

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：32612

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20984

研究課題名（和文）マイクロスプリングを利用した昆虫足裏反力計測フォースプレートの創成

研究課題名（英文）Force plate for measurement of insect ground reaction force using micro springs

研究代表者

高橋 英俊（Takahashi, Hidetoshi）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・准教授

研究者番号：90625485

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：超精密3Dプリンタを用いて、フォースプレート構造の設計・製作を進め、試作したフォースプレート構造とレーザ変位計を組み合わせてフォースプレートのシステムを構築した。またフォースプレートの力に対する校正実験、共振周波数の評価を行った。フォースプレート構造とレーザ変位計のスポット位置のずれによる応答の位置誤差に関して、理論構築と実証実験を行った。また構築したフォースプレートを用いて、ショウジョウバエの歩行時の足裏反力計測を行い、自重と同等の足裏反力が応答として計測された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の機械加工では、3次元的な微細構造、特にマイクロメートルオーダーで柔らかい構造を製作することは難しかった。一方で、従来のMEMSプロセスにおいても、材料を積層し構造を製作するため、3次元的に曲線を描くような構造の製作には不向きであった。本研究では、マイクロ光造形を利用したマイクロスプリングの製作に挑戦することで、昆虫の運動中に働く微小な足裏反力を地面の変位として変換し計測するシステムへの応用に繋げている。近年、マイクロ光造形を利用した研究は盛んになってきたが、スプリングのような機械的構造を利用した研究はほとんどなく、研究の鍵となるスプリング構造そのものにも新規性がある。

研究成果の概要（英文）：Using an ultra-precision 3D printer, we designed and fabricated a force plate structure, and constructed a force plate system by combining the prototype force plate structure with a laser displacement meter. In addition, calibration experiments of the force plate against the force and evaluation of the resonance frequency were conducted. Theoretical construction and demonstration experiments were conducted on the positional error of the response due to the misalignment of the spot positions of the force plate structure and laser displacement meter. Using the force plate system, we measured the ground reaction force (GRF) of a fruit fly while walking, and measured the GRF equivalent to the body weight as a response.

研究分野：機械工学

キーワード：フォースプレート 微小昆虫 3Dプリンタ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ロボットのモデルとして生物から学ぶことは多く、近年生物規範のソフトロボティクスの分野が盛んである。その中で、機動的に走行する昆虫の運動は学ぶべき点が多い。これらの運動を評価する上で不可欠な研究方法は、フォースプレートで地面に作用する足裏反力を計測することである。

従来、 piezo抵抗素子を利用した MEMS フォースプレートなどが研究開発されてきたが、性能としては優れているものの、製作に多大な労力がかかり、さらにプレートを支えて計測を行うバネ部分を厚さ 10 μm オーダの板バネ構造としていたため、非常に繊細で壊れやすいという問題点があった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、容易なフォースプレートを用いた昆虫の足裏反力計測方法の構築である。提案する計測システムは、マイクロスプリング、プレート、レーザ変位計から構成される。MEMS のマイクロ光造形装置を利用して、壊れにくく、かつ“柔らかい”マイクロスプリングを実現する。マイクロ光造形装置はいわゆる高性能の 3D プリンタであり、一度製作の条件を決定すれば、誰でも、再現性高く、かつ容易に構造を製作できる。四隅をマイクロスプリングが支えるプレート上に昆虫が乗った際、プレートの中心の変位をレーザ変位計で検知することで μN オーダの足裏反力を計測する。力が加わった位置によらずプレートの中心の変位は力の大きさに対して一意に決まるため昆虫がプレート上のどこに脚を接地していても足裏反力を正確に算出できる。昆虫に合わせて、マイクロスプリング及びプレートを製作することで、計測対象にあったフォースプレートを実現できる。

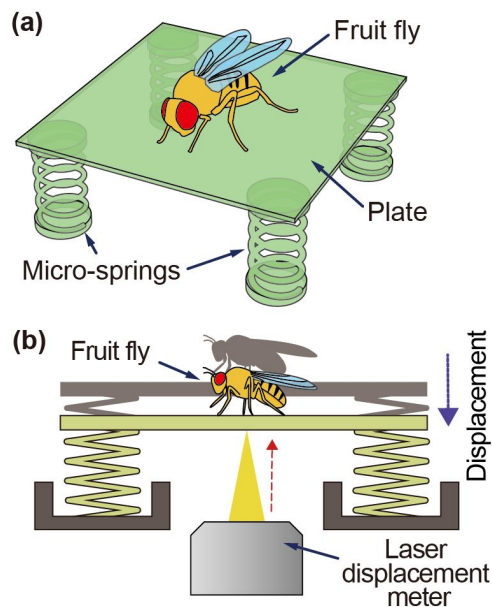


図1 提案するフォースプレートの概念図。

3. 研究の方法

本研究では、超精密 3D プリンタを利用することで、壊れにくく、微小で柔らかいマイクロスプリングを実現する。マイクロスプリングによって支えられるプレート上を昆虫が走行すると、力に応じてプレートが変位する。変位をレーザ変位計で検知することで、 μN オーダの足裏反力を計測する(図1)。スプリングのバネ定数が十分に小さくなければ、 μN オーダの力ではプレートはほとんど変位せず計測できない。

本研究では小型の昆虫として体重が 10 μN 程度のアリ・ショウジョウバエを計測対象とし、6脚全てがプレート上に乗り走行する際に、垂直方向の足裏反力の総和を計測するフォースプレートを設計・製作する。プレートの四隅を同じバネ定数を持つマイクロスプリングで支えると、力が加わった位置によらずプレートの中心の変位は力の大きさに対して一意に決まる。そのため、プレート中心の変位をレーザ変位計で検出することで力を正確に算出できる。またレーザ変位計の時間分解能は 1 ms 以下であり、歩行周波数に対して十分に速い。

4. 研究成果

当初の計画にある超精密 3D プリンタを用いて、フォースプレート構造の設計・製作を進め、試作したフォースプレート構造とレーザ変位計を組み合わせるフォースプレートのシステムを構築した。またフォースプレートの力に対する校正実験、共振周波数の評価を行った。フォースプレート構造とレーザ変位計のスポット位置のずれによる応答の位置誤差に関して、理論構築と実証実験を行った。また構築したフォースプレートを用いて、ショウジョウバエの歩行時の足裏反力計測を行い、自重と同等の足裏反力が応答として計測された。

(1) フォースプレート構造に関しては、プレートとスプリング構造を一体化して設計し、プレートの裏側を軽量化のためハニカム構造とした(図2)。プレートの寸法は 9 mm \times 9 mm \times 0.5 mm であり、四隅に直径 2 mm 高さ 2.5 mm の立体コイルばねを有する。製作には超精密 3D プリンタ

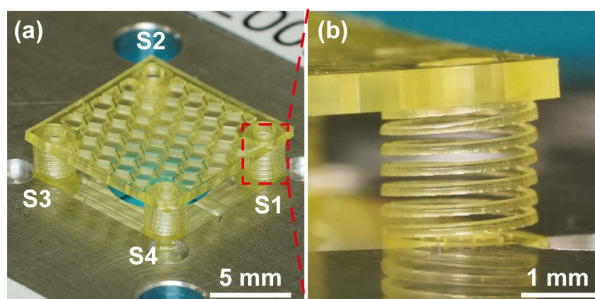


図2 試作したフォースプレート。

(BMF, S140) を用いて製作した。コイルバネの1本のバネ定数は約 1.5 N/m となった。プレートの裏からレーザ変位計 (CL-L015, Keyence) で変位を計測できるようにセットアップを構築した。ロードセルの先端に針を取り付け、プレートの各八ニカムを中心を押した際の力と変位を計測することで力に対するフォースプレートの応答を校正した。校正の際に、応答の分布からレーザ変位計の位置を調整し、位置誤差を最小限に抑えた。フォースプレートの力分解能及び位置誤差は $0.1 \mu\text{N}$ 、 $\pm 1.5\%$ となった。また共振周波数は 76 Hz であった。

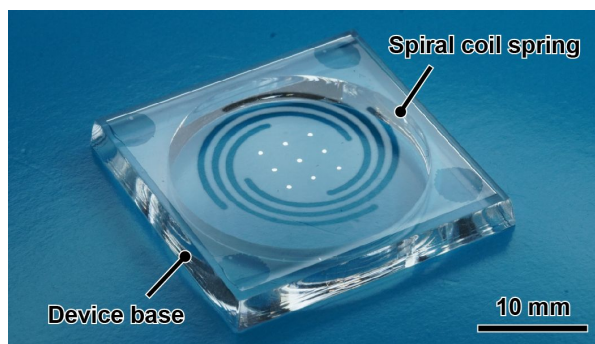


図3 ガラスの平面スパイラルフォースプレート。

(2) 3D プリンタを用いた三次元的なフォースプレートの他に、平面スパイラルスプリングを用いたフォースプレートに関しても、研究開発を行った。プレートの材料として厚さ $50 \mu\text{m}$ のシリコン、厚さ $100 \mu\text{m}$ のアルミニウム、厚さ $100 \mu\text{m}$ のポリイミドフィルムの3種類の材料でそれぞれフォースプレートを製作した。アルミニウムのプレートに関しては、レーザ変位計ではなく渦電流式の変位計を用いた。スパイラルスプリングとしてアルキメデスの螺旋形状を用い、直径 10 mm オーダの円形状のプレートの四隅から螺旋を描きプレートを支える構造とした。シリコンのプレートは MEMS のフォトリソグラフィ及び DRIE によるエッチングによって製作を行った。アルミニウムのプレートはファイバーレーザ加工機で切削し製作した。ポリイミドフィルムのプレートは UV レーザ加工機を用いて製作した (図3)。ポリイミドフィルムのフォースプレートが最も感度が高く、ショウジョウバエの体重および翅の重量を計測できることを示した。

(3) 3D プリンタを用いた三次元的なフォースプレートの他に、プレート構造と検出部が機械的に接続されていないセンサとして、センサ素子に渦電流式の変位計を用いた、多軸フォースプレートを研究開発した。多軸フォースプレートに関しては、まずはラージスケールということで人間の足裏反力計測を対象として設計した。フォースプレートはこれまでと同様にばね構造がプレートを支える構造になっており、ばね変形によるプレート変位を4つの渦電流センサで測定する。渦電流センサは垂直方向、水平方向の2方向の変位を検知できるため、4つのセンサ出力の正負方向の組み合わせから2軸方向の力と2軸回りのモーメントを独立して測定することが可能となった。

またフォースプレートの設計として、ばねの配置やばね定数を複数の組み合わせで考慮することで小さい位置誤差と十分な共振周波数を実現した。実際に両方十分な共振周波数を有している四隅だけにばねを配置した場合とばねを最適化した場合を比較してシミュレーション上で位置誤差を $\pm 20\%$ から $\pm 2\%$ に低減されることを確認した。製作したフォースプレートの共振周波数は 133 Hz で位置誤差は $\pm 5\%$ 、分解能は F_y, F_z, M_x, M_y に対してそれぞれ $0.026 \text{ N}, 0.17 \text{ N}, 0.01 \text{ Nm}, 0.02 \text{ Nm}$ となった。また、このフォースプレートで歩行が測定可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 T. Kiriyama, K. Shimazaki, R. Nakashima, H. Takahashi	4. 巻 14
2. 論文標題 Thin Glass Micro Force Plate Supported by Planar Spiral Springs for Measuring Minute Forces	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Micromachines	6. 最初と最後の頁 1056
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/mi14051056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kawasaki Yuta, Takahashi Hidetoshi	4. 巻 12
2. 論文標題 Spiral Spring-Supported Force Plate with an External Eddy Current Displacement Sensor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Actuators	6. 最初と最後の頁 16
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/act12010016	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Shimazaki Kenichiro, Sugimoto Takumi, Toda Hirofumi, Takahashi Hidetoshi	4. 巻 22
2. 論文標題 A Polyimide Film-Based Simple Force Plate for Measuring the Body Mass of Tiny Insects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 8352
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22218352	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Takahashi Hidetoshi	4. 巻 22
2. 論文標題 MEMS-Based Micro Sensors for Measuring the Tiny Forces Acting on Insects	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 8018
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s22208018	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sugimoto Takumi、Kawasaki Yuta、Toda Hirofumi、Takahashi Hidetoshi	4. 巻 33
2. 論文標題 Measurement method of a microspring-supported force plate with an external laser displacement meter	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 105118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ac7b12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kawasaki Yuta、Ogawa Ami、Takahashi Hidetoshi	4. 巻 21
2. 論文標題 Force Plate with Simple Mechanical Springs and Separated Noncontact Sensor Elements	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 7092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21217092	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計9件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 K. Shimazaki, T. Sugimoto, H. Toda and H. Takahashi
2. 発表標題 A force plate using a polyimide film-based flat spiral springs for measuring the body part mass of fruit flies
3. 学会等名 ISABMEC2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Sugimoto, H. Toda and H. Takahashi
2. 発表標題 3D printed micro force plate for measuring the ground reaction force of a fruit fly
3. 学会等名 IEEE MEMS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Kawasaki and H. Takahashi
2. 発表標題 Planar spring-supported force plate with an eddy current displacement sensor
3. 学会等名 JCK MEMS/NEMS2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本匠, 戸田浩史, 高橋英俊
2. 発表標題 昆虫足裏反力測定のためのSiフォースプレート
3. 学会等名 第12回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 杉本匠, 戸田浩史, 高橋英俊
2. 発表標題 3D プリンタを用いた昆虫足裏反力測定のためのフォースプレートの製作
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 桐山大世, 島崎健一郎, 中島利八郎, 高橋英俊
2. 発表標題 UVレーザ加工による薄膜ガラスフォースプレート
3. 学会等名 第13回マイクロ・ナノ工学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎裕太, 小川愛実, 高橋英俊
2. 発表標題 非接触変位センサとばねを用いたフォースプレートの開発
3. 学会等名 スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎裕太, 小川愛実, 高橋英俊
2. 発表標題 ばね構造とセンサ素子を用いた4軸フォースプレート
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 川崎裕太, 小川愛実, 高橋英俊
2. 発表標題 センサ素子とばね構造を分離した可搬型フォースプレートの開発
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	尾上 弘晃 (Onoe Hiroaki) (30548681)	慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授 (32612)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
韓国	Kyung Hee University			