

AR タグを用いたミツバチ歩行軌跡同時追跡アルゴリズムの検討

Development of Simultaneous Tracking Algorithm
for Multiple Honeybees Walking Trajectories Using AR Tag高橋 伸弥[†] 橋本 浩二[†] 前田 佐嘉志[†] 鶴田 直之[†] 藍 浩之[‡]
Shinya Takahashi Koji Hashimoto Sakashi Maeda Naoyuki Tsuruta Hiroyuki Ai

1. はじめに

採餌から帰巢したミツバチ (採餌バチ) は、尻振りダンスと呼ばれる翅を振動させながら尻を振って歩く動きやその歩行軌跡の形状・大きさなどで蜜源の所在地を仲間のミツバチに伝えていることが知られている^[1]。このようなミツバチの行動様式は、情報交換のための一種の「言語」と考えられるものであり、このメカニズムを解明することは、ミツバチの社会性を理解するうえで生物学上の重要なテーマとなっている^[2]。またミツバチは成長の過程でその役割を変化させるという特徴を持つことが知られている^[3]。例えば、羽化後のミツバチは、初めは巣内の清掃や幼虫の世話などを行い、その後、巣外へと採餌に出かけ、仲間に尻振りダンスで蜜源を知らせるようになる。しかし、このようなミツバチの成長の過程において、ダンス行動の形成がどのように進んでいくのかについては未だ明らかにされていない。この問題に対し、我々はこれまで、RFID タグによる出巣・帰巢の自動記録と画像処理による歩行軌跡自動追跡とを組み合わせ、羽化直後のミツバチの行動を解析するシステムの開発を進めてきた^[4]^[5]。画像処理により、動画内での軌跡を追跡することがある程度可能となったが、RFID 読み取り結果と動画から検出した歩行軌跡との対応付けは目視で行う必要があった。これを自動化するには、画像処理による個体識別が不可欠である。そこで本研究ではこの問題を解決する方法の 1 つとして、AprilTag^[6]と呼ばれる AR タグを用いて個体識別を行うことを検討する。

AR タグを用いて社会性昆虫の行動解析を行っている研究例としては、スイスのローザンヌ大学のアリ約 100 匹を対象にした例^[7]やドイツのベルリン自由大学の数百のミツバチを対象にした例^[8]などがある。いずれも画像処理により AR タグを読み取ることで個体識別および行動追跡を行っているが、本研究のように RFID タグによる出巣・帰巢の記録をとることは行っていない。また本研究では、すべての個体の全行動ではなく、羽化後のミツバチの行動変化、とりわけ採餌行動と巣内行動の関係を観察することに焦点を当てている点で大きく異なっている。

2. RFID タグ付きミツバチの行動記録システム

図 1 に、実験に使用した観察巣箱と RFID 読み取り装置を示す。観察巣箱としては巣板 1 枚を用意し、両面を透明なアクリル板で覆っている。巣板内のミツバチの行動を記録する動画は、焦点距離 8mm の望遠ミニレンズを装着した CMOS カメラモジュールを接続したボード型小型 PC (RaspberryPi3) を使用して、68cm 離れた地点から撮影し

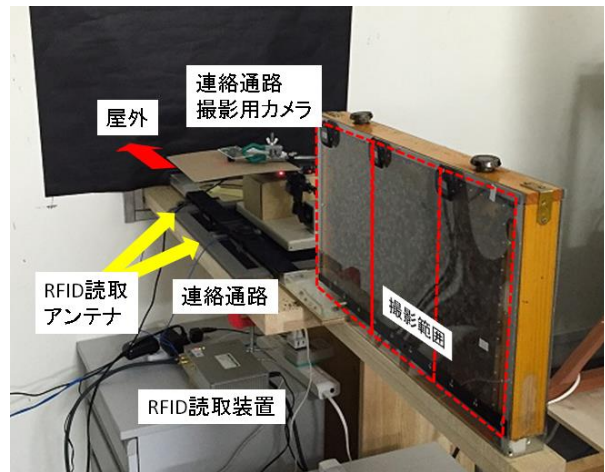


図 1 ミツバチの行動追跡システム (2016 年度版)

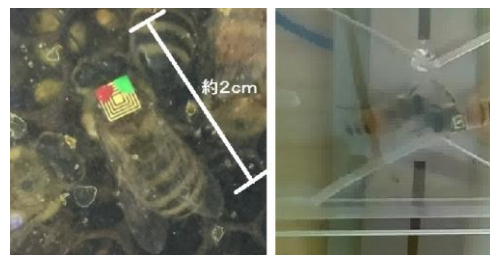


図 2 RFID タグをつけたミツバチ個体

た。図 1 に示すように表・裏それぞれ撮影範囲を 3 分割して計 6 台のカメラを用いている。撮影動画のサイズは 1920x1080 とし、フレームレート 15fps の h264 形式で記録した。

読み取り装置及び読み取りアンテナには、昨年度と同じくソーバル社製の UP4-1000-J2 及び AN-UDUL1-mmxc を使用し、外部へと通じる連絡通路の窓側と巣箱側の 2 か所に 2 枚のアンテナを設置した^[5]。使用した RFID タグは日立化



図 3 AprilTags の例

† 福岡大学工学部, Dept. Eng. Fukuoka Univ.

‡ 福岡大学理学部, Dept. Sci. Fukuoka Univ.

表 1 予備実験の撮影条件

条件	AprilTag サイズ (mm)	使用 レンズ	撮影範囲 (cm)	AprilTag 画素サイズ (px)
1	3~3.5	f8mm	16×27	28×28
2	5~6	f8mm	16×27	40×40
3	3~3.5	f12mm	10×18	38×38

成製の UHF タグ IM5-PK2525 (大きさ 2.5mm × 2.5mm × 0.4mm) である (図 2)。RFID タグだけでは、目視での区別ができないため、図 2 左に示すように色をつけて区別したり、図 2 右のようにタグの上に番号を印字したシールを貼りつけたりといった工夫が必要となる。

3. AprilTag による個体識別

3.1 AprilTag ライブラリ

AprilTag は、Olson によって提案された AR(Augmented Reality)用の 2 次元バーコードである^[6]。オープンソースとしてライブラリが公開されており、C++から利用できる。図 3 に AprilTag ライブラリで提供されているタグの例を示す。それぞれ左の数字が $n \times n$ の画素サイズを示しており、右の数字がパターン間の最小ハミング距離を示している。本研究では 242 種のパターンを識別可能な Tag25h7 のコードを使用し、これらを観察対象のミツバチ個体に取り付けた RFID タグ上に貼り付けて、画像処理によりミツバチ個体番号を検出することを試みる。

3.2 予備実験

大小 2 種のサイズのタグを作成し、撮影条件も変えて、どの程度タグが検出できるかを確認する予備実験を行った。撮影条件を表 1 に示す。画像サイズはいずれも 1920x1080 であり、動画から静止画を切り出して実験を行った。

図 4~6 に各条件下におけるタグ検出結果の例を示す。各条件とも動画から切り出した 5 フレームで検出実験を行った結果、条件 1 で適合率 93.2%、再現率 23.7%、条件 2 で適合率 96.2%、再現率 100%、条件 3 では適合率・再現率ともに 100%となった。ここで、適合率は正解検出数/検出総数、再現率は正解検出数/正解総数として求めている。条件 2、3 では検出対象のタグが少なかったことが、再現率が高くなった理由と考えられるが、条件 1 で 8 割近くのタグが検出できていないことから、AprilTag の画素サイズが小さすぎると検出が難しいことがわかる。ミツバチ個体に AprilTag を装着する場合、RFID タグと同程度のサイズでタグを作成する必要がある、大きすぎると個体の行動の邪魔になることが予想されることから、タグのサイズは大きくせず撮影範囲を狭めて高解像なタグ画像を得る条件 3 が望ましいといえる。ただし、この場合、巣板全体をカバーするには、カメラの台数を増やさなくてはならないこと、またその結果、撮影データが増大することに注意が必要である。

3.3 AprilTag を用いたミツバチ歩行軌跡の同時追跡

図 5 や図 6 で示したように AprilTag の検出精度が十分に高ければ、動画の各フレームにおいて AprilTag を検出し、それらを時間軸上でつなぎあわせれば、軌跡の検出が可能

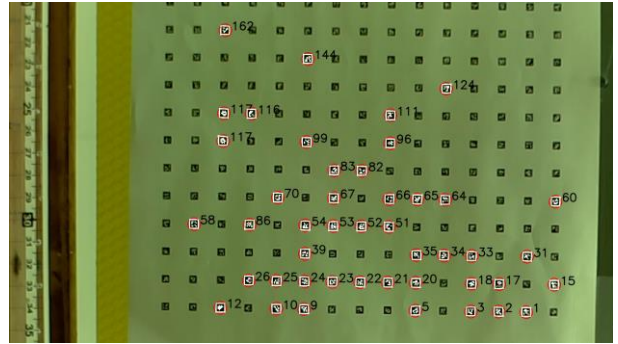


図 4 条件 1 (AprilTag サイズ小, 撮影範囲大) でのタグ検出結果

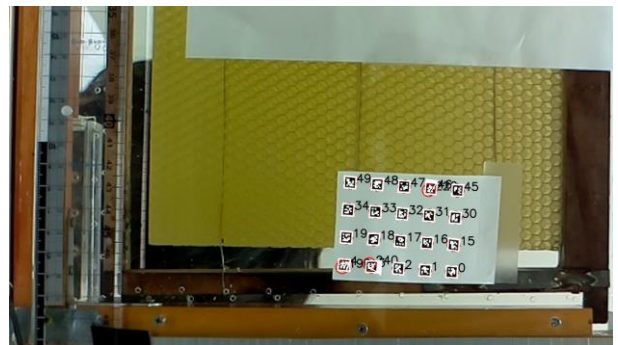


図 5 条件 2 (AprilTag サイズ大, 撮影範囲大) でのタグ検出結果

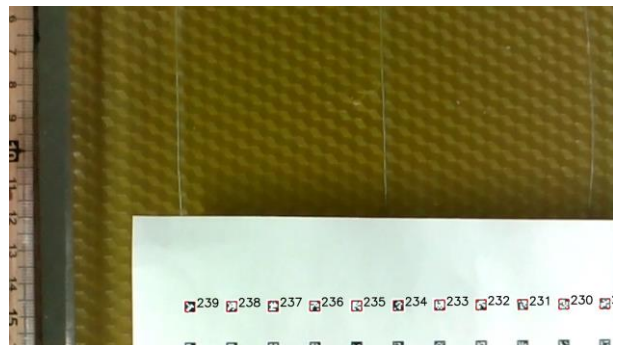


図 6 条件 3 (AprilTag サイズ小, 撮影範囲小) でのタグ検出結果

である。しかし、動き回っているミツバチ個体では AprilTag の検出精度が低下することが予想されるため、複数軌跡同時追跡アルゴリズム^[4]と併用することを考える。このアルゴリズムの基本的なアイデアは、ミツバチの巣内の行動を撮影した動画の各フレームから、予め学習しておいた Haar-like 特徴を用いてミツバチ個体領域を検出し、隣接するフレーム間において検出された領域の対応関係を求め、最終的にそれらを繋ぎ合わせることで、複数の軌跡を同時に追跡しようというものである。このとき、検出されたミツバチ領域の周辺でタグ領域を探索し、タグつきの個体のみを対象とすることができる^[5]。本研究では、検出

表 2 使用した動画像

動画	AprilTag 番号.	画像内 ミツバチ個体数	フレーム数
A	11,12	約 150	233
B	8,11,12	約 140	237
C	2,18	約 120	230

表 3 各フレームごとの AprilTag の検出結果

動画	AprilTag 番号.	正解 検出数	誤検 出数	正解数 (フレーム数)	検出率
A	11	51	1	233	21.9%
	12	4	1	233	1.7%
B	8	0	0	237	0.0%
	11	53	4	237	22.4%
	12	0	0	157	0.0%
C	2	0	0	231	0.0%
	18	0	0	231	0.0%

表 4 軌跡追跡アルゴリズムによる AprilTag の検出結果

動画	AprilTag 番号.	正解 検出数	誤検出 数	検出率
A	11	101 (233)	7	43.3% (100%)
	12	2 (233)	0	0.9% (100%)
B	8	0	0	0.0%
	11	147 (237)	9	62.0% (100%)
	12	0	0	0.0%
C	2	1 (231)	1	0.4% (100%)
	18	0	0	0.0%

されたミツバチ領域の周辺で AprilTag の検出を行うことで、歩行軌跡追跡結果の個体識別を実現する。

4. 実験

4.1 AprilTag を用いたミツバチの検出

ミツバチ 20 個体に、縦横 3mm サイズの AprilTag を装着して検出実験を行った。撮影条件は 3.2 に示した条件 3 と同様である。実験に用いた動画は、2 または 3 個体のタグ付きミツバチが撮影された約 10 秒間の動画像 3 種類である。うち 2 つは同じ範囲を撮影したもの（図 1 単板右（裏側手前）の画像。以下、動画 A,B とする）、1 つは異なる範囲を撮影したもの（図 1 単板左（表）側連絡通路側。以下動画 C とする）となっている。表 2 に各動画で撮影された AprilTag の番号と画像内に写っているミツバチ個体数、動画のフレーム数を示す。なおここではフレームレートは 25fps とした。

まずそれぞれの動画の各フレームに対して、AprilTag の検出を試みたところ、表 3 のような結果となった。表からわかるように、まったく検出できないタグも存在した。比較的検出できていた 11 番のタグの場合でも、検出率は約 22% となった。これは解像度が不十分であったためだけでなく、動画から切り出した静止画像では不鮮明な箇所が多かったためと思われる。

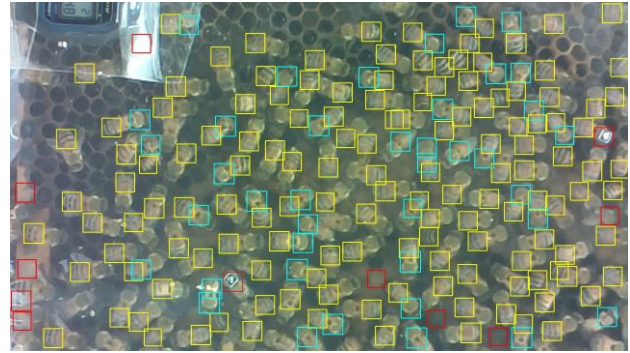


図 7 ミツバチ個体領域の検出結果例：動画 A に対する結果。黄色い枠は正解、水色は腹部以外の検出、赤は誤検出を示す。

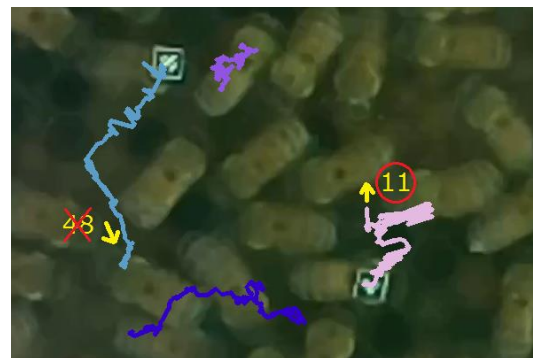


図 8 タグつきミツバチの歩行軌跡検出結果（動画 B の 11 番の例。画像中央付近を拡大）

4.2 AprilTag を用いたミツバチ歩行軌跡の追跡

次に同じ動画像に対して、3.3 に述べた AprilTag 付きミツバチの歩行軌跡追跡アルゴリズムを適用した。ミツバチ個体領域検出に用いた Haar-Like 特徴は、文献[4]と同じものである。図 7 に、動画像内の 1 フレームに対する、ミツバチ領域の検出例を示す。この例では、検出正解率（適合率）94.6%，検出精度（再現率）73.3% となっている。

各フレームでミツバチ個体を検出したのち、検出領域周辺で AprilTag 検出を行い、追跡結果の軌跡にその番号を付与する。表 4 は、検出された AprilTag の個数と検出率を示したものである。正解検出数としてカッコつきで示した値は、同一軌跡内であれば同一のタグであるとみなした場合の検出数（今回の例では総フレーム数に同じ）である。

図 8 に番号つき追跡結果の例を示す。右下の軌跡が、正しく番号つきで軌跡を追跡できた結果となっている。他にも動画 A の 11 番、12 番、動画 C の 2 番の個体も同様に検出することができた。一方、動画 B の 8 番、12 番、動画 C の 18 番は検出することができなかった。これらの例は目視で確認しても判別が難しく、より高精細な画像を撮影する必要があると考えられる。

また追跡結果の中には、異なる個体のタグを誤検出してしまいう例が例（図 8 中央上下）や、タグつきの個体として軌跡検出できたもののタグ番号を誤認識してしまう例（図

8 左) が見られた。今後は、このような誤検出に対する対策を講じる必要がある。

5. おわりに

本稿では、これまで著者らが提案してきたミツバチ歩行軌跡の同時追跡アルゴリズムに、AR タグの一種である AprilTag の検出処理を組み込んで、検出結果の軌跡の個体識別を行うことを検討した。予備実験より、AprilTag を検出するためには1つのタグのサイズが 40×40 画素程度になる画像解像度が必要であることが分かった。次にミツバチ個体に AprilTag を装着して実験を行った結果、フレームごとに AprilTag を検出するだけでは精度が不十分なことが示された。さらに、ミツバチ歩行軌跡の追跡処理結果と AprilTag の検出結果とを組み合わせることで、歩行軌跡の個体識別が可能なが確認できた。このことから、従来手法の課題であった RFID 読み取り結果と検出軌跡との対応付けや複数の動画からの検出軌跡間の対応付けが可能になると考えられる。

本稿は、AprilTag が利用可能か否かを確認するための基礎的な調査を行ったものである。今後はさらに長時間の動画に対しての追実験が必要である。また誤検出・未検出の軌跡への対処法について検討する必要があるが、より高精細な画像を取得することで、さらに精度を向上させることができると考えている。その場合、莫大なデータ量・処理量になることが予想されるが、現状における観察者の目視による膨大な作業の負担は大幅に低減でき、生物学上の新たな発見にもつながるものと期待される。

参考文献

- [1] Frisch, von K., “The tail-wagging dance as a means of communication when food sources are distant”, in Frisch, K. ed., *The dance language and orientation of bees*, Cambridge, MA, pp. 57–235, Belknap Press of Harvard University (1967).
- [2] Ai, H. and Kishi, N., “How does the waggle dance communication mature after the adult emergence?”, in *Proc. of the 11th International Congress of Neuroethology*, pp. PO–1174 (2014).
- [3] Seely, T. D., “ミツバチの知恵 ミツバチコロニーの社会生理学”, 文一総合出版 (1989).
- [4] 高橋伸弥, 井手翔太, 鶴田直之, 藍浩之, “ミツバチ歩行軌跡の複数個体同時追跡アルゴリズムを用いた尻振りダンス軌跡の抽出”, *人工知能学会全国大会論文集*, 第 29 巻, pp. 1-4 (2015).
- [5] 高橋伸弥, 橋本浩二, 前田佐嘉志, 藍 浩之, 鶴田直之, “RFID タグをつけた複数ミツバチの巣箱内歩行軌跡の検出”, *情報処理学会全国大会講演論文集*, 1C-04 (2016).
- [6] Olson, E., “AprilTag: A robust and flexible visual fiducial system,” *Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp.3400-3407 (2011).
- [7] Mersch, D.P., Crespi, A., Keller, L., “Tracking Individuals Shows Spatial Fidelity Is a Key Regulator of Ant Social Organization,” *Science*, Vol. 340, Issue 6136, pp. 1090-1093 (2013).
- [8] Wario, F., Wild, B., Margaret, J.C., Rojas, R. and Landgraf, T., “Automatic methods for long-term tracking and the detection and decoding of communication dances in honeybees”, *Frontiers in Ecology and Evolution*, Vol. 25, pp. 1–14 (2015).