

# 星形テンセグリティ構造の変形による転がり移動

○伊牟田 遼(立命館大) 平井 慎一(立命館大)

## 1. 緒言

今日、ロボットの移動機構はさまざまな方法で確立されており、不整地での移動を実現できるロボットも多くある。しかし、その大部分は転倒の危険性を含んでおり、損傷具合に関係なく自力で復帰することは難しいとされている。このような状況を避けるため、本研究室では、転倒の可能性を排除した、柔軟素材と形状記憶合金製アクチュエータを用いた移動・跳躍ロボットの研究を行ってきた。この研究では移動手段として外殻変形による重心移動、およびポテンシャルエネルギーの蓄積・解放により転がり移動による不整地の走行を実現させた [1]。しかし、自立化するため、バッテリー等を搭載できるよう機体を大型化した際に、柔軟素材、および形状記憶合金製アクチュエータの各パラメータが自重を支えられないという問題があった。そこで、現在ではテンセグリティ(Tensegrity / Tensional integrity)構造を用いた転がり移動ロボットの研究を行っている。

テンセグリティ構造は、建築の分野において軽量でデザイン性の高い構造物などに用いられている。この構造は硬い圧縮材とゴムなどの張力材で構成されており、各圧縮材が互いに接続されることなく張力材の張力のつり合いによって立体形状を維持することができる。また、圧縮材、および張力材の本数、配置によって複数の構造体のパターンが存在する。

先行研究では20面体型テンセグリティロボットにおいて、張力材の変形を用いた転がり移動を確認することができた [2]。ただし、平面でのみの検証であり、障害物などで地面に凹凸がある場合では張力材部分の空気圧アクチュエータが地面に接触し、転がるということが不可能な場合や意図しない転がり移動となるといった問題が生じた。そこで、新たに空気圧アクチュエータが地面に接触しない星形20面体型テンセグリティの構造を用いた転がり移動ロボットを考案する。

## 2. テンセグリティモデルの比較

本章では20面体型テンセグリティと星形20面体型テンセグリティの比較を行う。20面体型テンセグリティのモデルを図1、星形20面体型テンセグリティのモデルを図2に示す。

20面体型テンセグリティは圧縮材を6本、張力材を24本用いており、張力材が各圧縮材の頂点間に結ばれている。このため、張力材部分が常に地面に接触する構造となっている。それに対して、星形20面体型テンセグリティは圧縮材を6本、張力材を12本用いており、張力材が各圧縮材の頂点と中央部分に結ばれている。このため、圧縮材が地面に接触することなく構造物を維持することができる。また、圧縮材本数が従来の配置パターンに比べ半数で構成されているため、制御する張力材本数の減少や、製作コストの削減においても貢献することができると考えられる。

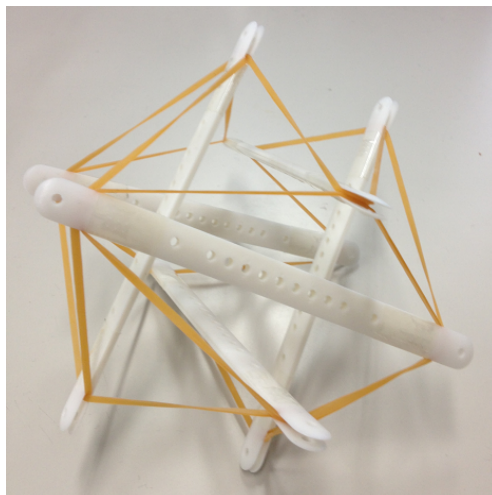


図1 20面体型テンセグリティ

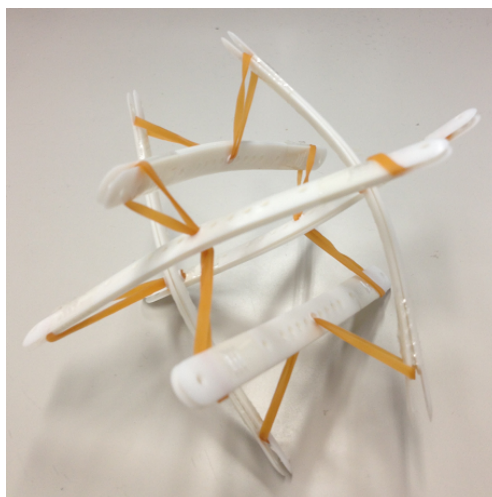


図2 星形20面体型テンセグリティ

## 3. 星形20面体型モデルの転がり検証

本研究では星形20面体型テンセグリティモデルの転がり移動をシミュレーションを用いて検証を行う。各シミュレーションのパラメータは20面体型テンセグリティの転がり移動ロボットのものを使用する。20面体型テンセグリティロボットの実機を図3に示す。なお、20面体型テンセグリティロボットの実機とシミュレーションにおいては同様の転がり移動をすること、および20面体型テンセグリティモデルが張力材を2本縮めることで転がり移動を実現することを確認している [3]。

本研究でモデリングの対象とする構造は、転がり移動を実現するテンセグリティ構造体であるため、張力材にあたる部分には McKibben 型空気圧ゴム人工筋を

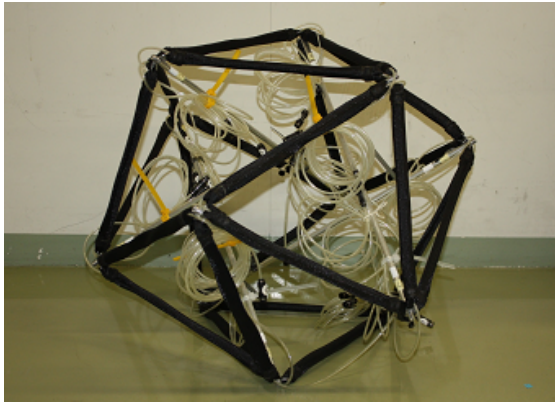


図3 20面体型テンセグリティロボット

用いている。また、圧縮材にあたる部分にはアルミ軸を用いている。本シミュレーションにおいては圧縮材をバネと圧力により張力材が縮もうとする力の2つの力で表す。また、各張力材、圧縮材は一様であるとし、結合部分は無視するものとする。なお、テンセグリティの各頂点に20面体を参考に頂点番号を付ける。図4にテンセグリティの頂点を示す。以降、頂点 $i$ を記号 VERTEX  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, 12$ ) で表す。また、図5に各張力材の番号を示す。以降、頂点 $j$ を記号 ACTUATOR  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, 12$ ) で表す。

また、星形20面体型テンセグリティモデルで生じる接地パターンは、圧縮材が3方向に接地するパターンと、圧縮材が2本平行に接地し、1本がその2本と垂直に接地するパターンの2種類のみである。以降、圧縮材が3方向に接地するパターンを軸対称接地パターン、圧縮材が2本平行に接地し、1本がその2本と垂直に接地するパターンを面対称接地パターンとする。図6に軸対称接地パターン、図7に面対称接地パターンを示す。

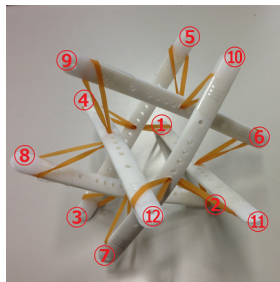


図4 テンセグリティの頂点

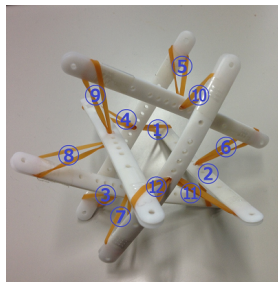


図5 張力材の番号

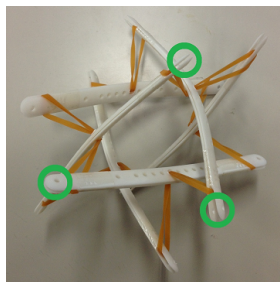


図6 軸対称接地パターン

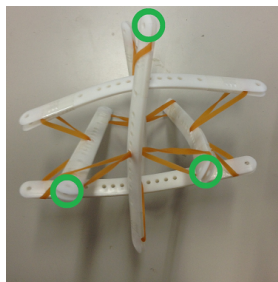


図7 面対称接地パターン

## 4. シミュレータ実現の手法

### 4.1 運動方程式の導出

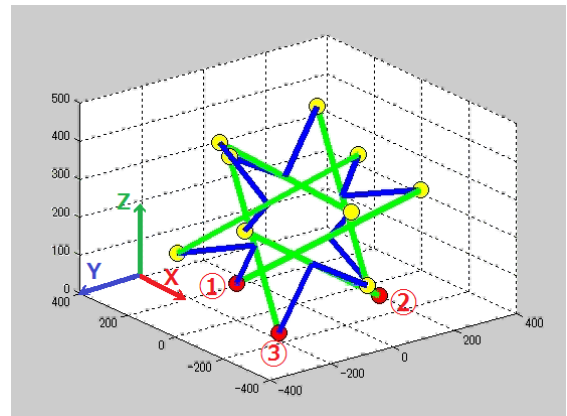
本シミュレーションは6本の圧縮材の姿勢の運動方程式に基づいた数値計算により各頂点の三次元座標を検出し、その軌跡からテンセグリティ構造体のモデリングを行う。なお、張力材、圧縮材は本研究でモデリングの対象とする構造と同様に配置する。

### 4.2 モデリング対象の描画方法

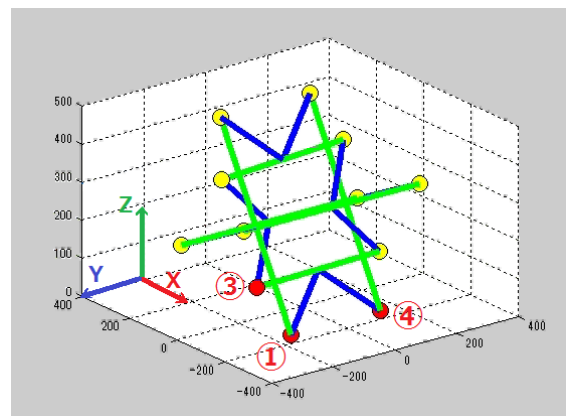
モデリング対象の描画方法としては、運動方程式より導出した各頂点が接地している場合は赤色、接地していない場合は黄色の球体で描画する。また、各張力材を青色、各圧縮材を緑色の直線で描画する。図8に軸対称接地パターン、および面対称接地パターンのテンセグリティロボットのシミュレーションモデルを示す。また、時間ステップごとの各頂点の値の連続データによる各パーツの描画データを AVI ファイル形式でアニメーションにすることで検証を行う。

### 4.3 シミュレーションの設定

シミュレーションにおけるテンセグリティロボットのパラメータとして、圧縮材の長さを570mm、その質量を0.28kgとし、張力材の自然長を0.207mとする。また、慣性テンソル $J$ は  $\text{diag}(0.27, 0.27, 0)\text{kg}^2 \cdot \text{m}$  とする。



(a) 軸対称接地パターン



(b) 面対称接地パターン

図8 シミュレーションモデル

## 5. シミュレーション結果

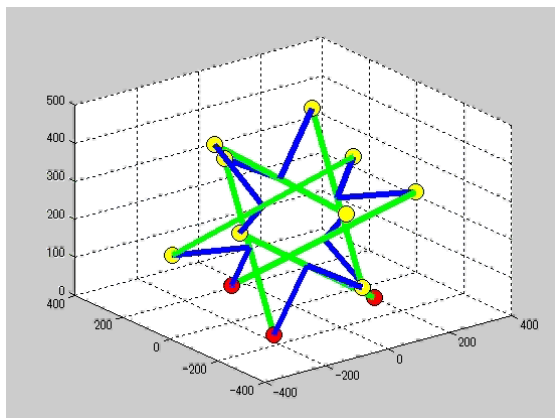
### 5.1 実験方法

本章では、星形 20 面体型テンセグリティモデルのシミュレーション結果を検証する。接地パターンについては軸対称接地パターンと、面对称接地パターンのみである。このため、この2つの接地パターンを検証し、その両方が転がり移動をすることが確認できれば、星形 20 面体型テンセグリティモデルは転がり移動を実現することができると思われる。

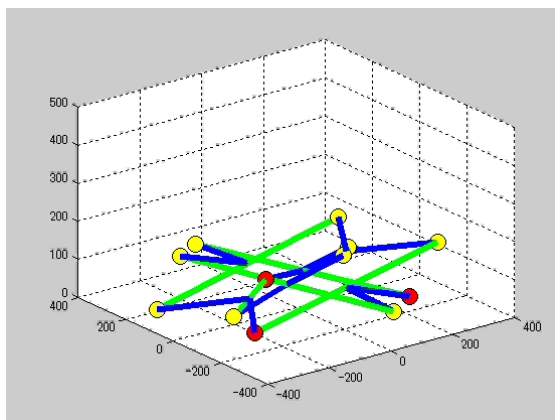
### 5.2 実験結果

まず、軸対称接地パターンの実験結果について述べる。張力材を ACTUATOR4, 6, 8 の 3 本を縮めたところ、実機の転がり移動は図 9 のようになり、接地している頂点は VERTEX1, 2, 3 から VERTEX3, 4, 8 へと変化した。また、移動パターンは軸対称接地パターンから軸対称接地パターンへの転がり移動となった。

次に面对称接地パターンの実験結果について述べる。ACTUATOR3, 12 の張力材を縮めたところ、実機の転がり移動は図 10 のようになり、接地している頂点は VERTEX1, 3, 4 から VERTEX1, 2, 3 へと変化した。また、移動パターンは面对称接地パターンから軸対称接地パターンへの転がり移動となった。

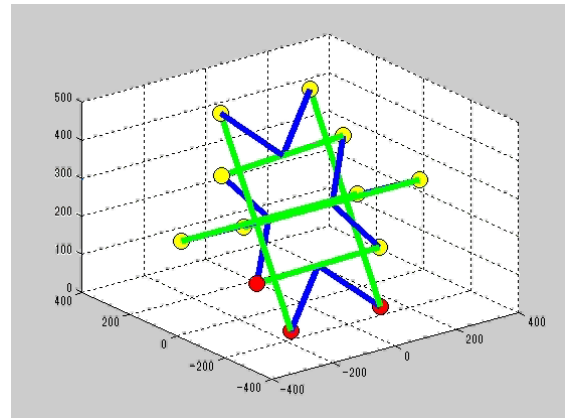


(a) 開始時

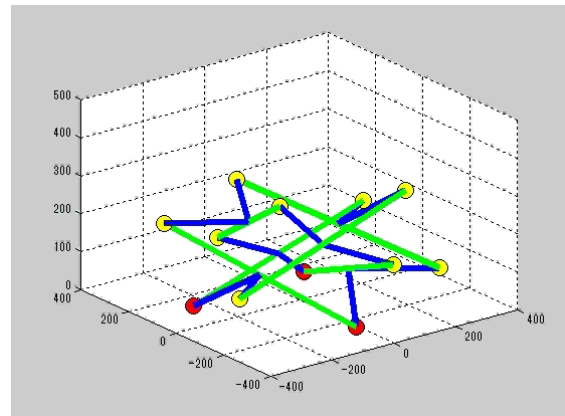


(b) 終了時

図 9 軸対称接地パターンの実験結果



(a) 開始時



(b) 終了時

図 10 面对称接地パターンの実験結果

### 5.3 考察

実験結果として示した通り、軸対称接地パターン、および面对称接地パターンにおいて、共に転がり移動が確認された。しかし、軸対称接地パターンにおいては 20 面体型テンセグリティモデルが張力材を 2 本縮めることで転がり移動をするのに対して、星形 20 面体型テンセグリティモデルは張力材を 3 本縮める必要があるといった結果になった。これは 20 面体型テンセグリティモデルに比べ星形 20 面体型テンセグリティモデルの張力材の長さが短いため、変形量が張力材 2 本では足りないことが原因として挙げられる。

## 6. 結言

本研究では、星形 20 面体型テンセグリティの転がり移動の検証として、シミュレーションを用いて 2 つの接地パターンにおいて転がり移動を実現することを確認した。今後の課題としては、今回の結果を元に星形 20 面体型テンセグリティロボットを製作し、実機での転がり移動の検証をすることが必要である。

### 参考文献

- [1] 杉山勇太, 平井慎一, 「柔軟ロボットの変形を用いた移動と跳躍」, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.3, pp.378-387, April, 2006

- [2] 小泉佑介, 柴田瑞穂, 平井慎一, 「テンセグリティロボットの連続転がりの評価」, 日本ロボット学会第 29 回学術講演会予稿集, 2011
- [3] 伊牟田遼, 平井慎一, 「テンセグリティ構造の変形による移動の力学シミュレーション」, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演集, 2012