

加速度計を用いた バイオフィードバック用センサシステムの開発

国立スポーツ科学センター 太田 憲
(共同研究者) 同 宮地 力

Biofeedback Training System Using Accelerometers - Application of Hammer Throw Training Aid

by

Ken Ohta, Chikara Miyaji
*Department of Sports Information,
Japan Institute of Sports Science*

ABSTRACT

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, wearable 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 of hammer throwing players in training. Microelectromechanical systems (MEMS) accelerometers were chosen as the sensor platform because they are unobtrusive, 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.

要 旨

一般に身体に直接センサを埋め込むことが困難なため、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ことは困難である。そこで、それらを計測するために、複数の加速度計を用いたダイナミクスモデルベースの力覚センサの開発を行っている。運動中のそれらのオンライン計測が可能となれば、ダイナミック・シミュレーションの入力デバイスなど様々な応用が期待される。本研究ではスポーツなどの身体運動のスキルを獲得する目的のトレーニングにおいて、有益な情報をバイオ・フィードバックするセンサシステムとして、加速度計を用いたハンマー投げ競技用の計測システムを開発した。

このシステムは、ハンマーに装着されるセンサ部、ウェアラブルで無線機能を有するデータロガー、信号処理し音に変換するバイオフィードバック・システムから構成される。センサ部は複数の加速度計から構成され、動力学計算に適した運動学データを計測する。ここでは、ハンマー競技へのバイオフィードバックを考慮し、回転力(角加速度)の計測を中心に行った。無線データロガーは選手のケーブルによる負担を軽減し、さらにオンラインでのフィードバックを可能とする。

一般に、スキル・トレーニングにおいて重要な情報は運動のダイナミクスに関連することが多く、これを適切に抽出し、選手にオンラインでフィードバックすることが重要である。本研究で開発した装置は複数の加速度計を組み合わせるダイナミクスの計算に必要な運動学情報を計測し、オンラインで選手にバイオフィードバックする点に特徴があり、これがバーチャルな感覚器官としてトレーニング時に効果的に作用する期待がある。

はじめに

身体運動やスポーツ運動のモニタリングや運動

計測する目的に、加速度計を用いた研究は多い。しかしながら、これらの研究のほとんどは、加速度信号から歩数¹⁾や消費エネルギー^{2,3,4,5,6,7,8,9)}などの計測や、運動中の衝撃加速度の計測^{10,11)}の目的で加速度計を利用しており、身体運動の精密な計測には至っていない。

ところが衝撃や振動の少ない自由に運動する身体運動を行っている際に、身体や道具に加速度計を装着する場合、加速度計から計測される信号には、並進や回転運動成分が混在し、単に加速度計を装着するだけでは、それらが混在し何を計測しているかわからないという問題がある。このため、並進加速度や回転運動を分離して計測する研究は少なく、複数の加速度計を用いた遠心加速度の計測^{12,13)}、角加速度を計測する方法¹⁴⁾にとどまっている。そこでわれわれは角速度と角加速度の同時計測^{15,16)}、関節トルクと内力推定などの動力学計算のための運動学データの計測方法^{17,18,19)}を開発してきた。この加速度計を用いた計測方法は、単に並進運動と回転運動を加速度レベルで分離できるばかりでなく、動力学計算に直結した加速度成分として計測するので、関節トルクなどの計測をリアルタイムで行うことができる。すなわち、動力学計算に必要な運動学データの計測を複数の加速度計を用いて行い、動力学モデルと共に用いることによって、力覚センサとして機能する。力やトルクを計測するために、身体内部に力覚センサを埋め込むことは非現実的であるが、加速度計を用いればリアルタイムでこれらを計測することができ、力覚センサとして利用が可能のため、様々な応用が期待される。

そこで本研究では、この力覚センサをオンラインで利用できる特徴を活用し、身体運動計測用のセンサシステムを作製し、それを用いたトレーニングや運動学習のためのバイオフィードバックシステムを開発する。力覚情報は運動のスキルに密接に関係しているために、単に位置や速度の情報

をフィードバックするよりも、スキル・トレーニングの情報として有効に作用する期待がある。そこで、スキル・トレーニングの現場で音や筋への電気刺激などの信号を直接感覚信号へバイオフィードバックすることによって、トレーニング効果を高めるのが本研究の目的である。このバイオフィードバックシステムでは、運動後にデータを解析しデータを表示することによってフィードバックするのではなく、運動をしながらオンラインで直接感覚に訴えながら練習するところに特徴がある。

この目的を実現するために、センサによるオンライン計測と無線化が必要となる。特にMEMS技術の発展により加速度計は超小型化され、複数の加速度計を用いても大きさや質量が気にならない程度になっている。また、Bluetoothなどの無線技術も発展し、これらの技術によって選手の負担にならないウェアラブルな計測環境が実現可能となってきた。このような小型化・無線化されたシステムは、スポーツのみならず、教育の現場、日常の運動、リハビリテーションの現場などの技術にも適用できる。

本研究では、はじめにハンマー投げの運動を分析し、ハンマー投げ競技のトレーニングにおいて、どのような情報をフィードバックするかを考察する。その次に、その情報をフィードバックするためのセンサシステムとその計測方法について述べ、選手の負担を少しでも減らすために開発した無線データロガーと、選手にバイオフィードバックするシステムについて概説する。

1. ハンマーの運動

ハンマーヘッドの軌跡がおおよそ平面内にあると仮定し、瞬間回転中心を原点とした極座標表現 (r, θ) によるハンマーの運動方程式は

$$m\ddot{r} = mr\dot{\theta}^2 + f_r \quad (1)$$

$$mr\ddot{\theta} = -2m\dot{r}\dot{\theta} + f_\theta \quad (2)$$

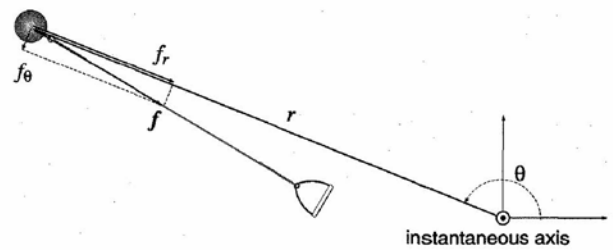


図1 Polar coordinate system

と表される (図1参照)。ここで、 f_r, f_θ はハンマーに作用する張力 f の r と θ 方向成分である。ただし、運動中 r 方向とワイヤー軸方向は一致せず、加減速に応じて r 方向は少しだけずれ、ハンマーの回転を加速する条件は、コリオリ力と張力の θ 方向成分 f_θ となる。この運動方程式からもわかるように、ハンマーに作用する外力はワイヤーに作用する張力だけで、ハンマーの運動は基本的に質点運動と考えることができ、運動計測や運動のモデル化が容易となる。また、ハンドル部にはトルクが作用しないので、ハンマーの加速はコリオリ力とわずかな張力の θ 成分から得られるので、手等によって直接トルクを与えることができるバットやラケットなどの運動と比べてもその角加速度は小さく、ゆっくりと加速することしかできないことが理解できる。

運動中のハンマーの角速度と角加速度の一例を図2に示す。ハンマーは両足が接地している間加速し、片足期に減速し、このような角加速度の正負の変動を繰り返しながら、全体的に角速度が増加している^{12, 20)}。熟練者のハンマーの運動の瞬

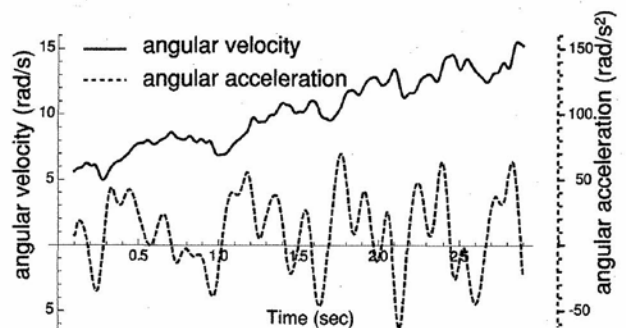


図2 Angular velocity and angular acceleration of hammer

間回転中心が大きく変動しないことから、ハンマーの角加速度を加速期にできるだけ増加し、減速期の低下を抑えることが、ハンマー投げ競技のスキルとして重要である。

また、ハンマーの加速成分であるコリオリ力と張力 θ 成分は、それらは物理的に相互作用し、運動中どちらも複雑に変化し、どちらの貢献が大きいとは言えない。したがって、選手には総和である角加速度情報を運動中にフィードバックする方法が有効と考えられる。次節以降では、角加速度を加速度計から計測し、オンラインで選手にフィードバックするシステムについて述べる。

2. 計測システムの開発

2.1 計測原理

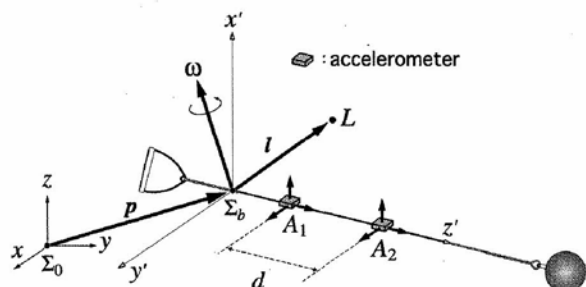


図3 Coordinate system

図3に示したように、基準座標系 Σ_0 の原点から見た物体に固定された移動座標系 Σ_b の原点の位置ベクトルを p とし、移動座標系 Σ_b 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

$$a = \ddot{p} - g + \dot{\omega} \times l + \omega \times (\omega \times l) \quad (3)$$

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る。いま、移動座標系 Σ_b 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 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

$$a_{12} \equiv a_2 - a_1 = \dot{\omega} \times l_{12} + \omega \times (\omega \times l_{12}) \quad (4)$$

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、図3の 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_b で表現した移動物体の角速度ベクトルを $[\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ とした場合、

式(4)の成分は、

$$a_{12} = d \begin{bmatrix} \omega_z \omega_x + \dot{\omega}_y \\ \omega_y \omega_z - \dot{\omega}_x \\ -(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \quad (5)$$

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、同時に式(3)から、並進加速度と重力加速度も分離でき、動力学計算に必要な運動学成分が計測可能となる。

2.2 ハンマー投げ用センサ

図3に示すように、ハンマーのワイヤと移動座標系 Σ_b 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。いま、センサはハンマーワイヤ軸と z' 軸を一致するように配置しているの、厳密には加速度計から計測される角速度 ω と前節の瞬間回転軸回りの角速度は一致しないが、瞬間回転中心とハンマーヘッドを結ぶ直線と、ワイヤがなす角度は小さく、それらはほぼ等しい。また、ハンマー投げ運動の場合、 ω_z は小さく、 $\|\omega_z \ \omega_x\| \ll \|\omega_y\|, \|\omega_y \ \omega_z\| \ll \|\omega_x\|$ なので、

$$a_{12} = d \begin{bmatrix} \dot{\omega}_y \\ -\dot{\omega}_x \\ -(\omega_x^2 + \omega_y^2) \end{bmatrix} \quad (6)$$

と近似できる。このように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。

図4に示したように、2種類の2軸MEMS加速度計（アナログデバイセズ社：ADXL278（50G） z' 軸、STMicroelectronics社：LIS3L06AL（2/6G） x', y' 軸）を用いて3軸加速度計を構成し、加速度

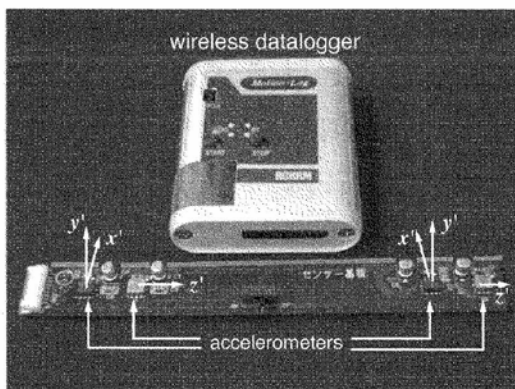


図4 Measurement system

計間の距離 d を 100mm となるように 17×140 mm の大きさの基板の上に配置した。式 (6) から、 x 軸と y 軸方向のペアの加速度計からハンマーワイヤの角加速度が、同様に z 軸方向のペアの加速度計から遠心加速度を計測する。

2. 3 無線データロガー

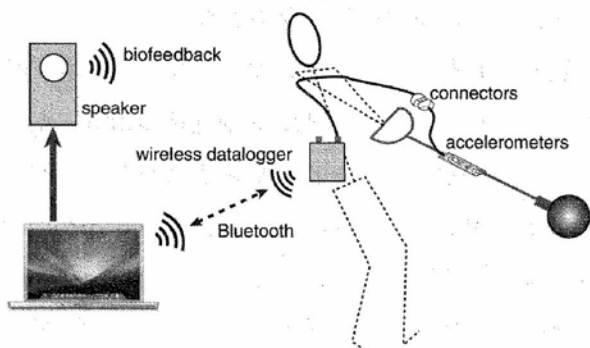


図5 Schematic illustration of biofeedback system

ケーブルなどの拘束を少なくするために、ローム理研社と共同開発したウェアラブルな小型無線データロガー (大きさ $65 \times 75 \times 22$ mm, max 400Hz, 12bit, 7ch) に加速度計を接続する (図4参照)。無線データロガーには充電式電池が内蔵され、加速度計への電源 (3.3V) はデータロガーから供給される。無線データロガーのプロセッサには ADUC812 を使い、あわせて搭載した Class1 の Bluetooth のシリアル通信機能を利用して、PC にオンラインでデータを送信する。加速度計を搭載した基板はハンマーワイヤー部に固定され、リリース時にはセンサ基板とデータロガー部を接続

するコネクタ部分から分離する。PC で受信した加速度信号は、式 (6) に基づいて角速度と角加速度に分離されるが、そのうち角加速度信号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 (図5)。なお、小型無線データロガーには MMC メモリ (256MB) も内蔵され、オフラインでデータを転送することも可能である。

2. 4 バイオフィードバック・システム

計測された角加速度信号は電圧一周波数 (VF) 変換され、スピーカーを通して選手にオンラインでフィードバックされる。シリアル通信によって得られた信号はフィルタによって平滑化され、下記のルールに従い、音信号に変換される。

$$\tilde{\Omega}' = \begin{cases} \Omega' + H & (\Omega' \geq 0 \text{ のとき}) \\ \Omega' + H - h & (\text{それ以外の場合}) \end{cases}$$

ここで、 Ω' は角加速度ベクトルの大きさであり、

$$\Omega' = \sqrt{\dot{\omega}_x^2 + \dot{\omega}_y^2} \quad (7)$$

のように表されるが、総和の角加速度ベクトルの符号は ω_x と ω_y の符号から判断する。このとき、角加速度信号の大きさ $\|\Omega'\|$ を考慮し、 $H \geq \|\Omega'\|$ となるように、十分大きな定数 H を設定し、 Ω' が負の信号とならないようにする。また、角加速度が正と負で切り替わったときに明瞭に異なる周波数の音として判断できるように、 H と比較し小さな定数 h を適切に設定する。こうして変換された角加速度 $\tilde{\Omega}'$ は電圧一周波数 (VF) 変換され、スピーカーを通して選手にオンラインでフィードバックされる。なお、これらの信号処理は PC 内のソフトウェアで行われる。

3. 計測システムの性能評価

本システムの計測性能をテストするため、MEMS 加速度計によって計測した角加速度と、小型ジャイロセンサによって計測した角加速度を

比較した。

3. 1 実験方法

ハンマーワイヤ軸上に、図4の加速度計を図3と同様に配置し、 ω_x , ω_y を計測する2個の小型ジャイロセンサ（村田製作所：圧電振動ジャイロ）を加速度計付近に装着し同時に計測した。被験者はセンサを装着したハンマーを数回転まわした。ただし、実験では投てきは行わず、ハンマーを保持したまま回転した。各加速度計信号はデータロガーを経由してPCに保存された。このときサンプリング周波数を400Hzとした。

3. 2 実験結果

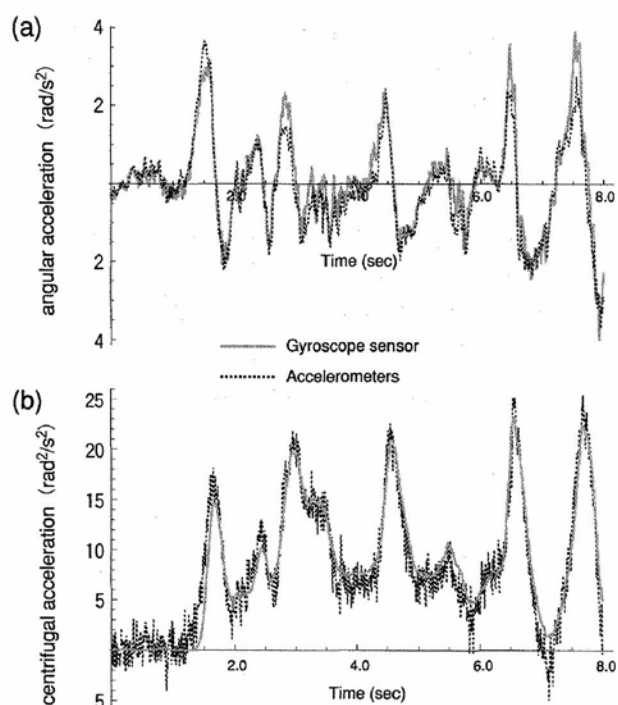


図6 Comparison of (a) angular acceleration and (b) centrifugal acceleration

図6に、式(6)によって計測された(a)角加速度の一成分と、(b)遠心加速度 $\omega_x^2 + \omega_y^2$ を示した。それぞれの図には、ジャイロセンサによって計測した角加速度と遠心加速度も合わせて示した。なお、ジャイロセンサから角加速度を算出する場合は、その数値微分した信号を用いた。ジャイロで計測した各角加速度と遠心加速度は、加速度計

によって計測したそれらとほぼ一致している。

以上の結果より、本実験は標準的なハンマー投げ運動よりもゆっくりとした運動であるが、十分な計測精度が得られている。一般に角加速度信号が大きいほど、2つの加速度計の差の信号は大きくなり、計測精度が向上する。本計測システムを用いてトップアスリートのハンマー投げの運動でも十分な計測精度が得られることが期待される。

4. まとめ

本研究では、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に、複数の加速度計を用いたダイナミクスモデルベースの力覚センサの開発の一環として、ハンマー投げ競技用センサと無線データロガーによるバイオフィードバック・システムを開発した。

ハンマーの運動において、角加速度は運動の入力であり、遠心力は角速度の二乗に比例し運動の出力を反映している。オンラインのバイオフィードバックを行う情報として、角速度は角加速度の積分であり位相遅れが生じる点からも適切ではない。また、ハンマー投げ競技では、選手はハンマー・ワイヤ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ない。練習時に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ため、角加速度情報を抽出しフィードバックするシステムを開発した。

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、加速度計は二つの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効果などがあり、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^{15,16)}。

本研究では複数の加速度計から、回転運動成分だけを利用したが、同じ加速度計から並進加速度と重力加速度も計測することが可能である。したがって、運動中のそれらのオンライン計測が可能となれば、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。

また、単に計測された加速度信号をフィードバックするのではなく、ハンマー投げ競技をモデル化し分析し、物理モデルを介してトレーニングにおいて重要な情報が何であるかを分析し、その情報をフィードバックするために、適切に複数の加速度計を配置して計測しているところに本研究の特徴がある。ハンマーの運動に着目すると、ハンマーには外力としてトルクが作用せず、質点モデルとして考えることができ、モデル化や計測が比較的容易であった。

今後は、映像と同期して表示し、運動直後に運動を解析するシステムを開発する。また、より複雑な回転運動のともなう運動を取り上げ、例えばラケットやバットなどに加速度計を装着して、オンラインで関節トルクを計測するシステムを開発する予定である。

謝 辞

本研究に対して助成をいただいた、(財)石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼を申し上げます。また、本研究に助言をいただいた、梅垣浩二氏(舞鶴工業高等専門学校)、室伏広治氏(中京大学大学院)に御礼申し上げます。

文 献

1) 関根他, 高齢者における杖歩行時の歩数計測法の開発, デサントスポーツ科学, 27, 155-161 (2007)

- 2) A. J. Wixted, D. V. Thiel, A. G. Hahn, C. J. Gore, D. B. Pyne, and D. A. James, Measurement of Energy Expenditure in Elite Athletes Using MEMS-Based Triaxial Accelerometers, *IEEE Sensors J.*, 7, 481-488 (2007)
- 3) J. B. Reswick, J. Perry, and D. Antonelli, Preliminary Evaluation of the Vertical Acceleration Gait Analyser (VAGA), in Proc. 6th Annu. Symp. External Control Human Extremities, Dubrovnik, Yugoslavia, 305-314 (1978)
- 4) H. J. Montoye, R. Washburn, S. Servais, A. Ertl, J. G. Webster, F. J. Nagle, Estimation of Energy Expenditure by a Portable Accelerometer, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 15, 403-407 (1983)
- 5) G. A. King, N. Torres, C. Potter, T. J. Brooks, and K. J. Coleman, Comparison of Activity Monitors to Estimate Energy Cost of Treadmill Exercise, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36, 1244-1251 (2004)
- 6) A. Yngve, A. Nilsson, M. Sjostrom, and U. Ekelund, Effect of Monitor Placement and of Activity Setting on the MTI Accelerometer Output, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 35, 320-326 (2003)
- 7) S. M. Powell, D. I. Jones, and A. V. Rowlands, Technical Variability of the RT3 Accelerometer, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 35, 1773-1778 (2003)
- 8) S. M. Powell and A. V. Rowlands, Intermonitor Variability of the RT3 Accelerometer During Typical Physical Activities, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36, 324-330 (2004)
- 9) M. S. Treuth et al., Defining Accelerometer Thresholds for Activity Intensities in Adolescent Girls, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 36, 1259-1266 (2004)
- 10) 宮地力, ランニング時の着地衝撃とそのシミュレーション, バイオメカニズム学会誌, 14, 73-77 (1990)
- 11) 湯川治敏, 小林一敏, 可変質量粘弾性モデルによるランニング中の着地衝撃のパラメータ同定, 日本機械学会論文集. C編, 61, 2862-2868 (1995)
- 12) 梅垣, 小林, 島野, 太田, 室伏, ハンマー投げにおける回転半径, 中京大学体育研究所紀要, 13, 9-14 (1998)
- 13) 小林, 梅垣, 島野, 太田, 室伏, 加速度センサを用いた運動解析法の開発, 中京大学体育研究所紀要, 13, 51-58 (1998)
- 14) A. J. Padgaonkar, K. W. Krieger and A. I. King, Measurement of Angular Acceleration of a Rigid Body Using Linear Accelerometers, *ASME J. Appl.*

- Mech.*, 42, 552-558 (1975)
- 15) 太田, 小林, 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, 30, 1442-1448 (1994)
 - 16) 太田, 小林, 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, 31, 1265-1272 (1995)
 - 17) 太田, 小林, カルマンフィルタを用いた3次元生体内力推定方法, 第12回日本バイオメカニクス学会大会論集, 270-275 (1994)
 - 18) 『スポーツ・データ』共立出版, 東京, 太田, 仰木, 木村, 廣津共著 (2005)
 - 19) 小林, 太田, 連載: バイオメカニクス 映像解析—映像解析の新しい手法—, *Japanese J. Sports Science*, 13, 363-370 (1994)
 - 20) K. Murofushi, S. Sakurai, K. Umegaki and K. Kobayashi, Development of a System to Measure Radius of Curvature and Speed of Hammer Head during Turns in Hammer Throw. *Int. J of Sport and Health Science*, 3, 116-128 (2005)