究では、身体およびやりを、16の剛体セグメントからなる剛体セグメントモデルと仮定した。その際、投擲腕手部-やり間は、自由度3の仮想関節によって連結しているものとした。図3に、実験試技における被験者のスティックピクチャを示す。分析範囲はブロック脚1歩前接地時点(L-on)から、手指の伸展により、やりのリリースが開始される時点(Rel-S)までとし、L-onからブロック脚接地時点(BLK)までを第1局面、BLKから投擲腕の肩関節最大水平外転時(MaxHA)までを第2局面、MaxHAからRel-Sまでを第3局面と定義した。

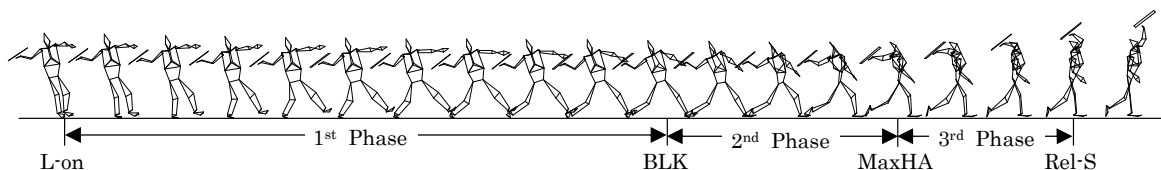


Fig.5 Stick picture of Javelin throwing motion.

3.4 結果および考察

ここでは、総関節トルク、運動依存トルク、重力のやり速さに対する貢献度、ならびに主要な関節軸トルクのやり速さに対する貢献度を示し、やり速さの生成因子について検討する。

3.4.1 関節トルク、運動依存トルク、および重力のやり速さに対する貢献

図6に、一例として男性被験者 D.I.および女性被験者 M.N.のやり速さに対する総関節トルク、運動依存トルクおよび重力の貢献度の時間変化を示す。なお、図中の各実線における Torque, M-dep および Grav は、それぞれ総関節トルク、運動依存トルクおよび重力を表し、各縦線における BLK および MaxHA は、ブロック脚接地時点、および肩関節最大水平外転時点を示す。

同図(a), (b)から、総関節トルクは、BLK 前から Rel-S まで増大し続け、運動依存トルクや重力に比べ顕著に大きな貢献を示していた。運動依存トルクは、第2局面後半から第3局面前半まで小さな負の貢献を示した後、第3局面終盤には小さな正の値へ転じていた。重力の貢献は全局面を通じて非常に小さかった。なお、各項目による貢献度の時間変化は、両被験者とも同様であった。

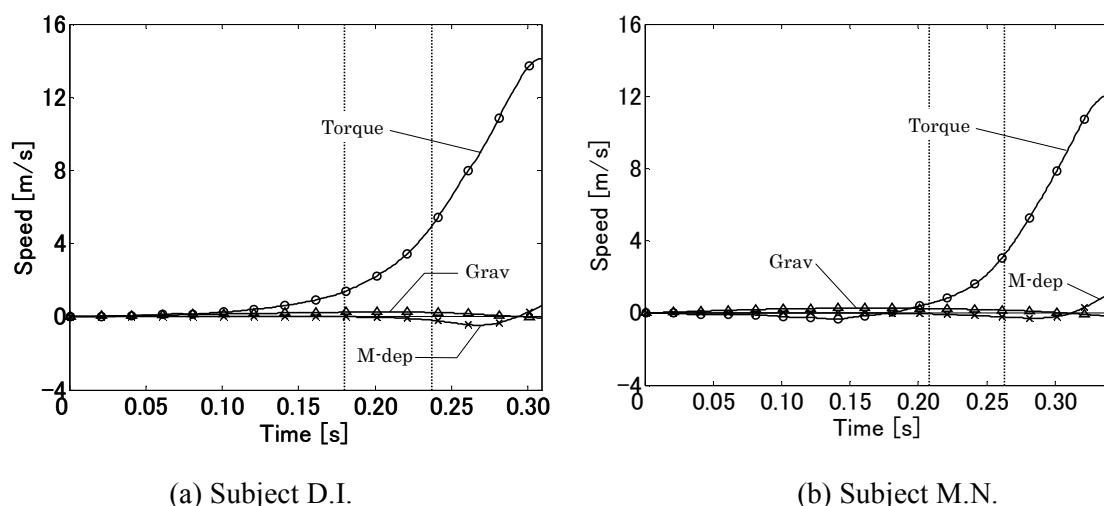


Fig.6 Time series of contributions of the terms to Javelin speed.

図6から、やり速さは、その殆どが関節トルクによって生成されていることが明らかとなった。このことは、同じ投動作である野球の投球時に運動依存トルクの貢献が大きいことに対して、注目すべき結果である。この理由としては、やりの質量が800g(男性用)、600g(女性用)と、野球の硬式球に対して非常に重いこと、やり投射角が上向きであること、ならびに助走を伴う投動作であること等の諸条件の違いによって、速さ生成のための動作のメカニズムが異なるためと考えられる。

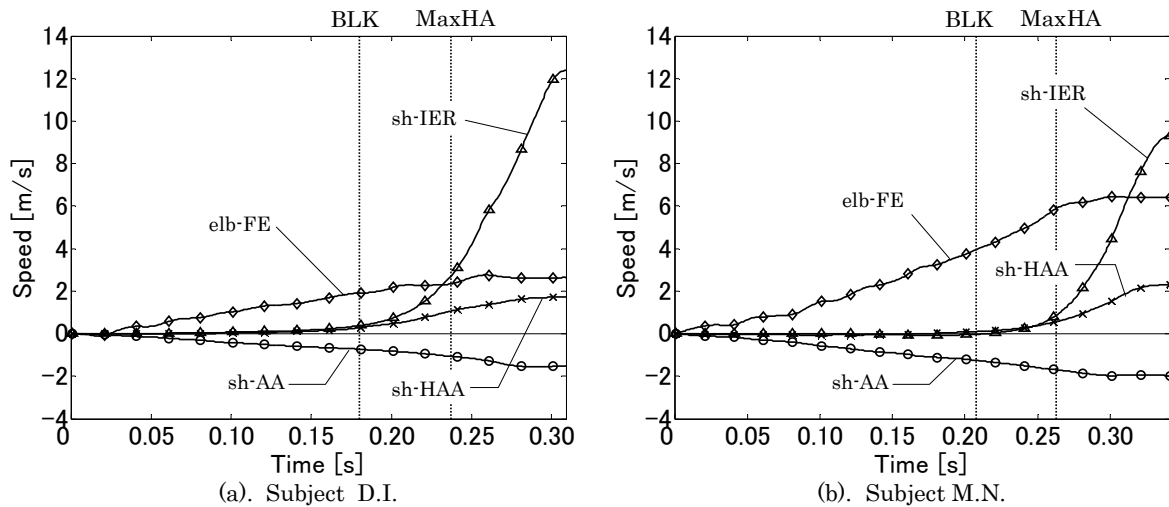


Fig.7 Time series of contributions of joint torques to Javelin speed.

3.4.2 各関節軸トルクのやり速さに対する貢献

続いて、前節で示した総関節トルクの貢献度を、各関節軸トルクの貢献度に分解したものについて示す。図7はその一例として、図6と同一被験者における、やり速さに対する投擲腕各関節軸トルクの貢献度の時間変化を示したものである。図中各実線における sh-AA は肩関節内外転、sh-HAA は肩関節水平内外転、sh-IER は肩関節内外旋、そして elb-FE は肘関節屈曲伸展の貢献度をそれぞれ示す。同図から、まず、肩関節内外転トルクの貢献は、両被験者ともに第1局面から第3局面中盤まで緩やかに減少し、Rel-S では負の貢献を示していた。つぎに、肩関節水平内外転トルクの貢献は、被験者 D.I. では第2局面前半から、被験者 M.N. では第2局面中盤から緩やかに増大し、Rel-S では正の貢献を示していた。続いて、肩関節内外旋トルクの貢献は、両被験者ともに第2局面から第3局面において急激な増大を示し、Rel-S では、他の関節軸トルクに比べ、顕著に大きな正の貢献を示していた。また、その増加開始時点は肩関節水平内外転トルクの貢献と同じであった。そして、肘関節屈曲伸展トルクの貢献は、両被験者ともに第1局面において増大を示したが、その大きさは被験者 D.I. に比べ、被験者 M.N. が顕著に大きかった。

図7(a), (b)に示した、各関節軸トルクの貢献から見ると、被験者による個人差が顕著に表れている。すなわち、同図(a)の被験者 D.I. では、リリース開始における肩関節内外旋の貢献は約 12m/s であるのに対して、肘関節屈曲伸展の貢献が約 3m/s であり、肩関節水平内外転の約 2m/s とほぼ同じとなっている。一方、同図(b)の被験者 M.N. では、肩関節内外旋の貢献が約 10m/s であるのに対して、肘関節屈曲伸展の貢献が約 6m/s、肩関節水平内外転が約 2m/s と、肘関節屈曲伸展の貢献の割合が大きくなっている。このような、被験者毎の特徴は図7からも明らかであり、図6にて示した総関節トルクによる貢献を各関節軸トルクによる貢献へと分解することにより、被験者毎のやり加速メカニズムにおける主要因子が明らかになった。

4 バレーボールスパイク動作の分析

バレーボールにおいて速いスパイクを打つことは、スパイク決定における要因の1つである。堀田ら(14)、橋原ら(15)、そして和田ら(22)は、インパクト時の手先の速度が増加するにつれ、インパクト直後の

ボール速度は大きくなる傾向があると報告している。このことから、インパクト時の手部速さを大きくすることは、ボール速度を大きくするための要因の1つであるといえる。このため、速いスパイクを打つための身体の動きに関する研究が、いくつか行われてきている。堀田ら(14)は、体肢をムチのように動かすムチ動作を、肘のスイング速度のピーク値とその時点での手首速度との差と定義し、この動作が、スイング速度・ボール速度と高い相関を示すこと、およびスイング速度を増大させ、ボール速度を増加させる重要な要子の1つであると述べている。橋原(15)は、フォアスイング中に胴体をひねるようにして上胴を前方屈曲させることは、肩や手先の速度を大きくし、強いスパイクを行うのに役立つと述べている。和田ら(22)は、体幹の角度・角速度と手速度との関係から、体幹のひねり角とひねり戻し角速度を大きくすることは、インパクト時の手速度を大きくするのに役立つと述べている。これらの報告が示すように、手部速さを獲得するには、上肢だけでなく、体幹の動きも重要である。しかしスパイクに関する研究は、キネマティクスあるいはキネティクスの分析によって行われたものであり、手部速さ生成のメカニズムを明らかにするための動力的分析は行われていない。

4.1 モデル化

身体を16セグメントの剛体リンクによってモデル化した際の、関節軸自由度数を考慮した全身の運動方程式の導出法について概説する。そして、全身の運動方程式から手部速さ成分を抽出することによって、手部速さに対する総関節トルク項、運動依存トルク項、および重力項の貢献度を算出する。図1に、関節自由度を考慮してユニット化した全身のモデル図を示す。肘および膝関節においては、屈曲・伸展の自由度のみを考える。上胴においては、スパイク腕の肩甲骨の動きを、挙上・下制軸および前方回転・後方回転軸によって連結された、上胴セグメントおよび肩甲骨セグメントからなる一つのユニットとしてモデル化する。また、手部、足部、頭部、下胴部は、単一セグメントからなるユニットとして扱う。各セグメントの重心位置、質量、慣性モーメントなどの慣性パラメータについては、文献(1)の身体部分慣性係数を用いる。そして、画像より得られた身体代表点の3次元座標値を用いて逆動力学計算を行い、スパイク動作における全身の関節トルクを算出する。

4.2 スパイク実験

日本代表経験者を含む7名の被験者(身長 184.7 ± 6.8 cm, 体重 77.7 ± 7.8 kg)の身体各代表点(47点)に反射マーカーを貼付し、セッターによってトスされたボールを、相手側コート上に設置したターゲットマットに向けてスパイクさせた。その際の身体各代表点の3次元座標値を、光学式3次元自動動作分析装置(Oxford Metrics社製, Vicon612, 250Hz, 9台)を用いて検出した。また、ネットに貼付したマイクロフォンによってインパクト時の衝撃音を、アナログ信号としてコンピュータに取り込み、その信号のインパルスから試技におけるインパクト時点を特定した。なお、トスは全被験者をセミトスで統一した。

得られた3次元座標をWells and Winterの方法によって遮断周波数(10–20Hz)を決定し、バターワース型デジタルフィルタを用いて平滑化を行った。また、各セグメントの平均長と姿勢によって、近位から遠位の身体代表点を順次再定義し、モデル化の際に誤差となるセグメントの伸縮を除去した。算出した各データは、各試技において規格化を行い、被験者ごとに複数試技の平均値を算出した。

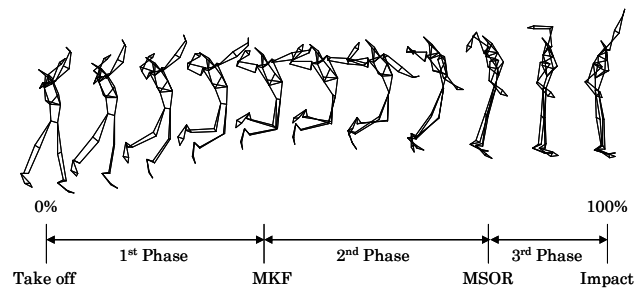


Fig.8 Stick pictures of the spike motion.

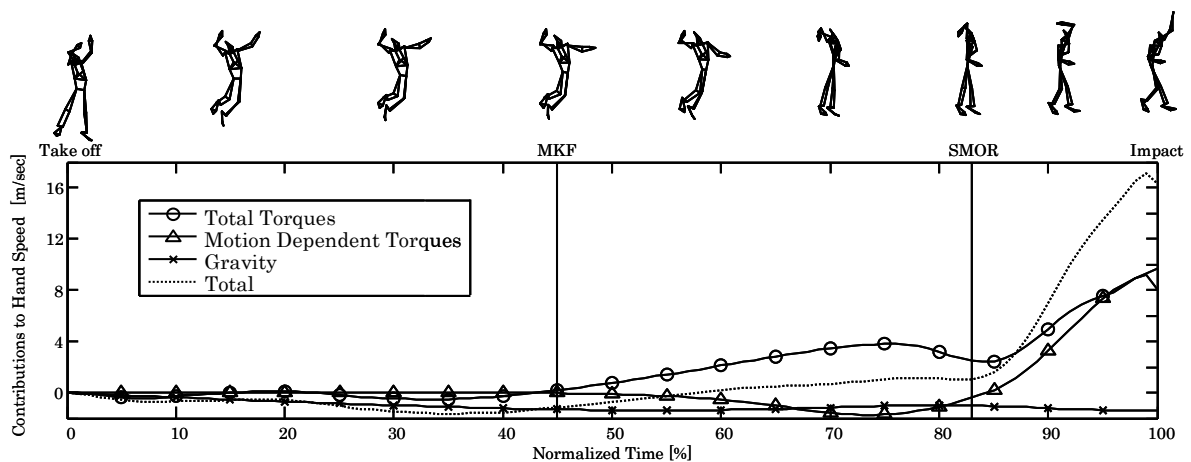


Fig.9 Time series of contribution to hand speed.

4.3 結果および考察

スパイク動作のスティックピクチャを図8に示す。各試技において、離地(Take off)から右膝関節最大屈曲時点(MKF)までを第1局面、MKFから右肩関節最大外旋時点(SMOR)までを第2局面、そしてSMORからインパクト(Impact)までを第3局面とした。

図9は、手部速さに対する総関節トルク項、運動依存トルク項、および重力項の貢献度の一例を、時系列データで表したものである。被験者全員の傾向として、手部速さは特に第3局面において急激に増加し、この局面における手部速さは、総関節トルク項および運動依存トルク項の二つの因子によって生成されており、重力項はこれら二つの値よりも小さな範囲で負の貢献を示している。

図10は、5人の被験者の第2、および第3局面における手部速さへのこれら3項の貢献度を、右からインパクト時の手部速さが大きかった順に示す。なお第1局面は主にバックスイングが行われる局面であり、手部速さの変化はほとんどみられなかったため、割愛した。図中の棒グラフは左からそれぞれ総関節トルク項(T)、運動依存トルク項(H)、および重力項(G)の貢献を示している。手部速さが大きな被験者ほど、第3局面における運動依存項の貢献が大きくなっている。このことから、運動依存トルク項の貢献を高めることが、手の速さを大きくするための重要な要素であると考えられる。また、トルクの貢献に関しては、上位2名が第2局面よりも第3局面において大きな貢献を示していたのに対し、下位の被験者では、逆のパターンを示していた。

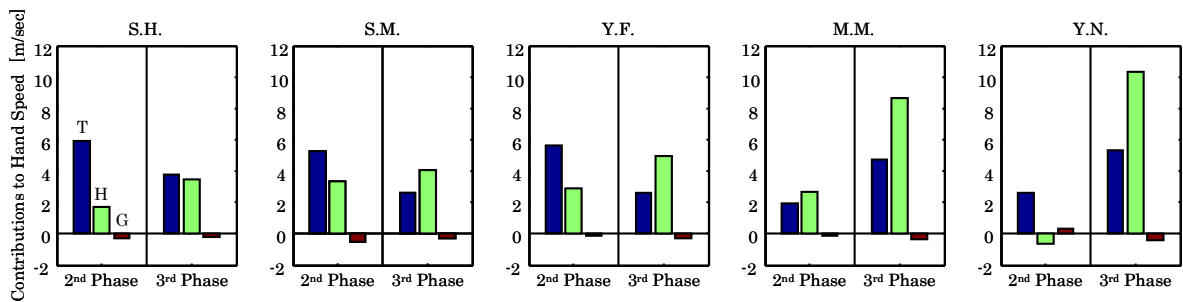


Fig.10 Contributions to hand speed for 5 subjects.

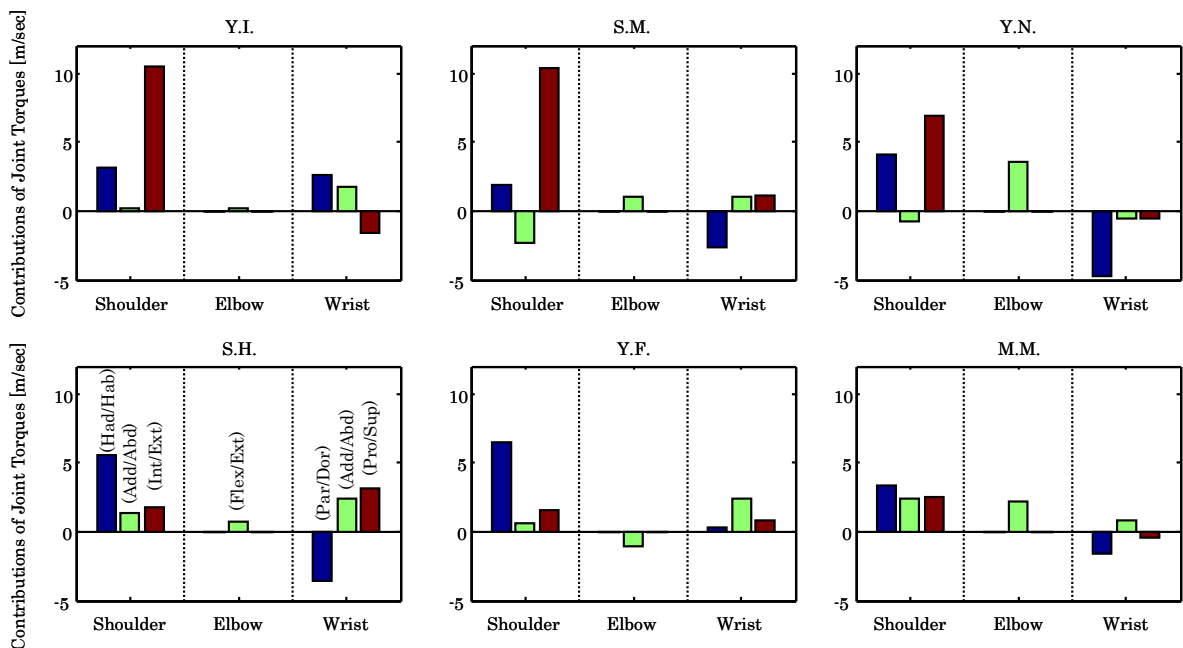


Fig.11 Contributions of joint torques to hand speed.

図 11 に 6 人の被験者における手部速さに対する右上肢の各関節軸トルクの貢献を示す。ここで肩関節の水平内・外転トルク (Had-Hab)、内・外転トルク (Add-Abd)、内・外旋トルク (Int-Ext)、肘関節の屈曲・伸展トルク (Flex-Ext)、手首関節の掌・背屈トルク (Par-dor)、橈・尺屈トルク (Add-Abd)、回内・外トルク (Int-Ext) とした。なお、手部速さに対しては、主に右上肢の関節軸トルクが貢献しており、肩甲骨や体幹を含む、その他の関節軸トルクの貢献はほとんど見られなかった。

関節軸トルクの貢献においては、手部速さとの高い相関を示すような傾向は見られなかった。また、貢献する関節軸トルクは、被験者間でばらつきが大きいものの、全体的に肩の内・外旋トルクの貢献が大きい者 (図 7 上段) と、肩の水平内・外転トルクの貢献が大きく、内・外旋トルクの貢献が比較的少ない者 (図 7 下段) と二つの傾向が見られた。これは、被験者ごとのスパイクフォームの違いによるものであると考えられる。図 12 にインパクト時の手部速さが大きかった上位 2 人のバックスイング終了時の、側方および上方から見たスティックピクチャを示す。被験者 Y.N. は一般的にスナップ・アームスイング、あるいはサーキュラー・アームスイングと呼ばれるバックスイングの形 (9) をとっており、肘を大きく身体の後方に引きつけ、右肘が両肩を結ぶ線に近い位置からフォワードスイングを開始している。一方、被験者 M.M. は、一般的にボウ・アンド・アロウアームスイングと呼ばれるバックスイングの形 (9) をとっており、腕

を大きく振り上げた状態で肘を後方に引きつけるため、右肘が両肩を結ぶ線に対して、比較的高い位置からフォワードスイングが始まる。このように、被験者によってスパイクフォームがそれぞれ異なるため、手部速さに貢献する関節軸トルクは、一様に定まらないと考えられる。しかし、それぞれのスパイクフォームにおいて、貢献する関節軸トルクを抽出することにより、それぞれのスパイクフォームにおける動力学的特徴を理解し、スパイクフォームと選手の適正判断や、フォームの改善点の把握などに役立てられるものとする。現段階において、右肩の内・外旋トルクが大きく貢献する被験者(図 11 上段)にはスナップおよびサーキュラー・アームスイングに近いスイングの者が多く、右肩の水平内・外転トルクが大きく貢献する被験者には、ボウ・アンド・アローアームスイングに近い被験者(図 11 下段)が多い傾向はあるものの、有意な相関は見られないため、今後より多くの被験者を分析し、評価していく必要がある。

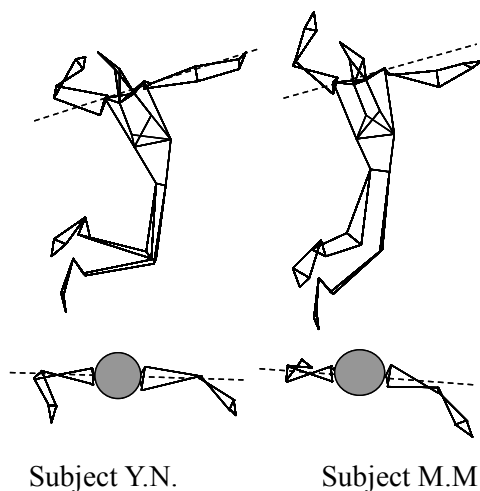


Fig.12 Stick pictures of back swing types.

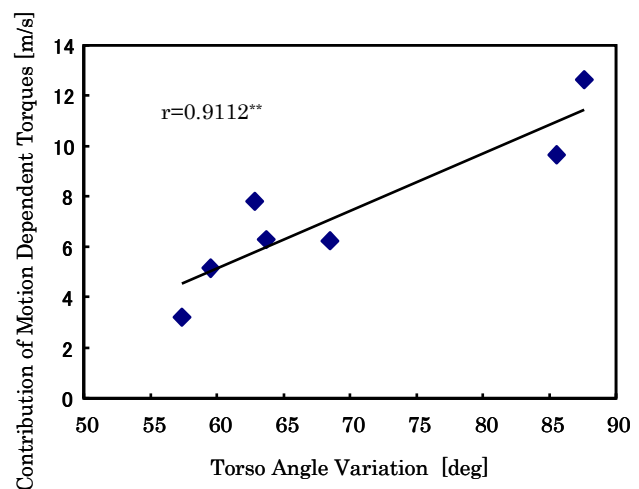


Fig.13 Relationship between torso angle variation and contribution of motion dependent torques.

図 13 に、バックスイングによる体幹の最大後屈角、右回旋時からインパクトまでの前屈角度、および左回旋角度の変化量を合計した値と、手部速さに対する運動依存トルク項の貢献との関係を示す。これらに有意な正の相関が認められることから、体幹の動きは運動依存トルクの貢献度を高める重要な因子であると考えられる。それゆえ、体幹で発揮されるトルクは、手部の速さに直接的には貢献しないものの、運動依存トルクの貢献を増大させる形で、間接的に貢献しているものと推測される。体幹を空中でより大きく動かすための知見を得るためには、離地時やフォワードスイング開始時のボールに対する姿勢などのキネマティクスの観点とともに、角運動量の保存を前提とした、全身の動力学的分析が必要となる。

4. 結言

本研究では、まず、関節軸の自由度を考慮した順動力学的解析を可能とするために、身体各セグメントを関節軸自由度に応じてユニット化し、ユニット毎の運動方程式を導出した後、連結点の加速度拘束式と連立することにより、全身の運動方程式を導出した。導出した運動方程式を用いて、関節トルク、運動依存トルクおよび重力の投擲物体の速さに対する貢献度を算出した結果、受動関節軸トルクの貢献度として計上していたものを、そのトルクを発生させる他の能動発揮可能な関節軸トルクの貢献度と

して示すことが可能となった。

次に、やり速さ生成に対する、総関節トルク、運動依存トルクおよび重力の貢献度を算出し、やり速さの生成因子について検討した後、総関節トルクを各関節軸トルクに分解することによって、各関節軸トルクの機能を明らかにした。その結果、やり速さのほとんどが関節トルクによって生成されるものであり、中でも、肩関節内外旋トルク、肘関節屈曲伸展トルク、および肩関節水平内外転トルクが、その順に大きな貢献を示すことが明らかとなった。この貢献の順序はすべての被験者に共通していたが、その比率は被験者によって異なり、固有の速さ生成メカニズムが存在することが示唆された。

さらに、同様の手法によって、日本代表経験者を含むバレーボール選手のスパイク動作を分析したところ以下の結果を得た。

(1)スパイク動作時の手部速さ生成には、主に総関節トルク項、運動依存トルク項が貢献しており、インパクト時の手部速さが大きな被験者ほど運動依存トルク項の貢献が大きくなる傾向が見られた。

(2)体幹内の各関節軸トルクや、肩甲骨の運動を表すために設けた関節軸まわりのトルクは、手部速さ生成には直接貢献しないことがわかった。

(3)手部速さに対する各関節軸トルクの貢献は、被験者によってばらつきは大きかったものの、スパイクフォーム別に右肩内・外旋トルク貢献タイプと水平内・外転トルクタイプに分かれる傾向が見られた。

(4)バックスイング終了時からインパクトまでの体幹の角運動が大きいほど、運動依存トルクの貢献が大きくなる傾向が見られることから、体幹で発揮されるトルクは、運動依存トルクとして手部速さに間接的な貢献をしていたと考えられる。

以上の結果から、非常に高速なスポーツ動作の分析において、全身の運動方程式を用いることによって、各種目内に共通の動力学的特徴を明らかにするだけでなく、パフォーマンス実現のメカニズムにおける選手間の個人差をも抽出可能な手法を開発することができた。なお、本報告では、投動作や、スパイク動作を対象として分析を行ったが、本手法は、あらゆる動作に適用が可能である。

参考文献

- (1)阿江通良(1996):日本人幼少年およびアスリートの身体部分慣性係数. Japanese Journal of Sports Science 15(3), 155-162.
- (2)R.J.Best, R.M.Bartlett, C.J.Morriss(1993):A three -dimensional analysis of javelin throwing technique. Journal of Sports Science 11, 315-328.
- (3)J.Campos, G.Brizuela, V.Ramon(2004):Three -dimensional kinematic analysis of elite javelin throwers at the 1999 IAAF World Championships in Athletics. New Studies in Athletics 2, 47-57.
- (4)金子靖仙, 佐藤文宣(1999):走動作の関節トルクの地面反力への変換. バイオメカニクス研究概論, 208-112
- (5)伊藤章, 村上雅俊, 田辺智(2006):やり投げの投射条件, 助走速度と記録の関係—第11回世界陸上競技選手大会決勝進出者と日本選手の測定結果. 陸上競技研究紀要 2, 159-161.
- (6)小池関也, 森洋人, 阿江通良(2006):多体系の運動方程式に基づく跳躍動作の動力学的分析. 日本機械学会ジョイント・シンポジウム 2006 講演論文集, 17-22.
- (7)前田正登ほか(1994):やり投におけるヤリに加わる力の測定. 体育学研究 39, 109-117.
- (8)前田正登(1996):やり投げにおけるヤリの飛行挙動. Japanese Journal of Sports Science 15(3), 207-213.
- (9)宮西智久ら(1996):野球の投球動作におけるボール速度に対する体幹および投球腕の貢献度に関

する3次元的研究. 体育学研究 41, 23-37.

(10)村上雅俊, 伊藤章(2003):やり投げのパフォーマンスと動作の関係. バイオメカニクス研究 7(2), 92-100.

(11)C.J.Morriss, R.M.Bartlett(1996):Biomechanical Factors Critical for Performance in the Men's Javelin Throw. Sports Med 21, 438-446.

(12)平島雅也, 大築立志(2005):ヒトの高速多関節運動における相互作用トルクの制御. バイオメカニクス研究 9(1), 18-25.

(13)広瀬茂男(2005):ロボット工学—機械システムのベクトル解析—(改訂版). 改訂第 17 版, 裳華房, 東京.

(14)堀田朋基(1988);バレーボールにおける上肢の動作の定量解析, Japanese J. Sports Sci., 7(4): 256-262

(15)橋原孝博(1988);バレーボールのスパイク技術に関する運動学的研究—高い打点で強く打撃するためのスイング動作として役立つ動き—, 広島大学体育学研究, 14:11-22

(16)内藤耕三, 丸山剛生(2006):野球の投球腕速度を生成する運動依存トルク解析のための3次元上肢動力学モデル. バイオメカニクス研究 10(3), 146-158.

(17)野友宏則, 富樫時子, 阿江通良(1998):記録水準の異なる選手のやり投動作に関するキネマティクスの研究. 陸上競技研究 32, 32-39.

(18)Putnam,C.A.(1991);A Segment interaction analysis of proximal-to-distal sequential segment motion patterns, MEDICINE AND SCIENCE IN SPORTS AND EXERCISE, 23(1):130-144

(19)Putnam CA(1993):Sequential motions of body segments in striking and throwing skills: descriptions and explanations. Journal of Biomechanics 26(suppl 1), 125-135.

(20)田内健二ほか(2006):砲丸投げにおける砲丸速度に対する身体各部位の貢献—世界レベル選手と日本レベル選手との比較—. 陸上競技研究紀要 2, 65-73.

(21)田内健二ほか(2007):日本一流男子円盤投げ選手の技術分析. 陸上競技研究紀要 3, 127-131.

(22)和田尚, 阿江通良, 遠藤俊郎, 田中幹保(2003);バレーボールのスパイク動作における体幹のひねりに関するバイオメカニクスの研究, バレーボール研究, 5(1):1-5

(23)A.セリンジャー, J.アッカーマンブルント(1993);セリンジャーのパワーバレーボール, ベースボールマガジン社, 東京