

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18140

研究課題名（和文）VRを用いた人における探索行動パターンの定量化と認知機能の予測手法開発

研究課題名（英文）Quantification of searching behavior in human using virtual reality and prediction of cognitive function

研究代表者

阿部 真人（Abe, Masato）

国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・研究員

研究者番号：60758027

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：脳は安定で固い状態と乱雑な状態の間の臨界点に調整されることで高いパフォーマンスを示すことが知られている。本研究では、脳の状態が臨界点に調整されることで、機能的な探索行動を示すことを数理的に明らかにし、さらに人間の実証データでは認知機能が高い人ほどそのような探索的な振る舞いを示すことを明らかにした。この知見は、認知機能低下を早期発見するためのシグナルを抽出することや、認知機能低下を防ぐための介入手法の開発に対して基礎的な知見を与えると期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義
行動と脳の関係を経験現象と探索行動の観点から明らかにしたことで、これまで入力と出力という観点から明らかにされてきた脳の動作原理だけでなく、脳の自発的な活動と行動に関する基礎知見を得ることができた。また、人間の日常的なデータから脳の状態の良し悪しを定量化することが可能になり、認知機能低下を早期発見するためのシグナルを抽出することや、認知機能低下を防ぐための介入手法の開発に対して基礎的な知見を与えると期待できる。

研究成果の概要（英文）：It is known that the brain exhibits high performance when it is adjusted to a critical point between a stable state and unstable one. In this study, we mathematically revealed that the brain exhibits functional exploratory behavior when its state is adjusted to a critical point, and furthermore, empirical data on human showed that people with higher cognitive function exhibit such exploratory behavior. This finding is expected to provide fundamental insights into the extraction of signals for early detection of cognitive decline and the development of intervention methods to prevent cognitive decline.

研究分野：数理生物学

キーワード：探索行動 臨界現象 脳 会話 ベキ則

1. 研究開始当初の背景

古来、人の行動を理解し、予測・制御することは、心理学から認知科学、情報科学、社会学、医学、動物行動学さらに哲学にまでわたる重要な課題である。しかし、行動とは個体の身体運動を伴った空間的・時間的な変化であり、定量的に捉えることが困難であった。近年、情報技術の向上に伴い、人を含めた生物の行動の定量データを得る手法が急速に発展し、行動を定量的に科学することが可能になりつつある。例えば、画像解析や GPS による動物個体の空間内での位置情報の特定や、加速度センサーのついたウェアラブルデバイスによる身体運動の定量データ取得が可能になってきた。このような行動の定量データ解析を通して、生物の行動パターンの法則性の解明が試みられている。その中で、ここ 20 年で大きく研究が進んだのは、移動パターンや行動を開始するタイミングの意思決定パターンに見られるベキ分布 (ベキ則、スケーリング則) の発見によるものである。ベキ分布とは、裾の長い分布であり、 $P(x) \sim x^{-\mu}$ と表される (μ は分布を特徴づける指数で $1 < \mu < 3$ の範囲である)。これは通常よくみられる指数分布などとは、まれに桁が違う大きな値が現れるという点で、性質が大きく異なる。ランダムウォークの直線移動の長さがこのベキ分布に従うとレヴィウォークと呼ばれる特殊な振る舞いになる。動物行動学の分野では、移動データの定量解析を通して、バクテリア、昆虫、魚、鳥、サル、さらに人までレヴィウォークのパターンを示すことが多いと報告され、生物の行動の普遍法則である可能性が示唆されている。移動パターンの理論研究では、レヴィウォークすることで餌などを探索する際の効率を最大化することが報告されており、様々な生物種がレヴィウォークすることの機能的側面が、探索行動の効率最大化として理解されている。

しかしながら、様々な生物が野外や実験環境下でレヴィウォークを示した(または示さない)という報告に留まる研究が多く、レヴィウォークを生む認知メカニズムや、移動パターンの差異をもたらす要因は明らかになっていない。移動パターンのプロセスとメカニズムを明らかにできれば、行動の予測、制御が可能になり、行動の統合的な理解が達成される。

人を対象にした場合、認知的な要因を認知テストや内観報告によって定量化することが可能であるため、行動パターンと認知プロセスの関係を解明することができる。特に、記憶を司る海馬が萎縮した認知症患者における徘徊といった異常な移動パターンを考慮すると、認知機能とレヴィウォークは深く関連すると予想されるため、認知症を考慮した解析を行うことは行動パターンと認知プロセスの関係の解明に直結すると考えられる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、動物行動の知見による人の探索行動パターンの解析を通じて、認知機能と行動パターンの関係を明らかにし、行動パターンのデータから認知機能の予測、さらに行動への介入によって認知機能低下を防止する手法を開発することである。

人に関する探索行動パターンの実証データは狩猟民族に GPS 装置を取り付けて得られたデータが主で、一般の人がレヴィウォークするかは明らかになっていない。本研究では、一般の人を対象にした探索行動パターンを対象に、仮想現実 (Virtual Reality: VR) システムを用いることで、行動の定量データを取得する。特にこれまで明らかになっていない認知機能との関連を解明することで、レヴィウォークを支えるメカニズムの解明に取り組む。これにより日常的な行動である探索行動のパターンから人間行動一般にまつわる法則を明らかにできると考えられ、学術的にも社会的にもインパクトが大きい。また、行動パターンから認知機能の予測および介入することで、認知症という認知機能低下を予測・予防する手法を開発する点は独創的であり、かつ創造的である。

3. 研究の方法

本研究では、レヴィウォークが脳内で自発的に生成されるという先行研究の結果と、レヴィウォークの特徴である、ベキ分布が一般に臨界点付近で出現するという事実に基づき、「レヴィウォークの機能的利点はシステムの臨界現象から生じる」という仮説を立て、解析を行なった。具体的には、移動パターンを生成する神経ネットワークの数理モデルを構築し、ダイナミクス of 安定な同期状態 (システムの相互作用が強い) と不安定な非同期状態 (システムの相互作用が弱い) の境の臨界点付近で生じる、レヴィウォークの機能的な側面を探った。

実際の高齢者の探索行動として、当初予定していた VR 空間における動きを捉えようとしたが、COVID-19 によって実験実施が困難になったことがあり、別の実験ですでに取得していた高齢者 65 人の 100 万語を超える会話データを用いることにした。ここでの会話データは日常的な会話を 4 人ないし 5 人のグループで行った際に記録したデータである。会話における単語の移り変わりはある種の単語空間における探索行動とみなせ、先行研究における認知プロセスでのレヴィウォークとも関連する。そこで、本研究では会話に見られるベキ則 (スケーリング則) を解析し、会話における探索行動のパターンおよび会話データとは別個に測定した認知機能スコアとの関係を明らかにした。

4. 研究成果

1つ目の数理解析の研究では、臨界点付近で出現するレヴィウォークが、情報を符号化するための大きなダイナミックレンジ（識別できる入力大きさ）と、近場の探索と遠くの新しい場所の探索を入力に応じて切り替える柔軟性を持つことが明らかになった（図1）。さらに、これらの数理モデルによる予測を、先行研究で公開されているショウジョウバエの幼虫のレヴィウォークのデータに非線形時系列解析を適用して検証したところ、データからもレヴィウォークが臨界点付近で生じ、大きなダイナミックレンジと高い柔軟性を持つことが明らかになった。これらの結果は、一般的に生物の移動で観察されているレヴィウォークが、臨界点付近で生じること、これらの機能的利点に基づいて説明できる可能性があることを示している。本研究で示した情報処理能や行動の切り替えの柔軟性は、認知機能と関連すると考えられ、脳における臨界現象と行動パターンや認知機能の関係を深く理解することで、行動パターンから脳に関連した病気、例えば認知機能低下を早期発見するためのシグナルを抽出することや、認知機能低下を防ぐための介入手法の開発に対して基礎的な知見を与えると期待できる。

さらに、生物は、本研究で示した臨界現象に基づく仕組みとその機能的利点からレヴィウォークという「戦略」を採用していると考えられるため、その知見を応用することで、柔軟性を持つ人工的な自律エージェントの設計原理になりうる。

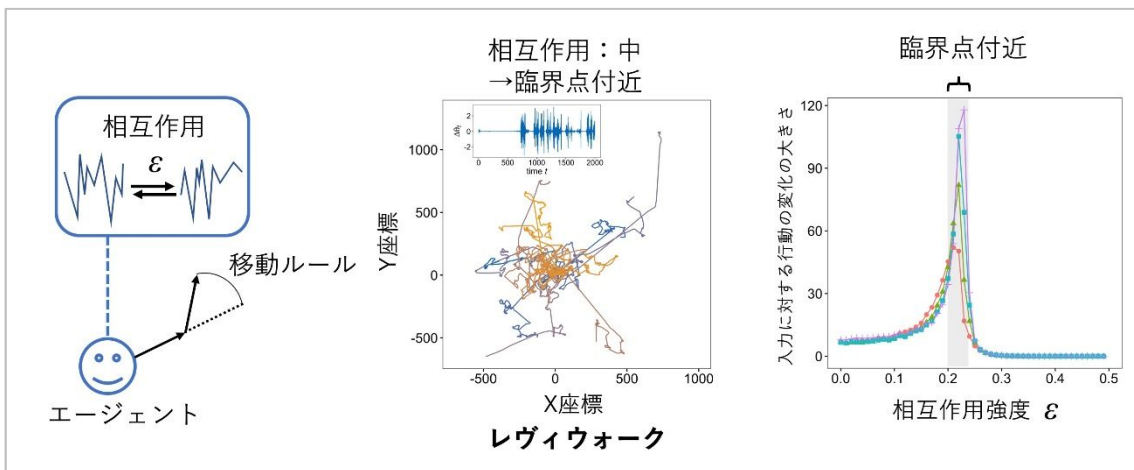


図1. 探索行動のモデル（左）と臨界点付近に見られるレヴィウォーク（中）。右は、臨界点付近のシステムは、外部からの入力刺激に対して行動が最も可変的であることを示している。

2つ目の会話データにおけるスケーリング則の研究では、会話データにおける新規単語の創出パターンが文章などの言語データでよくみられる2つのスケーリング則（Zipf則、Heaps則）に従うことが明らかとなった。また、そのHeaps則の指数がMoCAといった認知機能スコアと正の相関をすることが明らかとなった（図2）。これは、単語空間を広く探索し、単語の新規創出が多い人ほど、認知機能が高いことを意味する。この知見は、日常生活において容易に取得可能な会話データをもとにして、認知機能を予測する手法開発における基礎知見となりうる。

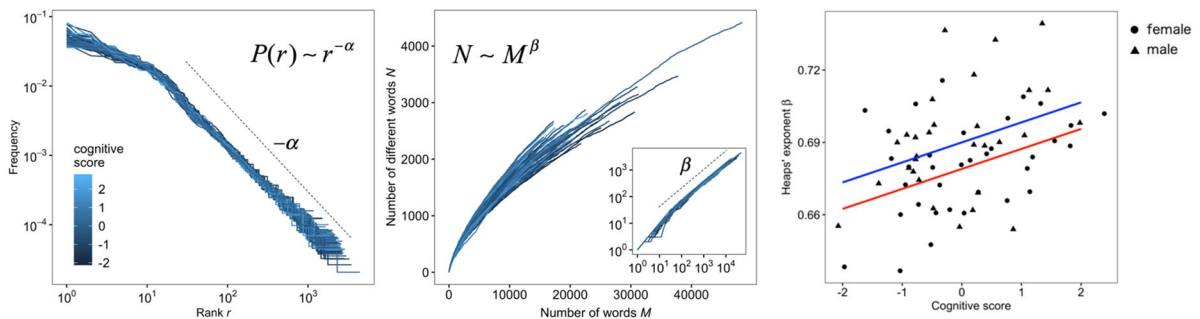


図2. 単語のスケーリング則（左：Zipf則、中：Heaps則）と認知機能スコアとの相関（右）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Abe Masato S.	4. 巻 117
2. 論文標題 Functional advantages of Levy walks emerging near a critical point	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the National Academy of Sciences	6. 最初と最後の頁 24336 ~ 24344
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1073/pnas.2001548117	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 Abe Masato S., Otake-Matsuura Mihoko	4. 巻 16
2. 論文標題 Scaling laws in natural conversations among elderly people	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0246884
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0246884	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 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 阿部真人
2. 発表標題 臨界点付近でみられるLevy walkの機能的利点
3. 学会等名 日本数理生物学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato S. Abe
2. 発表標題 Functional advantages of Levy walks emerging as critical phenomena
3. 学会等名 日本生態学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masato S. Abe and Mihoko Otake-Matsuura
2. 発表標題 Scaling laws in spoken-language associated with cognitive functions
3. 学会等名 日本数理生物学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masato S. Abe
2. 発表標題 Levy walks emerge near a critical point
3. 学会等名 SWARM 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>生物のレビューにおける情報処理上の利点を発見 - 臨界現象から生じる行動パターン - https://www.riken.jp/press/2020/20200917_1/index.html</p>
--

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
---------	---------