解説

屋外で活躍する移動ロボットの機構設計

Mechanical Design of Mobile Robot for External Environments

広瀬 茂 男* *東京工業大学大学院理工学研究科機械宇宙システム専攻

Shigeo Hirose* *Tokyo Institute of Technology Department of Mechanical and Aerospace Engineering

1. ま え が き

本解説ではまず、屋外で活躍する移動ロボットの活躍の分野を分類し、機構設計に必要な検討事項をまとめる。ついで、移動ロボットの設計の主要項目が、1) 形態設計、2) 駆動系設計に大別できることを指摘し、1) 形態設計については、三つの基本形態を明確化して具体的な設計実例を示す。また、2) 駆動系設計については、これまで筆者が設計を行ってきた過程で有効と思われる設計手法7項目を論ずる。

2. 屋外作業移動ロボットの設計

屋外で活躍する移動ロボットの設計を考える場合には、移動すべき環境を明確化しなければならない。平坦な移動環境に対比し、一般の移動環境は「不整地」であるが、それらは以下のように四つに分類できる。

1. 岩場、工事現場、そして階段などの「凹凸型不整地」
2. 砂地、沼地、灌木繁茂地などの「脆弱型不整地」
3. 岩場の隙間、瓦礫内、配管内などの「狭隘型不整地」
4. 大型建築物の壁面、配管系の外部などの「立体型不整地」

そして移動ロボットを設計する際には、これらの固有な移動環境に合わせた形態と駆動機構を導入しなければならない。なお、舗装された道路などの平坦地での効率の良い移動や、液体中や気体中などの浮遊環境での移動も場合によっては組み合わせる必要がある。

また、不整地環境を推進する移動ロボットの設計に当たっては、以下の6項目の特性すべてかそれらを組み合わせた特性を達成しなければならない。

1. 不整地踏破性の高さ
2. 移動のエネルギー効率の高さ（移動仕事率）
3. 移動の滑らかさ
4. 移動運動性能の多様性（旋回特性、全方向移動特性）

5. 積載質量の高さ

6. 姿勢保持安定性の高さ

このように多様な不整地環境において、上述のすべての特性を満足する移動ロボットの機構設計は、現状の技術ではまず不可能である。そのため、必要とされる機能性に応じた特有の機構設計がいずれにしろ必要となる。そしてこの機構設計は、1) 形態設計と2) 駆動系設計の二つに大別されよう。このうち形態設計は、移動ロボットの外形と基本的な運動様式を決定することであり、駆動系設計は所期の運動を生成する系の構成を決定することに相当する。もしも我々が超小型で高出力な理想アクチュエータを持っていれば、ロボットの機構設計は、適当な外形状と運動様式を選択し、それに必要なだけの理想アクチュエータを貼り付けるという単純な作業に帰着する。しかし、そのような理想アクチュエータは存在しない。そのため、形態設計に対比される駆動系設計は、機構の組み合わせを工夫することによって「擬似的な理想アクチュエータ」を作り出すプロセスと位置付けられる。以降それぞれの設計法を論じる。

3. 形 態 設 計

18年前の解説記事[1]に筆者は、移動ロボットの形態設計における三つの基本形は、車・クローラなどの無限回転機構、脚機構、そしてヘビのような節体幹であり、それらのいずれか、あるいはそれらの組み合わせで設計が可能であると論じた。そしてその後、自分自身の開発研究を含め多くの移動ロボットの形態を観察したが、おおむねこの分類が妥当であったと確認できた。そのため、以下にそれぞれの形態ごとに最近の設計例を示しておくことにする。

3.1 無限回転機構

オフロード車やクローラを装備した装甲車はすでに高度な不整地踏破性を発揮する[2]が、例えば階段の走行性などはまだ劣っている。そのため車輪自身を高機能化する試みがなされてきている。空気タイヤの空圧を下げることで階段昇降性能を向上しながら平地では高圧タイヤを利用する6輪走行車[3]、スプリングを用いた車輪[4]、車輪の底部と側面の特性を変えた車輪[5][6]などの事例がある。クローラについては、履帯にばね性[7]や非線形変形特性を持つ砂

原稿受付 2000年7月7日

キーワード: Mechanical Design, Mobile Robots, Coupled Drive, GDA, Connected Differential Mechanism

*〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1

*Meguro-ku, Tokyo

図1 人道的対人地雷撤去を行う歩行型移動ロボット

袋を用いて凹凸型不整地での移動特性を向上しようとする試み[8]も行われている。なお、このように単純な車両で不整地踏破性を上げるには重心位置の制御が重要である。そのため、傾斜面で自動的に重心位置を制御する機構[9]も合わせて開発されている。

3.2 脚

屋外作業用として有効に利用しようとする歩行移動体としては、林業用や惑星探査用の6足歩行機械[10][11]、惑星探査用の8足歩行機械などが提案されているが、以下に実用化を目指した筆者らの2例を示しておく。

第1は、ハイウェーを作るときに造成する急傾斜面の建設現場で作業するための4足歩行ロボットである[12]。急傾斜面造成地には格子状のコンクリートフレームが張られるため通常の車輪やクローラでは自在な移動ができず歩行移動が望ましい。そして、歩行移動であれば全方向移動が可能であり、足を開いた静止姿勢を取ることで安定な作業足場を構成できる。さらに、足を踏ん張って駆動すれば、脚がパラレルリンク駆動系を構成して胴体を6自由度的に駆動でき、それによって胴体に装備したドリルで強力な穴あけ作業なども遂行できる。TITAN-VIIと呼ぶ機械モデルで急斜面での自在な歩行が実現されている。

第2は、歩行型の人道的対人地雷撤去ロボットの開発例である[13]。このロボットは昆虫型の脚形状を持ち、足先機構を挿げ替えられる歩行機械である。この形態を選択することで、1) 不整地に埋設された対人地雷であっても、それが歩いて近づく兵士のために敷設されたものであるため、歩行移動体にとっては接近しやすい、2) 足を地雷撤去のために必要な腕に流用でき、草刈り作業、地雷探査作業、地雷掘り出し作業、地雷撤去作業などを遂行できる、3) 中枢の機器を搭載している胴体部が足先の地表面接地点の真上から離れた位置に置ける昆虫型脚であるので、誤って地雷を爆破させてしまっても中枢部の破壊を免れやすい、などの特性を発揮する。図1に小型機械モデルでの作業風景を示す。

図2 歩行と車輪のハイブリッド移動体 Roller Walker

これらの例に示すように、脚移動は移動速度を上げられない大きなハンディがあるが、脚を作業のためにも利用できる点はほかの研究[14][15]でも指摘されるように重要であり、用途によっては著しく実用的である。

3.3 無限回転十脚

歩行機械と車輪の組み合わせとしては、1) 歩行機械の足先に駆動車輪を取り付けたもの、2) 歩行機械の胴体部に車輪を取り付けたもの、3) 歩行機械の足先姿勢を変えることで足先が受動車輪となりローラースケート推進も行える図2のRoller Walker[16]などが試作されている。これらのうち特にRoller Walkerは、足先の追加質量が最小限に限定でき、歩行のためのアクチュエータが車輪走行にも利用でき実用的にも有効なシステムと考えられる。

3.4 節体幹

ヘビと同じ移動原理で推進するヘビ型ロボットACM III[17]を1972年に筆者が世界で始めて開発して以来、ヘビのような節体幹形状の移動ロボットは多く試作されている[18]。ただし、多自由度機構であるため、屋外作業用ロボットとして実用化されるのは未だ難しい状況にある。この形態は、以下に述べるように車輪やクローラと組み合わせることで実用化が計られていくであろう。

3.5 無限回転十節体幹

節体幹車両に複数の車輪やクローラを取り付けた形態が多く開発されてきている[19][20]。図3は車輪を装備した節体幹ロボットKR-IIである。通常は屈曲節と車輪(クローラ)とも駆動されるが、節の屈曲を受動的なものとしたもの、また車輪を受動的なものとしたものなどもある。いずれも細長い形態であるため、狭隘型不整地の移動に適した形態となっている。図4は先端にテレビカメラを搭載し、大震災時に倒壊家屋の瓦礫中に侵入していき生存者の探索を行うような目的で開発した蒼龍1号機である[21]。実用

図 3 節体幹型移動ロボット KR-II

図 4 瓦礫内探査を行う節体幹型移動ロボット「蒼龍 1 号機」

化を意識して、3 節からなる機構であるにもかかわらず駆動モータを三つだけに制限している。一つのモータがすべてのクローラを駆動し、残りの二つのモータが二つの関節を対称的に 2 軸方向に屈曲する構造である。このように関節は対称運動に制限されているが、それでも走行実験から狭隘型荒地での高い移動特性を発揮できるものとなっている。

4. 駆動系設計

「擬似的な理想アクチュエータ」を作り出す試みと位置付けられる駆動系設計法を、筆者のこれまでのロボット設計の体験に基づいて 7 項目に整理し紹介する。

4.1 機構特性を生かす連係運動系の構成

駆動すべき複数の関節対偶の間に、ある関数関係が保持されることが望ましい場合は、機構的に運動を拘束し単一のアクチュエータで複合的なアクチュエータ特性を生成すべきである。このような機構の事例は無数にある。例えば、歩行機械の足先機構は、足の位置にかかわらず常時胴体の姿勢と同じ向きにすることが有効であり、筆者の開発してきた歩行機械の多くは並行リンク機構によってその特性を生成している。

4.2 連結差動機構の利用

連結差動機構とは、エネルギーポートが三つある機構要素を、それらの二つのポートを連結のためのポートとし、残りの一つを出力ポートとして順次連結し、エネルギーを複数の出力ポートに伝達する機構である [22]。エネルギーポートが三つの機械要素は、例えば三つのシリンダーを有する連通管や、動滑車（滑車を通るワイヤーの両端と滑車の支持金具が三つのポートとなる）がその例である。そしてただの一本の棒も、左右と中心部に三つの出力端を想定すると 3 端子エネルギーポートの機構となる。これを連結するといわゆる rocker bogie 機構が実現できる。この機構は、車輪の支持力が機構的に均一化されるため不整地移動機構に有効であり、NASA が火星探査に使用したソジャーナーの車輪のサスペンション機構に使用されている。筆者も菱形 4 輪惑星ローバーのサスペンション機構や、歩行機械足先に取り付ける足先機構に利用した。このように連結差動機構は擬似的な多自由度化を実現するために有効である。

4.3 運動切り替えを行う可変拘束機構の利用

単純な機構でできるだけ多様な機能性を発揮するための機構である。本機構については、昨年本誌上で解説した [23] ので詳細は省くが、要するに、できるだけ多くの機能を発揮する機構を導入すること、機能性を切り替えるための機構はできる限り最小なものとする、そして切り替えのためには、主動力源の動力を利用すること、主動力源からの動力の切り替え時の「なごり」を利用すること、などがポイントとなる。

4.4 干渉駆動による搭載アクチュエータの有効利用

あるロボットに N 個のアクチュエータが搭載され、それぞれがパワー P を生成できるとしたとき、そのロボットが生成できる最大の出力パワーは NP である。干渉駆動の設計原理は、そのロボットが最もパワーを必要とする動作状態において、発生できる最大のパワー NP にできる限り近いパワーを生成するように機構 and/or 制御法を構成しようとするものである [24]。

例えば、出力パワーが P の二つの駆動アクチュエータで推進される図 5 の 2 種類の車両を考えよう。図 5 (a) は (b) に比較すると推進の駆動系と操舵の駆動系が非干渉化され、制御性の点で好まれる。しかし、干渉駆動の面からは図 5 (b) の方が望ましい。なぜなら、もしも直進運動が主要運動であるとする (a) の機構では操舵用駆動アクチュエータは利用されず出力は推進用アクチュエータの出力 P だけに依存する。しかし、(b) の機構では左右の駆動アクチュエータが両者とも推進のために寄与し、車両の総合出力パワーは $2P$ まで上げられるからである。この干渉駆動の考え方は、筆者がこれまで設計してきたロボットに多く使用している。

4 クローラ走行車両 HELIOS-II および図 6 の TAQT

図5 非干渉型と干渉型の車輪推進機構

図6 脚のようにクローラ角度を変えられる4クローラ走行車 TAQT Carrier

Carrier [25] では、四つのクローラそれぞれの傾き度を変える駆動軸と、クローラ履帯の駆動軸を干渉させ、クローラが傾斜するためにトルクを発生しない通常の走行時にも搭載している両者の駆動パワーが総合して推力に使用できるようにした。

壁面吸着歩行を行う NINJA-I, NINJYA-II では干渉駆動型の脚駆動機構を導入した [26]。壁面歩行では、垂直壁面を上昇する歩行時に最もパワーを必要とする。そのため、各脚は三つの直動駆動アクチュエータで駆動し、それぞれの直動駆動アクチュエータが垂直上昇時にはほぼ垂直になるような構造と姿勢制御を導入し、軽量で高出力な壁面移動機構を実現している。

4.5 負のパワー消費を生じない駆動系の導入

通常我々が使用できるアクチュエータは回生能力を持たない。つまり、外部の動きを規制するような制動運動を行うときで、外部からのパワーがアクチュエータに流れ込む状態の駆動状態において、アクチュエータに流入するパワーを貯蔵することはできない。この状態は、外にパワーを生成する動作状態を正のパワー消費状態とすると、逆の方向にパワーが流れるため負のパワー消費状態と呼べる。さて、回生能力のないアクチュエータを使う限り、この負のパワーは熱になって散逸し系のパワー効率は著しく低下する。そ

のため、運動モードの中にこのような負のパワー消費がなされないようにする、あるいは負のパワーを回生する特別の機構を導入することが駆動系設計では重要となる [27]。

負のパワー消費を防止する機構設計の典型例として、歩行機械の GDA (Gravitational Decoupled Actuation) がある。水平方向に等速直進運動を行う歩行機械は、原理的に移動のためにパワーを消費しない。しかし、関節機構で歩行運動を実現しようとする、関節駆動系に負のパワー消費状態が生じ、大きなパワーロスが生ずる。これを回避するため、GDA では重力方向とそれと直交する方向の駆動軸を非干渉化し、負のパワー消費を防止している。なお、通常の脚機構でもその歩行姿勢を変えることで GDA の効果を生じたり干渉駆動の効果を生じたりできる [28]。これは多様な機能性を発揮する歩行機械の実現のために有効である。

これに対し、負のパワーを生ずるときには、そのパワーをスプリングの歪エネルギーや、質量のポテンシャルエネルギーに変換して回生利用する手法も有効である。生体の脚に見られる腱駆動系のばね性も歩行運動のエネルギー効率を向上するために使用されている。

4.6 インピーダンスマッチングを可能とする機構の導入

インピーダンスマッチングの問題は、歩行機械が高速化できない大きな理由の一つとなっている。脚は支持相では低速・高出力モード、遊脚相では高速・低出力モードで駆動する必要がある。そのため脚のサイクル運動の中で頻繁に減速比を変更しなければならない。これまで、自動車用の自動変速機のような大型の変速装置はあるが、ロボットに使用できる小型高出力のものは未だ見当たらない。その結果、必要不可欠な自重支持特性を発揮するため、高減速比の減速器が使用され遊脚相でもゆっくりとしか脚を振れなかった。もしも、ロボット用に小型の減速機構が実現できれば歩行運動ははるかに高速化できるであろう。

筆者らは、このような効果を有する変速機構として、変速比の異なる一対の駆動系を利用する機構 [29]、リングコーン変速機を用いた無段変速装置 [2] の試作、X-screw と呼ぶ新しい負荷感应型変速機構 [30] の開発などを試みている。

4.7 軽量高出力駆動力伝達機構の導入

一般に激しく運動する部位の質量はできる限り軽量化すべきであり、そのためアクチュエータ動力を、リンク機構、タイミングベルト、チェーンなどで必要な部位に伝達する機能を利用することが有効である。従来からある駆動系に追加して、筆者らはワイヤーの利用が有効であると考えている。ワイヤー駆動にはワイヤーの破断しやすさ、伸び、端部処理の難しさがあるが、筆者らが開発した普及型 4 足歩行機械 TITAN-VIII [31] の最終駆動系には、プーリ側に V 溝を設ける機構、ワイヤー端部長さ調整機構などの導入で性能の良いワイヤー伝達機構を構成した。さらに、ワイ

ヤーの伸びを常時調整しながら、閾値のトルク以外ではばね性のない伝達を可能とする M-drive [32] というワイヤー駆動系も筆者らは提案しているが、これも軽量高出力駆動力伝達系として有効である。

5. あ と が き

設計は妥協の産物である。すべての観点から最適な設計ができたので製作を始めようとしたら、たまたま一つの部品が生産中止だったので、まったく別の形状に設計変更してしまった、などという事例は日常茶飯事である。そのため、設計はかくあるべきだと論ずる設計の一般理論は、筆者自身本当は眉唾ものだと感じており懐疑的である。そのためここで記述した筆者の設計論も、実はあまり信用してもらおうと困る。結局は自分自身で設計製作を繰り返し、自分なりの手法を編み出してもらう以外ないのではないかと感じている。まえがきにこう書いてしまうと読んでもらえないので、最後に本音を述べさせていただいた。

参 考 文 献

- [1] 広瀬茂男: “移動ロボット技術”, 計測と制御, vol.21, no.12, pp.1129-1134, 1982.
- [2] B. Shamah, D. Apostolopoulos, M. Wagner and R. Whittaker: “Effect of Tire Design and Steering Mode on Robotic Mobility in Barren Terrain,” Proc. FSR Int. Conf. on Field and Service Robotics, pp.287-292, 1999.
- [3] 内田, 古市, 広瀬茂男: “6 輪不整地走行車「HELIOS-V」の開発”, 日本設計学会誌, 2000.
- [4] 広瀬, 宇佐, 大森, 青木, 鶴澤: “対地適応型 4 輪走行車 HELIOS-III の開発”, 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.305-306, 1991.
- [5] 内田, 古市, 広瀬: “低圧・高圧ハイブリッドタイヤとしての効果を有するメカニカル車輪の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '99 講演論文集, pp.2A1-47-076(1)-(2), 1999.
- [6] 田口他: “足付き車輪による不整地移動機械の研究”, 第 12 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1199-1200, 1994.
- [7] S. Hirose, J. Miyake and S. Aoki: “Terrain Adaptive Tracked Vehicle HELIOS-I,” Proc. 4th Int. Conf. on Advanced Robotics, Springer-Verlag, pp.676-68, 1989.
- [8] 米田, 太田, 広瀬: “粉体の変形特性を利用したハイグリップクローラの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.8, pp.1183-1193, 1997.
- [9] S. Hirose, T. Senu and S. Aoki: “The TAQT Carrier: A Practical Terrain-Adaptive Quadru-Track Carrier Robot,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2068-2073, 1992.
- [10] 小林, 中野, 福田, 荒井, 妻木: “急傾斜山地移動用 6 脚歩行機械の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2CIII1-8 (1)~(4), 1998.
- [11] R. Whittaker, D. Wettergreen and J. Bares: “Configuration of a Walking Robot for Volcano Exploration,” Proc. Int. Conf. On Advanced Robotics, pp.487-492, 1993.
- [12] S. Hirose, K. Yoneda and H. Tsukagoshi: “TITAN VII: Quadruped Walking and Manipulating Robot on a Steep Slope,” Proc. Int. Conf. on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, pp.494-500, 1997.
- [13] S. Hirose and K. Kato: “Quadruped Walking Robot to Perform Mine Detection and Removal Task,” Proc. 1st Int. Symp. Clawar '98, pp.261-266, 1998.
- [14] 新井, 安達, 小谷内: “脚・腕統合化の研究 第 1 報 基礎的考察”, 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.629-630, 1991.
- [15] D.K. Pai, R.A. Barman and S.K. Ralph: “Platonic Beasts: a new family of multilimbed robots,” Proc. IEEE ICRA, pp.1019-1025, 1994.
- [16] 遠藤, 広瀬: “ローラーウォーカーに関する研究—システムの構成と基本的動作実験—”, 日本ロボット学会誌, vol.18, no.2, pp.270-277, 2000.
- [17] Y. Umetani and S. Hirose: “Biomechanical Study of Serpentine Locomotion,” Proc. 1st RoManSy Symp.'73, Springer-Verlag, pp.171-184, 1974.
- [18] M. Yim, D.G. Duff and K. Roufas: “PolyBot: a Modular Reconfigurable Robot,” Proc. IEEE ICRA, pp.514-520, 2000.
- [19] S. Hirose, E.F. Fukushima and S. Tsukagoshi: “Basic Steering Control Method for Articulated Body Mobile Robot,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.2384-2390, 1994.
- [20] K.U. Scholl, V. Kepplin, K. Berns and R. Dillmann: “An Articulated Service Robot for Autonomous Sewer Inspection Tasks,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1075-1080, 1999.
- [21] 広瀬, 高山: “瓦礫内推進連結クローラ-走行車「蒼龍 1 号機」の開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 '98 講演論文集, 1C14-1(1)(2), 1998.
- [22] 広瀬: “連結差動機構とその応用”, 設計製図, vol.21, no.10, pp.362-366, 1986.
- [23] 広瀬: “「可変拘束機構」とその設計—特殊環境移動作業ロボットへの適用—”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.5, pp.615-619, 1999.
- [24] 広瀬, 佐藤: “多自由度ロボットの干渉駆動”, 日本ロボット学会誌, vol.7, no.2, pp.128-135, 1989.
- [25] S. Hirose, T. Senu and S. Aoki: “The TAQT Carrier: A Practical Terrain-Adaptive Quadru-Track Carrier Robot,” Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2068-2073, 1992.
- [26] 広瀬, 長久保, 外山: “四足壁面移動ロボット NINJA-1 の研究”, 日本機械学会論文 (C 編), vol.57, no.540, pp.2679-2686, 1991.
- [27] 広瀬: “負のパワー消費防止による機械システムの改善”, ロボティクス・メカトロニクス講演会論文 A, pp.303-309, 1992.
- [28] 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.
- [29] S. Hirose, K. Yoneda, K. Arai and T. Ibe: “Design of Prismatic Quadruped Walking Vehicle TITAN VI,” Proc. 5th Int. Conf. Advanced Robotics, pp.723-728, 1991.
- [30] S. Hirose, C. Tibbetts and T. Hagiwara: “Development of X-Screw: A Load-Sensitive Actuator Incorporating a Variable Transmission,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Detroit, USA, pp.193-199, 1999.
- [31] 広瀬, 有川: “研究用プラットフォームとしての普及型歩行ロボット TITAN-VIII の開発”, 日本ロボット学会誌, vol.17, no.8, pp.1191-1197, 1999.
- [32] S. Hirose and R. Chu: “Development of a Lightweight Torque Limiting M-Drive Actuator for Hyper-Redundant Manipulator Float Arm,” Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Detroit, USA pp.2831-2836, 1999.

広瀬茂男 (Shigeo Hirose)

1947 年 12 月 6 日生。1976 年東京工業大学制御工学専攻博士課程修了。工学博士。同年同大学機械物理工学科助手。1979 年同大学助教授。1992 年同大学教授。1993 年機械宇宙学科に学科名変更。現在に至る。ロボットの機構、センサ、制御の研究に従事。

(日本ロボット学会正会員)