

陸上移動ロボットの段差踏破の条件と シミュレーションソフトの開発

二井見 博文*

Study on the Height of Steps for Traversable Mobile Robot and Simulation

Hirofumi NIIMI*

Synopsis: We studied conditions for land mobile robot to climb a step. Climbing a step depends on whether the centre of gravity of the robot can pass through the step boundary surface. The height of the step that can be climbed is determined by the relationship between the shape of the robot and the position of the centre of gravity. Based on these relationships, we have developed simulation software that determines the height of the steps that can be climbed.

(Received Sep. 21,2021)

Key words: crawler robot, Robot climbing steps, simulation

1. はじめに

災害対応ロボットなど不整地移動が必要な場合、一般的にクローラ移動機構が使用される。車輪と比較し、接地面積が広いため、地面に対し駆動力を伝えやすく、また、溝にはまる危険性も少ない。段差・階段では、クローラの凹凸を階段・段差のエッジ部に掛け、踏破する。ただし、段差・階段ではロボットが転倒する危険性がある。そこで、クローラ型移動ロボットの重心位置と踏破可能な段差の高さの関係を調べ、そこからクローラ型移動ロボットの設計指針を示す¹⁾⁶⁾。また、任意の形状のロボットの踏破可能な段差の高さを示す方法を導き、シミュレーションソフトを開発する⁷⁾。

2. ロボットが段差を移動する手順

ロボットが段差を移動する場合の各部の名称を Fig.1 に示す。段差を、①段差下面、②段差壁面、③段差エッジ部、④段差上面に分け、段差エッジ部の鉛直方向に、⑤段差境界面を考える。ロボットは、支持多角形により支えられており、支持多角形の最

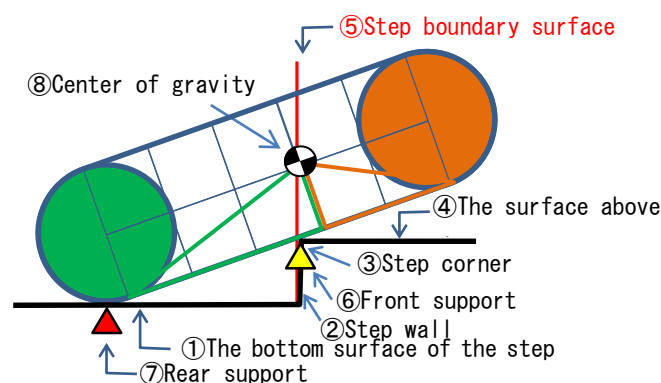


Fig.1 Name of each part of robot and step.

前部を⑥前部支持部、最後部を⑦後部支持部と呼び、ロボットの⑧重心を記号で示す。ロボットが段差を通過する手順を Fig.2 に示す。段差踏破の手順は、以下の通りである。

(a)段差下面に、後部支持部、重心、前部支持部がある。

(b)ロボットを前進させ、クローラの前面を段差壁面に当て、前部支持部を、段差壁面、段差エッジ部、段差上面へと移動させる。前部支持部が、段差壁面、段差エッジ部にある場合、接触角度によって

* 産業技術短期大学 教授 博士(工学) 機械工学科

は後部支持部が滑り、前部支持部が滑り落ちる危険性がある。クローラに凹凸やフィンをつけることで、前部支持部が段差上面に来るようにする工夫が必要である。

(c)重心を段差境界面に近づけると後部支持部の荷重が減少し、前部支持部に荷重が集中する。

(d)前部支持部は段差エッジ部付近にあり、重心が段差境界面を超えると重心が前部支持部を超え、ロボットが段差エッジ部を中心に回転する。後部支持部が段差下面から離れ、その瞬間、後部支持部が段差エッジ部に移動する。その時、後部支持部、前部支持部ともに段差エッジ部付近の狭い領域にある。ロボットは段差エッジ部を中心に回転を続け、ロボットの前部が段差上面に接し、回転が止まる。その時、前部支持部は段差エッジ部付近からロボットの前輪下の段差上面に移動する。

(e)段差境界面から重心が離れるように、ロボットを前進させる。

(f)ロボットを前進させることで、重心を段差境界面から離し、後部支持部を段差上面の安定した位置に移動させることで段差乗り越えは完了する。

段差移動のポイントは、Fig.2(d)のように、重心が段差境界面を超えることである。重心が段差境界面を超えることで、ロボットが回転し、後部支持部が段差下面から離れる。後部支持部が段差下面から離れることが出来るかは、重心が段差境界面を超えることが出来るかによる。ただし、その前段階として、前部支持部を段差エッジ部または段差上面に移動させる必要がある。踏破可能な高さは、重心位置とロボットの形状により決まる。重心を段差境界面にある Fig2(d)の状態を調べることで段差踏破に必要な条件を求める。

3. 踏破可能な高さを求める簡易的な方法

ロボットの移動は体積の移動と重心の移動である。ロボットの段差踏破は、ロボットの重心が段差境界面を通過できるかにより決まる。ロボットの重心が段差境界面を通過後、段差エッジ部付近に後部支持部が来れば段差を踏破できる。逆に、重心が段差境界面を通過することができなければ段差を上ることができない。クローラロボットが通過可能な高さを見積もる方法を Fig.3 に示す。重心の位置を示す x_G と y_G の長さから

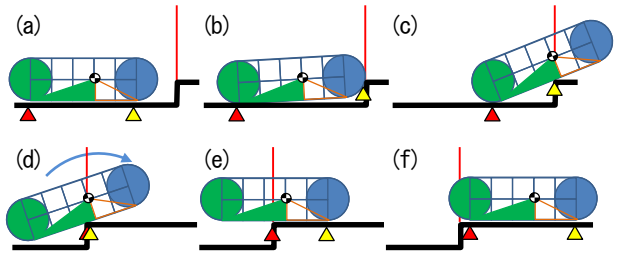


Fig.2 Process to climb the step.

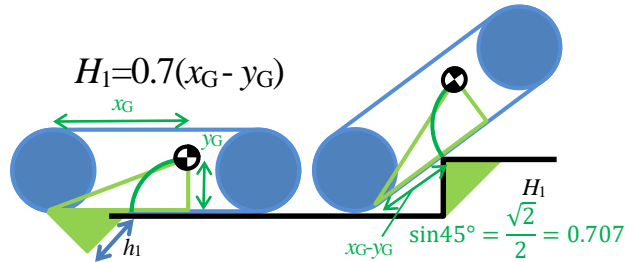


Fig.3 Easy way to calculate the height of the steps that can be climbed from the centre of gravity triangle.

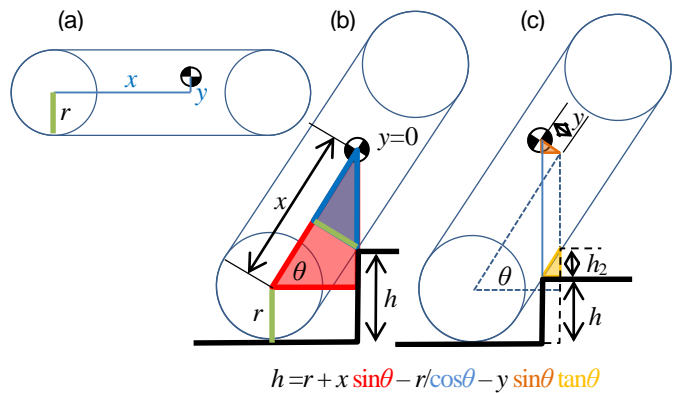


Fig.4 Model of a robot climbing a step.

$$H_1 = 0.7(x_G - y_G) \tag{1}$$

により、見積もることができる。0.7 は $\sin 45^\circ = \sqrt{2}/2 = 0.707$ から得た。重心の高さは低いほど高い段差に対応できる。

4. ロボットの重心位置と踏破可能な高さの関係

クローラロボットの重心位置と踏破可能な高さの関係を調べる。Fig.4(a)のように、車輪の半径を r 、後輪の中心を原点に、重心の水平方向の位置を x 、高さを y とする。Fig.4(b)のように、重心が段差境界面にある状態を考える。段の高さを h_1 、ロボットの傾きを θ とすると、

$$h_1(\theta) = r + x \sin \theta - r / \cos \theta \tag{2}$$

になる。Fig.4(c)のように、 y を考慮し、

$$h(\theta) = r + x \sin \theta - r / \cos \theta - y \sin \theta \tan \theta \tag{3}$$

となり、段の高さ h を求めることができる。

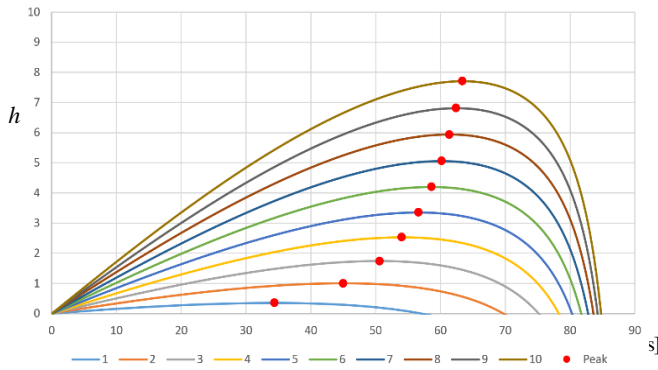


Fig.5 Relationship between tilt of robot and height of step.

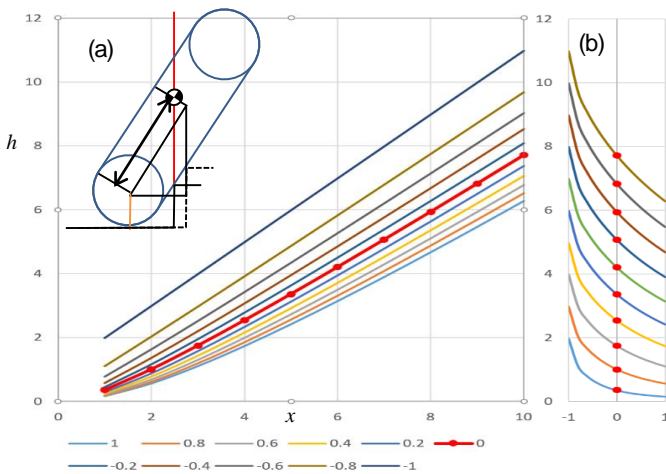


Fig.6 Relationship between position of the center of gravity and height of step.

Fig.5に、 $r=1, y=0$ の時の、 $x=1$ から10について、横軸をロボットの傾き θ 、縦軸を段の高さ h として、計算した結果を示す。グラフのピークを赤丸で示す。 $x=2$ の時、ピークは $\theta=45^\circ$ で $h=1$ になる。 $x=10$ の時、ピークは、 $\theta=63^\circ$ で $h=7.7$ になる。 x が大きくなるに従い、ピークを示すロボットの傾き θ は増加する。

Fig.6(a)に、重心の水平方向の位置 x に対する踏破可能高さ h との関係を示す。重心の高さ y を -1 から 1 の間で変化させた。 $y=0$ のグラフは、Fig.5のピークを示す赤丸に対応する。重心の高さ $y=-1$ は単体のクローラロボットではあり得ないが、クローラロボットを連結した場合、ロボット全体の重心を $y=-1$ に持ってくることは可能である。

Fig.6(b)に、重心の鉛直方向の位置 y に対する踏破可能高さ h との関係を示す。重心位置が低いほど高い段差を上ることができ、その影響は低くなるほど踏破可能高さへの影響は大きい。

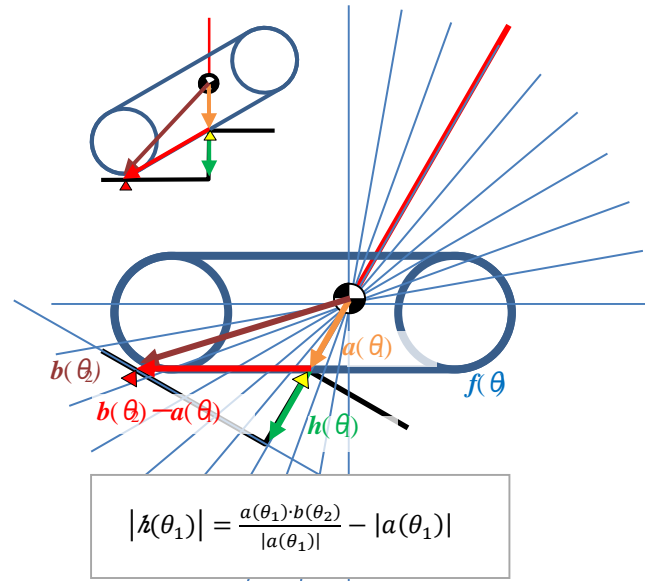


Fig.7 Relationship between shape vector with origin at center of gravity and traversable height.

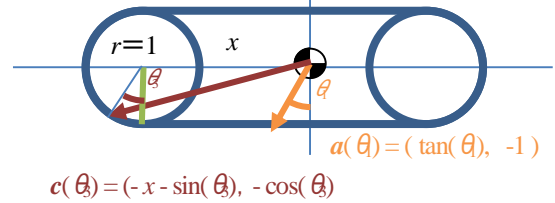


Fig.8 Shape vector with the centre of gravity as the origin.

クローラ型移動ロボットを設計する場合、重心が前側の低い位置に来るように部品の配置を考慮すると、高い段差に対応することができるようになる。

5. 形状ベクトルと踏破可能な高さの関係

Fig.7のように、重心を原点とする形状ベクトル $f(\theta)$ を考える。ロボットの傾きを θ_1 とする。 $\theta_1=30^\circ$ の例で考える。 $a(\theta_1)$ は、段差エッジ部と接している場所を示す位置ベクトルである。 $b(\theta_2)$ は、後部支持部の位置ベクトルである。 $a(\theta_1)=f(\theta_1)$ 、 $b(\theta_2)=f(\theta_2)$ である。踏破可能高さ $h(\theta_1)$ は、

$$|h(\theta_1)| = \frac{a(\theta_1) \cdot b(\theta_2)}{|a(\theta_1)|} = \frac{a(\theta_1) \cdot b(\theta_2)}{|a(\theta_1)|} - |a(\theta_1)| \quad (4)$$

になる。

Fig.8のように、 $r=1, y=0$ の時の、 $x=1$ から10について、踏破可能高さ $h(\theta_1)$ を計算する。

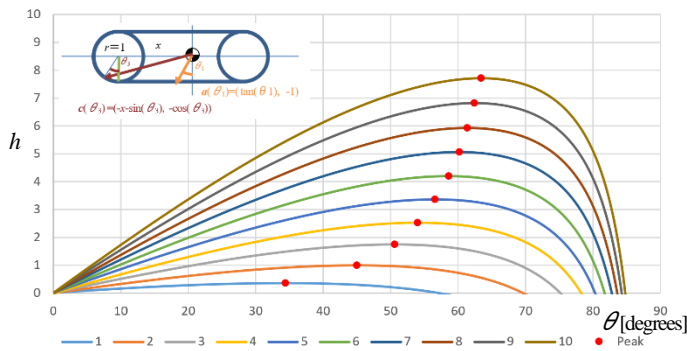


Fig.9 Relationship between tilt of robot and height of step.

$$a(\theta_1) = (\tan(\theta_1), -1), \quad 0^\circ \leq \theta_1 \leq 90^\circ \quad (5)$$

$$c(\theta_3) = (-x - \sin(\theta_3), -\cos(\theta_3)), \quad 0^\circ \leq \theta_3 \leq 90^\circ \quad (6)$$

ロボットの傾き $\theta = \theta_1$ の時、 θ_3 を 0° から 90° 変化させ、 h が最大になるとき、 $b(\theta_2) = c(\theta_3)$ になる。この計算方法を使い、横軸をロボットの傾き θ_1 、縦軸を段の高さ h として計算した結果を Fig.9 に示す。Fig. 5 と同じ結果を得ることができた。

Fig.10 のように、任意の形状ベクトル $f(\theta)$ と重心の位置ベクトル g を持つロボットを考える。 $f(\theta) - g$ より、重心を原点とする形状ベクトルを求める。ロボットの傾き θ_1 の時、 θ_b を変化させたとき、 h が最大になるときの θ_b が後部支持点を示す角度 θ_2 になる。重心を原点とする形状ベクトルから、踏破可能な最大高さを求めることができる。

6. 踏破可能な高さのシミュレーション

クローラ式移動ロボットの踏破可能な段差の高さは重心の位置で決まる。ロボットの形状と重心位置を入力し、形状ベクトルと踏破可能な高さの関係で示した式を用い、踏破可能な高さを求めるシミュレーションソフトを開発した(Fig.11)。ロボットの写真を使い、マウスの左クリックで形状を入力し、右クリックで重心位置を入力すると踏破可能な高さを求めることができる。重心位置は、動的に変更することができる。

7. まとめ

ロボットが段差を移動する手順、踏破可能な高さ

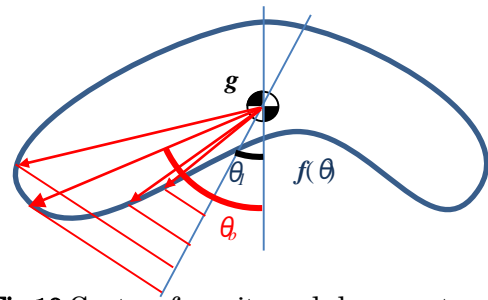


Fig.10 Center of gravity and shape vector.

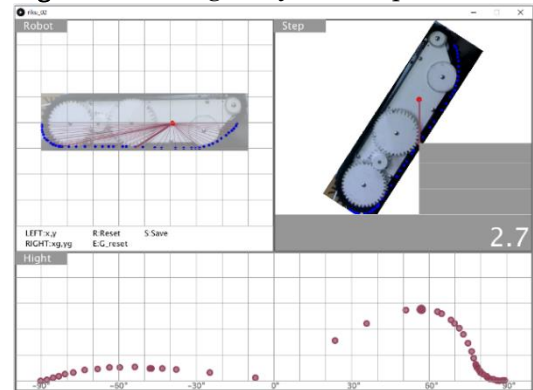


Fig.11 Calculates the height of steps that can be climbed.

を求める簡易的な方法、ロボットの重心位置と踏破可能な高さの関係について説明した。形状ベクトルと踏破可能な高さの関係から、踏破可能な高さのシミュレーションソフトを開発した。

参考文献

- 1) 二井見博文：ロボティクス・メカトロニクス講演 2018 in Kitakyushu 1P2-F05.
- 2) 坂田佳景, 梶原周平, 志摩真那早, 二井見博文：SI 2018 3C4-10.
- 3) 梶原周平, 二井見博文：ロボティクス・メカトロニクス講演 2019 in Hiroshima 2P2-A12.
- 4) 二井見 博文：ロボティクス・メカトロニクス講演 2019 in Hiroshima 2P2-A07.
- 5) 梶原周平, 二井見博文：SI 2019 1D2-08.
- 6) 尾崎 仁紀, 二井見 博文：SI 2019 1D4-03.
- 7) 梶原周平, 二井見博文:日本機械学会関西学生会 2019 年度学生員卒業研究発表講演会 16P24.