

# クローラ型移動ロボットの非固定球型障害物乗り越え動作戦略の検討

○高宮秀徳 谷島諒丞 濱崎峻資 永谷圭司 山下淳 浅間一 (東京大学)

**概要** 日本は災害大国であり、迅速な復旧を実現するために、復旧技術の発展が必須である。現在、ムーンショット型研究開発プロジェクトの課題3「インフラ構築を革新する協働 AI ロボット」では、複数のロボットによる自然災害対応を目指している。対象とする被災環境には、岩石や倒木など、ロボットとの相互作用により動きうる非固定障害物が存在し、走行が困難になるという問題がある。そこで、本研究では、動力学シミュレータを用いて、クローラ型移動ロボットが非固定障害物を乗り越えるための動作戦略について検討を行う。

**キーワード:** クローラ型移動ロボット, 非固定障害物, 障害物乗り越え, 災害対応

## 1 序論

日本は災害大国として知られており、毎年、地震や台風など、多くの災害が起きている。このような災害による被害から国民を守るために、被災状況をいち早く把握し、復旧作業に迅速に取り掛かることが重要である。現在、ムーンショット型研究開発プロジェクトの目標3「多様な環境に適応しインフラ構築を革新する協働 AI ロボット」では、複数のロボットが協働することによる自然災害対応を目指している。対象とする被災環境には、岩石や倒木など、ロボットとの相互作用により動きうる障害物が存在し、走行が困難になるという問題がある。例えば、ロボットが障害物に乗りかかったときに、転倒したり、滑落したりすることが考えられる。ロボットの走行時に問題が発生し、想定通りに動かなければ、作業効率が低下するだけでなく、最悪の場合、タスクを遂行する場所へたどり着くことが難しくなる。したがって、迅速かつ効率的な復旧作業を実現するためには、障害物が存在する環境におけるロボットの走破性を向上させることが必要である。

ロボットの障害物乗り越え性能を向上させる研究は数多く行われており、クローラ型移動ロボットの機構的な工夫に着目した研究<sup>1)2)3)4)</sup>や、サブクローラを適応的に制御する研究<sup>5)6)</sup>などがある。また、段差などの障害物に対して、乗り越え可能な高さを予測する研究もある<sup>7)</sup>。これらの研究により、障害物が存在する不整地環境でも、十分な走破性があることが確認されているが、障害物の対象が、階段や凸凹な形状の環境など、ロボットの動作に関わらず動かない障害物であった。このように、ロボットの動きに関わらず、地面に固定されていて動かない障害物を、本研究では固定障害物と呼ぶ。一方、本研究で対象とする被災環境には、岩石や倒木など、ロボットとの相互作用により動きうる障害物が存在する。本研究では、このような障害物を非固定障害物と呼ぶ。非固定障害物乗り越え時、固定障害物とは違い、障害物そのものが動く可能性があるため、起きる挙動も異なると考えられる。そこで、クローラ型移動ロボットの非固定障害物乗り越え時に起きる挙動について研究が行われた<sup>8)9)</sup>。これらの研究では、非固定障害物の乗り越え、滑落、転倒という3つの挙動が起きる条件について解析した。固定障害物の場合と比較すると、非固定障害物の場合は、ロボットと障害物の接触点が移動してしまうため、障害物を乗り越えることが難しくなることが報告されている。しかし、この研究では、2次元の単純なモデルで

の乗り越え時の挙動についての解析に留まり、具体的な乗り越え動作については明らかになっていない。そこで、本研究の目的を、クローラ型移動ロボットの非固定障害物乗り越え動作戦略の検討とする。

## 2 問題設定

ロボットの乗り越え動作を実現する上で、ロボットや周囲の環境情報が必要であるが、本研究では、環境認識は対象としない。よって、環境に関する情報は既知とし、その後の乗り越え動作を実現するための動作戦略を考えることとする。

災害現場は一般的に複雑な環境であるため、本研究では、モデルの簡略化のために、平坦な地面に存在する1つの障害物に対してロボットの乗り越え動作戦略を考えることとする。また、従来研究<sup>8)9)</sup>では、円筒形の障害物を扱い、2次元的な解析を行っていたが、本研究では3次元環境を扱えるようにするため、障害物の形状を球とする。

本研究では、ロボットの非固定障害物乗り越え時の具体的な課題として、Fig. 1に示すような、障害物との相互作用によってロボットの滑落が起き、乗り越えられないという課題を対象とする。Fig. 1では、

1. ロボットが障害物に乗りかかる
2. ロボットが障害物の上を乗りながら進む
3. 障害物がロボットとの相互作用により回転を始め、地面がロボットを支える力も最大摩擦力を超えてしまい、ロボット自体が滑る
4. ロボットが滑落する

という現象が起きている。本研究では、この課題に対し、滑落を回避し、乗り越える動作戦略について検討する。

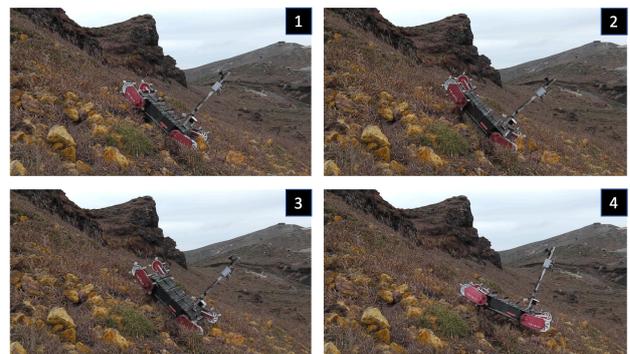


Fig. 1: Target problem.

### 3 提案手法

#### 3.1 ロボットと障害物の相互作用における固定と非固定の違い

ロボットと障害物の相互作用は、固定障害物と非固定障害物で異なる。固定障害物を乗り越える時、障害物がロボットの滑落及び転倒が起きない範囲の大きさであれば、ロボットの両クローラを前進させることで乗り越えることができる。これは、障害物が地面と一体化化していて、凹凸のある地面と同様の状態と考えることができる。そのため、ロボットと地面との間に十分な摩擦があれば、前進に必要な駆動力を得られ、乗り越えられると考えられる。一方、非固定障害物の場合、ロボットのクローラを前進させると、その下に潜り込んでいる障害物がクローラから力を受けることにより動く。これによって、例えばロボットの滑落が起こるような位置に障害物が移動してしまったり乗り越えることが難しくなったり、反対に乗り越え可能な位置に移動することでロボットが滑落せずに乗り越えられるという現象が起こる。

#### 3.2 動作戦略の概要

本研究では、クローラを制御することにより、障害物を乗り越え可能な位置に意図的に移動させるという、非固定障害物特有のアプローチを軸にした動作戦略を検討する。

検討に際し、事前にシミュレータ上で実験を行い、ロボットを手動で操作した。手動操作では、ゲーム用コントローラを用い、ジョイスティックでロボットの左右のクローラを動かすことによってロボットを操作した。その結果、障害物をロボットに対して端の方へ移動させることで、滑落せずに乗り越えられることがわかった。端の方へ移動させることにより、ロボットが傾いて、片方のクローラ側面が接地するため、非固定障害物の動きに関わらず地面からの駆動力を十分に得られ、乗り越えられると考えられる。Fig. 2 が実際に手動操作を行った様子である。

1. ロボットが障害物に乗りかかる
2. クローラを制御し、障害物をロボットに対して端の位置に移動させる
3. クローラを制御し、ロボットを傾かせ、片方のクローラ側面を接地させる
4. クローラ側面が接地したら、ロボットを前進させ、障害物を乗り越える

したがって、本研究で提案する動作戦略では、障害物を乗り越え可能な位置へ移動させることでロボット

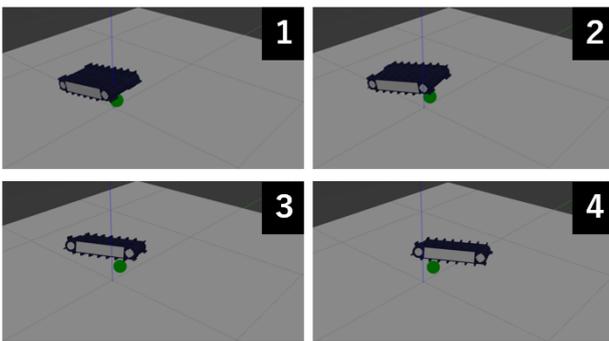


Fig. 2: Overview of the operation strategy.

を傾かせ、片方のクローラ側面を接地させることが重要となる。

#### 3.3 クローラ型移動ロボットの安定性評価指標

事前の実験により、ロボットを傾かせ、片方のクローラ側面を接地させることが乗り越えに重要であることがわかった。そこで、ロボットが傾き始める状態を判定するために、ロボットの安定性評価指標を導入する。本研究では、Force-Angle Stability Measure (FA Stability)<sup>10)</sup>を用いる。以下でその概略について述べる。Fig. 3 において、ロボットの底面を水色の四角形で表し、ロボットの接触点を、 $P_1, P_2, P_3$  とする。 $P_1, P_3$  は地面との接触点を、 $P_2$  は障害物との接触点を表す。また、各点  $P$  を、 $P_1$  から右回りに結んだベクトルを、 $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3$  とする。ここで、ロボットが傾くとき、ロボットの重心は  $\mathbf{a}_i$  のいずれかを軸として回転すると考えられる。ただし、本研究においては、軸  $\mathbf{a}_3$  に対してロボットが傾く、すなわち、ロボットの上下が反転するような現象は考えないこととする。軸  $\mathbf{a}_i$  に垂直な平面に対してロボットの重力を射影した力  $\mathbf{f}_i$  と、重心から軸  $\mathbf{a}_i$  に向かって引いた垂線ベクトル  $\mathbf{l}_i$  が成す角  $\theta_i$  の最小値を FA Stability( $S$ ) として採用する。すなわち、

$$S = \min(\theta_i). \quad (1)$$

である。

この指標の意味について、 $S = \theta_1$  の場合を例にとると、まず、 $\theta_1 > 0$  のときは、真上から見たときにロボットの重心が三角形  $P_1P_2P_3$  の中に入っており、ロボットが地面と障害物によって支えられている安定な状態である。

次に、 $\theta_1 = 0$  となるのは、Fig. 4 のように、ロボットの重力ベクトル方向の直線とロボットの底面が交わった点  $P$  を、線分  $P_1P_2$  が通る時である。よって、このとき、地面に対して真上から見たロボットの重心が、地面との接触点と障害物との接触点を結ぶ線分  $P_1P_2$  上にあり、ロボットは安定限界と考えることができる。

そして、 $\theta_1 < 0$  となり、 $S$  が負になると、ロボットの重心が軸を超えて外側に行き、ロボットはすでに傾き始めていると考えることができる。

本研究では、片方のクローラの側面を接地させる必要があるため、軸周りにロボットを傾かせることを目指す。よって、この FA Stability が負になるような状態にロボットを持っていくことが重要となる。

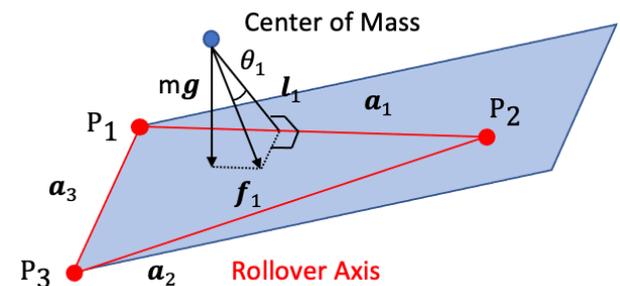


Fig. 3: FA stability model. The light blue plane is the bottom surface of the robot.

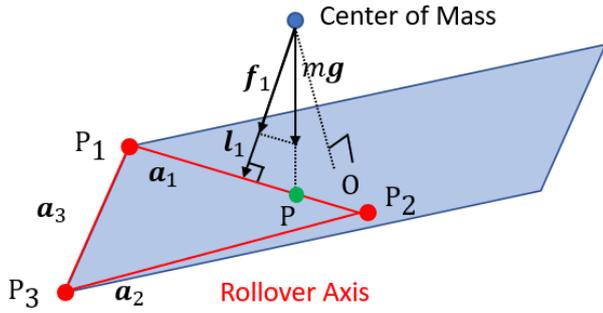


Fig. 4: The condition when  $\theta_1 = 0$ .

### 3.4 障害物を乗り越え可能な領域

FA Stability が負になるような位置に障害物との接触点  $P_2$  を移動させる必要があるため、それを満たす  $P_2$  のロボット底面上の領域について考える。

まず、ロボット座標系を定義する。ロボットの重心からロボット底面におろした垂線の足を点  $O$  とし、ロボット座標系の原点とする。  $x, y$  軸は Fig. 5 のように設定する。また、ロボット座標系から見た各点  $P$  の座標を、  $(x_P^R, y_P^R)$  と表す。

ロボットを傾かせるためには、  $S = 0$  すなわち  $\theta_1 = 0$  となればよいので、ロボット底面を真上から見たときに、線分  $P_1P_2$  が点  $P$  を通るように、点  $P_2$  を移動させればよい。その条件を満たす領域は、Fig. 5 におけるロボット底面の右側の辺と直線  $P_1P$  の交点を  $P_4$  としたとき、緑色の線で囲われた三角形  $P_1P_4P_3$  である。その領域に点  $P_2$  を移動させることができれば、線分  $P_1P_2$  が点  $P$  を通り、ロボットは傾き始めると考えられる。ここで、この三角形  $P_1P_4P_3$  の領域を  $D_1$  とする。一方、  $D_1$  の中でも、点  $P_2$  がロボットの中央軸に近い場合、ロボットが傾いて接地するまでの角度が大きい。反対に、点  $P_2$  が Fig. 5 の線分  $P_3P_4$  に近い場合、ロボットが接地するまでの角度をより小さくすることができる。接地までの角度が小さい方が、ロボットを傾かせた後に接地させやすいので、点  $P_2$  をロボットに対

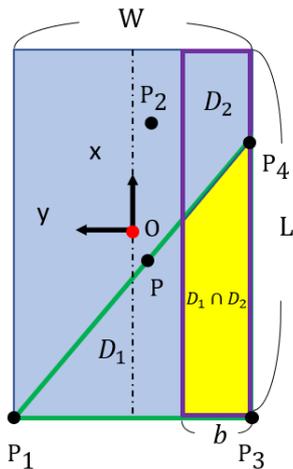


Fig. 5: Definition of the robot coordinate system and the area of  $P_2$  where the robot can climb over the sphere obstacle. The area to the left of the dashed line in the center is the left crawler, and the area to the right is the right crawler.

して端の位置、すなわち  $y_{P_2}^R$  をできるだけ小さい位置に移動させる。このような領域を  $D_2$  とする。本研究における  $D_2$  は、ロボットの底面の長さを  $L$ 、横幅を  $W$  としたときに、Fig. 5 における紫色で囲われた長さ  $L$ 、幅  $b$  の長方形領域とする。したがって、領域  $D_2$  は以下の式で表される。

$$D_2 = \left\{ (x, y) \mid -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \cap -\frac{W}{2} + b \leq y \leq -\frac{W}{2} \right\}. \quad (2)$$

以上より、本研究の提案手法において乗り越え可能な障害物の領域は、Fig. 5 における黄色の領域の  $D_1 \cap D_2$  である。

### 3.5 乗り越え動作戦略

乗り越え可能な領域に接触点を移動させ、滑落を回避した乗り越えを実現するための動作戦略として、以下の3つの Motion を定義する。

- **Motion 1** 障害物との接触点 (点  $P_2$ ) を、  $y_{P_2}^R$  の小さい領域 ( $D_2$ ) へ移動させる
- **Motion 2** すでに  $D_2$  の領域にある点  $P_2$  を、  $x$  軸の小さい方向へ移動させ、  $D_1 \cap D_2$  の領域へ移動させる
- **Motion 3** すでに  $D_1 \cap D_2$  の領域にあるとき、両クローラを前進させる

Motion 1 は、Fig. 6 の中央付近にある点  $P_2$  を  $D_2$  へ移動させることで、ロボットが傾いてから接地しやすくなるようにするための動作である。Motion 1 を達成するためには、障害物に近い方のクローラ (Fig. 6 では前進方向向かって右のクローラ、以降、単に右クローラと呼ぶ) は動かさず、障害物と反対側のクローラ (Fig. 6 では前進方向向かって左のクローラ、以降、単に左クローラと呼ぶ) を後退方向に動かす。これにより、ロボットは点  $P_3$  を支点に左へ旋回し、障害物のロボットに対する相対位置が  $D_2$  へ近づく。制御としては、各クローラのスプロケットの角速度を以下のように設定する。

$$c_r = 0, c_l = -v. \quad (3)$$

ここで、  $c_r, c_l$  はそれぞれ右・左のクローラのスプロケットに送る角速度指令値である。また、  $v$  は角速度入力値であり、正の向きが前進方向に対応する。Motion 1 において、左クローラを動かすとロボットが旋回するため、障害物の位置によっては、障害物がロボット前方に外れてしまう場合がある。これを回避するために、障害物との接触点の位置がロボット底面前方の座標  $\frac{L}{2}$

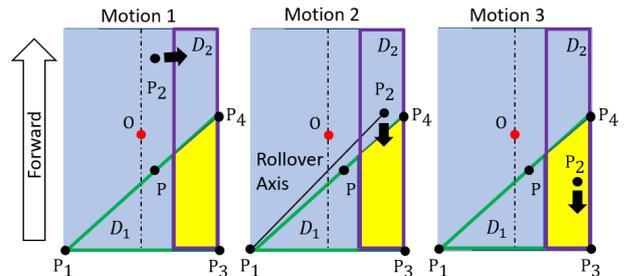


Fig. 6: Graphical description of the 3 motions. The black arrows are the direction of the movement of  $P_2$ .

より大きい場合、すなわち前方に外れそうな場合には、両クローラを前進するという動作に切り替えるようにした。すなわち、

$$c_r = v, c_l = v, \quad (4)$$

となる。

続いて、Motion 2は、Fig. 6のように、ロボットに対して障害物を後ろ方向に移動させ、傾き時の軸を示す線分  $P_1P_2$  が、 $S = 0$  となる線分  $P_1P$  を通過するための動作である。これにより、 $S$  が負になり、ロボットは傾き始め、片方のクローラを接地させることができる。Motion 2を達成するためには、左クローラを動かさず、右クローラを前進方向に動かす。すなわち、各クローラのスプロケットの角速度を以下のように設定する。

$$c_r = v, c_l = 0. \quad (5)$$

最後に、Motion 3は、乗り越え可能な領域に入っている点  $P_2$  に対して、障害物を乗り越えるための動作である。Motion 3を達成するためには、両クローラを前進方向に動かすので、各クローラのスプロケットの角速度を以下のように設定する。

$$c_r = v, c_l = v. \quad (6)$$

### 3.6 動作戦略アルゴリズム

前節までに述べた安定性評価指標、及び動作戦略を実装するための動作戦略アルゴリズムを Fig. 7に示す。まず、安定性評価指標  $S$  を算出する。負であればクローラはすでに傾き始めていて、片方のクローラが接地するので、Motion 3を選択する。 $S \geq 0$  の場合、まだロボットは傾いていない状態であり、障害物との接触点  $P_2$  を乗り越え可能な領域  $D_1 \cap D_2$  へ移動させる必要がある。ロボット座標系から見た点  $P_2$  の座標  $(x_{P_2}^R, y_{P_2}^R)$  を算出し、 $(x_{P_2}^R, y_{P_2}^R) \notin D_2$  のとき、Motion 1を選択し、領域  $D_2$  へ点  $P_2$  を移動させる。一方、 $(x_{P_2}^R, y_{P_2}^R) \in D_2$  の場合、Motion 2を選択し、点  $P_2$  を領域  $D_1 \cap D_2$  へ移動させる。その後、 $S$  が負になるまで繰り返す。

## 4 実験

### 4.1 実験概要

提案した動作戦略アルゴリズムの有効性を検証するため、シミュレーション実験を行った。物理シミュレータとして gazebo を用い、ロボットの制御には ROS を用いた。平地に非固定球形障害物を置き、ロボットは

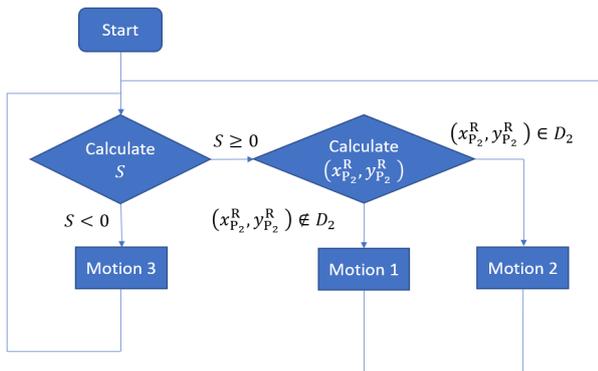


Fig. 7: Operation strategy algorithm.

Table 1: Specification.

L	0.47 m
W	0.33 m
Height	0.095 m
Weight	19.53 kg
Friction coefficient	0.85

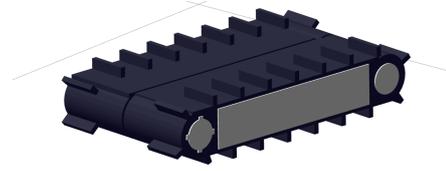


Fig. 8: Model of the robot used in the simulation experiment.

球に乗りかかった状態から動作を開始させた。そして、最終的に乗り越えたか、もしくは何らかの原因（滑落等）で乗り越えられなかったかを記録した。そして、動作戦略アルゴリズムを適用しない、提案手法無しの方法と比較した。

### 4.2 実験条件

この実験に使用したロボットのモデルを Fig. 8に示す。このロボットのモデルには、クローラの端の領域にグローサと呼ばれる突起状の板のような部分が取り付けられており、その高さは 0.02 m である。また、使用したロボットのモデルの仕様を Table 1に示す。ロボットの各クローラのスプロケットの角速度入力値  $v$  は 3 rad/s とした。提案手法無しの方法の場合、ロボットの各クローラのスプロケットを常に 3 rad/s で制御し、単純に前進させた。

領域  $D_2$  は以下のように設定した。

$$D_2 = \{(x, y) | -\frac{L}{2} \leq x \leq \frac{L}{2} \cap -\frac{W}{2} + 0.0825 \leq y \leq -\frac{W}{2}\}. \quad (7)$$

これは、Fig. 8のクローラのグローサ領域がロボットの端に位置していることから、グローサ領域と一致する領域を  $D_2$  とした。

球の半径は 0.05 m、密度は 3 g/cm<sup>3</sup> (約 1.57kg) とし、球の初期位置は、 $y = -0.1425, -0.1225, -0.1025, -0.0825, -0.0625, -0.0425, -0.0225, -0.0025, 0$  m の 9 パターンで変化させ、各パターンで 3 回ずつ実験を行った。

## 5 実験結果

まず、乗り越えたか否かの回数の全体結果を Fig. 9に示す。提案手法を適用しない場合、球が乗り越え可能な領域に入らなかったため、6パターンで滑落が起き、乗り越えることができなかった。一方、提案手法の場合、全てのパターンで乗り越えることに成功した。

提案手法による乗り越え動作例として、 $y = -0.1425$  の場合を、Fig. 10に示す。1はロボットが球に乗りかかった状態であり、そこからロボットが動き出すと2のように旋回して、球の位置がロボットに対して中央に来てしまった。そこで、3で Motion 1が機能し左クローラを動かして球の位置をロボットに対して端の位置に移動させた。その後、4で Motion 2に入り、右クローラを動かすことでロボットを傾かせ、5で左クローラが接地した。最後に、6で Motion 3が機能し、球を

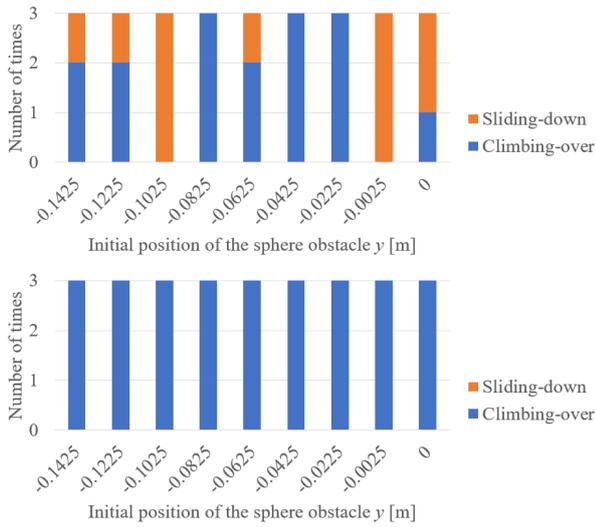


Fig. 9: Result of the number of times the robot climbed over the obstacle and did not mainly because of sliding down. The upper graph shows the result without the proposed method, and the lower one shows the result with the proposed method.

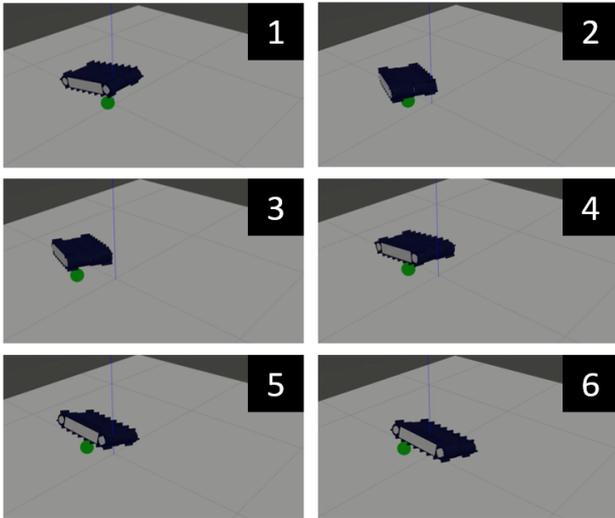


Fig. 10: Example of climbing-over the sphere obstacle ( $y = -0.1425$ ).

乗り越えた。このように、提案手法の動作戦略アルゴリズムを適用することで、非固定球型障害物を乗り越えることができた。

続いて、 $y = -0.1425$  の場合の、 $(x_{P_2}^R, y_{P_2}^R)$  の変化と、安定性評価指標  $S$  の遷移を Fig. 11 に示す。まず乗り越えを開始してから Motion 1 が行われている間、Motion 1 の動作の切り替えもあり、 $x$  および  $y$  は波打つようなグラフとなっている。  $S$  も正の値であり、ロボットはまだ傾いていないことがわかる。  $t = 4.5$  付近から  $y_{P_2}^R$  の値が  $-0.0825$  を下回り、領域  $D_2$  に入ったため、Motion 2 に移行した。その後、 $x_{P_2}^R$  と  $y_{P_2}^R$  の値が線形に下がっていき、乗り越え可能な領域  $D_1 \cap D_2$  に入るように点  $P_2$  が移動して、 $S$  の値も 0 に近づいていることがわかる。そして、ロボットが実際に傾き始めた  $t = 5.2$  付近で  $S < 0$  となり、ロボットは Motion 3 に移行した。その後、 $x_{P_2}^R$  の値がさらに下がっていることから、ロボットに対して球が後ろの方向へ移動し、

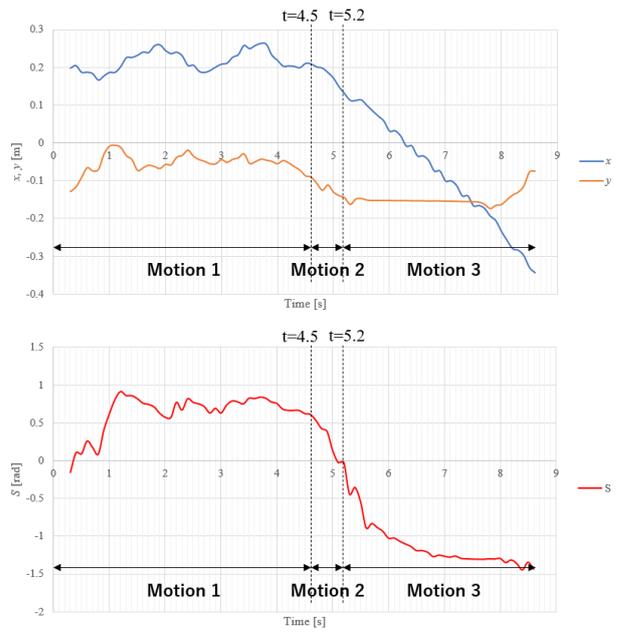


Fig. 11: The upper graph shows the position of the contact point between the robot and the sphere obstacle in the robot coordinate system. The lower graph shows the value of FA stability.

障害物を乗り越えたことが確認できる。

## 6 結論

本研究では、クローラ型移動ロボットの非固定球型障害物乗り越え動作戦略について検討した。固定障害物と非固定障害物を乗り越える際に起こる現象の違いについて考察し、非固定障害物に対して滑落を回避し乗り越える動作戦略について提案した。そして、シミュレーション実験により、提案手法無しでは滑落が起きた場合があったのに対し、提案手法を適用した場合は、全ての球の初期位置において乗り越えができ、提案手法の有効性が確かめられた。

今後の展望としては、今回の動作戦略は事前の手動操作による経験的知識に依っている部分もあるため、クローラの動かす方向・速度と球の運動の関係に関する物理的な解析に基づいたクローラの制御を検討していきたいと考えている。また、極めて限定された環境での動作戦略であったため、例えば平地ではなく斜面や凹凸のある不整地環境、障害物が複数存在する環境など、より現実に近い環境でも適用可能な動作戦略を提案していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) 妻木俊道, 本田瑛彦, 加藤裕基, 藤岡紘: 4 クローラ型不整地踏破ロボットの開発—可変構造型の検討と中間試作機による踏破性能の評価—, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 7, 422/431 (2016)
- 2) 妻木俊道, 加藤裕基: マルチクローラロボット—4 クローラ型移動機構の開発と合体連節型移動機構への展開—, 日本ロボット学会誌. Vol. 36, No. 8, 551/558 (2018)
- 3) 広瀬茂男, 青木実仁, 三宅潤: 対地適応型 4 クローラ走行車 HELIOS-II の開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 2, 283/291 (1992)
- 4) 岩本太郎, 山本広志, 本間和男, 藤江正克, 中野善之: 地形変化に応じながら走行する形状可変形クローラ走行車の機構と制御, 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 3, 200/208 (1984)

- 5) Okada Y, Nagatani K, Yoshida K: Semi-autonomous Operation of Tracked Vehicles on Rough Terrain Using Autonomous Control of Active Flippers, Proceedings of the 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2815/2820 (2009)
- 6) Ohno K, Takeuchi E, Chun V, Tadokoro S, Yuzawa T, Yoshida T, Koyanagi E: Rollover Avoidance Using a Stability Margin for a Tracked Vehicle with Subtracks, Proceedings of the 2009 IEEE International Workshop on Safety, Security & Rescue Robotics, 1/6 (2009)
- 7) Rajabi A H, Soltanzadeh A H, Alizadeh A, Eftekhari G: Prediction of Obstacle Climbing Capability for Tracked Vehicles, Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics, 128/133 (2011)
- 8) Yajima R, Nagatani K, Hirata Y: Research on Traversability of Tracked Vehicle on Slope with Unfixed Obstacles: Derivation of Climbing-over, Tipping-over, and Sliding-down Conditions, Advanced Robotics, Vol. 33, No. 20, 1060/1071 (2019)
- 9) 谷島諒丞, 永谷圭司, 平田泰久: 非固定障害物が存在する斜面におけるクローラ型移動ロボットの走行性能に関する研究—グローサが非固定円柱障害物の乗越え性能に与える影響の評価—, 計測自動制御学会論文集, Vol.55, No.11, 700/708, (2019)
- 10) Papadopoulos E G, Rey D A: A new measure of tipover stability margin for mobile manipulators, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4, 3111/3116 (1996)