

展 望

ロコモーション・パターン創発研究の現状と今後の展望

The History, State of Art, and Future Prospects of Study on Emergence of Locomotion Pattern

木 村 浩* *京都工芸繊維大学

Hiroshi Kimura* *Kyoto Institute of Technology

1. は じ め に

最初から昔の話で恐縮ですが、尊敬する先生から「マニピュレーション研究とマニピュレータ研究の違い」について言われたときに、「では、ロコモーション研究とロコモータ研究に分けられますね」と返したら、「うーん」と言われました。当時（1990年頃）はそう言われるほどにロコモータ（機構・アクチュエータ等）への依存度が高く、ロコモータの数だけロコモーション制御手法があるといった状態でした。しかし、1990年代も半ばになると、「ロコモーションの原理」を明らかにしたいという気運が生まれ、生物学・ロボティクス[†]などの研究者が集まるワークショップがいくつか欧州主導で開催され、2000年には小さな国際シンポジウムが開催され今でも継続されています[1]。ロボティクスが生物学から学ぶことは多く有意義ではありましたが、ロボティクスの発展が生物学にさらなる貢献・知見を与えるフィードバックと共働効果を切に願います。

ロコモーション自体は定常振動をいかに維持するかという単純そうな問題に思えますが、数億年の進化の歴史を生き残ったものだけが見せる洗練されたメカニズムの原理を知することはまだ遙か先の目標としか言いようがありません。ただし、遊泳ではヤツメウナギ・オタマジャクシなど、脚式ではロブスター・昆虫などの甲殻類とマウス・ネコなどの哺乳類で、生物学的知見として種を越えた共通点が多く指摘されていること[2]~[4]は興味深く、「ロコモーションの原理」が存在することを強く期待させます。

そもそもパターン創発は非線形力学の重要な研究対象で、「個々部分の運動が秩序パラメータおよび隷属原理によって協調する」という自己組織化[5]や、非線形システムの構成的理解[6][7]としてロボティクスと深い関わりを持ってきました。それらと同様な「生命を動かす情報の普遍的原理[8]」という背景のなかで、脚式ロコモーションに関して「神経・筋骨格系と環境との相互作用により歩行パターンが創発する」ことを鮮やかに示したのが、多賀ら[9]の神経振動子を用いた2足歩行シミュレーションでした。一方、脚式ロコモーションのパターン創発^{††}は、神経回路やそのモデルなしで、機構・アクチュエータ特性や簡単な力学モデル

によっても発生します。本稿では脚式ロコモーション研究に長年関わった者の一人^{†††}として、これらを簡単に紹介しつつ、思うことを述べ、本特集号の展望とさせていただきます。個別の研究の詳細は、本特集号の解説やほかの特集号[10]~[12]を参考にしてください。また、紹介した研究に関連する動画が筆者のホームページ[13]で公開されており、順次アップデートする予定です。

2. 脚式ロコモーションの歩容とリズム

脚式ロコモーションで各脚の運動は遊脚（swing, SW）相と支持脚（stance, ST）相から構成され、SW-to-ST相遷移が接地（touch down, TD）、ST-to-SW相遷移が離地（lift off, LO）であり、各脚のTDとLOの時刻さえ分かれば歩容（gait）線図を作成できる。通常、歩容はduty比（ステップサイクル：SCにおけるST相の割合）と脚間位相差を用いて表されるが、広義には脚負荷、COP（Center of Pressure）の足裏位置、TD時とLO時の脚前後位置（前：AEP、後：PEP）なども含む。通常duty比が0.5以下となると「歩行」から「走行」に遷移する。歩容と言えば脚間位相差のみが着目されがちであるが、duty比も移動速度やロール・ピッチ運動との関係が深く重要視されるべきである。COP位置は2足歩行の重要な指標として用いられてきた。移動速度との関係では歩幅ではなくAEPとPEPが用いられる。環境との相互作用のダイナミクスを強く表す指標として脚負荷を用い、1, 2, 4, 6脚ロコモーションで脚負荷パターンを比較することにより[14]、脚数に依存しない「ロコモーションの原理」を考えることができる。

2脚步容では左右逆位相歩行のみでなく、様々な歩容遷移がネコ・後2脚・トレッドミル実験[15][16]で観察されている。4脚步容[‡]の生成・遷移は多くの研究者の関心を集め、「歩容生成の主体と要因」について様々な研究がある[4][11]。これについては、次章以降で詳しく述べる。6脚步容につ

[†]生物学は動物学・神経生理学・神経行動学・バイオメカニクス等を、ロボティクスはロボット工学・計算機科学・非線形力学等を含むとします。

^{††}本稿では非線形システムと環境との相互作用によるパターンの生成と遷移を創発とよぶ。適応も摂動があるときの（近いが）別のパターン生成と考え創発に含める。不整地適応を想定している。

^{†††}脚ロボットを創り動かす立場から感覚-運動機能に特に興味があるので、神経生理学的知見の説明が多くなるのはご容赦下さい。

[‡]対角、左右同側、前後同側が対になった歩容はそれぞれtrot, pace, boundとよばれる。左右、前後、対角の脚間に位相差がある歩容としてはwalk, gallopがある。低速歩行ではwalkが中速走行ではtrot, paceが高速走行ではgallop, boundが現れる。

原稿受付 2023年1月11日

キーワード：Rhythm and Gait, Rhythm Generator, Reflex Chain, Sensory-Motor Functions, Interlimb Coordination

*〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町

*Matsugasaki-Goshokaidotyo, Sakyo-ku, Kyoto-shi, Kyoto

いては本特集号の解説を参考にしていただきますが、上で述べたように各脚の動きや脚間協調について4脚と共通なメカニズムが多く指摘されている。

一方、ロコモーション周波数（周期）も安定性・エネルギー効率と深く関係する[17]ので、歩容と同時に、もしくは、歩容より先に考慮すべき指標である。「リズムを生成する主体」と「リズム周波数を決める要因」についても様々な研究がある[4]。一つだけに限定する必然性はないが、バイオメカニクスは機構・アクチュエータ特性を重視し[14][18]、神経生理学の大勢は脊髄・中枢性（Central）リズム生成器（Rhythm Generator, RG）と上位中枢からの指令の存在を認めている[2][19]。しかし、RGと感覚フィードバックの関係については分からないことが多く、RGとして固有周波数を持つ振動子よりも反射の連鎖（Reflex Chain）を重視する勢力[20]も根強く、100年以上も議論が続いている。これについても、次章以降で詳しく述べる。

3. 「リズムと歩容」と脊髄中枢

3.1 除脳ネコ実験

除脳ネコ[†]を用いた実験として、中脳ネコの歩行誘発野（MLR）刺激強度上昇による二つの結果（Shik 1966）が有名である。一方は「自由ベルト・トレッドミル（freely moving treadmill）」上での「移動速度上昇を伴う」リズム周波数増加と歩容遷移（walk-trot-gallop）であり[19]、他方は「ベルト速度一定・トレッドミル」上での「移動速度変化なし」での同様なリズム変化と歩容遷移であり[2]、同時に前方推進力増加も観測された。また、脊髄ネコの後2脚・トレッドミル上実験[15]では、ベルト速度上昇に対して歩行から走行への遷移に伴い左右脚間の逆位相（walk, trot 相当）から同位相（gallop, bound 相当）への遷移が見られた[13]。さらに歩行誘発野発見以前の実験（Brown 1939）[21][22]では、頭部と胴体で懸架された除脳ネコがトレッドミルのベルト速度上昇に対して同様なリズム変化と歩容遷移を示した^{††}[13]。

これらの実験結果から、歩容を含む4脚ロコモーションの生成・適応を担う基本メカニズムが脳幹以下、おそらく脊髄にあると認識されるようになった。現在、ロコモーションにおいて脚関節の屈筋・伸筋の交替運動が、脊髄中枢の介在ニューロン群で構成されるパターン生成器（Central Pattern Generator, CPG）により生成されることは広く認められている[2]。近年では除脳でもネコでもないが、MLR

に光感応遺伝子を組み込んだマウスで光刺激周波数を変えることにより、RG周波数・duty比・移動速度変化を伴う左右逆位相（walk, trot）から同位相（gallop, bound）歩容への遷移が誘発されている[19]。

3.2 リズム生成の主体と感覚フィードバック

近年CPGは、屈筋と伸筋の交替活動を司るリズム生成部（RG）と、関節を駆動する複数筋活動の共働（synergy）を司るパターン形成部（Pattern Formation, PF）に分けて考えられることが多い[19][22]。脊髄には求心性信号（感覚情報）なしでリズムを生成できるRGが存在することが知られており[2]、RG単体やRGs間相互作用の特性、求心性信号の影響などが実験により詳細に調べられ、歩容を規定する脚間協調は非常に複雑なプロセスであると言われている。一般にCPGを含めてロコモーション全般について感覚フィードバックの重要性が指摘されている[2][19]。

感覚フィードバックがリズムに与える影響について以下述べる。2章で述べたように各脚の運動はSW相とST相から構成され、SW相では屈筋がST相では伸筋が主に働く。TDとLOタイミング調節にはRGへの感覚フィードバックの役割が大きいことが知られている。TDタイミング調節では、SW相後半において腰（関節）屈曲が伸筋活動を活性化することでTDが生じることが示されている[24]。LOタイミング調節では、Grillnerら[25]は脊髄ネコのST相において腰（関節）伸展がある閾値に達するまでLOが生じないことを示した。Pearsonら[26]は脚負荷がLOのための重要な感覚情報であることを示した。その後PearsonらはLOタイミングと腰伸展[27]や脚負荷[28]の関係についてより詳細に報告している。まとめると、腰屈曲がRGのST相への遷移（TD）に、腰伸展と脚負荷がRGのSW相への遷移（LO）に重要な感覚情報として働き、結果としてRG固有のリズムが感覚情報により調節される。これが、神経生理学における一般的な見解である[2][19]。

一方、筋活動がない仮想ロコモーション（fictive locomotion）と除脳ネコ実験の両者において、RGリズムと感覚情報の関係について「屈筋ニューロン活動期間はほぼ一定であるが、伸筋ニューロン活動期間は感覚情報に完全に引き込まれる[2]」ことが観察され、結果としてRGのduty比と周波数は完全に感覚情報に依存している。この観察結果から、「感覚情報もない仮想ロコモーションではかなり不安定なRGの固有周波数[2]」の意義に疑問を持つ見方がいわゆる“Reflex Chain”であると筆者は考える。ここで、固有周波数を持たないが感覚情報により脚相遷移を起こして状態遷移機械として振る舞うRGを想定する。RG以外に例えば胴体ロール（ネコでは重心・左右）運動のリズムが存在するとき、ロール運動は脚負荷に影響を与えるのでRGは感覚情報によりこのリズムに引き込まれて「同一周波数、かつ、あるduty比を持つ」リズムの生成を始め、そしてRGとRGsネットワークがロール運動に影響を与える。この相互作用は何かのきっかけで起動された運動^{†††}が脊髄反射により継続してリズムを生成する“Reflex Chain”と見なすことができ、相互作用の結果としてある周波数と

[†]除脳ネコ（decerebrate cat）とは上位中枢（大脳など）との連絡を切断された標本であり、特に歩行誘発野（Locomotor Region）の一つであるMLRと小脳を残した標本を中脳ネコ（mid-brain cat）、さらにSLRも残し自発的な歩行が可能な標本を視床ネコ（thalamic cat）、脊髄頸部または胸部で切断した標本を脊髄ネコ（spinal cat）とよぶ。除脳ネコは切断部位により拘束・自重支持方法やロコモーション起動方法は異なるが、トレッドミル上でステップ運動を行うことができる。

^{††}上丘前縁で除脳され歩行誘発野刺激なしで歩行が誘発された[21]ので視床ネコであり[23]、前後方向の拘束は弱いことから、ベルトの動きに対して視床ネコとして自発的にMLR刺激強度を上げてベルト速度に適応したと考えられる。

^{†††}3.5節で紹介するシミュレーションでは、静止状態から最初に右脚長を伸展させてロール角左傾斜と右脚負荷低下を起こすことで、左右のRGsとロール運動のリズムを起動している。

duty 比を持つ RG のリズムが感覚情報により創発される。

次節で述べる歩容遷移の要因に関して、リズム生成の主体が脊髄 RG にあると考えたときには、RG として振動子モデルを想定し「上位指令主導型」を仮定することとなる。リズム生成の主体が胴体のロール運動やピッチ運動にあると考えたときには、RG として非振動子モデルを想定し「感覚フィードバック主導型」を仮定することとなる。

3.3 歩容遷移の要因に関する二つの仮説

歩容は 3.2 節で述べた各脚の TD, LO タイミングが脚間協調の影響を受けて最終的に決まる。例えば、腰屈曲・伸展と脚負荷という感覚情報がフィードバックされる RG と左右 RGs 間が相互抑制される RGs ネットワークからなる脚相遷移モデル (図 1) が提案されている [16]。

従来多くの分野で歩容遷移は、RGs ネットワークの重み調節や再構成により生じると考えられてきた。3.1 節の中脳ネコ実験において「MLR 刺激強度上昇が直接 RG 周波数増加と歩容遷移を誘発した」という仮説を建て、ここでは上位指令主導型とよぶ。

神経生理学において、脊髄 RG を構成するニューロン群の同定には至っていないが、近年では、遺伝子変異マウスを用いた実験により RGs 間協調を司るニューロン群の詳細が明らかになりつつある。例えば左右脚 RGs 間をつなぐ交連介在ニューロン群 (CINs) に抑制性 (2)・興奮性 (1) を含めた三つの型があり、MLR 刺激強度の変化に伴い RG または non-RG ニューロンにより CINs の活性が切替えられることで RGs ネットワークは再構成され、左右逆位相 (walk, trot 相当) や同位相 (bound 相当) の RGs 活動パターンが生じることが確認された [19]。計算機シミュレーション [29] において、前後・対角脚 RGs 間では長尺固有脊髄ニューロン群 (LPNs) が CINs と同様な働きをするとし、上位中枢指令 (脳幹ドライブ) により発振周波数を変える RG と活性が切替えられる CINs, LPNs から構成されるニューロン群モデルを用いて、感覚情報もない仮想ロコモーションレベルで脳幹ドライブ強度に応じた 4 脚歩容遷移が示された。ただし、感覚フィードバックに関しては「求心性信号も脳幹ドライブと同様に CINs と LPNs ネットワークに影響を与える」という記述にとどまっている。

一方、Orlovsky は 3.1 節の中脳ネコ実験において、MLR が下位中枢に伝える信号の物理的意味は RG 周波数ではな

く筋肉収縮強度 (前方推進力) であると述べている [2]。また 3.1 節の脊髄ネコ実験において上位中枢指令は存在しない。この二つから「感覚フィードバックが RG 周波数増加と歩容遷移を誘発した」という仮説を建て、ここでは感覚フィードバック主導型とよぶ。具体的には、移動速度上昇時にトレッドミル上で前後方向に拘束されたネコの支持脚・脚先に働く前後方向の力に関して、中脳ネコの MLR 刺激強度上昇では前方推進力が働き、脊髄ネコのベルト速度上昇ではベルトから後方引張り力が働き、「この力のモーメントによる胴体ピッチ運動の変化がきっかけとなり、その後の感覚フィードバックによる状態変化が歩容遷移の主要因である」という仮説である。詳細を次節以降で説明する。

ここで定義した二つの仮説の大きな相違点は、「RG 周波数が上位中枢指令と感覚フィードバックのどちらで決定されるか」と「RGs ネットワーク再構成の有無」にある。

「上位指令主導型」と比較して「感覚フィードバック主導型」歩容遷移において考慮すべきは、ロコモーション中の胴体ロール運動とピッチ運動により生じる脚負荷パターン変化が各脚 RG の SW 相遷移 (LO) タイミングに大きな影響を与え、RGs 間協調メカニズムとして重要な役割を果たす点である。すなわち、RGs ネットワークによる明示的な RGs 間協調メカニズム以前に、移動速度に応じた大域的な身体運動変化が脚負荷という局所的な感覚情報を通して各脚 RG の LO タイミング調節を行い、脊髄レベルで非明示的な RGs 間協調メカニズムが働き歩容遷移が誘発される。

3.4 関連するロボティクス研究事例

振動子型 RG を用いた「上位指令主導型」歩容創発シミュレーションの事例として、多賀ら [30] の CPG への定常入力を増加させることによるリズム周波数増加を伴う 2 足歩行から走行への遷移や、Ijspeert ら [31] の上位指令による RG 周波数変化と RGs ネットワーク再構成によるサンショウウオの歩行と遊泳の切替えがよく知られている。

また、上位指令を仮定した移動速度変化から同一の RGs ネットワークを用い感覚情報による調節で 4 脚 walk-trot 歩容遷移がロボットで実現されている [32] [33]。特に青井ら [33] は、脚間相互作用の位相ダイナミクスに TD による位相リセットを導入して自律歩容遷移を実現し、位相差データのポアンカレマップからポテンシャルを構成して、位相差安定性の観点から「歩容遷移」と「遷移移動速度・ヒステリシス」の理由を説明した。このような位相ダイナミクス上での議論は、数学的な背景を与え自律歩容遷移の要因を構成論的に理解する大きな助けとなる。

福岡ら [34] は、RG への感覚フィードバックとして腰関節角と脚負荷を用い、移動速度増加によって生じる胴体ピッチ運動変化に起因する脚負荷パターン変化の結果として異なる歩容 (walk, trot, gallop) が生成されることを二次元シミュレーションにより示した。RG として振動子を用いているため周波数は手動で調節されているが、RGs ネットワークは同一で左右 RGs 間には左右逆位相歩容 (walk, trot) を生成する相互抑制結合であるにもかかわらず、脚負荷の左右脚間同期によって左右同位相歩容 (gallop) が生成されて

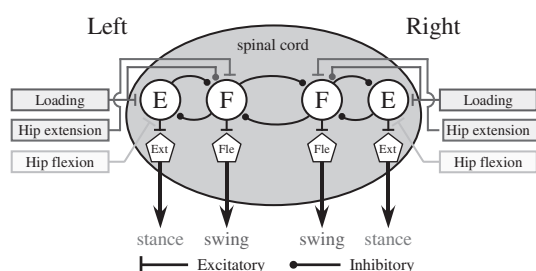


図 1 脊髄・脚相遷移モデル (文献 [16] より筆者が改変)
左右の各 RG は相互抑制する伸筋 HC (Half Center): E と屈筋 HC: F からなる。E と F はそれぞれ伸筋・屈筋運動ニューロン (Ext, Fle) に投射して、それぞれ ST 相と SW 相を生成する

いることは、「上位指令主導型」でありながら「感覚フィードバック主導型」での歩容遷移の可能性を示唆している。

非振動子型 RG を用いた「感覚フィードバック主導型」歩容創発の事例として、Ekeberg と Pearson [35] は、RG への感覚フィードバックとして腰伸展と脚負荷を用い、RGs ネットワークなしで安定な後 2 脚ステッピング運動が生じることを、腰伸展のみでは不安定であることを三次元シミュレーションにより最初に示した。筆者らは、RG への感覚フィードバックとして脚負荷のみを用い、最低限の RGs ネットワークで歩容 (walk, pace) 生成や横方向摂動時・ロール運動安定化が可能なことを三次元 4 脚シミュレーション [36] と 4 脚ロボット実験 [37] により示した。

3.5 感覚フィードバック主導型とパターン創発

相互作用の詳細やロコモーション・パターン創発の簡便さ・面白さを知っていただくために、簡単な例を紹介したい。脊髓ネコモデル (図 1) を用いた脊髓ネコ・後 2 脚・歩容遷移 [15] のシミュレーション結果 [38] を図 2 に示す。トレッドミル上ロコモーションを模擬するため、ロボットは胴体部の前後・上下方向がバネ・ダンパ拘束されており、図 2 の運動ではそれぞれ振幅が 1 [cm] 程度の振動が発生する [13]。

図 2 では上から、(a) 歩容線図、(b) 胴体ロール角とピッチ角、左右脚それぞれの (c) SW 相・ST 相・SC の期間 (T_{sw} , T_{st} , T_{sc}), duty 比, (d) AEP と PEP, (e) 脚先前後接線方向力 (ベルト引張り力), (f) 脚負荷が示されている。LO 条件で重要な脚負荷は ST 相初期では TD 時の衝突の影響を強く受け、その後は胴体下向き加速度の影響で減少する。定常状態では両脚の運動はロール運動に引き込まれており、ベルト速度変化の前後でロール運動の振動振幅は T_{sc} 減少のため小さくなる [17]。すなわち、ロール運動と両脚の運動の相互引き込みの中で、定常状態ではロール運動がリズムと歩容を安定させ、非定常状態ではロール運動が脚の運動の影響で変化したことを示している。

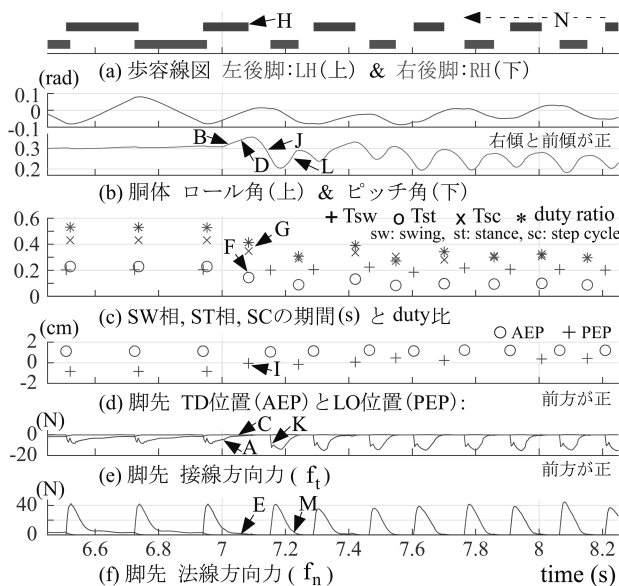


図 2 後 2 脚・脊髓ネコのトレッドミル上・歩行-走行歩容遷移 [15] のシミュレーション結果 [38]。時刻 7 [s] にベルト速度が 0.15 [m/s] から 0.3 [m/s] に変化した

低ベルト速度 (0.15 [m/s]) では、 T_{st} が長いこと PEP は AEP とほぼ同じ値であり、後方ベルト引張り力が小さいためピッチ角振動振幅は小さい。また、ST 相後半でピッチ運動・角加速度の脚負荷への影響が小さいため、脚負荷は左右脚で交替し両脚が SW 相となることはなく、duty 比約 0.53 の歩行が生じている。時刻 7 [s] にベルト速度が増加 (0.3 [m/s]) したあとの経過を以下に述べる。

- (1) 前後方向拘束のため支持脚：LH 先端に働く後方ベルト引張り力が少し大きくなり (図中：A)，胴体に正のモーメントが働きピッチ角が増加する (B)。
- (2) ベルト引張り力減少 (C) によるピッチ運動減速時の負の角加速度 (D) は脚負荷を減少させ (E)，早期 LO のため T_{st} が減少する (F)。一方、 T_{sw} はほぼ一定であり、 T_{st} の減少分だけ T_{sc} と duty 比が減少する (G)。
- (3) この時点で走行への遷移 (H) が発生しており、図 2 (b) の各 SC (Step Cycle) で、ロール運動は 1 周期・ピッチ運動は 2 周期の振動をしている。
- (4) 図 2 (c) の T_{sw} 一定・ T_{st} 減少のため AEP はほぼ一定・PEP は前方に移動 (I) して歩幅は小さくなるが、 T_{sc} ・duty 比の減少と跳躍の結果として、ロボットは自律的にベルト相対速度を上げ、ほぼ一定の位置にとどまる。
- (5) 両脚 SW 相期間にピッチ角は減少するが (J)，RH の TD 後に大きなベルト引張り力 (K) が働いてピッチ角は増加 (L) に転じて、ピッチ角振動の振幅は増大する。
- (6) ピッチ角振動の負の角加速度 (L) は RH の脚負荷を減少させ脚負荷パターンがさらに変化する (M)。
- (7) まとめて、ベルト速度増加はピッチ角振動の振幅を増大させ (L)，脚負荷パターンが変化した (M)，歩容は左右対称で定常的な走行 (N) に自律的に遷移した。

結果、図 2 (c) に示された指標の変化は脊髓ネコ・後 2 脚・歩行-走行歩容遷移時の変化 (文献 [15] の Fig. 1) と一致する。また、胴体ピッチ運動の変化 (b) と PEP の変化 (d) は、動画 [13] をよく再現している。さらに、同じモデルを用いて脊髓ネコ・後 2 脚・スプリットベルト適応 [16] が再現されている [38]。これらのことは、ここで用いた脊髓ネコモデルの妥当性を示している。

以上、感覚情報で脚相遷移を行う非振動子型の RG を用いて、胴体のロール運動がリズムと歩容を生成し、ピッチ運動変化が歩行-走行歩容遷移を誘発することが示された。

ベルト速度：0.4 [m/s] で、ピッチ運動の各 SC での 2 周期から 1 周期振動への遷移、ロール運動からピッチ運動へのリズム生成主体の遷移、その結果として左右逆位相から同位相への遷移 [15] が確認されている [13]。ベルト速度ではなく推進力の増加による歩容遷移 [2] の再現も望まれる。

3.6 二つの主導型の関係と統合について

パターン創発の目的の一つは感覚情報に基づく適応的なパターンの自律生成であり、パターン生成器にどのように感覚フィードバックを組み込むか [32]~[38] は最重要課題の一つである。ここでは RG の構成法の違いから歩容創発に対する手法として二つの主導型を紹介した。振動子型 RG

と RGs ネットワークは神経生理学的知見により忠実であり、上位指令による RG リズム調節と RGs ネットワーク再構成により歩容生成・遷移を実現可能であるが、RGs ネットワークと感覚フィードバックの関係についてまだ不明な点が多いことから、感覚フィードバックによる自律・適応的な歩容生成・遷移の実現は現時点では困難を伴う。一方、非振動子型 RG はこの知見の重要な部分を切り捨てているが、完全な感覚情報依存であるので、RGs ネットワークへの感覚フィードバックなしでも RG 単体レベルで感覚フィードバックによる自律・適応的な歩容生成・遷移を容易に実現可能であると期待される。

このように、脊髄ネコ・中脳ネコ実験でのパターン創発を理解するための構成論的アプローチとして、「感覚フィードバック主導型」でこれらを再現できる可能性が見えてきた。さらに、身体と環境の相互作用の結果としてのパターン創発はロボティクスの得意分野でもあり、本稿の読者の興味を強く引くと期待している。このことから、本稿では非振動子型の RG を用い、「感覚フィードバック主導型」のリズム生成と歩容遷移について詳細に述べた。

いずれにしても動物のリズム運動についてのいわゆる「“CPG vs. Reflex Chain” 100 年論争」が少し形を変えて今も続いているが、この二つの主導型を統合できればロボティクス側から論争決着を提案できる。統合のために固有周波数を持ち感覚情報に強く引き込まれる脊髄 RG に近い特性を持つ RG モデルを用いた試み [39] もあるが、膨大な数のパラメータの調節問題を克服する必要がある。

3.7 除脳ネコ規範型ロボティクスの夢

本章のまとめとして、Brown (1939) の視床ネコ・トレッドミル上歩容遷移の過程を考えてみる[†]。ベルトの動きに対して大脳周辺系 [23] が働き、「快・不快」の情動的評価に基づきベルト速度適応行動が発動される。そして、大脳基底核による抑制があればこれを解除して、ベルト速度上昇に合わせて MLR 刺激強度を上げる。「上位指令主導型」仮説では、MLR 出力は脳幹ドライブとして脊髄 RG に投射されて RG リズム調節や RGs ネットワーク再構成が行われ、感覚フィードバックも働き移動速度上昇と歩容遷移が発現する。一方、「感覚フィードバック主導型」仮説では、脳幹ドライブは脊髄で筋肉収縮強度を上げ、支持脚による前方推進力増加は胴体ピッチ振動・振幅増加となり、その結果の各脚での脚負荷・時間パターン変化は RG リズム変化によるベルト速度適応を生み、脚負荷・空間パターン変化は歩容遷移を発現する。脚間協調には小脳の働きも欠かせない [40]。この歴史的実験の構成論的な再現と理解にあと何年かかるであろうか。

4. 「リズムと歩容」と能動機械特性

アクチュエータを含む機構の柔らかさを利用してフィードフォワードと簡単なフィードバック制御を用いた 6 脚歩行・走行ロボット [4] は、身体と環境の相互作用の中で高い不

整地踏破性を示した。そこで Buehler らと Cutkosky らは、仮想バネ-質量系 [14] の持つ自己安定性について論じている。

増田ら [41] は、空気圧人工筋、受容器（力センサ）、バルブを用いて伸張反射デバイスを構成し、各脚にこれを 4 個備えた後 2 脚ロボットを用いて計算機を用いることなく左右逆位相の走行が生成されることを示した。そこでは、3.2 節で紹介された Pearson らの三つの実験結果 [24] [27] [28] を三つの伸張反射の連鎖（Reflex Chain）と解釈して機械的に実装しリズムを生成している点が大変興味深く、3.2 節で述べた脊髄中枢 RG による Reflex Chain との類似性は高い。また、RG を用いたシミュレーション [35] [36] では左右 RGs ネットワークなしでもロール運動によって生じる左右間脚負荷の交替により左右逆位相歩容の生成が示されたが、増田は同じく明示的な左右脚間協調なしで空気圧人工筋の「弱い特性」によって左右逆位相歩容が生成されると述べている。さらに、前者では RG の ST-SW 相遷移後の屈筋活動による LO から歩行が継続することに対して、後者では対側脚の TD による支持脚負荷の減少が伸筋の強い収縮を起こし床を蹴ることで LO から走行を生成している点も興味深い。

5. 「リズムと歩容」と受動機構特性

2 脚受動機械が「関節摩擦や斜面との衝突による損失エネルギー」と「斜面を下る位置エネルギー」の出入りの中で歩行・走行パターンを創発することはよく知られている。4 脚受動歩行や 6 脚以上の超多脚受動歩行では、胴体部の自由度構成やその剛性などに依じて異なる歩容が創発する [11] ことは容易に理解できる。杉本ら [42] は 2 脚の受動歩行・走行において、各ステップサイクル・衝突点間のポアンカレマップ内部にフィードバック構造が存在することを解析的に示した。また、斜面の傾斜角を変化させたとき、「歩行周期（リズム）の分岐現象が生じる理由」や「動歩行から歩行に歩容遷移する理由」についてもポアンカレマップの安定性解析を用いて説明した。特に「動歩行から歩行への歩容遷移」がポアンカレマップ内部フィードバック構造の「不安定から安定への遷移」である点は、3.4 節で述べた青井らの研究 [33] と同様に歩容遷移の要因が解析的に示されという意味で「脚式ロコモーションの原理」の一端がロボティクス側から示された例である。

6. おわりに

ロコモーション・パターン創発研究の背景とその興味深い点について私見を交えて述べた。特に、4 脚動物でリズムと歩容がどのように規定され結果として創発するかという点について、主に神経生理学的知見を紹介し、対応するロボティクス研究を紹介した。リズムと歩容の創発では、周波数・duty 比から脚間位相差・脚先離地位置（PEP）といったネコ・ロコモーションを表す指標 [2] のほとんどが、「上位中枢の指令、下位中枢の CPG を含む感覚-運動機能、アクチュエータの能動的特性、筋骨格系の受動的特性」と「環境」との相互作用から生じること [4] [43] までは広く理

[†]3.1 節で述べた実験の詳細が不明のため、上位機能の一部は筆者の独断です。

解されてきた。各レベルのメカニズムと環境との相互作用の詳細な解明と各レベル間の関係の解明において、生物学とロボティクスのより良い共働が進むことを期待する。

筆者が神経生理学的知見にこだわる理由は、「ロコモーションの原理」追及の真摯な努力の歴史と適切な教科書 [2] [19], および遺伝子変異マウス [19] [40] に代表される近年の強力な道具にあります。思えば、学生時に指導していただいた三浦宏文先生の「昆虫規範型ロボティクス」は、傍で見ただけですが、昆虫の仕組みを理解し、その本質を知り、機構・感覚-駆動系設計や制御に生かし、人の役に立つ機械を作るという趣旨だったと理解しています。意欲ある若手研究者がさらに参入し研究費もしっかり流入して、アプローチは違えどもロコモーション研究がさらに発展することを願って本稿を終えます。最後に本「展望」を書く機会を与えて下さった各位に感謝致します。

参 考 文 献

- [1] <http://adaptivemotion.org/>
- [2] G.N. Orlovsky, T.G. Deliagina and S. Grillner: Neural control of locomotion. pp.62–246, Oxford Univ. Press NY, 1999.
- [3] M.H. Dickinson, et al.: “How Animals Move: An Integrative View,” *Science*, vol.288, no.546, pp.100–106, 2000.
- [4] H. Kimura, K. Tsuchiya, A. Ishiguro, H. Witte (Eds.): *Adaptive Motion of Animals and Machines*. Springer-Verlag, 2005.
- [5] H. Haken: *Principles of brain functioning*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996. 奈良, 山口 (訳): 脳機能の原理を探る. Springer-Verlag Tokyo, 2000.
- [6] 土屋: “複雑系の構成原理”, 計測と制御, vol.38, no.10, pp.605–611, 1999.
- [7] 國吉: “ロボティック・サイエンスとは何か”, 日本ロボット学会誌, vol.28, no.4, pp.370–374, 2010.
- [8] 清水: 生命知としての場の論理. 中公新書, 1996.
- [9] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators,” *Biolog. Cybern.*, vol.65, pp.147–159, 1991.
- [10] 特集: 身体・脳・環境の相互作用による適応的ロコモーション機能, 計測と制御, vol.48, no.9, 2009.
- [11] 特集: 多脚生物の歩容とロボットによる実現, 日本ロボット学会誌, vol.37, no.2, 2019.
- [12] 特集: 身体と環境の相互作用, 日本ロボット学会誌, vol.38, no.10, 2020.
- [13] <http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/RSJ-J-2023.html>
- [14] R. Blickhan and R.J. Full: “Similarity in multilegged locomotion: bouncing like a monopode,” *J. Comp. Physiol. A.*, vol.173, pp.509–517, 1993.
- [15] H. Forssberg, S. Grillner, J. Halbertsma and S. Rossignol: “The locomotion of the low spinal cat. II. Interlimb coordination,” *Acta Physiol. Scand.*, vol.108, pp.283–295, 1980.
- [16] A. Frigon, et al.: “Left-right coordination from simple to extreme conditions during split-belt locomotion in the chronic spinal adult cat,” *J. Physiol.*, vol.595, no.1, pp.341–361, 2017.
- [17] 木村, 下山, 三浦: “四足動物歩行ロボットの力学的解析”, 日本ロボット学会誌, vol.6, no.5, pp.367–379, 1988.
- [18] D.L. Jindrich, et al.: “Dynamic stabilization of rapid hexapedal locomotion,” *J. Exp. Biology*, vol.205, pp.2803–2823, 2002.
- [19] T. Drew and O. Kiehn: “Locomotion (Chap.33): Principles of Neural Science 6th edn,” E.R. Kandel, et al. (Eds.), pp.783–814, McGraw Hill NY, 2021. 西丸 (訳): ‘歩行運動 (第 33 章)’, カンデル神経科学 第 2 版. pp.797–827, メディカル・サイエンス・インターナショナル, 2022.
- [20] H. Cruse: “The functional sense of central oscillations in walking,” *Biolog. Cybern.*, vol.86, pp.271–280, 2002.
- [21] A. Lundberg and C.G. Phillips: “T. Graham Brown’s film on locomotion in the decerebrate cat,” *J. Physiol.*, vol.231, no.2, pp.90–91, 1973.
- [22] D.G. Stuart and H. Hultborn: “Thomas Graham Brown (1882–

- 1965), Anders Lundberg (1920–), and the neural control of stepping,” *Brain Res. Review*, vol.59, no.1, pp.74–95, 2008.
- [23] 高草木: ‘歩行運動における随意的側面と自動的側面’, シリーズ移動知第 2 巻「身体適応」. pp.44–62, オーム社, 2010.
- [24] D.A. McVea, et al.: “A role for hip position in initiating the swing-to-stance transition in walking cat,” *Neurophysiol.*, vol.94, no.5, pp.3497–3508, 2005.
- [25] S. Grillner and S. Rossignol: “On the initiation of the swing phase locomotion in chronic spinal cats,” *Brain Res.*, vol.146, pp.269–277, 1978.
- [26] J. Duysens and K.G. Pearson: “Inhibition of flexor burst generation by loading ankle extensor muscles in walking cats,” *Brain Res.*, vol.187, pp.321–332, 1980.
- [27] G.W. Hiebert, P.J. Whelan, A. Prochazka and K.G. Pearson: “Contribution of hind limb flexor muscle afferents to the timing of phase transitions in the cat step cycle,” *Neurophysiol.*, vol.75, no.3, pp.1126–1137, 1996.
- [28] P.J. Whelan, G.W. Hiebert and K.G. Pearson: “Stimulation of the group I extensor afferents prolongs the stance phase in walking cats,” *Exp. Brain Res.*, vol.103, no.1, pp.20–30, 1995.
- [29] S.M. Danner, et al.: “Computational modeling of spinal circuits controlling limb coordination and gaits in quadrupeds,” *eLife*, 10.7554/eLife.31050, 2017.
- [30] 多賀, 山口, 清水: “二足歩行運動の自己組織的制御”, *HOLONICS*, vol.2, no.2, pp.131–151, 1991.
- [31] A.J. Ijspeert: “A connectionist central pattern generator for the aquatic and terrestrial gaits of a simulated salamander,” *Biolog. Cybern.*, vol.84, no.5, pp.331–348, 2001.
- [32] Y. Fukuoka, H. Kimura and A.H. Cohen: “Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts,” *Robotics Res.*, vol.22, no.3–4, pp.187–202, 2003.
- [33] S. Aoi, et al.: “A stability-based mechanism for hysteresis in the walk-trot transition in quadruped locomotion,” *Royal. Soc. Interface*, 10:20120908, 2013.
- [34] Y. Fukuoka, Y. Habu and T. Fukui: “A simple rule for quadrupedal gait generation determined by leg loading feedback: a modeling study,” *Sci. Rep.*, 10.1038/srep08169, 2015.
- [35] O. Ekeberg and K. Pearson: “Computer simulation of stepping in the hind legs of the cat: an examination of mechanisms regulating the stance-to-swing transition,” *Neurophysiol.*, vol.94, no.6, pp.4256–4268, 2005.
- [36] C. Maufroy, H. Kimura and K. Takase: “Integration of posture and rhythmic motion controls in quadrupedal dynamic walking using phase modulations based on leg loading/unloading,” *Auto. Robots*, vol.28, pp.331–353, 2010.
- [37] 木村: ‘歩行の工学的実現 (II) —四足歩行ロボット’, シリーズ移動知第 2 巻「身体適応」. pp.285–311, オーム社, 2010.
- [38] 古殿, 木村: “ネコの歩容遷移・適応の感覚-運動レベルでの構成論的理解 —脊髄モデルの検証—”, 自律分散システムシンポジウム, 2A3-2, 2023.
- [39] C. Maufroy, H. Kimura and K. Takase: “Towards a general neural controller for quadrupedal locomotion,” *Neural Networks*, vol.21, no.4, pp.667–681, 2008.
- [40] 柳原: ‘適応的歩行における小脳の役割’, シリーズ移動知第 2 巻「身体適応」. pp.63–80, オーム社, 2010.
- [41] 増田: “無脳歩行現象: 「弱い」モータや筋肉から発現する運動パターン”, 日本ロボット学会誌, vol.38, no.10, pp.920–925, 2020.
- [42] 杉本: ‘受動的動歩行’, シリーズ移動知第 2 巻「身体適応」. pp.237–259, オーム社, 2010.
- [43] 土屋, 高草木, 荻原 (編): シリーズ移動知第 2 巻「身体適応」. オーム社, 2010.



木村 浩 (Hiroshi Kimura)

1988 年東京大学機械工学専攻博士課程修了。工学博士。東北大学、電気通信大学を経て、2008 年より京都工芸繊維大学・教授。1996 年 CMU 客員研究員。脚ロボット等の研究に従事。第 3, 17 回日本ロボット学会論文賞, 2003 年度船井情報科学振興賞, SAB2004 Best Technical Paper Award を受賞。(日本ロボット学会正会員)