

6 脚クローラ型不整地移動ロボットによる

脚とクローラのハイブリッド移動と作業に関する研究

(Study on leg-track hybrid motion for traversing and handling tasks by hexapod tracked mobile robot)

佐々木 大雅 (Taiga Sasaki)

A robot has been developed that can perform tasks such as transportation at disaster or work sites in place of humans. Such a robot needs to have both a high level of mobility and working ability. The author has therefore developed a hexapod tracked mobile robot. The robot is able to perform static walking using six legs and crawler-based traveling. The leg has 4-DOF mechanism and can be used as a working arm. In addition, the robot is able to perform leg-track hybrid motion using the legs and crawlers.

In this thesis, firstly, we consider a leg-track hybrid motion of "stepped-gap traversing with object carrying" by the hexapod tracked mobile robot. The robot is able to perform carrying object by middle legs and traversing a wide gap with steps by supporting the track driving using front and rear legs simultaneously. Based on a model of this motion, we analyze the gap width and the step height that can be traversed by the relationship between the robot body and the position of the leg tip in the motion. In addition, we propose the autonomous motion of the stepped-gap traversing by this robot according to gap width and step height detected by the 2-D distance measurement system using servo motor equipped with an infrared sensor. We measured the step height and gap width, and based on measured step height and gap width in actual environments, we conducted an experiment of autonomous motion of "the stepped-gap traversing"

Secondly, we consider a motion for "object-retrieving under a board" in which the robot retrieves a hidden object under a board. We proposed a motion of "object-retrieving under a board" model and calculated the forces obtained at the leg tips based on the equilibrium between forces and moments to determine if the movement was feasible.

1. 研究要旨

人が活動するには危険な災害現場や作業現場で、人の代わりに作業を行うことができるロボット開発が行われてきた。そのようなロボットはどのような地形でも走破することができるような移動能力と人間の作業を代行できるような作業能力の双方が高い水準で必要になる。その能力を持つロボットはクローラ移動機構に作業腕を装

着した作業移動ロボットでクローラ駆動と腕によるハイブリッド動作により実行することができ、複雑な作業タスクを完遂することが可能となる[1][2][3]。

また、脚ロボットでは脚機構を作業腕として移動と作業を両立することで機構的に軽量なロボットが製作可能となる。

そこで筆者らは6脚クローラ型不整地移動ロボ

ットを開発した(図 1) [4]。このロボットの特徴として、6脚を用いた静的歩行とクローラ走行による移動を選択可能である。また脚機構は4つの自由度をすべて駆動することで作業腕として使用可能になる。また、クローラ走行中に脚機構による補助を行うことで、移動しながらの作業や、移動の補助なども行うことが可能となる。この研究では作業腕として使用可能な脚を持ち、さらに移動機構とのハイブリッドで作業と移動を自律的に行うロボットの研究という分野で独自性を主張することができる。

2. 対象物持ち上げ持ち替え動作

6脚クローラ型不整地移動ロボットにて運搬を行う場合、中脚にて運搬物の保持をするが、ロボットは最初に対象物を前脚で持ち上げ、それを中脚に持ち替える必要がある。脚先の可操作度マップを用いて生成した軌跡により持ち替え軌跡を求める。その結果を図2に示す。図2(a)(b)の点の色は各点での手先位置における各脚関節角より得られたヤコビアンから求めた可操作度を表している。これらの点群から脚先軌道を生成することが可能となるため、同じY値の前脚、中脚の脚先の水平となる軌道から得る。ただし、持ち替えを行うためには中脚と前脚のX値が重なっていることが必要になる。また中脚の手先軌道の末端が中脚のベースの位置より後方となることも必要となる。これらの条件を満たす前中脚の持ち替え軌跡を図2(c)に示す。この結果から持ち替え可能な手先軌道となる。

3. 段差溝乗り越え運搬

脚とクローラの移動補助の動作として、クローラのみでは本来超えられない幅と高さの段差のある溝を前後の4脚で補助して走破する動作と対象物を2腕にて保持する運搬動作を組み合わせた「段差溝乗り越え運搬」を考える。

はじめに、段差溝乗り越えの動作モデルを図3に示す。各フェーズ(phase_1~5)について前後脚



図1. 6脚クローラ型不整地移動ロボット

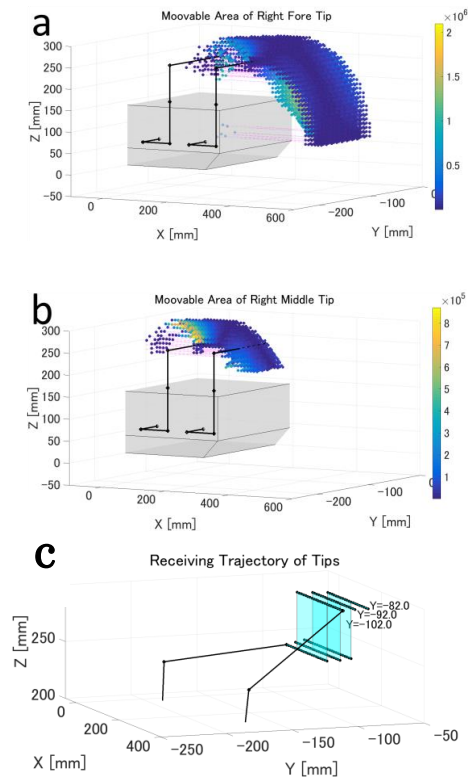


図2. (a)右前脚先の可動範囲

(b) 右中脚先の可動範囲

(c)前・中脚間で可能な持ち替え軌跡

先接地位置と各対岸の溝縁との間の距離を W_{lf} 、 W_{br} との関係を各フェーズで求めた。それらを用いて、前後脚それぞれの最大・最小値から各前後脚の接地による溝幅 w_f, w_r の条件は

$$w_f \leq \begin{cases} \max(L_{lf1}) + \min(L_{lf4}) + L_b \\ - (L_{cb} \cos \varphi - c_H \sin \varphi) \text{ if } (W_{lf1} < W_{lf2}) \\ \max(L_{lf2}) - \min(L_{lf4}) \\ + (L_b - L_{cb})(2 \cos \varphi - 1) \text{ if } (W_{lf1} \geq W_{lf2}) \end{cases} \quad (1)$$

$$w_r \leq \max(L_{lr5}) - \min(L_{lr3}) + L_b \cos\varphi - (L_{cb} \cos\varphi + c_H \sin\varphi) \quad (2)$$

となる。

結局、式(1)、(2)より乗り越え可能な最大の溝幅 w_{max} は

$$w_{max} = \min(\max(w_f), \max(w_r)) \quad (3)$$

となる。式中の L_{lfi} 、 L_{lri} は i 番目のフェーズの各脚のベース位置に対して脚先接地位置の x 値である。これらは機構的な制約に基づき運動学的に可能な範囲として得られる。また、 L_b は機体重心からクローラ端までの長さであり、 L_{cb} はクローラ端から最も近い脚ベースまでの長さである。 c_H はクローラ底面から脚ベースまでの高さである。以上より、段差高 h および溝幅 w に対して、 L_{lfi} 、 L_{lri} の範囲が得られる。そして、機体姿勢の回転角度 φ を

$$\varphi = \tan^{-1}(h/w) \quad (4)$$

として計算し、 w が式(3)の値以下であれば乗り越え可能と判断できる。 w と h に対して走破可能性を求めた結果を図4に示す。図中の各領域は各溝幅、段差高における結果を示している。(a)の領域は走破可能な幅と高さであることを示している。また(b)、(c)、(d)、(e)、(f)の領域は乗り越え不可能である。

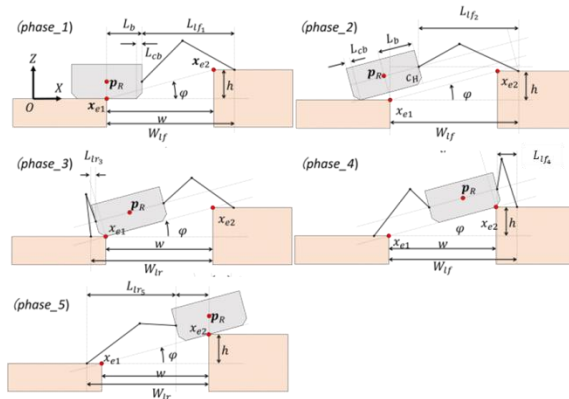


図3. 段差溝乗り越えモデル

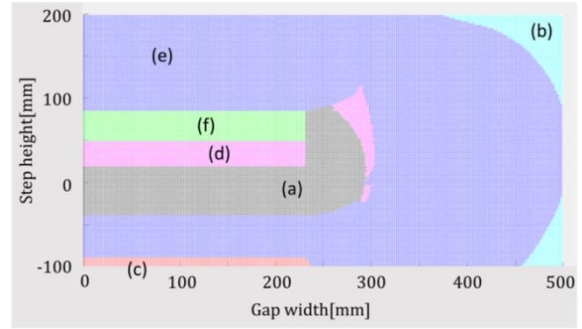


図4. 段差高と溝幅に基づく走破可能性

次に、動作の自律化のためにサーボモータに赤外線距離センサを装着した測距システムを開発し(図5)、それによるロボット前方の距離情報から溝幅および段差高を検出する手法について示す。その phase_1 でのモデルを図6に示す。機体前方上部に設置した測距システムにおいて、IR 距離センサが X 軸方向を計測しているときのセンサ回転角を 0 とする。計測は負のセンサ回転角の状態から開始し、センサを Y 軸まわりに正方向に回転しながら、機体前方の距離情報を取得する。このとき、溝縁の前後で計測点が路面から壁面に変わり計測距離が大きく変化するため、距離変化情報から溝縁を検出できる。奥側の溝縁 $P_2 = [x_2, z_2]^T$ については、計測距離の変化量の符号が負から正に変化する点となる。段差が大きい場合や壁の場合は、奥側の路面を検出できず、センサが負の回転角の段階で計測距離が得られるため、センサにて最初に距

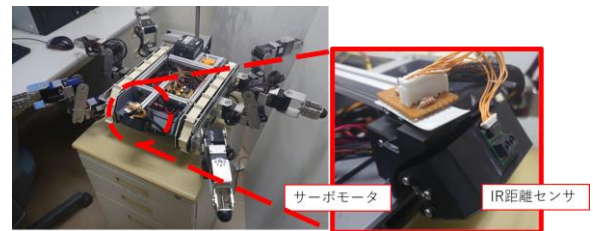


図5. IR センサを用いた 2 次元測距システム

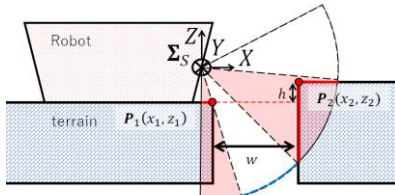


図 6. 段差高と溝幅検出モデル

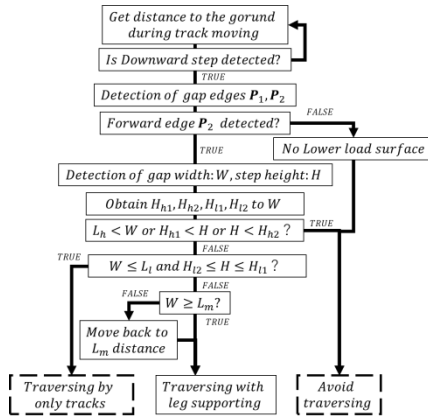


図 7. 自律段差溝乗り越えアルゴリズム

離を検出した点を溝縁がある位置とみなす。また手前側の溝縁 $\mathbf{P}_1 = [x_1, z_1]^T$ は距離変化が急激に減少した点になる。これにより検出した各溝縁 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$ の位置差

$$[w, h]^T = \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1 \quad (5)$$

より溝幅 w と段差高 h を得ることができる。そして、図 4 の解析結果を用いることでロボットはその段差溝が乗り越え可能かを判断できる。

段差溝乗り越え時のアルゴリズムを図 7 に示す。通常のクローラ走行中はセンサを正の回転角としておき、機体と前方の路面との距離を取得する。その際、もし大きな距離の増加があれば、前方に下方向の段差があることが推測できる。そのため、そこで走行を停止し、上述の方法により前方の 2 次元距離情報から溝幅と段差高の検出を行う。もし奥側の溝縁 \mathbf{P}_2 が得られなかった場合は崖などの乗り越え不可能な地形であると判断し、動作を中止する。溝幅と段差高がともに検出されれば、それに応じた適切な動作を選択する。検出した溝

幅を W 、段差高さを H としたとき。図 4 の結果を参照し、溝幅 W に対して乗り越え可能な段差高の最大と最小値である H_{h1} と H_{h2} が得られる。最大乗り越え可能幅を L_h としたとき、 $W \leq L_h$ かつ $H_{h2} \leq H \leq H_{h1}$ を満たす場合は乗り越え可能と判断できる。

検出した段差溝に基づく自律段差溝乗り越え実験を行った。図 8 (i) に溝幅 270 [mm]、段差 20 [mm] で上りの段差の結果と (ii) に溝幅 250 [mm] 段差高 85 [mm] で下りの段差の結果を示す。木材にて段差溝を形成した。その路面に対して溝縁とクローラ端が一致させたところから動作を行う。また、対象物把持をスキップし、最初から対象物を持たせ、段差溝乗り越えのみを検証した。その結果に基づいてロボットは動作を行った。図で示すようにそれぞれで図 4 にて示した各フェーズの状態について確認することができた。

(i) では溝幅に 18 [mm] の誤差があり、**phase_4** にてクローラが対岸溝縁に到達する前に前脚を離してしまっていたが、クローラ車輪の半径 30 [mm] 以内の誤差であったため、対岸路面にクローラが接地することができ、そのまま動作を完了した。この結果からクローラ車輪半径以下の溝幅と段差高の誤差であればそのまま動作可能であるということが確認することができた。また (ii) では、溝幅誤差 14 [mm]、段差高誤差 23 [mm] により **phase_1** にて脚先が対岸路面に接地できていない状態であったが、**phase_3** にて機体傾斜とともに接地し、そのまま動作した。また溝幅誤差に関しては (i) の結果と同様にクローラ車輪が対岸に接地できたためそのまま走破した。

この結果から指定した溝幅と段差高に対して

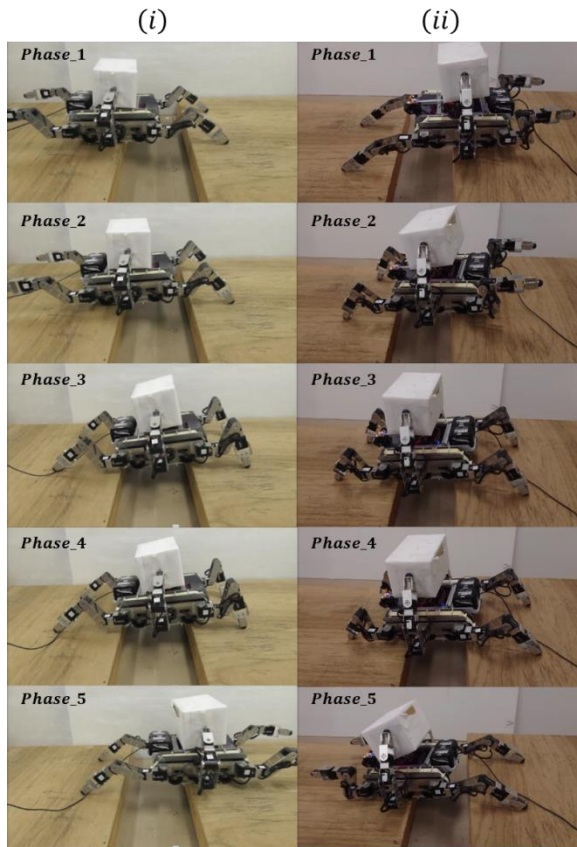


図 8. 自律段差溝乗り越え運搬実験
 (i) 上り段差 ($W:270[\text{mm}]$, $H:20[\text{mm}]$)
 (ii) 下り段差 ($W:250[\text{mm}]$, $H:-40[\text{mm}]$)

段差溝乗り越え動作が可能になることを確認した。

4. 板下対象物回収動作

開発した6脚クローラ型不整地移動ロボットのハイブリッド作業である板下対象物の回収動作を検討する。この動作は天井崩落などで大きな板状の障害物の下に対象物がある場合に想定される。その対象物を回収するために板を持ち上げその内部に移動し、その中の対象物を作業腕により回収する。その後、板を降ろしながら移動することで板を崩さずに対象物を回収することが可能になる。

板を持ち上げたときの板下対象物回収動作モデルを図9に示す。図は前後の脚で板を持ち上げている状態を示しており、各脚で板を支えている

点 p_2 で発生する脚先力を求めることで動作が可能であるかを判断することができる。そして点 p_2 を板の端から l_2 移動させ、持ち上げ高さ h と変化させたときの脚先に発生する力 F_z をシミュレーションにより求めた結果を図10に示す。今回のシミュレーションにて板の全長を1.2[m]、板の重量を1.5[kg]とした。その結果、最大の脚先力は、持ち上げ位置 $l_2:0.7[\text{m}]$ 、持ち上げ高さ $h:0.5[\text{m}]$ で $F_z:13[\text{N}]$ であるとわかる。脚に使用したサーボモータの最大出力は7.2[Nm]であることから、最大脚先力は36.4[N]なので、十分に持ち上げ可能であることがわかる。このように任意のパラメータを与えたときの最大の脚先力を実際に搭載したモータと比較することにより動作が可能であるかを判断することができる。本手法により、動作が可能であるかを判断することができる。

5. 考察

本研究では、6脚クローラ型不整地移動ロボットで可能になる脚とクローラのハイブリッド移動である段差溝乗り越え運搬について研究を行った。また、ハイブリッド作業である板下対象物回収動作について解析した。それらの達成に必要な、前後脚による対象物の持ち上げ持ち替えについて可操作度に基づく軌道生成の手法を提案し、実際のロボットにて持ち替え可能な軌跡を導出し、それに基づく持ち替え可能な対象物高さを求めた。次に脚とクローラによる段差溝乗り越え運搬について、幾何学的な動作の解析を行い、ロボットの機構的条件から乗り越え可能な段差高と溝幅を算出する手法を提案した。また、自律での段差溝乗り越えを考え、赤外線距離センサとサーボモータを使用した2次元測距システムによる溝幅、段差高検出手法について提案し、検出した溝幅に基づく自律段差溝乗り越えを確認した。

次に板下対象物回収動作について、自律動作のための板持ち上げ時の脚関節トルクに基づく板持ち上げ制御についてシミュレーションを行っ

た。

これらの6脚とクローラによるハイブリッド作業と移動がともに可能である点から6脚クローラ型不整地移動ロボットの有用性が証明でき、他の類似の機構を持つロボットに対しても有効であると考えられる。

今後の研究計画について、段差溝乗り越え運搬と板下対象物回収動作ともに自律化に必要な技術について達成していないものについて各種導入し、それらに基づく動作の手法や検証を行っていく。例えば段差溝乗り越え運搬については段差溝乗り越え中の脚関節トルクの最適化制御を行うことで効率の良い動作が実現可能になると思われる。

また、板下対象物回収動作について持ち上げを行う板の検出、認識について手法の提案を行う必要がある。これにはロボットビジョンに関する技術の導入が必要になる。最終的にはロボット自身が持ち上げ可能な板の姿勢・位置をそれぞれ認識し、その位置に対する脚先軌道を算出、その軌跡に応じて動作する手法の提案を行う必要がある。

参考文献

- [1] 程島竜一, 福村泰明, 天野久徳, 広瀬茂男, “クローラ可変型4足歩行ロボット TITAN X の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.7, pp.872-879, 2010.
- [2] Koji Ueda, Michele Guarnieri, Takao Inoh, Paulo Debenest, Ryuichi Hodoshima, Edwardo F. Fukushima and Shigeo Hirose: “Development of HELIOS IX: An Arm-Equipped Tracked Vehicle” Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.23, No.6, pp.1031-1040, 2011.
- [3] 亀崎允啓, 東宏河, 陳奎, 片野貴裕, 金子大靖, 石田健蔵, 中山正之, 関雅俊, 一柳健, 菅野重樹: “電動型4腕式極限作業ロボット E-OCTOPUS の開発”, 第35回日本ロボット学会学術講演会, 1K2-01, 2017
- [4] T.Fujita, T.Sasaki, “Development of Hexapod Tracked Mobile Robot and Its Hybrid locomotion with Object-Carrying,” 2017 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS2017), pp. 69-73, 2017

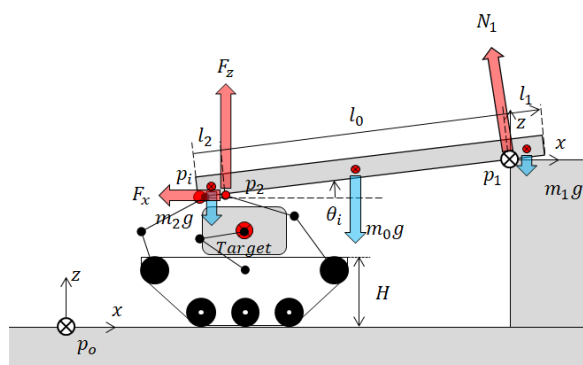


図9. 板下対象物回収動作モデル

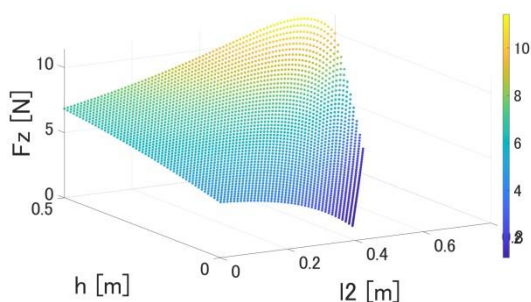


図10 板下対象物回収動作の静力学解析結果