解 説

ザトウグモの形態を模倣した多脚ロボット

Multi-Legged Robot Inspired by Harvestman

程 島 竜 一* *埼玉大学

Ryuichi Hodoshima* *Saitama University

1. ま え が き

脚式という移動様式を選択していることから、多くの多脚ロボットは生物からヒントを得て開発されている。筆者らの研究グループでは、自らの身体より何十倍も大きい倒木や岩場、さらには樹の枝や壁面をも自在に歩き回るザトウグモという生物に注目し、多脚ロボットを継続的に研究している。

ザトウグモは名前にクモを冠しており、一見するとクモを連想させる外見ではあるが、学術的にはクモとは別種である。このザトウグモは、豆のような身体に針金のような脚が付いた独特の姿をしている。著しく長い4対の歩脚がザトウグモの最も特徴的な外見である。歩行には3対6脚のみを用い、図1(a)に示すように主にトライポッド歩容にて身体を揺らしながら歩く姿が一般的である。なお、正面から数えて2番めにある左右の各脚は歩行に使われない。この一対の脚は特に長く、これらの脚を胴体前方に伸ばして地面の様子を探っている。

歩行に用いられる六つの歩脚は図1(b)のように七つの節から成り立っている構造である。特に脚の末節は多数の細かな節から構成され、しなやかに湾曲する構造になっており、この末節により凹凸や段差、または壁面などに柔軟に適応して脚先が着地する。

本稿では、まず移動形態という観点からザトウグモの特徴を解説した後、そのザトウグモの形態を模倣し開発した多脚ロボットを紹介するとともに、その機構設計と歩容生成法を概説する。

2. 移動形態としてのザトウグモの特徴

生物を規範とする多脚ロボットの脚構造は、胴体下面から真下に太く短い脚を伸ばす脚構造である哺乳類型、胴体側面から長脚を外側に張り出す脚構造である昆虫型の二つの構造に大別される。ザトウグモは典型的な昆虫型の脚構造であるが、そのほかにもザトウグモの特徴的な外観として、著しく長い脚構造および小型胴体が挙げられる。そして、準静的に安定な歩行をする多脚ロボットにとって、こ

(a) ザトウグモの歩容 (トライポッド歩容)

Muscles:

- 1.Cx-Tr: levator
- 2.Cx-Tr: depressor
- 3.Tr-Fe: remotor
- 4.Fe-Pa: flexor
- 5.Fe-Pa: extensor
- 6.Pa-Ti: remotor-extensor
- 7.Pa-Ti: promotor/flexor
- 8.Ti-Mt: flexor
- 9.Ta-Cl: depressor
- 10.Ta-Cl: levator

Abbreviations:

- Cl: claw
Cx: coxa
Fe: femur
Mt: metatarsus
Pa: patella
Ti: tibia
Tr: trochanter
Ta: tarsus

(b) ザトウグモの脚構造

図1 ザトウグモの特徴 (文献[1]より転載)

これらのザトウグモの特徴は不整地を移動する際の大きな利点になると筆者らは考えている。

多脚ロボットが研究されてきた背景として、その不整地踏破性能が第一に考えられるが、準静的な安定性を保ちつつ歩行する場合、脚長は長い方が有利であることが指摘されてきた[2]。長脚であれば歩幅を拡大できるため、脚先接地点の間隔を大きくすることができ胴体軌道計画が容易になるだけでなく、遊脚速度を低速に保ったまま歩行ロボットの移動速度を高めることができるからである。また昆虫型の脚構造であれば重心を低く保つことも可能であり、歩行の安定性の観点からも望ましい。これに加え胴体が小型であれば、自身の脚長以上の段差高さを有する大規模段差を踏破する際に有利であると筆者らは指摘している[3]。胴体が小型であれば胴体姿勢の可動範囲を拡大できるため、段差踏破の運動計画が容易になるだけでなく、胴体の姿勢

原稿受付 2018年12月10日

キーワード: Biologically-Inspired Robot, Multi-Legged Robot, Harvestman, Leg Mechanism, Gait Generation

*〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

*Saitama-shi, Saitama

変更に要する時間を短縮することができるからである。

このように、ザトウグモの外見的形態が準静的に歩行する多脚ロボットに有利な移動形態と一致しているため、筆者らはザトウグモの形態を多脚ロボットに取り入れ試作機を開発してきた。なお昆虫型の脚構造はスケール則の観点から小型の多脚ロボットへの導入例が多いが、筆者らは昆虫型の脚機構を中・大型の多脚ロボットを中心に導入してきた。脚を長くするには高い脚先出力や高い脚構造の剛性、および特別な脚の運動軌道計画や胴体姿勢制御などが必要となる。以降では実際の開発例を元に、いくつかの技術的解決法を紹介する。

3. ザトウグモ型の多脚ロボット

3.1 ASURA I

2013 年前後に開発した 6 足歩行ロボット ASURA I [3] を図 2 (a) に示す。このロボットは脚長が 1.3 [m]、胴体長が 0.33 [m]、重量が 27 [kg] となっている。

開発時に脚長と胴体長（胴体の前部から後部までの長さ）の関係に注目し、その比率（脚長／胴体長）を表す脚長比という指標を提案した。多脚ロボットの胴体構造に関する研究では、能動関節あるいは弾性体で連結した体節で胴体を構成した場合についての報告がほとんどである。しかし、

(a) ASURA I 試作機

(b) 脚機構の概念図

図 2 ザトウグモ型 6 足歩行ロボット ASURA I

胴体長と脚長の関係を調査してみると、ロボットのサイズにかかわらず脚長比はほぼ 1.0~2.0 の間に集中していた。

これはロボットのサイズが大きくなり脚が長くなると、同時に胴体も長くなることを意味する。ロボットのサイズが大きくなれば重量も大きくなるので、大出力の大型アクチュエータが搭載できるように胴体も脚に比例して大きくなるためだと考えられる。胴体長が姿勢計画に影響することは指摘したが、脚構造と比べると胴体構造にはこのように関心が集まっていない。そこで、ASURA I では胴体サイズにも注目して胴体を小型化し、ほぼザトウグモの形態を再現した。

長い脚構造を実現するために、関節の駆動系には後述する干涉駆動の原理を導入し、図 2 (b) に示すパラレルリンク機構で構成した差動機構と 5 節リンク機構を用いた。干涉駆動により搭載されているアクチュエータを常時稼働させることで、効率化とアクチュエータの軽量化を図る設計である。またアクチュエータを胴体付近に集中配置し、脚の慣性モーメントを低減化することで脚の運動性能の向上を図っている。脚のたわみを抑制するため、構造として剛性の高い CFRP のパイプをリンク構造として使用した。

3.2 TITAN XI

筆者が 2005 年前後に開発に携わった TITAN XI [4] を図 3 (a) に示す。脚長 3.7 [m]、重量 7,000 [kg] の土木工事用ロボットであり、世界最大級の 4 足歩行ロボットである。法面工事において重要な工程であるロックボルトやアンカーボルト用の削孔工事を行うことを目的に開発した。

(a) TITAN XI 試作機

(b) 脚機構の概念図

図 3 4 足歩行型法面作業ロボット TITAN XI

一般的なバックホウを図3(b)に示すように改良し、脚機構として用いた。バックホウ改良の際にはバックホウのリンク長、油圧シリンダのストロークと出力を機構解析し、長脚構造を実現した。急斜面を歩行する際には張力制御されたワイヤによりTITAN XIを懸架し、水平面での歩行と同等以上に歩行することが可能である。動力用のエンジン、およびワイヤを巻き取るためのウィンチ機構をロボットの背面と後部にそれぞれ搭載した。また法面を長距離移動する際に必要な環境認識技術として、測量機器を用いた環境地図生成手法と自己位置姿勢推定手法を開発し実装した。

土木工事用ロボットであるため安全性を最優先して歩行速度は低速に設定し、法面に設置されたコンクリートフレームを傷つけないよう間歇クロール歩容を基準歩容とした跨ぎ超え歩容生成法[5]を開発した。この跨ぎ超え歩容生成法は、後半で解説する領域設定法や位相保持法を間歇クロール歩容に応用した歩容生成法であり、操縦者からのロボットの速度指令を基に歩容を生成する。この歩容生成法の有効性は計算機シミュレーションと水平面および模擬法面における試作機を用いた実験にて確認した。山梨県南アルプス市での運用など実際の工事現場へすでに投入されている。

3.3 TITAN XII

図4(a)に示すのは、2014年前後に開発したTITAN XIIである[6]。脚長1.3[m]、重量100[kg]であり、能動足首関節を有している点が最大の特徴である。

(a) TITAN XII 試作機

(b) 脚機構の1脚モデル

(c) 足首機構の設計

図4 大型障害物を踏破可能な4足歩行ロボット TITAN XII

2脚ロボットでは、歩行中に1脚支持期間があるため足首を積極的に駆動する必要があることから、様々な能動足首機構が提案されている。また6脚以上の多脚ロボットでは、接地する脚が増えるため脚先は簡略化される傾向にあり、足首を省略し脚先を球構造とすることで歩行の際に脚先が路面と点接地する構成とすることがほとんどである。一方で4脚ロボットの場合は脚数が2脚と6脚の間であることから、(1)足首を省略した点接地型、(2)受動足首関節と足裏、(3)能動足首関節と足裏、などの脚先構造に関する報告があり、ほかの多脚ロボットとは事情が異なる。

ここで、4脚ロボットが不整地を歩行する状況を考える。脚長と比較して凹凸が十分小さい場合には、凹凸に適応する機構を脚先に搭載することにより対応できると考えられる。他方、脚長と同等のスケール以上であるような凹凸が大きい場合には、胴体姿勢を一定に保ち脚先高さを変化させるだけでは適応することが困難であるため、地形に応じた胴体姿勢を積極的に変化させることが必要である。そのような胴体姿勢制御のためには可動範囲が広く高負荷にも耐えうる多自由度足首機構が必要であり、その能動足首機構を導入した4脚ロボットがTITAN XIIである。

4. 脚機構設計

脚ロボット研究の黎明期ではアクチュエータの性能が十分でなかったため、歩行や走行、十分なペイロードを実現するためには脚機構に工夫が必要であり、職人的・芸術的と形容する方が相応しい脚機構も存在した。しかし近年では、アクチュエータ、センサ、計算機の性能向上や小型化が目覚ましく、特にアクチュエータに関しては性能向上が顕著であるため、ひとところより出力重量比は格段に向上している。それに伴い、近年ではシンプルな機構で優れた性能を発揮している脚機構も現れるようになった。このように脚機構の設計の難易度は以前よりも下がってはいるのだが、脚機構の軽量化や高出力化などは依然として現代でも解決すべき問題である。ここでは、注目される機会が減った機構的側面の重要性を認識して発展させていくために、重要な脚機構の駆動原理について紹介する。

4.1 干渉駆動

多脚ロボットは常に自重を支持する必要がある。静止状態においても支持脚には負荷が加わっており、特に胴体の外側に脚を張り出した昆虫型の脚機構では哺乳類型とは比較にならないほど脚の根本に大きな負荷が加わっている。そこで、文献[7]ではアクチュエータを効率的に稼働させる干渉駆動(Coupled Drive)を脚機構に導入することの有効性が指摘されている。

図5を例にして干渉駆動を説明する。このロボットはCMUにて開発された油圧駆動の6脚歩行ロボットである。アクチュエータは油圧シリンダであり、脚の骨格に対して斜め上方から2本のシリンダを組にして取り付けられている。この2本のシリンダを協調して伸展することで脚機構を下方に駆動させ自重を支え、互いに逆方向に長さを変更することで脚機構を前後に振る。したがって、大出力が必要な

図5 干渉駆動の駆動原理が用いられている油圧式6足歩行ロボット（文献[8]より転載）

重力方向には二つの油圧シリンダ（アクチュエータ）が協力して力を発生させ、力をあまり必要としない水平方向への脚の動作には二つの油圧シリンダ（アクチュエータ）の長さの差を利用して動作を生成する構成である。もし、これを従来どおりの機構（例えば、建機のバックホウ構造が相当する）で構成すると、自重を支える重力方向には干渉駆動で用いた油圧シリンダの2本分の出力が可能な特大の油圧シリンダ、水平方向には干渉駆動で用いたものより小型の油圧シリンダを用いて脚動作を生成することとなる。したがって、干渉駆動で構成した方がアクチュエータの合計重量が軽くなる、つまり脚機構の軽量化が期待できるのである。このように、干渉駆動は脚を駆動する際に常にすべてのアクチュエータを働かせて有効活用する設計原理である。ただし、脚の姿勢や力の出力方向によっては有効に作用しない場合もあることを付け加えておく。

4.2 重力方向分離駆動（GDA）

繰り返しになるが、自重を支持しているため、多脚ロボットは常にエネルギーを消費する。これは重力に抗う運動を行っているためである。したがって重力から影響を受けないようにアクチュエータを配置すれば、アクチュエータには大きな負荷がかからずアクチュエータを小型化、つまりシステムの省エネルギー化が図れる。このようなアクチュエータ配置による駆動系は重力方向分離駆動（GDA: Gravitationally Decoupled Actuation）として文献[2]で提案されている。これは車輪ロボットにおいて車輪を回転させるアクチュエータに重力による負荷が加わらないのと同様である。

図6に示す構造は完全に重力方向とアクチュエータを切り分けた例であり、これはスカラ型マニピュレータと同じ構造である。アクチュエータA、Bの回転関節は水平面でリンクを駆動させるだけで、胴体が水平であれば重力は影響しない。そして先端のアクチュエータCだけが重力に抗って負荷を支えている。

しかし、GDAを採用し重力に影響されないアクチュエータを増やすことは、少ないアクチュエータで自重を支えることになり、先ほどの干渉駆動とは基本的に相容れない。そのため、一部を干渉駆動、残りをGDAで構成する、または脚姿勢を工夫することにより同一の機構でGDAと干渉駆動を実現する工夫が必要となってくる。

図6 重力方向分離駆動の駆動原理が用いられている4足歩行ロボット（文献[8]より転載）

5. 歩容生成

不整地の歩容に関しては、近年では多種多様な手法が提案されている。例えばCPGは実装の容易さと多脚ロボットが発現させる歩容の多様性が興味深いこともあり、近年は適応歩容生成の主流の一つになっている。これから紹介する歩容生成法は、ロボットと環境のモデルを構築し歩容計画を行うモデルベースによる歩容生成手法であるが、準静的な歩行を行う多脚ロボットと親和性が高いので紹介する。

5.1 領域設定法

多脚ロボットにおける多くの歩容計画では、歩容計画を平面の歩容計画と高さ方向の歩容計画に切り分けて議論をしている。そして、平面の歩容計画では脚の可動範囲を設定し、その可動範囲の中で遊脚の脚先接地点を探索する手法が一般的である。しかしながら、可動範囲全域で脚接地候補点を探索することには無駄が多い。そこで文献[9]では、図7に示すように4脚ロボットにおいて脚接地候補点探索のために脚可動範囲内における探索範囲をあらかじめ設定し、探索の効率化を図る領域設定法が提案されている。

ロボットが歩行する際、後脚には前脚よりも制約が加わる。胴体座標系から後脚を観測すれば重心が前方に移動するにつれて常に後脚が離れていき、可動限界に達しやすいためである。そこで次の方針に従い、領域設定法では後脚の可動範囲を領域I、II、IIIとして三つの領域に設定している（ただし領域設定法IIIだけは前脚にも適用する）。領域Iは歩行を継続するために遊脚が着地する必要のある領域、領域IIはクロール歩容を継続する（前脚が遊脚可能になる）ための領域、領域IIIはロボットの脚の左右の位置関係を保持する（つまり、ロボットの側面と前面が入れ替わらないようにする）領域である。遊脚する後脚が歩行を継続するために着地すべき領域と、遊脚する後脚とは反対側の後脚の接地位置とに関係があることを見出したので、この領域設定法では領域Iを設定する際に反対側の後脚の接地位置を考慮に入れている。つまり、基準歩容シーケンスにおける2歩先を読みながら運動を計画する。

5.2 基準収束型適応歩容

周期歩容は平坦地において最も移動効率と安定性が良い

図 7 領域設定法

(a) Leg-3 は遊脚終了直後であり、基準歩容軌道とは異なる点に着地した。そのときの支持脚運動可能な距離は d である (b) 続いて Leg-4 が可動限界に達し次の遊脚となる。このとき、遊脚着地候補点を基準歩容の支持脚運動終了点から d だけ離れた基準歩容軌道上の点として設定する

図 8 位相保持法 (図は 4 足歩行ロボットの平面図)

歩容であり、非周期歩容は不整地において状況に応じ脚軌道を変化させる歩容である。そのため、基準歩容として周期歩容、適応歩容として非周期歩容が選択されるのだが、文献 [9] で提案されている基準収束型適応歩容はこれらの歩容を融合させた歩容である。通常は適応歩容により不整地を継続するが、地形が許す限りの範囲で基準歩容への収束を図るものである。この歩容を実現するにあたり位相保持法という手法が用いられている。

この位相保持法では、図 8 に示すように遊脚動作を行う脚 s に対し基準歩容シーケンスにおいて直前で遊脚動作を行う脚 s^* の位置に注目するのが特徴である。ただし歩行の効率化を図るために、同じ脚は連続して遊脚しない、支持脚運動による重心移動距離は可動範囲内で最大化するな

(a) コンプライアンス計測のための実験システム

(b) 油圧シリンダを用いた模擬負荷装置

図 9 脚構造のコンプライアンス計測実験

どの前提条件がある。

歩容生成の核心となるのは、 s^* が支持脚運動する距離を d としたとき、基準歩容の復帰開始点から d だけ離れた基準歩容軌道上の点を最有力の復帰候補点 (脚着地点) として、 s を復帰させようとする部分である。つまり、直前で遊脚であったはずの脚に合わせて、遊脚ストロークを基準歩容の遊脚ストロークから意図的に短くする。この方法により s と s^* の支持脚運動の距離を等しくしようと試みているのである。これを各脚で順次繰り返すことにより、最短であれば歩容の 1 周期後にはすべての脚の位相が揃い基準歩容を再開できる。要するに、歩行を継続しながら無理なく足並みを揃えようとする方法である。

5.3 脚機構コンプライアンス計測による脚のたわみ補償

脚機構が長くなると顕著になってくる問題の一つが、支持脚時において脚先への負荷により脚機構がたわむ現象である。この脚のたわみにより、意図しない胴体姿勢の変化を引き起こし、遊脚や支持脚運動に影響を与えてしまい、最悪の場合、歩行の継続が困難になってしまう。このたわみには大別して、(1) 脚機構の剛性、(2) 関節の剛性 (サーボ剛性)、の二つの理由が考えられるが、実際にはこれらの複合的な影響が原因であり、それぞれ独立に解決を試みても改善することは難しい。そこで筆者らは、脚機構のコンプライアンスを事前に直接計測して歩行運動を補償した手法 (文献 [10]) を TITA XI にて試みた。この手法では、まず事前に脚機構のコンプライアンスを計測し情報をデータベース化しておく。このデータベースを用いて、支持脚運動における脚先位置を修正するフィードフォワード制御を行い、支持脚時の脚のたわみによる脚先位置誤差を補償する。

コンプライアンスの計測は図 9 (a) に示すシステムで行った。まず、図 9 (b) のような油圧シリンダによる負荷装置

図 10 脚構造のコンプライアンス計測結果

を製作し、この負荷装置により任意の脚先位置において脚先に負荷を加える。次に、そのときの油圧シリンダの変位量（脚先位置の変位量）とそのときの油圧シリンダの圧力（脚先への負荷）を計測して、その場所におけるコンプライアンス行列を決定する。この作業を脚先高さが一定の場合、脚旋回角一定の場合でそれぞれ脚の可動範囲内の各点で行い、脚先位置ごとのコンプライアンス行列を求めた。このコンプライアンス行列を元に脚のたわみ量を見積り、支持脚運動時の脚先位置の指令値を更新する。そして検証実験において、地平面の歩行における鉛直方向の脚のたわみ補償を行い、胴体姿勢の変化を抑制することに成功した。

6. あとがき

生物のザトウグモの形態を模倣した多脚ロボット、機構設計、歩容生成法について紹介した。長らく指摘されているが、多脚ロボットの研究が数多く行われているにもかかわらず一部の例を除き実用化された例はほとんどない。生物的研究アプローチは確かに有効であると考えてはいるが、現状では生物規範型の多脚ロボットの性能は実際の生物のそれには及ばない。自然の生物の機能に学びながらも、それを超える多脚ロボットを創造できる未来につなげるため、今後も地道に技術を研鑽していく姿勢が必要である。本稿により、読者が多脚ロボットの研究分野に興味を持ち研究者の裾野が拡大すれば幸いである。

謝辞 紹介した多脚ロボットの研究では、広瀬茂男先生（東京工業大学 名誉教授）、米田完先生（千葉工業大学 教授）、福田靖先生（玉川大学 教授）、土居隆宏先生（金沢工業大学 准教授）、尾形勝氏（キヤノン株式会社）、小松洋音氏（三菱重工業株式会社）に多大なご協力をいただいた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] R. Pinto-da-Rocha, G. Machado and G. Giribet: Harvestman: The Biology of Opiliones. pp.28–33, Harvard University Press, 2007.
- [2] 広瀬, 梅谷: 歩行機械の脚形態と移動特性, バイオメカニズム 5. pp.242–250, 東京大学出版会, 1980.
- [3] R. Hodoshima, Y. Ohura, Y. Nishiyama, A. Sakaki, S. Watanabe and S. Kotosaka: “The ASURA I harvestman-like hexapod walking robot: compact body and long leg design,” Advanced Robotics, vol.30, no.23, pp.1467–1483, 2016.
- [4] 程島, 土居, 福田, 広瀬, 岡本, 森: “4 足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発—基本設計と脚機構の動作実験—”, 日本ロボット学会誌, vol.23, no.7, pp.847–857, 2005.
- [5] R. Hodoshima, T. Doi, Y. Fukuda, S. Hirose, T. Okamoto and J. Mori: “Development of Quadruped Walking Robot TITAN XI for Steep Slope Operation—Step Over Gait to Avoid Concrete Frames on Steep Slopes—”, Journal of Robotics and Mechatronics, vol.19, no.1, pp.13–26, 2007.
- [6] H. Komatsu, G. Endo, R. Hodoshima, S. Hirose, E.F. Fukushima: “How to optimize the slope walking motion by the quadruped walking robot,” Advanced Robotics, vol.29, no.23, pp.1497–1509, 2015.
- [7] 有川, 広瀬: “3D 荒地用歩行ロボットの研究 (GDA と干渉駆動に基づく最適化歩行)”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.5, pp.720–726, 1995.
- [8] 米田, 大隅, 坪内: ここが知りたいロボット創造設計. pp.103–104, 講談社, 2005.
- [9] 広瀬, 福田, 菊池: “4 足歩行機械の制御システム”, 日本ロボット学会誌, vol.3, no.4, pp.304–324, 1985.
- [10] 土居, 程島, 福田, 広瀬, 岡本, 森: “4 足歩行型法面作業ロボット TITAN XI の開発 (脚コンプライアンスの計測と補償について)”, 日本設計学会誌, vol.46, no.2, pp.94–101, 2011.

程島竜一 (Ryuichi Hodoshima)

2006 年東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。博士 (工学)。東京工業大学 21 世紀 COE 研究員および産学連携研究員、総務省消防庁消防研究センター研究官、埼玉大学助教を経て、2017 年埼玉大学大学院理工学研究科准教授、現在に至る。多脚ロボットや生物規範型ロボットに関する研究に従事。日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)