昆虫匂い源探索アルゴリズム評価のための 小型大気イオン源探索ロボット

勝 又 聡一郎* 安 藤 規 泰* 神 崎 亮 平*

An Insect-sized Atmospheric Ion Source Localization Robot for the Evaluation of Odor Source Localization Algorithms of Insects

Souichirou Katsumata*, Noriyasu Ando* and Ryohei Kanzaki*

We developed an two-wheeled insect-sized robot to evaluate odor source localization algorithms of the male silkmoth (*Bombyx mori*). For fast and stable acquisition of sensory information, we used atmospheric ions and ion sensors to simulate odorant catch by insect olfactory sensors. The robot has two ion sensors, and a microcomputer for processing the sensor output, motor control and communication with external devices. To minimize its size, we used two modified servomotors as actuators, which enabled the robot to move in the same manner as a walking silkmoth. We used wheel encoders for feedback control of wheel position. The encoder output can also be used as a simulation of optic flow, which is necessary for speed and turn control in insect locomotion. By employing the robot, we evaluated the performance of two odor source localization models: one is based on the fixed programmed behavior of the silkmoth and a second model additionally includes course control dependent on the amplitude difference of ion sensor output on opposite sides of the robot. The results indicate that the robot based on the latter model was superior in ion plume tracking. Further evaluations of algorithms using our insect-sized robot will be an important tool for understanding behavioral mechanisms of orientation and applying them to robotics.

Key Words: Odor-source Localization, Biomimetics, Insect, Microrobot, Olfaction

1. 背 景

匂い源の探索は、ガス漏れ検知、災害における生存者救助、爆発物、麻薬や犯罪捜査など、我々人間社会の安全にとって重要である。今日これらの役割の多くは、人間よりはるかに嗅覚の優れた動物、例えば災害救助犬や警察犬が担っているが、これをロボットで代替することができれば、必要な場所に大量に投入することができ、作業の効率化が期待できる。

匂い源探索ロボットを開発する上での課題の一つが、最適な探索アルゴリズムの開発である。空気中の匂い物質の分布は、匂い源から離れるに従い、不連続な塊状に分布することが報告されている [1]。そのため、たんに濃度の高い方に向かって巡回する単純な方法では、匂い源へ正しく定位することは難しい。一方、嗅覚情報は、餌の探索や配偶行動のように、動物が生存する上で非常に重要な情報であり、特に昆虫のような小さくシンプルな脳を持つ動物でさえ、感度や応答速度に優れたセンサと、

効率のよい匂い源探索アルゴリズムを、生まれながらの本能行動として備えている [2]。したがって、昆虫の匂い源探索アルゴリズムを分析して、モデルを作成し、移動ロボットを用いて工学的に再現することができれば、匂い源探索ロボットの開発に有用な情報を提供することができる。また、このロボットを用いた行動の再現による生物学的知見の統合・検証は、神経科学、とりわけ神経レベルから行動発現を明らかにしようとする「神経行動学」の分野では、その重要性が広く認識されつつあり、視覚、聴覚、嗅覚の分野で研究が進められている [3]~[6]。

昆虫の匂い源探索行動の中で、雄カイコガ (*Bombyx mori*) は、非常に多くの神経行動学的知見が得られている昆虫である。雄カイコガは、雌の性フェロモンを受容すると、受容している間はサージ (直進歩行) を行うが、その後ジグザグターン・回転からなるプログラム行動を発現して雌へ定位する (Fig. 1)。このプログラムは、新たにフェロモンを受容することによってリセットされる。実環境では、このリセットの頻度は離散的に分布する匂い物質の受容頻度に依存するため、匂い環境に応じた最適な探索行動を行うことができる [7]。また、この探索行動を発現する脳内神経回路も明らかにされつつあり、現在では、これらの知見を統合してモデルを作成し、工学的に行動を再現することで、カイコガの脳を完全理解する取り組みが進められてい

原稿受付 2008 年 12 月 21 日

*東京大学先端科学技術研究センター

*Research Center for Advanced Science and Technology, The University of Tokyo

■ 本論文は学術性で評価されました。

Fig. 1 Pheromone searching behavior of a male silkwmoth

る [8]. そして、この行動の工学的再現には、作成したモデルの検証プラットフォームとなる移動ロボットの開発が重要である。先行研究として、桑名・下山は、カイコガの触角をフェロモンセンサとした移動ロボットを製作し、リカレントニューラルネットワークを用いて生成したプログラム行動を用いて、フェロモン源へ定位できることを示した [9]。また、神崎らは、生物学的な知見をもとに神経回路モデルを作成し、触角をフェロモンセンサとしたカイコガと同じスケールの小型ロボットで、定位行動モデルの検証を行った [5]。

この移動ロボットには次の要素が必要である。それは、実際のカイコガと比べて 1) 同等のセンサを持つこと、2) 同等の運動能力を持つこと、3) 同等のサイズを持つこと、4) 大規模な神経回路モデルをシミュレートする外部のコンピュータと相互通信ができること、そして 5) 複数感覚、特に視覚情報を持つこと、である。これらすべてを満たすロボットは開発されておらず、特に 1) および 5) については課題が残されている。まず、1) については、最適な人工センサの採用が挙げられる。人工のセンサは出力値を定量的に取り扱うことができるので、モデルの評価に最適であるが、応答速度が遅い欠点がある。例えば、半導体匂いセンサや水晶発振子匂いセンサは、一度付着した分子を除去するために数秒～数十秒を要する。一方、昆虫の触角の匂いセンサである嗅受容細胞群の応答（触角電位）は、カイコガでは 5 [Hz] 程度の断続的な嗅覚刺激に追従できる。このパルス刺激に対する応答性は、前述の離散的な匂い物質の分布の受容に不可欠であり、探索行動に大きな影響を与える。そのため、前述の先行研究では、切り取った触角に電極を差し込み、フェロモン受容に伴う触角電位の変化をセンサ入力として用いている [5] [9]。しかし、触角電位の計測は、電気ノイズや振動、乾燥による影響を受けやすく、入力情報を定量的に取り扱うことが難しいという課題があった。5) については、最近の行動学的実験により、定位行動が視覚情報、特にオプティックフロー（自身の運動によって生じる網膜上の像の動き）の影響を受けることが示されており、嗅覚と視覚の統合モデルが提案されている [10]。したがって、視覚を考慮したモデルを検証するためには、移動ロボット上から、昆虫と同等の広視野からのオプティックフローを得る必要がある。

そこで本稿では、カイコガの行動発現モデル検証に求められる前述 1)～5) のすべてを満たすカイコガサイズの小型移動ロボットの開発を目的とした。匂いセンサは、空気中の匂い物質の模擬として使用されている大気イオンを用いた手法を採った [1] [4]。視覚情報については、カメラは搭載せずにロボット自身の運動から擬似的に求めるために、ロータリエンコーダを車輪に装着した。これは、オプティックフローは自身の運動を知覚するの

に必要な情報であり、昆虫はこれを運動の補正に用いているためである [11]。試作したロボットの性能評価として、これまでに提案されているアルゴリズムを基にした行動モデルを組み込み、大気イオン源への定位実験を行った。

2. 大気イオンの計測

2.1 大気イオンセンサ

化学物質のセンサとして用いられる半導体匂いセンサや水晶発振子匂いセンサは、どちらも分子が一度付着すると、それを除去するために数秒～数十秒を要するため、カイコガの行動モデルの検証に用いる入力センサとして適しない。また、ガスクロマトグラフィーの検出器である光イオン化検出器は、300 [Hz] 以上の高速なサンプリングが可能であり、空気中の化学物質の分布の計測や、匂い刺激装置の時間分解能の評価に用いられているが [12] [13]、装置自体のサイズが大きく、小型移動ロボットに搭載するには不向きである。一方、匂い物質の模擬として、大気イオンを用いた手法があり、匂い物質の離散的な分布もこの方法で明らかになっている [1]。また、触角電位との比較においても同様の応答特性を示すことが検証されていることから [14]、本稿では大気イオンを匂い物質の模擬として使用した。一般的な大気イオンセンサ（以下イオンセンサ）は、流路を備えた並行板コンデンサやゲルディエンコンデンサで大気イオンを集めて、電荷を直接計測するが、これらは大型であるため、本稿では感度は低いものの電極と電流-電圧変換回路のみからなるイオンセンサ（Fig. 2）を用い、強力な大気イオン発生装置と組み合わせることにした。匂い源の模擬として、コロナ放電型の大気イオン発生装置（以下イオン源）を製作した。これは電極針と電極板で構成される放電装置で、負電圧（-16 [kV]）側に針電極を用いた負針コロナが周囲の大気分子をイオン化させることで、大気イオンを大量に発生させることができる。コロナ放電型の大気イオン発生においては O_3 や NO_x が生成され、同時に NO_3^- および $NO_3^-HNO_3$ を主とした負イオンが発生することが知られている [15]。

2.2 実験環境における大気イオンの計測

本研究では、ロボットの定位実験はすべて 180 [cm] (L) × 90 [cm] (W) × 30 (H) [cm]、風速 0.4 [m/s] の風洞中で行った。まず製作したイオンセンサを用いて、風洞内の時空間的な大気イオンの分布と、センサの応答の速さを評価した。

大気イオンの分布は、イオン源を原点とした 10 [cm] ごとの格子点において 30 [s] 計測した。応答の速さは、イオン源の風下 10 [cm] におけるイオン源の ON/OFF に対するセンサの出力応答を計測した。

風洞環境における大気イオン分布は、Fig. 3 に示すように、イオン源から風下に向かって濃度が低下する勾配が生じていることが確認できた。また、同じ y 座標における濃度分布を見ると、風洞中央部 ($x = 0$ [cm]) の濃度が最も高いことから、ブルーム状の分布が形成されていると考えられる。さらに、風下の $y = 40, 50$ [cm] の地点では、断続的な濃度の時系列変化を示し、大気イオンの分布が離散的になっていることが示された。これらの特徴は、これまでに報告されている匂い物質の分布と同様であることから、この実験環境は匂い源探索アルゴリズムを

評価する上で適した環境であると言える。イオン源の ON/OFF 応答では、0 [V] から飽和レベル（約 300 [mV]）までに 0.3 [s]、飽和レベルから 0 [V] までに 0.4 [s] を要した（Fig. 4）。この場合、識別可能な断続的な匂い刺激の周波数は、1.4 [Hz] とカイコガの触角電位の 5 [Hz] と比べ低い、Fig. 3 のように、特に離散的な分布を示す計測範囲でのセンサ出力が、300 [mV] よりはるかに低い 10 [mV] 以下であることを考えると、カイコガと

同等以上の応答速度が期待できる。

3. 大気イオン源探索ロボットの開発

3.1 開発したロボットの特徵

本研究で開発した大気イオン源探索ロボットを Fig. 5 に示した。ロボットのサイズは、カイコガと同程度になるよう、幅 45 [mm] × 長さ 55 [mm] として設計した。これは、昆虫とロボットでサイズが大きく異なると、スケール効果が生じてしまい、昆虫のアルゴリズムを検証するプラットフォームとしては不適切となる可能性があるためである。

ロボット前方には 2.1 節で製作したイオンセンサを、カイコガの触角と同様左右にそれぞれ搭載した。イオンセンサの検出部は、長さ 10 [mm] の錫メッキ線を用い、左右のセンサの基部の間隔は 10 [mm] である。このスケールはカイコガの触角の長さ 5 [mm]、基部の間隔 2 [mm] と比べやや長い。これは、試験の結果、定位実験を実施する空間内で十分なセンサ入力を得るのに最低限必要な検出部の表面積と、左右のセンサ入力の差を検出できる最小のセンサ間隔であったことから設定した。ただし、水平方向の距離は、検出部を斜め下方へ延ばすことでカイコガと同等の 5 [mm] とした。

3.2 ロボットのシステム

Fig. 6, 7 に示す模式図のように、イオンセンサとモータ、そして制御用のマイコン（H8-3694, Renesas）で構成されている。

イオンセンサからのイオン濃度の情報は、マイコンの A/D 変換機能によって入力される。この入力情報を用いて、マイコンにプログラムされた任意の匂い源探索アルゴリズムに基づいてロボットを制御した。アクチュエータとしてサーボモータ（W038-

Fig. 3 Spatial and temporal distribution of atmospheric ion in a wind tunnel

Fig. 4 Ion-sensor output by turn on/off of the ion-generator

Fig. 5 An insect-sized ion source localization robot

Fig. 6 Schematic drawing of the robot

Fig. 7 System configuration diagram

Fig. 8 Components of the robot

CL, Waypoint) を用い、マイコンのタイマーからのパルスを用いて周期 50 [Hz] で PWM 制御した。

ロボットの移動速度は、車輪に取り付けたロータリエンコーダで取得してマイコンでフィードバック制御されており、匂い源探索アルゴリズムから算出された目標速度を追従することができる。制御方法は、モータの速度に対して PID 制御を行っている。また、ロータリエンコーダから計算される移動時の速度ベクトルを積分して、ロボットの移動経路を求めるというオドメトリの手法によって、実験中のロボットの軌跡を、センサの応答と同期して計測することができる。

Fig. 8 に示すように、ハードウェアはマイコンボード、モータユニット、イオンセンサユニットに分かれている。マイコンボードでは、イオンセンサからのアナログ信号の入力、サーボモータの制御信号の出力、およびロータリエンコーダのパルス信号のデコードを行うために、2 チャンネルの A/D 変換機能と、2 種類のタイマーを使用している。またシリアル通信によって PC と 19,200 [bps] の通信レートでデータを入出力することが可能であり、本研究ではロボットの移動情報とイオンセンサの反応を実験のログとして PC に送信している。

モータユニットは、二つの小型サーボモータ、タイヤ、ロータリエンコーダを組み合わせて構成されている。サーボモータはモータ、ギアボックス、モータドライバ回路という要素がコンパクトに内蔵されているため、ロボットの駆動系を小型化するために使用した。サーボモータに内蔵されているポテンショメータを外し、モータが連続に回転できるようにした。タイヤは直径 20 [mm]、厚さ 2.5 [mm] の金属円盤のふちに、グリップを持たせるために両面テープを巻きつけた直径 21 [mm] のものを使

Fig. 9 Comparison between A/D converter output and data logger output

用した。ロータリエンコーダはボールマウス (W-23, A-Open) から取り出したフォトインタラプタとスリットディスクで構成され、モータの回転数をパルス信号にエンコードしている。

3.3 ロボットの評価実験

試作したロボットの運動能力を評価した結果、直進速度で最大 200 [mm/s]、回転角速度で 7 [rad/s] を出すことが可能であった。これは、カイコガの移動速度の範囲 (直進速度最大 22.4 [mm/s]、回転角速度最大 2 [rad/s]) を十分カバーする性能である。また、フィードバック制御による車輪の回転目標値への追従性能について、Fig. 1 に示した行動パターンをロボットへ入力して評価した。その結果、左右の車輪回転の誤差は 2.6% 以下と十分高い精度を示したことから、実装する探索アルゴリズムを忠実に再現できると考えられる。

先行研究 [5] [9] のように、匂い刺激で誘発される触角神経の微弱な信号をロボット上で計測するには、高感度の増幅回路をロボット上に実装するため、モータのノイズ対策が大きな課題である。そこで、試作したロボットがイオンセンサの情報を正しく取得し、その情報を基に走行できるか検証した。実験では風洞内にイオン源、イオンセンサおよび本ロボットを置き、イオンセンサをロボット上の A/D コンバータと、外部のデータロガーに接続して走行させ、双方の信号を比較した。また、ロボットの制御には、後述する「モデル (1) Straight-zigzag-loop モデル」を用いた。左右のイオンセンサからの出力に対して閾値を設定し、その値を越えた出力をカイコガにおける匂い受容と見なした。本実験では 10 [mV] を閾値と設定した。これは計測領域の最も風下側において、検出可能なセンサ出力電圧の最大値に相当する。

Fig. 9 に示すように、ロボット上に搭載したマイコンから出力した情報 (A/D コンバータ出力) と、センサから直接得た出力 (データロガー) の時系列変化は等しく、ロボットがイオンセンサの情報を正しく取得できることが示された。Fig. 9 グラフ上部の図は、ロータリエンコーダの出力をもとに作成した実験中のロボットの軌跡である。このように、自身の運動から風洞内における位置を算出できるため、仮想的な視覚情報を計算してアルゴリズムに追加することも可能である。

走行中のノイズについては、直進走行時には認められなかったが、ターン時におけるモータの逆起電力により、20 [mV] 以下のノイズが認められた。このため、20 [mV] 以下の閾値を設定すると、ターンが頻繁に起こった際に、マイコンがセンサからの入力と誤検知する問題が生じた。そこでノイズ対策として、モータユニットとセンサユニットの間にアルミのテープを貼ることでシールドし、さらにソフトウェア的にも、ターン時のノイズにフィルタをかける処理を行った。これらの対策により、ターン時のノイズによる誤動作を防止することができた。

4. 探索アルゴリズムの評価

4.1 定位実験

試作したロボットを用いて、カイコガの定型行動をもとにした探索アルゴリズムを実装し、定位実験を行った。風洞内の上流にイオン源を設置し、下流 500 [mm] の位置をスタート地点としてロボットを設置した (Fig. 10)。イオン源の周囲 250 [mm] × 250 [mm] の領域に到着したものを定位成功とし、逆にイオン源の上流 200 [mm] 以上および中央から左右に 300 [mm] 以上の領域に出てしまったもの、左右どちらかに 720 [deg] 以上回転したものを定位失敗とした。

使用したモデルは、Fig. 1 の行動パターンのうち、「サージ」の特性を変化させた次の二つである。

- モデル (1) Straight-zigzag-loop モデル

カイコガの基本的な行動モデルで、センサが反応した側へ Fig. 1 に示す直進歩行、ジグザグターンに示す定型行動を行う [7]。左右のセンサが同時に反応すると、正面への直進歩行の後にジグザグターン、ループへと進む。歩行速度、旋回角速度、持続時間はカイコガの平均的な値を用いた。

- モデル (2) Curve-zigzag-loop モデル

近年の行動学的研究により、サージの期間では左右の濃度の高い側へ偏向することが示されている (神崎, 未発表)。そこで、左右のセンサの出力値を比較し、高い側へ旋回した後ジグザグターン、ループへと進むモデルを設定した。先行研究のロボットの触角を利用した匂いセンサと異なり、イオンセンサを用いることで、出力値を絶対値として定量

的に取り扱うことができるため、本稿で試作したロボットを用いることで初めて検証可能なモデルである。

4.2 結果

Fig. 11 に、それぞれのモデルを用いた定位行動中のロボットの軌跡である。実線の軌跡が定位成功例、点線が失敗例である。それぞれのモデルについて 10 試行行ったところ、モデル (1) では、定位に失敗した例が 10 例中 3 例あるのに対して、モデル (2) ではすべての実験で定位に成功した。モデル (1) の直線的な軌跡が多く見られたのに対して、モデル (2) では、大気イオンのプルームの中央に相当するイオン源の正面へ旋回する傾向が見られた。軌跡の違いを定量的に評価するために、ゴールまでの総走行距離、所要時間、そして、プルームの中央 ($x = 0$ [mm]) からのずれを評価するために、スタート位置から 300 [mm] 風上側 (Fig. 11, 矢印で示した点線の位置 $y = 300$ [mm]) における x 座標の絶対値 (Path width) を集計し、箱ひげ図で示した (Fig. 12)。そして、ウィルコクソンの順位和検定を用いて、5%の有意水準で、モデル間の違いについて検定を行った。その結果、総走行距離と所要時間については、モデル (1) とモデル (2) の間に有意な差が見られた (Fig. 12 (A), (B))。このことは、モデル (2) では、わずかな左右の大気イオン濃度の差であっても、サージにおける方向が補正され、常に受容頻度の高いプ

Fig. 10 Experimental conditions

Fig. 11 Behavioral models and their trajectories

Fig. 12 Comparison of behavioral parameters between two models

ルームの中央を捉えることができるため、結果的に最短距離と短い所要時間で到達できるものと考えられる。対照的に、モデル(1)では、左右のセンサ出力を比較しない。そのため、ブルーム中央を通過する際には左右のセンサが同時に応答するため、方向の修正ができず、直線的な軌跡を示すものと考えられる。一方、ブルームからのずれを示す指標である Path width では、ばらつきが大きくモデル間の有意差は認めなかった (Fig. 12 (C))。しかし、三つのパラメータすべてについて、モデル(1)のばらつきが大きい傾向がみられ、このことは、定量的な左右の匂い濃度の検出が方向の修正とブルームの捕捉に重要であること示唆するものである。

5. 考 察

5.1 イオン源探索ロボット

本稿では、神経回路の解析の進むカイコガの匂い源探索アルゴリズムを評価するための、昆虫サイズの移動ロボットの開発を目的とした。そして、必要とされる五つの要求の達成を目指した。1)「同等のセンサを持つこと」については、匂い物質の模擬として用いられている大気イオンを用い、検出器として大気イオンセンサを用いることでカイコガと同等の応答速度を得た。また、センサ出力を定量的に取り扱うことができるため、カイコガと同様の左右のセンサの差を利用したモデルの検証も可能になった。一方、センサの検出部のサイズや配置が、カイコガのスケールと比べ大きくなっているため、カイコガの触角と同様に検出部を櫛状にするなどして、表面積を広げ感度を高めることで、検出部全体を小型化する必要がある。2)「同等の運動能力を持つこと」、3)「同等のサイズを持つこと」については、小型のサーボモータと、ロータリエンコーダによるフィードバック制御を組み合わせることで、カイコガサイズの小型の筐体でありながらカイコガの運動能力を十分カバーできる運動特性と誤差 2.6% 以下の高精度の制御が可能となった。匂い源 (イオン源) 探索ロボットとしての本ロボットのサイズは、先行研究で報告されているものと比べ最小レベルである [4] [5] [9]。4)「大規模な神経回路モデルをシミュレートする外部のコンピュータと相互通信ができること」については、外部とのシリアル通信が可能な仕様とした。本稿では、モデル化したアルゴリズムはロボット上のマイコンに実装し、イオンセンサとロータリエン

コーダの出力は、モニタ用にシリアル通信を介して外部に出力したが、出力したセンサ情報を外部で処理し、運動指令をロボットへ入力することで、より複雑な神経回路モデルの検証も可能である。最後に、5)「複数感覚、特に視覚情報を持つこと」であるが、ロボットのサイズが限られているため、カメラの追加は難しい。そこで、ロータリエンコーダの出力を利用した運用を考えている。昆虫一般の運動にとって、オプティックフローは自身の運動状態を知る上で重要な情報であり、提案されているカイコガの嗅覚・視覚統合モデルも、オプティックフローを用いている [10]。したがって、カイコガが床面のオプティックフローを参照しているのであれば、ロータリエンコーダの値から直進・旋回成分を算出し、仮想的なオプティックフローを求めることができる。また、壁面のような高い位置のオプティックフローを参照しているのであれば、Fig. 11 の軌跡に示すように、ロータリエンコーダ出力を利用したオドメトリにより、固定された環境である風洞内の現在位置を計算できれば、壁面との距離からオプティックフローを計算し、探索アルゴリズムに加えることができる。以上の点から、試作したロボットは、カイコガの神経回路モデルをもとにした匂い源探索アルゴリズムの検証に必要な仕様を達成できたと考える。

5.2 匂い環境

製作したイオンセンサを用いて、風洞内の大気イオンの分布を計測した。その結果、イオン源に近い上流と下流では、センサで計測された大気イオン濃度の時系列変化が異なり、より大気イオン濃度の低い下流では離散的な分布を示した。この条件は、先行研究で報告されている匂い物質の分布と同等であり、不連続かつ幅広い頻度で受容する匂い情報にも適応可能な昆虫の匂い源探索アルゴリズムを検証するのに適している。また、本実験で使用した風洞は、実際のカイコガのフェロモン源探索行動の行動解析にも使用しているもので、ロボットの運動とカイコガの実際の行動を比較・検証することができる。

5.3 アルゴリズムの評価

二つの匂い源探索アルゴリズムを実装して定位実験を行った結果、左右のセンサの出力差を考慮したモデル(2)では、10 例すべてでイオン源への定位に成功し、考慮しないモデル(1)に比べ、有意な走行距離の減少と所要時間の短縮が見られた。このことから、左右の触角が受容する濃度差によるサージ (Fig. 1) における方向制御が、効率的な定位に重要であると考えられる。その一方で、左右のセンサ出力の差を考慮しないモデル(1)であっても、10 例中 7 例で定位に成功していることから、ジグザグターン・ループも、ブルームの外からブルーム内に復帰する上で十分な機能をもつと考えられる。このように、アルゴリズムに加えた要素と定位行動との関係を解析することで、加えた要素の機能を理解することも可能である。

5.4 今後の展望

まず、ハードウェアの改良として、本稿ではロボットに電源を有線で外部供給したが、カイコガは回転など複雑な運動を行うため、電池駆動として完全に自由に動作できるようにする予定である。そして、風洞内の大気イオンの分布と匂い物質の分布を等しく扱うために、イオンセンサおよび、触角電位計測を用いて、最適なイオン発生器の電圧と匂い物質の濃度の関係を

導き出し、匂い源探索アルゴリズムの実環境評価系を確立する。

この後に、試作したロボットを用いて、先行研究で提案されている複数感覚統合モデルを実装し、定位成功率、定位速度等の性能を比較・検証する。また、カイコガの行動は常に固定されたパターンではなく、神経修飾物質によって行動発現の閾値が動的に変化することが報告されている[16]。本稿で示した実験では、行動を開始するセンサの閾値を 10 [mV] と設定したが、これを動的に変えることで神経修飾物質と同等の効果を再現できるので、環境に応じた行動修飾についても検証を進める予定である。

6. 結 論

カイコガの匂い源探索アルゴリズムを実環境で評価するための、昆虫サイズの移動ロボットを開発した。匂い物質と触角の模擬として、大気イオンとイオンセンサを用いることで、高速かつ安定したセンサ出力が得られた。ロボットは、カイコガの歩行能力を十分カバーする駆動力と、ロータリエンコーダによるフィードバック制御により、高い精度で行動の再現が可能であり、外部との通信機能により、将来的に大規模な神経回路ネットワークとリンクすることができる。また、ロータリエンコーダの出力から、オプティカルフローに相当する視覚情報を仮想的に得ることで、複数感覚統合についても検証が可能である。実際に風洞内で探索行動の試験を行った結果、左右のセンサの出力の差に基づく方向決定により、効率的にイオン源へ定位することが示された。この移動ロボットの開発により、今後カイコガの匂い源探索行動の神経メカニズムの解明が進み、工学的再現と応用へつながると考えられる。

謝 辞 大気イオンを用いた実験やイオンセンサの回路について、Mark A. Willis 博士 (Case Western Reserve University) の多大な協力を得た。ここに深く謝意を表する。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究「身体・脳・環境の相互作用による適応的運動機能の発現—移動知の構成論的理解—」(領域番号 454) の支援による。

参 考 文 献

- [1] J. Murlis and C.D. Jones: "Fine-scale structure of odour plumes in relation to insect orientation to distant pheromone and other attractant sources," *Physiological Entomology*, vol.6, pp.71-86, 1981.
- [2] 神崎亮平: "昆虫の神経系と適応行動", *日本ロボット学会誌*, vol.23, no.1, pp.27-31, 2005.
- [3] B. Webb: "Robots in invertebrate neuroscience," *Science*, vol.417, pp.359-363, 2002.
- [4] B. Webb, R. R. Harrison and M.A. Willis: "Sensorimotor control of navigation in arthropod and artificial systems," *Arthropod Structure and Development*, vol.33, pp.301-329, 2004.
- [5] R. Kanzaki, S. Nagasawa and I. Shimoyama: "Neural basis of odor-source searching behavior in insect microbrain systems evaluated with a mobile robot," *Bio-mechanisms of swimming and flying*, Springer-Verlag Tokyo, pp.155-170, 2004.
- [6] S. Yue and F.C. Rind: "A collision detection system for a mobile robot inspired by the locust visual system," *Proceedings of the 2005 International Conference on Robotics and Automation*, pp.3832-3837, 2005.
- [7] R. Kanzaki, N. Sugi and T. Shibuya: "Self-generated Zigzag

- Turning of *Bombyx mori* Males during Pheromone-mediated Upwind Walking," *Zoological Science*, vol.9, pp.515-527, 1992.
- [8] R. Kanzaki, N. Ando, T. Sakurai and T. Kazawa: "Understanding and reconstruction of the mobilization of insects employing multiscale biological approaches and robotics," *Advanced Robotics*, vol.22, pp.1605-1628, 2008.
- [9] Y. Kuwana and I. Shimoyama: "A Pheromone-Guided Mobile Robot that Behaves like a Silkworm Moth with Living Antennae as Pheromone Sensors," *The International Journal of Robotics Research*, vol.17, no.9, pp.924-933, 1998.
- [10] N. Ando, A. Yamashita, W. Matsuura, H. Kose, H. Takahashi and R. Kanzaki: "Visual and odor integration for high efficacy of odor searching tasks based on the silkworm," *Proceedings of the 2nd International Symposium on Mobiligence*, pp.227-230, 2007.
- [11] M. V. Srinivasan and S. Zhang: "Visual motor computations in insects," *Annual Review of Neuroscience*, vol.27, pp.679-696, 2004.
- [12] K.A. Justus, J. Murlis, C. Jones and R.T. Cardé: "Measurement of odor-plume structure in a wind tunnel using a photoionization detector and a tracer gas," *Environmental Fluid Mechanics* vol.2, pp.115-142, 2002.
- [13] R.S. Vetter, A.E. Sage, K.A. Justus, R.T. Cardé and C.G. Galizia: "Temporal integrity of an airborne odor stimulus is greatly affected by physical aspects of the odor delivery system," *Chemical Senses*, vol.31, pp.359-369, 2006.
- [14] J. Murlis, M.A. Willis and R.T. Cardé: "Spatial and temporal structures of pheromone plumes in fields and forests," *Physiological Entomology*, vol.25, pp.211-222, 2000.
- [15] 長門研吉: "質量分析法による大気圧負イオン反応の解析", *エアロゾル研究*, vol.18, no.1, pp.15-17, 2003.
- [16] L. Gatellier, T. Nagao and R. Kanzaki: "Serotonin modifies the sensitivity of the male silkworm to pheromone," *Journal of Experimental Biology*, vol.207, pp.2487-2496, 2004.

勝又聡一郎 (Souichirou Katsumata)

2007 年東京大学工学部機械情報工学科卒業。2009 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻修士課程修了。在学中は、昆虫サイズの移動ロボットプラットフォームの開発に従事した。2009 年ソニー株式会社入社、現在に至る。

安藤規泰 (Noriyasu Ando)

2004 年筑波大学大学院博士課程生物科学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員、2005 年東京大学大学院情報理工学系研究科産学官連携研究員、2006 年同大学先端科学技術研究センター特任助手を経て、2007 年同センター助教となり現在に至る。昆虫の飛行、および生体-機械融合システムの研究に従事。博士(理学)。日本動物学会、日本比較生理生化学会、国際神経行動学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)

神崎亮平 (Ryohei Kanzaki)

1986 年筑波大学大学院生物科学研究科博士課程修了。1987 年アリゾナ大学神経生物学研究所博士研究員。1991 年筑波大学生物科学系助手、講師、助教授。2003 年同教授。2004 年東京大学大学院情報理工学系研究科知能機械情報学専攻教授。2006 年東京大学先端科学技術研究センター生命知能システム分野教授。神経行動学、生体-機械融合システムに関する研究に従事。国際神経行動学会、日本動物学会、日本比較生理生化学会等会員。理学博士。