B16 振り子モデルに基づくハンマー投競技用アシストシステムの開発

Training aid system for hammer throw using pendulum model

○ 太田 憲 (国立スポーツ科学センター) 梅垣 浩二 (舞鶴工高専) 室伏 広治 (中京大)
小宮根 文子 (国立スポーツ科学センター) 桜井 伸二 (中京大)

Ken OHTA JISS, 3-15-1 Nishigaoka, Kita, Tokyo 115-0056
Koji UMEGAKI Maizuru National College of Technology
Koji MUROFUSHI Chukyo University
Ayako KOMINE Japan Institute of Sports Science (JISS)
Shinji SAKURAI Chukyo University

Dynamics-based force sensor using accelerometers which measures forces and joint torques has been developed. In this study we have applied this method to hammer throw training aid integrating small sensors, signal processing, short-range wireless transmission, data-logger and biofeedback training system. The purpose of this study was to establish methods for the measuring of rotational movement and the biofeedback training system for hammer throwers. Microelectromechanical systems accelerometers were chosen as the sensor platform capable of because they are noninvasive miniaturized devices and have wide bandwidth. In this system, a wireless data-logger was developed as a wearable device to replace cables and reduce constraint caused by wearing cables. The transmitted data were given as biofeedback information over a speaker through signal processing and voltage to frequency conversion.

Key word: Accelerometers, Biofeedback, Dynamics Model-based Sensor, Hammer, Training Aid

1 はじめに

スポーツバイオメカニクスの研究などによって様々な運動スキルに関する研究が行われているが、実際にそれらの研究成果を選手にわかりやすく伝達することは困難なことが多い。また、スキルトレーニングにおける選手に対する指導方法は様々であるが、言語による指導やビデオなどによって後から選手の運動のパフォーマンスを評価し指導することが多いが、選手とコーチの間で事前に獲得された情報や共通感覚を共有していない場合は、ときとしてその情報伝達が容易でない場合もある。

一方、古くから医療や心理学の分野では自律神経系等のトレーニングとしてバイオフィードバック法が用いられている^(1, 2)。一般にバイオフィードバック法とは、制御が困難な体温や脳波などの生理学的な指標を計測し、対象者にその情報をフィードバックして一般に困難な体内状態を制御する方法をさす。このようなフィードバック方法は、事前の知識共有も必要なく、バーチャルな感覚器官として作用することによって、アクションを起こしながら、無意識的に制御されている自律神経系等を意識的にトレーニングすることができる。

そこで著者らは、運動スキルに関連した無意識下の情報や直接感覚することのできない情報を、音や電気刺激などの情報に変換することによって、スポーツのスキル獲得のトレーニング方法としてのバイオフィードバック法を提案している。また、これまでバドミントン・ラケットに装着した加速度計を用いて計測した角速度情報をVF変換によって音の情報に変換し、運動を行いながら情報をリアルタイムでフィードバックし、バドミントンのスキルトレーニングに応用した⁽³⁾。しかし、この方法ではラケットの角速度情報をフィードバックしただけであった。そこで本研究では、スキルトレーニングにおける重要なのは運動のダイナミクスに関連する情報と考え、ダイナミクスを考慮した適切な情報をオンラインでフィードバックするトレーニング・ア

シストシステムを開発することを目標とする。このアシストシステムは、ダイナミクス計算に必要な運動学情報を計測する複数の加速度計を用いたセンサとワイヤレスデータロガーから構成される。この情報をオンラインで選手にバイオフィードバックすることによって、これがバーチャルな感覚器官として作用し、無意識的・感覚的な学習を可能として、効果的にトレーニングが作用する期待がある⁽⁴⁾。

そこで本研究では、適切にハンマーが加速しているかどうかをフィードバックするための、ハンマー投の回転の加速原理を数理モデルと実験から検討し、それを適用したハンマー投用のトレーニング・アシストシステムの開発について報告する。

2 バイオフィードバック・アシストシステム

ここでは、開発した加速度計を用いたハンマー投競技用の計測・トレーニングアシスト・システムの概要を示す。

2.1 計測原理

Fig. 1 Coordinate system

まず加速度計を用いた運動の計測方法の計測原理について述べる。Fig. 1に示したように、基準座標系 Σ_{xyz} から見た移動物体（ここではハンマー）に固定された移動座標系 Σ_* の原点の位置ベクトルを p^* とし、移動座標系 Σ_* に固定さ

れた点 L の位置ベクトルを l^* とする。このとき、点 L の加速度 a^* は

$$a_L^* = \ddot{p}^* + g^* + \dot{\omega}^* \times l^* + \omega^* \times (\omega^* \times l^*) \quad (1)$$

となる。ここで、 g は重力加速度、 ω は移動物体の角速度であり、記号 $*$ は移動座標系で表現されていることを示す。いま、移動座標系 Σ_* の z^* 軸上に3軸加速度計 A_1, A_2 を平行に配置する。ここで、並進加速度成分 $\ddot{p}^*$ と重力加速度 g^* は、平行に配置された A_1, A_2 に共に等しく検出されるので、 A_1, A_2 に検出される各加速度 a_1^*, a_2^* の差は

$$a_{12}^* \equiv a_2^* - a_1^* = \dot{\omega}^* \times l_{12}^* + \omega^* \times (\omega^* \times l_{12}^*) \quad (2)$$

となる。ここで、 l_{12}^* は加速度計 A_1 から A_2 への位置ベクトルである。たとえば、Fig. 1のように z^* 軸上に3軸加速度計 A_1, A_2 を平行に配置し、 A_1, A_2 間の距離を d とし、移動座標系 Σ_* で表現した移動物体の角速度ベクトル ω^* の成分を $[\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ とした場合、Eq. (2)の成分は、

$$a_{12}^* = d \begin{bmatrix} \omega_z \omega_x + \dot{\omega}_y \\ \omega_y \omega_z - \dot{\omega}_x \\ -(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \quad (3)$$

のように、間隔 d に比例した遠心加速度と角加速度になる。したがって、各座標軸上にある平行な2個の加速度計の差をとることによって、移動物体の加速度の回転運動成分を取り出せる。

なお、Eq. (1)とEq. (2)から、並進加速度と重力加速度の和 $\ddot{p}^* + g^*$ も計測でき、これらの運動学データと、運動方程式の質量・慣性モーメントなどの物理パラメータや幾何学パラメータと併せて動力学計算を可能とする。またこの計測方法によって得られる運動学データは微分演算などを含まず、簡単な代数演算から計算され、かつ、動力学計算に必要な形式^{*1}で直接運動学データを計測できることから、動力学計算に適した計測方法といえる。そこで、このような複数の加速度計を用いたセンサを、我々はダイナミクスモデルベースの力覚センサと呼び⁽⁴⁾、運動中のそれらのオンライン計測が可能となれば、逆動力学に基づいたバイオフィードバックのみならず、順動力学によるダイナミック・シミュレーションや、ゲーム機器などへの様々な応用が期待される。

2.2 ハンマー投用センサ基板

Fig. 1に示すように、ハンマーのワイヤと移動座標系 Σ_* の z^* 軸を一致させ、3軸加速度計 A_1, A_2 を z^* 軸上に配置する。ハンマー投運動の場合、投擲中の ω_z は小さく、

$$a_{12}^* \approx d \begin{bmatrix} \dot{\omega}_y \\ -\dot{\omega}_x \\ -(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

と近似でき、このような物体の長軸回りの回転が少ない場合は、それ以外の軸に加速度計を装着することを省略することができる。また、ワイヤ軸上の任意の点 e の加速度 $\ddot{a}_e$ は

$$\ddot{a}_e = a_1 + l_{1e}^* a_{12}^* \quad (5)$$

から推定することが可能である。ここで、 l_{1e}^* は z^* 軸方向を正とした加速度計 A_1 から点 e までの距離である。

Fig. 2に示したように、センサ用基板には、MEMS加速度計を2個（アナログデバイセズ社：ADXL278（50G） z^*

軸、STMicroelectronics社：LIS3L06AL（2G） $x^* y^*$ 軸）から構成される3軸加速度計を配置し、その加速度計間の距離 d を100mmとした。Eq. (4)から、 x^* 軸と y^* 軸方向のペアの加速度計から角加速度が、同様に z^* 軸方向のペアの加速度計から遠心加速度が計測可能となる。

Fig. 2 Measurement system

2.3 無線データロガーとバイオフィードバックシステム

Fig. 3 Schematic illustration of biofeedback system

ケーブルなどの拘束を少なくするために、アローセブン社と共同開発した小型無線データロガー（大きさ100×70×55 mm, max 1kHz, 12bit, 12ch）に加速度計を接続する（Fig. 2参照）。無線データロガーの搭載した2.4GHz帯の無線機能を利用して、PCにオンラインでデータを送信する。データ送受信等の命令には、PCから無線またはUSBを経由したシリアル通信を用いる。加速度計を搭載した基板はハンマーワイヤ部に固定され、データロガーとケーブルで接続される。PCで受信した加速度信号は、Eq. (4)に基づいて角速度と角加速度に分離され、その情報をオンラインで音の信号に変換し、選手にバイオフィードバックする（Fig.3）。なお、小型無線データロガーにはメモリも内蔵され、無線またはUSBを経由してデータをオフラインで転送することも可能である。

3 実験

3.1 実験方法

Fig. 4に実験の風景を示す。投擲時のハンマーの運動を詳細に計測するため、モーションキャプチャシステム（Oxford Metrics社、光学式動作解析システムVicon、カメラ12台、120Hz）と開発したハンマー投用センサと無線

^{*1} たとえば $\omega_x \omega_y, (\omega_x^2 + \omega_y^2), (\ddot{p} + g)$ のように。

Fig. 4 Experimental setup

データロガーを用いてハンマー投擲実験を行った。ハンマー各部に反射マーカを6個（ハンマーヘッド部3個、ワイヤー部3個）装着し、モーションキャプチャシステムでハンマーの運動を計測した。また、加速度計を実装したセンサ基板をハンマーワイヤー部に装着し、投擲者の腰部に装着したワイヤレスデータロガーに200Hzで記録した。センサ基板とデータロガーはケーブルで接続されているが、リリース時にコネクタ部で切断される。また、計測中同じ2.4GHz帯の無線によって、無線データロガーとモーションキャプチャシステムのAD変換器に同時にパルス信号を送信し（誤差 μ sec以内）、同期を行った。

実験では、大学陸上部のハンマー投擲競技者4名（男子3名、女子1名、競技歴3～6年）とアジア男子記録保持者1名（競技歴18年）の計5名の被験者が、室内の陸上競技実験場内の緩衝用カーテンに向かって投擲を行った。

3.2 実験結果：ハンマーの角速度と角加速度

Fig. 5 Comparison of angular velocity and angular acceleration of hammer

計測した運動中のハンマーの角速度と角加速度の一例をFig. 5に示す。実線は加速度計から計測した角速度(a)と角

加速度(b)を、破線はモーションキャプチャによって計測したそれぞれを示す。このことから、加速度計から計測した角速度と角加速度がほぼ一致していることがわかる。また、同様に加速度計とジャイロから計測した角速度と角加速度の比較からも、同様に一致した計測値が得られていることから(4)、加速度計を用いた計測方法の妥当性を示している。

またこの実験結果から、ハンマーは両足が接地している両足期に加速し、片足期に減速し、角加速度の正負の変動を繰り返しながら、全体的に角速度が振動的に増加していることが確認できる(5)。熟練者のハンマーの運動の瞬間回転中心が大きく変動しないことから、運動はほぼ回転運動から構成されていると考えることができ、回転のエネルギーを蓄えていくことが重要と考えられる。

4 ハンマーの加速原理の考察

4.1 1自由度振子モデル

Fig. 6 Hammer model

選手に与えるフィードバック情報を検討するために、ハンマーの運動をモデル化する。Fig.6に示すような、1自由度振子モデルを考え、単純化のためハンマーは角度 α で傾いた平面内を運動していると仮定する。Fig.6bはこの平面内のハンマーの位置関係を示したもので、この平面内の xy 座標で定義された基準座標系 Σ_{xy} を定義する。ハンマーワイヤーは質量を無視した伸縮のないワイヤーで、ハンマーヘッドは質量 m の質点とする。ハンマーのハンドル部分からハンマーヘッドまでの距離を l とし、ハンマーと x 軸のなす角度を q とする。またハンドルの位置ベクトルを $\mathbf{p} = [x_0, y_0]^T$ とし、ハンドル部分は加速度 $\ddot{\mathbf{p}}$ で運動する。

以上の条件の下での、ハンマーの振子型モデルを考える。ハンマーヘッドの位置ベクトル $\mathbf{X}$ は、

$$\mathbf{X} = \mathbf{p} + l\mathbf{e}_l \quad (6)$$

その速度は

$$\dot{\mathbf{X}} = \dot{\mathbf{p}} + l\dot{q}\mathbf{e}_q \quad (7)$$

となる。ここで $\mathbf{e}_l = [\cos q, \sin q]^T$, $\mathbf{e}_q = [-\sin q, \cos q]^T$ は、各法線、接線方向の単位ベクトルである。このときの運動エネルギー T とポテンシャルエネルギー U は

$$T = \frac{1}{2}m\dot{\mathbf{X}}^T\dot{\mathbf{X}} \quad (8)$$

$$= \frac{1}{2}m(\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 + l^2\dot{q}^2 + 2l\dot{q}\mathbf{e}_q^T\dot{\mathbf{p}}) \quad (9)$$

$$U = mgs\sin\alpha(y_0 + l\sin q) \equiv mg\alpha(y_0 + l\sin q) \quad (10)$$

となり、上式をラグランジュの運動方程式

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}}\right) - \frac{\partial L}{\partial q} = 0 \quad (11)$$

に入れ、

$$ml\ddot{q} = -me_q^T(\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{g}_\alpha) \quad (12)$$

を得る。ここで、 $L = T - U$ 、 $\mathbf{g}_\alpha = [0, g_\alpha]^T$ である。この式より、ワイヤーに直交する e_q 方向の加速度がハンマーの回転の加速度を左右する条件であることを示しており、この回転方向だけに着目すれば、符号よりハンマーヘッドと反対方向に加速度を与えることが条件となることがわかる。

運動方程式から確認したこの加速条件を、実際のハンマーの運動で確認する。Fig. 7にEq. (12)における、ハンマーヘッドの加速度の接線方向成分 $l\ddot{q}$ と、ハンマーハンドル部の反対方向の加速度 $e_q^T(\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{g}_\alpha)$ 比較した。ここでハンマーヘッドの加速度は加速度計から計測し、ハンドル部の加速度はモーションキャプチャ・システムから計測した値を用いている。この図からも、回転方向のハンマーヘッドの加速が、ハンドル部の接線方向の加速度に依存していることがわかる。

次に、ハンマーの加速条件をエネルギーレベルで考察する。

Fig. 7 Acceleration for rotational movement

4.2 加速条件1：力学的エネルギー

ハンマーヘッドの運動エネルギー T とポテンシャルエネルギー U の和

$$E_M = T + U \quad (13)$$

を微分し、Eq. (12)を考慮して、

$$\dot{E}_M = F_l v_l \quad (14)$$

を得る。ここで

$$F_l \equiv me_l^T(\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{g}_\alpha) - ml\dot{q}^2 \quad (15)$$

$$v_l \equiv e_l^T \dot{\mathbf{p}} \quad (16)$$

である。これより、全力学的エネルギーを考慮してハンマーを加速するためには $\dot{E}_M$ を最大化することが必要とわかるが、Fig. 6bにも示したように、 $\dot{E}_M$ を構成する F_l はハンマーの法線方向の加速力を、 v_l は法線方向の速度を意味し、これらの積である法線方向のパワーがハンマーヘッドの加速条件となっている。

実際のハンマーの運動では、Eq. (15)の遠心力 $ml\dot{q}^2$ が大きいため、ハンマーの力学的エネルギーを増加させるためには、 e_l の逆方向の力と速度を与えること、すなわちハンドル方向に引っ張ることが必要となる。

また、この条件1を考慮した加速度信号によるフィードバック方法を実現する場合、 F_l と v_l を計測する必要がある、これはEq. (5)を用いて推定するハンドル部の法線方向

の加速度と質量 m の積が F_l に相当し、ハンマー用センサによって力 F_l を計算することが可能であることがわかる。ただし、ハンマーハンドル部分の法線方向速度 v_l は加速度計から単純に推定することができないため、今後の課題である。

4.3 加速条件2：回転運動エネルギー

ハンマーの運動のほとんどが回転運動から構成されるため、回転の運動エネルギーだけを加速の条件として考慮することもできる。同様に、ハンマーヘッドの回転の運動エネルギー

$$E_R = \frac{1}{2}ml^2\dot{q}^2 \quad (17)$$

を微分し、Eq. (12)を考慮して、

$$\dot{E}_R = F_q v_q \quad (18)$$

を得る。ここで

$$F_q \equiv ml\ddot{q} = -me_q^T(\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{g}_\alpha) \quad (19)$$

$$v_q \equiv l\dot{q} \quad (20)$$

であり、Fig. 6bに示したように、 F_q はハンマーの接線方向の加速力を、 v_q は接線方向の速度を意味し、これらの積である接線方向のパワーがハンマーヘッドの加速条件となっている。なお、ハンマーの角速度の変化が滑らかで大きな変化がなく、ハンマーの制御がハンドル部分で行われると仮定すると、 $\dot{E}_R$ の最大化のためには、 F_q の最大化、すなわちハンドル部分の接線方向の加速度成分の最大化が、考慮すべき加速条件となる。

また、この条件2を考慮した加速度信号によるフィードバック方法を実現する場合、 F_q すなわち、 $\ddot{q}$ もしくは $\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{g}_\alpha$ を計測する必要があるが、第2.2節で述べたように、センサから計測される、Eq. (4)の $\dot{\omega}_x$ と $\dot{\omega}_y$ の合ベクトルが $\ddot{q}$ に相当し、Eq. (5)を用いて推定するハンドル部の加速度が $\ddot{\mathbf{p}} + \mathbf{g}_\alpha$ に相当し、加速条件2を計算するための運動学データがハンマー用センサで計測可能であることがわかる。

4.4 ハンマーのエネルギー変化

Fig. 8 Comparison of power for hammer movement

Fig. 8に、投擲中のハンマーのエネルギー変化率を示した。ここで、 $\dot{E}_M$ は力学的エネルギー全体の変化率を、 $\dot{E}_R$ は回転エネルギーだけの変化率を示している。実際のハンマーの運動では、ハンドル部分も比較的大きな速度を持つことから、Eq. (14)とEq. (18)に違いが生じており、主としてこれは法線方向の腕からハンマーへのエネルギー伝達による影響といえる。

前述したように、加速条件2でフィードバックする場合は、センサ基板の加速度計の情報だけからのフィードバックが可能となるが、加速条件1でフィードバックする場合、ハンドル部の速度 v_l を何らかの方法で計測する必要があり、2リンク機構モデルを考えるなどして、さらなるフィードバック方法の検討が必要となる。

なお、ハンマーを加速する条件をエネルギーレベルで考察すると、回転の運動エネルギー E_R は力学的エネルギー E_M に含まれる。しかし、力ベクトルと速度ベクトルの内積であるエネルギー変化率（パワー）レベルで比較すると、 $\dot{E}_R$ を構成する F_q と v_q は接線方向のベクトルから、また $\dot{E}_M$ を構成する F_l と v_l は法線方向のベクトルから構成されて、これらの向きは直交している。両者の関係は独立ではないが、ハンマーの回転エネルギーを増加させるためにはハンドル部に接線方向と逆向きの加速度を、全力学的エネルギーを増大させるにはハンドル部をワイヤ軸方向に引っ張る方向に加速度を与えることが条件となり、両方の情報をフィードバックする方法も検討すべきである。投擲中のハンドル部の各加速度成分をFig. 9に示した。これまで述べてきたように、接線方向では加減速を繰り返しているが、ワイヤ軸方向ではハンドルを身体の方方向にほぼ一定の加速度で引っ張り続けていて、ハンマーの曲率半径も次第に短くなっている⁽⁶⁾。

Fig. 9 Accelerations of hammer handle

5 おわりに

ハンマー投擲競技では、選手はハンマーワイヤー部に作用する張力を直接感じることができるが、遠心力（角速度の二乗）が大半を占め、ハンマーの加速の程度を示す角加速度の情報が埋もれてしまい感じることができず、努力感の割にはハンマーが効率よく加速していないなどの問題が生じる。そこで本研究では、ハンマーを効率よく回転させるための学習やトレーニングをアシストする道具として、加速度計をベースにした力覚センサを開発した。このセンサ基板はハンマーワイヤー軸上の任意の場所に装着し、ワイヤー軸上の任意の加速度信号を推定することを可能としている。また、ハンマーに作用する角加速度や遠心加速度、また並進の加速度なども分離することができ、これらの情報はダイナミクス計算に適しているという特徴がある。すなわち、オンラインで運動中の身体や道具に作用する内力やトルクを計測するためのダイナミクスモデルベースの力覚センサとして機能するが、ここでは、無線データロガーとあわせて利用し、バイオフィードバックによるトレーニングアシストシステムを開発した。また、運動中のそれらのオンライン計測が可能であるので、動力学計算に必要なすべ

ての運動学データが加速度計から計測することができ、動力学モデルを介在させて、ダイナミック・シミュレーションのための入力デバイスなど様々な応用が期待される。

一般に、回転運動を計測するセンサとしてジャイロが存在するが、スポーツのような高速な運動を計測することが困難である。また、ジャイロの信号から角加速度を算出する場合、微分の数値演算によるノイズが生じる。一方、本研究で用いた計測方法では加速度計の差の信号を用いていることにより、微小振動などのノイズをキャンセルする特徴から、高精度な角速度と角加速度の同時計測を可能としている^(7, 8)。

現在1リンク機構を用いて考察を行っているが、今後は、腕のリンクを考慮した2重振りモデルや、最適制御問題などから、より適切なフィードバック情報を検討していく。また、現在、音情報を用いてフィードバックする機構を採用しているが、試験を繰り返すことによって、選手にとって学習しやすい方法方法をさらに検討していきたい。特にFES（機能的電気刺激）法など直接筋肉を刺激する方法の検討も行う予定である。

参考文献

- (1) 西村千秋. バイオフィードバック. *BME*, Vol. 2, pp. 618–625, 1988.
- (2) 西村千秋. バイオフィードバックにおける訓練過程の数理モデル. バイオフィードバック研究, Vol. 21, pp. 14–21, 1994.
- (3) 太田憲; 小林一敏; 土居陽治郎. 加速度信号による運動の分析方法. 日本機械学会スポーツ工学シンポジウム 1990 講演論文集, pp. 26–29, 1990.
- (4) Ken Ohta, Koji Umegaki, Koji Murofushi, Ayako Komine, and Chikara Miyaji. *Dynamics-Based Force Sensor Using Accelerometers -Application of Hammer Throw Training Aid-*, Vol. 1 of *The Engineering of Sports* 7, pp. 207–213. Springer, Paris, 2008.
- (5) Koji Murofushi, Shinji Sakurai, Koji Umegaki, and Junji Takamats. Hammer acceleration due to thrower and hammer movement patterns. *Sports Biomechanics*, Vol. 6, No. 3, pp. 301 – 314, 2007.
- (6) Koji Murofushi, Shinji Sakurai, Koji Umegaki, and Kazutoshi Kobayashi. Development of a system to measure radius of curvature and speed of hammer head during turns in hammer throw. *International Journal of Sport and Health Science*, Vol. 3, pp. 116–128, 205.
- (7) 太田憲; 小林一敏. 加速度計を用いたスポーツにおける角速度・角加速度計測. 計測自動制御学会論文集, Vol. 30, No. 12, pp. 1442–1448, 1994.
- (8) 太田憲; 小林一敏. 拡張カルマンフィルタを用いたスポーツにおける角速度・角加速度計測. 計測自動制御学会論文集, Vol. 31, No. 9, pp. 1265–1272, 1995.