

公益財団法人中山人間科学振興財団活動報告書

2013（平成25）年度研究助成

情報を生成し、抽出する身体
—— 自己生成情報と運動の引き込み特性の解明

工藤和俊

東京大学 大学院総合文化研究科 広域科学専攻 生命環境科学系

緒言

月の明かりを頼りにして夜道の歩行が可能になるように、環境情報とは生物にとって行為の礎となるものである。近年、この行為可能性を引き出す情報環境を構築し、運動を支援する試みが行われており、たとえば、リズムカルな聴覚刺激（**rhythmical auditory stimuli, RAS**）による歩行やランニング運動の安定性およびエネルギー効率の改善効果が報告されている¹⁾³⁾。このうち歩行の遂行支援の研究では、パーキンソン病患者を対象とした研究が数多く行われている²⁾。パーキンソン病患者の歩行は小股歩行で、その歩行リズムが不安定であることが知られている。そこで歩行リハビリテーションとして、**RAS**を環境情報として与えると、歩行リズムの改善、ストライドの幅の増加など、歩行の改善効果が認められる。また、ランニングやサイクリングを対象とした研究では、**RAS**を運動遂行中に聴かせると、エネルギー消費の減少と疲労困憊までの時間の延長が生じることが報告されている³⁾。これら**RAS**による運動パフォーマンスの向上は、**RAS**と運動の間に引き込み現象が生じたために起きたと考えられている。引き込み現象とは2つのリズムを持った振動子が一方向にまたは相互に作用することにより、周波数や位相が同期する現象である。外部機器によって生成された**RAS**は、ヒトの運動よりも相対的に安定しているため、外部機器によって生成された**RAS**へ一方向的に引き込みが生じることにより、ヒトの運動の時空間的な安定性が向上し、運動リズムの加速、減速によるエネルギーの減少が生じたことが、様々な運動パフォーマンスの向上に繋がったと考えられる。

一方で、情報は外部由来のものだけではない。生物の顕著な特徴は、環境情報を知覚し行動するとともに自ら情報を生成し得る点にあり、たとえばリズムカルな聴覚情報を自ら生成することが可能である。そのため、このことを利用して自己言及的な運動遂行支援環境を構築しうる可能性がある。また、さまざまな運動の熟練者は、このような運動遂行支援環境を自ら生成することにより、安定したパフォーマンスを達成している可能性がある。

そこで我々はストリートダンス動作⁴⁾⁵⁾を用いて、自らの運動に基づいた知覚情報を利用した、新たな運動遂行支援方法の開発を試みた。ストリートダンスの基本的な動きである、立位でのリズムカルな膝屈伸を運動課題として、**RAS**を生成する発声との間に引き込み現象が生じるか、また発声により膝の運動の安定性は向上するかということについて検証した。その結果、発声と膝運動の間には引き込みが生じ、単独で動作を行うよりも発声と協調することにより、膝運動インターバルの標準偏差（**SD**）は小さくなる、つまり膝運動の安定性が向上することを明らかにした。これらの結果は、自ら生成した情報が行為者自身の運動を安定化させたことを示しており、自らの運動に基づいた知覚情報を利用して、運動遂行を支援することが可能であることを示唆する結果である。

そこで本研究では、これまでの研究を踏まえ、以下に示す2つの目的を設定し実験を行

った。

1. 発声による膝運動の安定化が生じる要因を、再帰定量化解析法を用いて検討する

近年、非線形数理科学的手法を用いた研究では、これまでの統計量（平均や標準偏差）では捉えることのできなかつた動作の変動を鋭敏に捉えることに成功している。これまでの研究では、安定性の評価は膝運動インターバルの変動で行っていた。非線形数理科学的手法を用いることにより、より詳細に発声による膝運動への影響を捉えることができると考えられる。たとえば、発声による膝運動の安定性向上の背景には運動の変動を増大させるノイズ(雑音)成分の減少と、ノイズに対する耐性向上が想定できる。これらノイズ量やノイズに対する耐性を定量化することのできる再帰定量化解析 (recurrence quantification analysis: RQA) ⁶⁾を用いて、より詳細に安定性の評価を行う。

2. 聴覚フィードバックを伴わない発声運動によって膝運動の安定化が生じるかを明らかにする

これまでの研究で明らかにされた発声による膝運動の安定化には、声だけではなく発声運動そのものが影響している可能性が考えられる。RAS による運動の安定化については多くの先行研究で報告されている^{1-3,7)}。一方で、聴覚フィードバックを伴わない発声運動自体が他の運動を安定化させるかについては不明である。しかし、先行研究では、リズム運動の際に単独の効果器よりも2つの効果器で運動することによって感覚情報が増大し、その結果より正確にリズムを刻めることが示唆されている⁸⁾。このことから発声運動と膝運動を同時に行うことにより、両者の安定化が生じる可能性が考えられる。そこで、聴覚フィードバックを阻害した条件においてもなお発声運動が膝運動の安定性向上に貢献するかを明らかにする。

実験1:方法

健常な男性 14 名 (23~36 歳) が、運動課題として立位での膝屈伸運動を遂行した。条件は屈曲と発声を同期するように教示した条件 (Coordination 条件) と膝運動のみを行う条件 (Control 条件) の 2 条件とした。課題の周波数は 80、130、180 beat per minutes (bpm) とした。課題遂行中の膝角度データを記録し、解析には再帰定量化解析を用いた。

再帰定量化解析とは、平均や標準偏差では評価しえない動作の時系列変動を解析する手法であり、時系列データの再帰性、変動の決定論的性質、ノイズ量、ノイズに対する耐性などの検出に有効である。解析の手順は、①状態空間軌跡の再構成、②リカレンスプロットの作成、③各評価指標の算出の3つのパートに分けることができる。それぞれの項目について簡潔に説明する。

①状態空間軌跡の再構成

Takens の埋め込み定理を用いて、状態空間軌跡の再構成を行う。Takens の埋め込み定理とは遅れ時間を用いて、ひとつの状態変数から他の状態変数を復元する方法である。まず遅れ時間と埋め込み次元を決定する。遅れ時間は、平均相互情報量を求め、最初に最も小さな値を示した時間遅れを、もしくは周期の4分の1の時間遅れを採用する。本研究では、課題周波数の4分の1周期を時間遅れとした。埋め込み次元に関しては、先行研究から6次元とした。

②リカレンスプロットの作成

リカレンスプロットとは、状態空間上の各点間の距離を視覚化したものである。再構成された状態空間軌跡上における、各点間の距離を算出する。そして半径パラメータを決定し、パラメータ内の距離にある点同士は再帰点として、それ以外は再帰していない点として二値化する。二値化された値からリカレンスプロットを作成する。本研究では半径パラメータを最大距離の0.15%とした。

③各評価指標の算出

作成されたリカレンスプロットから、再帰率、最大線長を算出する。それぞれの指標の意味と求め方については表1に示した通りである。

表1 再帰定量化解析の指標

| 評価指標 | 意味 | 算出法 |
|-------------------|----------------|---------------------------------------------|
| 再帰率 (%RECUR) | システム内のノイズ量 | $RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}$ |
| 最大線長 (MAXLINE) | システムのノイズに対する耐性 | $L_{\max} = \max(\{l_i; i = 1 \dots N_l\})$ |

以上の方法を用いて再帰率、最大線長を算出し、条件間での比較を行った。統計解析は二要因の分散分析を行い、有意水準を $p < 0.05$ とした。

結果

図1に再帰率と最大線長の結果のグラフを示す。再帰率について、課題周波数の主効果が有意であった ($F(2, 26) = 26.38, p < 0.001$)。一方、条件の主効果と交互作用は有意ではなかった ($F(1, 13) = 1.543, P = 0.236; F(2, 26) = 0.978, P = 0.39$)。最大線長の結果についても、

課題周波数の主効果が有意であった ($F(2, 26) = 65.20, p < 0.001$)。一方、条件の主効果と交互作用は有意ではなかった ($F(1, 13) = 2.464, P = 0.141$; $F(2, 26) = 1.512, P = 0.239$)。膝運動インターバルの標準偏差では有意な差が見られたにも関わらず、再帰率や最大線長に条件間で有意な差がみられなかったことから、発声によって生じる膝運動の安定化は、運動生成におけるノイズ成分の減少や、ノイズに対する耐性の向上以外の要因が関与している可能性が示唆される。

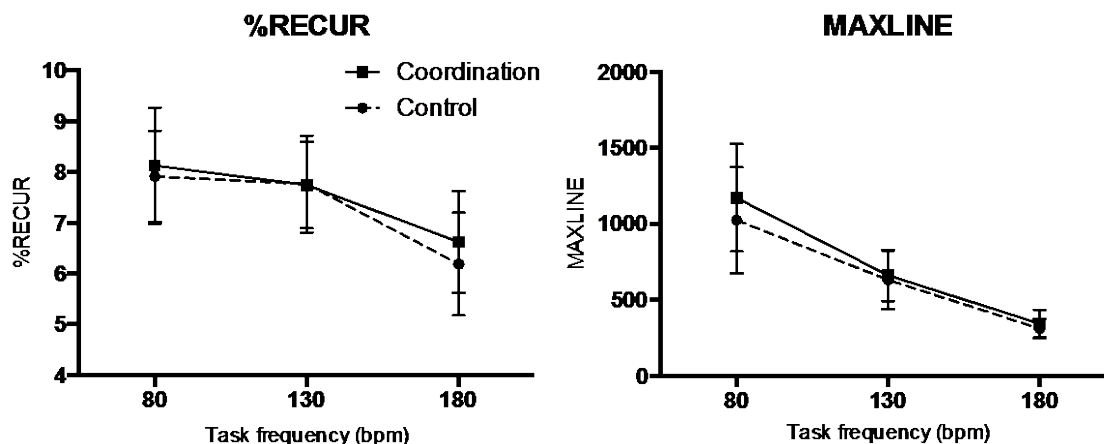


図1 再帰率と最大線長

実験2:方法

これまでに明らかにしてきた発声による膝運動の時間的な安定性の向上は、発声によって生成された聴覚フィードバックによる可能性と、発声運動そのものによる可能性が考えられる。実験2では聴覚フィードバックを阻害することにより、発声運動そのものが膝運動の安定性向上に貢献するかを検討した。

健常男性 14 名が実験 1 と同様に立位での膝屈伸運動を行った。条件は屈曲と発声を同期するよう教示した条件 (Coordination 条件)、屈曲と発声を同期するよう教示し、同時に聴覚フィードバックを阻害した条件

(Coordination-inaudible 条件) と膝運動のみを行う条件 (Control 条件) の 3 条件とした。聴覚フィードバックはヘッドフォンを通してホワイトノイズを聴かせることにより阻害した。課題周波数は 80、130、180 bpm で、各試行の前に同じ周波数のメトロノームを聴いてもらい、課題の周波数を再現してもらった。課題遂行中の膝角度を記録

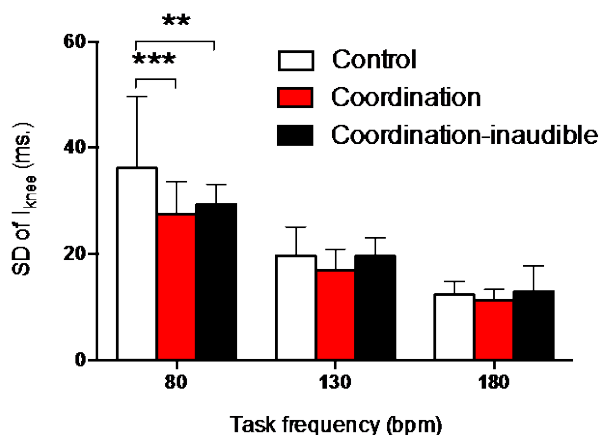


図2 膝運動インターバルの標準偏差

し、最大屈曲位のインターバルの標準偏差 (SD of I_{knee}) を算出し、条件間で比較を行った。統計解析は二要因分散分析を用い、下位検定には Bonferroni 法を用いた。被験者 1 名は、聴覚フィードバック阻害を行うことができなかったため、解析から排除した。

結果

図 2 に結果のグラフを示す。課題周波数、条件それぞれの主効果が有意であった ($F(2, 24) = 128.7, p < 0.001$; $F(2, 24) = 4.024, p = 0.031$)。一方、交互作用については有意ではなかった ($F(4, 48) = 2.534, p = 0.052$)。下位検定により、80 bpm において Control 条件に比べて、Coordination 条件、Coordination-inaudible 条件の膝最大屈曲位インターバルの標準偏差は有意に低い値を示した ($p < 0.001$; $p < 0.01$)。そして Coordination 条件と Coordination-inaudible 条件間で有意な差は見られなかった。以上の結果より、発声運動自体によって膝運動の安定化が生じることが明らかになった。

考察

本研究では、1) 発声による膝運動の安定化現象について、再帰定量化解析を用いて膝角度の時系列から再構成された状態空間軌道 (アトラクタ) の特性を評価すること、および 2) 膝運動の安定化における発声運動の影響を明らかにすることを目的として実験を行った。

実験 1 では、発声による再帰率ならびに最大線長の変化が認められなかった。膝屈伸運動の時間間隔の変動が減少しているにもかかわらず、これらの指標に有意な差が認められなかった理由としては、状態空間内の軌道がかならずしも安定化したわけではなく、多様な軌道によって時間的変動の小さい膝運動が実現していた可能性を示している。この点については今後さらに、再構成されたアトラクタ軌道のより詳細な検討が必要と考えられる。

また、実験 2 において発声による膝運動の安定化が、聴覚フィードバックが阻害された条件でも生じたことから、発声運動そのものによっても膝運動の安定化が引き起こされることが明らかとなった。先行研究では、片手よりも両手タッピングの方が安定することが報告されており、この理由として両手動作はより多くの感覚情報をもたらすことが指摘されている⁸⁾。本研究では発声に伴う聴覚フィードバックは得られないが、運動に伴う遠心性コピーや発声関連筋からの固有感覚受容器情報など、運動遂行に関する情報を取得することができたために、膝運動の安定化が生じた可能性がある。一方で有意差はなかったものの、すべての課題周波数で Coordination 条件が、Coordination-inaudible 条件よりも小さな値を示していることから、発声によって生成された聴覚情報も膝運動のさらなる安定化に貢献している可能性が指摘できる。これらの結果から発声による膝運動の安定化は発

声による声と発声運動そのものの両方が膝運動の安定化をもたらしていることが明らかになった。

これら一連の結果より、リズムカルな運動は、より少ない解剖学的自由度を用いて行うよりも、発声など自身の他の運動/感覚情報を重畳し協調させたほうが安定化することが示された。このことは、自ら情報を生成し、その生成された情報と自らの運動とが互いに引き込み合っただけで相互の安定化が達成されるという運動組織化原理の存在を示唆する有力な知見であると考えられる。

謝辞

本研究は、中山科学振興財団の平成 25 年度研究助成を得て行われました。ここに厚く御礼申し上げます。また、本研究の遂行にあたり、宮田紘平氏（東京大学大学院総合文化研究科博士課程）の協力を得ましたので、ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Muto, T., Herzberger, B., Hermsdoerfer, J., Miyake, Y. and Poeppel, E. Interactive cueing with walk-Mate for hemiparetic stroke rehabilitation. *Journal of Neuroengineering and Rehabilitation*, 9: 58, 2012.
- 2) Thaut, M. H. and Abiru, M. Rhythmic auditory stimulation in rehabilitation of movement disorders: A review of current research. *Music Perception*, 27: 263-269, 2010.
- 3) Bood, R. J., Nijssen, M., van der Kamp, J. and Roerdink, M. The power of auditory-motor synchronization in sports: Enhancing running performance by coupling cadence with the right beats. *PLoS ONE*, 8: e70758, 2013.
- 4) Miura, A., Kudo, K. and Nakazawa, K. Action-perception coordination dynamics of whole-body rhythmic movement in stance: A comparison study of street dancers and non-dancers. *Neuroscience Letters*, 544: 157-162, 2013.
- 5) Miura, A., Kudo, K., Ohtsuki, T. and Kanehisa, H. Coordination modes in sensorimotor synchronization of whole-body movement: A study of street dancers and non-dancers. *Human Movement Science*, 30: 1260-1271, 2011.
- 6) Marwan, N., Romano, M. C., Thiel, M. and Kurths, J. Recurrence plots for the analysis of complex systems. *Physics Reports-Review Section of Physics Letters*, 438: 237-329, 2007.
- 7) Kudo, K., Park, H., Kay, B. A. and Turvey, M. T. Environmental coupling modulates the attractors of rhythmic coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32: 599-609, 2006.
- 8) Drewing, K. and Aschersleben, G. Reduced timing variability during bimanual coupling: A role for sensory information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A: Human Experimental Psychology*, 56: 329-350, 2003.