

# 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

## Extraction of Waggle Dance Trajectories Using A Simultaneous Tracking Algorithm for Multiple Honeybees

高橋 伸弥<sup>\*1</sup>  
Shinya Takahashi

井手 翔太<sup>\*1</sup>  
Shouta Ide

鶴田 直之<sup>\*1</sup>  
Naoyuki Tsuruta

藍 浩之<sup>\*2</sup>  
Hiroyuki Ai

<sup>\*1</sup> 福岡大学工学部  
Faculty of Engineering, Fukuoka Univ.

<sup>\*2</sup> 福岡大学理学部  
Faculty of Science, Fukuoka Univ.

Analyzing communications performed by honeybee workers in their hive is one of the most important issues to reveal a mechanism of honeybee's language, but these analyses have been usually conducted by observing long-time video data and extracting honeybee's walking trajectories manually. For a systematic and theoretical analysis of honeybee's communication, we developed an automatic tracking system of multiple honeybees based on image recognition. In this paper, we show experimental results of tracking honeybees and extracting waggle dances from tracking data.

### 1. はじめに

採餌して帰巢したミツバチ（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や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[Frisch 1967]. 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[Ai 2014].

ミツバチの行動解析に関する研究は、半世紀近くの歴史があるが、ビデオカメラ等の記録装置の高性能化に伴い、近年では長時間撮影した動画像を用いて行われるようになってきた。しかし、撮影された動画像からミツバチの歩行軌跡を追跡する作業は、人手により目視で行われ、多大な労力を要するものとなっている[Tauz 2010].

これに対し、背中に色を塗るなどマーカーをつけたミツバチを対象として、比較的簡易な画像処理を用いて追跡した結果により行動解析をする手法[Feldman 2003]が提案されているが、対象とするミツバチが数百となる場合には現実的ではない。またマーカーを用いずに画像処理によってミツバチ個体を追跡し、複数のミツバチの行動をモニタリングする手法 [Khan 2004], [Kimura 2011]も提

案されているが、密集した巣内における複数のミツバチの歩行軌跡を同時に追跡することは、個体同士の接触や他の個体による遮蔽により軌跡が交差したり消失したりするため非常に難しい問題となっている。一方、ミツバチ以外の小型生物の追跡手法として、個々の個体を識別することで、交差や遮蔽に対してロバストに軌跡を追跡する手法 [Escudero 2014] が提案されているが、対象とする数が 10 個体程度と少なく、ミツバチの巣内のような密集した環境でも有効かどうかは不明である。

本研究は、密集した巣内の数百のミツバチを画像処理により自動的に、さらに同時に追跡する手法について検討するものである。本稿では、複数軌跡を同時追跡する手法[高橋 2015]の精度評価を行い、さらに追跡結果の軌跡群の中から尻振りダンスを行っているミツバチのみを抽出することを試みる。

### 2. 提案手法

複数軌跡同時追跡アルゴリズム[高橋 2015]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像の各フレームからミツバチ個体領域を高精度に検出し、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。以下、ミツバチ領域の検出手法とその後の複数軌跡検出法について述べ、

その応用としての尻振りダンス軌跡判定法について説明する。

### 2.1 ミツバチ領域の検出

ミツバチの個体領域の検出には、Haar-Like 特徴を AdaBoost アルゴリズムで学習させたカスケード型分類器を用いる [Viola2001]. 学習させるサンプルとしては、腹部の縞模様を正解サンプルとする. また今回は巢内の画像のみを対象としていることから、不正解画像はミツバチ以外の背景画像から切り出すこととする. 図 1 に、正解サンプル、不正解サンプルの例を示す.



図 1 学習サンプルの例

### 2.2 複数ミツバチの同時追跡

図 2 は、隣接するフレームにおけるミツバチ領域検出結果の対応関係を例示したものである. 時刻  $t$  における  $i$  番目の検出領域を  $b_i^{(t)}$  とすると、フレーム間での最適な対応付け問題は、重複を許さずに求めた  $i, j$  の組み合わせ  $c(i, j)$  に対して、 $b_i^{(t)}$  と  $b_j^{(t+1)}$  との間での類似度  $s(i, j)$  の総和を最大にするような問題として以下のように定式化できる.

$$\max \sum_{i,j} \{s(i, j) \cdot c(i, j)\},$$

$$\text{s.t. } c(i, j) \in \{0, 1\}, \sum_{i=1}^N c(i, j) = 1, \sum_{j=1}^N c(i, j) = 1.$$

この問題は、2 集合間の対応関係を表した 2 部グラフにおける最適マッチング問題と見做すことができるため、ハンガリー法 [Kuhn1955] を用いて  $O(N^3)$  で解くことが可能である. ハンガリー法では 2 つの集合の要素数が等しい必要があるが、各フレームで検出される領域数は異なるため、隣接するフレームでの領域数が等しくなるようダミーの領域を追加しておくこととする. また領域間の類似度の計算においては、以下の式を用いている.

$$s(i, j) = (1 - h(i, j)) \times \exp\left(-\frac{d(i, j)^2}{2\sigma^2}\right)$$

ここで、 $h(i, j)$  は、検出領域の中心部 (サイズ 24x24) 間のヒストグラムを Bhattacharyya 距離に基づき比較した距離であり、0~1 の値をとる. また  $d(i, j)$  は、検出領域の中心座標間のユークリッド距離を示し、第 2 項の指数部で距離制限を与え

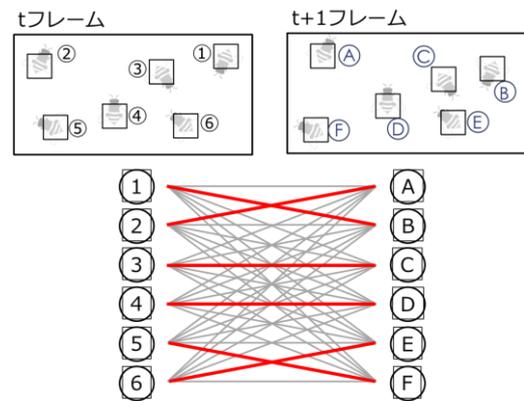


図 2 隣接するフレーム間における対応付け

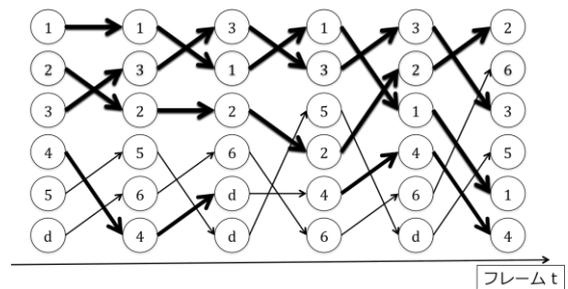


図 3 対応付け結果に基づく複数軌跡の追跡

ている. なお  $\sigma$  の値はミツバチの移動速度を考慮し 7 とした. 以上の処理をすべてのフレームに対して行った後、対応付けされたそれぞれの領域を順にたどることで、複数の軌跡の同時追跡を行う (図 3). このとき、類似度 0 で対応付けされた領域は、軌跡追跡の対象外とする.

上記の手法で追跡された軌跡は、領域検出の失敗などが原因で断片的な軌跡になる場合があると予想される. そこで、追跡結果の軌跡のうち、終点時刻と始点時刻が一定の範囲内である軌跡に対して、終点・始点領域間で類似度を計算し、その最適なマッチングを、隣接フレーム間での領域マッチングの計算と同様にハンガリー法で求め、軌跡を接続する.

### 2.3 尻振りダンス軌跡の判定

図 4 は、ミツバチのダンス軌跡の例である. 採餌バチは蜜源までの距離と方角を直進歩行の長さ

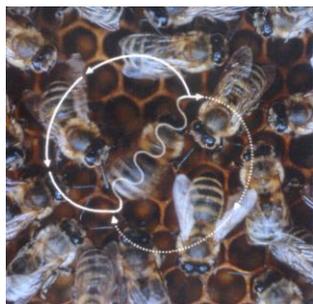


図4 尻振りダンス軌跡の例

(<http://dx.doi.org/10.1371/journal.pbio.0020216>)

その直進の体軸方向により仲間伝える。直進歩行の際、翅を振動させながら尻を振ってジグザグに歩くため、尻振りダンスと呼ばれる。尻振りダンスの特徴として、腹部の移動量が大きいことと、断続的に行われることが挙げられる。従って尻振りダンス軌跡は、大きな画素変化が断続的に含まれている軌跡であると考えられる。そこで、フレーム間の差分画像を重み付け加算した画像に対し、閾値処理により2値化した後、膨張収縮処理とラベリング処理により小領域を除去することで尻振りダンス領域を検出する。その後、2.2節で説明した手法で得られた追跡軌跡データにおいて、尻振りダンスの領域が連続して含まれているような追跡データを尻振りダンスの軌跡として抽出する。

### 3. 実験

#### 3.1 複数ミツバチの同時検出

ミツバチ検出に使用するカスケード型分類器は、OpenCV2の `traincascade` を用いて Gentle Boosting 法により学習した。学習に用いた正解画像、不正解画像の数はそれぞれ 2000 枚である。ミツバチの巣内を撮影した動画から数フレームを抜き出した後、ミツバチの腹部画像を手動で切り出して、それらを回転させた画像も合わせて正解画像とした。

提案手法を用いて、30秒間900フレームの入力動画（サイズ 1920x1080）に対する実験を行った。カスケード型分類器を用いてミツバチ領域の検出を行った例を図5に示す。図5で検出された385の領域のうち、腹部を検出できたものが274、誤って背景を検出したものが47、胸部を検出したものが64であった。また、検出が出来なかった



図5 カスケード分類器による検出結果

ものが17であった。その多くは、フレームの枠にミツバチの身体が隠れ全て見えていないものであった。他3フレームに対し、同様の検証を行った結果、ミツバチ領域の平均検出正解率は92.4%、平均検出精度は74.0%となった。

#### 3.2 複数ミツバチの同時追跡

歩行軌跡同時追跡実験の結果を図6に示す。ここでは、11022個の全ての軌跡追跡結果の中から、追跡軌跡長上位50個の軌跡を示している。図より、尻振りダンスに特徴的なジグザグ歩行や回転歩行をしている軌跡が追跡できていることがわかる。また、ミツバチ歩行軌跡を目視で追跡した正解軌跡とプログラムにより追跡された軌跡とを照合した結果を図7に示す。正解軌跡全体に対し、

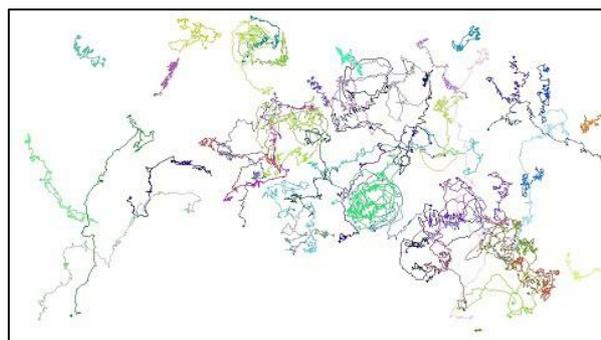
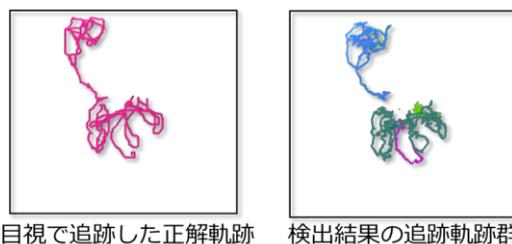


図6 歩行軌跡同時追跡結果



目視で追跡した正解軌跡

検出結果の追跡軌跡群

図7 検出結果の追跡軌跡の例

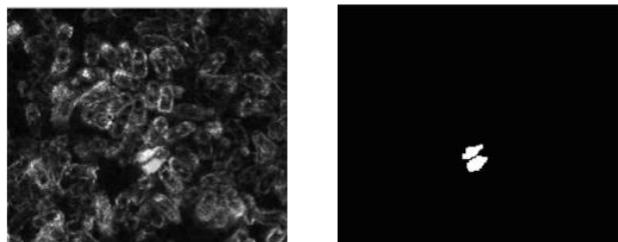


図 8 重み付け差分画像 (左) と閾値処理による尻振りダンス領域 (右)

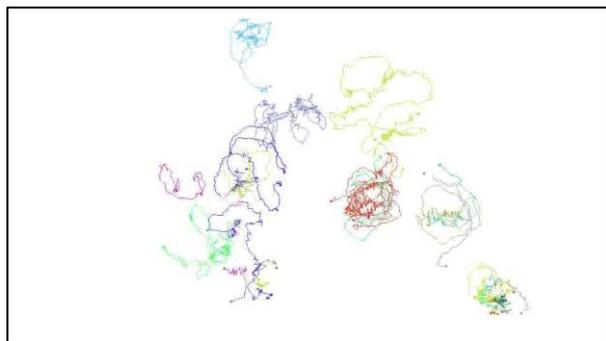


図 9 尻振りダンス軌跡の検出

断片的にでも追跡できた割合をカバー率として評価すると、図 7 の例では 85.6%となった。同様の検証を他に 3 回行った結果、平均カバー率は 96.8%となった。

### 3.3 尻振りダンス軌跡の検出

入力動画のあるフレームに対し差分画像の重み付け加算処理と閾値による 2 値化処理を行った例を図 8 に示す。左の図は、重み付け差分処理の結果であり、その後、閾値処理を行って尻振りダンス領域を抽出した結果が右の図である。全てのフレームに対して同様の処理を行った後、追跡結果の軌跡と照合を行ったところ、28 個の軌跡が尻振りダンス軌跡として判定された。そのうち、25 個の軌跡が尻振りダンスをしているミツバチであり、正解率は 89.3%となった。誤判定となった 3 個の軌跡は全て尻振りダンスに追従するミツバチであり、尻振りダンスと同様、動きの変化が大きな軌跡であった。図 9 に尻振りダンス軌跡として判定された 28 個の軌跡を示す。

## 4. まとめ

本稿では、ミツバチの画像特徴を用いたカスケード型識別器によりミツバチの位置を検出し、隣接フレームにおける検出領域間の最適マッチングを

行うことで軌跡を追跡する手法の有効性を検討した。さらに本手法の行動解析への応用として、差分画像における変化量の大きな領域をダンス領域と見なし、ダンス領域が断続的に含まれている軌跡を尻振りダンス軌跡として検出することを試みた。

実験の結果、ミツバチ個体領域の検出正解率は 92.4%、検出精度は 74.0%となり、提案手法が検出の面で有効であることが示された。追跡処理では、96.8%の平均カバー率となったが、分断されている軌跡を今後どのように接続するかを検討する必要がある。尻振りダンス軌跡の判定では、正解率が 89.3%となった。今後は誤判定を削減する工夫として、差分画像だけでなく、形状特徴を併用することを検討している。

## 参考文献

- [Frisch 1967] K. von Frisch: The tail-wagging dance as a means of communication when food sources are distant. In: Frisch, K. editor. The dance language and orientation of bees. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press, pp. 57-235, 1967.
- [Ai 2014] H.Ai, N.Kishi: "How does the waggle dance communication mature after the adult emergence?," PO-1174, ICN/JSCPB, 2014.
- [Tauf 2010] J.Tauf (丸野内訳): "ミツバチの世界 個を超えた驚きの行動を解く," 丸善, 2010.
- [Feldman 2003] A. Feldman, T. Balch: Automatic identification of bee movement, Proc. of the 2nd International Workshop on the Mathematics and Algorithms of Social Insects, pp. 53-59, 2003.
- [Khan 2004] Z. Khan, et. al.: A Rao-Blackwellized Particle Filter for Eigentracking, Proc. IEEE Conf. CVPR, Vol. 2, pp.980-986, 2004
- [Kimura 2011] T. Kimura, et. al.: A new approach for the simultaneous tracking of multiple honeybees for analysis of hive behavior, Apidologie, Vol. 42, pp.607-61, 2011.
- [Escudero 2014] A. Pérez-Escudero, et. al.: idTracker: tracking individuals in a group by automatic identification of unmarked animals, Nature Methods, Vol. 11, pp.743-748, 2014.
- [高橋 2015] 高橋他: ミツバチ歩行軌跡の複数個体同時追跡アルゴリズムの検討, 情報処理学会全国大会講演資料集, 2015.
- [Viola 2001] P. Viola and M. J. Jones: Rapid Object Detection using a Boosted Cascade of Simple Features, Proc. IEEE Conf. CVPR, Vol. 1, pp. 511-518, 2001.
- [Kuhn 1955] H. W. Kuhn: The Hungarian Method for the Assignment Problem, Naval Research Logistics Quarterly, Vol. 2, pp.83-97, 1955.