

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K06741

研究課題名(和文) アマガエル着地行動における行動計画と実時間視覚情報処理による協調制御

研究課題名(英文) Cooperative control of tree frog landing behavior by using motor planning and real time visual information processing

研究代表者

中川 秀樹 (Nakagawa, Hideki)

九州工業大学・大学院情報工学研究院・准教授

研究者番号：80212083

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：実験Ⅰ：アマガエルの誘発されたジャンプと強制的に着地面に向けて移動させた時の前肢伸展行動の発現タイミングと振幅を統計的に比較した。その結果、着地に備えた前肢伸展はリアルタイムの視覚情報処理だけでは発現せず、行動計画を伴うジャンプ時にのみ観察されることが明らかになった。実験Ⅱ：アマガエル着地に備えた前肢伸展の発現タイミングを、その着地面に1) 静止した2) 接近してくる3) 遠ざかる同心円のシミュレーション画像を提示して測定し、統計的に比較した。その結果遅延時間は2) 1) 3) の順に有意に大きな値となり、前肢伸展行動の発現タイミングはリアルタイム視覚情報処理により調整されていることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

行動を計画することは我々が日常を生きていくうえで、なくてはならない能力である。これまでこの高度な能力は、ヒトや霊長類でしか研究できないと考えられてきた。しかし、近年、フクロウ、コウモリ、さらにはアリにまで行動計画の存在が示され、多くの動物種がこの高次脳機能の研究のモデルと成り得ることが示された。全ての行動を実時間感覚情報処理に負っている、神経系の計算負荷は膨大なものになってしまう。そこで、行動計画と感覚フィードバックによる修正を組み合わせることで、その負荷は大きく軽減できると期待される。本研究は、アマガエルの着地行動の研究により、動物がこの戦略を実際に実行していることを初めて明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Experiment I: The timing and the amplitude of the forelimb extension of the tree frog were statistically compared between mechanically evoked jump and enforced movement toward the landing surface. The results showed that prelanding forelimb extension was observed in jump behavior with motor planning, but not evoked with only real time visual information processing during enforced movement.

Experiment II: The timing of prelanding forelimb extension of the tree frog were statistically compared between jumps to the landing surface presenting 1) static, 2) approaching, 3) recessing concentric circles. The results showed that the delay time of the forelimb extension increased 2), 1), 3) in that order. This suggested that the timing of forelimb extension was finely adjusted by using real time optic flow information during landing behavior.

研究分野：神経行動学

キーワード：行動計画 リアルタイム視覚情報処理 アマガエル 着地行動 前肢伸展行動 行動解析 高速後ビデオ撮影 オプティックフロー刺激

1. 研究開始当初の背景

その樹上生活での巧みな運動能力の高さに着目して、アマガエルがどうやって複雑な環境下で、障害物との衝突を避け、安全に着地するのかを研究してきた。当初昆虫や鳥などの先行研究から、着地までの残り時間が一定になったときに行動を開始する、いわゆる戦略を実行していると考えていた。ところが、アマガエルの前肢伸展のタイミングを調べてみた結果、戦略ではなく、ジャンプの総時間の20%に達した時点で前肢を伸展するという新たな戦略(2対8戦略)を実行していることが分かった。また、驚いたことに、予想に反して、目隠しをしたアマガエルでも、このタイミング制御は可能であることが分かった。このことは、前肢伸展の制御は、ジャンプ開始前から、あらかじめ計画されたタイミングで実行されているという可能性を示した()。そこで、本当に、着地制御に行動計画は必須なのか？またリアルタイムの視覚情報は利用されていないのかをより確実に示すために本研究の着想に至った。行動実験と画像解析のノウハウは修得済みで、人工的なオブティクフロー提示プログラムと画像解析により得られる膨大な時系列データから、前肢伸展のタイミングや振幅など必要なパラメータを抽出するためのプログラムもそれぞれ Visual C++ と Python 言語で開発途中にあった。

<引用文献>

Kamada, Tachibanagi and Nakagawa, 2018, Strategy of landing behavior of the tree frog *Hyla japonica*, J. Exp. Zool., 327

2. 研究の目的

我々のこれまでの研究は、ウシガエルの逃避行動や、アマガエルの着地行動などが、行動計画にもとづき制御されていることを示してきた()。複雑な実環境下では、適切な結果を得るためには計画は、時に修正を余儀なくされることも起こりうる。しかし、全ての行動をリアルタイムの感覚情報処理に負っているのは、その計算負荷は膨大なものになってしまう。そこで、行動計画と感覚フィードバックによる修正を組み合わせることで、その負荷は大きく軽減できると期待される。本研究は、この新たな枠組みで、行動発現、制御を理解しようとする試みの第1歩として、まず動物が実際にこの両方を利用していることを行動学的に示し、研究のためのモデル系を構築することを目的とする。将来的には、その生理、形態に関する豊富な知見が蓄積されているカエルの脳神経系の持つ利点を生かし、この単純なモデル系を研究することで、これまで明らかにされてこなかった行動計画の神経基盤と、感覚フィードバックとの相互作用が、どのような神経機構により実現し、行動発現を司っているのかを明らかにする。

<引用文献>

Nakagawa and Nishida, 2012, Motor planning modulates sensory-motor control of collision avoidance behavior in the bullfrog, *Rana catesbeiana*, Biology Open, 1

3. 研究の方法

(1) <実験I>

機械刺激により誘発されたジャンプの着地における前肢伸展行動の解析

- 1) アマガエルをジャンプ開始台の上に静置する。
- 2) コンピュータで、ソレノイドを駆動して、その先端でカエルに機械刺激を与える。また同時に高速度カメラで高速ビデオ撮影(300 frames/s, 800x600 pixel)を開始し、25

c m離れた壁面 (1.5x1.5 cm² 格子模様) への着地までの行動を解析用コンピュータに連続静止画として記録する (図 1)。

- 3) 2次元運動解析ソフトと Python 言語を用いて研究室で開発した軌跡解析ソフトを用いて、前肢伸展行動のタイミングと振幅を測定する。

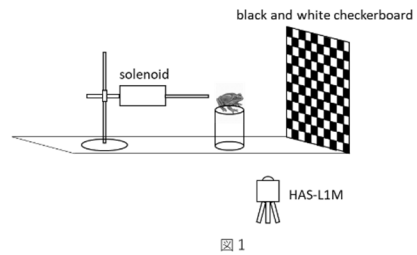


図 1

実験には6匹の動物を使用し、各動物につき、5分間隔で10~14試行実施した。

スライディング装置による強制的着地における前肢伸展行動の解析

- 1) アマガエルをスライディング装置のレールをスムーズにすべるホルダーに、マグネットで吊るし、レールの末端にストッパーで固定する。

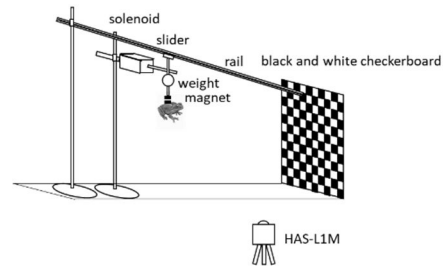


図 2

- 2) コンピュータで、ソレノイドを駆動してストッパーをはずし、ホルダーのスライドを開始する。また同時に高速度カメラで高速ビデオ撮影 (300 frames/s, 800x600 pixel) を開始し、35 cm離れた壁面

(1.5x1.5 cm² 格子模様) への着地までの行動を解析用コンピュータに連続静止画として記録する (図 2)。

- 3) 上記実験 と同じ

実験には5匹の動物を使用し、各動物につき、5分間隔で10試行実施した。

スライディング装置による人工的オプティックフロー刺激を伴う強制的着地における前肢伸展行動の解析

- 1) 上記実験 と同じ

- 2) コンピュータで、ソレノイドを駆動してストッパーをはずし、ホルダーのスライドを開始する。同時に高速度カメラで高速ビデオ撮影 (300 frames/s, 800x600 pixel) を開始し、17.5 cm離れた、ルーミング刺激 (35 cmの距離を55 cm/sの速度で接近する同心円) を提示したコンピュータ画面前に設置した透明な壁面への着地までの行動を解析用コンピュータに連続静止画として記録する (図 3)。

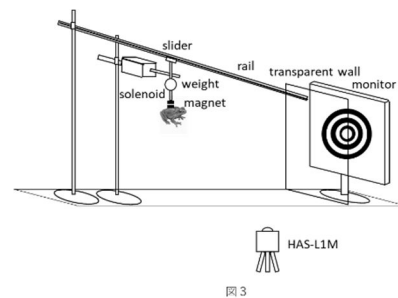


図 3

- 3) 上記実験 と同じ

実験には5匹の動物を使用し、各動物につき、5分間隔で10試行実施した。

(2) <実験II>

- 1) アマガエルをジャンプ開始台の上に静置する。
- 2) コンピュータで、ソレノイドを駆動して、その先端でカエルに機械刺激を与えジャンプを誘発する。また同時に高速カメラで高速ビデオ撮影 (500 frames/s, 800x600 pixel) を開始し、静止画の同心円を提示したコンピュータディスプレイの前に設置した 20 cm 離れた透明な壁面への着地までの行動を記録し、解析用コンピュータに連続静止画として取り込む (図4)。

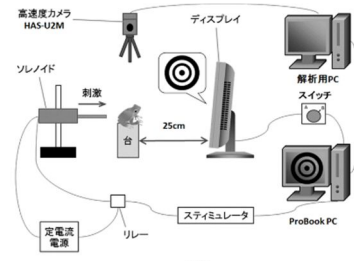


図4

- 3) 2) 同様にジャンプを誘発し、同時に着地面となる 20 cm 離れた透明な壁面の後のコンピュータディスプレイに、100 cm/s での接近、144 cm/s での後退をシミュレートした同心円の動画をスタートさせる。また同時に高速カメラで高速ビデオ撮影 (500 frames/s, 800x600 pixel) を開始し、行動を、解析用コンピュータに連続静止画として取り込む (図4)。
- 4) 2次元運動解析ソフトと Python 言語を用いて研究室で開発した軌跡解析ソフトを用いて、静止した同心円、接近、後退する同心円に向けたジャンプの前肢伸展位のタイミングと振幅を測定し、統計的に比較検討する。

実験IIには5匹の動物を使用し、各動物につき、3分間隔で5試行実施した。

4. 研究成果

(1) <実験I>

アマガエルに機械刺激を与えて誘発されたジャンプ (Exp1) と強制的に着地面に向けて移動させた時 (Exp2) の前肢伸展位の発現タイミングと振幅を統計的に比較した。また後者の遅い移動速度を補償するため、人工的にオプティックフロー刺激を与えた条件 (Exp3) でも実験を行った。その結果ジャンプ時に観察された着地前一定時間に発現する振幅の大きな前肢伸展位は、オプティックフローの有無に関わらず、スライディングによる強制移動では観察されなかった (図1)。それぞれの実験で観察された前肢伸展位の振幅と着地までの残り時間の平均と標準偏差は 135.4 ± 26.6 度 ; 0.175 ± 0.052 秒、 60.2 ± 31.0 度 ; 0.252 ± 0.15 秒、 61.6 ± 33.5 度 ; 0.252 ± 0.09 秒であった (図2)。これらの結果は、着地に備えた前肢伸展位はリアルタイムの視覚情報処理だけでは発現せず、行動計画が必須であることを示している。

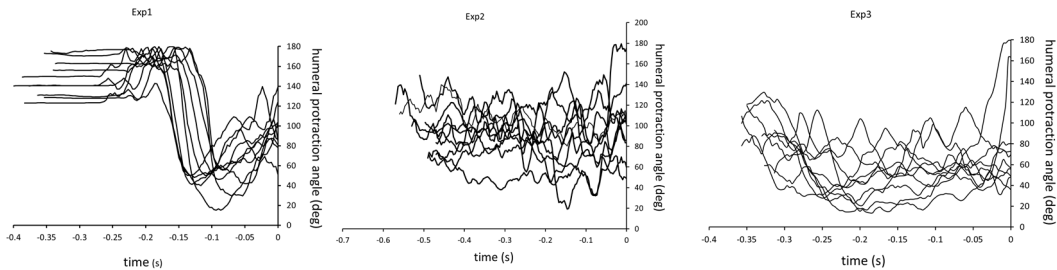


図1

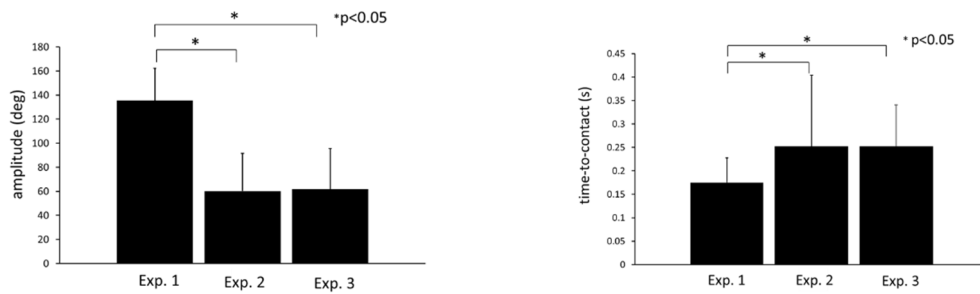


図 2

(2) < 実験 II >

アマガエルに機械刺激を与えて誘発されたジャンプの着地前前肢伸展行動の発現タイミングを、その着地面に 1) 同心円の静止画、 2) 速度 100cm/秒で接近してくる同心円のシミュレーション画像 (ルーミング刺激)、 3) 速度 144cm/秒で遠ざかる同心円のシミュレーション画像 (リセッション刺激) を提示して測定した。その結果前肢伸展開始までの遅延時間の平均と標準偏差はそれぞれ 0.049 ± 0.00013 秒、 0.037 ± 0.00017 秒、 0.059 ± 0.00014 秒となった。検定の結果遅延時間はルーミング刺激、静止画、リセッション刺激の順に有意に大きな値となり (図 3)、このことは、前肢伸展行動の発現タイミングは着地直前のリアルタイム視覚情報処理により調整されていることを示している。またルーミング刺激においては、刺激開始 0.02 ~ 0.04 秒の間にリアルタイム制御のためのオプティックフロー情報の閾値が存在していることが分かった。

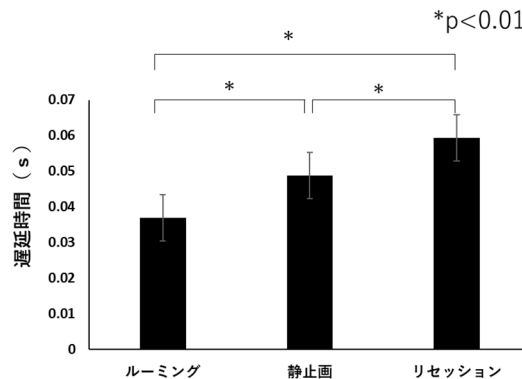


図 3

(3) 国内外における位置づけとインパクト、今後の展望

近年、ヒトや霊長類以外の動物もあらかじめ行動を計画し、実行する能力をもっていることが様々な動物種で報告されてきた。着地行動では、正確なタイミングの制御ができなければ、衝突や、墜落といった生存を脅かす結果をもたらす。そのため、ハエやハトなどの飛行後の着地行動は、着地時のリアルタイムの視覚情報から、衝突までの残り時間を正確に計算することで、それを可能にしていると考えられてきた。本研究で対象としたジャンプ後の着地行動は、これら 2 つの性質、つまり行動計画とリアルタイム視覚情報処理を合わせ持った行動であり、これを研究することで、両者がいかにして協働し、適切なタイミングの着地行動の発現を可能にしているかを理解することができると期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Hideki Nakagawa, Ayaka Takasumi	4. 巻 38
2. 論文標題 Changes in landing behavior of the tree frog, <i>Hyla japonica</i> , depending on distance toward the point aimed at landing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 比較生理生化学	6. 最初と最後の頁 12-12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中川秀樹、重藤聖英、田上知佳
2. 発表標題 アマガエル <i>Hyla japonica</i> の着地点までの距離に依存したジャンプの非連続的変容
3. 学会等名 第92回日本動物学会オンライン米子大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hideki Nakagawa, Ayaka Takasumi
2. 発表標題 Changes in landing behavior of the tree frog, <i>Hyla japonica</i> , depending on distance toward the point aimed at landing
3. 学会等名 日本比較生理生化学会第42回山形大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中須宏文、今泉春人、中川秀樹
2. 発表標題 人工的オブティックフローを用いた、アマガエルの着地前前肢伸展行動発現タイミングのリアルタイム制御の検証
3. 学会等名 三学会合同佐賀大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

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

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------