

# テンセグリティ型柔軟ロボットの転がり移動の解析

立命館大学 ○西條 文雄, 柴田 瑞穂, 平井 慎一

## Analysis of Deformable Crawling Robot with Tensegrity Structure

○Fumio SAIJO, Mizuho SIBATA and Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

**Abstract:** This paper represents a crawling of a deformable robot with a tensile structure body. The body consists of tensegrity, which has noncontiguous compressed struts and contiguous tensioned strings. This robot crawls by body deformation. In this paper, we calculate the position of the strut ends during the body transition.

### 1. 緒言

不整地での移動を実現するロボットには、クローラや脚機構、ヘビ型ロボットなどのメカニズムが使われている。これらのロボットは一般的に硬い部品から構成されており、転倒からの回復が容易ではないという欠点がある。この観点から、近年、外殻変形を利用した柔軟ロボットに関する研究が盛んに行われている。外殻変形を実現する構造として、テンセグリティ [1] があげられる。

テンセグリティ構造を用いたロボットとして、張力材の変形による移動を実現されている [2]。当研究室では、張力構造体としてテンセグリティ構造を参考にした柔軟型ロボットの転がりを実現した [3]。アクチュエーターを用いて、圧縮材の幾何学的配置を変形させると、ポテンシャルエネルギーに勾配が生じ、ロボットと地面との接触領域まわりに、重力によるモーメントが発生する。このモーメントにより、ロボットは地面の上を転がることで移動する。我々が作成したロボットでは、接地パターンが2種類あり、それぞれの接地パターンから転がることを実験的に確認した。本報告では、接地パターンによる重力ポテンシャルエネルギーの推移を確認するために、このロボットの転倒の際の各頂点座標を算出する。

### 2. 張力構造体

本研究では、張力構造体としてテンセグリティ構造を参考にする。テンセグリティ構造とは、不連続な圧縮材と連続する張力材で構成され、各部材が有効に機能して剛形態をつくるような骨格構造のことをいう。この構造の特徴として、圧縮材の本数によって幾何学的構造に依存する事があげられる。Fig.1 にテンセグリティ構造の例を示す。図に示すテンセグリティ構造は、本実験で採用した構造であり、圧縮材が6本、張力材が24本で構成されている。

### 3. 正20面体の性質

本研究では、圧縮材6本、張力材24本の構造を採用している。この構造は、自重を考慮しない場合には、正20面体である。ただし、完全な正20面体ではなく、正20面体と比べて、辺が6本足りない構造になっている。柔軟ロボットの転がりを解析するために正20面体が接地しているときの各頂点の座標を計算する。正20面体

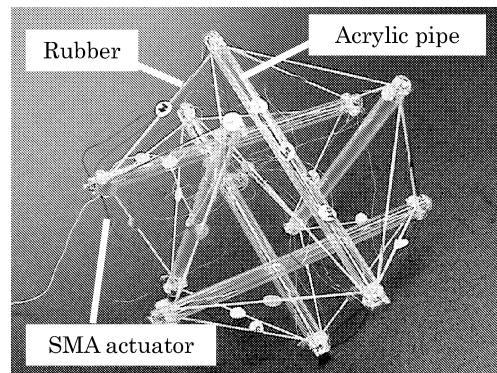


Fig.1 Prototype of deformable robot with tensile structure

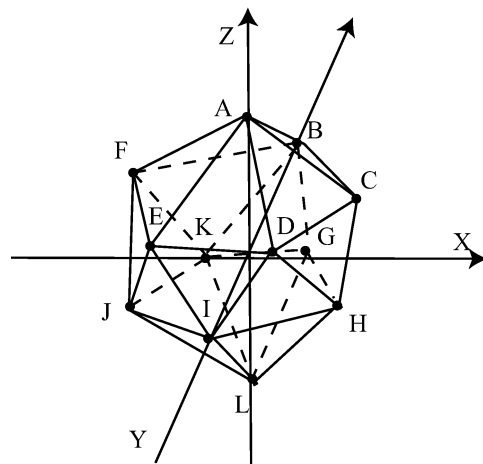


Fig.2 Regular icosahedron

の形状を Fig.2 に示す。正20面体の面の形は正三角形、面の個数は20面、頂点の個数は12点、辺の個数は30辺である。また、正20面体の形状の特徴から、対角となる点A、Lの2点が、Z軸上に存在する場合、時計回りに、点B、C、D、E、FがXY平面と平行で、正5角形を形成している。また点G、H、I、J、KもXY平面と平行で位相が180°異なる正5角形を形成している。

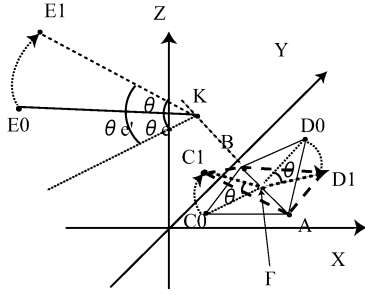


Fig.3 Coordinates transition when falling

#### 4. 転倒後の座標計算式

転倒後の各頂点の座標を算出する。Fig.3 に転倒の際の座標系を示す。初期状態で地面に接している面を  $ABC_0$ 、転倒後の接地面を面  $ABD_1$  とする。各点は、辺  $AB$  を回転軸として、回転する。点  $C_0$ 、 $D_0$  が辺  $AB$  に対して垂直に交わる点を点  $F$  とする。また点  $E_0$  が、辺  $AB$  に対して垂直に交わる点を、 $K$  とする。点  $C_0$ 、 $D_0$ 、 $E_0$  の転倒後の点を  $C_1$ 、 $D_1$ 、 $E_1$  とする。また点  $C_0$ 、 $D_0$ 、 $E_0$  の  $XY$  平面への射影を点  $C'_0$ 、 $D'_0$ 、 $E'_0$  とする。点  $A$  の座標を  $A = [x_a, y_a, z_a]^T$  と表す。他の点も同様に表す。

最初に、接地面が、面  $ABC_0$  から面  $ABD_1$  に転倒する場合に面  $ABD_1$  が地面に接地する条件は、点  $D_1$  の  $Z$  座標が 0 に等しい時である。これより転倒に必要な回転角度  $\theta$  を計算すると、

$$\theta = \cos^{-1} \frac{|C'_0 F|}{|C_0 F|}. \quad (1)$$

となる。式 (1) より、転倒後の点  $C_1 = [x_{c1}, y_{c1}, z_{c1}]^T$ 、 $D_1 = [x_{d1}, y_{d1}, z_{d1}]^T$  の座標は、以下の式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \end{bmatrix} = (1 - \cos \theta) \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{c0} \\ y_{c0} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$z_{c1} = |C'_0 F| \sin \theta, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} x_{d1} \\ y_{d1} \end{bmatrix} = \left(1 - \frac{1}{\cos \theta}\right) \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{d0} \\ y_{d0} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$z_{d1} = 0. \quad (5)$$

点  $E_0$  を転倒させる場合、辺  $AB$  に垂直に交わる点を、点  $K$  とする。辺  $E_0 K$  の地面に対する角度を求めると

$$\theta_e = \cos^{-1} \frac{|E'_0 K|}{|E_0 K|}. \quad (6)$$

したがって、転倒後の回転角度は以下の通りになる。

$$\theta_{e'} = \theta + \theta_e. \quad (7)$$

よって点  $E_{c0}$  の転倒後の座標  $E_1 = [x_{e1}, y_{e1}, z_{e1}]^T$  は、以下の式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} x_{e1} \\ y_{e1} \end{bmatrix} = \cos \theta_{e'} \frac{|E_0 K|}{|E'0 K|} \begin{bmatrix} x_{e0} - x_k \\ y_{e0} - y_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{e0} \\ y_{e0} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$z_{e1} = |E_0 K| \sin \theta_{e'}. \quad (9)$$

#### 5. ポテンシャルエネルギーの計算

各頂点の 3 次元座標値により、柔軟ロボットの重力ポテンシャルエネルギーを計算することができる。今回は張力材の重量を無視する。圧縮材の重量を  $m$ 、重力加速度を  $g$  として、全体の重力ポテンシャルエネルギーを計算すると、以下の式になる。

$$U = \frac{[z_a + z_b + z_c + \dots + z_k + z_l] mg}{2}. \quad (10)$$

式 (8) を用いて、転倒前後で、重力ポテンシャルエネルギーに違いが生じるか調べた結果、2 つの接地パターンで重力ポテンシャルエネルギーは等しいことが判明した。

#### 6. 結言

本研究では、テンセグリティ型柔軟ロボットを正 20 面体の剛体として考え、転倒の際の各頂点の座標推移を算出した。転倒前後で、重力ポテンシャルエネルギーに違いが生じるか調べた結果、2 つの接地パターンで重力ポテンシャルエネルギーは等しいことが判明した。しかし実際は、接地パターンによって圧縮材の自重が張力に対して与える影響に差が生じるため重力ポテンシャルエネルギーに対して差が生じることが考えられる。今後テンセグリティ型柔軟ロボットにおいて、圧縮材の重量が張力に対してどのように働くかを解析する必要性がある。また、転倒の際に、回転軸となる辺から、圧縮材の重心位置の距離の違いが、転倒に必要なエネルギーの違いの要因になると推測する。今後は、この推測を解析することが、テンセグリティ型柔軟ロボットの転倒のシミュレーションを行うにあたって重要であると考えられる。

#### 参考文献

- [1] “K. Snelson のウェブサイト”, <http://www.kennethsnelson.net/>.
- [2] C. Paul, F. J. Valero-Cuevas, and H. Lipson: “Design and Control of Tensegrity Robots for Locomotion”, IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS, Vol.22, No.5, pp.944-957, 2006.
- [3] 柴田瑞穂, 西條文雄, 平井慎一: “テンセグリティ型柔軟移動ロボットの実験的検討”, 日本ロボット学会誌, 第 26 回学術講演会予稿集, 2008.