

令和 6 年 6 月 28 日現在

機関番号：34204
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20H04264
研究課題名（和文）プリントドエレクトロニクス技術による生物の生理応答と行動の直接計測と制御

研究課題名（英文）Direct Measurement and Control of Biological Physiological Responses and Behavior Using Printed Electronics Technology

研究代表者
清水 正宏（Shimizu, Masahiro）
長浜バイオ大学・バイオサイエンス学部・教授

研究者番号：50447140
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、プリントドエレクトロニクスを生物の計測に直接利用し、生物の行動を阻害しない程度に低侵襲性を維持しつつ、生理応答と行動を同時に計測した。表皮が伸縮する生物身体にプリントしても表面上に電子回路を形成・維持できる。また、プリントドエレクトロニクス技術により環境からのローカルフィードバックの直接観察を行った。具体的には、筋細胞をコラーゲンシート上で培養し、コラーゲンシートの構造に傷がついている部分に、細胞が多く生着することを確認した。細胞からみた環境であるコラーゲンシートの構造が変わると、細胞群の構造も変化することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、生物の行動を阻害しない程度に低侵襲性を維持しつつ、生理応答と行動を同時に計測できることにある。リーフパウダーAgをプリントドエレクトロニクスのための導電性塗料として採用することが、本研究の新奇な着眼点である。銀ナノ粒子インク等のプリントドエレクトロニクスで用いられる他の導電性材料との違いは、粒子がフレーク状の形状をしていることである。プリント対象の物体が伸縮したとしても、フレーク状粒子の重なりにより導電性が維持される。このため、表皮が伸縮する生物身体にプリントしても表面上に電子回路を形成・維持できることが期待される。

研究成果の概要（英文）：This study utilized printed electronics for direct measurement of biological entities, maintaining low invasiveness that does not hinder the organisms' behavior while simultaneously measuring physiological responses and behavior. Even when printed on the skin of an organism that stretches, an electronic circuit can be formed and maintained on the surface. Additionally, printed electronics technology allowed direct observation of local feedback from the environment. Specifically, muscle cells were cultured on collagen sheets, and it was confirmed that more cells adhered to damaged areas of the collagen sheet structure. It was also confirmed that when the structure of the collagen sheet, which serves as the environment from the perspective of the cells, changes, the structure of the cell group also changes.

研究分野：バイオソフトロボティクス

キーワード：プリントドエレクトロニクス 生物の生理応答と行動 計測と制御

1. 研究開始当初の背景

生物行動の適応メカニズムを理解し応用するためには、生物身体の変形がどのように生理応答と行動を改変しているかという研究の核心をなす学術的「問い」を明らかにしなければならない。知能ロボットに生物の適応的性質を実装することは、外乱があっても自律的に動き続けるロボットの実現のために必要不可欠である。特に、自己複製、自己修復、成長といった、生物自身のソフトウェアのみならずハードウェアさえも自己改変する能力は、いまだに工学的な実装が難しい。一方で自然界では、細胞から個体までのマルチスケールで、自己改変が起こっている。Engler (ペンシルバニア大、USA) らによると、間葉系幹細胞は、接着した場所の機械的な強度を認識することができ、足場の固さに応じて遺伝子の改変なしに骨・筋肉・神経に分化する。この知見は、現在、再生・移植医療、ガン医療を初めとする医療分野からも大きな関心を集めている。また、除脳ネコの研究においては、上位中枢から身体への行動指令を遮断しても、ネコが接地面との相互作用から歩行を生成することが確認された。四足歩行が、能動性が伴わなくても環境適応的に表出することが明らかとなった。このような現象は、従来は環境からのローカルフィードバックを伴う神経ネットワークの働きによって理解されてきた。一方で、環境からのローカルフィードバックの発生由来が直接観察されていない。実際には、生物身体の変形に依存して、環境との相互作用を形成し、生理応答と行動を改変していると考えられる。そこで、申請者は、生物の行動中の身体変形に依存する生理応答と行動の変化を直接計測することが寛容であるとの認識に至った。そのためには、生物個体の自然な振る舞いを阻害しない低侵襲性を有する計測技術の適用が求められる。我々は、そのためにプリンテッドエレクトロニクス技術を応用し、生物の身体表面に電子回路を形成することで、変形と生理応答を同時計測可能な生体機械融合システムを考える。

2. 研究の目的

本研究の目的は、プリンテッドエレクトロニクス技術によって生物の生理応答と行動を直接計測し、適応的システムを構築することである。具体的には、リーフパウダーAg を計測対象に塗布して、生体の表皮に直接電子回路を印刷することで、生物身体の変形に起因する動的情報を記録・処理する。学術的独自性と創造性は、生物の行動を阻害しない程度に低侵襲性を維持しつつ、生理応答と行動を同時に計測できることにある。

リーフパウダーAg は、これまでは、主に装飾用に用いられていたマテリアルである。その特長からプリンテッドエレクトロニクスのための導電性塗料として採用することが、本研究の新奇な着眼点である。リーフパウダーAg は、フレーク状の形状をしている。銀ナノ粒子インク等のプリンテッドエレクトロニクスで用いられる他の導電性マテリアルとの違いは、粒子がフレーク状の形状をしていることである。プリント対象の物体が伸縮したとしても、フレーク状粒子の重なりにより導電性が維持される。このため、表皮が伸縮する生物身体にプリントしても表面上に電子回路を形成・維持できることが期待される。また、リーフパウダーAg のフレーク状粒子の膜厚は 40nm 程度であり、スプレーや筆などの日常的なツールを用いて塗布する方法で、nm オーダーの伸縮する導電膜を低侵襲に生物身体にプリントできるといった簡便性を有する。「日常的・簡便性」といった性質は非常に重要である。モーションキャプチャリングやレントゲン撮影等の特殊かつ専用の機材を必要しないことから制約が少なく、研究を迅速、かつ確実に推進することに寄与する。また、生物の身体に針を刺すといった、行動を阻害するような高い侵襲性はない。図1にリーフパウダーAg を翅に塗布されたトンボの飛翔に関する予備実験を示す。図中右上部分に示すとおり、翅部分を経由してLED が点灯する(電子回路の形成)。この状況下において、トンボは、十分に飛翔することができることを確認している(低侵襲性)。翅は、羽ばたき時に伸縮することから、翅の動力学の性質を抵抗値の測定から観察することができる(行動の計測)。以上から、生物の自然な振る舞いの中で計測できる有効な方法であると期待される。

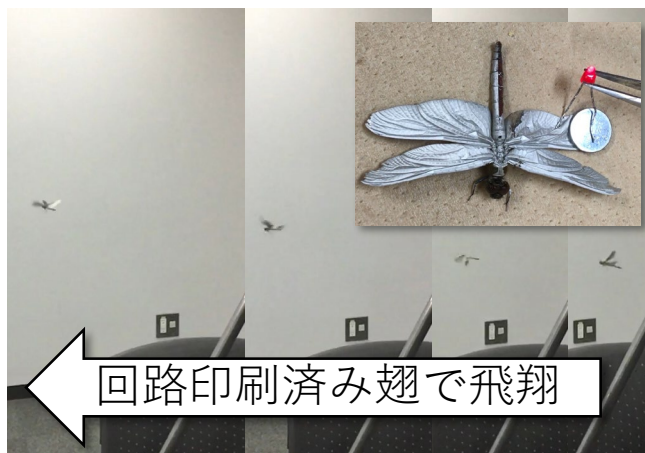


図1：リーフパウダーAg を翅に塗布された
トンボの飛翔

3. 研究の方法

研究計画では、初動段階から複数の手段を勘案した。これにより、一部の計画が当初計画どおりに進まない時であっても多角的かつ迅速に研究を遂行できる。

●生物身体の変形を伴う生理応答と行動の計測

昆虫、両生類、哺乳類細胞等における表面の変形を伴う生理応答と行動をプリントドエレクトロニクス技術により計測する。具体的には、マルハナバチの飛翔行動、カイコガのフェロモン源定位行動、アフリカツメガエルの遊泳行動を対象とし計測を試みる。既に、カイコガの触角による匂い検出（生理応答）の計測に成功した。また、皮膚の伸縮するアフリカツメガエルの脚の屈曲姿勢がリーフパウダーAgによって推定可能であることを確認した。また、非拘束下での自然な行動下における生理応答と行動を計測する。

●環境からのローカルフィードバックの発生由来の直接観察と制御

生体機械融合システムを用いることで、身体-環境間の条件を恣意的に調節し、条件間の差分を抽出する。既にカエルサイボーグ（科研費 挑戦的萌芽研究（H27～H28）による成果）、マルハナバチ遠隔操作型マルチコプタ（科研費 挑戦的研究（萌芽）（H29～H30）による成果）、分担者の志垣によるカイコガ操縦型ロボットがあり、ただちに生体機械融合システムと計測の結果を連携させる準備が整っている。以上による多種の実験によって、システム毎の特徴を把握し、生物身体の変形を伴う生理応答と行動の連関を明らかにする。環境からのローカルフィードバックの発生由来を直接観察し、生物型の適応性を有するシステム制御則を構築する。

4. 研究成果

本研究は、プリントドエレクトロニクスを生物の計測に直接利用し、生物の行動を阻害しない程度に低侵襲性を維持しつつ、生理応答と行動を同時に計測した。プリント対象の物体が伸縮したとしても、フレーク状粒子のリーフパウダーAgの重なりにより導電性が維持される。表皮が伸縮する生物身体にプリントしても表面上に電子回路を形成・維持できる。リーフパウダーAgを計測対象に塗布して、生体の表皮に直接電子回路を印刷することで、生物身体の変形に起因する動的情報を記録・処理した。学術的独自性と創造性は、生物の行動を阻害しない程度に低侵襲性を維持しつつ、生理応答と行動を同時に計測できることにある。研究計画では、初動段階から複数の手段を勘案した。生体機械融合システムを用いることで、身体-環境間の条件を恣意的に調節し、条件間の差分を抽出した。生物身体の変形を伴う生理応答と行動の連関を明らかにした。また、プリントドエレクトロニクス技術により環境からのローカルフィードバックの直接観察を行った。具体的には、筋細胞をコラーゲンシート上で培養し、コラーゲンシートの構造に傷がついている部分に、細胞が多く生着することを確認した。細胞からみた環境であるコラーゲンシートの構造が変わると、細胞群の構造も変化することを確認した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Yanagisawa Ryota, Shigaki Shunsuke, Yasui Kotaro, Owaki Dai, Sugimoto Yasuhiro, Ishiguro Akio, Shimizu Masahiro	4. 巻 21
2. 論文標題 Wearable Vibration Sensor for Measuring the Wing Flapping of Insects	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 593 ~ 593
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s21020593	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0件

〔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	細田 耕 (Hosoda Koh) (10252610)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	志垣 俊介 (Shigaki Syunsuke) (50825289)	国立情報学研究所・情報学プリンシプル系・助教 (62615)	

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
---------	---------