学術・技術論文

リズムと歩容を自律生成する4脚ロボット制御器
—ネコ・後2脚歩行–走行遷移のシミュレーション—

木　村　　　浩*1　モフロァ　クリストフ*2　古　殿　幸　大*1

Quadruped Robot Controller Autonomously Generating Rhythm and Gait
—Simulation of Walking-to-Running Transition of Cat with Hindlimbs—

Hiroshi Kimura*1, Christophe Maufroy*2 *and* Kodai Kodono*1

We have been intending to realize a quadruped robot controller autonomously generating rhythm and gait while utilizing natural body dynamics under the gravity. For this purpose, we newly proposed a model of the rhythm generator mainly consisting of sensorimotor functions in the spinal cord, and simulated the walking–running transition of a low spinal cat with hindlimbs according to increased belt speed on a treadmill (Forssberg et al. 1980). In this simulation, we constructed a physical model of the hind-legged biped robot with a trunk and fixtures, and used an independent leg controller with such rhythm generator for each leg. When we employed hip flexion/extension and leg unloading as sensor information for the stance–to–swing phase transition of the rhythm generator, the rhythm in the steady walking could be generated mainly based on leg unloading. In the transient state under the perturbation of belt speed change and the steady running, different rhythms could be autonomously generated based on the combination of leg unloading and hip flexion/extension. Moreover, the walking–running transition could emerge by the change of the dynamics structure triggered by the increase of belt speed.

Key Words: Emergence of Locomotion, Constructive Understanding, Spatiotemporal Pattern, Spinal Cord, Sensorimotor Functions, Self-excited Oscillation

1. は　じ　め　に

ロボット研究における重要な課題の一つに，外界への自律適応が挙げられる．ロボットの自律適応を創発を利用して実現する試みが近年提案されている [1] [2]．創発とは，「非線形力学系と環境との相互作用の中での自律分散的かつ自己組織的な時空間パターンの生成」を意味する [3] [4]．生物のロコモーションの原理を同様に「中枢神経や身体と環境との相互作用」で説明する考えも一般的になってきた [5] [6]．また，ロボティクスと生物学が共働してロコモーションの原理を明らかにしようという試みもある [7]〜[9]．

脚式ロコモーション（歩行と走行）が創発により実現可能であることは，多賀ら [10] の神経振動子を用いた 2 足歩行シミュレーションにより最初に示された．その背景には，除脳ネコを用いたトレッドミル上ロコモーション実験 [11]〜[15] がある．これらの実験結果から，4 脚動物のロコモーションの生成と適応を担う基本メカニズムが脊髄にあり，上位中枢の指令に基づいて脳幹や小脳などがそれを起動と調節しながら [8]，ロコモーションが創発すると考えられている．現在，4 脚動物のロコモーションにおいて関節の屈筋と伸筋の交替活動が，脊髄介在ニューロン群で構成される中枢性パターン生成器（Central Pattern Generator, CPG）により生成されることは広く認められている．CPG は交替活動を司るリズム生成器（Rythm Generator, RG）と複数筋活動の共働を司るパターン形成部（Pattern Formation, PF）に分けられる．RG 単体や RG 間相互作用の特性と求心性（感覚）情報の影響などが詳細に調べられ，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 [16] [17].

一方，4 脚ロボットの歩容†生成と遷移の研究も数多く行われてきた．4 脚ロボット制御では，目標パターンとして脚や関節個々の周期的な運動パターン以前に，ロコモーションのリズム（周波数とデューティ比）と脚間位相差を与え，感覚情報を用いて歩容安定化を図る手法 [18]〜[20]，上位指令のパラメータ変更により歩容遷移を行う手法 [19] [21] がある．また，自律制御を目指した研究では，RG を与えてリズムと歩容の生成を行い，感覚情報を用いて歩容遷移を行う手法 [22]〜[29] が用いられてきた．しかし，「リズムと歩容」両方の自律的な生成と遷移は時空間パターンの創発を意味するので，いまだ困難な問題として

原稿受付　2023 年 6 月 15 日
*1 京都工芸繊維大学
*2 フラウンホーファー研究所バイオメカトロニック部門
*1 Kyoto Institute of Technology
*2 Department Biomechatronic Systems, Fraunhofer Institute IPA
■ 本論文は新規性（システム設計・構築分野）で評価されました.
■ J-STAGE では本論文の電子付録として動画が閲覧できます.

† 対角，左右同側，前後同側の 2 脚が対になった歩容をそれぞれ trot, pace, bound と，すべての脚間に位相差がある場合を walk, gallop とよぶ．一般に低速では walk が中速では trot が高速では gallop, bound が現れる．さらに，2 脚間位相差（$-\pi \sim \pi$）が $\pm\pi$ のとき逆位相（out-of-phase），0 のとき同位相（in-phase）とよぶ．

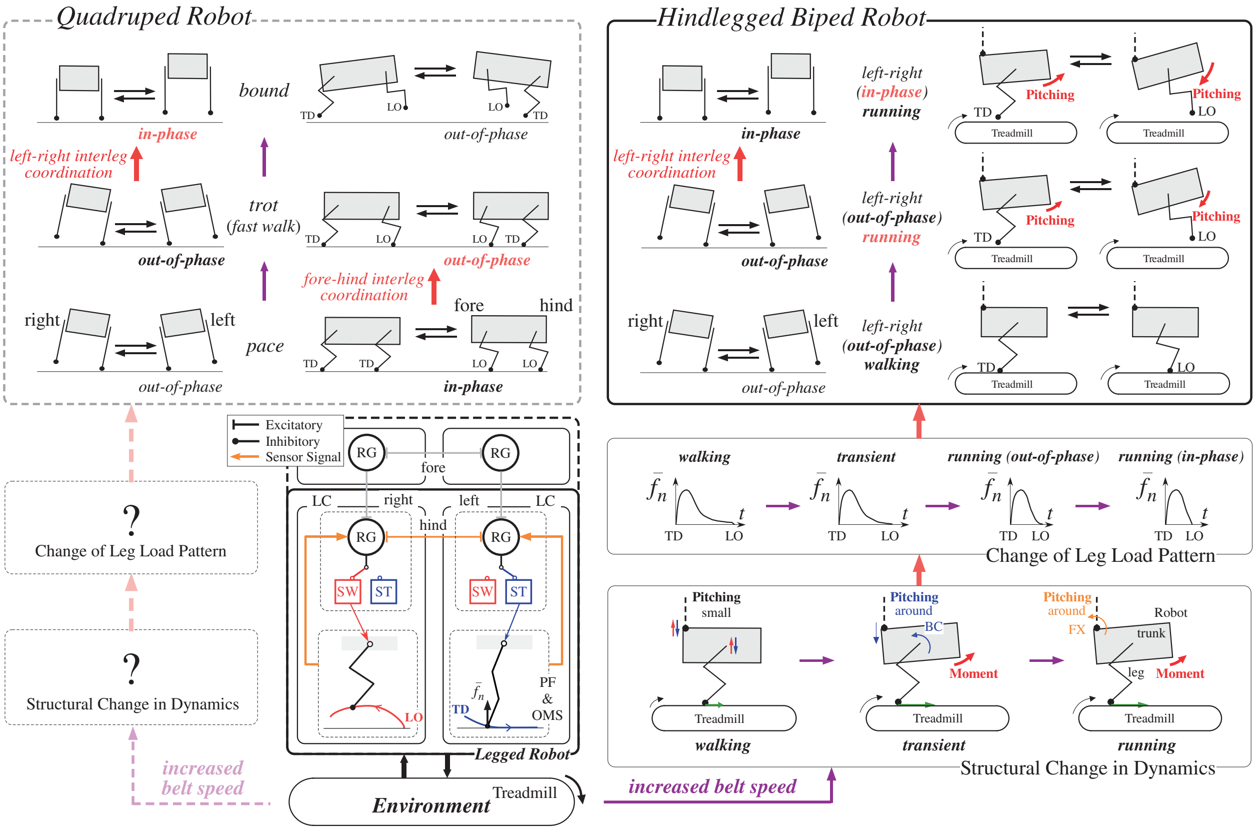


Fig. 1 Emergence of legged locomotion in this study (Lower Center : mutual interaction between a biped/quadruped and environment. Right : process of changes in dynamics (lower) and gait transition in a biped (upper). Left : gait transition in a quadruped (upper).)

残されている [30].

本論文では，同一の制御器パラメータと感覚情報のみを用いて，トレッドミルベルト速度上昇に対してリズムと歩容が創発するとき，自律適応が実現されたとする．そして，創発においては生成と適応や遷移に違いはないので，以後これらをまとめて「自律生成」と簡単によぶ．自律生成の具体的な例としては，自由ベルト（freely moving）トレッドミル上除脳† (中脳）ネコの上位指令（MLR 刺激強度上昇）に伴う移動速度上昇時に観察されたリズムと歩容の遷移実験 [11] がよく知られている．本研究の目的は，この実験の構成論的理解†† [1] [2] を試み，成功裡に得られた制御器を 4 脚ロボットに適用することである．構成論的理解の対象は，ネコの神経システムではなく，リズムと歩容の自律生成という物理現象の創発メカニズムである．

ここで本研究では，上位中枢からの指令のない脊髄ネコを参考にする．その背景には，高位脊髄ネコ · 4 脚実験で最初に pace が現れその後に前後脚間で同位相（pace）から逆位相（trot）への遷移 [12] が，低位脊髄ネコ・後 2 脚実験で歩行から走行への遷移の後に左右脚間で逆位相（pace, trot 相当）から同位相（bound 相当）への遷移 [15] が，それぞれベルト速度上昇時に観察されたことがある．この二つを組み合わせることで（**Fig. 1**：左上），pace から trot 経由で bound への 4 脚歩容遷移が脊髄・感覚–運動機能のみで可能と考えている．

本研究の概略図（Fig. 1）において，本論文では最初に RG を中心とする脚制御器（Leg Controller, LC，図下中）の設計方針について述べ，脊髄ネコ・後 2 脚実験 [15] でのリズムの変化と左右逆位相での歩行から走行への遷移をシミュレーションで再現し（図右上），遷移過程を時間に沿って詳細に追うことで感覚–運動機能が具体的にどのように働くかを説明する（図右下）．そして，脚制御器と物理モデルから成る構成論的モデルの妥当性評価をネコやイヌの実験結果との比較により行う．次の課題である 4 脚歩容遷移（pace–trot–bound）について考察するとき図左下を用いる．

以上により，本研究では脊髄・感覚–運動機能のみを用いてリズムと歩容という時空間パターンが創発する枠組みを提案し，本論文では歩行–走行というリズムの自律遷移をその最初の例として示す．関連する研究の動画や資料が筆者のホームページ [31] で公開されている．

2. リズムと歩容の自律生成

2.1 創発する脚式ロコモーション・パターン

脚の運動は遊脚（swing, SW）相と支持脚（stance, ST）相か

† 上位中枢との連絡を切断された標本であり，特に歩行誘発野（LR）の一つである MLR と小脳を残した標本を中脳ネコ，さらに SLR も残した標本を視床ネコとよぶ [8]．上位中枢すべてとの連絡を切断された標本のうち，脊髄頸部または胸部で切断されたものをそれぞれ，高位脊髄ネコ，低位脊髄ネコとよぶ．除脳ネコは切断部位により拘束と自重支持方法や運動起動方法は異なるが，トレッドミル上でステッピングを行う．視床ネコは自発的な歩行が可能であり，頭部で拘束された中脳ネコは MLR 刺激によりステッピングを開始する．トレッドミル駆動でステッピングが起動される脊髄ネコでは，ベルト速度上昇時に歩容遷移が観察される．

†† 要素自身と要素間のダイナミクスを定義したモデルを構成し，モデルと環境との相互作用の力学シミュレーションや実験により創発現象を模擬する．そして，結果として現れた時空間パターンの生成や遷移の過程を，数理的に解析する，もしくは，詳細に分析することで，創発現象の背後にあるメカニズムの理解を目指す．

ら構成され，SW–ST 相切替が接地（touch down, TD），ST–SW 相切替が離地（lift off, LO）であり，各脚の TD と LO の時刻が分かればリズムを指標化し歩容線図を作成できる．リズム指標として，SW 相期間 T_{sw} と ST 相期間 T_{st}，および，ステップサイクル期間 $T_{sc}\,(=T_{sw}+T_{st})$，デューティ比 $\bar{\beta}\,(=T_{st}/T_{sc})$ を用いる．Δ_{TD} は TD 時の正規化・脚間位相差を表す．TD 時と LO 時の脚先位置はそれぞれ AEP と PEP（Anterior & Posterior Extreme Position）とよばれる．環境との相互作用としての床反力パターン [32] をこれらの指標に加えて，ロコモーション指標とする．

脚式ロコモーションの特徴は脚相切替の繰り返しである．脚相切替のうち TD が安定化に大きく寄与していることは，初期の 1 脚 [18] や 2 脚 [33] ロボット研究や近年のモデル解析研究 [34]～[36] でも示されている．本研究では，創発におけるロコモーション指標間の密接な関係を明らかにし，LO がリズムと歩容の自律生成に大きな役割を果たすことを示す．

健常ネコの歩行と中速走行において，移動速度上昇時に T_{st} は双曲線的に減少し PEP はほぼ線形な後方伸展を見せる一方で，T_{sw} と AEP はほぼ一定であることが観察されている（文献 [16]：Fig. 10.1-D&E）．脊髄ネコでも同様な結果が観察されている [14]．本論文では創発メカニズムの構成論的理解において，このような移動速度と指標変化の関係に力学的合理性があると考え，制御器の設計と評価の基準とする．

2.2　脊髄 RG の特性

脊髄で自発的にリズム生成する神経回路の詳細な解明が，ヤツメウナギを用いて行われた [16]．ネコについて文献 [16]（Fig. 11.1-A&B，11.11-A）を参考にして，脊髄 RG の特性と感覚入力の関係をまとめると以下となる．

(a) 感覚入力なしでも RG は自発的にリズムを生成できる．ただし，伸筋ニューロン活動期間の変動が大きく，結果として周波数は最大約 3 倍も変化する．
(b) 屈筋ニューロン活動期間は感覚入力とほぼ無関係である．
(c) 伸筋ニューロン活動期間は感覚入力に完全に引き込まれる．結果として RG のデューティ（伸筋活動）比とサイクル期間は完全に感覚入力に依存している．

(a) に関連して，脊髄ネコや中脳ネコは感覚入力を除去された後も，トレッドミル上でよく組織化された歩行を示すことができる（文献 [17]：Fig. 33-6）．

この重要な神経生理学的知見から，RG のモデルとして自発的発振と同期の機能を併せ持つ非線形振動子が想定され，脚式ロコモーションのシミュレーションやロボット実験でも非線形振動子が用いられることが非常に多かった [10] [22]～[29]．

2.3　脊髄の感覚–運動機能と脚間協調

感覚フィードバックがリズムに与える影響について，SW 相では屈筋が ST 相では伸筋が主に働くことを念頭に置いて，除脳ネコの実験で得られた知見を以下述べる．TD と LO の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）前方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 [37]．LO タイミング調節では，Grillner ら [13] は脊髄ネコの ST 相において腰（関節）後方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 [38] は支持脚足首伸筋への加負荷が足首屈筋の活動を抑制することを示した．まとめると，SW 相で「腰屈曲が TD を促進する」，ST 相で「腰伸展と脚徐負荷が LO を促進する」あるいは「腰屈曲と脚加負荷が LO を抑制する」となる．

歩容は，この各脚の 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．上で述べた Grillner らの左右スプリットベルト実験†において片脚を手のひらに載せ腰伸展を変化させて LO を起こしたときに，ベルト上の対側脚の脚相は ST 相とは限らず SW 相でも相当数観察された（文献 [16]：Fig. 11.11-D）ことは，左右 RG 間協調が抑制性とは限らないことを示している．また，1 章で紹介した脊髄ネコ・後 2 脚実験 [15] でベルト速度上昇に伴い左右同位相歩容に遷移した結果は，上位指令なしでは脊髄での RG 間協調が興奮性である可能性を示している．

2.4　感覚情報と制御器の設計

本研究では，2.1 節で述べた健常ネコ・移動速度上昇時の T_{sw} と T_{st} の変化パターンを目標として，制御器を設計する．感覚情報を用いたリズムと歩容の創発を目指しているので，2.2 節の脊髄 RG 特性（a）を重要視する必要はなく，非線形振動子という扱い難い要素を用いない．同様に，脊髄 RG 特性（b）を考慮せず，感覚情報のみに基づいて制御器 RG は SW–ST 相切替を行うこととする．そして，脊髄 RG 特性（c）と密接な関係にある 2.3 節の ST 相・感覚–運動機能を制御器 RG に実装して，ST–SW 相切替を行うこととする．

感覚–運動機能とロコモーション指標の関係について，SW–ST 相切替での「腰屈曲が TD を促進する」は PF のパターン形成で行われるが，TD の発生は創発する胴体の前頭面内（ロール）と矢状面内（ピッチ）運動や上下運動および自由落下に影響されるので，「T_{sw}：一定」の保証は困難である．ただし，アクチュエータ出力の制約下で極端に短い T_{sw} は，安定性維持のために必要な程度の AEP の確保 [24] [25] [34] を妨げるので，SW 相前半での ST 相切替を抑制して最低限の T_{sw} は保証する．十分な T_{sw} が確保されるならば AEP はほぼ一定に保たれる．

一方，ST–SW 相切替での「腰伸展と脚徐負荷が LO を促進する」は，移動速度上昇時に「腰伸展の増加」または「早期の脚徐負荷」が生じるとき，早期 LO すなわち「T_{st}：減少」を引き起こす．T_{st} の変化は PEP に大きな影響を与える．

以上，主に感覚–運動機能を用いて，身体と環境との相互作用からロコモーション・パターンを自律生成する手法を「感覚フィードバック主導型」とよぶ [30]．

2.5　「脚負荷」と「リズムの創発」

固有周波数を持たないが，ST 相と SW 相という二つの脚相を持ち，脚負荷情報により脚相切替を起こす「2 状態（ST, SW）遷移機械」を RG のモデルとして考える．胴体と後脚の前頭面内運動で左右逆位相での歩行開始を想定して，**Fig. 2**：[a] のように脚 RH（right hind）が SW 相で脚 LH（left hind）が ST

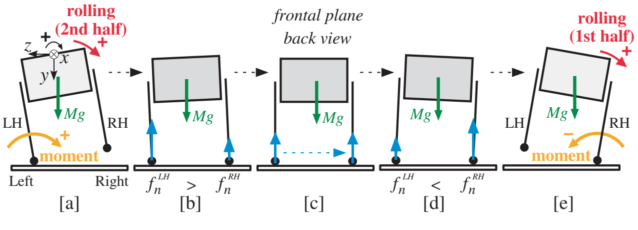


Fig. 2　Rolling oscillation self-excitedly induced by the gravity moment operating in the opposite direction depending on the single support phases of LH [a] and RH [e]

†脚間協調メカニズムを調べるために，左右や前後間でベルト速度が異なるトレッドミル上でのロコモーション実験が数多く行われている．

相の片脚支持期が発生した後に，このRGにより自励振動が生成される過程を以下に示す．

[a] LHの片脚支持期で正の重力モーメントが働き，ロール運動の正の角速度が増加する．

[b] 結果，RHの着地が生じ，脚負荷を検知したRHのRGはST相へ切替える．

[c] 両脚支持期でのロール運動により脚負荷はLHからRHに移動する．

[d] LHの脚負荷の減少を検知したLHのRGはSW相へ切替える．LHのRGからSW相の運動生成を指示されたLHのPFは，脚の素早い上下方向の屈曲運動を生成する．

[e] LHの脚負荷が小さいためにすぐにLHの離地が生じ，ロール運動が十分大きな正の角速度を持てばその後の負の重力モーメントにもかかわらずSW相がある程度の期間継続する．結果として，上述[a]と左右対称な片脚支持期が生じるので，以後同様な過程が左右交替で発生する．

このように，ロール運動は脚負荷に影響を与えるので，左右脚のRGは脚負荷情報によりロール運動に引き込まれて「ある周波数とデューティ比を持つ」リズムの生成を始める．そして，RGの指令で生成される脚のSW相とST相での矢状面内運動により生じるTDとLOが，ロール運動に大きな影響を与える．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“chain-reflex”と見なすことができ，相互作用の結果としてRGのリズムが脚負荷という感覚情報により創発したことになる．

2.6 「脚負荷」と「歩容の創発」

非線形振動子型RGを用いて基本リズムを与え感覚入力として脚負荷を用い，RG間ネットワークによらない歩容生成[27]と遷移[28]が報告されているが，脚間位相差の創発結果のみが注目されており，「非線形振動子と脚負荷の相互作用」や「リズムと歩容の創発」の構成論的理解が試みられたとは言い難い．

一方，「感覚フィードバック主導型RG」を用いる利点は，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相への切替に大きな影響を与え，脚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，RG間ネットワークによる明示的な脚間協調以前に，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SW相切替に影響を与え，脊髄レベルでRG間ネットワークによらない非明示的な脚間協調が働き，歩容遷移がリズム遷移と同時に創発する．

2.7 関連する先行研究

ヤツメウナギとは異なり重力下で直立した脚を持つネコやロボットでは，感覚フィードバック主導型の手法を用いてリズムと歩容が創発的に生成されることが構成論的に示されている．

Ekeberg と Pearson は三次元・後2脚シミュレーションにおいて，RG（TD, ST, LO, SWの4状態遷移機械）への感覚情報として腰伸展と脚負荷を用い，RG間ネットワークなしで安定なリズムと逆位相歩容が生じることを最初に示した[39]．

筆者らはRG（ST, SWの2状態遷移機械）への感覚情報として脚負荷のみを用いて，三次元・4脚シミュレーションにおいて左右RG間ネットワークなしでリズムと歩容（pace, walk）を生成した．また，walk歩容で横方向外力などの摂動が働くとき，前頭面内姿勢が安定化されることを示した[40]．さらに，脚負荷検出に小型力センサを用いた4脚ロボットによりシミュレーション結果を再現し，創発的なリズムと歩容の生成がロボットで実際に可能であることを示した[41]．

増田らは2.3節で述べた脊髄・感覚–運動機能[13] [37] [38]を三つの伸張反射の連鎖（chain-reflex）と解釈して，各脚に伸張反射デバイスを4個備えた後2脚ロボットにおいて，計算機を用いることなく左右逆位相走行を生成した[42]．

† 4章のシミュレーションでは，静止状態から右脚を最初に伸展させ次に素早く屈曲させて Fig. 2:（a）の状態を発生させ，左右RGとロール運動のリズムを起動している．

3. 脚　制　御　器

矢状面内で胴体に固定された腰関節に原点をおく x-y 座標系で脚先位置 $\boldsymbol{r} = [x\ y]^T$ と速度 $\boldsymbol{v}$ が定義され，表記 $(*)_x$ はベクトル $*$ の x 座標値を表す．上付記号 hat:$\hat{}$，bar:$\bar{}$，tilde:$\tilde{}$ はそれぞれ変数のノミナル値，計測値，目標値を表す．脚番号: i は省略されることがある．

3.1 脚相切替モデルと屈筋 Half-Center 活性度

脚相切替モデルを **Fig. 3** に示す．図中の **F** はRGの屈筋HC（Flexor Half-Center [16]）を表し，簡略化のため伸筋HCは用いていない．図中の × は明示的なRG間協調が用いられていないことを示す．ST相への切替（TD）タイミングは脚負荷 f_n を用いて判定される．2.3節で述べた脊髄・感覚–運動機能に基づいて，屈筋HCには腰屈曲（Hip flexion）と腰伸展（Hip extension）および脚負荷（Leg load）が興奮性または抑制性の感覚情報として入力される．屈筋HCはこれら感覚情報によってのみ決まる「屈筋HC活性度 α_F」を持ち，SW相への切替（LO）タイミングはこの値を用いて判定される．

文献[39]のLOタイミング判定式を参考にして，脚 i において，感覚情報として脚先位置の x 座標値 $(\bar{\boldsymbol{r}}^i)_x$ と脚負荷 $\bar{f}_n^i$ という計測値を用い，屈筋HC活性度 α_F^i を新たに提案する．

$$\alpha_F^i = -\max(\bar{r}_{flx}^i,\ 0)/(\hat{D}/2) + \max(\bar{r}_{ext}^i,\ 0)/(\hat{D}/2) + C_{frc}\{\hat{\chi}_{LO} - \min(\bar{f}_n^i,\ \mu\hat{\chi}_{LO})\}\,/\,\hat{\chi}_{NM} \qquad (1)$$

ここで，$\bar{r}_{flx}^i (= (\bar{\boldsymbol{r}}^i)_x)$，$\bar{r}_{ext}^i (= -\bar{r}_{flx}^i)$ は計測される腰屈曲と腰伸展であり，ノミナルな歩幅 $\hat{D}$ と脚負荷 $\hat{\chi}_{NM}$ は正規化パラメータである．また，LOタイミング判定のための重要なパラメータとして $\hat{\chi}_{LO}$ は脚負荷の閾値を設定し，$C_{frc} (> 0)$ は腰屈曲や伸展と脚負荷の相対的な重みを設定する．右辺の項を前から順に，腰屈曲項・腰伸展項・脚負荷項とよぶ．

式（1）において，α_F^i と脚先 x 座標値の関係について説明するとき腰屈曲と腰伸展を使い分けるため，max関数を用いて $(\bar{\boldsymbol{r}}^i)_x$ を $\bar{r}_{flx}^i$ と $\bar{r}_{ext}^i$ に分けている．またデータグラフの見易さのため，TD後に $\bar{f}_n^i$ が増加したとき α_F^i が極端に小さな負の値にならないように，min関数とパラメータ μ を用いて脚負荷項の下限を設定している．

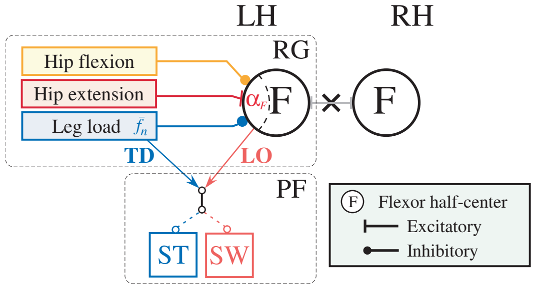
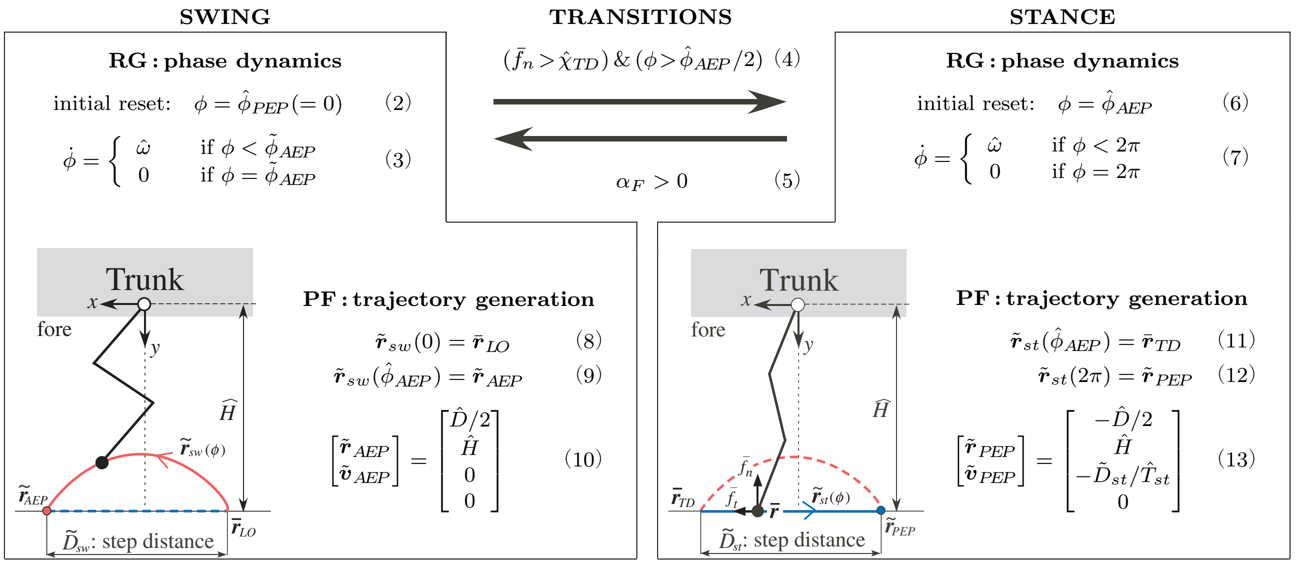


Fig. 3 Schematic diagram of leg phase switching in a CPG



$\hat{\phi}_{AEP} = 2\pi(1 - \hat{\beta})$ (14) $\hat{\omega} = \hat{\phi}_{AEP}/\hat{T}_{sw}$ (15) $\hat{T}_{st} = \hat{\beta}/(1 - \hat{\beta})\hat{T}_{sw}$ (16)

Fig. 4 Overview of a CPG in this study (α_F is defined by eq.(1).)

屈筋 HC 活性度に対して，腰屈曲と脚加負荷は減少させる方向に，腰伸展と脚徐負荷は増加させる方向に働く．これは 2.3 節で述べた LO を抑制または促進する脊髄・感覚–運動機能を定式化したものにほかならない．シミュレーション結果の考察で示すように，LO 促進のための腰伸展と脚徐負荷の組み合わせは，特に遷移過程と定常走行において適切にリズムを継続させるために有効に働く（4.5，5.1，5.2 節）．

3.2 CPG の概要とリズム生成器の実装

脚制御器は，中枢性パターン生成器（CPG）を構成するリズム生成器（RG）とパターン形成部（PF），および，駆動部（Output Motor Stage, OMS）からなる [16] [17]．

CPG の概要（**Fig. 4**）において，RG は SW 相（図左）と ST 相（図右）という二つの脚相を持ち，内部変数としてステップサイクル内での位相を表す変数 $\phi \in [0, 2\pi]$ を持つ [40]．ノミナル値である SW 相期間 $\hat{T}_{sw}$ とデューティ比 $\hat{\beta}$ を与えたとき，ほかのパラメータのノミナル値は式（14）～(16) により計算される．

TD タイミング判定の条件式（4）は，計測される脚負荷 $\bar{f}_n$ と閾値 $\hat{\chi}_{TD}$ を比較する不等式と LO 後に早期の ST 相への切替を回避するための ϕ の不等式の論理積となっている．すなわち，脚先と床面との接触が検出された（$\bar{f}_n > \hat{\chi}_{TD}$）とき，SW 相の後半（$\phi > \hat{\phi}_{AEP}/2$）でのみ ST 相に切り替えることを示す．LO タイミング判定の条件式（5）は，3.1 節で述べた屈筋 HC 活性度 α_F を用いており，腰伸展と脚徐負荷により α_F が正になったとき SW 相に切り替えることを示す．これらの条件式は，2.4 節で述べた制御器設計を忠実に実装したものである．

RG は，条件式（4）の成立により ST 相への切替を行い，ϕ は式（6）により初期値 $\hat{\phi}_{AEP}$ にリセットされる．また，条件式（5）の成立により SW 相への切替を行い，ϕ は式（2）により初期値 0 にリセットされる [23]．位相変数 ϕ は，式（3）または式（7）により $\hat{\omega}$ を時間積分して単調増加するが，それぞれの上限値 $\hat{\phi}_{AEP}$ と 2π に達した場合には，条件式（4）または条件式（5）が成立するまで脚相切替は生じないため，上限値にとどまり続ける．すなわち，RG は固有周波数を持たない 2 状態遷移機械として振る舞う．その後の詳細については 5.2 節で述べる．

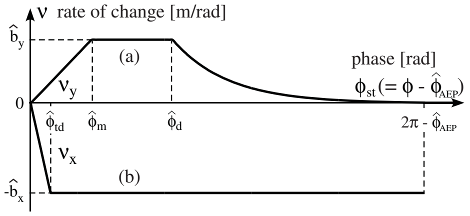


Fig. 5 Profiles of the rate of change: ν_x & ν_y of the leg tip position in the stance phase [43]. (ϕ is a phase variable of the RG. From eq. (13), $\hat{b}_x = (\hat{\boldsymbol{v}}_{PEP})_x/\hat{\omega} = \hat{D}_{st}/(2\pi\hat{\beta})$.)

3.3 パターン形成部と駆動部の実装

Fig. 4 において，PF は RG から脚相 $lp \in \{sw, st\}$ と位相 ϕ を受け取り，脚先目標軌道 $\tilde{\boldsymbol{r}}_{lp}(\phi)$ $(0 \leq \phi < 2\pi)$ を生成する．$\phi = 2\pi$ でも軌道が停止しない実装がなされている．軌道生成の詳細は文献 [43] に述べられており，ここでは簡潔に説明する．

各脚相で脚先目標位置の x, y 座標値は，ϕ（[rad]）に対する変化率 $\nu_x(\phi)$, $\nu_y(\phi)$（[m/rad]）に $\hat{\omega}$ を掛けた目標速度（[m/s]）を時間積分することで計算される．ST 相における脚先位置変化率を示す **Fig. 5** より，y 座標値は下方伸展を示す: (a)．(b) により後方伸展を示す x 座標値は TD 直後を除いて，そして，LO タイミング判定式が成立せず ϕ が上限値 2π にとどまった場合でも，一定速度 $(\hat{\boldsymbol{v}}_{PEP})_x (= -\hat{b}_x\hat{\omega})$（[m/s]）で減少する．LO タイミング判定式が早期に成立した場合には，SW 相への切替のため後方伸展は打ち切られ，PEP は前方に移動する（4.5 節）．

脚先目標軌道の初期位置は計測値を用いて，SW 相と ST 相で式（8），(11) により与えられる．軌道生成に必要な脚相 lp での目標歩幅 $\tilde{D}_{lp}$ は，これら計測値を用いて次式で計算される．

$$\begin{aligned} \tilde{D}_{sw} &= \hat{D}/2 - (\bar{\boldsymbol{r}}_{LO})_x \\ \tilde{D}_{st} &= \hat{D}/2 + (\bar{\boldsymbol{r}}_{TD})_x \end{aligned} \quad (17)$$

脚先目標軌道の終端位置と速度は，SW 相では式（9），(10) により，ST 相では式（12），(13) により与えられる．

PF は，脚先目標軌道 $\tilde{\boldsymbol{r}}(\phi)$ から関節 j の目標角度 $\tilde{\theta}_j$ と角速度 $\dot{\tilde{\theta}}_j$ を逆運動学より計算して，駆動部（OMS）に送る．駆

動部は各関節で，計測した角度 $\bar{\theta}_j$ と角速度 $\dot{\bar{\theta}}_j$ を用いて次式のPD 制御を行い，トルク Γ_j をアクチュエータから出力する．ここで，${}^{lp}K_P^j$, ${}^{lp}K_D^j$ は，脚相 lp, 関節 j での PD ゲインである．

$$\Gamma_j = -{}^{lp}K_P^j(\bar{\theta}_j - \tilde{\theta}_j) - {}^{lp}K_D^j(\dot{\bar{\theta}}_j - \dot{\tilde{\theta}}_j) \qquad (18)$$

4. 歩行–走行遷移シミュレーション

物理モデルと脚制御器を用いて脊髄ネコ・後 2 脚実験 [15] のシミュレーションを行い，リズムの変化と歩行から走行への遷移を再現する．自律生成が目的であるので，トレッドミルのベルト速度以外のパラメータはすべて固定である．物理モデルと脚制御器の主要なパラメータ値とその設定方法は 付録 A に示されている．用いた力学シミュレータ Webots 2021b において，組み込みの PD 制御機能を用い，4 [ms] の時間刻みでシミュレーションは行われる．床反力は ODE（Open Dynamics Engine）接触モデルを用いて計算される．TD 時に脚先と床は非弾性衝突を行い，床反力の法線方向成分（脚負荷）は弾性係数：5.0e3 [N/m] と粘性係数：8.0e1 [Ns/m] により，接線方向成分はクーロン近似・摩擦係数：1.0e3 により計算される．この接触モデルとパラメータおよび PD ゲインと時間刻みの妥当性については，脚負荷の時間変化の観点から付録 B で述べる．

4.1 物理モデルと拘束条件

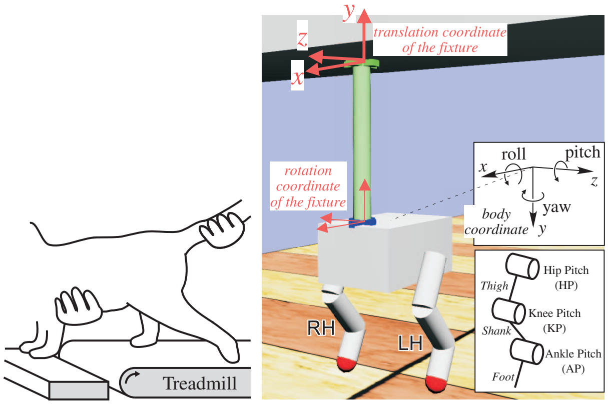
脊髄ネコ・後 2 脚実験は，**Fig. 6**：(a) に示すように，前 2 脚は静止立脚で後 2 脚がステッピングを行い，腹と尾を人が手で支える状況で行われた．この状況を簡略化して Fig. 6：(b) に示すように，後 2 脚ロボットと 6 軸拘束器，および，トレッドミルからなる物理モデルを構成した．後 2 脚ロボットは胴体と矢状面内 3 関節を持つ脚から構成され，左右脚間の負荷移動は自然に発生する全身ロール運動により行われる（2.5 節）．Fig. 6：(b) には，後 2 脚ロボットの胴体座標系の 3 軸並進と 3 軸回転，および，拘束器座標系の 3 軸並進と 3 軸回転が示されている．トレッドミルには，Webots 2021b の Track ノードとよばれる組み込みのベルトコンベア機能を用いた．拘束器とトレッドミルは，後 2 脚ロボットとは独立に動作するので，環境の一部とみなされる．

文献 [14] [15] と動画 [31] よりネコの拘束状況を推測し，6 軸の拘束条件は x 軸（前後），y 軸（上下）並進はバネ–ダンパ拘束，z 軸（左右）並進と roll & pitch 軸回転は自由，yaw 軸回転は固定とした．バネの中立点は運動開始前静止立脚時の位置である．前後と上下方向のバネ–ダンパ拘束はそれぞれ「トレッドミル上」の「後 2 脚ロボット」のシミュレーションにおいて必須であるが，環境との相互作用の一部として拘束器の働きも詳細に見る必要がある．この拘束条件の妥当性についても 付録 B で述べる．

4.2 シミュレ–ション結果の概要

時刻 0 [s] の静止状態からベルト速度 0.14 [m/s] の定常歩行を生成し，時刻 6 [s] でベルト速度を V_b に切り替える．$V_b = 0.3$ [m/s] の結果を **Fig. 7** に示す[†]．（a）歩容線図，（b）胴体ロ–ル角，（c）胴体ピッチ角，左右脚それぞれの（d）リズム指標（$\bar{T}_{sw}$，$\bar{T}_{st}$，$\bar{T}_{sc}$，$\bar{\beta}$），（e）脚先 x 座標値 $(\bar{\boldsymbol{r}})_x$（$\bar{r}_{flx}$ または $-\bar{r}_{ext}$）や AEP

[†]RG が LO タイミング判定に用いる閾値 $\hat{\chi}_{LO}$ は運動の遅れを考慮して比較的高い値（2.5[N]）を設定しているが，離散的なプロット（a）と（d），および，（e）の AEP&PEP 作成時には低い閾値（1 [N]）を設定してより正確な LO の時刻を求めているため，LO 時刻は RG の LO タイミング判定時刻より遅くなる．



(a) locomotion with hindlimbs　(b) a hind-legged biped with the fixture

Fig. 6　(a) A low spinal cat on a treadmill [15]; (b) a hind-legged biped robot with fixtures on a treadmill

と PEP，脚先床反力の（f）接線方向成分 $\bar{f}_t$ と（g）法線方向成分 $\bar{f}_n$（脚負荷），（h）屈筋 HC 活性度 α_F が示されている．下段には，バネ–ダンパ拘束器の変位と力が，前後方向（i）と上下方向（j）についてそれぞれ示されている．

ベルト速度切替後にすべての指標やパターンが大きく変化し，（a）の約 6.2 [s] で跳躍相が現れて定常走行に遷移している．歩行リズム生成に重要なロール運動（b）については，切替後の $\bar{T}_{sc}$ 減少のため振幅は小さくなる [19]．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，過渡状態ではリズムとロール運動が各脚の運動の影響で変化したことを示している．ピッチ運動（c）は定常歩行では非常に小さく，定常走行では両脚の ST 相と同期した振動を行い，両脚は逆位相であるため結果として各脚のステップサイクルやロール運動の 2 倍周波数で振動している．**Fig. 8** において，左図の片脚支持相（a）で脚先に働くベルト後方引張り力 $\bar{f}_t$ は胴体に矢状面内で正のモーメントを生じさせ，右図の跳躍相（b）で働く重力は負のモーメントを生じさせる．このような脚相によって反対方向に働くモーメントが，定常走行で胴体ピッチ角の振動を生じさせると考えられる．

RG の LO タイミング判定で重要な脚負荷（g）の時間変化については，ST 相初期では TD 時の衝突の影響を強く受けて大きくなり，その後，歩行時は上向拘束力により，走行時は胴体ピッチ運動の負の角加速度により減少する（5.4 節）．

4.3 定常歩行パターン

Fig. 7 の時刻 5.6 [s] 前後の LH の ST 相領域（破線枠：walking）での α_F の変化について模式図を用いて説明する．**Fig. 9** の左に，脚先 x 座標値（a），脚負荷（b），α_F（c）が示されている．右に，TD 直後の腰屈曲状態（d）と LO 直前での腰伸展状態（e）が脚負荷の大きさと一緒に示されている．

Fig. 9 において，TD 直後（d：A）で脚先は前方にある（$(\bar{\boldsymbol{r}}^i)_x > 0$）ため腰屈曲 $\bar{r}_{flx}$ は正で（a：A），脚負荷 $\bar{f}_n$ も大きい（b：A）．その結果，式（1）で，max 関数のため腰屈曲項（< 0），腰伸展項（$= 0$），脚負荷項（< 0）のため，α_F は負となる（c：A）．その後，ベルトにより脚先が後方に引張られて腰屈曲 $\bar{r}_{flx}$ は減少して（a：C），α_F が増加する（c：C）．このとき式（1）で，脚負荷が $\mu\hat{\chi}_{LO}$ より大きい間は（b：C），min 関数のため脚負荷項は一定（$= C_{frc}(1-\mu)\hat{\chi}_{LO}$）なので，脚負荷の変化は α_F に影響を与えない．さらに，$(\bar{\boldsymbol{r}}^i)_x < 0$ となったとき，式（1）で max 関数のため腰屈曲項（$= 0$）および

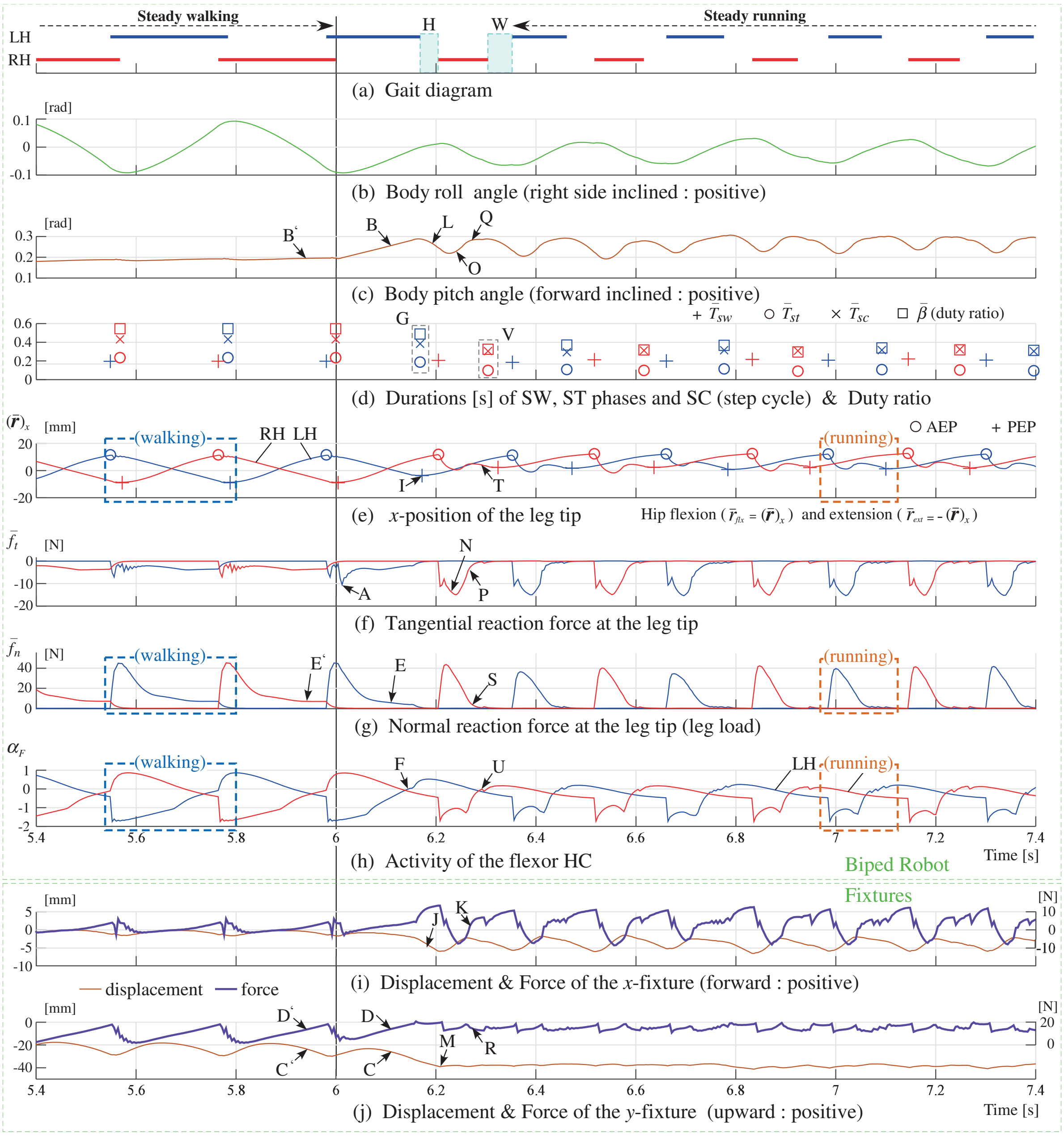


Fig. 7 Simulation of the walking-to-running transition ((a)∼(h) : states of the biped robot with hindlegs, and (i)&(j) : displacement and force of the x- & y-fixtures)

腰伸展項（>0）となり，α_F の計算過程のみが変わる．次に，脚負荷が $\mu\hat{\chi}_{LO}$ を下回ったとき（b : D)，脚負荷項は可変（$=C_{frc}(\hat{\chi}_{LO}-\bar{f}_n)$）なので脚徐負荷により α_F は増加する（c : D)．右図（e）において，脚徐負荷が十分なとき（b : B）に $\alpha_F>0$ となり（c : B)，LO タイミング判定式（5）が成立する．

このように，α_F 値に腰屈曲と腰伸展も関係するが，LO タイミング判定は対側脚の TD による自脚の脚負荷の急速な低下（2.5 節）によってほぼ決まる．結果，デューティ比約 0.54 の歩行が生成され，$\bar{T}_{st}$ は $\bar{T}_{sw}$ と同程度（約 10% 大）のため，Fig. 7: (e) で PEP の大きさは AEP と同程度（約 10%小）である．

4.4 ベルト速度上昇に伴う走行パターンへの遷移

Fig. 7 の（a）～（j）に示された事象（A）～（W）を参照しながら，遷移過程での胴体ピッチ運動と脚負荷の変化を追う†．

† 創発の過程を因果関係のみで説明することはできないが，ダランベールの原理から力のつり合いを考え脚負荷変化に焦点を当て，ロボット制御器評価の観点から因果関係を適宜設定し分かりやすく説明している．

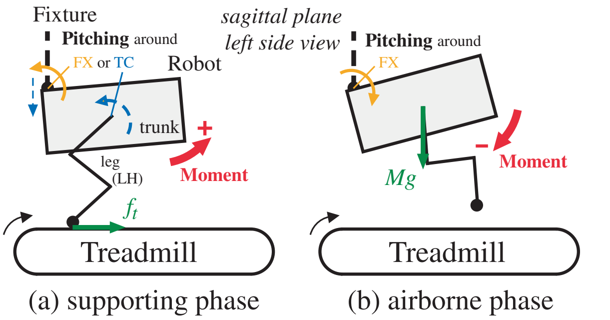


Fig. 8 Moment on the trunk in the pitch plane caused by the tangential force: f_t at the leg tip in the single support phase (a) and by the gravity: Mg in the flight phase (b) (TC (trunk center) and FX (fixture connection))

● ベルト速度上昇時に ST 相にあった LH の脚負荷パターン変化から早期 LO，そして，跳躍相発生までの過程を示す．

{1} ST 相で $\bar{f}_t$ 増加（A）によりピッチ角が増加する（B）

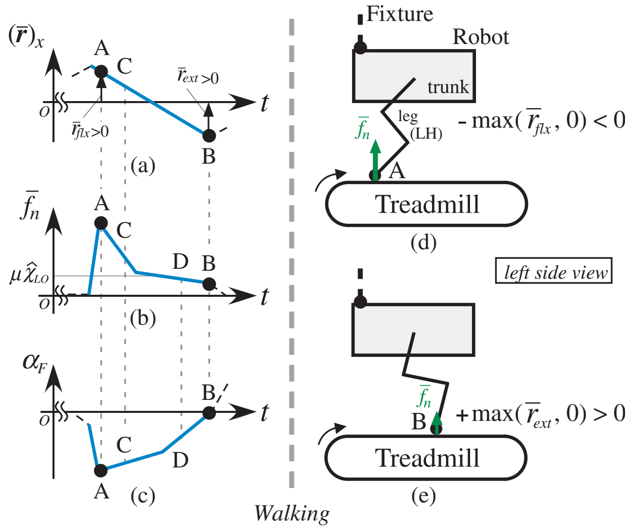


Fig. 9　Changing of FHC activity (α_F) in the stance phase corresponding to Fig. 7: (walking)

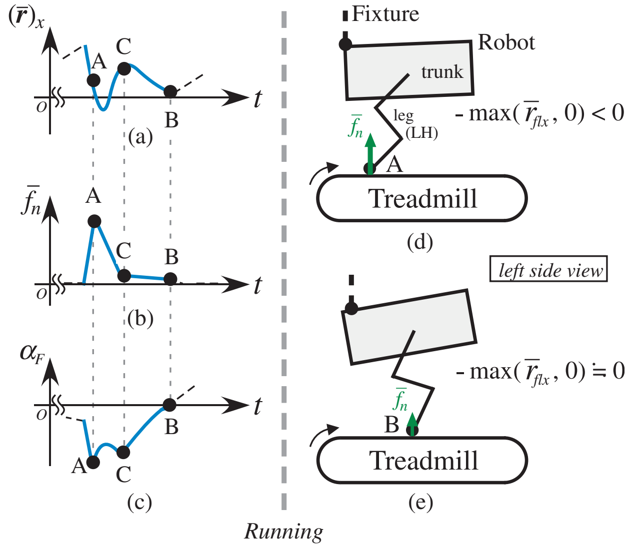


Fig. 10　Changing of FHC activity (α_F) in the stance phase corresponding to Fig. 7: (running)

とき，拘束点が下がっている（C）ことから胴体中心付近がピッチ運動回転中心（Fig. 8: (a : TC)）であることが分かる．

{2} 上下方向拘束器・下向変位の増加（C）により上向拘束力が増加し（D），定常時より早く脚負荷が減少する（E）．

{3} 脚徐負荷（E）による α_F の増加により定常時より早く LO タイミング判定式（5）が成立し（F），その後の $\bar{T}_{st}$ 減少と早期 LO（G）となる．

{4} $\bar{T}_{sw}$ はほぼ一定のため $\bar{T}_{sc}$ と $\bar{\beta}$ が減少する（G）．

{5} 早期 LO の結果として跳躍相（H）が現れ，リズム・周波数の増加を伴う走行が発生する．

- AEP&PEP の変化と前後運動を示す．

{6} $\bar{T}_{sw}$ がほぼ一定のため AEP もほぼ一定（3.3 節）であるが，早期 LO により PEP は前方に移動（I）する．

{7} 後 2 脚ロボットは，一旦後方へ移動する（J）が，以降は各脚の ST 相で前後運動を行うので，前後方向拘束器の働きは強くなる（K）．

- 跳躍相と次の RH・ST 相でのピッチ運動変化の過程を示す．

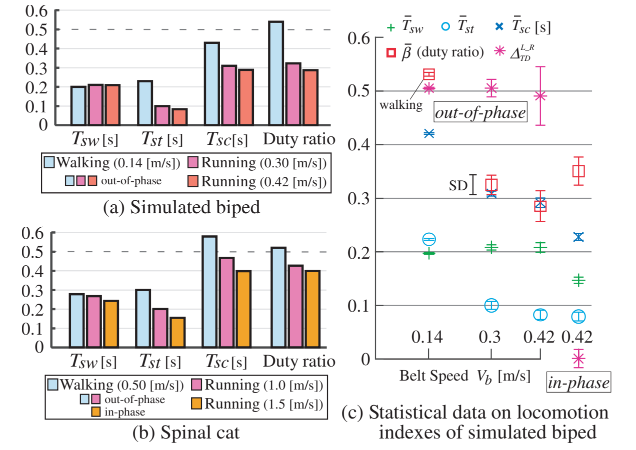


Fig. 11　(a)&(b) Comparison of mean values of rhythm indexes, and (c) statistical data of a simulated biped ((b) was estimated by the author from Fig. 2 in [15].)

{8} 跳躍相で重力モーメントが働きピッチ角が減少する（L）が，拘束点が上がっていない（M）ことから拘束点付近がピッチ運動回転中心（Fig. 8: (b : FX)）であることが分かる．

{9} ST 相で $\bar{f}_t$ 増加（N）によりピッチ角は増加に転じる（O）．

{10}（M）以降は，下向変位がほぼ一定であることから，ST 相でのピッチ運動回転中心も拘束点付近（Fig. 8: (a : FX)）に移動したことが分かる．結果，ピッチ角は拘束点を中心とした振動を始め，上下方向拘束器の働きは弱くなる．

{11} ST 相後半に $\bar{f}_t$ が減少し（P），ピッチ運動減速時の負の角加速度（Q）と上向拘束力（R）により，脚負荷がさらに低下する（S）．

{12} 脚徐負荷（S）と腰伸展増加（T）による α_F の増加により判定式（5）が成立し（U），$\bar{T}_{st}$ はさらに大きく減少して早々期 LO（V）となる．

- 次の跳躍相（W）以降は定常走行となる．

4.5　定常走行パターン

Fig. 7 の時刻 7 [s] 前後の LH の ST 相領域（破線枠：running）での α_F の変化について模式図を用いて説明する．**Fig. 10** の右図（d）の状態で，4.3 節と同様に α_F は負となる（c : A）．

その後，ST 相の早い段階で脚負荷が減少する（b : C）．一方，ST 相全般で脚先 x 座標値（a）は，（J）以降は振動する前後方向拘束器の影響で歩行時（Fig. 9: (a)）と比べて複雑な動きをする．結果，腰屈曲はまだ十分大きい（a : C）ため α_F は負のまま（c : C）であり，ST 相前半での LO タイミング判定式（5）の成立とならない．これは 2.3 節で述べた「腰屈曲が LO を抑制する」に相当する．そして右図（e）の状態で，腰屈曲がゼロに近づいたとき（a : B）に抑制は小さくなり，すでに十分な徐負荷（b : B）もあって LO タイミング判定式が Fig. 9: (c : B) より早期に成立する（c : B）．結果として，早期の SW 相切替のため脚先・後方伸展は打ち切られ，PEP は前方に移動する（a : B）．

4.6　ネコとの比較と制御器の評価

後 2 脚ロボットと脊髄ネコ [15] のトレッドミル上ロコモーションで，歩行時のベルト速度を基準としてベルト速度を約 2 倍・3 倍としたときのリズム指標（$\bar{T}_{sw}, \bar{T}_{st}, \bar{T}_{sc}, \bar{\beta}$）の平均値を **Fig. 11**: (a)&(b) に示す．両者のサイズが近いにもかかわらずベルト速度はかなり異なるが，指標の変化に着目する．健常ネコと同様に両者において，ベルト速度 V_b 上昇に対して $\bar{T}_{sw}$ は

ほぼ一定である．ロボットにおいて，これは創発したロコモーション・パターンで跳躍高さがそれほど大きくないことの結果に過ぎないが，AEP がほぼ一定（Fig. 7: (e)）であることを含めて制御器パラメータ値が妥当なことを示している．両者において V_b 上昇に対して，脊髄・感覚–運動機能による早期 LO のために $\bar{T}_{st}$ が双曲線に近い形状で減少することも，健常ネコと同様である．したがって，リズム指標に関しては制御器の設計と実装は妥当であると評価する．

ただし，ネコと比べて走行時 $\bar{T}_{st}$ の減少が大きいことは，PEP 前方移動の一因でもあり，制御器の実装がまだ不十分であり改善すべき点が多いことを示している．PEP 変化については 5.3 節で考察する．ベルト速度 V_b 上昇に対対する胴体ピッチ運動や AEP&PEP 等の変化を比較可能なように，両者の動画が公開されている [31]．

ベルト速度を V_b に切り替えて 6 [s] 後の定常状態データを 12 [s] 間集め，リズム指標と TD 時・脚間位相差 $\Delta^{L\text{-}R}_{TD} \in (-0.3, 0.7]$ の平均値と標準偏差（SD）を求めた．$V_b = 0.14, 0.3, 0.42$ [m/s] での結果を Fig. 11: (c) の out-of-phase（逆位相）に示す．参考のために，本論文と同じパラメータ値の制御器に興奮性の RG 間協調を導入して得られた同位相·走行の結果を図右端の in-phase（同位相）に示す．歩行時と比べて走行時の変動が大きくなる原因は，走行時に発生した胴体ピッチ振動がロール振動と干渉するためと考えられる．特に，$V_b = 0.42$ [m/s] では脚間位相差の変動が大きいことから，ロール振動の停止により変動が減少する同位相に自律遷移すべきである．

5. 考　察

5.1 RG 位相 ϕ および腰屈曲と腰伸展の役割

3.2 と 3.3 節で述べたように，RG の位相変数 ϕ は「LO 後早期の ST 相切替・回避」と「脚先目標軌道計算」に用いられる．実際に意味を持つのは ϕ の絶対値ではなく，$\phi_{sw} = \phi - \hat{\phi}_{PEP}$，$\phi_{st} = \phi - \hat{\phi}_{AEP}$ という脚相開始時からの相対位相である．

一方，屈筋 HC 活性度 α_F で用いられる脚先位置 $\bar{\boldsymbol{r}}$ の目標値 $\tilde{\boldsymbol{r}}$ は ϕ の関数（3.3 節）であるため，腰屈曲 $\bar{r}^i_{flx}$ と伸展 $\bar{r}^i_{ext}$ には位相 ϕ 情報が間接的に含まれており，α_F を用いた条件式（5）に条件式（4）と同様に位相 ϕ 情報が使われていることを意味する．すなわち LO タイミング判定において，脚先 x 座標値 $(\bar{\boldsymbol{r}})_x$ は，腰伸展の幾何的限界の意味を持つが，4.5 節で示したような駆動ベルトの影響を強く受けながらも SW 相と ST 相での相対位相 ϕ_{sw} と ϕ_{st} の意味も持ち，左右同位相歩容・自律生成における RG 間協調として有効に働くことが分かっている．

5.2 リズムの継続と創発

2.5 節で述べたように，リズムが起動されて定常状態にあることは脚相切替条件が定常的に成立していることである．一方，3.2 節で述べたように，位相変数 ϕ は SW 相と ST 相で単調増加してそれぞれの上限値に達した場合には TD または LO タイミング判定式（4），（5）が成立するまでそれぞれの上限値にとどまるが，このような事態は摂動等により切替条件成立が遅れた過渡的な状態を意味する．

SW 相で ϕ が上限に達したとき，脚先目標軌道は位置 $\tilde{\boldsymbol{r}}_{AEP}$ で停止するが，定常に近い胴体の運動（Fig. 2，Fig. 8: (b)）では TD の発生は確実であり，RG は ST 相に切替える．一方，ST 相で ϕ が上限に達したときとは，摂動により脚徐負荷が影響を受けて LO タイミング判定式が成立しない状態である．このとき，3.3 節で述べたように，脚先は目標速度 $b_x\hat{\omega}$ を保持したまま後方に伸展する．このため α_F の定義式（1）の腰伸展 $\bar{r}_{ext}(= -(\bar{\boldsymbol{r}})_x)$ は増加を続けることで LO を促進し，脚徐負荷がまだ十分でなくても，ある時間経過後に LO タイミング判定式が成立して RG が SW 相に切り替えることを助ける．これは 2.3 節で述べた Grillner らの実験 [13] における人為的な腰伸展の効果と同等である．

結果として RG として 2 状態遷移機械を用いたときに，2.5 節で述べた「脚式ロコモーションの特性」と 3.1 節で述べた「屈筋 HC 活性度 α_F の定義」および上記の「PF 軌道生成」の貢献により，摂動に対してもリズムが継続することで過渡的なリズムが創発し，その後，定常的なリズムが自律生成される．

5.3 後方伸展と感覚–運動機能

ネコのトレッドミル上ロコモーションでは，PF または OMS の機能によりベルト速度上昇に伴って支持脚はより大きく後方伸展する．一方，本論文では RG レベルでの感覚–運動機能に焦点を絞ったため，PF での脚先後方伸展・目標速度 $b_x\hat{\omega}$（3.3 節）は固定であり，OMS でコンプライアンス制御等は行われていない．結果として Fig. 7 では，ベルト速度上昇に伴う走行遷移後に後方伸展の増加は見られず，早期 LO による PEP の前方移動が発生した（4.5 節）．行うべき PF レベルでのベルト速度適応の簡単な例を 付録 C に示す．

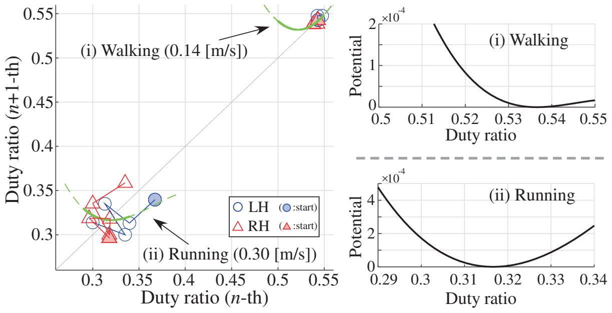
次の課題である自発的 4 脚ロコモーションでは，移動速度上昇時に前方推進力増加（5.5 節）を行うため必然的に後方伸展が現れると予想される．いずれにしても，PF や OMS にベルト速度適応のための感覚–運動機能を導入し，さらに，推進力増加・機能を導入して，より自然な後方伸展が現れる場合には，リズムと歩容の創発における腰伸展と脚徐負荷の関係について，さらなる構成論的理解を進める必要がある．

5.4 遷移と力学構造変化

Fig. 1：右下を用いて，定常歩行と遷移過程および定常走行，それぞれにおける ST 相での脚徐負荷の過程を説明し，「リズムと歩容の遷移」と力学構造変化の関係について考察する．なお，ベルト速度を再度下げると，逆の過程を経て定常歩行に戻る．

Fig. 7 の定常歩行（C', D', E'）と遷移過程（C, D, E）において，順に拘束器の下向変位と上向拘束力の増加および脚負荷の減少が生じており，「上向拘束力により脚徐負荷が促進」という力学構造構造が見られる．ただし，胴体ピッチ運動が非常に小さい（B'）定常歩行では胴体中心の下方向運動（C'）が，遷移過程では胴体中心まわりのピッチ前傾運動（B & C）が，拘束器の下向変位を生むという違いがすでに現れている．一方，次の跳躍相（W）以降では，「ピッチ運動・負の角加速度（Q）により脚徐負荷が促進」という別の力学構造が見られる．そして，この力学構造変化からピッチ運動に定常的な振動が発生し（B, L, O, Q），定常歩行から定常走行に遷移したと構成論的に理解できる．ただし，この力学構造変化を因果関係で説明することは難しく，また，拘束器という環境要素の影響が大きいため，次の課題である無拘束 4 脚ロコモーションでのリズムと歩容の遷移における力学構造変化とは大きく異なるに違いない（Fig. 1: 左下）．数理的解析の手段がまだ十分に整っていない現状では，個々の遷移について個別に力学構造変化を詳細に観察するしかないと考えているが，今後はリズムと歩容の遷移における力学構造変化の一般的な構成論的理解が進むことを期待している．

歩容遷移と力学構造変化について，杉本ら [36] は，路面・傾斜角増加時の「受動機械の歩行から走行への遷移」の理由が，ポ



(a) Return maps　　**(b) Potentials**

Fig. 12 (a) Return maps and polynomial approximation curves (solid & broken) and (b) Potentials calculated using the solid curves in the return maps

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」であることを示した．Aoi ら [26] は，4 脚ロボットの walk–trot 遷移実験の脚間位相差データのポアンカレマップかららからポテンシャルを構成することにより，脚間位相差安定性の観点から遷移の理由を説明した．遷移過程のポテンシャルに「双安定性」と「安定点のヒステリシス効果」が現れることが視覚化 [3] されている点が興味深い．同様にして歩行–走行遷移結果からデューティ比のポテンシャルを構成（付録 D）した結果を **Fig. 12** に示す．図（b）の定常歩行（i）と定常走行（ii）それぞれに安定な平衡点が存在する．遷移過程において双安定性は見られなかったことから，左右逆位相の歩行–走行というデューティ比のみの遷移は，青井らのデューティ比と脚間位相差の遷移と比較して力学構造変化の性質が異なると考えられる．

5.5　上位指令の意味と次の課題

従来多くの分野でリズムと歩容の自律遷移は RG と RG 間ネットワークが上位指令により直接的に調節や再構成されて（文献 [17]: Fig. 33-7）生じると考えられ，非線形振動子型 RG を用いたシミュレーションも行われている [44]．筆者は従来手法を「上位指令主導型」とよび，「感覚フィードバック主導型」との関係について詳しく紹介している [30]．二つの手法の相違点は「RG 周波数が上位指令と感覚フィードバックのどちらで決定されるか」と「RG 間ネットワーク再構成の有無」にある．また現時点では，上位指令主導型には「リズム調節やネットワーク再構成における感覚情報の詳細な役割が不明」という問題点があり，感覚フィードバック主導型は「脊髄・感覚–運動機能が RG 自発的発振機能を上書きする」という仮説に基づいている．ここでは，中脳ネコで観察された歩容遷移での上位指令（MLR 刺激強度増加）の意味と，本研究の次の課題について考察する．

中脳ネコは「ベルト速度一定」トレッドミル上で上位指令により前方推進力を増加しながらリズムと歩容の遷移 [11] を見せる．そこではベルト速度一定のため脊髄・感覚–運動機能は働かず上位指令主導型で遷移したと考えることも可能である．一方，Orlovsky 自身は，上位指令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（文献 [16]: 10.3 節）．この仮説に従うと，1 章で紹介した「中脳ネコの上位指令によるベルト速度上昇を伴うリズムと歩容の遷移」の実験設定は，「無拘束 4 脚モデルが床面上で前方推進力増加により移動速度上昇を行う」設定に置き換えることができる．そしてこの設定下で前方推進力増加が，脚先での作用方向が違うにもかかわらずベルト・後方引張り力増加と同様に，胴体ピッチ運動変化からの脚徐負荷によりリズムと歩容の遷移を生じさせることを示すことができれば，本研究の目的を果たすことができる．すなわち，中脳ネコにおいても上位指令による前方推進力増加を仮定した上でリズムと歩容の自律遷移を脊髄・感覚–運動機能のみで説明可能であること，および，無拘束であるので得られた制御器をそのまま 4 脚ロボット制御に適用可能であることの両者を示すことができる．

6.　お　わ　り　に

創発を通してリズムと歩容の生成と遷移を行う 4 脚ロボット制御器を実現するために，構成要素を簡略化して感覚–運動機能が主として働く手法を提案し，トレッドミル上で拘束器付き後 2 脚ロボットの歩行–走行遷移シミュレーションを行った．

感覚情報として腰屈曲・伸展と脚負荷を用いた脚相切替は，胴体の自励振動を誘発することでリズムと歩容の自律生成を行うことができる．ロール振動は左右それぞれの片脚支持期に前頭面内モーメントが反対方向に働くことで，ピッチ振動は片脚支持期と跳躍期に矢状面内モーメントが反対方向に働くことで，それぞれ自励的に生成される．この脚相切替の結果として，歩行開始時には胴体ロール振動によりリズムと左右逆位相歩容が自律生成された．そして，ベルト速度上昇がきっかけとなって胴体ピッチ振動が生じるという力学構造の変化が，歩行–走行・自律遷移を生じさせた．そして，脚式ロコモーション創発の構成論的理解の第一段階として，「感覚情報に基づく支持脚相から遊脚相への切替（離地）タイミングの調節がリズムと歩容の自律生成に大きな役割を果たす」という知見が示された．

最後に，この制御器は直立した脚を持ち離地を素早く行うことができる 4 脚ロボットが重力下で持つ身体のダイナミクスを巧みに利用している点に，ご興味を持っていただきたい．

謝　辞　本研究は科研費 16K00353，19K12169，21J23064，23K11272 の研究助成を受けて行われた．

参　考　文　献

[1] 土屋：“脳・身体・環境の生み出す知能”，計測と制御，vol.44, no.9, p.579, 2005.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 土屋：“複雑系の構成原理”，計測と制御，vol.38, no.10, pp.605–611, 1999.

[5] R.J. Full and D.E. Koditschek: “Templates and anchors: neuromechanical hypotheses of legged locomotion on land,” J. Exp. Biology, vol.202, pp.3325–3332, 1999.

[6] M.H. Dickinson, C.T. Farley, R.J. Full, M.A.R. Koehl, R. Kram and S. Lehman: “How Animals Move: An Integrative View,” Science, vol.288, no.546, pp.100–106, 2000.

[7] H. Kimura, K. Tsuchiya, A. Ishiguro and H. Witte (Eds.): Adaptive Motion of Animals and Machines. Springer-Verlag Tokyo, 2005.

[8] 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.

[9] N. Gravish and G.V. Lauder: “Robotics-inspired biology,” J. Exp. Biology, vol.221, 138438, 2018.

[10] G. Taga, Y. Yamaguchi and H. Shimizu: “Self-organized control of bipedal locomotion by neural oscillators,” Biolog. Cybern., vol.65, pp.147–159, 1991.

[11] M. Shik, F.V. Severin and G.N. Orlovsky: “Control of walking and running by means of electrical stimulation of the midbrain,” Biophysics, vol.11, pp.756–765, 1966.

[12] S. Miller and F.G. van der Meché: “Coordinated stepping of all four limbs in the high spinal cat,” Brain Res., vol.109, no.2,

pp.395–398, 1976.
[13] 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.
[14] H. Forssberg, S. Grillner and J. Halbertsma: “The locomotion of the low spinal cat. I. Coordination within a hindlimb,” Acta Physiol. Scand., vol.108, pp.269–281, 1980.
[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] G.N. Orlovsky, T.G. Deliagina and S. Grillner: Neural control of locomotion. Oxford Univ. Press NY, 1999.
[17] 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東京，2022.
[18] M.H. Raibert: Legged robots that balance. MIT Press, 1985.
[19] 木村，下山，三浦：“四足動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.
[20] M.H. Raibert: “Trotting, pacing and bounding by a quadruped robot,” J. Biomech., vol.23, no.1, pp.79–98, 1990.
[21] D.J. Hyun, J. Lee, S. Park and S. Kim: “Implementation of trot-to-gallop transition and subsequent gallop on the MIT Cheetah I,” Int. J. of Robotics Res., vol.35, no.13, pp.1627–1650, 2016.
[22] H. Kimura, S. Akiyama and K. Sakurama: “Realization of dynamic walking and running of the quadruped using neural oscillator,” Autonomous Robots, vol.7, no.3, pp.247–258, 1999.
[23] 土屋，辻田：“Central Pattern Generator モデルに基づく 4 脚歩行ロボットの歩行制御”，日本ロボット学会誌，vol.20, no.3, pp.243–246, 2002.
[24] Y. Fukuoka, H. Kimura and A.H. Cohen: “Adaptive dynamic walking of a quadruped robot on irregular terrain based on biological concepts,” Int. J. of Robotics Res., vol.22, no.3-4, pp.187–202, 2003.
[25] 福岡，木村：“4 足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行 –自立型「鉄犬 2」による屋外歩行の実現–”，日本ロボット学会誌，vol.25, no.1, pp.138–154, 2007.
[26] S. Aoi, D. Katayama, S. Fujiki, N. Tomita, T. Funato, T. Yamashita, K. Senda and K. Tsuchiya: “A stability-based mechanism for hysteresis in the walk-trot transition in quadruped locomotion,” Royal. Soc. Interface, vol.10, no.81, 10:20120908, 2013.
[27] Y. Fukuoka, Y. Habu and T. Fukui: “A simple rule for quadrupedal gait generation determined by leg loading feedback: a modeling study,” Sci. Rep., vol.5, no.8169, 10.1038/srep08169, 2015.
[28] D. Owaki and A. Ishiguro: “A Quadruped Robot Exhibiting Spontaneous Gait Transitions from Walking to Trotting to Galloping,” Sci. Rep., vol.7, no.277, 10.1038/s41598-017-00348-9, 2017.
[29] T. Fukui, H. Fujisawa, K. Otaka and Y. Fukuoka: “Autonomous gait transition and galloping over unperceived obstacles of a quadruped robot with CPG modulated by vestibular feedback,” Robotics and Auto. Sys., vol.111, pp.1–19, 2019.
[30] 木村：“ロコモーション・パターン創発研究の現状と今後の展望”，日本ロボット学会誌，vol.41, no.3, pp.217–222, 2023.
[31] http://www.robotlocomotion.kit.ac.jp/JPN-J.html
[32] H. Geyer, A. Seyfarth and R. Blickhan: “Compliant leg behavior explains basic dynamics of walking and running,” Proc. of Royal Society B, vol.273, no.1603, pp.2861–2867, 2006.
[33] H. Miura and I. Shimoyama: “Dynamical walk of biped locomotion,” Int. J. of Robotics Res. vol.3, no.2, pp.60–74, 1984.
[34] A. Seyfarth, H. Geyer and R. Blickhan: “A movement criterion for running,” Journal of Biomechanics, vol.35, no.5, pp.649–655, 2002.
[35] S. Aoi and K. Tsuchiya: “Stability analysis of a simple walking model driven by an oscillator with a phase reset using sensory feedback,” Trans. Robotics, vol.22, no.2, pp.391–397, 2006.
[36] 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.
[37] D.A. McVea, J.M. Donelan, A. Tachibana and K.G. Pearson: “A role for hip position in initiating the swing-to-stance transition in walking cat,” Neurophysiol., vol.94, no.5, pp.3497–3508, 2005.
[38] J. Duysens and K.G. Pearson: “Inhibition of flexor burst generation by loading ankle extensor muscles in walking cats,” BrainRes., vol.187, pp.321–332, 1980.
[39] O. Ekeberg and K.G. 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.
[40] 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.
[41] C. Maufroy, H. Kimura and T. Nishikawa: “Stable Dynamic Walking of the Quadruped “Kotetsu” Using Phase Modulations Based on Leg Loading/Unloading against Lateral Perturbations,” Proc. of ICRA2012, pp.1883–1888, 2012.
[42] 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.
[43] C. Maufroy: “Generation and stabilization of quadrupedal dynamic walk using phase modulations based on leg loading information,” Ph.D dissertation, University of Electro-Communications, 2009. (available at [31])
[44] S.M. Danner, S.D. Wilshin, N.A. Shevtsova and I.A. Rybak: “Computational modeling of spinal circuits controlling limb coordination and gaits in quadrupeds,” eLife, 10.7554/eLife.31050, 2017.
[45] M.S. Fischer, et al.: “Compensatory load redistribution in walking and trotting dogs with hind limb lameness,” Veterinary J., vol.197, no.3, pp.746–752, 2013.
[46] P. Musienko, et al.: “Somatosensory control of balance during locomotion in decerebrated cat,” J. Neurophysiol., vol.107, no.8, pp.2072–2082, 2012.

付録 A．パラメータ値とその設定方法

Table 1, **2** の物理モデルのパラメータと PD ゲインは，4 脚ロボット [41] を参考にして設定した．**Table 3** の RG パラメータにおいて，$\hat{\beta}$ は fast-walk 歩容を想定して 0.5 に近い値とし，$\hat{T}_{sw}$ はおおよそのステップサイクル期間と設定した出力トルク上限値 2.2 [Nm] を考慮して決定された．C_{frc} は条件式（5）の

Table 1 Physical parameters of a biped robot with a trunk and x- & y-fixtures

robot (L: length, W: width, H: height, D: diameter)	
Trunk	Mass 1 kg Rectangular (L: 0.22, W: 0.15, H: 0.1 [m])
Thigh	Mass 0.4 [kg] Cylinder (H: 0.09, D: 0.04 [m])
Shank	Mass 0.3 [kg] Cylinder (H: 0.11, D: 0.04 [m])
Foot & Toe	Mass 0.1 [kg] & 0.01 [kg] Cylinder (H: 0.06, D: 0.04 [m]) & Hemisphere (D: 0.04 [m])

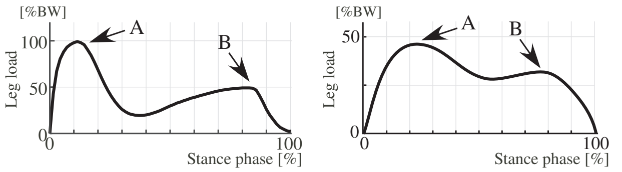
	fixtures (spring-damper system)	
	stiffness [N/m]	damping [Ns/m]
x	980	98.0
y	392	39.2

Table 2 PD gains for j ($\in \{HP, KP, AP\}$) and lp ($\in \{sw, st\}$) where HP, KP and AP respectively mean hip, knee and ankle pitch joints (Fig. 6: (b))

	${}^{lp}K_P^j$ [N·m/rad]			${}^{lp}K_D^j$ [N·m/(rad/s)]		
lp	HP	KP	AP	HP	KP	AP
sw	90	70	30	0.5	0.3	0.15
st	120	90	45	0.5	0.4	0.3

Table 3　Parameters in a CPG ($\Delta\hat{H}_{sw}$ is the leg tip clearance in the swing phase.)

$\hat{T}_{sw}$	0.25 [s]	$\hat{\beta}$	0.53	$\hat{H}$	0.22 [m]	$\Delta\hat{H}_{sw}$	0.05 [m]
$\hat{D}$	0.03 [m]	$\hat{\chi}_{LO}$	2.5 [N]	$\hat{\chi}_{TD}$	3 [N]	$\hat{\chi}_{NM}$	3 [N]
C_{frc}	0.4	μ	4				



(a) Simulated quadruped (pace)　　**(b) Dog (walk)**

Fig. 13　Leg load temporal patterns normalized by body weight (BW) in walking of (a) a simulated quadruped and (b) a dog (revised from [45] by the co-author) (Double peaks patterns consisting of A and B are shown in both.)

右辺が 0 で適切なパターンが生成生成されるように，歩幅 $\hat{D}$ はベルト速度 0.14 [m/s] に合うように設定された．μ は α_F のグラフの見やすさを，ほかのパラメータは物理モデルと運動の関係を考慮しておおよその値が設定されている．x, y 軸拘束器のバネ係数は試行錯誤的にそれぞれ 1, 0.4 [kgf/cm] と設定し，粘性係数はバネ係数値の 1/10 とした．両バネ係数を半分にしても，PD ゲインや RG パラメータを 10%程度変えても，同様な歩容遷移が創発するが，詳細な検討は行っていない．

付録 B．接触モデルパラメータと拘束条件の妥当性

Fig. 13 において，4 脚歩行シミュレーション（a）とイヌ歩行実験 [45]（b）の結果で脚負荷の時間変化を比較する．両者において横軸は ST 相での位相，縦軸は全重量で正規化した脚負荷である．(a）では 4 章の 2 脚モデルと同じ関節構造と物理定数を持つ無拘束 4 脚モデルを，同じ脚制御器パラメータで定常歩行させた．脚負荷パターンは，Fig. 5: (a) で与えられる胴体・上下方向加速度と脚 PD ゲイン，および，接触モデルパラメータに大きく依存する．イヌの結果（b）と比較して，ST 相初期の上向き加速度のためピーク値（A）が約 2 倍大きく，バネ–ダンパ系として働く PD 制御の結果その後の低下も著しい．また，pace 歩容であるため LO 前に対側 2 脚の TD により脚負荷が素早く減少する点がイヌの walk 歩容と異なる．しかし，両者において TD 後のピーク値（A）が LO 前のピーク値（B）より大きくなる二峰性のパターン [32] が現れることから，ST 相前後半の脚負荷パターンの類似性を重視して接触モデルにおける粘弾性パラメータ値は妥当であるとする．

一方，4. 1 節で述べた拘束条件に関して，歩行時の脚負荷パターン（Fig. 7: (g) の破線枠：walking）は ST 相後半の上向拘束力増加ため二峰性ではなく TD 後ピークからの単調減少である．一方，肩付近を機構的に拘束された中脳ネコ・後 2 脚歩行実験 [46] でも基本的に脚負荷パターンは TD 後ピークからの単調減少であるので，拘束条件は妥当であるとする．いずれにしても，無拘束 4 脚ロコモーションにより本研究で提案された手法の有効性を示すことが重要と考えている．

Table 4　Mean values of measured AEP, PEP, and step distance (The nominal step distance $\hat{D}_{st}$ is 3 [cm].)

V_b	0.14 [m/s]	0.3 [m/s]	
b_x	constant	constant	variable
AEP [cm]	1.1	1.0	1.0
PEP [cm]	−1.2	0.2	−1.5
$\bar{D}_{st}$ [cm]	2.3	0.8	2.5

付録 C．ST 相・脚先後方伸展速度の調節

ベルト速度適応の簡単な例として，各ステップサイクル・ST 相において脚先速度計測値 $|(\bar{\boldsymbol{v}}_{st})_x|$ が式（13）の目標値 $|(\hat{\boldsymbol{v}}_{PEP})_x|$ の 2.5 倍を超えたとき，脚先後方伸展・目標速度 b_x $(= |(\hat{\boldsymbol{v}}_{PEP})_x|/\hat{\omega})$（3. 3 節）を 2.5 倍にして保持する．Fig. 7 と同じパラメータを用いて行ったベルト速度適応の有無で比較した結果を **Table 4** に示す．各ステップサイクルでの b_x の増加により，走行時の PEP は歩行時と同程度に回復した．胴体に対する脚先後方速度とベルト速度の差の減少はベルト後方引張り力 $|\bar{f}_t|$ の低下として現れ，結果として胴体ピッチ振動の振幅も低下したが，リズム指標や歩行–走行遷移の過程に大きな違いは見られなかった．

付録 D．デューティ比のポテンシャル計算方法

青井らの手法 [26] を用いて，以下の手順で Fig. 12 を作成した．

（1）同一の力学構造を持つと考えられる時間区間でデューティ比 β のリターンマップ（(a) の○点と△点）を作成する

（2）プロットした点から多項式近似を行い（a）の曲線を求める

（3）曲線と各点の差分 $\Delta\beta$ を求めて多項式近似を行い，得られた β–$\Delta\beta$ 曲線を積分して β–Potential 曲線（b）を得る

ここでリターンマップのサンプル点の数を増やすために，近いベルト速度でのデータを加えて $\beta(n)$–$\beta(n+1)$–ベルト速度の三次元空間で多項式近似曲面を計算し，得られた曲面の当該ベルト速度断面から近似曲線を得る工夫をした．

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．脚ロボット，知能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等を受賞．（日本ロボット学会正会員）

モフロァ クリストフ（Christophe Maufroy）

ブリュッセル自由大学とエコール・サントラル・パリで機械工学専攻修士課程修了．2009 年電気通信大学生産情報システム学専攻博士課程修了．工学博士．現在，フラウンホーファー研究所，ヒューマンアシスタントシステム研究開発グループ長．

古殿幸大（Kodai Kodono）

2021 年京都工芸繊維大学機械設計学専攻博士課程に在籍．2021 年 4 月より日本学術振興会特別研究員（DC1）．AMAM2023 Best Poster Presentation Award を受賞．日本機械学会，計測自動制御学会の学生会員．（日本ロボット学会学生会員）