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

○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．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．ただし，この構造においては，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し，実機の試作による比較は，費用や製作時間が膨大なものとなることが考えられる．そのため，シミュレーションを用いてテンセグリティロボットの転がりを評価することが有効と考える．

先行研究ではオープンソース方式の物理演算エンジンである ODE (Open Dynamics Engine) を用いた三次元物理シミュレータを製作した．このシミュレータにより転がりが完了するまでの，20 面体型テンセグリティ転がり移動ロボットの転がりをシミュレートすることができた．ただし，転がりが完了した後に意図しない水平移動を行う問題が生じた．この原因としては圧縮材の先端に付けたボールジョイントが圧縮材とともに振動を起こしたことが挙げられる．この問題の原因はボールジョイントが回転することであり，解決にはボールジョイント部分への減速制御等が必要である．ODE 内でこれらの解決方法を用いることは可能であるが，ODE 内で用いられているプログラム言語は一般的ではなく汎用性が低い．そこで，新たに汎用性に優れている MATLAB を用いて，剛体の運動方程式を導出し，それに基づいた数値計算によるテンセグリティ構造の三次元転がり移動の力学シミュレータの製作を行う．

2.　テンセグリティロボットのモデリング

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．また圧縮材にあたる部分にはアルミ軸を用いており，張力材と圧縮材との結合部はワイヤで固定されている．本シミュレーションにおいては各張力材，圧縮材は一様であるとし，結合部のワイヤを無視するものとする．

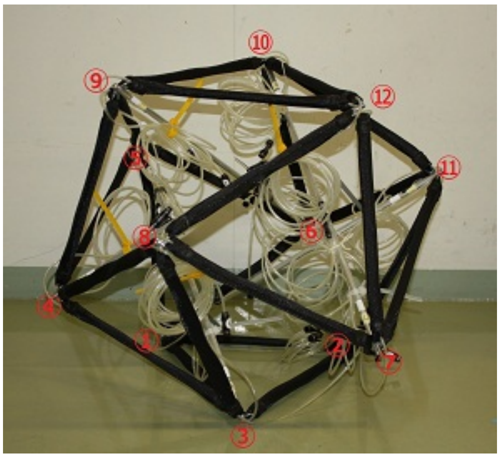


図 1 正 20 面体型テンセグリティロボット

本研究で用いるテンセグリティ構造体は圧縮材を 6 本用いており，各圧縮材の先端を結ぶと正 20 面体に近い構造体となる．本研究においては，このテンセグリティ構造体を正 20 面体であるとし，三次元転がり移動の力学シミュレーションを行うまた正 20 面体型テンセグリティロボットの実機を図 1 に示す．なお，赤色で各頂点の番号を示す．以降，頂点 j を記号 VERTEX j $(j = 1, 2, \cdots, 12)$ で表す．

また，正 20 面体型テンセグリティロボットで生じる接地パターンは，張力材が 3 本接地するパターンと，張力材が 2 本接地するパターンの 2 種類のみである．以降，張力材が 3 本接地するパターンを軸対称接地パターン，張力材が 2 本接地するパターンを面対称接地パターンとする．図 2 に軸対称接地パターン，図 3 に面対称接地パターンを示す．

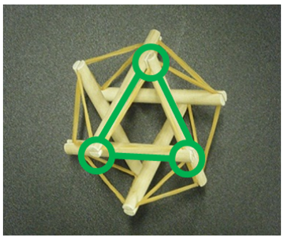


図 2 軸対称接地パターン

図 3 面対称接地パターン

3. シミュレータ実現の手法

3·1 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．

圧縮材 i の重心位置を三次元ベクトル

$$\boldsymbol{x_i} = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}, \tag{1}$$

姿勢を四元数

$$\boldsymbol{q_i} = \begin{bmatrix} q_{0i} \\ q_{1i} \\ q_{2i} \\ q_{3i} \end{bmatrix} \tag{2}$$

で表す．このとき圧縮材の質量 m，圧縮材に作用する力$\boldsymbol{f_i}$より運動方程式

$$\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{i}} = \frac{\boldsymbol{f_i}}{m} \tag{3}$$

が得られる．

次に，圧縮材 i の回転に関する運動方程式を求める．角速度ベクトル

$$\boldsymbol{\omega_i} = \begin{bmatrix} \omega_{\xi i} \\ \omega_{\eta i} \\ \omega_{\zeta i} \end{bmatrix} \tag{4}$$

と慣性テンソル$\boldsymbol{J}$より

$$\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\boldsymbol{i}} + \boldsymbol{\omega_i} \times \boldsymbol{J}\boldsymbol{\omega_i} = \boldsymbol{\tau_i} \tag{5}$$

が得られる．また，$\boldsymbol{\omega_i}$は四元数$\boldsymbol{q_i}$と四元数の時間微分$\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}$を用いて

$$\boldsymbol{\omega_i} = 2\boldsymbol{H_i}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}, \tag{6}$$

ただし

$$\boldsymbol{H_i} = \begin{bmatrix} -q_{1i} & q_{0i} & q_{3i} & -q_{2i} \\ -q_{2i} & -q_{3i} & q_{0i} & q_{1i} \\ -q_{3i} & q_{2i} & -q_{1i} & q_{0i} \end{bmatrix} \tag{7}$$

と表される．このとき，

$$\boldsymbol{J}(2\boldsymbol{H_i}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}) + (2\boldsymbol{H_i}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}) \times \boldsymbol{J}(2\boldsymbol{H_i}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}) = \boldsymbol{\tau_i} \tag{8}$$

が得られる．ここで，両辺の式を整理することで

$$\boldsymbol{H_i}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} = -2\boldsymbol{J^{-1}}(\boldsymbol{H_i}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}) \times (\boldsymbol{J}\boldsymbol{H_i}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}) + \frac{1}{2}\boldsymbol{J^{-1}}\boldsymbol{\tau_i} \tag{9}$$

が得られる．また，四元数は絶対値が 1 となるため，制約式

$$R \triangleq \boldsymbol{q_i}^T\boldsymbol{q_i} - 1 \tag{10}$$

を満たさなくてはならない．計算過程において幾何制約が 0 に収束するために，幾何制約の臨界減数を表す微分方程式

$$\ddot{R} + 2\nu\dot{R} + \nu^2 R = 0 \tag{11}$$

を導入する．ここで ν は角周波数を表す正の定数である．制約式 (10) を式 (11) に代入すると

$$-\boldsymbol{q_i}^T\ddot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} = r_1(\boldsymbol{q_i}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}) \tag{12}$$

が得られる．ここで

$$r_1(q_i, \dot{q}_i) = \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}^T\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} + 2\nu(\boldsymbol{q_i}^T\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}) + \frac{1}{2}\nu^2(\boldsymbol{q_i}^T\boldsymbol{q_i} - 1) \tag{13}$$

である．このとき，式 (9) と式 (12) より

$$\ddot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}} = -r_1(\boldsymbol{q_i}, \dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}})\boldsymbol{q_i} - 2\boldsymbol{H_i}^T\boldsymbol{J^{-1}}((\boldsymbol{H_i}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}) \times (\boldsymbol{J}\boldsymbol{H_i}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{i}}) - \frac{1}{4}\boldsymbol{\tau_i}) \tag{14}$$

が得られる．これにより，式 (3)，(14) より常微分方程式を数値的に解くことにより，時間ステップごとの圧縮材の挙動を計算することができる．

3·2 地面との拘束条件

テンセグリティロボットが地面の上を転がるとき，いくつかの圧縮材が地面と接触する．制約安定化法を用いて地面との接触により生じる拘束条件を運動方程式 (3)，(14) に統合する．このとき，各圧縮材の両端ののZ 軸座標を表す状態変数 z_i，q_{0i}，q_{3i} は制約式

$$R_i^+ \triangleq z_i + lq_{0i}^2 + lq_{3i}^2 - \frac{l}{2} = 0 \tag{15}$$

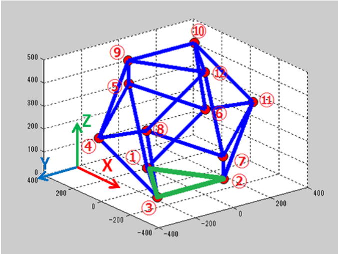
$$R_i^- \triangleq z_i - lq_{0i}^2 + lq_{3i}^2 - \frac{l}{2} = 0 \tag{16}$$

をそれぞれ満たさなくてはならない．ただし，l は圧縮材の長さを表す定数とする．この制約式を微分方程式の数値解放に組み込むためには，幾何制約を微分方程式に変換し，元の常微分方程式と統合する必要がある．このとき，幾何制約が 0 に収束するように，制約安定化法を導入する．

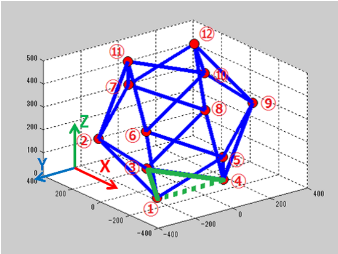
この拘束条件の条件分岐としては，各圧縮材の両端のどちらかの頂点の Z 軸座標の値が 0 以下になったときに，それぞれの制約式を含む運動方程式に変更する．また各制約式により導出される軸座標の値がを 0 にしようとする力 λ_i の値が 0 以下になったときに元の制約式を含まない運動方程式に戻す．

3·3 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を球体で，各頂点間の張力材を直線で描画する．圧縮材については張力材の動きに重なって転がり動作が観察しにくいため，本研究では表示しない．図 4 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．なお，緑色で接地している面を示す．本研究で用いる座標系は図 4 に示す通りである．以降，本論文で座標について述べる際にはこの方式に準ずる．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実機との検証を行う．



(a) 軸対称接地パターン



(b) 面対称接地パターン

図 4 シミュレーションモデル

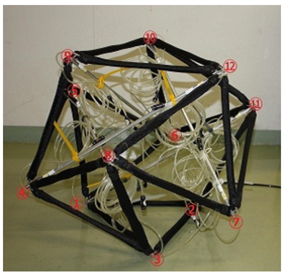
3·4　シミュレーションの設定

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 0.352279m とする．また，慣性テンソル$\boldsymbol{J}$は $\mathrm{diag}(0.27, 0.27, 0)\mathrm{kg}^2\cdot\mathrm{m}$ とする．

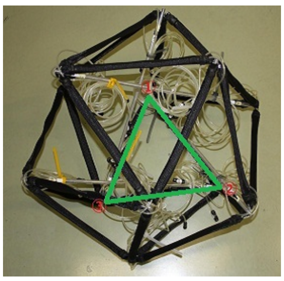
4.　シミュレーション結果と研究結果の比較

4·1　実験方法

本章では，テンセグリティロボットの実機の挙動とシミュレーション結果を比較する．テンセグリティロボットは，圧縮材 6 本と張力材 24 本から成る 20 面体型テンセグリティロボットである．20 面型テンセグリティロボットで生じる 2 種類の接地パターンに対して，実機の挙動とシミュレーション結果を比較する．接地パターンについては軸対称接地パターンと，面対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，その両方が実機と同様の転がり移動をすることが確認されれば，シミュレーション上のロボットモデルは実機との十分な整合性を持っていると考えることができる．図 5 に軸対称接地パターン，図 6 に面対称接地パターンを示す．

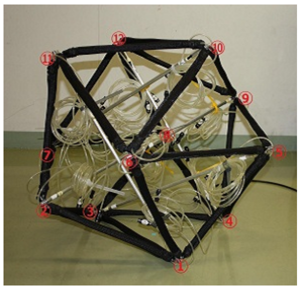


(a) 側面図

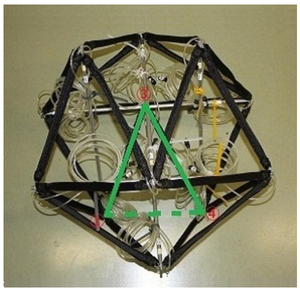


(b) 前面図

図 5 軸対称接地パターン (実機)



(a) 側面図



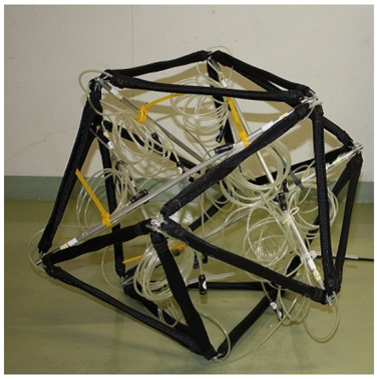
(b) 前面図

図 6 面対称接地パターン (実機)

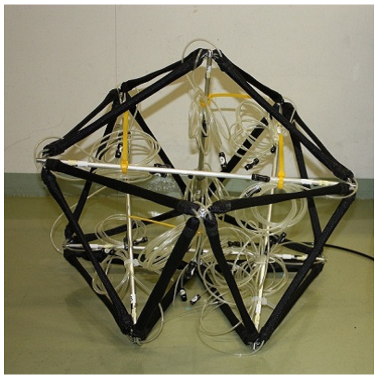
4·2　実験結果

まず，軸対称接地パターンの実験結果について述べる．VERTEX1，2 間と VERTEX2，11 間の圧縮材を縮めたところ，実機の転がり移動完了後の姿勢は図 7 のようになり，接地している頂点は VERTEX1，2，3 から VERTEX2，3，7 へと変化した．また，シミュレーションモデルも図 8 のように，同様の転がり移動が確認された．

次に面対称接地パターンの実験結果について述べる．VERTEX1，3 間と VERTEX1，5 間の圧縮材を縮めたところ，実機の転がり移動完了後の姿勢は図 9 のようになり，接地している頂点は VERTEX1，3，4 から VERTEX1，2，6 へと変化した．また，シミュレーションモデルは軸対称接地パターンと同様に，図 10 のように，同様の転がり移動が確認された．

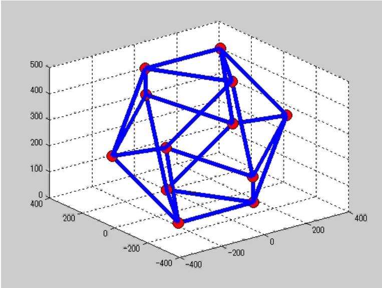


(a) 開始時

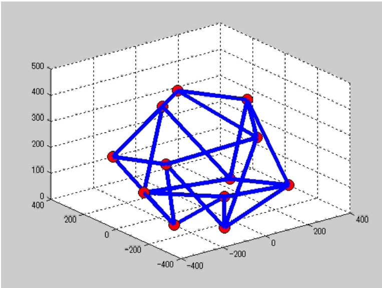


(b) 終了時

図 7 実機 (軸対称接地パターン)

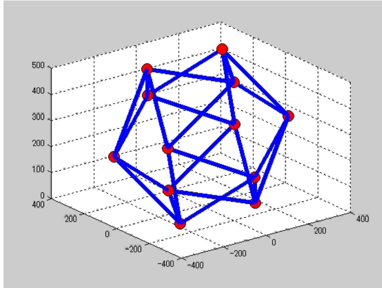


(a) 開始時

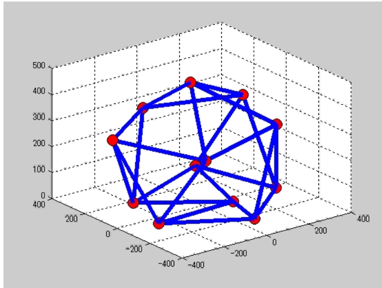


(b) 終了時

図 8 シミュレーションモデル (軸対称接地パターン)

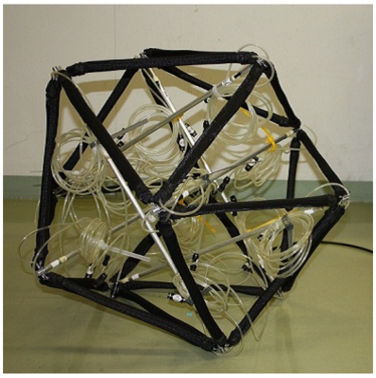


(a) 開始時

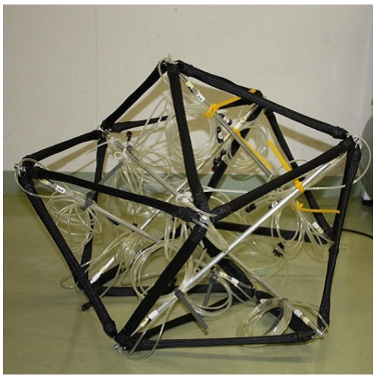


(b) 終了時

図 10 シミュレーションモデル (面対称接地パターン)



(a) 開始時



(b) 終了時

図 9 実機 (面対称接地パターン)

4·3 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対称接地パターンにおいて，共に実機と同様の頂点移動が確認された．また，実機に比べシミュレーション結果は地面との滑りといった現象が確認された．この現象の原因としては，本シミュレーションでは地面との拘束条件が Z 軸方向のみであり，地面との摩擦である X 軸，および，Y 軸における減衰に関して考慮していないことが挙げられる．このため，地面とシミュレーションモデルの間で滑りがおき，実機に比べて静止するまでの時間がかかるといった結果になったと考えられる．

5. 結言

本研究では，テンセグリティロボットの力学シミュレータの検証として，実機との転がり移動を比較し，同様の頂点移動が確認された．ただし，地面との滑りといった現象が起きた．この原因の解決方法としては，現在の運動方程式に地面との摩擦の式を導入することが必要である．また，より実機と近いシミュレーションモデルを実現するために，新たに地面のモデルを製作し，より実機の環境に近いシミュレーションを製作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