解 説

昆虫行動計測のためのバーチャルリアリティ装置

Virtual Reality System for Measuring Insect's Behaviors

永谷直久^{*1} 藤澤隆介^{*2} ^{*1}京都産業大学 ^{*2}八戸工業大学Naohisa Nagaya^{*1} and Ryusuke Fujisawa^{*2} ^{*1}Kyoto Sangyo University ^{*2}Hachinohe Institute of Technology

1. はじめに

生物がその生息する環境においてどのように適応し、行動するのかという行動生態学的な研究において、ある行動が発現するための因果関係を明らかにするためには、環境と行動の計測を同時に行うことが重要である。一般的に、生物の行動計測手法としては、自然環境内における行動計測と実験室環境内における行動計測という二つのアプローチに大別される。

自然環境内で行う行動計測では、GPSなどのセンサを用いて実際の自然な環境での行動軌跡データを取得する、バイオロギング (Bio-logging) 技術により、ウミガメや海洋哺乳類といった大型の野生生物から鳥類まで、幅広くその行動の計測が可能となっている [1]。しかし、バイオロギング技術による行動計測アプローチでは、計測されたデータにおける因果関係を明らかにすることが難しい。例えば、鳥の飛行軌跡データにおいて移動方向の変化が進行方向に天敵がいたためなのか、採餌のためなのか、風や気圧などの環境的要因なのかを判断するためには、別に外環境を正確に測定するセンサが必要になってくる。このような、自然環境内における様々な外的因子の影響を受けるヘテロな環境内でのデータ計測だけでは生物の行動規範を明らかにすることはできない。また、昆虫のような身体サイズが小さい生物に対して、種々のセンサを取り付けることは難しい。

これに対して、行動計測におけるもう一つのアプローチである実験室環境内における行動計測では、温度などの外環境が統制された環境下における計測が可能である。実験室内における行動計測では、主にシャーレやゲージなどの限られた空間内において、カメラなどを用いた画像ベースの行動軌跡計測が行われている。しかし、統制された環境内におけるデータ計測は可能であるが、軌跡計測という観

点では空間的な制約がある条件での計測となるため、実環境における軌跡と同定することが難しい。

統制された実環境における行動計測という二律背反する条件を満たす計測を行うためには、Virtual Reality (VR) の技術を用いて、実験室内の統制された環境下で、対象生物にとって現実と同じように外的因子を提示することができる実験装置の開発が必要となる。本解説では、全方向運動補償装置 (Omnidirectional treadmill) の近年の研究動向を踏まえた実装例を紹介するとともに、課題と生物の行動メカニズム解明のための VR 装置の展望を述べる。

2. 昆虫用全方位運動補償装置の研究動向

昆虫の行動計測を行うための全方向運動補償装置は、実装方法としてサーボスフィア方式とテザー方式の二つに大別でき、どちらの方式も対象昆虫を球の上に載せて計測するシステムである。サーボスフィア方式は、サーボモータなどのアクチュエータを用いて、対象昆虫の動きと反対方向に球体を回転させることで、球体上部に固定するように運動補償を行う方式である。テザー方式は、対象昆虫の背中などにピンを取り付け、自由回転できるようにした球体の上に配置し、昆虫自身の脚力で球体を回転させることで運動補償を行う方式である。

次節以降では、サーボスフィア方式とテザー方式の全方向運動補償装置の研究動向に関して解説する。

2.1 サーボスフィア方式の研究動向

サーボスフィア方式の運動補償装置開発の歴史は古く、ドイツ語の論文ではあるが、1968年に Götz らによって報告されている [2]。図 1 に示すように、マーカを貼り付けた昆虫を球体に乗せて、球体下部にサーボモータで個別駆動できる四つのオムニホイールを配置し、全方向の運動補償を実現している。さらに、1970 年中ごろから Kramer によって、再帰性反射材を昆虫に貼り付けて運動方向を検出し、サーボモータによる球体駆動で運動補償を行うサーボスフィア方式 (図 2) の研究報告が行われている [3]。Kramer の開発した運動補償装置は Kramer Treadmill と呼ばれ、その後のサーボスフィア方式の運動補償装置を用いた研究でも基本構造が援用されている [4] [5]。

原稿受付 2017 年 6 月 5 日

キーワード: Virtual Reality System, Omnidirectional Treadmill, Movement Trajectory

^{*1}〒 603-8555 京都市北区上賀茂本山^{*2}〒 031-8501 八戸市大字妙字大開 88-1^{*1}Kita-ku, Kyoto-shi, Kyoto^{*2}Hachinohe-shi, Aomori

図1 Görz らが開発した運動補償装置 (文献[2]より引用)

図2 Kramer Treadmill の模式図 (文献[3]より引用)

Kramer Treadmill などが、昆虫にマーカを貼り付ける必要があるのに対して、マーカレスで昆虫の運動方向を検出するシステムは、ビデオカメラなどの撮像デバイスの小型高性能が進んだ2000年ごろから報告されている。Sakuma は、ハイスピードカメラを用いた240 [Hz] のサンプリングレートでの昆虫の運動方向の検出を行い、マーカレスでの運動補償を実現した[6]。同様に、Tilborg らによってCMOSカメラを用いたシステムが報告されている[7]。Tilborg らのシステムは、昆虫行動計測装置 LC-100 として Syntech 社から販売されており[8]、筆者の知る限りでは唯一購入可能な運動補償機構を有した昆虫行動計測装置である。

近年では、志垣らによる65 [Hz] の制御周期を実現したシステム[9]や、同じく志垣らによるハイスピードカメラを用いた500 [Hz] の制御周期を実現したシステム[10]、安価な Web カメラを用いた筆者らのシステム[11]が報告されている。

サーボスフィア方式の潮流として、今後はUSB3.0対応のカメラを用いた、さらに高解像度かつ高フレームレートの動画の取得が可能なシステムが開発されと考えている。高解像度化により、昆虫の運動方向の検出がより高精度になり、高フレームレート化により、移動時の加速度変化が大きい昆虫への時間遅れが小さいシステムが実現することで、さらに多くの種に対して行動計測ができるようになるだろう。

図3 テザー方式による運動補償装置 A: カイコガの行動計測 (文献[12]より引用), B: ゴキブリの行動計測 (文献[14]より引用), C: ミツバチの行動計測 (文献[15]より引用), D: クモの行動計測 (文献[17]より引用)

2.2 テザー方式の研究動向

テザー方式はサーボスフィア方式と異なり、球体をアクチュエータなどで制御せず、昆虫の脚力で自由回転できるように球体の摩擦を極力減らした機構を有する運動補償システムである。テザー方式の装置に共通する機構として、球体の接触摩擦を軽減するために、球体をポリスチレンなどの軽量な材料で製作するとともに、球体の周りに空気の流れ(層)を作り、球体をわずかに浮かせることで実現している。原理上、昆虫をピンなどで固定し、空間上に固定する必要があるのに加えて、球体を回転させるだけの脚力が必要のため、適用可能な昆虫の種類は限定的である。しかし、テザー方式は対象の位置拘束力が強いので、行動中の脳活動を電極などから計測する神経科学・神経生理学的アプローチと親和性が高い。このため、神経活動の可視化技術が成熟するのに伴い、近年の実装報告が多い運動補償方式である。

Kanzaki らのグループは、カイコガの背中を棒の先に固定したテザー方式(図3A)を用いて、移動ロボットと組み合わせることで、昆虫の動きに合わせて移動するロボットを用いた実験を行い、雄カイコガの性フェロモン(ボンビコール)に対する行動特性を明らかにしている[12][13]。また、Takalo らは、ゴキブリに対して広視野での視覚刺激を行うためのVRシステムとして、プロジェクタから球面ディスプレイへの投影を行う光学設計とともに、テザー方式の行動計測装置の開発を行っている(図3B)[14]。Moore らのグループは、ミツバチの行動計測のために、FicTrac という球体表面の文様の画像処理により、球体の変位量を

図4 実環境におけるテザー方式を用いた行動計測実験 (文献[18]より引用)

計測するシステムを開発 (図3C) し、従来の光学マウスセンサを用いた変位量計測システムよりも高精度に、昆虫の行動軌跡を計測できることを示した[15][16]. Peckmezianらは、数種のクモに対して適用可能なテザー方式の運動補償装置の開発と、プロジェクタを用いた視覚刺激装置によるVRシステム (図3D) を開発している[17].

これまでの運動補償装置の研究は、基本的に実験室環境内における使用を想定した研究であったが、DahmenらはKanzakiらと同様にテザー方式を用いた昆虫の動きに合わせて移動するロボットを、実環境下での実験に用いている。対象昆虫としてサバクアリを用いた実験の結果、帰巢するアリと採餌活動において探査行動をするアリでは、行動軌跡や移動速度が異なることが示された[18]. サバクアリはフェロモンをほとんど用いないため、これまでどんな情報を用いて帰巢しているのか様々な説が提案されていたが、本研究の成果により明らかになることを期待したい。

3. 実験装置としての課題

本章では、筆者らが共同研究者との実験を通して明らかとなった、サーボスフィア方式およびテザー方式の両運動補償方式が潜在的に持つ、以下の問題点について述べる。

- 1) 静電気の発生による静電気力の影響
- 2) 運動補償に伴う慣性力の影響

まず、静電気の影響に関しては、Tilborgらと筆者らのサーボスフィア方式の研究で言及している。Tilborgらは静電気の影響によって対象昆虫の脚が球体にへばりつく、ゴミが球体に張り付き画像処理時にノイズとなるなどの悪影響があったことを報告し、解決法として、高湿度環境において実験を行うことや、実験ごとに球体の洗浄を行うことを提案している[7]. 我々の研究でも、対象昆虫の質量が軽い場合、静電気の影響により球体上部から昆虫が突然吹き飛ばされるなどの影響があったが、コピー機などの内部で用いられる静電気除去ブラシを用いたコロナ放電により、発生を抑えるのではなく除去する手法により解決している[11].

静電気の問題はサーボスフィア方式特有の問題に思えるかもしれないが、テザー方式が昆虫を固定しているため顕

在化しないだけで、ポリスチレン等の材料で球体を構成しているテザー方式でも、実際には静電気は発生していると考えられる。

次に、運動補償に伴う球体の慣性力の影響に関して、慣性力が計測対象の昆虫の行動にどのように影響しているのか調べた論文はない。しかし、慣性力の問題は正確な軌跡データの取得や、軌跡データから算出される移動速度・加速度を正確に計測したいという研究目的において、今後顕在化する問題であると考えられる。サーボスフィア方式においては、ハードウェアの制御周期の向上と、応答特性の良いアクチュエータを使用するといった改善策があげられる。一方で、テザー方式では球体の制御機構がないため、球体の慣性力を相殺し軽減するような改善策として、何らかの外力を加える機構が必要となる。慣性力軽減機構を新たに追加することで装置が大型化してしまうと、テザー方式の長所が失われてしまうため、球体の接触摩擦を減らすための空気流をうまく制御するなどの工学的手法による改善を期待している。

4. おわりに

本解説では、昆虫の行動計測のためのVRシステム研究において、行動軌跡データを計測するための根幹となる運動補償装置に主眼を置いて解説した。サーボスフィア方式とテザー方式の二つに大別し、研究動向を述べるとともに、両手法が潜在的に持つ問題点を明らかにした。

両手法の研究動向や課題において言及したように、運動補償装置の開発や改良のためには、これまでのロボット学分野において培われてきた、制御理論や機構学のノウハウが非常に有用である。また、昆虫の採餌活動時の効率的な探査アルゴリズムの発見は、レスキューロボットによる要救護者の効率的な探査に寄与できる。このように、昆虫の行動原理解明のためのVR装置は、バイオロギング技術と同様に、工学技術との融合によるまったく新しい知見をもたらすことができる技術であると考えている。両分野の今後のさらなる発展に尽力するとともに、本解説がロボット工学者の行動生態学への興味の架け橋となれば幸いである。

参考文献

- [1] G. Fehlmann and A.J. King: "Bio-logging," *Current Biology*, vol.26, no.18, R830-R831, 2016.
- [2] K. Götz and C. Gambke: "Zum Bewegungssehen des Mehlkäfers *Tenebrio molitor*," *Kybernetik*, vol.4, no.6, pp.225-228, 1968.
- [3] E. Kramer: "The orientation of walking honeybees in odour fields with small concentration gradients," *Physiological Entomology*, vol.1, pp.27-37, 1976.
- [4] T. Weber, J. Thorson and F. Huber: "Auditory behavior of the cricket," *J. Comp. Physiology*, vol.141, no.2, pp.215-232, 1981.
- [5] Beetle Orientation: unpublished Servosphere Studies from 1983, Retrieved June 1, 2017 from <http://prodinra.inra.fr/>

- record/273690
- [6] M. Sakuma: "Virtual reality experiments on a digital servosphere: guiding male silkworm moths to a virtual odour source," *Computers & Electronics in Agriculture*, vol.35, no.2-3, pp.243-254, 2002.
 - [7] M. Tilborg, J. Pers, P. Roessingh and M. Sabelis: "State-dependent and odor-mediated anemotactic responses of a micro-arthropod on a novel type of locomotion compensator," *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, vol.35, no.3, pp.478-482, 2003.
 - [8] Locomotion Compensation LC-100, Retrieved June 1, 2017 from <http://www.ockenfels-syntech.com/products/locomotion-compensation/>
 - [9] 志垣俊介, 福島俊平, 峯岸諒, 倉林大輔, 神崎亮平: "カイコガ行動計測のための3自由度サーボスフィアの構築", *日本機械学会論文集*, vol.80, no.813, pp.1-14, 2014.
 - [10] S. Shigaki, S. Fukushima, D. Kurabayashi, T. Sakurai and R. Kanzaki: "A novel method for full locomotion compensation of an untethered walking insect," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol.12, no.1, 016005, 2016.
 - [11] N. Nagaya, N. Mizumoto, M.S. Abe, S. Dobata, R. Sato and R. Fujisawa: "Anomalous diffusion on the servosphere: A potential tool for detecting inherent organismal movement patterns," *PLoS ONE*, vol.12, no.6, e0177480, 2017.
 - [12] R. Kanzaki, R. Minegishi, S. Namiki and N. Ando: "Insect-machine hybrid system for understanding and evaluating sensory-motor control by sex pheromone in *Bombyx mori*," *Journal of Comparative*, no.199, pp.1037-1052, 2013.
 - [13] N. Ando, S. Emoto and R. Kanzaki: "Odour-tracking capability of a silkworm driving a mobile robot with turning bias and time delay," *Bioinspiration & biomimetics*, vol.8, no.1, 016008, 2013.
 - [14] J. Takalo, A. Piironen, A. Honkanen, M. Lempeä, M. Aikio, T. Tuukkanen and M. Vähäsöyrinki: "A fast and flexible panoramic virtual reality system for behavioural and electrophysiological experiments," *Sci Reports*, vol.2, p.324, 2012.
 - [15] R.J. Moore, G.J. Taylor, A.C. Paulk, T. Pearson, B. van Swinderen and M. V. Srinivasan: "FicTrac: a visual method for tracking spherical motion and generating fictive animal paths," *J. Neurosci. Methods*, vol.225, pp.106-119, 2014.
 - [16] G. Taylor, A. Paulk, T. Pearson, R. Moore, J. Stacey, D. Ball, B. Swinderen and M. Srinivasan: "Insects modify their behaviour depending on the feedback sensor used when walking on a trackball in virtual reality," *J. Exp. Biology*, vol.218, no.Pt 19, pp.3118-3127, 2015.
 - [17] T. Peckmezian and P. Taylor: "A virtual reality paradigm for the study of visually mediated behaviour and cognition in spiders," *Animal Behaviour*, vol.107, pp.87-95, 2015.
 - [18] H. Dahmen, V. Wahl, S. Pfeffer, H. Mallot and M. Wittlinger: "Naturalistic path integration of *Cataglyphis* desert ants on an air-cushioned lightweight spherical treadmill," *J. Exp. Biology*, vol.220, no.4, pp.634-644, 2017.

永谷直久 (Naohisa Nagaya)

2011 年電気通信大学大学院電気通信学研究科博士後期課程単位取得済み退学。2012 年博士(工学)。日本学術振興会特別研究員 (DC1)。東北大学大学院情報科学研究科研究特任助教, 八戸工業大学防災技術社会システム研究センター博士研究員を経て, 2015 年より京都産業大学コンピュータ理工学部助教, 現在に至る。ヒトの感覚知覚特性を利用した感覚拡張インタフェースの研究に従事。ACM, 日本バーチャルリアリティ学会, 情報処理学会会員。
(日本ロボット学会正会員)

藤澤隆介 (Ryusuke Fujisawa)

2009 年 3 月電気通信大学電気通信学研究科博士後期課程修了。博士(工学)。2009 年 4 月より八戸工業大学機械情報技術学科助教, 2014 年 4 月より同学科講師, 現在に至る。社会性昆虫の多様な振る舞いに興味をもち, フェロモン・コミュニケーションを行うロボット群, 環境構築型ロボットに関する研究を通じて生物の社会構造に関する研究を行っている。計測自動制御学会会員, 土木学会会員, 情報処理学会会員, 動物行動学会会員。(日本ロボット学会正会員)