

テンセグリティロボットの連続転がりの評価

○小泉佑介 (立命館大学) 柴田瑞穂 (近畿大学) 平井慎一 (立命館大学)

1. 緒言

本報告ではテンセグリティ構造を用いたソフトロボットの転がり移動について論じる。

近年、ロボットの活動範囲は多岐に渡り災害救助など不整地における移動能力の向上が求められている。不整地での移動方法としては車輪型、クローラ型、脚型などが挙げられる。しかし、それらの移動方法の多くは転倒した場合に活動可能な状態へ復帰することが困難である。つまり、転倒の有無に関わらず活動を行い続けることができる移動機構の考案が求められている。

そこでテンセグリティ構造を利用した移動ソフトロボットが提案されている [1]。テンセグリティ(tensegrity)とは Tensile (張力), Integrity (統合) という2つの単語からなる造語であり, Fuller が提唱したといわれる [2]。剛体である圧縮材と弾性体である張力材の2つの部材により構造を保ちつつ, 力が加わった際には容易に変形する柔軟性を持つ構造体である [3][4]。

提案されたソフトロボットは多面体の外殻変形を利用した転がり移動を行うことで転倒という概念を持たない移動機構となっている。先行研究によりテンセグリティ構造体にアクチュエータを装着した状態での転がり移動が検証された。その結果, 球体型テンセグリティ構造体が外殻変形により転がり移動を行うことが実証された [5][6]。しかし, 実証されたのは1回の転がり移動についてであり2回以上の連続転がり移動に関しては実証が成されていない。そこで本報告においては2回以上の連続転がり移動を可能としたテンセグリティロボット製作とその連続転がり移動に関する実証実験の結果を述べる。

2. テンセグリティロボット

本研究で取り扱うテンセグリティロボットを図1に示す。この状態で高さ590mm, 全幅780mm, 重さ3.3kgである。ただし, 自重による変形があるため姿勢により大きさは随時変化する。

製作したテンセグリティロボットは圧縮材6本, 張力材24本で20面体を構成する球体型テンセグリティ構造を用いている。張力材兼アクチュエータとして McKibben 型空気圧アクチュエータを用いている [7][8]。アクチュエータとして神田通信工業株式会社製エアマッスルの1.0インチタイプを用いている。

2.1 テンセグリティの表現法

テンセグリティロボットが正20面体と近似できることを利用して正20面体の頂点番号を流用しテンセグリティロボットの各頂点に番号を付けた。図2(a)は正20面体の各頂点に番号をつけた図である。図2(b)はテンセグリティロボットの各頂点に番号をつけた図である。これ以後の説明においてはこの頂点番号を基に説明を行う。

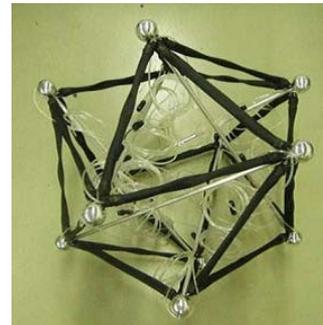
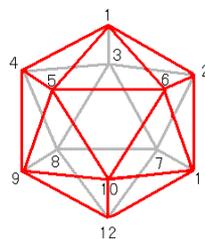
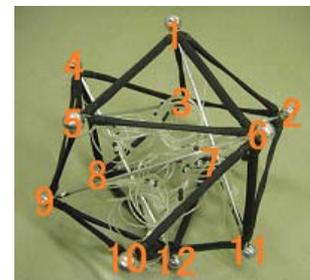


図1 テンセグリティロボット



(a) 正20面体



(b) テンセグリティロボット

図2 頂点番号

各面, 辺はそれぞれ面 (a,b,c), 辺 (d,e) と表記する。面 (a,b,c) は頂点番号 a,b,c で囲まれた三角形の面を指し, 辺 (d,e) は頂点番号 d,e 間の辺を指す。面 (f,g,h) が地面に接している状態を指す時, 特に接地面 (f,g,h) と表現する。辺 (i,j) 間にあるアクチュエータをアクチュエータ (i,j) と表現する。アクチュエータの方向がテンセグリティの変形および転がり移動に影響を及ぼすことはないので数字の小さいほうから表記する。

2.2 接地パターン

図1に示すテンセグリティにおいては頂点間に辺のない箇所があるために正20面体では存在しなかった面の違いが発生する。つまり, 図2(b)の頂点番号 (5,6,10) など2つの辺と3つの頂点で囲まれた三角形を形成している面と頂点番号 (1,5,6) など3つの辺と3つの頂点で囲まれた三角形を形成する面の2つである。また, この2種類の面はそれぞれの面を接地面として置いた際に異なる特性を持つ。それぞれを面対称接地パターン, 軸対称接地パターンとし, これ以後の説明において使用する。各接地パターンの様子を図3(a), (b)に示す。

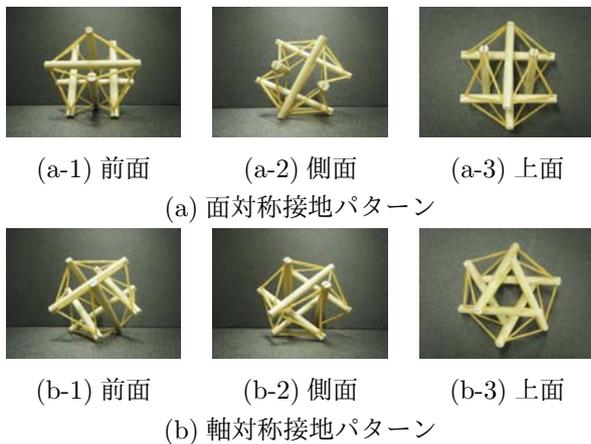


図3 テンセグリティロボットの接地パターン

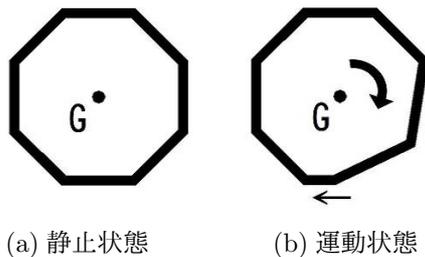


図4 転がり移動の原理

3. 外殻変形による転がり移動

テンセグリティロボットにおいては、移動手段として多面体の転がりを用いている。各辺の長さを変化させ、多面体の形状を制御することにより静止状態と運動状態を制御し移動手段として利用している。

図4は多面体を横から見た簡易図である。図4(a)に示すように、重心Gが接地面の上部にある時、テンセグリティロボットは静止状態にある。図4(b)に示すように、下辺を短くすることにより多面体に変形し重心Gが接地面の上部から外れた時、テンセグリティロボットは運動状態にある。図4は多面体の形状を制御し外殻を変形させることにより静止状態、運動状態の制御が可能であることを表している。

本研究で用いているテンセグリティロボットではアクチュエータを張力材と兼用して取り付けしており、アクチュエータの伸縮によりテンセグリティ構造体を変形させる。任意のアクチュエータを駆動させ各辺の長さを制御することにより外殻変形を制御している。

4. 転がり移動実験

本章では、実験を通して転がり移動の有無を確認し、駆動アクチュエータと変形、転がり移動の関係について検討する。

4.1 実験機器

実験を行うために用意した実験機器を表1に示す。

4.2 実験内容

面対称接地パターン、軸対称接地パターンのそれぞれにおいて任意のアクチュエータを2本同時に駆動させることによりテンセグリティロボットを変形させ、転がり移動の有無を確認する。McKibben型空気圧アク

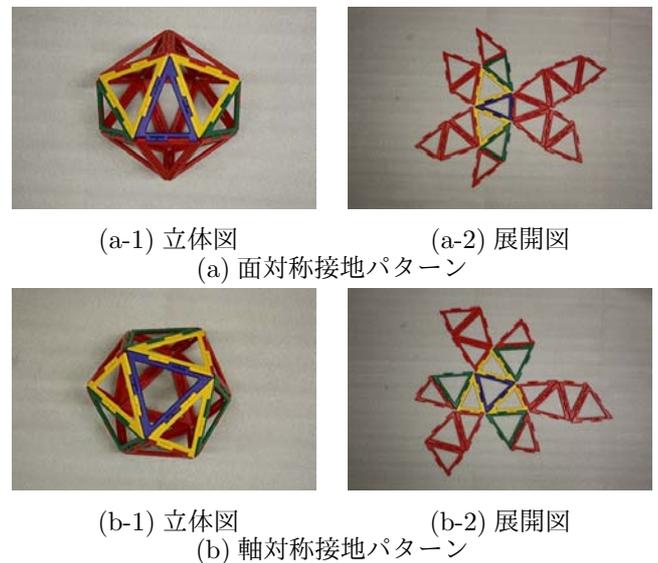


図5 転がり移動の表現

チュエータへ0~0.5MPaの圧縮空気を0.05MPa刻みで供給し実験を行った。空気圧の制御はレギュレータで行い、アクチュエータの制御は電磁弁のON-OFF制御で行った。

4.3 実験結果

実験より外殻変形によるテンセグリティロボットの転がり移動を確認した。

図5に実験より得た転がり移動パターンを示す。面対称接地パターンからの転がり移動パターンを図5(a-1)、図5(a-2)に示す。軸対称接地パターンからの転がり移動パターンを図5(b-1)、図5(b-2)に示す。図5(a-1)、図5(b-1)は圧縮材が6本の球体型テンセグリティ構造体の立体モデルである。図5(a-2)、図5(b-2)はモデルの展開図である。

以下に確認した4つの転がり移動パターンを示す。

1. 頂点番号(1,3,4)から(1,2,3)など面対称接地パターンから隣接する軸対称接地パターンへ移動するパターン面→軸

図5(a-1)、図5(a-2)において青で示される二等辺三角形から黄で示される正三角形への転がり移動パターンである。中央青の二等辺三角形から左右黄の正三角形に向かって2方向へ移動することが可能である。駆動アクチュエータの組み合わせが50通り存在する。そのうち2通りに関しては駆動アクチュエータ1本での転がり移動が可能であるパターンが含まれている。アクチュエータの駆動空気圧と組み合わせ数の分布を図6(a)に示す。

2. 頂点番号(1,2,3)から(2,3,7)など軸対称接地パターンから隣接する面対称接地パターンへ移動するパターン軸→面

図5(b-1)、図5(b-2)において青で示される正三角形から黄で示される二等辺三角形への転がり移動パターンである。中央青の正三角形から周辺黄の二等辺三角形に向かって3方向へ移動することが可能である。駆動アクチュエータの組み合わせが6通り存在する。アクチュエータの駆動空気圧と組み合わせ数の分布を図6(b)に示す。

表1 実験機器一覧

名称	メーカー	型番
5V用安定化電源	ALINCO	DM-310MV
24V用安定化電源	COSEL	R25A-24
エアコンベネーション	SMC	AFF2C-02BC
ウォータセパレータ	SMC	AMG150C-02BC
オイルセパレータ	SMC	AC20C-02CG
レギュレータ	SMC	ITV2030-212BS
コンプレッサー	Hitachi	0.40P-7S
タンク	アネスト岩田株式会社	SAT-33H-100
電磁弁	SMC	VQZ115R-5L-CP

3. 頂点番号(1,3,4)から(1,2,6)など面対称接地パターンから隣接する軸対称接地パターンを通り、1つ向こうの面対称接地パターンへ移動するパターン面→軸→面

図5(a-1), 図5(a-2)において青で示される二等辺三角形から黄で示される正三角形を通り、緑で示される二等辺三角形への転がり移動パターンである。中央青の二等辺三角形から左右緑の二等辺三角形に向かって2方向へ移動することが可能である。駆動アクチュエータの組み合わせが2通り存在する。アクチュエータの駆動空気圧と組み合わせ数の分布を図6(c)に示す。

4. 頂点番号(1,2,3)から(2,7,11)など軸対称接地パターンから隣接する面対称接地パターンを通り、1つ向こうの軸対称接地パターンへ移動するパターン軸→面→軸

図5(b-1), 図5(b-2)において青で示される正三角形から黄で示される二等辺三角形を通り、緑で示される正三角形への転がり移動パターンである。中央青の正三角形から周辺緑の正三角形に向かって3方向へ移動することが可能である。駆動アクチュエータの組み合わせが3通り存在する。アクチュエータの駆動空気圧と組み合わせ数の分布を図6(d)に示す。

4.4 考察

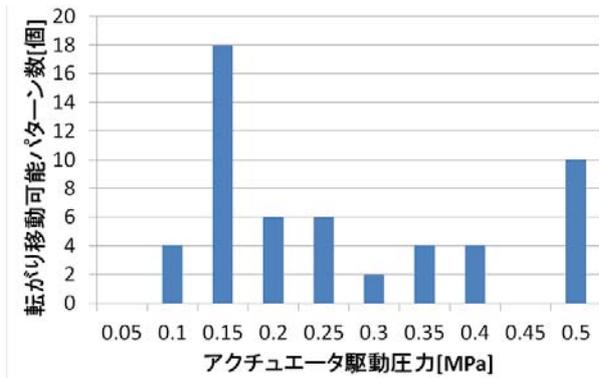
テンセグリティロボットはパターン面→軸、パターン軸→面を交互に行うことで転がり移動を連続で行う事ができる。しかし、今回実証されたパターン面→軸→面、パターン軸→面→軸を用いることで、より速く移動し、より圧縮空気の消費量が少ない転がり移動を行うことができると考えた。そこで、まずパターン面→軸→面、パターン軸→面→軸を行う際におけるテンセグリティロボットの挙動を考察し、パターン面→軸、パターン軸→面の連続交互動作による転がり移動との比較をする。

接地面(1,3,4)から面(1,2,6)への転がり移動を用いてパターン面→軸→面の転がり移動についての考察を行う。この転がり移動パターンはアクチュエータ(1,3),(1,5)を用いて接地面(1,3,4)から面(3,4,8)を経由し面(1,2,6)

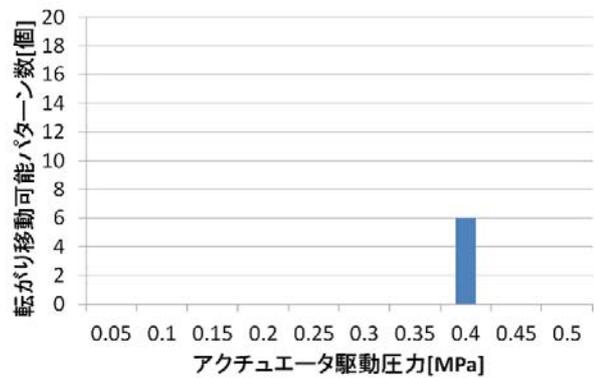
へ転がり移動を行うパターンである。ここで、接地面(1,3,4)から面(3,4,8)への転がり移動はアクチュエータ(1,3),(1,5)で可能であり、面(3,4,8)から面(1,2,6)への転がり移動もアクチュエータ(1,3),(1,5)で可能である。よって接地面(1,3,4)から面(1,2,6)への転がり移動パターンはアクチュエータ(1,3),(1,5)による接地面(1,3,4)から面(3,4,8)および面(3,4,8)から面(1,2,6)の2回連続転がり移動としてみなせ、アクチュエータの駆動により確実に転がり移動が可能である。また、この転がり移動パターンはアクチュエータ駆動圧力が0.15MPaでの転がり移動を確認しているため圧縮空気の消費量が少ない。

次に、接地面(1,2,3)から面(2,7,11)への転がり移動を用いてパターン軸→面→軸の転がり移動についての考察を行う。この転がり移動パターンはアクチュエータ(1,2),(10,11)を用いて接地面(1,2,3)から面(2,3,7)を経由し面(2,7,11)へ転がり移動を行う。ここで、接地面(1,2,3)から面(2,3,7)への転がり移動はアクチュエータ(1,2),(10,11)で可能であるが、面(2,3,7)から面(2,7,11)への転がり移動はアクチュエータ(1,2),(10,11)では不可能である。よって接地面(1,2,3)から面(2,7,11)への転がり移動パターンは接地面(1,2,3)から面(2,3,7)への転がり移動において発生した運動エネルギーにより面(2,3,7)から面(2,7,11)への転がり移動を行っていることになる。つまり、アクチュエータの駆動により確実な転がり移動が保証されていない。また、この転がり移動パターンはアクチュエータ駆動圧力0.50MPaでの転がり移動を確認しているため圧縮空気の消費量が多い。

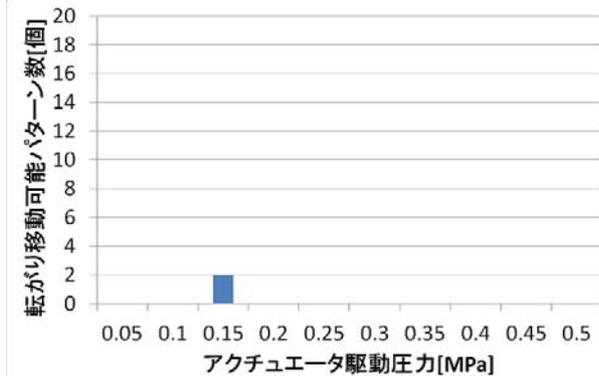
以上の考察より、テンセグリティロボットが転がり移動をするうえで用いる転がり移動パターンとしてパターン軸→面→軸は確実性の低さと圧縮空気消費量の多さからも極力使用を避けるべきである。また、パターン面→軸→面はパターン面→軸、パターン軸→面を連続で行って移動する場合と同じ転がり移動を1回のアクチュエータ駆動により実現している。そのため圧縮空気の消費量を削減でき、転がり移動において使用する主要なパターンとして積極的に用いるべきであると考える。



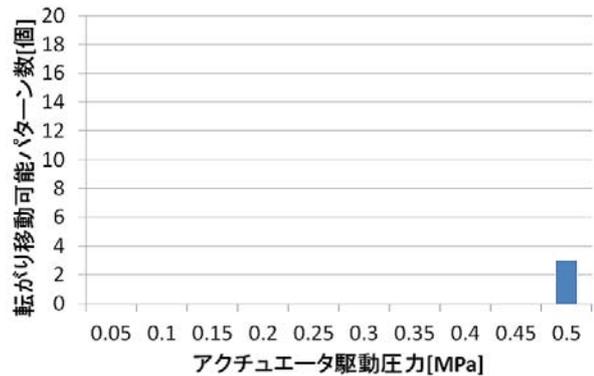
(a) 転がり移動パターン面→軸→面組み合わせ分布



(b) 転がり移動パターン軸→面組み合わせ分布



(c) 転がり移動パターン面→軸→面組み合わせ分布



(d) 転がり移動パターン軸→面→軸組み合わせ分布

図6 転がり移動パターン組み合わせ分布

5. 結言

本研究ではテンセグリティ構造を変形させることにより転がり移動を行うテンセグリティロボットを実現した。外殻を変形する方法として、張力材に用いている McKibben 型空気圧アクチュエータを収縮させることにより多面体の辺の長さを変える方法を用いた。また、2本のアクチュエータを用いることによりテンセグリティロボットが持つ2種20面のどの面が接地している状況に対しても確実に転がり移動が可能であることを確認した。さらに、2本以上のアクチュエータを連続して順次駆動させることにより連続転がり移動が可能であることも実証した。

今後の課題としては、本報告における結果を利用しテンセグリティロボットの転がり移動システムを構築し目標地点までの移動検証を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は科学技術研究費補助金若手研究(B)(課題番号 21760210)の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] 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” 日本ロボット学会第26回学術講演会予稿集, 2008
- [2] “BUCKMINSTER FULLER INSTITUTE“, <http://www.bfi.org/>

- [3] 藤井明, 川口健一 “東京大学 生産技術研究所 生研記者会見-技術度デザインのフュージョン 世界初のテンセグリティドーム (ホワイライト) -“(2011/1/27 現在) <http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/topics/011109/20011109Fujii.html>
- [4] “K. Snelson のウェブサイト“, <http://www.kennethsnelson.net/>
- [5] 柴田瑞穂, 西條文雄, 平井慎一: “テンセグリティ型多面体ロボットの転がり移動” 日本ロボット学会第27回学術講演会予稿集, 2009
- [6] 西條文雄, 柴田瑞穂, 平井慎一: “テンセグリティ型柔軟ロボットの転がり移動の解析” 第9回システムインテグレーション部門講演会予稿集, 2008
- [7] 長田義仁編著代表: “ソフトアクチュエータ開発の最前線-人工筋肉の実現を目指して-“, pp.291-293, 株式会社エヌ・ティー・エス, 2004
- [8] 野崎孝志, 則次俊郎: “McKibben 型空気圧ゴム人工筋の有限要素法による動作解析” 日本機械学会論文集, Vol.75, No.754, 2009