

## [研究助成 (B)]

## 反射と思考の融合による即時即応の次世代四脚ロボット制御法

Next-Generation Quadruped Robot Control Method for Immediate Response  
through the Fusion of Reflex and Thinking

2211903



研究代表者

大阪大学 大学院工学研究科

助 教

増 田 容 一

## [研究の目的]

動物は、大脳の計算能力がなくとも多数の神経と筋肉、そして身体ダイナミクスの相互作用のみで即時の外乱対応を実現できることが従来の実験で知られている。しかし、現在の多くの脚ロボット制御には身体モデルに基づく最適化計算が必要であり、それゆえ動物とロボットの間には埋めがたい制御構造のギャップがある。動物に備わる下位の脊髄反射系を理解したうえでロボットに実装できれば、従来の計算処理を大きく削減できる期待がある。

これまで数多くの反射型制御が提案されてきた。筆者らのこれまでの研究では、動物の歩行運動を創発できる反射回路の同定を試みてきた。その結果、歩行中のネコで観察される反射則（股－膝間の交叉性反射）のみにより平均 7.34 km/h の高速走行が発現した。

そこで本研究では、上記の研究を発展させることで、下位の反射制御則および上位からの指令を融合させる新たなロボット制御法の実現を目指す。特に本研究では、定常的な歩行・走行に加えて、姿勢を維持するための脚運びなど非定常な歩行運動に着目した。

動物が歩行や、走行、旋回などを行う反射制御則には、予測できない外乱に対して転倒を防ぐための反射制御則が内包されていると考えられる。裏を返せば、姿勢回復のための制御則を

下位の制御系として予め準備しておき、上位から運動方向の指令を与えるだけで、歩行や走行、旋回などの定常・非定常を含めた多様な脚運動が創発できるであろうということが本研究における 1 つの仮説である。

## [研究の内容、成果]

## 1. 歩行運動のための反射則

本研究でははじめに、二関節筋を含めた多数の筋肉を協調して歩行させるための反射則を調査した。ネコ後脚の主要な 14 本の筋肉を再現した脚歩行ロボット（図 1）を開発し、反射制御則から創発される歩容パターンの調査を行った<sup>[1]</sup>。

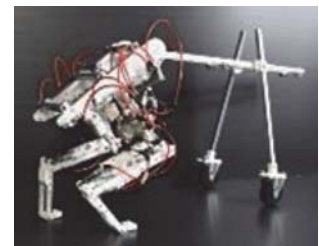


図 1 多数の筋と反射を備えたネコ後肢型ロボット

また、四脚動物の足運びパターン（歩容）を生み出すメカニズムについて、新たに複数の歩容を生み出す神経回路の候補が発見された。この反射回路をロボットに実装すると、支持脚期における股関節の伸展速度に応じて 2 つの歩容（walk → bound）が創発された<sup>[2]</sup>（図 2）。

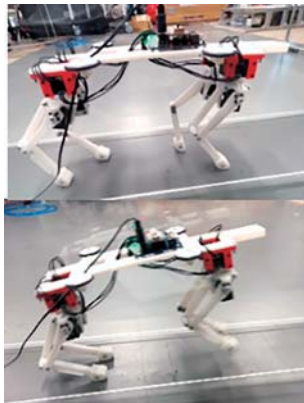


図2 反射による複数歩容の創発

## 2. 姿勢回復のための反射則

つぎに、ヒトの姿勢回復歩容を観察するべく、立位姿勢の研究代表者に目隠しを施し、左右からランダムに外力を加える実験を行った。

その結果、重心の位置に応じた姿勢回復のための脚運びを3パターン確認した。これら姿勢回復戦略に關与する反射系を同定するために、シミュレーション上で反射回路を探索した。その結果、各戦略を再現する3パターンの反射回路の候補を見出した<sup>[3]</sup>。さらに、反射則を検証するため、空気圧駆動のロボットにおける検証を行ったところ、姿勢回復のための歩容を創発した(図3)<sup>[4,5,6]</sup>。シミュレーションで予想された反射則に比べて、よりシンプルな反射則のみで歩容が創発されたことから足先の摩擦条件や脚部の受動的動特性が歩容の創発に寄与しているのではないかと考えられる。

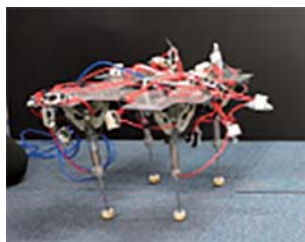


図3 反射のみで転倒回避するロボット

## 3. 下位および上位系の統合による複数運動のシームレスな切り替えと基礎実験

動物の脳にあたる上位系と、反射に基づく下位系の統合を目指した基礎実験を行った。予測

できない外乱に対する咄嗟の運動切替を考えた場合、運動間に共通する反射回路は維持したうえで、最小限の反射回路を上位から切り替えることが望ましい。そこで本研究では、走行中のロボットに横からの外乱を与えた際に、咄嗟の姿勢回復を行うハイブリッドな運動タスクに取り組んだ。

その結果、当初の予想に反して、走行のための反射則と脚部の受動的動特性のみであっても、姿勢回復のための歩容を創発できることを確認した<sup>[7,8]</sup>(図4)。一方で、足部が接地した直後など、タイミングによっては姿勢回復に失敗する現象を確認した。上記の結果は、複数の運動の間であっても、反射則の大部分が共通する可能性を示している。

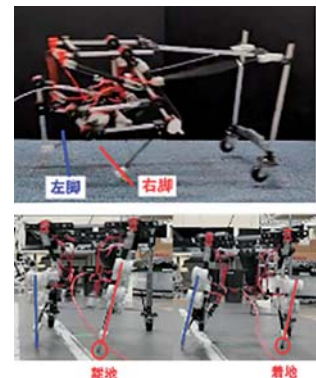


図4 歩行と姿勢回復を両立する神経回路の探索

## 4. 反射則を準備する「構え」の基礎検証

「構え」に関する研究では、過去の神経生理学における実験に基づき、環境変化や外乱に対して自らの姿勢や反射回路を準備したり、上位からの指令によって反射回路を切り替える制御方策を議論した。

例えば、われわれ人間も武道やスポーツ、もしくは日常生活などで、環境変化や外乱、もしくは次の自身の運動に対する反射則や姿勢を予め準備していることが知られている。本研究では「構え」を、「身構え：姿勢の準備」と「気構え：反射回路の準備」に分類して、動物が活用する複雑な状況への対応戦略についての考察を進めている<sup>[9]</sup>。

ロボットの運動制御における「気構え」戦略を検証するために、人間や動物の神経生理で知られる状況に応じた反射の反転(reflex re-



図5 環境を把持して構える  
上半身ロボット

ロボットを用いた実験では、上半身型のロボットの右手に周期的な外乱を与え、左手で環境を把持させた。このとき、左手の把持の状況に応じて、左右の腕を経由する反射回路の符号を調整することでロボット全体の揺動を抑制できることが示された。

#### [今後の研究の方向、課題]

本研究では、反射型制御により質の異なる運動間のシームレスな切り替えを実現するための基礎実験を行い重要な知見を得た。

上記の実験は、複数の運動間であっても反射則の大部分が共通する可能性を示している。筆者らはこのような複数運動に共通する神経回路を「多義的神経回路」と呼ぶ。今後は、複数の運動に共通する反射回路を特定していくことで、反対に、共通しない反射回路の活性・不活性を上位から調整していく際の重要な指針となると予想している。

現在は反射則を検証するための実験機を準備中である。アクチュエータとして高出力の



図6 準備中の実験機

versal) の有効性を検証した(図5)。中腰の人間が右手に外乱を受けた時、左手が机を把持するか否かで肘伸筋からの神経反射が興奮性から抑制性に変化する。ロ

大口径ブラシレス DC モータモジュールを採用した。また複雑環境下におけるタフな実験を想定し、安価かつ部品点数を抑えながらも整備性を向上した。今後は実験環境および実機を安全面において改善しながら反射型制御則の検証を行っていく(図6)。

#### [成果の発表、論文等]

- [1] 若本, 増田, 郡司, 福原, 多田限, 石川「マイコンレスで歩行運動を創発するネコ後肢型ロボットの開発」第39回日本ロボット学会学術講演会, 2C4-06, オンライン上, 10月, 2021.
- [2] 上田, 増田, 「ネコの腰——足首間の反射を再現した四脚ロボットによるベース・トロット歩容の創発」日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A2-G01, 名古屋, 6月, 2023.
- [3] 石浦, 増田, 郡司, 福原, 石川「神経反射モデルを用いた二脚ロボットのよろめき運動の創発」第34回自律分散システムシンポジウム (DAS2022), 1A1-3, オンライン上, 1月, 2022.
- [4] 石橋, 増田, 郡司, 福原, 石川「よろめきを活用した無脳二脚バランス制御」第34回自律分散システムシンポジウム (DAS2022), 1A2-4, オンライン上, 1月, 2022.
- [5] 石橋, 石浦, 増田, 郡司, 福原, 石川「蹴ってもコケない無脳よろめきロボットの実現に向けて」日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2A1-Q03, 北海道, 6月, 2022.
- [6] 石橋, 増田, 福原「押してもコケない無脳よろめきロボット」日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-I21, 名古屋, 6月, 2023.
- [7] 加納, 若本, 石橋, 増田「よろめきにより姿勢回復を行う無脳歩行ロボット」日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1P1-I22, 名古屋, 6月, 2023.
- [8] 加納, 若本, 石橋, 増田「バランス戦略と歩行を両立するネコ後肢型無脳ロボット」第35回自律分散システムシンポジウム (DAS2023), 2B3-5, 大阪, 2023.
- [9] 増田, 福原, 郡司「身構え・気構え・心構えによる身体多義性の再プログラム」第38回日本ロボット学会学術講演会, 2C4-01, オンライン上, 10月, 2021.