

Pre-pressure control によるテンセグリティロボットの 能動的変形制御

○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 pre-pressure control を用いたテンセグリティロボットの変形制御を提案する。

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での活動も求められている。しかし、不整地での活動においては転倒し、破損や復帰が困難となる危険性が常にあり対策が必要となっている。そこで、転倒という概念を持たない移動ロボットとして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][2][3]。

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 [4]。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 [5][6]。提案された移動ソフトロボットは多面体構造をしている。外殻変形を利用して転がりながら移動を行うことで転倒という概念を持たない移動を行うことができる。

文献 [7] により提案したテンセグリティロボットでは外殻変形により連続した転がり移動が可能であることを実証した。テンセグリティ構造の形状は圧縮材と張力材によって発生した内力のバランスにより決定される。張力材として用いている McKibben 型空気圧アクチュエータ [8][9] を駆動させる事により内力のバランスが崩れ, テンセグリティロボットは変形し転がり移動を実現している。そのため, 内力のバランスが, 安定した静止形状や転がり移動にとって重要となる。

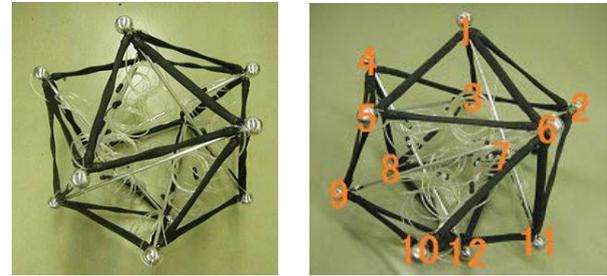
現在, テンセグリティロボットは駆動アクチュエータのみを制御しているため静止時形状や運動時形状の制御を能動的に行っていない。そのため, 張力材や圧縮材の個体差, 製作誤差, 荷重バランスの不一致による重心位置の偏りなどによりテンセグリティ構造に歪が発生する。この歪は内力のバランスを崩し, 安定した静止・運動の制御に影響を与える。そこで予めアクチュエータに圧力を供給し, 内力のバランスを整えることで安定したテンセグリティロボットの静止・運動制御を実現する pre-pressure control が必要であると考えた。

本報告においては提案されたテンセグリティロボットに対してアクチュエータを用いた形状の最適化を行うことにより静止状態及び転がり移動に与える影響について述べる。

2. テンセグリティロボット

2.1 概要

本研究においては文献 [7] で提案したテンセグリティロボットを用いている。



(a) 全体図

(b) 頂点番号

図 1 テンセグリティロボット

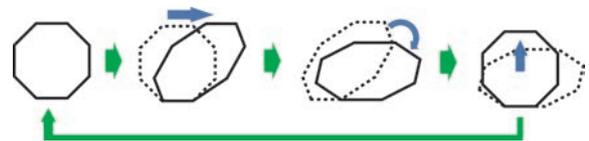


図 2 変形による多面体の転がり

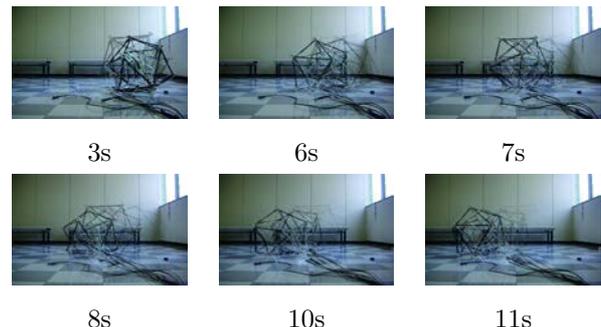


図 3 テンセグリティロボットの転がり移動

全体図を図 1(a) に示す。テンセグリティロボットは圧縮材として 570mm のアルミパイプを 6 本, 張力材として McKibben 型空気圧アクチュエータを 24 本用いている。アクチュエータには神田通信工業株式会社製「エアマッス」を用いている。1.0 インチタイプ, 可動部長 290mm, 無負荷時において約 34 % 収縮し, 最大 800N の張力が発生する [10]。テンセグリティロボットは図 1(a) の状態で高さ 590mm, 全幅 780mm, 重さ 3.3kg である。ただし, 柔軟な構造体であるため状態により大きさは変化する。

2.2 テンセグリティロボットの表現法

図 1(b) にテンセグリティロボットの頂点番号を示す。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。特に, 頂点番号 a,b,c で囲まれた三角形を面 (a,b,c), 頂点番号 d,e 間にあるアクチュエータをアクチュエータ (c,d) と表現する。

表 1 実験機器一覧

名称	メーカー	型番
コンプレッサ	Hitachi	0.40P-7S
タンク	Iwata	SAT-33H-100
メインラインフィルタ	SMC	AFF2C-02BC
ウォータセパレータ	SMC	AMG150C-02BC
レギュレータ	SMC	ITV2030-212BS
エアフィルタ	SMC	AF20-02C
ミストセパレータ	SMC	AFM20-02C
電磁弁	SMC	VQZ115R-5L-CP
圧力計	Convum	MPS-R3SRC4-CA

2.3 接地パターン

提案したテンセグリティロボットは図 1(b) の頂点番号 (5,6,10) など 2 本のアクチュエータと 3 つの頂点で囲まれた面対称接地パターンが 12 面と頂点番号 (1,5,6) など 3 本のアクチュエータと 3 つの頂点で囲まれた軸対称接地パターンの 8 面により構成されている [7].

2.4 転がり移動

テンセグリティロボットは移動手段として多面体の変形による転がりを用いている. 図 2 は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できることを示している. 転がり移動には 4 種の転がり移動パターン計 61 通りの転がり方があり, 2 種 20 面全ての面から転がり移動が可能である事がわかっている [7]. 図 3 にテンセグリティロボット実機による連続転がりの様子を示す.

3. 静止形状が転がり移動に与える影響に関する実験

3.1 Pre-pressure control

本章では pre-pressure control を用いた形状制御が転がり移動に与える影響について文献 [7] において実証した転がり移動パターンと比較し検証する.

テンセグリティロボットは形状を変化させる事により転がり移動を実現している. そのため, 変形前後の形状及び変形中の動的要因が転がり移動に大きな影響を持つと考えられる. 現在は変形に必要なアクチュエータのみに圧力を供給しテンセグリティロボットの変形を制御することで転がり移動を制御していた. そのため, 運動状態で駆動していないアクチュエータや静止状態においては McKibben 型空気圧アクチュエータが元々持つ弾性力のみで形状を維持している. そこで, 静止状態においても予め圧力をアクチュエータに供給し, 運動状態においても変形に用いているアクチュエータ以外に対しても圧力を供給することで能動的に形状の制御を行う pre-pressure control を用いた.

3.2 実験内容

Pre-pressure control による形状制御が与える影響について実験を行った. 予め 24 本すべてのアクチュエータに与圧し転がり移動実験を行った. 予め供給する圧力は 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10MPa の 5 段階に設定した. 転がり移動に用いるアクチュエータは 2 本一組で駆動させ, 供給する圧力は 0.50MPa とした.

本実験において用いた実験機器を表 1 に示す.

3.3 実験結果

Pre-pressure control を用いた上で 27 通りの転がり移動を行った. 各転がり移動パターンに対する実験結果を以下に示し, 表 2 にまとめる.

1. 転がり移動パターン「面軸」の場合

従来の結果では 50 通り存在した転がり移動パターン「面軸」のうち 20 通りが従来の転がり移動と同様の転がりを行った.

2. 転がり移動パターン「面軸面」の場合

従来の結果では 2 通り存在した転がり移動パター

表 2 Pre-pressure と転がり移動組み合わせ数の分布

転がりパターン	Pre-pressure [MPa]				
	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
面軸 [通り]	20	17	15	12	4
面軸面 [通り]	2	2	2	1	0
軸面 [通り]	3	0	0	0	0
軸面軸 [通り]	2	0	0	0	0

ン「面軸面」のうち 2 通りが従来の転がり移動と同様の転がりを行った.

転がり移動パターン「面軸面」においては pre-pressure の値により転がり移動に変化が生じることが分かった.

本来, 「面軸面」はアクチュエータ (1,3),(1,5) を駆動させた場合には接地面 (1,3,4) から (1,2,3) を経由し (1,2,6) へ 2 段階に転がり移動するパターンとなっている. しかし, pre-pressure として 0.04MPa 以上の圧力を用いた場合, 接地面 (1,3,4) から (1,2,3) への転がり移動となり面 (1,2,6) まで転がらないことが分かった. つまり, pre-pressure として 0.00~0.04MPa を供給した場合には 2 段階の転がり移動パターン「面軸面」となり, 0.04MPa 以上の圧力を供給した場合には 1 段階の転がり移動パターン「面軸」になるということが分かった.

「面軸面」と「面軸」を切り替え可能なアクチュエータ対を表 3 に, 転がり移動の経路を図 6 に示す.

3. 転がり移動パターン「軸面」の場合

従来の結果では 6 通り存在した転がり移動パターン「軸面」のうち 3 通りが静止形状を作成したうえで転がり移動を行った. 図 4 にアクチュエータ対と転がり移動の関係を示す.

4. 転がり移動パターン「軸面軸」の場合

従来の結果では 3 通り存在した転がり移動パターン「軸面軸」のうち 2 通りが静止形状を作成したうえで転がり移動を行った.

以上の結果より, 「面軸面」「面軸」の切り替えが可能なアクチュエータ対は「軸面」を行うアクチュエータ対でもあり図 4, 5, 6 に示すように 12 対のアクチュエータ対のみで連続転がり可能であることが分かった.

表3 「面軸」「面軸面」「軸面」を制御可能なアクチュエータ対

1	(1,3),(1,5)	7	(2,7),(7,8)
2	(1,2),(2,11)	8	(4,8),(8,12)
3	(2,3),(3,8)	9	(4,9),(9,12)
4	(3,4),(4,5)	10	(6,10),(9,10)
5	(5,6),(5,9)	11	(7,11),(10,11)
6	(1,6),(6,11)	12	(7,12),(10,12)

4. 考察

初めに、予め与えておく圧力が高くなるほどテンセグリティロボットの転がり移動パターン数が減少した事について考察を行う。

テンセグリティロボットの变形性はテンセグリティ構造の剛性によって決まり、その剛性は張力材の弾性によって決まる。Pre-pressure control によって全てのアクチュエータに圧力が供給されることで各張力材の弾性が強くなり、テンセグリティロボットの剛性が高くなったため变形が起りにくくなったと考えられる。つまり、転がり移動を行うためにより大きな変形量が必要となり、それに満たない変形量の組み合わせが発生したことにより減少したと考えられる。

しかしながら、連続転がりに必要な転がり移動パターン「面軸」は0.10MPaまで、「軸面」は0.06MPaまで転がり移動可能なパターンが存在することがわかった。そのため、選択できる転がり移動パターン数は減少するものの連続転がりは可能である。

次に、転がり移動パターン「面軸面」において pre-pressure の値を変化させることにより移動先が選択可能となったことについて考察を行う。

転がり移動パターン「面軸面」において pre-pressure の値を上げた際に「面軸面」から「面軸」へ転がりの切り替わりが起きた要因として、構造体の剛性が上がりテンセグリティロボットの变形量が抑えられた可能性と移動先である軸対称接地パターンの安定性が高くなった可能性が挙げられる。つまり、pre-pressure の値が低い場合は変形量が維持されかつ軸対称接地パターンでの安定性の向上も小さいため2段階の転がりを行い、値が上がるにつれて変形量が抑えられかつ安定性が向上したため1段階の転がりで終息したと考えられる。

転がり移動パターン「軸面軸」において同様の切り替わりが見られなかった理由として、元々、「軸面軸」が転がり移動に大きな変形量を必要とする転がり移動であることが挙げられる。Pre-pressure の値が上がることで面対称接地パターンの安定性が向上し、1段階で転がりが終息する前に変形量が不足し転がり自体ができなくなったため転がり移動パターン「面軸面」の様な転がりの切り替わりが起きなかったと考えられる。

5. 結言

本報告では予め供給した圧力により能動的に形状を制御する pre-pressure control について提案し、検証した。

実験結果より pre-pressure を用いることにより静止状態において变形が起りにくく、静止安定性が向上しているということが分かった。そして、その状態においても連続転がり移動が可能であることが実証できた。

また、転がり移動パターン「面軸面」は pre-pressure の値により「面軸面」だけでなく「面軸」を行うことができ、圧力の値によって任意に切り替え可能であることも分かった。この「面軸面」「面軸」の切り替えが可能なアクチュエータ対は転がり移動パターン「軸面」を行うアクチュエータ対でもあり、pre-pressure control により予め供給する圧力を制御することで12対のアクチュエータ対のみを用いて転がり移動パターン「面軸」「軸面」「面軸面」を制御し連続転がりが可能であることが分かった。つまり、24本すべてのアクチュエータを個別に制御する必要がなく、12対のアクチュエータ対を制御することでテンセグリティロボットの転がり移動を制御可能となった。これにより、電磁弁の削減や制御系の簡素化も可能となる。

今後は pre-pressure control により向上した静止安定性に関する実験、検証や転がり移動の荷重に対するロバスト性に関する実験、検証を行っていく予定である。

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] 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
- [3] 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
- [4] “BUCKMINSTER FULLER INSTITUTE”, <http://www.bfi.org/>
- [5] “K. Snelson のウェブサイト”, <http://www.kennethsnelson.net/>
- [6] 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(ホワイトライト)-“(2011/1/27 現在) <http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/topics/011109/20011109Fujii.html>
- [7] 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
- [8] 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
- [9] 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
- [10] “神田通信工業株式会社のウェブサイト”, <http://www.kanda.co.jp/>

駆動アクチュエータ対

- ①. (1,3),(1,5)
- ②. (1,2),(2,11)
- ③. (2,3),(3,8)
- ④. (3,4),(4,5)
- ⑤. (5,6),(5,9)

- ⑥. (1,6),(6,11)
- ⑦. (2,7),(7,8)
- ⑧. (4,8),(8,12)
- ⑨. (4,9),(9,12)
- ⑩. (6,10),(9,10)
- ⑪. (7,11),(10,11)
- ⑫. (7,12),(10,12)

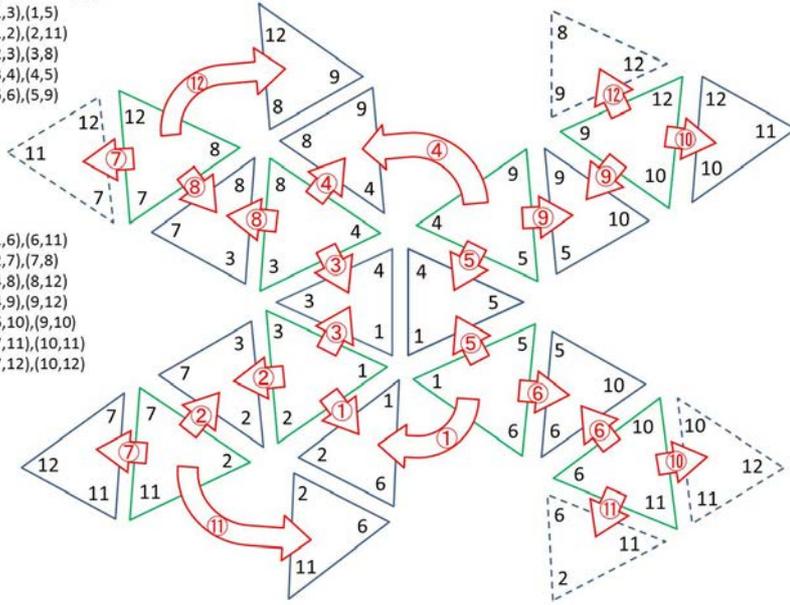


図4 転がり移動パターン「軸面」

駆動アクチュエータ対

- ①. (1,3),(1,5)
- ②. (1,2),(2,11)
- ③. (2,3),(3,8)
- ④. (3,4),(4,5)
- ⑤. (5,6),(5,9)
- ⑥. (1,6),(6,11)
- ⑦. (2,7),(7,8)
- ⑧. (4,8),(8,12)
- ⑨. (4,9),(9,12)
- ⑩. (6,10),(9,10)
- ⑪. (7,11),(10,11)
- ⑫. (7,12),(10,12)

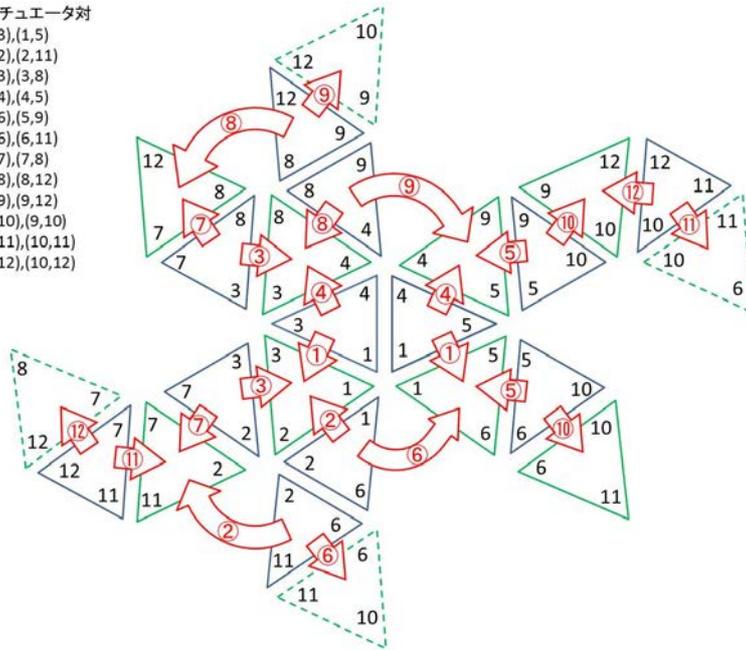


図5 転がり移動パターン「面軸」

駆動アクチュエータ対

- ①. (1,3),(1,5)
- ②. (1,2),(2,11)
- ③. (2,3),(3,8)
- ④. (3,4),(4,5)
- ⑤. (5,6),(5,9)

- ⑥. (1,6),(6,11)
- ⑦. (2,7),(7,8)
- ⑧. (4,8),(8,12)
- ⑨. (4,9),(9,12)
- ⑩. (6,10),(9,10)
- ⑪. (7,11),(10,11)
- ⑫. (7,12),(10,12)

- ← 0.04MPa~0.06MPa
- ←..... 0.00MPa~0.04MPa

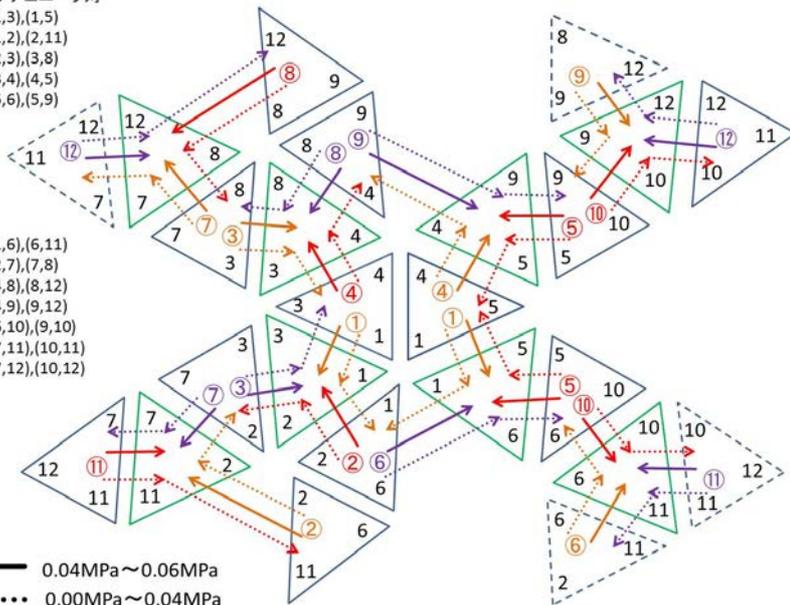


図6 転がり移動パターン「面軸面」「面軸」切り替え