

4 脚ロボットにおける腹ばい歩容と鱗の影響

— 生物が進化の過程で獲得した機能をふりかえりながら新たな発見をめざす —

森田由香里¹・森下 武志²

桐蔭横浜大学工学部

(2010 年 2 月 25 日 受理)

1. はじめに

ロボットの研究・開発のこれまでをふりかえると、しばしば人間をはじめ生物を規範として、そのメカニズムの解明から機構的なユニットやシステムの開発に至るまで、生物の構造に習いながら技術が進んできた側面がある。また、実生活に近いフィールドにおいても、近年はロボットとの協調や共存をめざす世代と言われており、社会の要求は日々高まりを見せている^[1]。一方で、これまで研究・開発されてきたこれらの機械は、自然の中で生物が簡単にこなすほんの一機能を実現できずにいる分野や領域が多々存在する。我々はこのような生物の能力を参考にしたこれまでのさまざまな研究や開発において、先を急ぎ過ぎている面があるのではないかと、ロボットは社会や人に貢献できなければ存在価値が無いのか、人の都合による表現が過ぎるのではないかと、生物は大きな社会の中で秩序を保ちながら、ただただ生きているのではないかと、大きく見るとその目的が異なっているのではないかなどと、ロボットと社会の関わりについて議論した。

本研究ではこういった疑問から改めて生

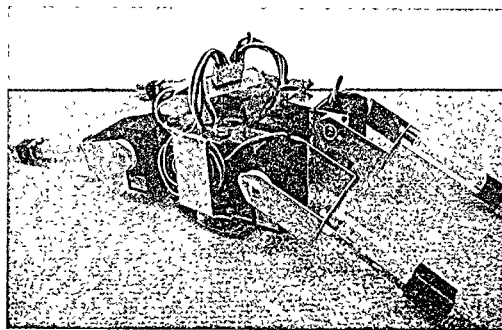


Fig.1 Sternal recumbency style robot

物の進化をふりかえり、長い年月の中で生物が獲得してきた重要な機能や能力をこれまで見過ごしてきた点があるのではないかと、新たな発見を期待して検討した。地球の誕生し生命が誕生した後の 36 億年前頃、水中の動物が陸上したと言われている^[2]。その際、両生類と体の皮膚を変形させた鱗で覆った爬虫類が現れたと言われている^[3]。本稿では、この地上での歩き出しと鱗に注目し、4 脚歩行に最低必要な機能を装備したロボットにおいて、腹ばい姿勢での歩行と胴体に鱗が装備された場合、これらが歩行における環境への適応力に与える影響を調査した。

¹ Yukari Morita : Graduate School of Engineering, Toin University of Yokohama

² Takeshi Morisita : Department of Robotics and Bio-mechatronics, Toin University of Yokohama, 1614 Kurogane-cho, Aoba-ku, Yokohama

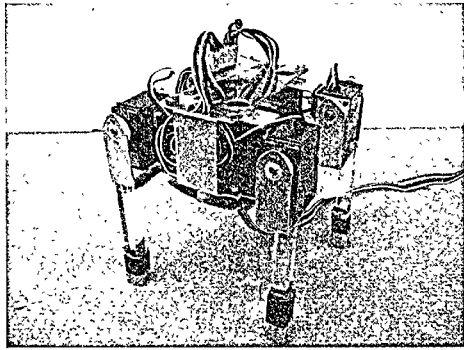


Fig. 2 Standing posture



Fig. 3 Sea turtle walking

2. 生物が上陸の際に必要なとした特徴と課題

現在の脚型移動ロボットは多くの場合、本体や胴体部分を接地面から浮かした状態を想定した設計で研究が進められていることが多い^[1]。本稿では、生物が進化し水中から陸上へ上陸した過程で獲得した歩行と体形の特徴に注目し、両生類と爬虫類の特徴を規範とした腹ばいでの歩行と鱗を装備したロボットの設計と歩容に関する調査項目を設定した。

2.1 腹ばい歩容を前提とした4脚ロボット

爬虫類や両生類など、地表に腹をつけて移動する生物が存在する中、脚型移動ロボットで腹を地表に付けることを前提としたロボットの研究はあまり見かけない。そこで本研究では、腹ばい歩行を前提とした4脚ロボットが歩行に及ぼす影響を課題とした。

2.2 腹に鱗を装備した4脚ロボット

爬虫類は鱗で覆われた生物である。この鱗は、外部環境の変化から身を守る役目に加え、歩行時の滑り止めとしての役割を持っている。しかしながら、この滑り止め機能の影響を4脚ロボットにおいて調査した研究事例

をほとんど見かけないため、本研究では歩行に直接影響する腹部にそれを装備した4脚ロボットの歩行に及ぼす影響を課題とした。

2.3 脚部自由度の検討

ロボットの機構と安定性はその評価基準が分類され比較検討がなされている。これより4脚ロボットの歩容は支持脚三角形内の安定余裕の等高線と重心位置や重心移動を考慮した機構、つまり各脚3自由度以上のロボットの研究が多い^[1]。しかしながら、水中に生活の重みを置いている生物が陸上で歩容する場合、脚となる部位は陸上で生活する生物と比べ発達していない。上陸したばかりの生物の歩容を、例えば、現代の水中を主とする生物で海亀などのように体に対し貧弱な手足で大きな体を移動する生物の歩容と類似していると仮定した (Fig.3)。そこで、本研究では、これらの生物の動作に習いロボットが歩行するために最低必要な自由度として1脚2自由度の4脚ロボットを用いて調査することとした^{[4][5]}。

3. 4脚モデルの設計

本研究では、前章で検討した課題に基づくロボットの設計を行った。Fig.1、2が開発したロボットである。各脚の自由度は2自由度とし、関節軸はヨー軸とロール軸とした。この関節設計は地面を腹ばいで歩行する生物の基本となる動作パターンを再現させるための最小限度の設計である。胴体はロボット全体

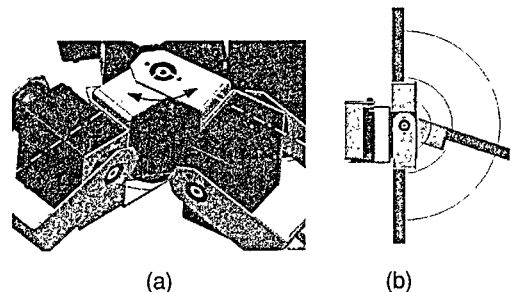


Fig. 4 Legs movable scope

Table 1 specific

Degree of freedom	8	
Length	132	[mm]
Width standing posture	199	[mm]
Width sternal recumbency	350	[mm]
Height standing posture	137	[mm]
Height sternal recumbency	59	[mm]
Weight	600	[g]

の大きさを極力小さくまとめるため、Fig.1のようにアクチュエータを4台並べ接触させたような配置とした。本研究は足の発達が十分でない生物を意識した研究であるが、実験において比較検討するため、脚の長さは哺乳類の直立姿勢時の比率を参考とした。また、ヨー軸は構造的に稼働できる最大の稼働範囲とし (Fig.4 (a))、ロール軸の稼働範囲は水平状態より $\pm 90[^\circ]$ とした (Fig.4 (b))。各関節の稼働範囲は、これらの条件を満たす設計を行った。Table 1にロボットの仕様を示す。

4. 動作モデル

海亀やオットセイなどは脚に比べ体が大きい。そのため、上陸し歩行する際、両腕両足を用いて引きずりながら体を持ち上げ歩行する歩容を本モデルの動作モデルとした。ここで両腕両足を同時に動作させるこの歩容を「全脚バタフライ歩容モデル」と定義し、これを実現させるため本研究では、腹ばい姿勢と4脚同時の動作で前から後ろへ送り出す動作モデルを検討した。この歩容パターンは歩行させるために、胴体を歩行面に接触させた状態で4脚を同時に機体前方にロールし、接地した状態から胴体を持ち上げる垂心力を加えながら4脚同時に後部へとロールさせる歩容パターンとした。

それに対して歩行姿勢、歩容の違いにおける影響を比較するために直立姿勢の歩容モデルを準備した。直立姿勢時の歩容は現在の爬虫類や両生類が低速な歩行時に多く見かけるクロール歩容とした^{[6],[7]}。

5. 歩行の適応実験

本稿では、直立姿勢歩行に対して腹ばい姿勢歩行の移動適応性を比較するための実験を行った。

5.1 水平面上歩行

実験は、重心を変えた2パターンの姿勢での歩容を確認した。各脚をほぼ垂直に立てた直立姿勢からの歩行を高重心での歩行とし、この姿勢でクロール歩容をさせた。また、腹部が歩行面に触れる程度の腹ばい姿勢から歩行を始める歩容を低重心での歩行とし、全脚バタフライ歩容による腹ばい歩行（以下、腹ばい歩行）をさせた。なお、Fig.5、Fig.6は歩行時の最大重心位置を示す。

また、この二つの姿勢での支持脚部と接地面との摩擦力を確認した。本体の重量が6[N]であり、転倒または滑落するまでの高重心姿勢の摩擦力は3.1[N]であり、低重心姿勢は6.4[N]であったので、歩行には十分な摩擦力

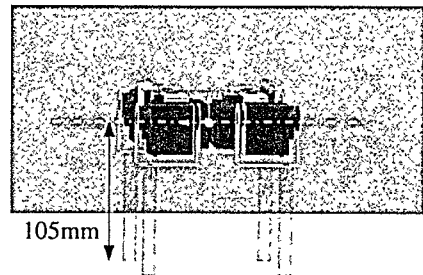


Fig. 5 Barycentric position of standing posture

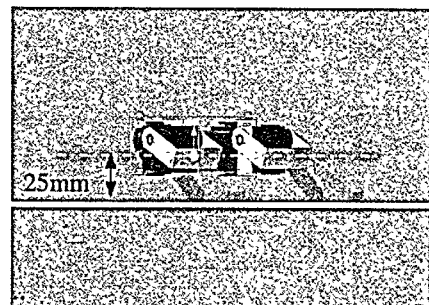


Fig. 6 Barycentric position of sternal recumbency

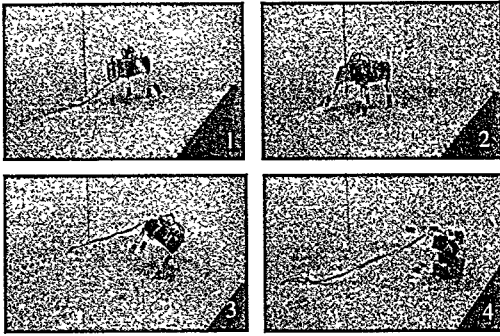


Fig.7 Standing posture walking of horizontal swing walking surface

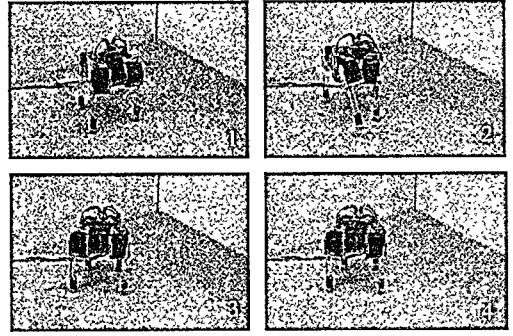


Fig.9 Standing posture crawl gait slope walking (5deg.)

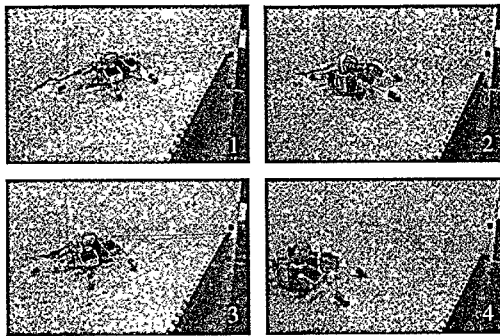


Fig.8 Sternal recumbency walking of horizontal swing walking surface

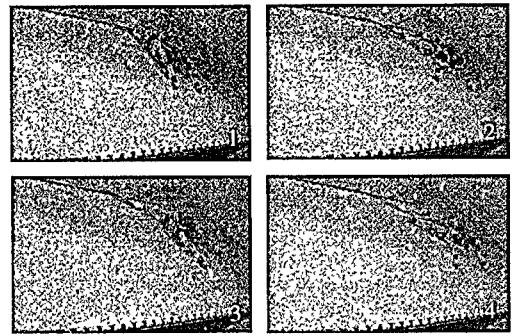


Fig.10 Sternal recumbency slope walking over abdomen frictional force (25deg.)

を有している。

水平面上で静歩行により直進させた実験の結果、両歩容とも歩行が確認できた。

5.2 水平揺動面歩行

姿勢の違いによる水平歩行面の適応力を確認するために水平面が揺動する歩行環境下での歩行状態を調査した。実験では、平面の歩行面を進行方向に対して最大角およそ $\pm 10[^\circ]$ の幅でゆっくりと一定の周期で揺らした状態のまま、直立姿勢と腹ばい姿勢で歩行を確認した。その結果、直立姿勢での歩行は Fig.7 のように歩行からまもなく転倒したが、腹ばい姿勢での歩行は終始前進し適応力が高いことがわかった (Fig.8)。

5.3.1 緩斜面歩行の比較

緩斜面に対する歩行の歩行姿勢の違いによ

る適応力を確認するため、進行方向に対して水平な状態で $5[^\circ]$ の斜度を歩行させた。直立姿勢の歩行は旋回してしまい直進することができなかったが、腹ばい歩行は斜面を上ることができた。

5.3.2 斜面歩行の適応力調査

次に、腹ばい歩行の傾斜面歩行の適応力の限界を調査するための実験を行った。実験は斜度を $15[^\circ]$ から $30[^\circ]$ まで $5[^\circ]$ 間隔で変化させ確認した。実験の結果、腹ばい歩行では $15[^\circ]$ までの間安定した前進歩行が確認できた。 $20[^\circ]$ においては滑落がはじまり直進できずに進度の曲がりが生じ、 $25[^\circ]$ 以上では、脚部が接地面から離れると同時に腹部の摩擦力が本体を支えきれずに完全に滑落することが確認できた (Fig.10)。

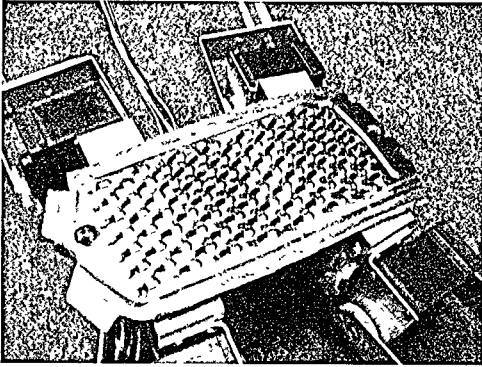


Fig. 11 squamation model

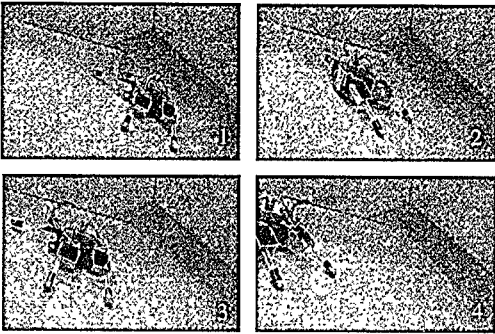


Fig. 12 Sternal recumbency slope walking with squamation (30deg.)

5.3.3 鱗を装備した斜面歩行

この実験では、後ろ向きの力に対して摩擦係数が大きい方向性を持つ部位として、本体腹部に Fig. 11 に示す鱗を模した金属性の鱗を装備した。この機能を持った状態で、斜度を $15[^\circ]$ から $35[^\circ]$ まで $5[^\circ]$ 間隔で変化させた場合の歩行実験を行った。この結果、 $20[^\circ]$ まで問題なく前進歩行した。 $25[^\circ]$ から $30[^\circ]$ の間では歩容 1 周期に対する移動距離が滑りのため徐々に縮んだが前進動作を実現し目標地点までの歩行を達成した。 $35[^\circ]$ では歩容における移動時の本体浮き上がり時に転倒した。これにより、本体に受ける重力が脚部支持の摩擦係数を超えるまで、全脚バタフライ歩容がロボットの歩行を実現することを確認できた。なお、鱗を装備した腹部摩擦係数は $7.6[\text{N}]$ であり、その他、本体重量、脚部摩擦係数は 5.1 項で示した通りである。

6. おわりに

本稿では、生物の進化の過程で動物が獲得した機能をふりかえり、その上で現在の研究で見過ごされた課題を探求する研究方法を提案した。また、4脚型移動ロボットが移動面に接触しながら歩容する全脚バタフライ歩容を提案し、その適応性を実験的に示した。さらに、この腹ばい歩容と一定の方向性を持つ摩擦機能が歩行機構に有用な機能となることを実験により明らかにした。加えて、本提案の歩容モデルが簡略化関節機構における移動機構の移動性能を引き出す歩容と機動性に寄与することを示した。

今後は、腹ばい歩行と鱗を装備し、本歩容モデルにおける不整地歩行に対する適応性の確認と歩行における定量的な移動効率を検証する計画である。

参考文献

- [1] 日本ロボット学会:“ロボット工学ハンドブック新版”, コロナ社, 2005
- [2] 犬塚則久, “イラスト・ガイド 私たちヒト 2 ヒトのかたち5億年”, てらべいあ, 2001
- [3] 西原克成: “生物は重力が進化させた 実験で検証された新しい進化の法則”, 講談社, 1997
- [4] 古屋拓郎, 金野祥久, 水野明哲, 菱沼和久, 平田宏一, 川田正國, “実験用ウミガメ型海中ロボットの設計・試作”, 日本設計工学会, 2005
- [5] 香原和志, “ウミガメの旅・太平洋 2万キロ”, ポプ, 1999
- [6] 佐藤好一, 藪田哲郎, 黄健: “ヤモリ型ロボットの強化学習を用いた運動獲得のための基礎的検討”, 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI21007) 講演論文集, pp45-46, 2007
- [7] 木村浩, 福岡泰宏, 中村洗之 “四足ロボットの生物模範型不整地適応歩行-力学に基づく制御との比較-”, 電学論, 122 巻 3 号, 2003