宇宙総合学研究ユニット NEWS 2020 年 5 月号

ユニット長からご挨拶

嶺重 慎（第 7 代宇宙総合学研究ユニット長 理学研究科教授）

毎回、宇宙ユニットの活動をご紹介している宇宙ユニット NEWS ですが、今回はイベント報告の記事はございません。新型コロナウィルス感染拡大の影響を受けて、３月以降予定していました、そしてとても楽しみにしていた数々のセミナーなどのイベントがほとんどすべて中止となったためです。このことをとても残念に思っています。感染拡大が終息し、一刻も早く活動を再開できることを願っています。再開の暁には、みなさまぜひまた宇宙ユニットの活動にご参加ください。

最近こんな記事を読みました。社会学者の大澤真幸さんが「コロナ後の世界」がテーマのインタビューを受け、以下のような内容のことばを語っておられます（朝日新聞４月８日）。「ウィルス自体は文明の外からやってきた脅威だが、それがここまで広がったのは『グローバル資本主義』という社会システムが抱える負の側面、リスクが顕在化したからだ。・・・持続可能な生存には『国家を超えた連帯』しかない。苦境の今こそ、21 世紀最大の課題である『国家を超えた連帯』を実現させるチャンスだ。」

そういえば、（宇宙に関わる）研究も教育も、そして宇宙開発も、『国家を超えた連帯』が発展のキーワードであることに違いないですし、その重要性は今後ますます高まることでしょう。深く考えさせられる一文でした。

全学共通科目「宇宙総合学」のご案内

学部１・２回生を主対象として、リレー講義形式の全学共通科目「宇宙総合学」を火曜日４限（14:45～16:15）に Zoom でのオンライン講義にて開講します。本講義では、宇宙総合学と有人宇宙学の入門的基礎講義を実施し、人類の宇宙進出に関わる問題が、狭い意味での理学・工学系のみならず、生物学・医学、さらには人文社会系の問題にまで幅広く関係していることを理解します。そして、これらの分野横断的な宇宙進出に関わる諸問題を解決するには、何を学び、何をする必要があるか、自分の頭で考える能力を養います。

月日	講義名	担当教員
5 月 12 日	宇宙医学	寺田昌弘（宇宙ユニット）
5 月 19 日	宇宙飛翔体工学	泉田啓（工学研究科）
5 月 26 日	太陽系天体	佐々木貴教（理学研究科）
6 月 2 日	宇宙霊長類学	湯本貴和（霊長類研究所）

6 月 9 日	宇宙太陽光発電	篠原真毅（生存圏研究所）
6 月 16 日	人類の宇宙観の変遷	伊藤和行（文学研究科）
6 月 23 日	地球磁気圏とオーロラ	海老原祐輔（生存圏研究所）
6 月 30 日	宇宙システム制御	藤本健治（工学研究科）
7 月 7 日	宇宙倫理学	伊勢田哲治（文学研究科）
7 月 14 日	宇宙落語	林家染二（噺家）
7 月 21 日	宇宙人類学	木村大治（アジア・アフリカ地域研究研究科）

大自由度を有する身体運動を簡略化して捉える
～宇宙飛行士の身体状態を測る新たな指標の開発を目指して～

萩生 翔大 講師（人間・環境学研究科）

１．はじめに

ヒトの運動は実に多彩です。朝起きて、顔を洗って食事をして、歩いて…と、日々の生活は多彩な身体運動の連続です。こうした背景には身体運動が有する「自由度」が関連しています。つまり身体には動かせる箇所がたくさんあるため、その組み合わせ次第で様々な運動を生み出すことができるわけです。一方で、運動を制御することを考えた場合、問題を難しくしているのもまた自由度です。例えば、目の前のグラスに手を伸ばすという簡単な動作を考えてみてください。グラスまで真っ直ぐに手を伸ばす場合でも、その運動を実現するための肩・肘・手首の関節運動は様々です（図１：関節運動における自由度）。また関節運動は関与する多くの骨格筋（筋）が適切な力を発揮することで生み出されますが、それら個々の筋の力の組み合わせもまた無数に考えられます（図１：筋活動における自由度）。つまり、運動を制御するということは、無数に存在する選択肢の中からただ一つの運動（解）を決定することであると言えます。では、我々の脳は莫大な自由度をどのように扱い、必要な運動を生み出しているのでしょうか？これは身体運動における自由度問題と言われており、運動制御研究が解決すべき最も重要な問題の１つとされています[1]。

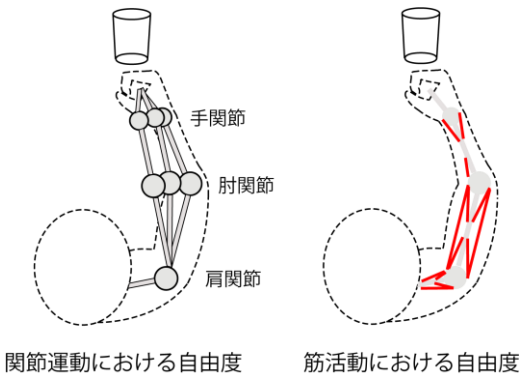

図１．身体運動が有する自由度

２．膨大な筋活動データの簡略化

自由度問題について研究するために、私は、莫大な自由度を持つ運動を簡略化して捉えるという方策をとっています。つまり、個々の関節運動や筋活動に直接向き合っていく前に、それらを簡略化して全体の性質を知ろうという戦略です。図２は個々の筋に送られる運動指令を反映した筋活動を模式的に示したものです。個々の筋に着目した際、一見するとその活動は様々であり、個別に扱われているように見えます。しかし、こうした多様な筋活動は少数の筋のグループを単位とした活動パターン（図の青・赤）の組み合わせとして表すことができます。これは多次元のデータを低い次元で捉える、次元削減という手

法です[2]。図 2 のモデル図の場合、N 次元の筋活動データが 2 次元にまで次元削減されています。同様の手法を歩行時に関わる両脚の 22 筋の活動に適用した場合、それら筋活動は約 6 つの筋グループの活動パターンの組み合わせとして十分に表すことができます（図 3）。筋活動だけを見ていると、その活動パターンは膨大であり非常に複雑ですが、簡略化して捉えることで各歩行フェーズに対応した少数の活動パターンが見えてきます。また、歩行から走行へと動作が切り替わった際、個々の筋活動は一見するとその活動の大きさやタイミングが大きく変化します。しかし、データを簡略化して見ると、実は歩行と走行時に関わる筋は同様の筋グループを単位として活動していることが分かります[3]。他にも、歩行時と直立姿勢制御時、サイクリング運動時の筋活動においても、筋グループが共通していることが明らかになっています[4, 5]。

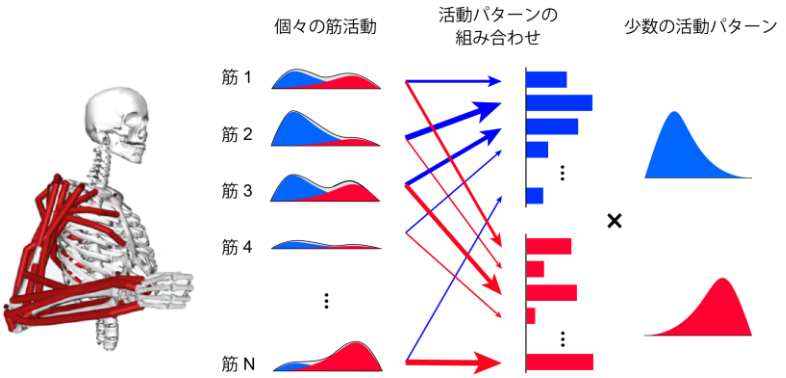

図 2．膨大な筋活動データの簡略化を表すモデル

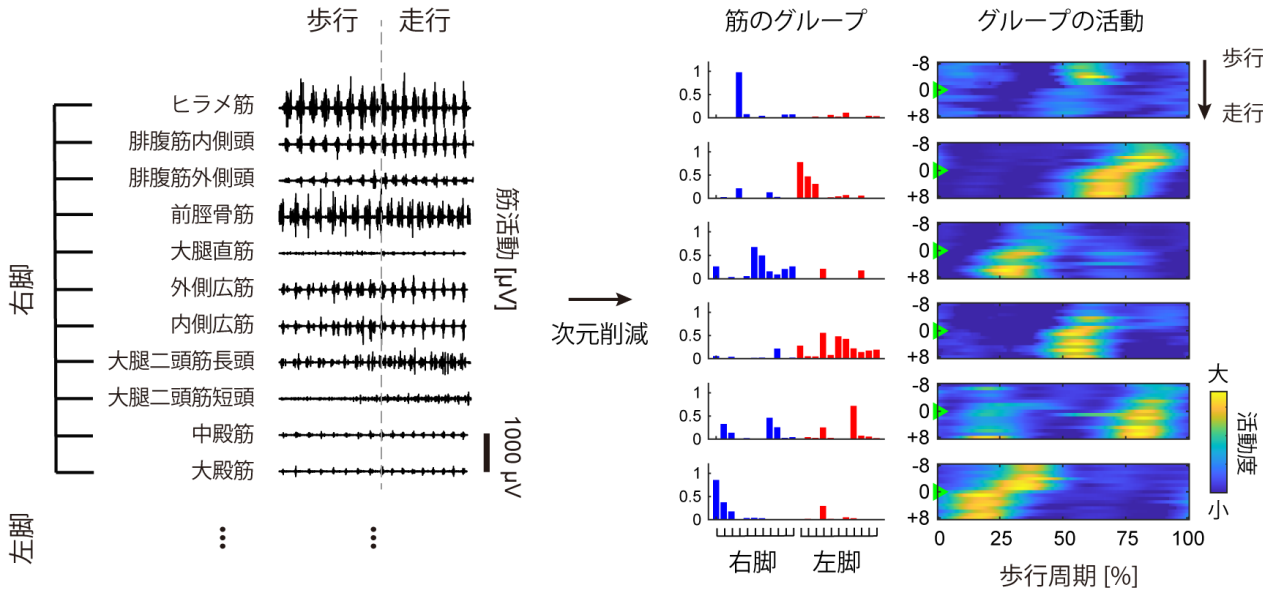

図 3．歩行と走行時の筋活動の簡略化

左：歩行から走行にかけての下肢筋活動。中央：次元削減後の筋のグループ。バーの高さはグループ内での各筋の重みを示している。右：対応するグループを単位とした活動。歩行（−）から走行（+）にかけての 17 歩行周期分の活動を示している。0 はちょうど歩行から走行へと動作が切り替わった周期。右足が接地してから次にまた右足が接地するまでを 1 歩行周期として 100%で規格化している。（[3]を改変）

3. 自由度を簡略化する筋シナジー

先に紹介した次元削減により、膨大で複雑な筋活動データを簡略化して見ることができるだけではなく、多彩な運動の背後にある共通性や相違性を知ることができました。こうした知見から、膨大な数の筋は個別に制御されているのではなく、いくつかの筋グループである「筋シナジー」を単位として制御されているという考え方が浸透してきました（図 4）。実験動物を対象とした研究では、神経系に筋シナジーの

構造を持った経路が実際に存在することも示されています[6]。つまり、制御を簡略化するための運動レパートリーが事前に備わっており、それらを組み合わせることで多彩な運動が生み出されているのではないかと考えられます。また、算出された筋グループには個人差があることから、筋シナジーは個人の運動を図る指標としても注目されています。スポーツなどの競技歴によって変化することも示されており、個人の運動特性を決める要因であるという見方もできます[7]。また、筋活動データを簡略化した際、筋グループの構造のみならず、グループの個数（つまり次元数）も重要な変数です。グループ数が少ない場合は、生み出される運動に柔軟性がなく、また一方で、グループ数が非常に多い場合は制御が複雑になり過ぎるとみなすことができます。脳卒中直後の片麻痺患者や脳性麻痺患者では、グループ数が著しく減少するという報告もあり、筋シナジーは疾患の重症度やリハビリテーション（リハビリ）による機能回復を測る指標としても有用であると考えられています[8-10]。脊髄を損傷したラットの歩行リハビリを行う際、筋シナジーに基づく介入を行った方が従来の方法よりも機能回復が早いことも示されており、今後はリハビリやトレーニングなどへの応用も期待されています[11]。

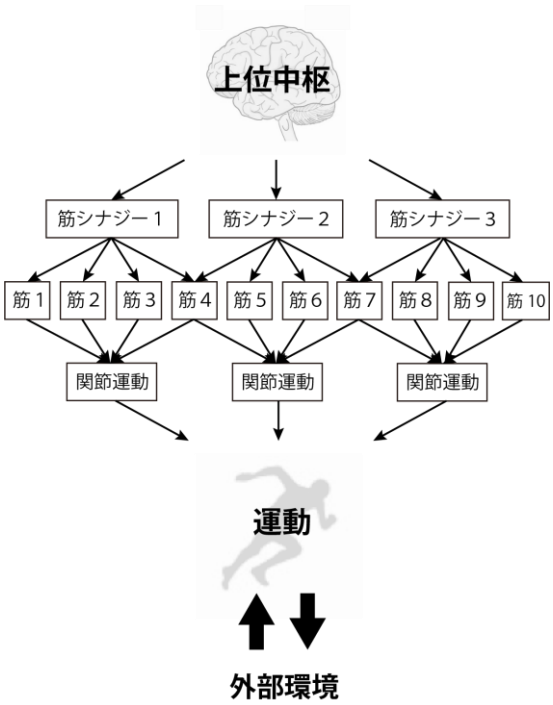

図４．筋シナジーを介した運動制御系のモデル

４．筋シナジーから宇宙飛行士の身体状態を測る

ヒトの運動は常に外部環境との相互作用の中で生み出されています（図４）。水中で歩いたり、包丁を使って自由に調理ができるのは、我々の脳が水中という環境や包丁という道具の性質をよく理解し、適切な運動を生み出しているからです。地球上の物体にかかる重力もまた、脳が知覚すべき重要な環境変数です。我々が生後長い年月をかけて習得した運動やそれを生み出す筋活動パターンは、地球という環境下（つまり 1G）に限定されたものであり、重力変数が変わるとそれらは再構築される必要があります。宇宙飛行士を対象として、宇宙滞在前後における立位時の下肢筋活動を計測した我々の研究から、宇宙滞在後、筋シナジーの個数は一定である一方でその構成が変化することが分かりました[12]。またその変化が大きい飛行士ほど、帰還直後の立位バランス能力が低く、さらに帰還後３ヶ月経っても飛行前の筋シナジーの構成に戻りませんでした。重要なことは、こうした飛行士においても、帰還後３ヶ月での立位バランス能力自体は飛行前のレベルに匹敵していたということです。見かけ上、もしくはこれまで用いられてきた評価指標上では機能回復したと見なされていた運動は、実はそれらを生み出すプロセスに着目すると回復していなかったということを表しているのかもしれません。運動レパートリーとしての筋シナジーの構成が変化したことは、日常動作やリハビリ運動以外の様々な運動に弊害をもたらす可能性もあります。現在、宇宙飛行士のリハビリは帰還後 45 日間とされていますが、その妥当性を見直し、新たなリハビリプログラムを開発するきっかけにもなるのではないかと期待しています。

５．おわりに

今後、火星探査に向けた有人宇宙飛行を達成するためには、帰還後の地球への再適応のみならず、さらに長期間の宇宙滞在や現地環境への適応についても考慮しなければなりません。そのためには、宇宙滞在前後の計測だけでは不十分であり、滞在中の身体運動を測る技術やデータ解析手法を開発していく必要があります。今回は膨大な筋活動データの簡略化について紹介しましたが、本手法は関節座標位置に基づく運動学データなど様々な身体運動データに適用可能です。近年では、撮影されたビデオから身体座標を計測する技術などの開発も進んでいるため、こうした手法を組み合わせた運動指標の開発についても現在検討しています。

参考文献

[1] Bernstein N. *Pergamon Press, New York,* 1967.

[2] Tresch MC, Saltiel P, Bizzi E. *Nat Neurosci,* 2: 162–167, 1999.

[3] Hagio S, Fukuda M, Kouzaki M. *Front. Hum. Neurosci,* 9 (48): 1- 12. 2015.

[4] Chvatal SA, Ting LH. *Front Comput Neurosci* 7: 1–14, 2013.

[5] Barroso FO et al. *J Neurophysiol*, 112(8): 1984-1998, 2014.

[6] Levine AJ et al. *Nat Neurosci*, *17*(4), 586–593, 2014.

[7] Sawers A, Allen JL, Ting LH. *J Neurophysiol*, 114(6): 2259-3373, 2015.

[8] Cheung VCK et al. *Proc Natl Acad Sci USA,* 109: 14652–14656, 2012.

[9] Clark DJ, Ting LH, Zajac FE, Neptune RR, Kautz SA. *J Neurophysiol,* 103: 844–857, 2010.

[10] Steele KM, Rozumalski A,Schwartz MH. *Dev Med Child Neurol.*, *57*(12), 2015.

[11] Wenger N et al. *Nat Med*, 22(2): 138-145, 2016.

[12] Hagio S, Ishihara A, Terada M, Tanabe H, Kibushi B, Higashibata A, Yamada S, Furukawa S, Mukai C, Ishioka N, Kouzaki M. Muscle synergies of multidirectional postural control in astronauts on Earth after a long-term stay in space. *submitted*.

宇宙ユニットの活動やイベントについては、下記サイトをご覧ください。また、宇宙ユニットや本 NEWS に関する皆さんのご意見等も気軽に下記メールアドレスまでお送りください。

京都大学 宇宙総合学研究ユニット

http://www.usss.kyoto-u.ac.jp/

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町 吉田キャンパス北部構内 北部総合教育研究棟 403 号室

編集人：伊藤梓

Tel＆Fax: 075-753-9665 Email: usss@kwasan.kyoto-u.ac.jp