

ストラット駆動型テンセグリティロボットの転がり移動

網干雄城 (立命館大学) 平井慎一 (立命館大学)

1. 緒言

近年、災害救助ロボットの不整地における移動能力の向上が求められている。移動方法としては車輪型以外にクローラ型、多脚型、ヘビ型ロボットなどのメカニズムが使われている [1]。しかしながら、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。または、転倒によって本体が故障する可能性がある。そのため、それらの移動機構を持つロボットが不整地移動を行う際には転倒復帰用の構造を組み込む必要や本体が故障しないだけの強度が必要とされる。そこで、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ロボットの外壳として、球形をしたテンセグリティ構造体を採用した [2][3][4]。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する骨格構造である [5]。先行研究によりテンセグリティ構造体の張力材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、張力材の変形を用いた転がり移動では移動できない接地パターンや安定性が高く転がり移動が起こりにくい接地パターンなどが存在することがわかっている [4]。転がり移動ができないパターンが存在すると、その方向へ移動するために迂回する必要があり、目標地点に移動するまでに行う転がり移動の回数が増えるため移動効率を下がる。また安定性が高く転がり移動が起こりにくいパターンは転がり移動に必要なエネルギーが高いため移動効率を下がる。本報告では張力材の変形を用いた転がり移動の問題点に注目し、圧縮材にアクチュエータを用いた実機の製作および実証実験を行い、その結果より移動効率について検証する。

2. テンセグリティロボット

本実験で取り扱うテンセグリティロボットを図 1 に示す。実機の大きさは全高 600mm、全幅 680mm である。ただし、柔軟な構造のため大きさはその都度様々な要因で変化する。重量は 5.2kg である。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 本から成り立つ。外壳は 20 面体を構成するテンセグリティ球体構造である。圧縮材兼アクチュエータとして SMC 製 CM2G25F-75 を用いている。張力材兼アクチュエータとして神田通信工業株式会社製 McKibben 型空気圧アクチュエータを用いている [6]。テンセグリティロボットの各頂点に正 20 面体の頂点番号を参考に図 2 のように頂点番号を付ける。この頂点番号を使用して接地面とアクチュエータを表現する [4]。

3. ストラット駆動による転がり移動

3.1 転がり移動原理

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る。外郭変形による転がり移

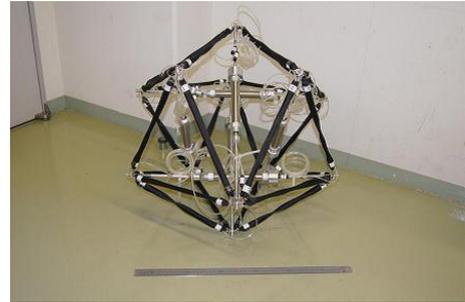
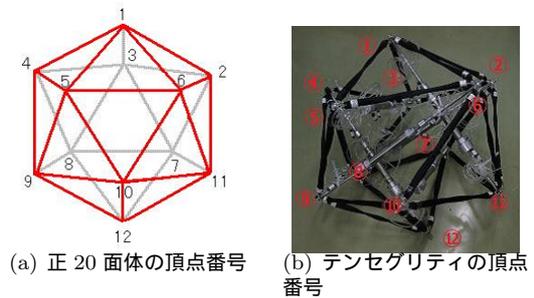
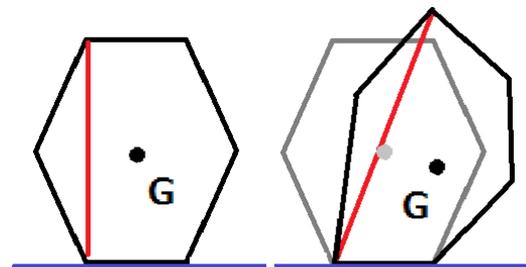


図 1 全体図



(a) 正 20 面体の頂点番号 (b) テンセグリティの頂点番号

図 2 頂点番号



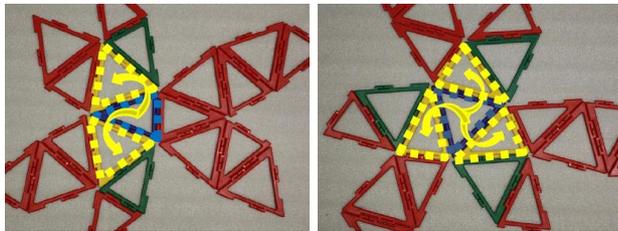
(a) 静止状態 (b) 運動状態

図 3 転がり移動モデル

動の原理として外郭変形によりバランスを失うことで転がり移動を行う。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する。本実験では各圧縮材の長さを変化させることにより外郭変形を起こす方法を用いる。図 3 に多面体の移動モデルを示す。G は多面体の重心位置を示し、外郭を変形することにより静止状態、運動状態を発生させることを示している。

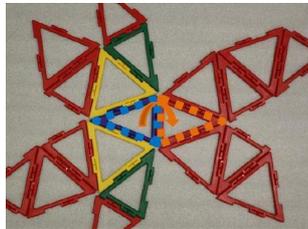
3.2 転がり移動パターン

テンセグリティロボットにおいては、接地パターンは面対称接地パターンと軸対称接地パターンの 2 種類



(a) 面 軸

(b) 軸 面



(c) 面 面

図 4 転がり移動パターン

存在する [4]．接地パターンは，地面に接地している三角形で表される．三角形は，その三個の頂点で表される．たとえば頂点 (1,3,4) で構成される二等辺三角形の接地面を面对称接地，頂点 (1,2,3) で構成される正三角形の接地面を軸対称接地である．実験を行う上で転がり移動パターンを以下のように設定した．

- 面 軸：面对称接地パターンから隣の軸対称接地パターンへの遷移
- 軸 面：軸対称接地パターンから隣の面对称接地パターンへの遷移
- 面 面：面对称接地パターンから隣の軸対称接地パターンへの遷移

たとえば接地面 (1,3,4) から接地面 (1,2,3) は面 軸，接地面 (1,2,3) から接地面 (2,3,7) は軸 面，接地面 (1,3,4) から接地面 (1,4,5) は面 面である．図 4(a) は青色の面对称接地から黄色の軸対称接地への遷移を表す．図 4(b) は青色の軸対称接地から黄色の面对称接地への遷移を表す．図 4(c) は青色の面对称接地から赤色の面对称接地への遷移を表す．

4. 転がり移動実験

4.1 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し張力材の伸縮による転がり移動と比較する [4]．任意のエアシリンダ 1 本を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，面 軸，軸 面，面 面の転がり移動の有無を確認する．頂点 (1, 11) の間にあるエアシリンダは，エアシリンダ (1,11) と表記する．図 5 に各実験を行うために用意した実験機器を示す [4]．エアシリンダへ 0~0.5 MPa の圧縮空気を 0.05 MPa 刻みで供給し実験を行う．空気圧の制御はレギュレータで行い，エアシリンダの制御は電磁弁の ON-OFF 制御で行う．

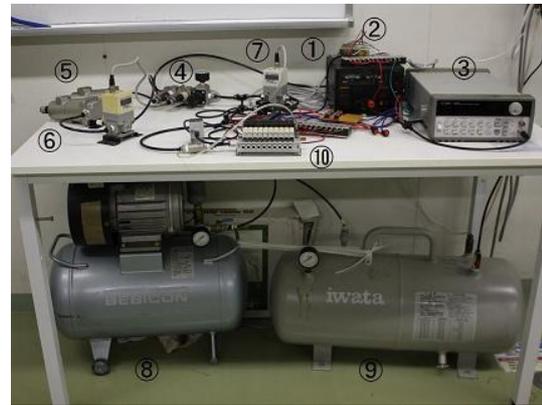
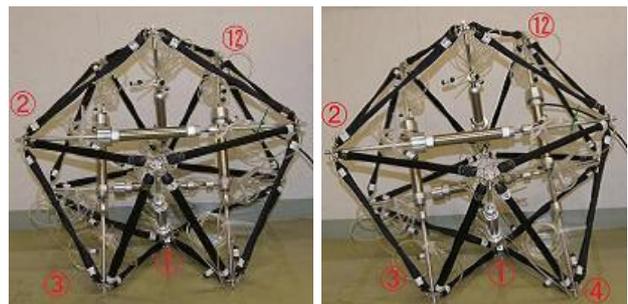


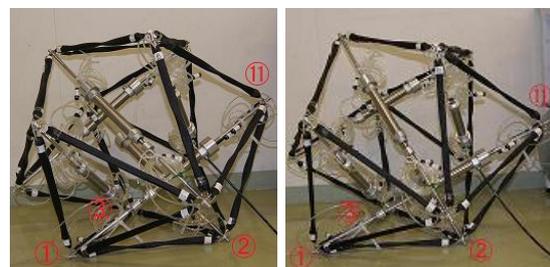
図 5 実験機器



(a) エアシリンダ駆動前

(b) エアシリンダ駆動後

図 6 面 軸



(a) エアシリンダ駆動前

(b) エアシリンダ駆動後

図 7 軸 面

4.2 実験結果

エアシリンダ 1 本による転がり移動の確認を行う．図 6 に面 軸の転がり移動の例として，接地面 (1,3,4) の状態でエアシリンダ (4,12) を駆動させた場合の外殻変形の様子を示す．面 軸の組み合わせ 16 通りにおける実験結果を表 1 に記す．図 7 に軸 面の転がり移動の例として，接地面 (1,2,3) の状態でエアシリンダ (1,11) を駆動させた場合の外殻変形の様子を示す．軸 面の組み合わせ 24 通りにおける実験結果を表 2 に記す．図 8 に面 面の転がり移動の例として，接地面 (1,3,4) の状態でエアシリンダ (1,11) を駆動させた場合の外殻変形の様子を示す．面 面の組み合わせ 12 通りにおける実験結果を表 3 に記す．

表 1 面 軸の実験結果

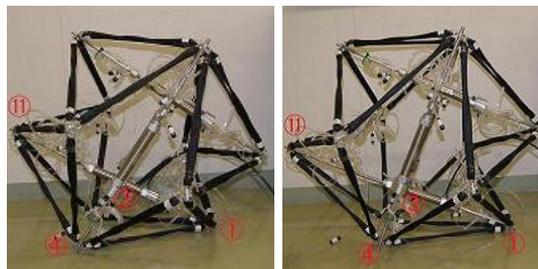
初期面	移動面	エアシリンダ	駆動圧力 [MPa]
1,3,4	3,4,8	1,11	0.50
1,4,5	4,5,9	1,11	0.50
1,4,5	1,5,6	4,12	0.50
1,2,6	1,5,6	2,8	0.50
2,3,7	2,7,11	3,5	0.50
2,3,7	1,2,3	7,10	0.50
3,7,8	7,8,12	3,5	0.50
3,7,8	3,4,8	7,10	0.50
4,8,9	4,5,9	2,8	0.50
4,8,9	3,4,8	6,9	0.50
5,6,10	6,10,11	3,5	0.50
5,9,10	4,5,9	7,10	0.50
7,11,12	7,8,12	1,11	0.50
8,9,12	9,10,12	2,8	0.50
8,9,12	7,8,12	6,9	0.50
10,11,12	6,10,11	4,12	0.50

表 2 軸 面の実験結果

初期面	移動面	エアシリンダ	駆動圧力 [MPa]
1,2,3	2,3,7	1,11	0.35
1,2,3	1,3,4	2,8	0.30
1,2,3	1,2,6	3,5	0.30
1,5,6	1,2,6	3,5	0.30
1,5,6	1,4,5	6,9	0.30
1,5,6	5,6,10	1,11	0.35
2,7,11	2,3,7	1,11	0.30
2,7,11	7,11,12	2,8	0.30
2,7,11	2,6,11	7,10	0.35
3,4,8	1,3,4	2,8	0.30
3,4,8	4,8,9	3,5	0.30
3,4,8	3,7,8	4,12	0.35
4,5,9	4,8,9	3,5	0.30
4,5,9	5,9,10	4,12	0.30
4,5,9	1,4,5	6,9	0.35
6,10,11	5,6,10	1,11	0.35
6,10,11	10,11,12	6,9	0.30
6,10,11	2,6,11	7,10	0.30
7,8,12	7,11,12	2,8	0.30
7,8,12	3,7,8	4,12	0.35
7,8,12	8,9,12	7,10	0.30
9,10,12	5,9,10	4,12	0.30
9,10,12	10,11,12	6,9	0.30
9,10,12	8,9,12	7,10	0.30

4.3 考察

先行研究の結果と今回の実験の駆動圧力を表 4 に示す [4]。表 4 からわかるように軸 面においては、最低駆動圧力が 0.05MPa 減少し、駆動に必要な空気量は 0.14L から 0.03L まで減少した。また面 面においては先行研究で移動が不可能であったため、今まで迂回していた移動パターンを最短で移動できるようになった。しかし面 軸においては、最低駆動圧力が 0.35MPa 増大し、駆動に必要な空気量は 0.02L から 0.03L まで増大した。軸 面、面 面において駆動圧力が減少した理由に図 6 における (1,2,11) のなす角度、図 8 における (1,4,11) のなす角度の変化が考えられる。



(a) エアシリンダ駆動前 (b) エアシリンダ駆動後

図 8 面 面

表 3 面 面の実験結果

初期面	移動面	エアシリンダ	駆動圧力 [MPa]
1,3,4	3,4,8	1,11	0.50
1,4,5	1,5,6	4,12	0.50
1,2,6	1,5,6	2,8	0.50
2,3,7	1,2,3	7,10	0.45
2,6,11	6,10,11	2,8	0.50
3,7,8	3,4,8	7,10	0.50
4,8,9	4,5,9	2,8	0.50
5,6,10	5,9,10	6,9	0.50
5,9,10	4,5,9	7,10	0.50
7,11,12	7,8,12	1,11	0.45
8,9,12	7,8,12	6,9	0.50
10,11,12	9,10,12	1,11	0.50

表 4 駆動圧力の比較

	張力材 [MPa]	圧縮材 [MPa]
面 軸	0.15	0.4
軸 面	0.4	0.35
面 面		0.5

5. 跳躍移動テンセグリティロボット

5.1 試作型跳躍移動テンセグリティロボット

前述したテンセグリティロボットでは段差に弱く活動範囲が限定される。そこで、エアシリンダの伸長動作に注目しストラット駆動で跳躍移動が可能か検証する。テンセグリティ跳躍ロボットの試作機として図 9 を制作した。図 9 の姿勢では全高 150mm、全幅 190mm である。ただし、柔軟な構造のため大きさはその都度様々な要因で変化する。重量は 312g である。制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 面体を構成するテンセグリティ球体構造を用いている。圧縮材兼アクチュエータとして自転車用空気入れの TOPEAK 製 Micro Rocket AL を用いている。張力材には 150 のゴムバンドを用いている。跳躍移動テンセグリティロボットの張力材はストラットの駆動の妨げにならないようにゴムバンドを使用している。

5.2 跳躍実験

接地しているエアシリンダ 2 本を 0.5MPa で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、跳躍の有無を確認する。実験環境に関しては第 4.1 節を

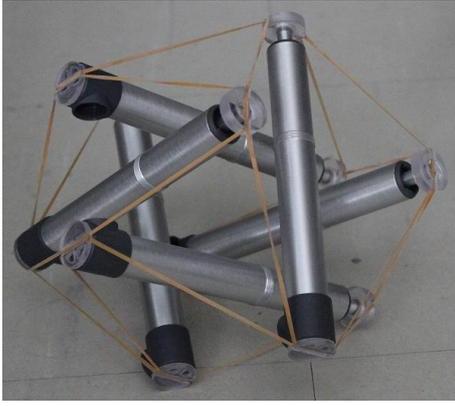


図 9 跳躍移動テンセグリティ

用いる。空気圧の制御はレギュレータで行い，エアシリンダの制御は電磁弁の ON-OFF 制御で行う。

5.3 実験結果

0.5MPa で跳躍実験を行う。図 10 に跳躍の様子を示す。跳躍高度は最大 250mm である。

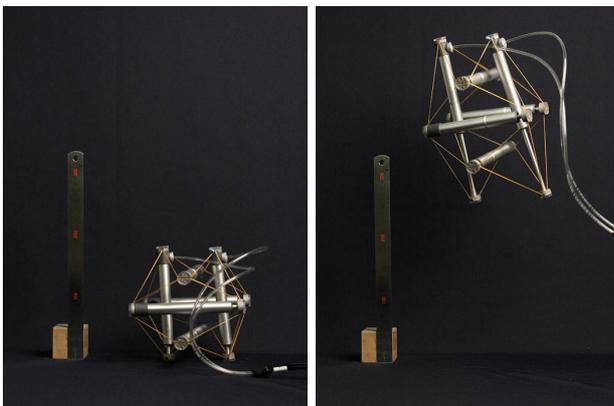
6. 結言

本研究ではテンセグリティ球体を用いた転がり移動ロボットの圧縮材をエアシリンダに変更したテンセグリティロボットを製作した。圧縮材の変形を用いることにより，張力材の変形のみでは転がれない移動パターンをなくし移動効率が上がった。またストラット駆動による跳躍移動が可能になったことがわかった。今後の課題としては，跳躍高度に関わる要素を明らかにし，跳躍高度を上昇させる予定である。

参考文献

- [1] 広瀬茂男：“ロコモーション研究の 20 年 - 私的回想と展望 - ”，日本ロボット学会誌，Vol.20, No.3, pp.1-6,2002。
- [2] 西條文雄，柴田瑞穂，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”，第 26 回日本ロボット学会講演集，2008。

- [3] 柴田瑞穂，寺師和真，仲瀬洸男，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”，第 27 回日本ロボット学会講演集，2009。
- [4] 小泉佑介雄，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
- [5] “BUCKMINSTER FULLER INSTITUTE”，<http://www.bfi.org/>
- [6] 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



(a) エアシリンダ駆動前

(b) エアシリンダ駆動後

図 10 跳躍実験