

令和 2 年 5 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K18348

研究課題名(和文) シオマネキのナビゲーション：視覚と経路統合の相互作用とその社会的行動との共進化

研究課題名(英文) Navigation in fiddler crab: Interaction between visual orientation and path integration and its co-evolution with social behavior

研究代表者

村上 久 (Murakami, Hisashi)

東京大学・先端科学技術研究センター・特任助教

研究者番号：20755467

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：動物の空間認知における多感覚相互作用モデルとして、競合する各感覚情報の信頼度の重み付けが注目されている。しかし多くの動物の生活では時間的制約があり、その中で情報間に齟齬がある場合、経験的な重み付けは困難ではないか。本研究では、シオマネキというカニの逃避行動を研究対象とし、通常一致する巣穴の記憶情報と視覚の間に齟齬を提示する実験を行なった。結果として、提案したモデル(記憶に従いながら、視覚情報を絶えず探索・評価し、帰巣終盤でのみ利用)が従来仮説よりも支持された。この結果は、動物が想定外な状況にあるとき、経験的裏打ちを待たず、行為の最中にリアルタイムで情報を探索し意思決定することを示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、動物が想定外な状況(ここでは迅速な意思決定が必要で、かつ通常一致している感覚情報間に矛盾がある状況)にあるとき、各情報の信頼度の蓄積を待つことなく、特定の感覚情報から規定する運動プランに沿って、環境から与えられる不意の変化に即時対応し、運動をシフト可能な適応的戦略を取ることが示唆された。この意味で、本研究はスポーツなどにおける習慣的な素早い一連の身体動作において、いかに環境変化に対応した突然の運動遷移が可能かという議論に比較認知的モデルを与える。さらに将来的には、視覚により外乱を補う能力が、経路統合を主に実行する能力の中に埋め込まれた自律運動ロボットのデザインへの応用が見込める。

研究成果の概要(英文)：Previous studies suggest that foraging animals tend to combine guidance systems in a weighted manner. However, when subjected to rapid enforced decision-making, the animal may use alternative mechanisms. We here conducted experiment with fiddler crabs scuttling to their burrows when threatened, where we imposed homing errors by placing fake entrances (visual cues) and masking their true burrows (the goal of path integration (PI)). we found that PI and the visual cues in fiddler crabs are mutually exclusive and that the crab instantly shifts from one to the other if it approaches the end of the home vector, instead of combining systems in a weighted manner. Our findings suggest that when subjected to rapid enforced decision-making, animals can prepare action plans (PI in our case), and even launch, before completing the decision process, and decisions can be taken using real-time exploration for sensory cues (visual one in our case).

研究分野：認知科学

キーワード：シオマネキ 空間認知 ナビゲーション マルチモーダル情報処理 視覚 経路統合 逃避行動 比較認知

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

動物の驚くべきナビゲーション能力は、認知科学や神経行動学の他、ロボティクス等からも注目を集める。近年、経路統合や視覚などの、異なるモダリティからの情報が恒常的に競合する場合、動物は各情報の信頼度を重み付き平均化することで、それを解決すると考えられている (Wehner et al., J Comp Physiol A, 2016)。しかし、通常一致するモダリティ情報間に、環境変化などによって齟齬が生じる場合、経験に基づく信頼度の重み付けは困難ではないか。

こうした問題を考える上で、シオマネキというカニは逃走行動を取る時、経路統合を通して現在地と出発地(自身の巣穴)の間に動物の中で最も厳密な空間関係を形成すると考えられているため、格好の研究対象となり得る。このカニは干潟で、巣穴を中心に比較的近距离(<1m)で活動する。従来、外敵の出現を刺激とする自身の巣穴への迅速な逃避行動(<1秒)を行うとき、ランドマーク等の視覚情報を抑制し、経路統合に厳密に従うと考えられてきた。他方、この点に関して、本研究開始以前の我々の先行研究において、現実の巣穴(経路統合のゴール)を隠し、擬似巣穴(視覚的キュー)を見せることで、通常一致するはずの経路統合と視覚的キューの間に齟齬を提示する実験を行っていた。その結果、両巣穴が一定距離内(約5cm)にあるとき、逃避行動においても軌道を修正し擬似巣穴へと帰巣することがわかった。これは、他個体の巣穴への誤侵入を抑制しつつ情報間の齟齬を解消可能であることを示唆するものであった。ここから、カニは経路統合に従いつつも、視覚的キューを絶えず探索・評価し、帰巣終盤にそちらへと排他的にシフトすることが可能、との仮説を立てた。ただし、この先行実験では擬似巣穴を現実の巣穴中心に分布させていた。そのため、シオマネキが巣穴を十分に知覚可能な奥行きは4cm未満であることを考えると、視覚的キューはホームベクトルの終点付近で始めて知覚されたと考えるべきであり、従って、仮説を確かめるためには、ホームベクトル上の任意の位置で視覚的キューを知覚させた際の意思決定を見る必要があった。

2. 研究の目的

以上を踏まえ、本研究ではシオマネキの逃避行動を対象とし、通常はゆらぎ無く経路統合に従うが、視覚との間で齟齬が生じた場合、帰巣終盤における両者の排他的シフトによりこれを解消する、との仮説を実験的に検証することを主たる目的とした。それにより、逃避行動においては、主流であるが経験的蓄積を必要とするベイズモデルと変わるマルチモデル相互作用が必要であることを提案した。

3. 研究の方法

沖縄県西表島船浦湾干潟に展開されるオキナワハクセンシオマネキ (*U. perplexa*) のコロニーを対象とした野外実験を実施した。鉄製枠組みにビデオカメラを設置することで、頭上より3.6m × 2mの範囲をビデオ撮影した。範囲内のランダムに選ばれた個体を対象に次の手順で実験を行なった。

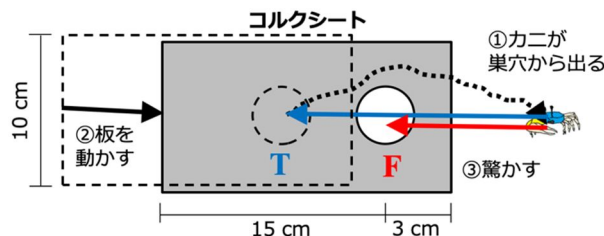


図1. 実験手順

実験ではシオマネキに、巣穴がいつの間にか移動してしまうという通常ではあり得ない状況を提示した。実験手順として、まずカニが巣穴の中にいる際、コルク板(30×10cm)に空けられた疑似巣穴(F; 直径1.5cm)を現実の巣穴(T)に重ねる。そしてカニが巣穴T=Fを出発し、板上から十分離れた時点で(図1)、カニを刺激しないよう板を移動させる(同)。その後、実験者が驚かすことでカニに帰巣行動を促す(同)。なお、この板の移動距離=T-F間距離は試行毎に様々に変化させ、カニが視覚的キュー(F)を知覚する際のホームベクトルの長さを変化させた。また、カニが巣穴を十分に視認できると考えられる、ホームベクトルから4cm以内の範囲に、Fが分布する試行のみ解析した。実験は90個体に対して137施行が行われたが、結果としてこの基準を満たした58個体による80施行に対して解析が行われた(1個体につき4回までの重複を可とした)。

以上の実験施行より得られた座標データをもとに、ホームベクトル長に対するTへの帰巣確率(=経路統合への信頼度)の振る舞いを検証した。ただしホームベクトル長は、カニがFに最接近した時のTまでの距離として定義された。

ホームベクトル長とTへの帰巣確率(=経路統合への信頼度)に関しては、次の2つのモデルから検証した。

1) 視覚的キュー-知覚時のホームベクトルが大きいかほど経路統合の信頼度が大きいかとする重み付けモデル(つまりベイズモデル): FがTに遠いほど(ホームベクトルが長いほど)、Tへと帰巣する確率が連続的に増加(e.g., Wystrach et al., Proc R Soc B, 2015):

$$PI_{weight} = \frac{2_{VIEW}}{2_{VIEW} + 2_{PI}} \quad (1)$$

2) 帰巢終盤において経路統合から視覚的キューへと排他的にシフトするモデル(申請者仮説: 排他的シフトモデル): T と F が一定距離内にあるならば F へと帰巢 ($PI_{weight}=0$) そうでなければ T へと帰巢 ($PI_{weight}=1$):

$$PI_{weight} = 1 / (1 + \exp(-x)) \quad (2)$$

ただし、 PI_{weight} は T への帰巢確率 = 経路統合の重みに対応し、 x はホームベクトル長である。

両モデルは共に、視覚的キューが知覚可能であるにも関わらず、その情報を抑制し得るとするものだが、その在り方が異なる。これを定量的に評価するため、上記の各統計モデルを最尤法により(式(1)の場合、式(2)の場合、結果は同じだがロジスティック回帰分析による)フィッティングし、ベストフィットモデルを AIC モデル選択(e.g., Burnham & Anderson, 2002)により実験データと比較した。

4. 研究成果

実験者が驚かした直後、素早く逃走し、F が T のいずれかの巣穴へと帰巢した。25 施行で T へ、55 施行で F へと帰巢した。T へ帰巢した施行では、カニは途中にある F を無視し、まっすぐ T の方向へ向かい、その場所で突然停止した。このことから、カニはほとんど経路統合に依存して振る舞ったと言える。他方、F への帰巢では、T へ到着することなく、F の位置で突然停止した。

図2は F/T へ帰巢した際の F の位置の分布を示している。ここから、ホームベクトル長が小さい時は F へと帰巢し、大きい時は T へと帰巢していることが明らかにわかる。

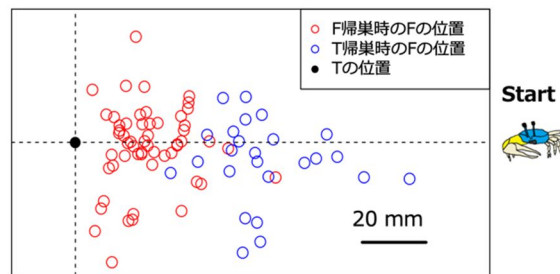


図2. F/T へ帰巢時の F の位置の分布

続いて、排他的シフトモデルにおいて、ロジスティック回帰により、ホームベクトル長は有意に T への帰巢確率に影響を与えていたことがわかった。そして AIC モデル選択により、重み付きモデルよりも排他的シフトモデルがよりデータにフィットすることがわかった。以上より、我々の仮説は支持された。これらの結果は Animal Behaviour 誌に掲載されるなどした(Editor's Choice に選ばれた)。

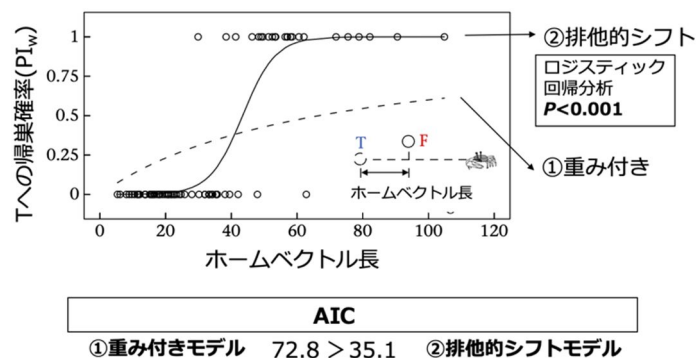


図3. モデルフィッティングの結果

このほか、発展的研究として、社会的行動と多感覚相互作用との関係、人の集団現象における運動戦略との比較認知的な議論の強化を進めた。後者の結果は Journal of the Royal Society Interface に掲載されるなどしている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Murakami Hisashi、Tomaru Takenori、Gunji Yukio-Pegio	4. 巻 144
2. 論文標題 Exclusive shift from path integration to visual cues during the rapid escape run of fiddler crabs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Animal Behaviour	6. 最初と最後の頁 147 ~ 152
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.anbehav.2018.08.012	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 -
1. 著者名 Feliciani Claudio、Murakami Hisashi、Nishinari Katsuhiko	4. 巻 13
2. 論文標題 A universal function for capacity of bidirectional pedestrian streams: Filling the gaps in the literature	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0208496
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0208496	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 -
1. 著者名 Gunji Yukio-Pegio、Murakami Hisashi、Tomaru Takenori、Basios Vasileios	4. 巻 376
2. 論文標題 Inverse Bayesian inference in swarming behaviour of soldier crabs	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences	6. 最初と最後の頁 20170370
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1098/rsta.2017.0370	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Niizato Takayuki、Murakami Hisashi	4. 巻 13
2. 論文標題 Entangled time in flocking: Multi-time-scale interaction reveals emergence of inherent noise	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0195988
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0195988	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 -

1. 著者名 Murakami Hisashi、Feliciani Claudio、Nishinari Katsuhiro	4. 巻 16
2. 論文標題 Levy walk process in self-organization of pedestrian crowds	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of The Royal Society Interface	6. 最初と最後の頁 20180939
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1098/rsif.2018.0939	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Sonoda Kohei、Murakami Hisashi、Niizato Takayuki、Tomaru Takenori、Nishiyama Yuta、Gunji Yukio-Pegio	4. 巻 185
2. 論文標題 Propagating wave based on transition of interaction within animal group	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Biosystems	6. 最初と最後の頁 104019 ~ 104019
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.biosystems.2019.104019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Niizato Takayuki、Sakamoto Kotaro、Mototake Yoh-ichi、Murakami Hisashi、Tomaru Takenori、Hoshika Tomotaro、Fukushima Toshiki	4. 巻 15
2. 論文標題 Finding continuity and discontinuity in fish schools via integrated information theory	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0229573
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0229573	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 -

1. 著者名 Feliciani Claudio、Murakami Hisashi、Shimura Kenichiro、Nishinari Katsuhiro	4. 巻 114
2. 論文標題 Efficiently informing crowds ? Experiments and simulations on route choice and decision making in pedestrian crowds with wheelchair users	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transportation Research Part C: Emerging Technologies	6. 最初と最後の頁 484 ~ 503
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.trc.2020.02.019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 郡司 ペギオ幸夫、村上 久	4. 巻 59
2. 論文標題 普遍的臨界性によって実現される頑健な群れ	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 111 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11499/sicejl.59.111	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 村上久・都丸武宜・郡司ペギオ幸夫
2. 発表標題 シオマネキは如何にして環境変化の中で巣穴へと逃走するか
3. 学会等名 日本動物行動学会第37回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上久・井澤玲・西山雄大・秋吉政則
2. 発表標題 色の好みは自発的行為に対する運動主体感に影響するか？
3. 学会等名 日本認知科学会第35回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西山雄大・階戸健太・右田正夫・村上久
2. 発表標題 ミナミコメツキガニの逃避行動を無効化する
3. 学会等名 日本動物行動学会第37回大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川井 健志, 樋口 礼人, 西山 雄大, 村上 久, 郡司 ペギオ 幸夫
2. 発表標題 ミナミコメツキガニは単純移動ロボットを仲間とみなすのか
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会 (SCI ' 18)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川井 健志, 樋口 礼人, 西山 雄大, 村上 久, 郡司 ペギオ 幸夫
2. 発表標題 カニロボットによる群れ実験
3. 学会等名 共創学会第2回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上 久・クラウディオ フェリチャーニ・西山 雄大
2. 発表標題 探索と搾取のトレードオフを解消するミナミコメツキガニの群れ
3. 学会等名 第38回日本動物行動学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H Murakami
2. 発表標題 Self-organization of human crowds and animal groups driven by inherent noise
3. 学会等名 ACML2019 workshop on Machine Learning for Trajectory, Activity, and Behavior (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村上久、クラウドディオ フェリシアーニ、西成活裕
2. 発表標題 人混みを縫って歩く:歩行者流の自己組織化における探索的振る舞い
3. 学会等名 IEICE非線形問題研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Y Nishiyama, M Migita, K Kaito, H Murakami	4. 発行年 2019年
2. 出版社 CRC Press	5. 総ページ数 18
3. 書名 From Parallel to Emergent Computing (Chapter 10: Toward a Crab-Driven Cellular Automaton)	

1. 著者名 早稲田大学複雑系高等学術研究所	4. 発行年 2019年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 156
3. 書名 複雑系としての経済・社会第 4 章(「動物の群れにおける自由と社会」郡司 ペギオ幸夫, 村上 久, 都丸 武宜)	

〔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
---------	---------------------------	-----------------------	----