

公益財団法人 中山人間科学振興財団  
2019（令和元）年度「歩行と転倒のサイエンス」中山賞奨励賞  
「適応的な歩行制御メカニズムの数理的理解とその応用」

青井 伸也

京都大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻

## 1. はじめに

ヒトは冗長で複雑な筋骨格系を巧みに制御し、多様な環境でも転倒することなく適応的な歩行をする。この実現には、上位中枢や各種感覚器からの信号を統合して適切な運動指令を生成する脊髄のCPGが重要な役割を担っている。このメカニズムの解明に向けて、ヒトの計測だけでなく除脳ネコをはじめとする様々な動物実験が実施され、歩行に寄与する神経網の構造など重要な知見がもたらされている。しかしながら、ヒトの実験には倫理的な制約があり、除脳動物では自立した歩行はできず、計測のみから全てを明らかにするには限界がある。

ヒトや動物の生み出す運動は、脳と身体そして環境との相互作用を介して実現される力学現象である。我々はこれまで、歩行をこの相互作用を介した安定な周期解への引き込み現象、転倒を周期解の不安定化による発散、もしくは発散する吸引領域への状態の遷移と捉え、ヒトや動物の神経筋骨格系の数理モデルを用いて適応的な歩行制御メカニズムの数理的な理解を目指してきた。更に、そこから明らかになる知見を工学的に具現化し、適応機能を有する二足ロボットの開発につなげてきた。

## 2. 神経筋骨格モデルを用いた研究

神経系が多数の筋を制御するメカニズムにはまだ不明な点が多いが、様々な運動における筋活動を調べると、運動に依存して同じタイミングで活動する筋の組合せが存在することが見えてくる。すなわち、多数ある筋の活動が仮に複雑に見えても、少数の基本となる活動パターンの組合せでそのほとんどを説明できるというものである。このような観測に基づいて、「筋シナジー」という考え方が提唱されている[1, 2]。具体的には、膨大な数の筋をそれぞれ個別に制御するのではなく、運動に応じた筋の組合せと活動パターン（筋シナジー）を複数用意しておき、その筋シナジーを介して制御することで制御構造をシンプルにし、負荷を減らすことができるという考え方である。

本研究では、この筋シナジーの考え方に基づいて、ヒトの神経制御系の数理モデルを構築し、筋骨格系の数理モデルと統合し、順動力学シミュレーションを介して、適応的な歩行形成に寄与する神経系の役割を調べた[3]。具体的には、頭と腕を含めた体幹1リンク（頭と腕は体幹に対して固定されている）と、左右の脚の大腿、下腿、足の6リンクからなる骨格、片脚に歩行と走行に主要な9つの筋を用いた筋骨格系の数理モデルを構築した(図1A)。ヒトの歩行においては、5つの基本となる活動パターンの組合せで筋活動のほとんどを説明

できることが知られているので[4]、運動指令としてCPGが位相に応じた5つの活動パターンを生成し、それぞれの筋に適切な重みで分配するモデルを構築した(図1B、C)。更に、接地などの感覚情報に基づいて、これらの活動パターンの生成タイミングを制御する方策をモデル化した。動力学シミュレーションの結果、この感覚情報に基づくタイミングの制御を用いることで外乱や環境変化に対する適応性が大きく向上し、このような制御方策の重要性が示唆された(図1D、E)。

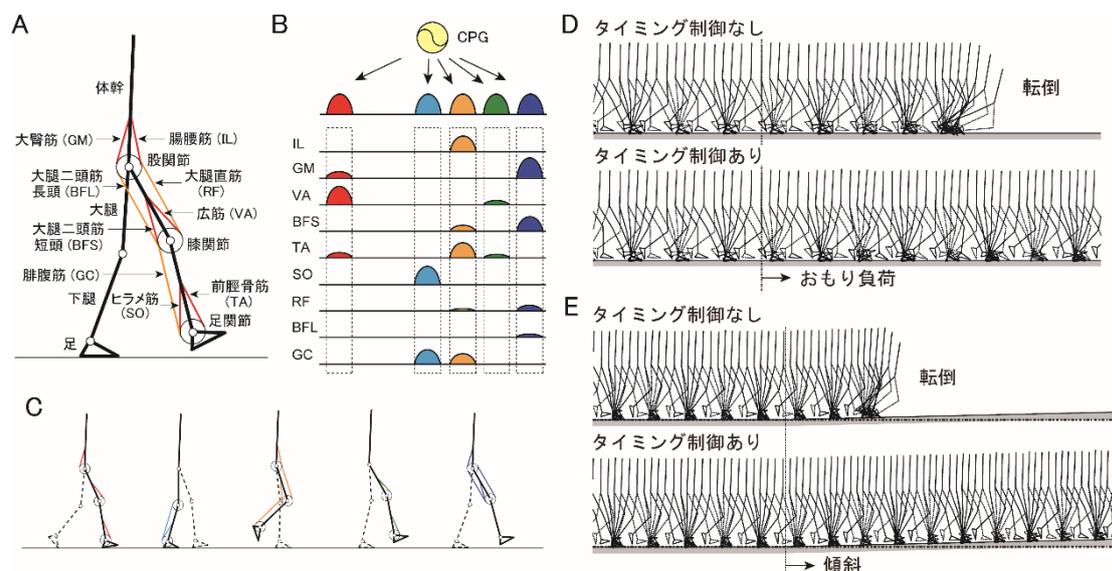


図1：ヒトの神経筋骨格モデルを用いた研究。(A) 筋骨格モデル。(B) 筋シナジーに基づく神経系の制御モデル。(C) CPGからの5つの活動パターンによって駆動される筋の組合せ。(D, E) 重りの負荷と傾斜の変化に対するタイミング制御の有無に応じた歩行持続性の違い

筋シナジーの考え方は、ヒトの歩行に限らず、ネコやラットなど様々な動物の歩行にも当てはまる[5]。そこで上記の手法を、無拘束で二足歩行する訓練を受けたサルや上体を少し支えて二足歩行するラットなど、ヒト以外で二足歩行する生物にも適用し、生来四足で歩行する生物が転倒を回避しつつどのように二足歩行を獲得したのか、また生物間で普遍的・特異な制御構造などを調べてきた。更には、通常二足歩行だけでなく、障害物跨ぎ越し[6]や走行[7]、左右分離型トレッドミル歩行[8]など様々な歩行タスクにも適用し、多様な状況下でも転倒せず歩行を持続させるメカニズムを調べてきた。

### 3. 二足ロボットへの応用

歩行とは端的には接地と離地を繰り返す脚の周期的な運動によって実現されるものである。足が接地している支持脚相では、重力に抗して身体を支え、地面を蹴って推進力を得る。それに対して足が空中に浮いている遊脚相では、地面との相互作用なしに、足を振って前方に送る。脚の役割は支持脚相と遊脚相で大きく異なるため、ロボットを制御する際には、こ

れらを適切に切り替える必要がある。そこで、神経筋骨格モデルを用いた研究により明らかになった接地感覚情報に基づくタイミング制御を応用し、二足ロボットの歩行制御系を構築した。その結果、傾斜など環境変化に対してロバストな歩行生成[9]や、旋回[10]、四足歩行から二足歩行への遷移(図2)[11]、左右分離型トレッドミル歩行[12,13]など様々な歩行タスクにおいて、その有効性を実証してきた。

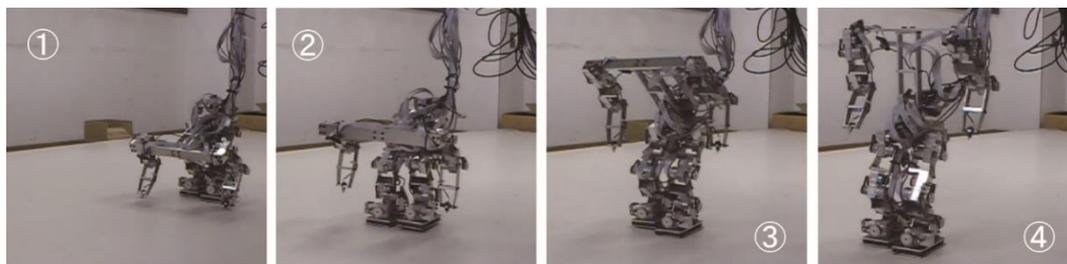


図2：二足ロボットの四足歩行から二足歩行への遷移

#### 4. おわりに

上述のように、多数の筋活動の協調性を説明する筋シナジーの考え方は歩行に限らず様々な運動に当てはまり、様々な動物にも当てはまる。脳卒中など筋の協調性を損なう疾患も数多く存在し[14]、筋活動だけでなく神経活動も調べることで筋シナジーの神経基盤も明らかにされつつある[15,16]。今後、筋シナジーに基づく治療やリハビリテーション法の開発など様々な医療応用も期待される。更には、本研究で示したような二足ロボットだけでなく、運動支援の外骨格ロボットなど工学的にも様々な応用への発展が期待され、神経筋骨格系の数理モデルは、ヒトや動物の優れた運動知能を理解し応用する上で有効なツールになると期待される。

今回これまでの研究成果に基づき、令和元年度中山賞奨励賞を受賞する榮譽を得た。授与式では、審査員の先生方や財団関係者の皆様と話をする機会をいただき、大変貴重な経験をさせていただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げます。この受賞を励みに、今後も研究の発展に邁進していきたい。

#### 参考文献

- [1] M.C. Tresch, P. Saltiel, E. Bizzi : The construction of movement by the spinal cord, *Nature Neuroscience* 2 : 162-167 (1999)
- [2] A. d'Avella, P. Saltiel, E. Bizzi : Combinations of muscle synergies in the construction of a natural motor behavior, *Nature Neuroscience* 6 : 300-308 (2003)
- [3] S. Aoi, N. Ogihara, T. Funato, Y. Sugimoto, K. Tsuchiya : Evaluating functional roles of phase resetting in generation of adaptive human bipedal walking with a physiologically based model of the spinal pattern generator, *Biological Cybernetics* 102 : 373-387 (2010)

- [4] Y.P. Ivanenko, R.E. Poppele, F. Lacquaniti : Motor control programs and walking, *Neuroscientist* 12 : 339-348 (2006)
- [5] N. Dominici, Y.P. Ivanenko, G. Cappellini, A. d'Avella, V. Mondì, M. Cicchese, A. Fabiano, T. Silei T, A. Di Paolo, C. Giannini, R.E. Poppele, F. Lacquaniti : Locomotor primitives in newborn babies and their development, *Science* 334 : 997-999 (2011)
- [6] S. Aoi, T. Kondo, N. Hayashi, D. Yanagihara, S. Aoki, H. Yamaura, N. Ogiwara, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, K. Tsuchiya : Contributions of phase resetting and interlimb coordination to the adaptive control of hindlimb obstacle avoidance during locomotion in rats: a simulation study, *Biological Cybernetics* 107 : 201-216 (2013)
- [7] S. Aoi, T. Ohashi, R. Bamba, S. Fujiki, D. Tamura, T. Funato, K. Senda, Y. Ivanenko, K. Tsuchiya : Neuromusculoskeletal model that walks and runs across a speed range with a few motor control parameter changes based on the muscle synergy hypothesis, *Scientific Reports* 9 : 369 (2019)
- [8] S. Fujiki, S. Aoi, T. Funato, Y. Sato, K. Tsuchiya, D. Yanagihara : Adaptive hindlimb split-belt treadmill walking in rats by controlling basic muscle activation patterns via phase resetting, *Scientific Reports* 8 : 17341 (2018)
- [9] S. Aoi, K. Tsuchiya : Locomotion control of a biped robot using nonlinear oscillators, *Autonomous Robots* 19 : 219-232 (2005)
- [10] S. Aoi, K. Tsuchiya : Adaptive behavior in turning of an oscillator-driven biped robot, *Autonomous Robots* 23 : 37-57 (2007)
- [11] S. Aoi, Y. Egi, R. Sugimoto, T. Yamashita, S. Fujiki, K. Tsuchiya : Functional roles of phase resetting in the gait transition of a biped robot from quadrupedal to bipedal locomotion, *IEEE Transactions on Robotics* 28 : 1244-1259 (2012)
- [12] S. Fujiki, S. Aoi, T. Yamashita, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, K. Tsuchiya : Adaptive splitbelt treadmill walking of a biped robot using nonlinear oscillators with phase resetting, *Autonomous Robots* 35 : 15-26 (2013)
- [13] S. Fujiki, S. Aoi, T. Funato, N. Tomita, K. Senda, K. Tsuchiya : Adaptation mechanism of interlimb coordination in human split-belt treadmill walking through learning of foot contact timing: a robotics study, *Journal of the Royal Society Interface* 12 : 20150542 (2015)
- [14] V.C.K. Cheung, A. Turolla, M. Agostini, S. Silvoni, C. Bennis, P. Kasi, S. Paganoni, P. Bonato, E. Bizzi : Muscle synergy patterns as physiological markers of motor cortical damage, *Proceedings of the National Academy of Sciences of*

the United States of America 109 : 14652-14656 (2012)

- [15] S.A. Overduin, A. d'Avella, J. Roh, J.M. Carmena, E. Bizzi : Representation of muscle synergies in the primate brain, Journal of Neuroscience 35 : 12615-12624 (2015)
- [16] T. Takei, J. Confais, S. Tomatsu, T. Oya, K. Seki K : Neural basis for hand muscle synergies in the primate spinal cord, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 114 : 8643-8648 (2017)