反射の連鎖による即時即応の走行ロボット制御法
Control Method for Running Robots with Immediate Response by Chain of Reflexes

大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻　助教　**増田　容一**
Department of Mechanical Engineering, Osaka University **Yoichi Masuda**

要旨

本研究では，反射を用いた動物の運動生成メカニズムを歩行ロボット制御に活用することを目的に，動物の筋特性や反射を再現可能な四脚ロボットを開発した．本四脚ロボットは，動物の柔軟性の再現に必要な高いバックドライバビリティを有しており，ソフトウェアにより筋肉と反射回路を仮想的に再現することが可能である．ロボットを用いてネコの運動生成に寄与する反射回路を探索した結果，安定な歩行を生み出すシンプルな神経回路を発見した．本研究の貢献は，その神経回路の根幹をなす構造が，膝-腰伸筋間の相互の興奮性回路であることを明らかにした点にある．反射回路を実装した四脚ロボットの歩行実験では，一切の中枢パターン生成器を持たないロボットが歩容パターンを自律的に生成し，また従来のネコの電気刺激実験の結果を再現した．

1.　はじめに

四脚動物は，様々な環境外乱に即座に対応して，安定した歩行運動を実現する能力を持っている．このような動物の巧みな運動メカニズムを理解して再現することは，生物学への貢献のみならず，従来の歩行ロボットの運動能力を向上できる期待がある．

四脚動物の運動生成メカニズムを解明すべく，脊髄反射を用いた運動調整機能の研究が数多く行われてきた．動物実験を用いた２０世紀の研究[1, 2] では，ネコに電気刺激や外力を加えた際の応答を観察することで，歩行運動のサイクルを支配する反射経路の候補を得ている. また，コンピュータシミュレーションを用いた研究[3] では，ネコ後脚モデルに幾つかの反射ルールを導入することで，反射と床面の相互作用のみで安定した歩容が発現することが示された．しかしながら，過去に発見された複数の神経機構が動物の体の中でどのように統合されているのか，すなわち歩行を司る反射回路がどのように配線されているのかは未だ謎のままである．

これに対して本研究では，ネコの歩行運動を生み出す反射回路の構造を探索し，歩行ロボット制御に活用することを目的に，歩行機能を創発する反射回路の構築を試みる．まず，動物の筋肉および反射の特性を再現可能な四脚ロボットを開発し，ネコの歩行実験[1, 2] をもとに構成した反射回路を実ロボット上で再現する．

本研究の最大の貢献は，安定な歩行運動を生み出すシンプルな神経回路の構造を発見したこと, そして, その神経回路の根幹をなす構造が, 膝-腰伸筋間の相互の興奮性回路であることを明らかにした点にある．反射回路を実装した四脚ロボットの歩行実験では，一切の中枢パターン生成器を持たないロボットが脚軌道および歩容パターンを自律的に発現した．また，実験動物とは異なり，神経回路をリアルタイムに再プログラム可能なロボットの特徴を活用することで，歩行する際中のロボットの神経回路を仮想的に切断し，応答を比較することでその機能を調査した．その結果，足首伸筋の神経刺激によるネコの支持脚期延長機能[1]を再現可能であ

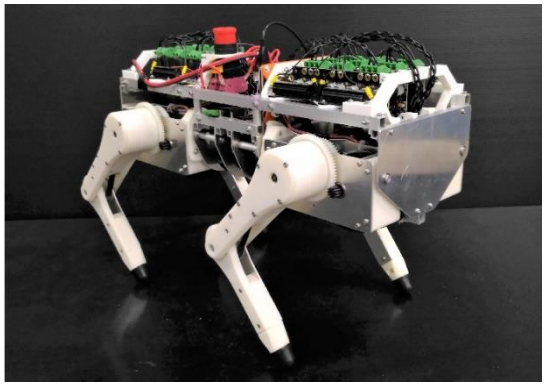

図 1　動物の特性を再現可能な四脚ロボット

ること，さらに支持脚期延長機能が歩容パターンを安定させる効果を有することを示した．

本研究で発見した反射回路の構造は，ネコの歩行生成を司る反射回路の有力な候補となり得るだけでなく，反射に基づく新たなロボット制御法の基礎となることが期待される．

2.　四脚ロボットの構成

開発した四脚ロボットを図１に示す．本章では, ロボットの機構系と制御系について述べる．

2.1.　機構系

ロボットの各脚は，脚を前後に動かす２つの関節と，脚を左右外側に動かすロール軸の関節をもつ．１脚あたりの自由度は３，全身の合計自由度は１２である．各関節のアクチュエータにはトルク密度の高いブラシレス DC モータ(MN6007 KV160, T-MOTOR, China)を採用し，ロール方向の関節および上部の回転関節は歯車，下部の回転関節は歯車とタイミングベルトにより動力を伝達している．また，脚の関節を駆動するモータを脚モジュールの腰部に配置したことで，脚の慣性モーメントを小さくしている．全ての回転関節において減速比を 1:7 と低くしたことで減速機の摩擦の影響を低減し，バックドライバビリティとトルク制御の性能を高めている．また，各モータの背面にはロータリーエンコーダ(ATM102-V 2048PPR, CUI Devices, USA)を備え, モータの回転角度が計測できるようになっている．ロボットの胴体長は 470 mm, 肩幅は 289 mm，脚の上腕および前腕の長さは 152 mm，重量は 7.6 kg である．

2.2.　制御系

本ロボットは，ブラシレスモータを制御するモータドライバと，筋特性・反射を再現するコントローラにより構成されている．

下位のモータドライバには ODrive v3.6 24V を採用し，ブラシレスモータとロータリーエンコーダを接続した．モータドライバでは，ロータリーエンコーダによるモータの角度計測および，モータの電流フィードバックによるトルク制御が 8 kHz の制御周波数で実行される．

上位のコントローラには teensy 3.6 を採用し，筋特性と反射を再現する処理を行っている．上位コントローラは，下位のモータドライバからシリアル通信によりモータの角度を取得し，脚の関節角度と仮想的な筋肉・反射の状態を 1 kHz の制御周波数で更新している．さらに，更新した筋張力と等価な関節トルクを計算し，目標トルクとして下位のモータドライバに送信している．また，筋肉や反射などの内部状態の記録のため，シリアル通信により内部状態データを PC に送信している．

3.　反射に基づく四脚ロボットの制御

本研究では，反射を用いた動物の運動生成メカニズムを歩行ロボット制御に活用することを考える．そのために，動物の筋繊維と腱の特性を表現した筋肉モデルを四脚ロボットの各関節に仮想的に配置する．そして，ソフトウェア上で筋肉モデルの特性を再現するための関節トルクを計算してモータに出力することで，動物の

筋肉および神経の特性をロボット上に再現する．

3.1.　筋特性の再現

動物の筋肉は，自身の活性化度合に基づいて筋繊維を収縮させ，張力を発生させる．このような筋肉の動特性を再現するために Hill 型の筋モデル[3]を採用した．Hill 型の筋モデルは筋活性化度に応じて筋張力を発揮する収縮要素 CE (Contractile element)と，並列接続の弾性要素 PE (Parallel elasticity)，直列接続の弾性要素 SE (Series elasticity)により構成される．また，CE と PE は筋肉の特性を，SE は腱の弾性特性を表している．収縮要素の CE には，最適な長さで収縮力が最大となる長さ依存特性と，収縮時には力が小さく，伸張時には力が大きくなる速度依存特性がある．また，弾性要素の PE と SE は，一定の長さを超えた際に張力が生じる非線形の弾性特性を有している．

3.2.　反射回路の設計

本研究では，ネコを用いた過去の歩行実験によって得られた神経生理学的な知見に基づいて，ロボットの歩行運動を生成する回路を探索した．

Whelan らの実験[1]では，除脳ネコにおいて後脚の足首関節の伸筋から伸びる求心性神経に電極を取り付け，歩行中に電気刺激を与えた．その結果，支持脚相の間に電気刺激を与えた際には，足首関節の伸筋の活動が延長されると同時に，腰関節の屈筋の活性化タイミングが遅れ，支持脚期が延長される現象が確認された．この実験から，足首伸筋の除荷が支持脚相から遊脚相への遷移タイミングを決定するという仮説が提唱されている．本研究では，この実験を再現しうる反射経路として，足首伸筋の筋力受容器（ゴルジ腱器官）が腰伸筋と足首伸筋を興奮させる反射経路を導入した．

二つめの McVea らの実験[2]では，除脳ネコの後脚の大腿部に紐を取り付け，紐を介して歩行時の腰関節の屈曲動作を補助した．その結果，遊脚相の屈曲動作を外部から補助した場合には，腰屈筋の活動時間が短くなると同時に，足首伸筋の活性化タイミングが早くなり，遊脚期が短縮される現象が確認された．この実験から，腰関節の位置により遊脚相から支持脚相への遷移タイミングを決定するという仮説が提案されている．本実験を再現可能な反射として，腰伸筋の筋力受容器が足首伸筋を興奮させる反射経路が挙げられる．

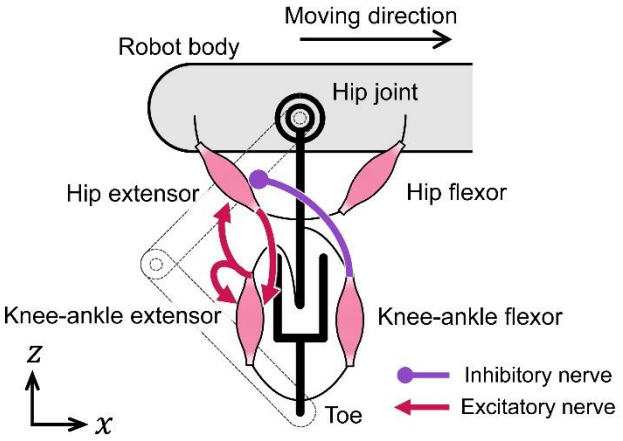

図 2　ロボット上に再現した反射回路

本研究では，上記の 2 つの神経生理学的な知見に基づいて，図 2 の反射回路を構築した．なお，遊脚終期の腰伸筋の過剰な興奮を抑制するため，膝屈筋の力受容器から腰伸筋への抑制性の反射経路を試行錯誤的に追加した．

4.　四脚ロボットの走行実験

ネコの歩行実験に基づいて構成した反射回路を評価するためにロボットの走行実験を行った．

はじめに，四脚ロボットの歩行実験を，つぎにネコの動物実験で観察された現象の再現を行い，提案した反射回路は歩行運動を発現可能か，ネコのふるまいを再現する妥当な回路であるかを検証する．

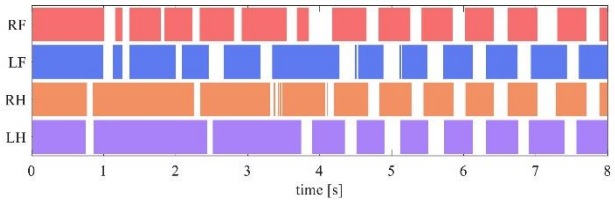

図３　反射回路から安定な歩行が発現

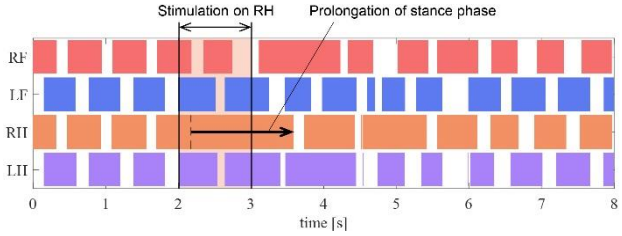

図４　ロボットによるネコ電気刺激実験の再現

4.1.　歩行実験

提案した反射回路による歩行生成を確認するために歩行実験を行った．実験では，四脚ロボットをトレッドミル上で歩行させ，歩行運動をモーションキャプチャシステムにより計測した．

四脚ロボットをトレッドミル上に置くと，上位脳からの指令やリズム生成器が無いにも関わらず，床面と反射系の相互作用によって安定した歩容および脚軌道が発現した．このときの各脚の接地状況を図３に示す．図中の RF，LF，RH，LH はそれぞれ右前脚，左前脚，右後脚，左後脚を表しており，それぞれについて接地時を色の付いた領域で表示している．図より，時間が経つにつれ各脚の接地タイミングが徐々に調整されることがわかる．時刻 4 s 以降は右前脚と右後脚および左前脚と左後脚の支持脚期のタイミングが一致しており，それぞれは反位相であることから，pace 歩容が発現している．

4.2.　神経刺激に伴う支持脚期延長の再現実験

ネコの歩行実験において，足首伸筋の求心性神経に電気刺激を与えた際にロボットの支持脚期を延長するという現象が確認されている[1]．本節では，ネコの電気刺激実験と等価な刺激をロボットの反射回路に与えた際に，ネコと同様の支持脚期延長現象が再現されることを示す．

まず，ネコの電気刺激により，足首伸筋の筋力情報を伝達する求心性神経が興奮する現象を，四脚ロボットでは膝・足首伸筋からの筋力フィードバックの値（感覚神経の活動度）を強制的に増大させた．電気刺激のタイミングは，ネコの実験と同様に，歩容が安定した後に，支持脚期の膝・足首伸筋の活性化から 200 ms 後に 1.5 s 間の刺激を与えた．

図 4 に歩行実験時の各脚の接地状況を示す．実験では時刻 2 s から 3.5 s にかけて右後脚の膝・足首伸筋神経に刺激を与えている．図より刺激を与えた際の右後脚の接地時間が平常時と比較して 1.37 s だけ増加しており，支持脚期が延長されている．よって，提案した反射回路はネコの歩行実験を再現可能であり，ネコと同様の支持脚相延長機能を有することが示された．

4.3.　支持脚期延長機能の無効化実験

ここでは，再現された支持脚期延長機能が歩行運動に与える影響をロボットを用いて調べる．具体的には，歩行する四脚ロボットにおいて，全ての脚の支持脚期延長機能を無効にすることで，支持脚期延長機能の歩行への寄与を調査する．本実験では，2 秒から 8 秒までの間，支持脚期延長機能を無効化した．具体的には，腰の回転関節の角度が 1.68 rad を上回ったとき，強制的に膝・足首伸筋から腰伸筋と膝・足首伸筋への筋力フィードバックを無効化し，支持脚相から遊脚相への遷移を引き起こした．これは，歩行中のネコにおいて膝・足首伸筋からの求心性神経のみを一時的に切断したことに対応する．

図 5 は歩行実験時の各脚の接地状況を示す．図より支持脚期延長機能を取り除いた時刻 2 s 以降は一様なパターンが生じておらず，支持脚期延長機能を無効にした際は歩容が乱れている様子が確認できる．

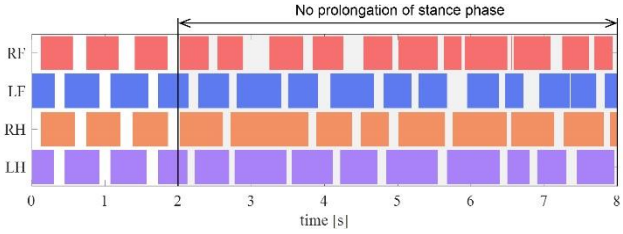

図 5　相互興奮回路の切断が歩容を乱す

以上より，膝・足首伸筋の筋力フィードバックによる支持脚期の延長は，各脚の位相を調整し，歩容の安定化していることが示唆された．

5.　おわりに

本研究では，ネコの歩行運動を生み出す反射回路の構造を明らかにして，歩行ロボット制御に活用することを目的に，筋特性と反射を再現可能な四脚ロボットを用いて反射回路を探索した．その結果，歩容と脚軌道を生成し，さらにネコの実験的振る舞いを再現可能な，シンプルな反射回路の構造を発見した．本回路は，除脳ネコの神経生理学的な実験に基づき，腰と膝の伸筋間を交差する興奮性の筋力フィードバック経路と，膝・足首伸筋の自己興奮性の筋力フィードバック経路により構成される．本研究の貢献は，その神経回路の根幹をなす構造が，膝-腰伸筋間の相互の興奮性回路であることを明らかにした点にある．筋特性と反射回路を実装して行った四脚ロボットの歩行実験では，反射回路は各脚で独立しているにも関わらず脚軌道および歩容パターンを創発したほか，ネコの歩行実験で見られる足首伸筋の神経刺激による支持脚期の延長現象が再現されることを示した. また，本四脚ロボットを用いることで，動物実験では困難な，支持脚相の後期のみ伸筋間の相互興奮反射を無効にした歩行実験を行った. その結果，伸筋間の交互興奮反射は, 各脚の位相を調整し，歩容パターンを安定させる効果を有することが示唆された．これらの結果は，伸筋間の相互興奮反射が脚軌道と安定な歩容の生成，さらにネコの実験的振る舞いの再現に大きく寄与することを示唆している．

謝辞

本研究は大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻の谷川豊章氏，石川将人教授との共同研究です．また，本研究を援助していただいた公益財団法人京都技術科学センターに感謝致します．

参考文献

[1] P. J. Whelan, G. W. Hiebert, and K. G. Pearson, "Stimulation of the group I extensor afferents prolongs the stance phase in walking cats," Experimental Brain Research, vol. 103, pp. 20-30, 1995.

[2] 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 Cats," Journal of neurophysiology, vol. 94, pp. 3497-3508, 2005.

[3] H. Geyer and H. Herr, "A Muscle-Reflex Model That Encodes Principles of Legged Mechanics Produces Human Walking Dynamics and Muscle Activities," in IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, vol. 18, no. 3, pp. 263-273, 2010.

研究成果発表

1) T. Tanikawa, Y. Masuda, M. Ishikawa, “A Reciprocal Excitatory Reflex Between Extensors Reproduces the Prolongation of Stance Phase in Walking Cats: Analysis on a Robotic Platform.” Frontiers in Neurorobotics, 15, 36, 2021.

2）谷川，増田，石川「 反射・筋特性を再現した四脚ロボットの即時適応的な運動生成 」第３８回日本ロボット学会学術講演会，3G1-06, 2020.

3）谷川，増田，石川「 四脚歩行メカニズム探究のためのトルク出力型ロボットプラットフォームの開発 」日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，　2A2-L14，2020.