

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔研究進捗評価用〕

平成25年度採択分

平成27年 5月29日現在

研究課題名（和文） MEMS 多軸力センサを用いた生物の運動計測

研究課題名（英文） Measuring Locomotion of Organisms  
Using MEMS Multi-Axis Force Sensors

課題番号：25000010

研究代表者

下山 勲 (SHIMOYAMA ISAO)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授



研究の概要：本研究では、生物が移動時に発生する力のベクトル分布を、周囲の力学環境を乱すことなく計測することを目的とする。コアとなる方法論は、微小な多軸力センサによる力ベクトル計測である。これにより、生体と環境との界面に作用する力を計測し、生物の運動メカニズムの解明に必要な正確な力学モデルの構築につながる。

研究分野：工学

キーワード：MEMS・NEMS、バイオメカニクス

#### 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、細胞の移動時に発生する力学的メカニズムが注目されており、例として、直径数 $\mu\text{m}$ のピラーが剣山状に林立した基板上に細胞を培養し、ピラーのたわみを観察する手法があるが、ピラー変位量を力に変換するため計測誤差が大きく、細胞の力を直接かつ正確に計測する方法が望まれている。

(2) 昆虫の羽ばたき飛行は、固定翼まわりの定常流れ解析がベースの航空力学と異なり、非定常でメカニズムが未解明である。しかし昆虫が小さいため、適した計測器具の開発が難しく、間接的な解析手法がとられているが、実際の生物が発生している力をダイレクトに計測できてないという弱みがあり、直接的な計測方法が期待されている。

(3) 人の歩行については、ロボット分野の観点からも研究が盛んに行われている。2足歩行型ロボットは、多脚型と比べて接地面積が少ないため、家庭などの狭隘地での活躍が期待される。しかし、現状の歩行制御法は、一様な面上での歩行を仮定しており、凹凸が多い不整地での歩行や走行の制御は難しかった。ロボットによる安定移動を実現するため、人の移動動作の解析が待たれている。

#### 2. 研究の目的

本研究では、生物が移動時に発生する力のベクトル分布を、周囲の力学環境を乱すことなく、計測することを目的とする。微小な MEMS (Micro Electro Mechanical Systems 微小電気機械システム) 多軸力センサを用いることで、表面の力学環境を乱さずに力ベクトルの計測が可能となる。

#### 3. 研究の方法

①MEMS センサグループ、②細胞グループ、③昆虫羽ばたき飛行グループ、④人間歩行グループ、の4グループが共同して研究を行う。

(1) MEMS センサグループでは、プローブ型多軸力センサと、平面型多軸力センサの2タイプのセンサを実現する。前者は、プローブ先端に働く力のベクトル成分と軸周りのモーメント成分を計測でき、ある一点に働く力を解析する際に用いる。一方、分布する力ベクトルを計測する場合には、平面型多軸力センサを用いる。

(2) 細胞グループでは、細胞運動時の力学メカニズム解明のための、平面型多軸力センサレイによる細胞の接地面と細胞膜の界面で作用する圧力およびせん断力の分布の計測手法を構築する。

(3) 昆虫羽ばたき飛行グループでは、運動モデルを構築し、包括的に昆虫の羽ばたき運動を解析するために、翼に働く力を直接計測することを目標とする。MEMS センサグループが試作するプローブ型多軸力センサの先端に昆虫を固定し、羽ばたき運動中に発生する力を計測する。

(4) 人間歩行グループでは、平面型多軸力センサを弾性体に埋め込み、両足の靴のインソールに設置することで、歩行時の足裏、足指に働く圧力、せん断力を多点で計測し、総合的な歩行動作の解析に取り組む。

#### 4. これまでの成果

(1) MEMS センサグループでは、各計測対象に合わせた MEMS 力センサを実現するため、①sub-nN 力を計測する微小力センサの実現、

②3 軸力とトルクを計測するプローブ型センサの実現、

③MEMS カセンサチップを高剛性弾性体中に埋め込むことでN オーダの足裏反力を計測可能な多軸力センサの実現、  
に取り組んだ。

(2) 細胞グループでは、細胞を顕微鏡で観察しながら牽引力をリアルタイムで直接計測するために、多軸力センサを用いた計測セットアップを構築した。10 nN の分解能を持つ2 軸力センサ上で細胞を直接培養し、牛由来平滑筋細胞が基板に接着・伸展していく際の力を実際に測定した。

(3) 昆虫羽ばたき飛翔グループでは、プローブ型3 軸力及び4 軸力センサを用いてショウジョウバエの羽ばたき運動時に発生する力を計測し、カセンサの信号と同期して、ハエを側面から高速度カメラで撮影した。計測した結果から 10  $\mu$ N のオーダで羽ばたき運動に合わせて力が発生していることを明らかにした。

(4) 人間歩行グループでは、シリコンゴムに埋め込んだ平面型3 軸力センサを左右の靴のインソールに各8 個ずつ配置し、アンプで増幅したセンサ出力を無線シリアル通信で計測できるシステムを構築した。試作したシステムを用いて歩行中の足裏に作用する3 軸力分布データの計測を行ない、妥当性を確認した。また、構築した計測システムを用いて、水平歩行・階段昇降・傾斜路歩行のデータを取得した。特に傾斜路歩行については、トレッドミルを用いることで傾斜角度と歩行速度を正確に設定することができ、定量的なデータの取得が可能となった。

## 5. 今後の計画

(1) MEMS センサグループでは、細胞が床面に及ぼす力の分布等を計測するために 10  $\mu$  m オーダの空間分解能で3 軸力の分布を計測することが可能なカセンサを実現するため、MEMS カセンサの小型化、高感度化ならびにアレイ化に取り組む。

(2) 細胞グループでは、カセンサアレイを用いた定量的な力計測の実現、薬剤を用いることで細胞機能を変化させた状態での力計測に取り組む。

(3) 昆虫羽ばたき飛翔グループでは、計測するショウジョウバエの運動の対象として、上昇・下降、旋回といった運動に対して焦点を当てる。また視覚刺激映像と力計測データを同期させることで、遷移時の力計測を行う。

(4) 人間歩行グループでは、被験者数を増やして足裏3 軸力分布データの計測を引き続き行う。これまでに構築したワイヤレス、かつウェアラブルな足裏3 軸力分布計測システムを用いて、傾斜路歩行時の傾斜角による影響と、水平歩行時の歩行速度による影響につ

いてデータの蓄積を進めていく。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)  
(研究代表者は二重線、研究分担者は一重下線、連携研究者は点線)

(1)Hidetoshi Takahashi, Ken Sato, Nguyen Minh-Dung, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama, "Characteristic evaluation of a bristled wing using mechanical models of a thrips with MEMS piezoresistive cantilevers," Journal of Biomechanical Science and Engineering, vol. 10, no. 2, 2015.

(2)Hidetoshi Takahashi, Nguyen Thanh-Vinh, Jung G. Uijin, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama, "MEMS two-axis force plate array for measurement of ground reaction force during the running of an ant," Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 24, no. 6, article no. 065014, 2014.

(3)Nguyen Thanh-Vinh, Hidetoshi Takahashi, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama, "Two-axis MEMS-based force sensor for measuring the interaction forces during the sliding of a droplet on a micropillar array," Sensors & Actuators: A. Physical, 2014.

(4)Hidetoshi Takahashi, Ken Sato, Kiyoshi Matsumoto and Isao Shimoyama, "Measuring differential pressures with multiple MEMS sensors during takeoff of an insect-like ornithopter," Journal of Biomechanical Science and Engineering, vol. 9, no. 1, 2014.

(5)日本機械学会賞(技術), 受賞者: 下山勲, 中井亮仁, 高橋英俊, 永野顕法, 木鋪大樹

(6)船井情報科学振興財団, 第13 回船井研究奨励賞, 受賞者:高橋英俊

(7)The 27th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Outstanding Paper Award, 受賞者:グエンタンヴィン, 高橋英俊, 松本潔, 下山勲

(8)Biomechanics Best Poster "1st prize" Society for Experimental Biology 2013, 受賞者:高橋英俊, 松本潔, 下山勲

ホームページ等

<http://www.leopard.t.u-tokyo.ac.jp/tokusui/>