

# 物理エンジンを用いたクローラ型ロボットの仮想評価用モデルの構成法に関する研究

北海道大学 大学院情報科学院 システム情報科学コース ○園部 一真, 小野里 雅彦, 田中 文基

## 要旨

本研究グループでは、レスキューロボットのうちクローラ型ロボットに焦点を当て、実機の走行機構に即したモデルの表現方法を研究している。異なるモデル化手法で作られたモデルを用いて走行シミュレーションを行い、走行挙動を比較することでモデル化手法の適合性を示す。本報告では、実機に即したクローラ型ロボットモデルに対して、挙動を安定させるための知見を集積する。また、実機の旋回動作をシミュレーション上で再現するための制御方法を検討する。

## 1 結論

地震によって倒壊した家屋の下敷きになった人々を救助するために、レスキューロボットの開発が進められている。レスキューロボットを用いた救助活動を行うにあたっては、その現場であるがれきについての性質を十分に知っておく必要がある。しかし、がれきに対する知見が不足しているため、救助活動の状況に応じたレスキューロボットの走行経路や制御方法の選択ができないといった問題がある。

このような問題に対して、本研究グループではレスキューロボットモデルを仮想空間上に構築したがれきフィールドで走行させて踏破性能評価を行うアプローチを進めている。しかし、レスキューロボットのうちクローラ型ロボットに着目すると、現状ではクローラ部分を車輪列でモデル化しており、実機とは異なった構造となっている。そのため、実環境での挙動とシミュレーション結果が大きく異なることが危惧される。そこで、本報告では、先行研究でモデル化されたクローラ型ロボット Quince[1]を対象に、実機の走行機構に即したクローラのモデル化手法を検討する。また、構築した評価用モデルを用いて走行シミュレーションを行い、走行性能を評価することで提案したモデル化手法の有効性を示す。なお、シミュレーション環境の構築には NVIDIA 社の物理エンジン PhysX 3.4[2]を用いる。

## 2 クローラのモデル化手法

クローラ型ロボットは、クローラが接地面に合わせて変形するという特性から、不整地での走行を可能としている。クローラを物理エンジン上で表現するにあたって、先行研究では車輪列による表現と、車輪および多数のベルト要素(リンク)を連結したクローラベルトによる表現の 2 通り行ってきた。前者は、挙動が比較的安定するが、地面との接地面積が小さくなるため特性を活かせていない。一方で、後者は実機の走行機構に即した構成であるが、物理エンジンの性質上クローラベルトの挙動が不安定となる。そこで、本研究では車輪とクローラベルトによってクローラを表現し、安定な挙動となるような評価用モデルを構築する。

## 3 クローラ型ロボット Quince のモデル化

PhysX を用いてクローラを有するブルドーザーをモデル化し、直進や旋回を安定して行っている先行事例がある[3]。本研究では、このモデルにおけるクローラの構成方法を参考に図 1 に示す Quince モデルを構築する。ブルドーザーモデルでは、クローラベルトの前後のリンクを接続する Revolute Joint と、1 つ飛ばしのリンク対の最大距離を制約する Distance Joint を併用することで安定性を向上させている。さらに、これらのジョイントを同じ位置にそれぞれ 32 回多重に定義することで、リンク間の拘束力をより大きくしている。本研究では、こうした手法を用いることで挙動の安定性を向上させる。本研究におけるリンクの概略図と

リンク間を接続するジョイントの接続の概要をそれぞれ図 2、図 3 に示す。

## 4 Quince モデルの走行性能評価

### 4.1 走行シミュレーションの概要

本研究では、直進動作と旋回動作を評価対象とし、旋回は 3 パターンを考える。i) 超信地旋回：左右のクローラを逆方向に等速駆動してその場で旋回する方法。ii) 信地旋回：片側クローラを制動し、他方を駆動して旋回する方法。iii) 緩旋回：左右のクローラに速度差をつけて同方向に駆動して緩やかに旋回する方法。クローラ型ロボットの旋回方法としては、狭い場所でも方向転換可能な超信地旋回が必要と考える。なお、各動作におけるクローラの駆動は、メインクローラの前輪と後輪を駆動させることで行う。

### 4.2 シミュレーションの精度に関するパラメータの変更

シミュレーションの精度に関するパラメータとして、PhysX 3.4 では物理演算のタイムステップ幅を表すシミュレーション周波数と、剛体間の接触やジョイントによる運動の拘束に対する物理演算の頻度を表す iteration count がある。また、iteration count は位置の精度に関するものと、速度・加速度の精度に関するものの 2 種類用意されている。

シミュレーション周波数が 60[Hz]と 120[Hz]の場合について、iteration count を変化させたときの挙動結果を表 1 に示す。ただし、表中の○、△、×は以下の意味である。

○：動作が可能で、挙動は比較的安定している。

△：動作が可能だが、挙動は不安定である。

×：動作が不可能である(リンクの連結が破断する)。

表の結果より、シミュレーション周波数を大きくすることによって挙動が安定し、直進と緩旋回が可能となった。しかし、旋回時にクローラベルトが波打ち、不安定な挙動となった。動作時に前後の駆動輪で回転速度に差が生じて、リンク間に大きな偏差が生じたことが原因と考えられる。

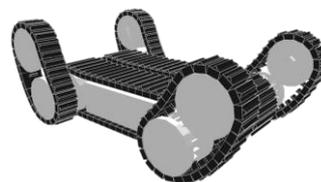


図 1 Quince モデル

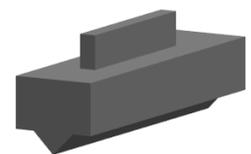


図 2 リンクの概略図

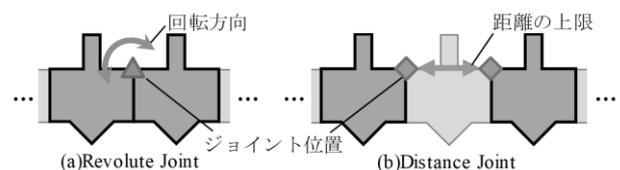


図 3 リンク間を接続するジョイント

### 4.3 クローラの駆動方式の違いによる挙動の検証

クローラベルトの不安定な挙動を改善する方法として、各メインクローラの前後輪どちらか一方を駆動させることにする。これによって、駆動輪が回転して巻き取ったリンクの分だけ、自由輪が回転する。

図4に示すクローラの駆動方式について検証する。ただし、直進は前輪駆動と後輪駆動の場合のみを考える。その結果、直進は前輪駆動より後輪駆動の方がクローラベルトの挙動は安定した。一方で、旋回はいずれの駆動方式においても動作が不可能であったが、超信地と信地旋回は内前輪・外後輪駆動、緩旋回は後輪駆動が最も安定した。以上から、いずれの動作においてもクローラの進行方向に対して後方の車輪を駆動させた場合が比較的クローラベルトの挙動が安定するという知見が得られた。前方の車輪を駆動させた場合、接地しているリンクは地面との摩擦力を受けるため伝達しにくく、駆動力を与えていない後方の車輪によってリンクを巻き取り難いことが考えられる。一方で、後方の車輪を駆動させた場合、接地していないリンクは重力以外の外力を受けないため伝達しやすく、駆動力を与えていない前方の車輪でもリンクを巻き取りやすいことが理由として考えられる。問題点としては、旋回の場合に駆動輪が空回りすることが挙げられる。原因は、クローラベルトとの噛み合わせが弱いことと地面との摩擦力によって旋回が阻害されていることが考えられる。

### 4.4 クローラを構成する要素の形状の変更

旋回時に生じる駆動輪とクローラベルトとの空回りを防ぐために、以下の2つの改善策について効果を検証する。

#### ①車輪に歯形を付加

図5のように、リンクと車輪が噛み合うよう車輪に歯形を付加することを考える。表2に示す結果より、車輪に歯形を付加することによって空回りすることを防ぎ安定した緩旋回が可能となった。しかし、超信地と信地旋回ではクローラベルトが波打ち不安定な挙動となった。

#### ②メインクローラにおけるリンクの形状の変更

図6のように、リンクの地面と接する爪部分を3つに分けて接地面積を減らすことで、地面との摩擦力が軽減されると考えた。さらに、内側の爪の高さを低くして接地部分を本体の中心から遠ざけることで、旋回時のトルクが大きくなると考えた。しかし、表3に示す結果より、全ての動作において変更前と同様の挙動となった。原因は、外側の爪だけでなく内側の爪も接地してしまったことから、地面との摩擦力が十分に軽減できなかつたためであると考えられる。

以上から、車輪に歯形を付加することによって駆動輪の空回りを防げたが、地面とクローラベルトとの間の摩擦力を軽減できず、超信地と信地旋回は不可能であった。

### 4.5 地面との摩擦係数の変更

これまでの検証から、超信地と信地旋回ができない原因は、地面との摩擦力であると考えられる。そこで、摩擦係数をデフォルトである0.70(クローラベルトの素材であるゴムと同程度)よりも小さくして改善されるか検証する。車輪は歯形を付加している形状とし、リンクは図6に示す変更後の形状とする。表4に示す結果より、地面との摩擦係数を小さくすることで超信地と信地旋回が可能となった。しかし、依然としてクローラベルトが波打ち不安定な挙動を抑えることはできなかった。車輪によってリンクを送り出すとき車輪と正しく噛み合わなかった場合に、リンク間で偏差が生じることが理由として考えられる。また、その原因はリンク間の拘束力が十分でないことであると考えられる。

## 5 結論

本研究では、Quinceモデルを構築するにあたってクローラベルトと車輪でクローラ部分を構成するといった、実機の走行機構に即したモデルの表現手法を提案した。また、構築したQuinceモデルを用いて走行シミュレーションを行い、走行性能を評価した結果、クローラベルトの挙動を安定させるための知見が得られた。しかし、クローラベルトの旋回時の挙動が安定性に欠けるため、その改善を今後の課題とする。

### 参考文献

- [1] Eric Rohmer et al.: Integration of a Sub-Crawler's Autonomous Control in Quince Highly Mobile Rescue Robot, SI International 2010, pp.78-83, 2010.
- [2] NVIDIA: PhysX, <https://developer.nvidia.com/physx-sdk>.
- [3] Pierre Terdiman: PEEL, <https://github.com/Pierre-Terdiman/PEEL>, 2015.

表1 シミュレーションの精度に関するパラメータを変更した場合の挙動結果

| シミュレーション<br>周波数[Hz] | iteration count |          | 直進 | 旋回  |    |   |
|---------------------|-----------------|----------|----|-----|----|---|
|                     | position        | velocity |    | 超信地 | 信地 | 緩 |
| 60                  | 4~50            | 1~50     | ×  | ×   | ×  | × |
| 120                 | 4~50            | 1~50     | ○  | ×   | ×  | △ |

表2 車輪に歯形を付加した場合の挙動結果

| 動作 | 結果  |   |
|----|-----|---|
| 直進 | ○   |   |
| 旋回 | 超信地 | × |
|    | 信地  | × |
|    | 緩   | ○ |

表3 リンクの形状変更後の挙動結果

| 動作 | 結果  |   |
|----|-----|---|
| 直進 | ○   |   |
| 旋回 | 超信地 | × |
|    | 信地  | × |
|    | 緩   | × |

表4 地面との摩擦係数を変更した場合の挙動結果

| 摩擦係数      | 超信地 | 信地 |
|-----------|-----|----|
| 0.60~0.20 | ×   | ×  |
| 0.15~0.10 | △   | △  |
| 0.05      | △   | ○  |



図4 検証する駆動方式



図5 歯形を付加した車輪の概略図

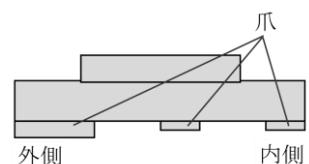


図6 形状変更後のリンクの正面概略図