

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	空圧人工筋を用いた大変形ソフトテンセグリティロボット
Title(English)	
著者(和文)	小林亮太
Author(English)	Ryota Kobayashi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京科学大学, 報告番号:甲第706号, 授与年月日:2026年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:難波江 裕之,遠藤 玄,前田 真吾,中西 洋喜,塚越 秀行
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Institute of Science Tokyo, Report number:甲第706号, Conferred date:2026/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

令和7年度 学位論文

空圧人工筋を用いた
大変形ソフトセンセグリティロボット

東京科学大学 工学院 機械系
小林 亮太

目次

第 1 章	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.2	研究目的	13
1.3	本論文の構成	14
第 2 章	細径人工筋の屈曲駆動耐久性向上	15
2.1	屈曲状態での繰り返し駆動時における細径人工筋の損傷機序	15
2.2	接着剤塗布による屈曲状態での細径人工筋の耐久性向上手法	17
2.3	細径人工筋のスリーブへの接着剤の塗布	17
2.4	接着剤を塗布した細径人工筋の性能評価	21
2.5	まとめ	25
第 3 章	細径人工筋の巻き付けによるテンセグリティモジュールの大変形	27
3.1	本章で実現するテンセグリティの変形について	27
3.2	細径人工筋を用いたテンセグリティの部分的変形	30
3.3	テンセグリティ構造全体の変形手法	31
3.4	テンセグリティのモデル化と設計	35
3.5	テンセグリティの構造変形評価	43
3.6	まとめ	51
第 4 章	巻き付けテンセグリティモジュールによるロボット	52
4.1	巻き付けテンセグリティのロボットへの適用	52
4.2	インチワーム型ソフトテンセグリティロボット	53
4.3	曲げ動作を利用したソフトテンセグリティアーム	59
4.4	ねじり操作可能なソフトテンセグリティマニピュレータ	65
4.5	まとめ	67
第 5 章	非加圧時に受動的伸長性を有する空圧人工筋	69
5.1	従来の空気圧人工筋の受動的伸長性	69
5.2	受動的伸長性を有する人工筋の基礎的検討	71
5.3	任意の長さで駆動可能な人工筋	80

5.4	拮抗駆動型ロボットアームへの適用	86
5.5	まとめ	87
第 6 章	受動的伸長性を持つテンセグリティモジュールの大変形	88
6.1	受動的伸長性を有する人工筋を用いた三角形の扁平化による変形	90
6.2	空圧シリンダと受動的伸長性を有する人工筋によるテンセグリティの設計	90
6.3	人工筋駆動によるテンセグリティの剛性変化	95
6.4	遺伝的アルゴリズムを用いた駆動最適化	96
6.5	まとめ	98
第 7 章	拡大変形を伴うソフトテンセグリティロボット	99
7.1	拡大変形を伴うテンセグリティのロボットへの適用	99
7.2	転がりと展開を行うソフトテンセグリティロボット	100
7.3	展開動作可能なインチワーム型ソフトテンセグリティロボット	103
7.4	2 つの三角形の扁平化手法によるテンセグリティ大変形の比較	105
7.5	まとめ	107
第 8 章	結論	108
8.1	本研究の成果	108
8.2	今後の展望	110
付録 A	本研究で用いた空圧システムに関する製作技術	112
参考文献		117
業績一覧		126

図目次

1.1	Tensegrity structure. (A) Kurilpa Bridge [1]. (B) Public art sculpture utilizing tensegrity structure [2]. (C) Tensegrity-based toy for infants [3]. All the images are adapted and relabeled from the original figures.	1
1.2	Soft tensegrity robots. (A) TR3 [4]. (B) SuperBall [5]. (C) SUPERball v2 [6]. (D) Variable-stiffness tensegrity spine [7]. (E) v-expander tensegrity robot [8]. (F) Dual stiffness tensegrity [9]. (G) A three-dof actuated robot [10]. (H) Strut-driven tensegrity [11]. (I) Modular tensegrity robot arm [12]. (J) Vibrating tensegrity robot. [13]. (K) Membrane-driven tensegrity robots [14]. (L) Spikebot [15]. (M) Shape-changing wheeling and jumping robot [16]. (N) 3D printed cable network [17]. (O) 3d-printed programmable tensegrity [18]. All the images are adapted and relabeled from the original figures. . .	4
1.3	(A) Tensegrity structure capable of large deformation into various configurations. (B) Cave exploration using the highly deformable tensegrity. (C) Supporting a semi-collapsing structure using the highly deformable tensegrity.	7
1.4	Operating principle and the physical artificial muscle.	8
1.5	Large deformation of the entire structure achieved by combining the compression deformation of triangles.	11
1.6	Compressive deformation and passive expansion of a triangle using artificial muscles. (B) Case using standard artificial muscles. (C) Case using thin artificial muscles in a bent state. (D) Case using artificial muscles with passive stretchability.	12
1.7	Structure of the thesis.	14
2.1	(A) Driving mechanism of thin McKibben muscle. (B) Appearance of the drive of the thin McKibben muscle in a bent state. (C) Fiber-to-fiber misalignment of the sleeve of the artificial muscle during repetitive driving in a bent state. (D) Mechanism of thin pneumatic artificial muscle breakage. . .	16

2.2	Proposed method of thin pneumatic artificial muscle with adhesive for the enhancement of durability in a bent state. (A) Structures to prevent fiber displacement. (B) Method to apply adhesive to the sleeve. (C) Modeling of thin McKibben muscle sleeve.	18
2.3	Surface of the sleeve of artificial muscle.	20
2.4	(A) Contraction of normal thin McKibben muscle and thin McKibben muscle with adhesive. (B) Surface of the sleeve. (C-G) Actuation performance of thin McKibben muscle with adhesive.	22
2.5	(A) Durability test equipment and driving system. (B) Repetitions number before breaking with respect to D/d ratio. (C) Repetitions number before breaking with respect to the thin McKibben muscle's angle. (D) Surface of the inner rubber tube caused breaking mode 2.	24
3.1	Node labeling of the tensegrity structure used in this study.	28
3.2	Definition of deformation magnitude of the tensegrity structure.	29
3.3	Method for attaching artificial muscles to the tensegrity structure. (A) Attachment scheme to bring a node and a strut closer. (B) Attachment scheme to bring two nodes closer.	31
3.4	(A) Two artificial muscles that affect the height displacement of A_1^1 when using the "4/3 muscle winding" method. To give an upward displacement to A_1^1 , the artificial muscle in (i) should be driven, and to give a downward displacement, the artificial muscle in (ii) should be driven. (B) Artificial muscles to be driven and the deformation at that case.	33
3.5	(A) Torsional deformation between triangles due to proximity between two points. (B) (i) Three ways to divide the four triangles into two pairs. Three methods to place artificial muscles between (ii) red, and (iii) blue triangles. Considering (i), (ii), and (iii), there are $3 \times 3 \times 3 = 27$ placement methods of the artificial muscles.	34
3.6	(A) Load on the rubber thread used in the tensegrity structure with respect to normalized length by natural length. (B) Force characteristic of thin artificial muscles.	37
3.7	Simulation of tensegrity deformation: (A) Contraction and (B) Stretch. . . .	38
3.8	(A) Diameter and (B) height, normalized by their initial values, with respect to the natural length of the rubber thread.	39
3.9	Simulation of tensegrity deformation: Bending.	40
3.10	Bending angle of the bend module with respect to the natural length of the rubber thread when the 0.4 MPa is applied to the artificial muscles.	40

3.11	Simulation result of torsion angle ψ with respect to pressure applied to the artificial muscles and in all placement methods that can cause torsion. In this study, the larger torsion angle at the point of 0.4 MPa is considered superior. The data are shown up to the point where strut-to-strut contact occurred in the simulation. For those without data at 0.4 MPa, the torsional angle at strut-to-strut contact occurred was used to optimize the artificial muscles arrangement.	41
3.12	Simulation result of a range of height changes relative to pressure changes, normalized by initial height with respect to the most torsion angle using all placement methods that can cause torsion. Torsion angle is desired to be large, and rate of change in height is desired to be small.	42
3.13	Simulation results of torsional deformation of tensegrity, with artificial muscles placed in the optimal position to produce torsion ($A_1^1 A_2^1$, $A_1^2 C_2^2$).	42
3.14	(A) Component to be attached to the tip of the strut. (B) Fittings to split one tube into six tubes.	43
3.15	(A) Contracted state. (B) Initial state. (C) Stretched state.	44
3.16	(A) Diameter and (B) height, normalized by their initial values, with respect to the applied pressure to artificial muscles when the natural length of rubber thread is 50 mm.	44
3.17	Deformations of bend module. (A) Initial state. (B) Contraction. (C) Stretching. (D)-(I) Bending in six different directions. Method of driving the artificial muscles is shown at the upper right of each picture.	45
3.18	Bending angle of the bend module with respect to the pneumatic pressure applied to the artificial muscles.	46
3.19	Comparison with bending angles of tensegrity in other studies	46
3.20	(A) Bending deformation of soft tensegrity modules with and without the adhesive. (B) Durability test results of one tensegrity module.	47
3.21	(A) Deformation in tensegrity structure. (A) When pressure of 0.4 MPa is applied to ($A_2^2 A_1^2$, $A_2^1 C_1^1$). (B) Initial state. (C) When pressure of 0.4 MPa is applied to ($A_1^1 A_2^1$, $A_1^2 C_2^2$).	48
3.22	Experiment result of (A) torsion angle and (B) height normalized by initial value with respect to the pressure applied to the artificial muscles.	48
3.23	Comparison with torsion angles of tensegrity in other studies	49
3.24	(A) Deformation of the tensegrity gripper. (B) Gripping force of a tensegrity gripper.	50
4.1	Tensegrity locomotion robot consisting of five contractile modules.	53
4.2	Driving principle of the tensegrity robot and the control signal.	54

4.3	Adaptation of the robot to the width of the wall.	55
4.4	Speed of the robot with respect to wall-to-wall spacing.	56
4.5	(A) Moving along a straight path. (B) Moving along a curved path. (C) Vertical tube climbing demonstration.	56
4.6	Speed of the robot with respect to sequence time interval ΔT when the wall spacing is 210 mm.	57
4.7	Behavior of the tensegrity robot inducing propulsion from contact with a mud wall.	58
4.8	Tensegrity robot movement on a curved path in the field test.	58
4.9	(A) Developed tensegrity arm consisting of two bend modules. The two structures are connected so that they are mirror images respect to the plane of symmetry. (B) Bending deformation when 0.4 MPa is applied to the artificial muscles. (C,D) Motion capture markers attached to the tensegrity arm. . .	59
4.10	Trajectory of the arm tip when the pneumatic pressure is varied. There are two patterns shown in (A) and (B). As shown in (C), the arm tip can move in six directions.	60
4.11	Deformation when a total of 600 g weight is suspended at the tip of the arm with the arm bent.	61
4.12	The bending angle displacement of the arm when a moment is applied to the root of the arm by a weight.	62
4.13	Demonstration of the tensegrity arm with grip module attached to pick and place of balls. (A) Initial state. (B) Down the arm and grip the ball. (C) Lift the arm. (D) Move and sort balls according to their colors in three directions. (E) Release the ball.	62
4.14	(A) Ball throwing tensegrity arm driven by thin pneumatic artificial mus- cles. (B) Ball throwing experiment of two types of arms. One is with thin McKibben muscles with the proposed method; the other is with normal thin McKibben muscles. (C) Repetitions number before breaking one artificial muscle of the two types of arms. (D) Appearance of the artificial muscle sleeve after repetitive throwing experiment. (E) Appearance of the broken artificial muscle.	64
4.15	Tensegrity arm consisting of two modules that can torsion, a module that can lift and a module that can grip. (A) Initial state. (B) Pressurized state. . .	65
4.16	(A) Module II showing arms down while Module III grips the cap. (B) Torsion the arm in the direction to loosen the cap with the Module I. (C) Module III releases the cap and Module II lifts the arm. (D) Torsion Module I back to its original state. (E) After turning the cap four times, the cap could be removed by lifting the arm without releasing the cap.	66

4.17	Tensegrity arm movement experiment. (A) Initial state. (B) Grasp the driver. (C) Rotate the arm tip in the direction to tighten the screw. (D) Open the gripping module of the arm. (E) Restore the initial state.	68
5.1	(A) Antagonistic actuation without slack. The movement of the robotic arm is severely restricted because the non-actuated muscle does not extend. (B) Antagonistic actuation with slack. The range of motion of the robotic arm is reduced due to the initial slack.	70
5.2	(A) Structure of the proposed stretchable artificial muscle. (B) Extension of the artificial muscle is achieved by stretching the inner rubber thread. (C) Contraction mechanism: (C.i) Inner silicone tube presses the thread against the sleeve, locking it in place. (C.ii) Sleeve contraction pulling the locked thread, which buckles into a wavy pattern within the sleeve. (D) Internal structure and variables, where $\ell_{\text{thread,out}} = 0$ mm at $F = 0$ N.	71
5.3	Fabrication of stretchable muscle. (A) Internal structure assembly. (B) Connection between rubber thread and inextensible thread. (C) Sleeve preparation. (D) Cutting of silicone tube. (E) Sleeve installation.	73
5.4	Performance evaluation of conventional and stretchable artificial muscles. The plots display the mean values with shaded regions representing standard deviation (sample size = 5). (A) Sleeve contraction ratio as a function of applied pressure, without sleeve-thread slippage effects. The stretchable muscle achieves typical contraction ratios under load but shows a 2% lower ratio when unloaded, as the rubber thread cannot contract. (B) Load as a function of elongation ratio under unpressurized conditions.	74
5.5	Sleeve-thread slippage under different conditions. The plots display the mean values with shaded regions representing standard deviation (sample size = 5). (A) Slippage during pressurization to 0.4 MPa. (B) Force-induced slippage after applying 0.4 MPa.	76
5.6	(a) Detailed analysis of slippage mechanism from Fig. 5.2A to C.ii. (b) Diameter of the sleeve and unconstrained silicone tube.	78
5.7	Durability test of McKibben muscles with passive stretchability.	79
5.8	(A) Single rubber configuration: Force transmission fails when the cord exits the sleeve. (B) Dual rubber configuration: The artificial muscle achieves contraction proportional to the sleeve's contraction ratio at any length. . . .	81
5.9	Fabrication method of lossless stretchable McKibben muscle. (A) Fabrication method of inserted thread. (B) Fabrication method of rubber tube. (C) Fabrication method of sleeve. (D) Assembling of artificial muscle.	84

5.10	(A) Activation performance of lossless stretchable McKibben muscle. (B) Contractile performance of conventional McKibben muscle and lossless stretchable McKibben muscle. (C) Passive stretchability of conventional McKibben muscle and lossless stretchable McKibben muscle.	85
5.11	Motion of a robotic arm using antagonistic actuation. (A) Case using standard artificial muscles. (B) Case using stretchable artificial muscles.	86
6.1	(A) Stretchable artificial muscle generating 5 N tension at initial length. (B), (C) Tensegrity deformation using conventional (B) and stretchable artificial muscles (C). (D) Axial and radial strain versus applied pressure, where strain represents the length change indicated by arrows. Tensegrity visualization from motion capture data (red: with conventional McKibben muscles, blue: with stretchable muscles).	89
6.2	(A) Tensegrity capable of large deformation and variable stiffness, composed of six pneumatic cylinders and 24 stretchable artificial muscles. (B) Strain of the tensegrity structure versus the stiffness of the tension members. (C) Load on the rubber threads constituting the tensegrity.	91
6.3	Fabrication method of air cylinder. (A), (B) 3d printed component. (C) Inner tube and Outer tube. (D) Assembled air cylinder.	94
6.4	Stiffness change of the tensegrity structure. (A) State with the pneumatic cylinder contracted. (B) State with the pneumatic cylinder extended. Stiffness is increased by applying pneumatic pressure to all artificial muscles after extending the cylinder.	95
6.5	Optimization of actuator combinations using an genetic algorithm. (A) Search space. (B) Initial state. (C) Optimization and experimental validation of actuator combinations maximizing height and volume.	97
7.1	Feasibility of transitions between tensegrity deformation modes based on the passive stretchability of artificial muscles.	100
7.2	(A) Tensegrity robot equipped with a battery, valves, control system, and sensors. (B) Optimization of rolling deformation using an evolutionary algorithm. (C) Simulation-based generation of actuation patterns for path following. (D) Overview of the demonstration setup for the rolling bridge-support robot. (E) Experimental demonstration of the bridge-supporting robot. . . .	102
7.3	(A) Mobile robot composed of combined tensegrity structures. (B) Deformation of individual structures. (C) Actuation patterns for locomotion. (D) Locomotion of the physical robot. (E) Structural deployment, showing the expansion of the central unit.	104

A.1	Adhesive-free connection between a 4 mm tube and a 3 mm tube.	113
A.2	Fabrication of a T-shaped pneumatic tube.	113
A.3	Fabrication of a pneumatic plug	114
A.4	Fabrication of 3D-printed pneumatic fittings.	114
A.5	Driving principle of the tensegrity robot and the control signal.	115
A.6	Method to make a spiral tube.	115

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

1.1.1 テンセグリティ構造

テンセグリティ (Tensegrity) は張力 (Tensile) と統合 (Integrity) を合成した言葉としてバック ミンスター・フラーによってつくられた概念であり、圧縮を支持する硬い棒状の剛体と引張を支持するケーブルから成る構造 (図 1.1) である [19]. この構造は、図 1.1 に示すように、形状を維持するために必要な圧縮力または引張力を支える部分にのみ部材が配置されており、構造を形成するための必要最小限の構成とされている [20]. このため、一般的な構造体に比して非常に軽い部材で大きな空間を占めることができる. 構造内のストラットは互いに接することがなく引張りを受ける紐によって接続されており、全ての部材に働く引張力と圧縮力が釣り合った状態で安定した姿勢をとる.

テンセグリティ構造はもともと、建築 [21, 1] や芸術 [2, 22] などの分野において生み出された構造で、構造の軽量性を利用することで図 1.1A,B に示すような数十メートル規模の非常に大きな構造物が実現されてきた. この構造は図 1.1C に示す手のひらに乗るほどの大きさの幼児向けの玩



Fig. 1.1: Tensegrity structure. (A) Kurilpa Bridge [1]. (B) Public art sculpture utilizing tensegrity structure [2]. (C) Tensegrity-based toy for infants [3]. All the images are adapted and relabeled from the original figures.

具 [3] にまで広く活用されており、スケーラビリティに富んでいる。

1.1.2 ソフトテンセグリティロボット

建築で用いられるテンセグリティ構造のように引張部材として金属ワイヤなどの伸びにくい材料を用いた場合には、構造全体の剛性は高くなる。一方で、テンセグリティ構造の一部または全体に柔らかい材料を用いた場合には、構造全体の剛性は低くなり、柔軟性を有する。この柔軟なテンセグリティ構造は、近年、ソフトロボット分野における応用がなされている [23]。

ソフトロボット [24] とはボディに柔軟性を取り入れることで環境への適応性を向上するロボットである。ロボットの研究では従来、硬い構造と緻密な制御によって動作の素早さ、正確さを追い求めてきた。人をはじめとする生物は逆に、身体の柔軟性を活かすことによって周囲の環境形状に適応した動作を得意とする。例えば、物を掴むという動作においては、従来の硬いロボットは緻密な制御を行う必要があるが、生物のような柔軟な指をもつロボット [25] は複雑な制御なしに物を掴むことを可能とする。ボディに柔軟性を取り入れることによって周囲の環境に適応した動作実現を目指すロボットがソフトロボットである。柔軟性を持つテンセグリティ構造をロボットのボディとして用いることによって、一般的なソフトロボットのもつ環境への適応性を持ちつつ [13, 26]、テンセグリティ特有の性質を活かしたロボットを実現することができる。

他の一般的なソフトロボット [24] が持たない特性として、柔軟なテンセグリティ構造を持つロボットには軽量さ、スケーラビリティ、展開性、衝撃吸収性、剛性変化が容易であるといった特性がある。まず、通常の構造体に比べて少ない要素で構成可能であるため、軽いロボットを実現しやすい。また、もともと建築で用いられていた構造であるように、柔軟ボディのみから成るソフトロボットと比較して、大きな構造を形成しやすい。構造全体の折り畳みやストラットの長さ変化による収納性、展開性 [27, 28, 29] により、ロボットの運搬を容易にすることが可能である。さらに、構造全体に柔軟な要素を取り入れたテンセグリティは、衝撃が加わった際には力を構造全体に分散させ、局所的な応力集中を防ぐことができる [30, 31]。このため、高い位置から落下した場合や、ロボットが周囲の環境へ衝突した際に、ロボットの致命的な損傷を防ぐことが可能である。剛体の圧縮部材を有するテンセグリティ構造は引張部材の剛性変化により構造全体の剛性を変化させることができるため、剛性変化が容易である [32, 33]。

テンセグリティ構造を用いることで衝撃吸収性や柔軟性による環境への形状適応性を積極的に利用しようとしたロボットはソフトテンセグリティロボット (soft tensegrity robot) と呼ばれることがある [13, 34, 35]。ここではまず、ソフトロボットにおけるテンセグリティ構造の構成、アクチュエーション方法、製作方法の観点からこれまでに研究されてきたソフトテンセグリティロボットについて述べる。その後、これまでのソフトテンセグリティロボットが有する課題について述べる。

ソフトロボットにおけるテンセグリティ構造

ソフトロボットに用いられるテンセグリティ構造には、ストラット状の剛体要素のみを有するものとテトラポッド形状などを含む非ストラット状の剛体要素を有するものがある。テンセグリ

ティ構造を構成する全ての剛体要素がストラットである場合、理論上、ストラットとケーブルにはそれぞれ軸方向の力のみが働く。このため、各部材は大きな曲げやせん断力を支える必要がなく、力を考慮した構造設計が比較的単純になる。ストラットを用いたテンセグリティ構造において最も単純な構成を有するものは 3 本のストラットと 9 本の引張部材から成るテンセグリティ構造である。この構造は単純な構成を有するために実機製作が比較的容易である。この構造を用いたソフトテンセグリティロボットとして、移動型ロボット [4, 36, 37] が開発されている (図 1.2A)。球体形状を有するテンセグリティ構造 [6, 38, 5, 39, 40, 41, 42] は広く研究されており、6 本のストラットと 24 本の引張部材を用いたテンセグリティ構造はの中では最も単純な構成を有している。NASA の開発している SUPERBall シリーズが代表的な例である [6, 5] (図 1.2B,C)。バージョンにより多少の差はあるものの、ばねやナイロンなどによる弾性を有するケーブルが用いられている。通常、ローバーの着陸には非常に精密で複雑な制御が求められ、その実現は容易ではない。一方でテンセグリティ構造をローバーのボディに用いた場合、構造の衝撃吸収性を利用することが可能となり、着陸時の緻密な制御が必要なくなると考えられる。このため、宇宙ロボティクスへの活用は、ソフトテンセグリティロボットの重要な応用の一つである。非ストラット形状の剛体要素を有するソフトテンセグリティロボットとしては、脊椎形状を模した構造が多く研究されている。一つの例が動物の脊椎の機能を模倣した例である [7, 43, 44]。動物の脊椎は、高い剛性により大きな荷重を支えられる一方、必要に応じて柔軟に動作する。文献 [7] に示す研究では、ワイヤ駆動系により脊椎のような高い剛性変化を実現している (図 1.2D)。

テンセグリティ構造をソフトロボットに利用する際、柔軟部材の適用方法により、ロボットの性質が変化する。ソフトテンセグリティロボットの多くは引張を支えるケーブル部分に、ゴムなどの伸長性のある材料を用いることで柔軟性を確保している。このようなケーブルにのみ柔軟性を適用したテンセグリティ構造は、ストラットが硬いため特定の方向にはストラットによる高い剛性を示す。より多くの方向に高い柔軟性が必要となる際には、ケーブルのみならずストラットなどの剛体要素にも柔軟な材料を用いることもある。文献 [8] では、引張部材に柔軟なケーブルを用いており、曲げ方向に柔軟に変形する素材をストラットに用いることで、外部環境に対してより安全に接触することが可能である (図 1.2E)。また、柔軟性と剛性による特性を両立させるために、強い衝撃が加わったときにのみストラットが変形するソフトテンセグリティロボット [9] も開発されている (図 1.2F)。文献 [9] におけるテンセグリティのストラットには硬い部材と座屈可能な柔軟な部材を直列に繋げたものが用いられている。伸縮性の小さいケーブルを用いているため、強い衝撃がかからない場合には硬い構造として機能するが、強い衝撃が加わった場合にストラットが座屈することで衝撃を吸収することができる。

アクチュエーション方法

ソフトテンセグリティロボットのアクチュエーション法は、テンセグリティの構造の一部を能動的に変形させて動かす方法、付加的にアクチュエータを取り付けることでテンセグリティ構造を受動的に変形させる方法、そしてアクチュエータによるテンセグリティの構造変形を伴わずボディとして用いる方法の 3 つに大きく分類できる。

能動的な構造変形を活用する手法では、ストラットを動作させる手法とケーブルを動作させる

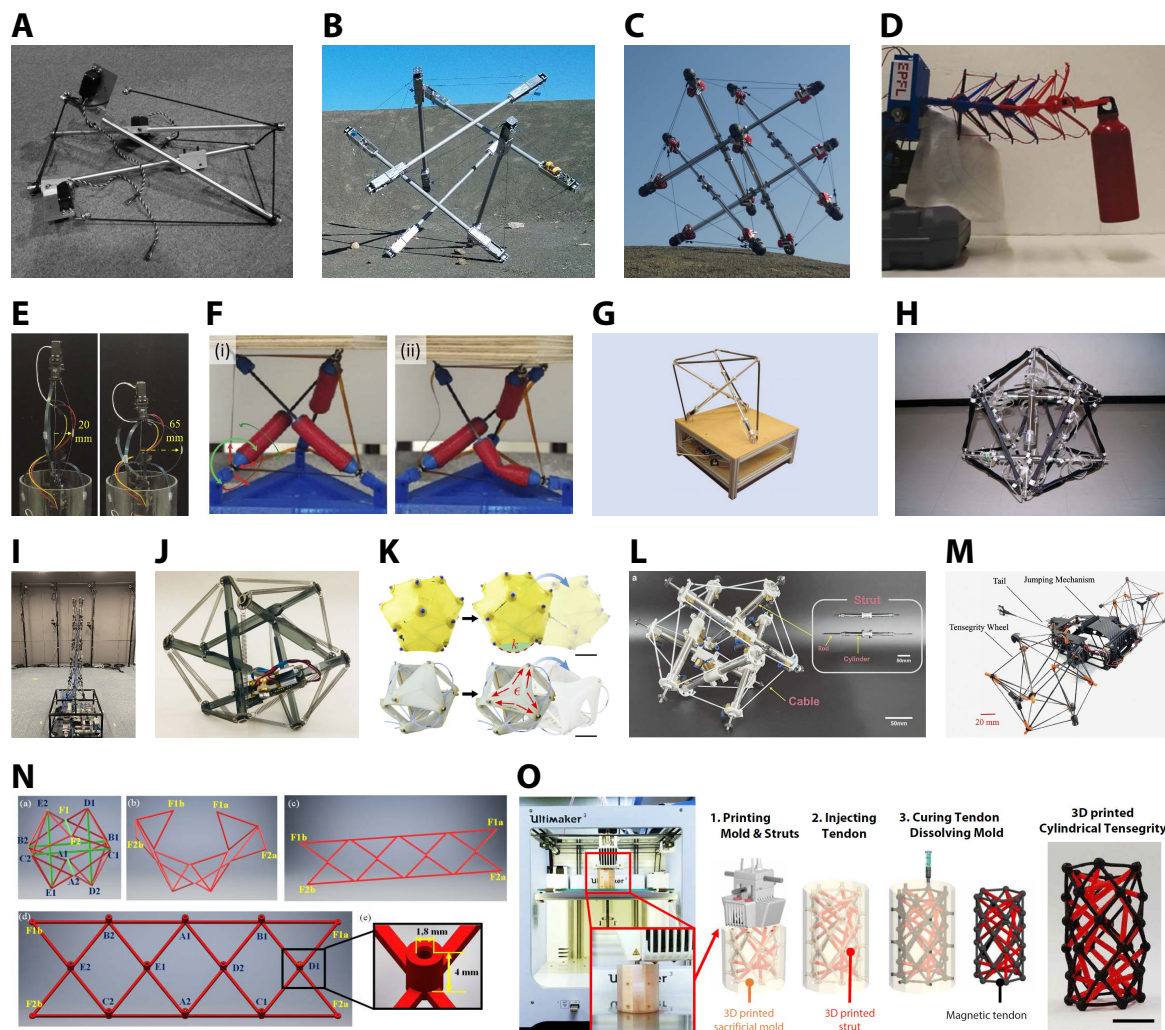


Fig. 1.2: Soft tensegrity robots. (A) TR3 [4]. (B) SuperBall [5]. (C) SUPERball v2 [6]. (D) Variable-stiffness tensegrity spine [7]. (E) v-expander tensegrity robot [8]. (F) Dual stiffness tensegrity [9]. (G) A three-dof actuated robot [10]. (H) Strut-driven tensegrity [11]. (I) Modular tensegrity robot arm [12]. (J) Vibrating tensegrity robot. [13]. (K) Membrane-driven tensegrity robots [14]. (L) Spikebot [15]. (M) Shape-changing wheeling and jumping robot [16]. (N) 3D printed cable network [17]. (O) 3d-printed programmable tensegrity [18]. All the images are adapted and relabeled from the original figures.

手法が代表的であり，ここではそれぞれをストラット駆動型とケーブル駆動型と呼ぶ．ストラット駆動型では，直動のアクチュエータ [10, 45] を用いることでストラットの長さを変化させ，構造を変形させる（図 1.2G）．アクチュエータの伸縮によりロボットの姿勢変化を実現している．空圧シリンダ [11] をストラットとして用いた場合には，シリンダを伸長させる際の動的動作を利用することでロボットの転がり動作を実現している（図 1.2H）．ケーブル駆動型として最も一般的なものは SUPERball のように，ケーブル長をモータやシリンダなどを用いたワイヤ駆動系によ

り変化させるタイプである。ほとんどのテンセグリティ構造では、ケーブルの本数がストラットの
本数よりも多いため、ケーブル駆動型の方がストラット駆動型よりも設計の自由度が高い。こ
のため、移動型ロボットなど複雑な動作を要するロボットではケーブル駆動が用いられることが
多い。

テンセグリティに対して付加的にアクチュエータを取り付ける方法では、単にケーブルをアク
チュエータに置換するのではなく、構造変形のさせやすさを考慮して、空圧シリンダ [12] や膜状
のアクチュエータ [14] などが用いられる。文献 [12] では、シリンダを用いることで、筋骨格のよ
うな特徴を有し、1.2 m のロボットアームにおいて高速動作を実現している (図 1.2I)。文献 [14]
では、テンセグリティの面に対して膜状のアクチュエータを取り付けることで転がり動作を実現
している (図 1.2J)。膜状アクチュエータのような軽量なアクチュエータを用いた場合、ロボット
全体を軽量にすることが可能である (図 1.2K)。

さらに、アクチュエータによるテンセグリティの能動的な変形を用いてロボットを動作させる
のではなく、ボディの一部としてテンセグリティを用いることで受動的な柔軟適応性や衝撃吸収
性を活用した研究例も多く報告されている [13, 16, 46, 47]。文献 [13] では、ボディにテンセグリ
ティ構造を用い、振動モータにより駆動しており、構造の変形は小さいものの素早い移動を実現
している。文献 [15] では、テンセグリティのストラット部分に空圧シリンダを用い、構造の外側
にストラットを伸ばすことでフグのように構造が膨らみ、転がりやジャンプを実現している (図
1.2L)。また、テンセグリティを車輪として用いたロボット [16] はテンセグリティ構造の変形に
より車輪の径、幅などを環境に応じて変化させる。これらのロボットは受動的な変形を可能とす
ることで、優れた衝撃吸収性や不整地走破性を実現している (図 1.2K)。このようにテンセグリ
ティ自体を変形させるのではなく、ボディに取り入れることでもその特性を活用できる。

製作手法

テンセグリティ構造は衝撃吸収性、剛性変化、軽量などの様々な優れた特性を有しているが、構
造が複雑になりやすい。少数のストラットから成る構造では複雑性は顕著ではないが、数十、数
百といった多数のストラットを有するテンセグリティではケーブルの本数も非常に多くなり、製
作難易度が高くなる。このため、ソフトテンセグリティロボットにおいては製作方法も研究対象
の一つとなっている。テンセグリティは全てのケーブルが一つの網のように互いに連結されてい
る。この性質を生かして、ケーブル部分を一体として 3D プリンティングにより製作する方法が
研究されてきた [17]。3D プリンティングにより、一体成型することでケーブル同士の接続が不要
となる。ストラットと組み合わせるだけで容易にテンセグリティを製作でき、ロボットの組み立
て時間が短縮される (図 1.2N)。

ストラットの本数が増えるにつれ、ケーブルとストラットの組み立ても容易ではなくなる。そ
こで、ケーブルだけでなく、ストラットもあわせて同時に製作する方法が提案された [18] (図
1.2O)。この方法ではストラット部分とケーブルを流し込むための犠牲層を一度に 3D プリントす
る。その後、ゴム素材を流し込み、犠牲層を水に溶かすことで複雑なテンセグリティ構造を容易
に実現している。製作方法の性質上、ストラットの本数を増やしても製作における手間は変わら
ず、非常に複雑な構造を容易に実現可能である。

1.1.3 従来のソフトテンセグリティロボットの課題

上記のようにソフトテンセグリティロボットは従来の硬い構造を持つロボットとは対照的に、衝撃吸収性や環境形状への柔軟な適応性を有している。これらの点はソフトロボットとしての特徴である。一方で、ボディが全てシリコンゴムのような柔軟な材料であるソフトロボットに比べると、剛性変化をさせやすく、大きなボディを作りやすいといった特徴を持つ。これは、テンセグリティが剛体部材と柔軟部材の両方を構造内に併せ持つ構成を有するためである。剛体部材が骨格として機能するため [48]、他の純粋なソフトロボットに比べて大きなボディを作りやすく、剛性変化もさせやすい。このように、ソフトテンセグリティロボットは従来の硬いロボットとソフトロボットの間の中間の存在として考えることができ、それぞれの長所を生かすことのできる構造の一種であると考えられる。

これまでに、ソフトテンセグリティロボットの軽量さ、スケーラビリティ、展開性、衝撃吸収性、剛性変化の容易さが示されてきたものの、多くのソフトテンセグリティロボットにおいて構造の能動的な変形量は小さいものにとどまっている。大変形を伴わずに転がり変形を実現できる点や衝撃吸収性を得られる点は球形状のソフトテンセグリティロボットの利点であるが、ソフトテンセグリティロボットにおいて大変形を実現し積極的に活用することにより、ソフトテンセグリティロボットの応用可能性を広げることができる。

1.1.4 ソフトテンセグリティモジュールの大変形による多機能ロボット

テンセグリティ構造の形状は構成する全ての要素の力のつり合いによって決定されるため、その設計やアクチュエーションは容易ではない。そのため、大変形を伴うソフトテンセグリティロボットの開発において、ロボットごとに構成、形状を設計し、アクチュエーション方法を決定するという手法は、時間がかかり、開発方法としての汎用性は低い。設計の容易化、汎用化のためには、基本的な大変形を行うソフトテンセグリティモジュールを開発し、それらを組み合わせることでアプリケーションに特化したソフトテンセグリティロボットを開発する手法が望ましいと考えられる。

そこで本研究では、一つのテンセグリティ構造（テンセグリティモジュール）において図 1.3A に示すような様々な変形を実現し、これらを単体、または、組み合わせることで多様な動作を実現するソフトテンセグリティロボットについて取り扱う。このようなモジュール型のソフトテンセグリティロボットは例えば、図 1.3B に示すように収縮、ねじり、曲げといった変形を組み合わせることによって人の立ち入ることが困難な洞窟内に能動的に入り込んでいき、探索することができる。図 1.3C では、人が立ち入るのが困難な場所において崩れかけた構造物を一時的に支えるソフトテンセグリティロボットの様子を示す。この崩れかけた構造物の下へ到達するためには高低差のある斜面を下り、整備されていない地面を移動して橋の下へ到達する必要がある。さらに構造物を支えるようにロボットが変形する必要がある。通常、ロボットが高低差のある斜面を下るのは容易ではないが、ソフトテンセグリティロボットの持つ衝撃吸収性により、本ロボットは容易に斜面を下ることができる。さらに、構造を変形させて転がることによって舗装されてい

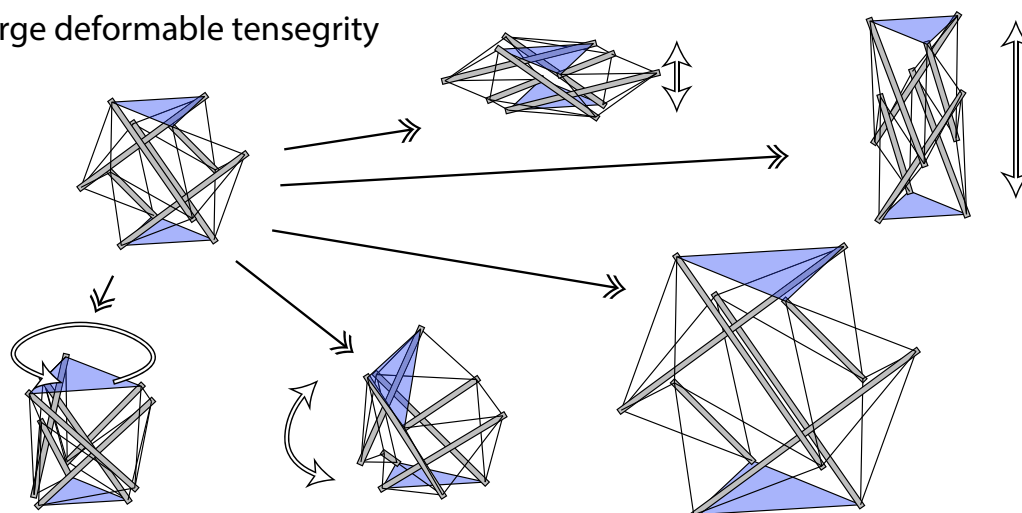
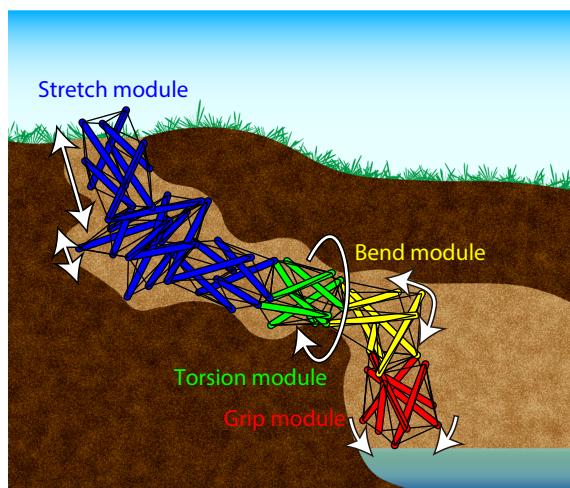
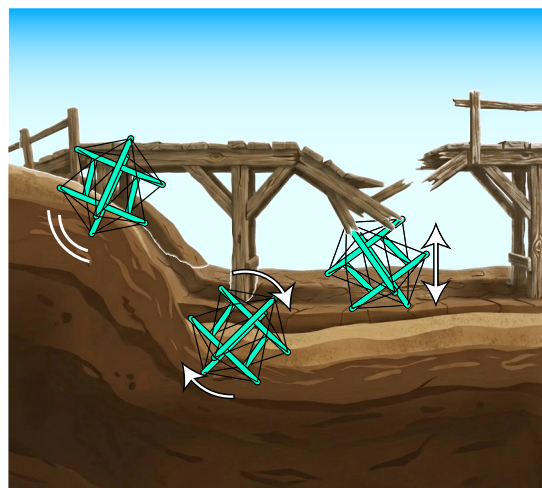
A Large deformable tensegrity**B Scenario 1****C Scenario 2**

Fig. 1.3: (A) Tensegrity structure capable of large deformation into various configurations. (B) Cave exploration using the highly deformable tensegrity. (C) Supporting a semi-collapsing structure using the highly deformable tensegrity.

い地面に適応しながら移動することが可能である。そして、テンセグリティの展開性により、崩れかけた構造物を一時的に支えることができる。

1.1.5 軽量なソフトテンセグリティモジュール実現のためのマッキベン型人工筋

一つのテンセグリティにおいて様々な変形を実現させる場合、搭載するアクチュエータの個数が多くなると考えられる。質量の大きなアクチュエータを用いるとテンセグリティ構造を維持するために必要な張力部材の剛性が大きくなり、柔軟性を保つことが困難となることが考えられる。このため、ソフトテンセグリティモジュールのためのアクチュエータの選定においては、その軽さが重要である。また、アクチュエータの応答時間も考慮すべき点である。ソフトテンセグリティ

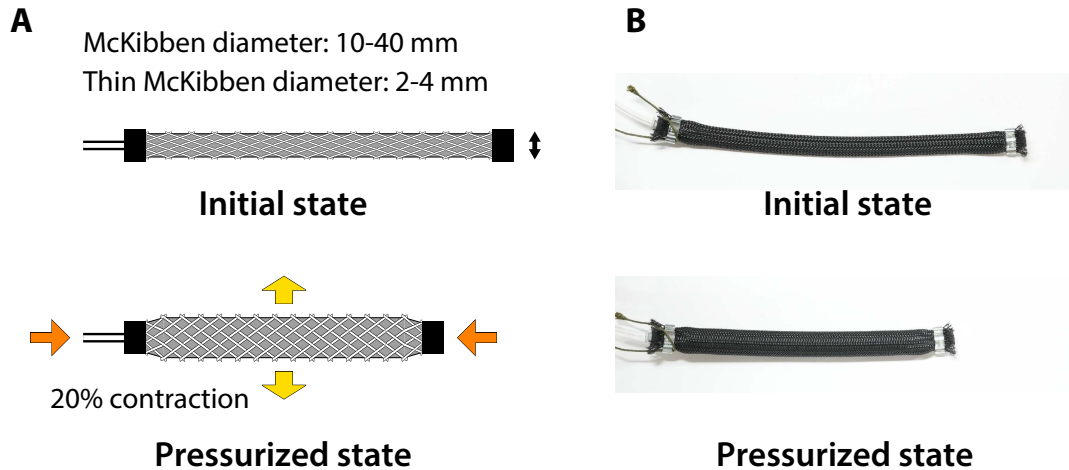


Fig. 1.4: Operating principle and the physical artificial muscle.

ロボットにおいて電磁モータによるケーブル駆動は一般的な駆動手法の一つであるが、ケーブルを引っ張るためにある程度大きな力を要するため、減速機を用いる必要がある。減速機を用いる場合、高速でケーブルを巻き取ることは難しくなり、ロボットの移動速度が遅くなる。例えば、SUPERball v2 [6] では一回の転がりに 10 秒程度要し、文献 [40] におけるロボットの一回の転がりには 35 秒程度要する。そして、ソフトテンセグリティモジュールの柔軟性を活かすためにはアクチュエータの柔軟性が重要である。そこで本研究では、テンセグリティ構造を動作させるためのアクチュエータとして、軽量でありながら出力重量比が高く、かつ応答性の速いマッキベン型人工筋 [49] を用いることとする。このアクチュエータを用いて転がりを行うソフトテンセグリティロボット [50] は、一回の転がりに要する時間は 2 秒程度であり、電磁モータを用いた場合比べて移動速度が速い。

マッキベン型人工筋は空圧タイプのアクチュエータである [51][52]。主に、ゴムチューブとそれを覆うスリーブからなるシンプルな構成を有する。スリーブの編み角によって空圧印加時に収縮するか、伸長するかの特徴が異なる。空圧印加時に伸長するタイプのマッキベン型人工筋は圧縮力を支える際の座屈等を考慮する必要があるが、空圧印加時に収縮するタイプのマッキベン型人工筋は張力を支持するために用いられるため座屈等を考慮する必要がない。このため、空圧印加時に収縮するタイプのマッキベン型人工筋のほうが扱いやすく、ロボット開発に多く用いられている。この収縮型のマッキベン型人工筋は一般的に 20% 程度の収縮率を有する。1 m 当たり数十グラム程度と非常に軽量でありながら、0.5 MPa 程度の空圧を印加させることで数十ニュートンといった大きな力を発生させることができる。この高い出力重量比を活かして、これまでに、ロボットアーム [52, 53] や四脚ロボット [54, 55, 56]、ホッピングロボット [57] に応用されてきた。

近年量産化に成功した細径人工筋 [58] は通常のマッキベン型人工筋が径 10 mm から 40 mm 以上であるのに対し、径 2 mm から 5 mm といった小さな径をもつ。この小さな径により、細径人工筋は通常のマッキベン型人工筋のような高い出力重量比に加えて、駆動時においても柔軟性を

有する。直線状だけでなく屈曲状態においても柔軟な動作が可能なこの特徴は従来の太い人工筋では実現困難であった柔軟ロボットの実現を可能とし、マッキベン型人工筋の応用可能性を高める。複数の細径人工筋をまとめて用いることで、これまでに人の骸骨型ロボット [59, 60] やキリン型ロボット [61], 犬型ロボット [62] が開発されてきた。また、その細径さを利用することで小型の歩行ロボット [63] やマニピュレータ [64, 65], ロボティックグローブ [66] などにも広く応用されている。さらに、細径人工筋は曲げた状態で駆動可能なため繊維として編み込んだ状態で利用することができ [67, 68], 能動的な動作が可能な布アクチュエータとしても研究が行われている [69, 70, 71]。

このマッキベン型人工筋を用いて駆動されるソフトテンセグリティモジュールは、柔軟なテンセグリティとマッキベン型人工筋に共通する利点である、軽量さ、柔軟性を有する。さらに、人工筋が高い時間応答性を有するため、高速に動作させることが可能となる。

1.1.6 大変形を有するソフトテンセグリティモジュールの実現における課題

ソフトテンセグリティモジュールを組み合わせてソフトテンセグリティロボットを構成することを考えると、それぞれのモジュールの変形量は大きいほうが望ましい。先行研究において、収縮変形を行うテンセグリティロボット [17] では 25% 程度の軸方向変形を実現している。また、曲げ変形では 20 deg 程度 [12], ねじり変形では 10 deg 以下 [72] である（後に述べる本研究で用いるテンセグリティ構造への換算値であり、換算方法については第 2 章で詳しく述べる）。これらを各変形の変形量の基準の目安として、本研究ではそれらを上回る大変形を目指す。

しかし、マッキベン型人工筋を用いてテンセグリティ構造を大変形をさせる場合、人工筋の 20% という収縮率の制限が大きな課題となる。電磁モータを用いたワイヤ駆動型では収縮率の制限はないが、人工筋を用いる場合、最大で 20% 程度の収縮率までしか用いることができない。単純にテンセグリティ構造を収縮させたい方向と平行に人工筋を配置した場合、構造全体としての変形は人工筋の収縮率である 20% 以下となり、大変形を実現させることはできない。人工筋の 20% の収縮率からテンセグリティ構造の大変形を生じさせるための変位拡大機構が必要となる。

大変形を行う人工筋駆動型のソフトテンセグリティモジュールを実現するために考慮すべき要素は、ソフトテンセグリティモジュールの骨格となるテンセグリティ構造の形状、また、そのテンセグリティに対する人工筋の配置方法である。これらを適切に選定することによって大変形可能かつ軽量のソフトテンセグリティモジュールを実現する。

まず、大変形テンセグリティモジュール実現のためのテンセグリティの形状について考える。ストラットからなるテンセグリティ構造において最も単純な構成は 3 本のストラットと 9 本のゴム紐からなるものである。しかし、この構造のプロトタイプを実際に製作し、外力を加えてどのような変形を生じさせることができるか試したところ、伸縮、曲げ、ねじりに関して先行研究を上回る大変形を生じさせることは困難であると考えられた。これは、テンセグリティの構造の自由度によるものであると考えられる。3 本のストラットと 9 本のゴム紐からなるテンセグリティの構造の自由度は 9 であり、特定の方向に剛性が高くなりやすく、伸縮、曲げ、ねじりといった変形を生じさせることが困難となる。一方で、図 1.5A に示す 6 本のストラットと 24 本のゴム紐

から成る Six-bar tensegrity の構造の自由度は 24 であり、3 本のストラットのものよりも変形がしやすいと考えられる。この Six-bar tensegrity はストラットから成る球形状のテンセグリティ構造の中では最も単純な構成である。実際にプロトタイプを製作し、外力を加えた際に、球形状の対称性により大変形を生じさせやすいことが確認できた。また、製作上の観点からも複雑すぎない構造であると考え、大変形を生じさせるためのテンセグリティの形状として球形状で最も単純な Six-bar tensegrity を用いることとする。

変形させやすいテンセグリティ構造として選定した Six-bar tensegrity を人工筋を用いて大変形させることによって、軽量大変形テンセグリティモジュールを実現させることができる。そのために、テンセグリティの大変形実現のための適切な人工筋の配置方が必要となる。

1.1.7 三角形の扁平化によるテンセグリティの大変形手法の提案

そこで、本研究では Six-bar tensegrity 内の三角形に注目した。注目する三角形は図 1.5A に示すものであり、一つのストラットの端点と、そのストラットの端点から最も近くに位置する他のストラット、それらをつなぐ 2 本の引張部材から成る。この三角形は構造内に 12 個存在する。

この 12 個の三角形の内、6 個を外力により扁平させるように変形させた様子を図 1.5B に示す。それぞれの三角形の周囲の長さに着目すると、これらの長さ変化は小さいものの、構造全体としては大きな収縮変形実現されていることが確認できる。このため、この三角形の扁平化を利用することで、人工筋の小さな収縮率を用いて構造全体の大変形を実現できると考えられた。そこで本研究では、この三角形を人工筋を用いて扁平させることによるテンセグリティの大変形手法を提案し、この手法によるテンセグリティの大変形について主に扱う。

1.1.8 三角形の扁平化に関する課題

図 1.5 に示すように 12 個の三角形の内 6 個の三角形を能動的に扁平させる際、能動的に扁平させていない三角形が受動的に広がる様子が確認された。これは拮抗駆動系の持つ性質である。筋骨格系の簡単な例は筋肉により動作する人の腕である。人の腕の筋肉のように上下に取り付けた筋肉がある場合、片側の筋肉を駆動すると、もう片方の筋肉は受動的に伸長させられる。片側の筋肉が受動的に伸びる性質がない場合、片側の筋肉を起動させようとした際に、もう片側の筋肉がその変形を阻害する。この阻害を防ぐため、筋肉は受動的な伸びを許容できる必要がある。テンセグリティ構造は複雑な拮抗駆動系であるため [73]、同様の性質を有しており、各三角形が受動的な広がりを許容しない場合、三角形を扁平させようとしたときに他の三角形がその変形を阻害することとなる。このため、テンセグリティの変形時にも人の腕の筋肉と同様に、能動的な三角形の扁平化だけでなく受動的な三角形の広がりを許容できる必要がある。

しかしながら、人工筋の課題の一つとして、受動的伸長性が小さいという点がある。マッキベン型人工筋はスリーブとゴムチューブの拘束により、外力を加えて引っ張った場合に伸長させることが困難である [74]。このため、図 1.6A に示すように人工筋を引張部材部分に配置した場合には人工筋を収縮させることで三角形の扁平化を実現できる一方で、大きな受動的な広がりを許容できない。実際にテンセグリティの引張部材として人工筋を用いた場合 [50, 75] には、転がり変

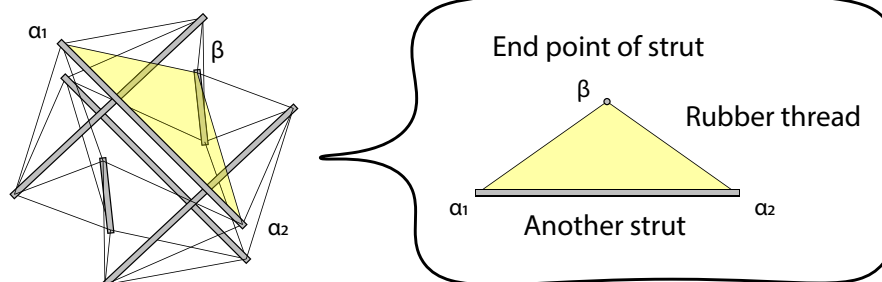
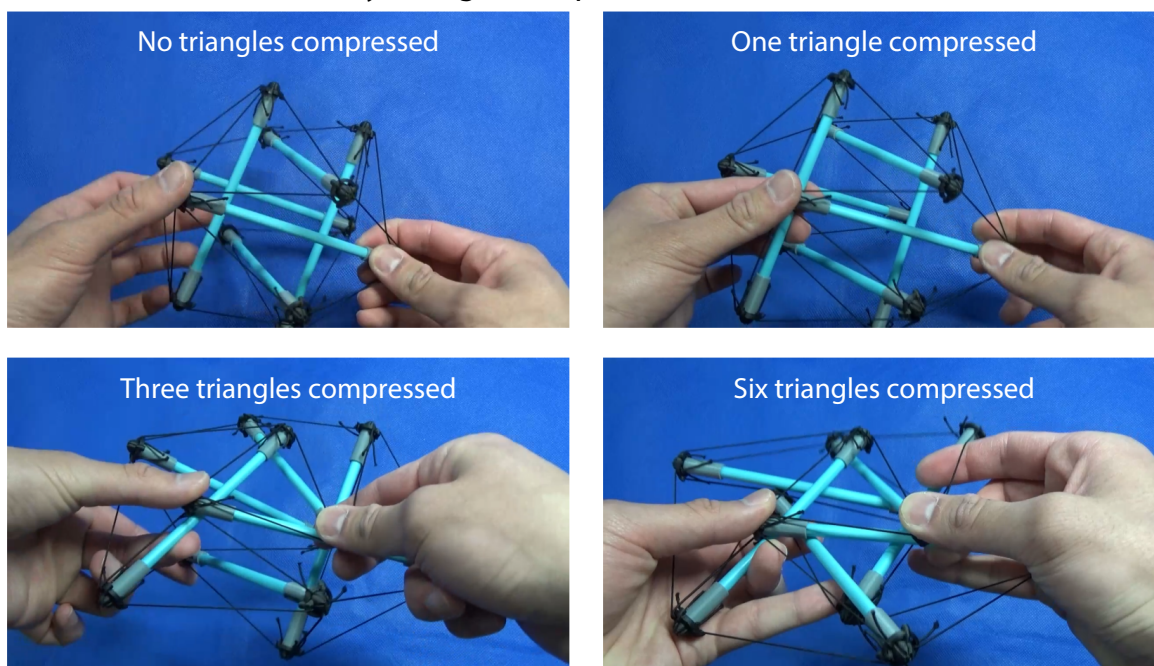
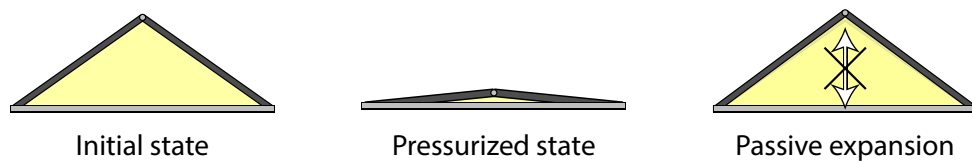
A Triangle in tensegrity**B Deformation driven by triangle compression**

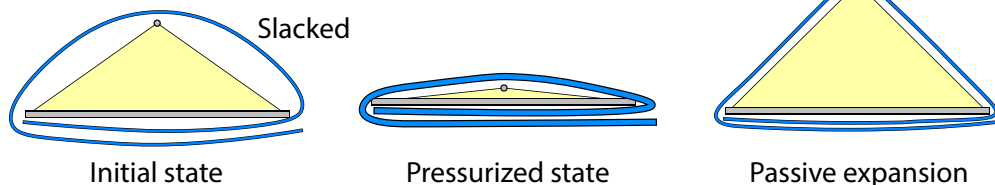
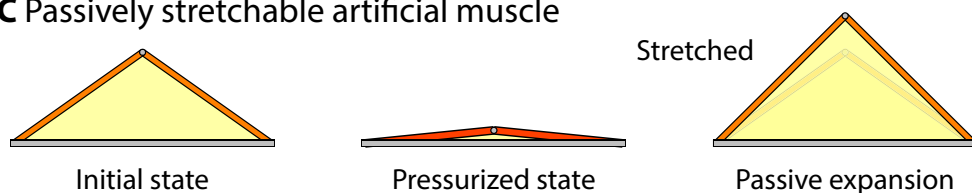
Fig. 1.5: Large deformation of the entire structure achieved by combining the compression deformation of triangles.

形は実現しているものの、構造全体としての大変形を生じさせることはできていない。引張部材部分に人工筋をたるませた状態で配置させた場合には、人工筋を収縮させても三角形を十分に扁平させることができない。そこで、本研究ではこの三角形の扁平化の手法として細径人工筋を用いた手法と、受動的伸長性を許容する人工筋を用いる手法の2つを提案する。

図 1.6B に示す手法は、三角形の周囲に細径人工筋を巻き付けるように配置する手法である。ストラット部分の長さは不変であるため、人工筋を収縮させた際に、人工筋の収縮をすべて引張部材の長さ変化に利用することができ、三角形を扁平させるように変形させることができる。そして、たるませた状態で配置しているため受動的な広がり性を許容する。ここで課題となるのが多くのソフトロボットにおいて課題となる耐久性 [76] である。直線状、または滑らかに配置された細径人工筋の繰り返し駆動において高い耐久性を有することは株式会社 s-muscle により示されてい

A Normal Artificial muscle

Hard to expand

B Thin Artificial muscle**C Passively stretchable artificial muscle**

Stretched

Fig. 1.6: Compressive deformation and passive expansion of a triangle using artificial muscles. (B) Case using standard artificial muscles. (C) Case using thin artificial muscles in a bent state. (D) Case using artificial muscles with passive stretchability.

る。しかし、s-muscle の認める使用条件から外れて、細径人工筋を急峻に曲げた状態で使用する際には耐久性が低下してしまう。このため、図 1.6B に示す手法を用いるためには屈曲状態における細径人工筋の耐久性を向上させる必要がある。

図 1.6C に示す手法は、受動的伸長性を有する人工筋を実現させ、その人工筋を用いる手法である。通常的人工筋と同程度の収縮性を有しながら、非加圧時に受動的な伸長性を実現させることで、図 1.6C に示す能動的な三角形の扁平化、受動的な広がり変形を実現できる。この手法の実現のためには、空圧を印加することで収縮することができ、かつ、非加圧時に受動的な伸長性を有する新しい構成の人工筋を開発する必要がある。

上記のように、構造内の三角形の扁平化に注目することで、図 1.5 に示す構造の大きな収縮変形を人工筋を用いて実現できると考えられる。ソフトテンセグリティモジュールを開発するにあたり、収縮変形のみならず、他の基本変形である伸長変形、曲げ変形、ねじり変形、拡大変形を実現する必要がある。三角形の扁平化をいかに組み合わせることで、これら的大変形を実現できるか、また、三角形の扁平化のみでは不十分な場合に、どのような手法でこれらの変形を実現できるかが、本研究における課題の一つである。

1.2 研究目的

本研究の目的は、多様な大変形を行う軽量なソフトテンセグリティモジュールの機構構成法、アクチュエーション方法の確立によって大変形ソフトテンセグリティロボットの基礎技術を確立することである。伸縮、曲げ、ねじり、拡大等の基本的な大変形を行うソフトテンセグリティモジュールを実現し、それらを組み合わせることによってソフトテンセグリティロボットの従来にない多様な運動を生成することを目的とする。

上記で述べた多様な大変形を行うソフトテンセグリティモジュールは構造内の三角形の扁平化を組み合わせることにより実現される。テンセグリティ構造内の三角形を扁平化させる手法として、1) 細径人工筋をたるませて三角形の周囲に配置する手法と、2) 受動的伸長性を有する人工筋を用いる手法の 2 つの手法を提案する。次に、これらの 2 つの手法を用いて、テンセグリティ構造の大変形の実現手法を確立する。そして、提案する 2 つの手法による大変形ソフトテンセグリティモジュールの有用性を示すために、大変形が有用であるソフトテンセグリティロボットへの適用を行う。

具体的には、1 つ目の手法である細径人工筋をたるませて三角形の周囲に配置する際に生じる細径人工筋の屈曲部分における耐久性の課題に対して、接着剤を用いた細径人工筋の耐久性向上手法を提案する。耐久性向上のために、細径人工筋のスリーブに接着剤による微細なパーティション構造を形成し、それが人工筋の耐久性に与える効果を耐久試験によって検証する。2 つ目の手法の実現のために、受動的伸長性を有するマッキベン型人工筋の実現手法として、弾性を有する紐と伸びない紐から成る 1 本の紐を従来のマッキベン型人工筋に加える手法を提案する。この人工筋を製作し、力特性を明らかにする。また、駆動原理を力学モデルを用いて明らかにする。

三角形の扁平化を組み合わせることで、ソフトテンセグリティモジュールにおける伸縮変形、曲げ変形の実現方法を示す。ねじり変形については細径人工筋を用いた他の配置法による実現方法を示す。また、拡大変形は受動的伸長性を有する人工筋と空圧シリンダを組み合わせによる実現方法を示す。これらの変形に関して、実際にモジュールの大変形を生じさせられることを、静力学シミュレーションと実機を用いた変形測定により実証する。

そして、これらの大変形可能なソフトテンセグリティモジュールが有用であることを示すために、モジュールを用いたソフトテンセグリティロボットを開発し、動作を検証する。細径人工筋を用いたソフトテンセグリティモジュールの応用例として、能動的に推進力を生じさせることのできる移動型ロボット、曲げ動作が可能なロボットアーム、ねじり操作が可能なマニピュレータを開発する。受動的伸長性を用いたソフトテンセグリティモジュールの応用例として、転がりと展開を行うロボット、狭隘部で移動と展開が可能なロボットを開発する。

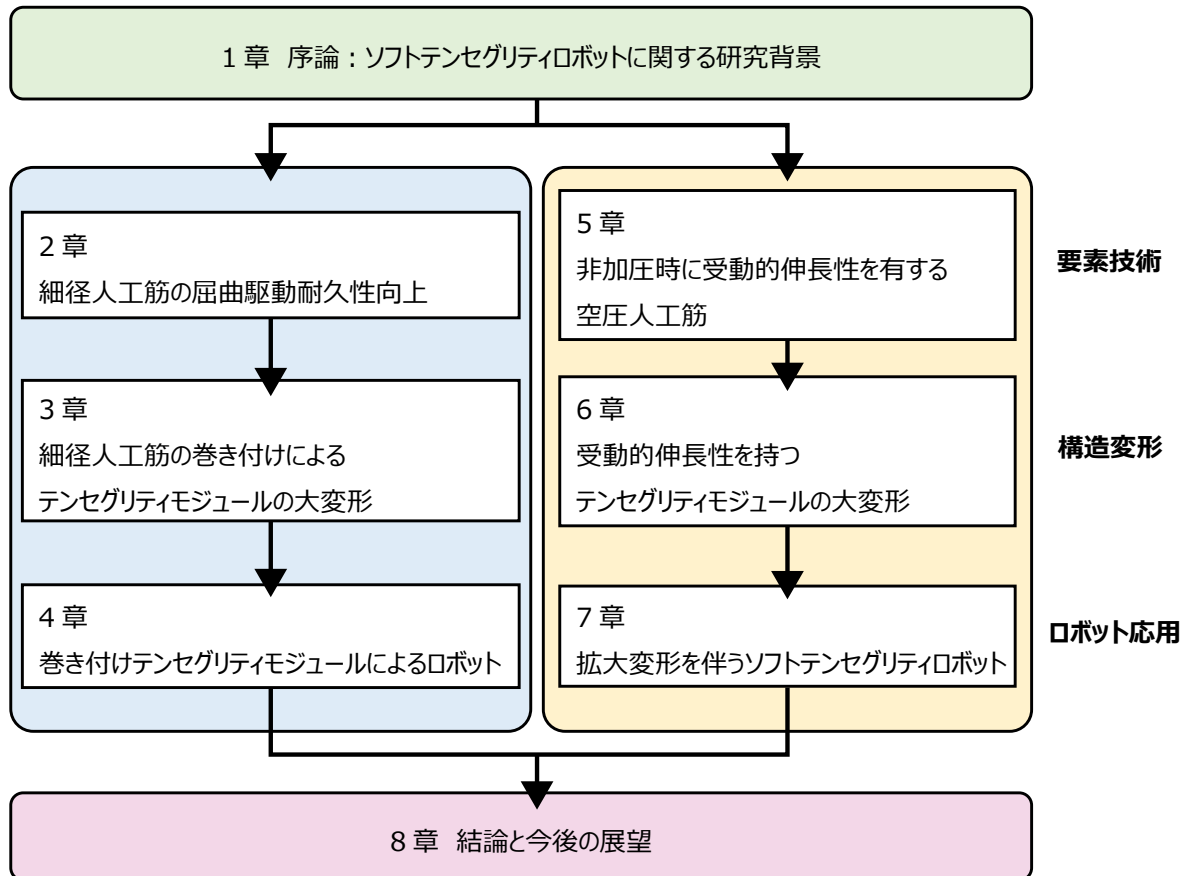


Fig. 1.7: Structure of the thesis.

1.3 本論文の構成

本論文は図 1.7 に示す通り、8 章構成となっている。第 1 章では、本研究が対象とするソフトテンセグリティロボットに関する先行研究を取り上げ、現状の課題を明らかにし、本研究の目的を述べた。第 2 章では、細径人工筋の屈曲状態での耐久性向上手法として、人工筋のスリーブに接着剤を塗布する手法を提案し、耐久試験を行うことによって、その効果を検証する。第 3 章では細径人工筋をテンセグリティ内で屈曲させて配置することで実現するテンセグリティの大変形について述べる。第 4 章では第 3 章で実現した細径人工筋駆動型のソフトテンセグリティモジュールのロボット応用について述べる。第 5 章では受動的伸長性を有する人工筋の開発について述べる。第 6 章では第 5 章で開発した人工筋を用いた拡大変形可能なテンセグリティの大変形について述べる。第 7 章では第 6 章で実現した拡大変形を伴うソフトテンセグリティのロボット応用を行う。そして、第 8 章では、本論文の結論及び今後の展望について述べる。

第 2 章

細径人工筋の屈曲駆動耐久性向上

本章ではテンセグリティ内の三角形を変形させるための一つ目の手法として重要となる屈曲状態における細径人工筋の耐久性の向上について述べる。

2.1 屈曲状態での繰り返し駆動時における細径人工筋の損傷機序

本章における人工筋には、外径 4 mm のポリエチレンプロピレングム (EPDM) のチューブ、ポリエチレンテレフタレート (PET) のスリーブを用いた細径人工筋 (EM40, 株式会社 s-muscle) を使用した。本人工筋は屈曲させた状態での繰り返し駆動において耐久性が低いという課題を抱えており、曲げ部分での人工筋の破損がたびたび観察された。人工筋のゴムチューブとしてシリコンゴムを用いた場合はシリコンゴムの耐久性により人工筋が破損しやすくなることが知られている [77]。一方で、本研究で使用する人工筋のゴムチューブは EPDM を用いており、直線状に配置された場合には 0.3 MPa で 100 万回の繰り返し動作にも耐える (株式会社 s-muscle)。このため、ゴムチューブ自体の耐久性には大きな問題がないと考えられた。

屈曲状態での繰り返し駆動時における人工筋の損傷機序を特定するため、屈曲状態で 2 秒ごとに繰り返し駆動する細径人工筋の様子を観察した。繰り返し駆動することによってスリーブの繊維同士の位置関係が図 2.1C に示すようにずれていった。図 2.1B に空圧を印加していないとき (図 2.1C.i,iii,v,vii) のスリーブの繊維同士の位置関係のずれの変化を示す。人工筋のスリーブの繊維が交差している部分の複数点の初期状態 (図 2.1C.i) からの変位量を写真から読み取り、以下の式によって N 回目の変位 ΔL を算出した。

$$\Delta L(N) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sqrt{(x_{i,N} - x_{i,0})^2 + (y_{i,N} - y_{i,0})^2} \quad (2.1.1)$$

$k = 13$ とし、中央部分 13 点の繊維同士の交点の座標を用いた。式 (2.1.1) において $x_{i,0}, y_{i,0}$ は初期状態 (図 2.1C.i) における 13 点のうち i 番目の点の x 座標, y 座標を示している。そして, $x_{i,N}, y_{i,N}$ は N 回目の 13 点それぞれの x 座標, y 座標を示している。一例ではあるが、図 2.1B

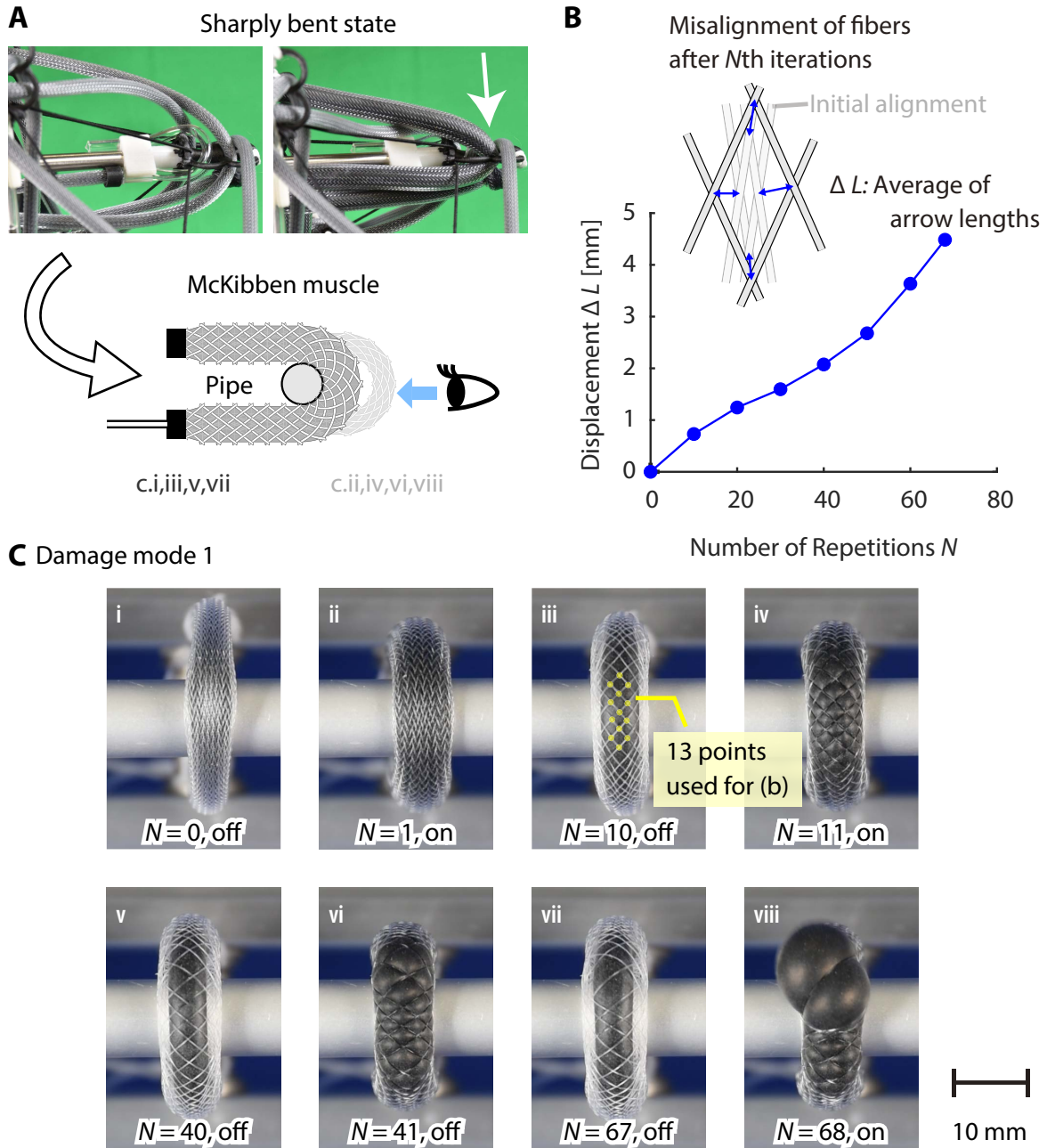


Fig. 2.1: (A) Driving mechanism of thin McKibben muscle. (B) Appearance of the drive of the thin McKibben muscle in a bent state. (C) Fiber-to-fiber misalignment of the sleeve of the artificial muscle during repetitive driving in a bent state. (D) Mechanism of thin pneumatic artificial muscle breakage.

から、 $N = 67$ において ΔL が4.5 mmとなり、広がったスリーブの網目から図 2.1C.viii のようにゴムチューブが飛び出して割れることがわかった。つまり屈曲状態での繰り返し駆動では、スリーブの繊維同士の位置関係がずれることで、広がったスリーブの網目から内部のゴムチューブが飛び出すことによって人工筋は破損する。スリーブの繊維同士のずれは生じないことが望まし

いため、理想的には ΔL を 0 mm に保つことが望まれる。

2.2 接着剤塗布による屈曲状態での細径人工筋の耐久性向上手法

屈曲状態での人工筋破損機序は上記の通りである。このため、スリーブの繊維同士の位置関係のずれを防ぐことで曲げ状態の繰り返し駆動においても細径人工筋の耐久性を向上できると考えられる。スリーブの繊維同士の位置関係のずれを防ぐために、融着糸から成るスリーブを用いてスリーブの繊維が交差している部分を融着する方法が提案されている [78]。しかし、通常的人工筋は非融着糸から構成されており、この手法を適用することは困難であり、また、融着のために炉を必要とするため加工が容易ではない。そこで本研究ではより簡単にスリーブ繊維が交差した部分を接着する手法として、接着剤 (LOCTITE 401, Henkel AG & Co. KGaA) を用いた新しい接着法を提案する。

繊維は編み込まれているため、繊維同士には互いに引き合う方向に力が働く。このため、図 2.2A.i に示すようにパーティション構造をつけることによって繊維同士のずれを防ぐことができると考えられる。しかし、実際のスリーブにこの微細なパーティション構造を取り付けることは困難である。そこで、接着剤を用いることで図 2.2A.i の機能を再現する方法を提案する。図 2.2A.ii に示すように繊維同士が交差した部分に接着剤を塗布する。接着剤の硬化後に、繊維をほぐすことで、余分な接着剤を除去し、図 2.2A.i の機能を実現できると考えた。

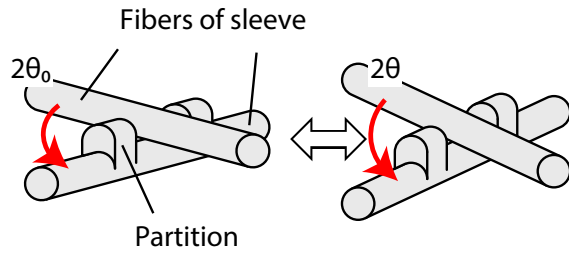
接着剤の選定に関しては、接着剤硬化前の粘性と硬化後の接着強度の 2 つの要素を考慮する。硬化前にはスリーブのメッシュに膜を形成させない必要があるため、接着剤が低粘度であるとよい。また、人工筋を駆動させる際に接着剤が剥離するのを防ぐために、硬化後の高い接着強度が必要である。これらの要件から、低粘度 (70 から 110 mPa·s) かつ高いせん断強度 (例えば、PVC で 10 N/mm², ポリカーボネートで 9.6 N/mm²) を有する高速硬化瞬間接着剤 (LOCTITE 401, Henkel AG & Co. KGaA) を選定した。

2.3 細径人工筋のスリーブへの接着剤の塗布

本研究では、接着剤の上でスリーブを転がすことによってスリーブの繊維が交差した部分に図 2.2A.ii のように接着剤を塗布することを実現する。スリーブに塗布する接着剤として高速硬化瞬間接着剤 (LOCTITE 401, Henkel AG & Co. KGaA) を用いた。図 2.2B.i,ii に示すようにシリコーンゴム上に (EcoFlex00-30, Smooth-On, Inc) に接着剤を塗り広げる。塗り広げた接着剤の上を図 2.2B.iii に示すようにスリーブを通した金属棒を転がすことでスリーブの繊維が交差した部分に接着剤を塗布する。このとき、スリーブの網目に接着剤が膜を張ってしまうと、スリーブの伸縮作用が失われてしまう。このため、スリーブの網目の中に接着剤が入り込まないようにする方法が重要となる。スリーブの網目に接着剤が膜を張ることを防ぐために、二つの要素が重要

A

i. Structure to prevent fiber displacement



ii. Proposed method

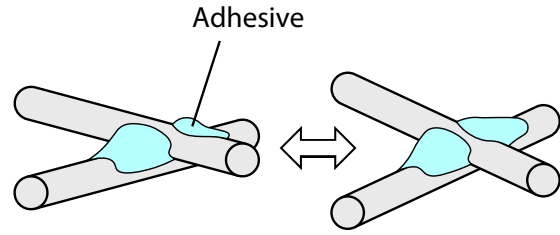
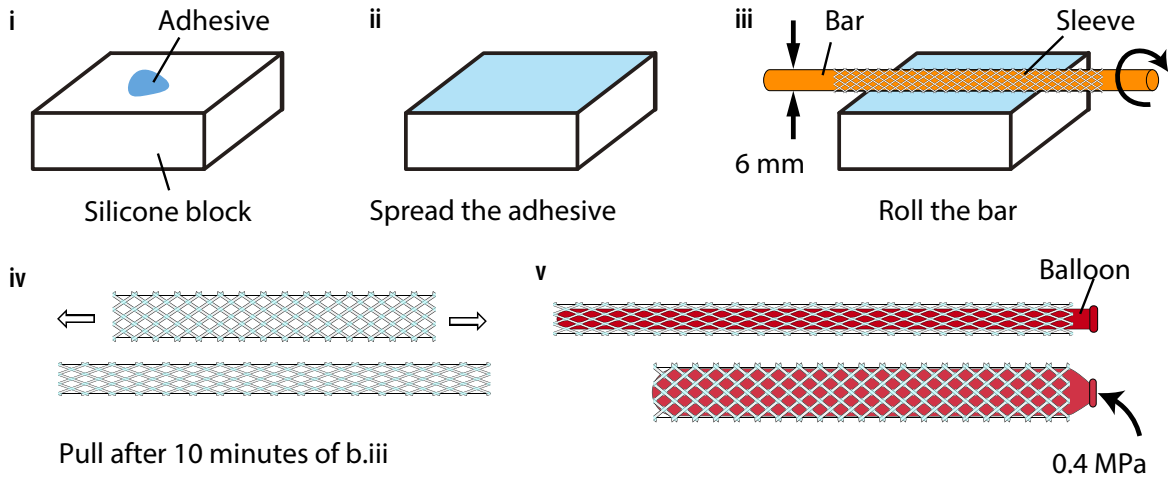
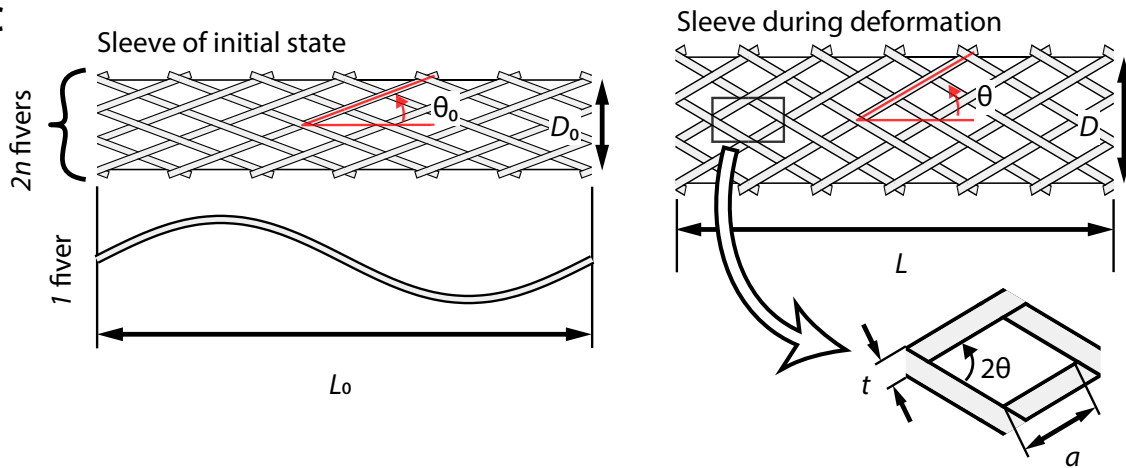
**B****C**

Fig. 2.2: Proposed method of thin pneumatic artificial muscle with adhesive for the enhancement of durability in a bent state. (A) Structures to prevent fiber displacement. (B) Method to apply adhesive to the sleeve. (C) Modeling of thin McKibben muscle sleeve.

となる．接着剤を塗布する際のスリーブの網目の面積とシリコンゴム上に広げる接着剤の層の厚さである．

まず，スリーブが網目に膜を張る原因は接着剤の表面積を小さくするように作用する分子同士が引き合う力である表面張力の小ささにある．スリーブの網目の面積が小さい場合，接着剤は網目に膜を張った際に膜の表面積が小さい．このため，接着剤の小さな表面張力では膜を破壊することができず，網目に膜を張る．逆に，スリーブの網目の面積を大きくすることで，接着剤が膜を張った場合の接着剤膜の表面積が大きくなる．これにより，接着剤の小さな表面張力でも膜を破壊しやすくなる．このため，網目の面積を大きくした状態で接着剤を塗布することでスリーブの網目に膜を張ることを防ぎやすくなる．そこで，スリーブに通す金属棒の径によってスリーブの網目を大きくする．スリーブの繊維に関する変数を図 2.2C に示す．スリーブは $2n$ 本の繊維から成っており，1 本の繊維はらせん状に巻き付けられている．1 本の繊維のらせんの波長を L_0 とする．また，スリーブの初期状態の径を D_0 ，変形時のスリーブの径を D ，スリーブの初期状態の編み角を θ_0 ，変形時のスリーブの編み角を θ ，繊維の線径を t ，網目のひし形の一辺の長さを a とする．このとき，網目の面積は以下の式 (2.3.1) で表される．

$$S = a^2 \sin 2\theta \quad (2.3.1)$$

また， $2n$ 本の繊維のうち n 本と他の n 本の繊維は互いに逆向きのらせん軌道を有する．このため，軸方向に L_0 間にスリーブの網目は n 個存在することとなり，繊維の線径を考慮すると網目の一辺の長さ a は式 (2.3.2) で示される．

$$a = \frac{L}{2n \cos \theta} - \frac{t}{\sin 2\theta} \quad (2.3.2)$$

スリーブが変形した場合においても 1 本の繊維のらせん一周分の長さが不変であることを利用すると次の式が得られる [79, 80]．

$$\frac{L_0}{\cos \theta_0} = \frac{L}{\cos \theta}, \quad \frac{\pi D_0}{\sin \theta_0} = \frac{\pi D}{\sin \theta} \quad (2.3.3)$$

式 (2.3.1)-(2.3.3) を用いることで，網目の面積はスリーブの径，つまり挿入する金属棒の径 D のみの関数として定められる．図 2.3B より， $t = 0.16$ mm, $\theta_0 = 22$ deg, $L_0/n = 1.6$ mm, $D_0 = 4.2$ mm であることがわかる．これらの値を用いると，式 (2.2) の網目の面積 S が最大値をとるのは D は 6.3 mm のときとなる．このため，入手が容易である径 6 mm の金属棒にスリーブを通し，接着剤を塗布することとした．これにより，網目の面積が大きくなり，接着剤の表面張力によって膜を張りにくくすることができる．

また，シリコンゴム上に広げる接着剤の層の厚さについても考える必要がある．接着剤の層が厚い場合，金属棒に接着剤が塗布されることとなる．そして，金属棒に塗布された接着剤によってスリーブの網目に膜が張られてしまう．膜が形成されることを防ぐために，接着剤が金属棒に塗布されない程度の薄さで接着剤を塗り広げる必要がある．接着剤の層がスリーブの繊維の径 0.16 mm よりも厚くなると，スリーブを転がした際に，接着剤が金属棒に塗布される．このため，本研究では厚さ 0.08 mm の接着剤の層の作製を目指した．接着剤の密度は 1.05 g/cm³ であり，面積が 70 mm×40 mm のシリコンゴムを用いた．また，塗り広げる際に半分の接着剤がは

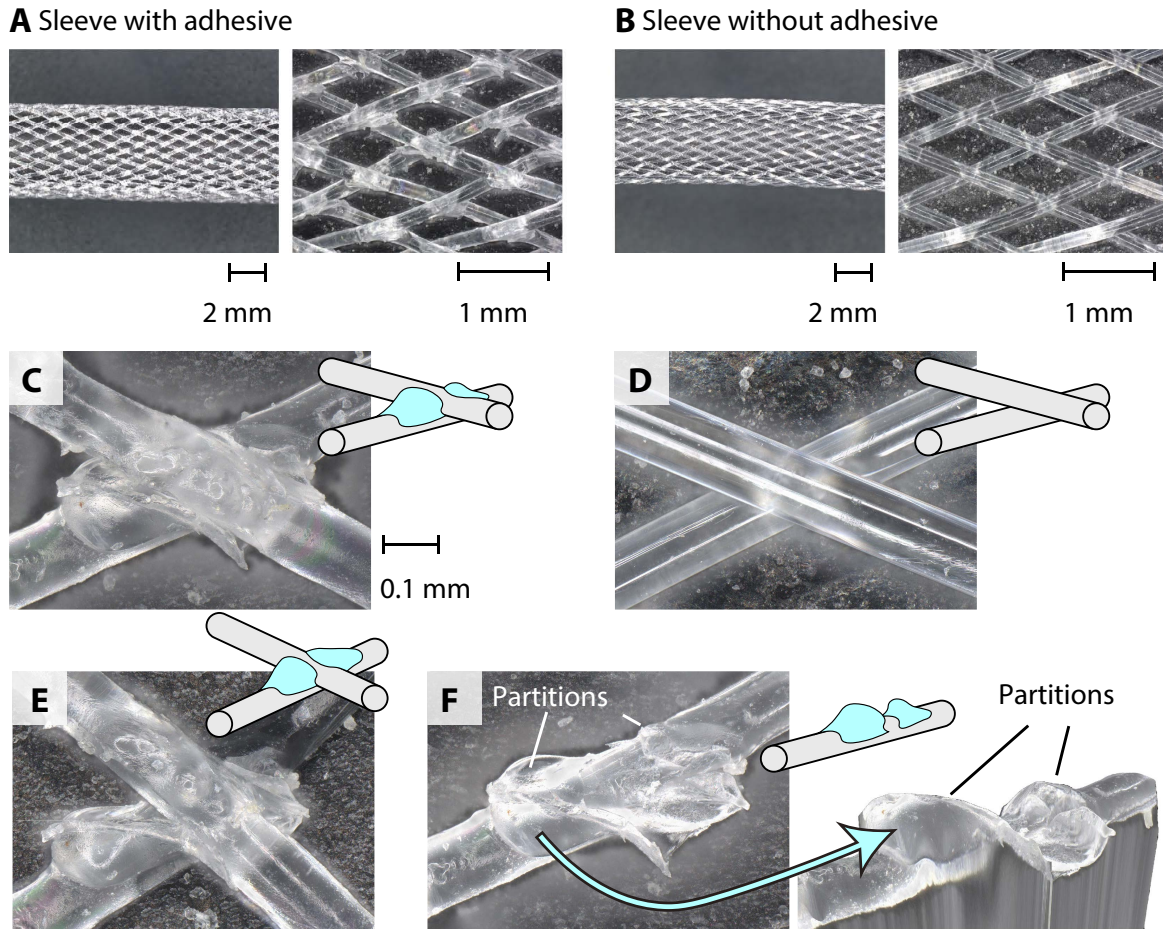


Fig. 2.3: Surface of the sleeve of artificial muscle.

けに付着すると仮定した。この場合、0.47 g の接着剤を塗布することで厚さ 0.1 mm の接着剤の層が形成され则认为られる。このため、0.5 g 程度の接着剤を用いた。

以上に述べた手法により、スリーブの網目に接着剤が膜を張りづらくすることが可能である。この手法を用い、スリーブをシリコンゴムの上で 5 回ほど転がすことによって接着剤を塗布した。このとき、よく喚起を行ったうえで接着を行った。また、径 6 mm の金属棒によってスリーブの編み角が大きくなってしまったため、10 分ほど接着剤を乾燥させたのち図 2.2B.iv に示すようにスリーブを両側から引っ張ることで編み角を通常の状態に戻す。接着剤を塗布した直後に編み角を戻すと、スリーブの繊維に付着した接着剤が容易に網目に入り込むため、10 分程度乾燥させる必要がある。

1 時間ほど放置し接着剤を乾燥させたのち、スリーブの繊維が交差した部分は図 2.2A.ii に示すように接着され、伸縮作用を失う。この状態のスリーブ内に長い風船を挿入し 0.4 MPa を加え、内側からスリーブを膨らますことで繊維 2 本の繊維に付着した接着剤がどちらか片方の繊維から外れる (図 2.2B.v)。これにより、接着剤が塗布された 2 本の繊維はパーティション構造を残した状態で切り離され、収縮作用が機能するようになる。2 本の繊維に取り残された接着剤によって、

図 2.2A に示す繊維同士のずれを防ぐ機能が実現される。

光学顕微鏡 (VHX-8000 series, Keyence Corp.) を用いて撮影した接着剤を塗布していないスリーブと接着剤を塗布したスリーブの様子を図 2.3 に示す。図 2.3A,B に示すように、繊維が交差した部分に接着剤が塗布されている様子を確認することができた。また、編み角についてもどちらも 22 deg 程度であることが確認できた。図 2.3C は接着剤を塗布したスリーブの繊維同士の交点、図 2.3D は接着剤を塗布していないスリーブの繊維同士の交点を示している。また、図 2.3E は接着剤を塗布したスリーブを用いた人工筋に空圧を印加して収縮させた際の繊維同士の交点を示している。繊維同士の間の角度が変化している様子が確認された。また、図 2.3E から上側の繊維を取り除き、下側の繊維の様子を観察した (図 2.3F)。図 2.3F の右図は深度合成法を用いて 3 次元表示させたものである。これにより接着剤によるパーティション構造が実際に形成されていることが確認された。

接着剤をスリーブに塗布する際、接着剤の塗布が不十分な場合や過剰な場合など失敗したものは 2 割程度であった。耐久試験においてはこれらの失敗したスリーブは取り除いて実験を行った。

2.4 接着剤を塗布した細径人工筋の性能評価

2.4.1 接着剤塗布による細径人工筋の動作性能への影響

接着剤を塗布したスリーブを用いた人工筋と通常的人工筋の収縮率を評価する。人工筋 (EM40, 株式会社 s-muscle) は一度 0.6 MPa 程度の高圧力を 5 秒程度印加することによって中のゴムチューブの柔軟性が向上し、0.3 MPa や 0.4 MPa といった通常の駆動印加圧を加えたときの人工筋の収縮力が向上する。このため、本研究においても一度 0.6 MPa を印加した。それぞれ的人工筋の収縮率を用いて比較を行った。

図 2.4A,B に接着剤を塗布した人工筋と通常的人工筋の駆動の様子を示す。図 2.4B.i に示すように、繊維に接着剤が付着された状態で図 2.4B.ii に示す通常のスリーブと同様に變形している様子が観察された。無負荷時において 0.4 MPa を印加した際に 2 種類的人工筋で同様の収縮率を有していることが確認された。このときの圧力と収縮率の関係を図 2.4C に示す。また、圧力と収縮力の関係、0.4 MPa を印加した際の収縮率と収縮力の関係について図 2.4D,E に示す。図 2.4C,D,E いずれの場合においても 5 つのサンプルにおいてデータを測定しその平均を用いてプロットした。人工筋の特性を示すための重要な図 2.4C,D,E に示す 3 つの関係において、接着剤を塗布したスリーブによる人工筋は通常的人工筋と同様の性能を示した。また、図 2.4F,G に人工筋の時間応答性に関するデータを示す。図 2.4F では、1 本的人工筋に 0.4 MPa の空圧を印加した際の収縮率の時間応答を示している。また、図 2.4G には 0.3 MPa, 0.5 MPa, 0.7 MPa を印加した際の収縮率の変化に関する時定数を示している。それぞれ、人工筋を 5 回収縮させた際の時定数の平均値を示している。接着剤を塗布したものと塗布していないもので大きな差は確認されなかった。

さらに、接着剤で強化した人工筋も通常的人工筋と同様に柔軟性を示し、曲げた状態での駆動が可能であることが確認された。

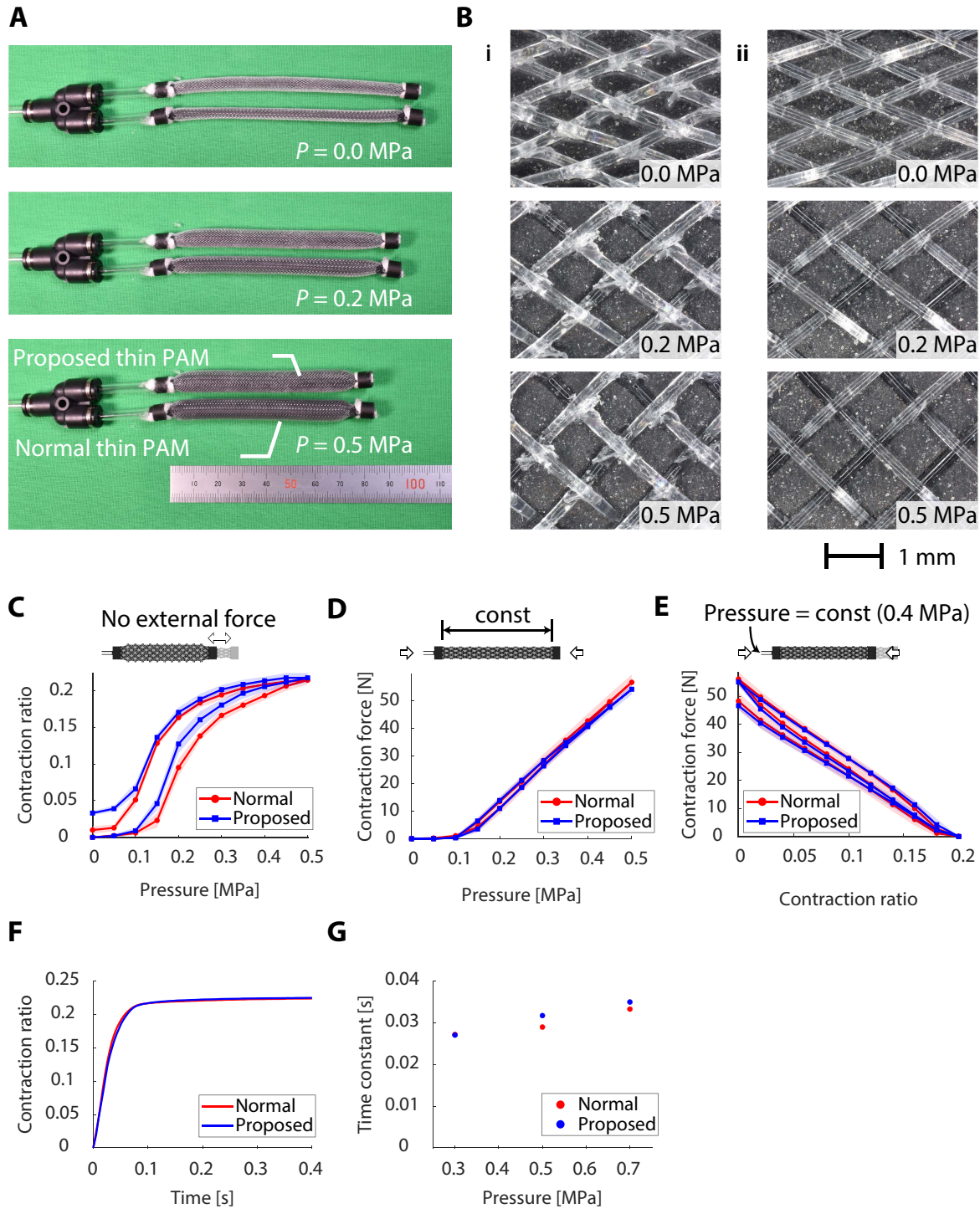


Fig. 2.4: (A) Contraction of normal thin McKibben muscle and thin McKibben muscle with adhesive. (B) Surface of the sleeve. (C-G) Actuation performance of thin McKibben muscle with adhesive.

2.4.2 接着剤塗布による細径人工筋の耐久性への効果

人工筋を巻き付ける金属棒の径と人工筋のなす角度、人工筋に印加する空圧の圧力に対する人工筋が破損するまでの駆動回数を測定した。耐久試験のための装置を図 2.5A に示す。1 本の人工筋は、人工筋の両端の紐をねじとワッシャを用いることでアルミフレームに取り付けられており、金属棒に巻き付けられた状態で配置されている。それぞれの人工筋はソレノイドバルブ (025E1, KOGANEI) につながれている。コンプレッサからの空圧をレギュレータによって 0.5 MPa に調整し、ソレノイドバルブに送られ、マイコンからの指令によって人工筋を駆動させる。1 秒 ON, 1 秒 OFF を繰り返し、0.5 MPa の空圧の印加、排気を繰り返すことで人工筋の耐久試験を行った。

耐久試験の結果を図 2.5B,C,D に示す。1 つのデータを得るために 5 本の人工筋の耐久試験を行い、その平均値と標準誤差によりプロットした。耐久試験はそれぞれ 1,000,000 回まで行った。1 回の空圧印加、排気に 2 秒要し、1,000,000 回の空圧印加には 23 日間要する。図 2.5B,C,D において百万回まで耐えた人工筋の結果は百万回として表示している。図 2.5B では径 4 mm の人工筋に加え、径 2 mm の人工筋 (EM20, s-muscle) を用いて巻き付ける金属棒の径 D と人工筋の径 d の比率 D/d に対する破損までの繰り返し駆動回数を検証した。人工筋のなす角度は 0 deg とした。図 2.5C では径 4 mm の人工筋を用いて、人工筋の巻き付け角 φ を 0 deg, 45 deg, 90 deg とした場合の破損までの繰り返し駆動回数を検証した。巻き付けるパイプの径は 10 mm とした。図 2.4D では、巻き付け角度を 0 deg とし印加圧力を 0.3 MPa, 0.5 MPa, 0.7 MPa とした場合の耐久性を検証した。図 2.5B,C,D において、青く示すデータが通常的人工筋による測定データ、赤く示すものが提案する手法を用いた人工筋による測定データである。

ここで、耐久試験において数千回の駆動後に確認された別の破損機序による破損について述べる。耐久試験の結果、スリーブの繊維同士のずれを伴わずに破損する人工筋が確認された。この人工筋の破損の様子を図 2.5E に示す。図 2.5E.i はスリーブを取り除いた人工筋のゴムチューブの表面を示しており、スリーブ痕が残っている様子が確認された。そして、空圧を印加することで図 2.5E.ii から図 2.5E.iii に示すように、直径 0.5 mm 程度の微小な穴から空気が漏れるといった破損の仕方であった。図 2.1C の破損の仕方を破損モード 1、図 2.5E の破損の仕方を破損モード 2 と呼ぶこととする。

図 2.5B では、 D/d が 5 から 7.5 の間のある値 $(D/d)_t$ を境にして、それより小さい場合にはすべての場合において提案手法が有効であることが確認された。提案手法を用いた場合、図 2.1C に示すスリーブのずれは生じず、 D/d が 6 以下の場合、通常的人工筋では破損モード 1 で、提案手法を用いた人工筋では破損モード 2 で破損した。一方で D/d が 6 以上の場合にはともに破損モード 2 で破損した。また、径が 2 mm の人工筋はゴムの厚さが薄いため、スリーブ痕による破損モード 2 で破損するまでの駆動回数が小さくなることが確認された。

図 2.5C では、測定したデータのうち、人工筋のなす角度が 67.5 deg から 90 deg の間のある角度 ψ_t を境にして、それより小さい場合は提案手法が有効であることが確認された。図 2.5C においても、提案手法を用いた場合は全て破損モード 2 による破損であった。巻き付け角を 90 deg と

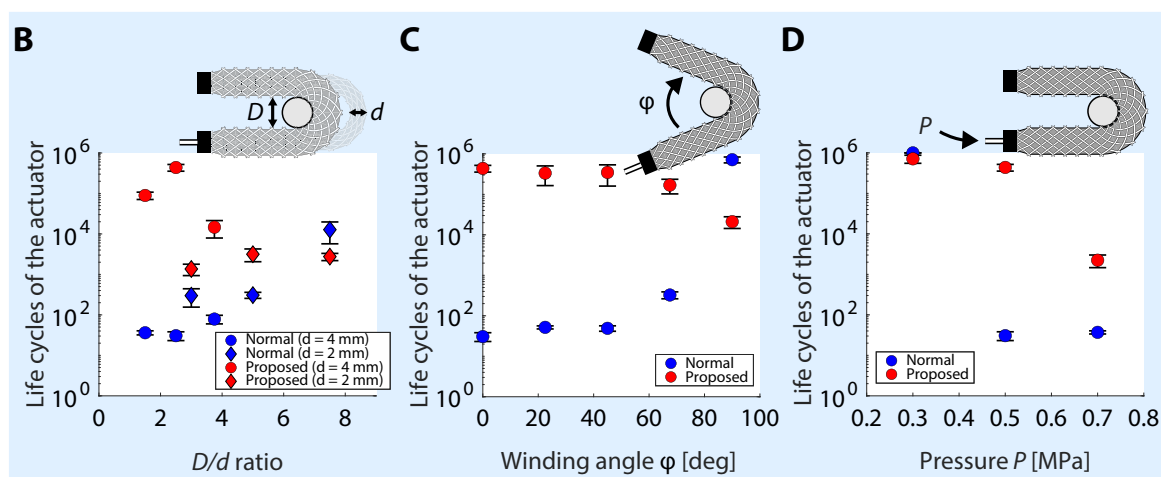
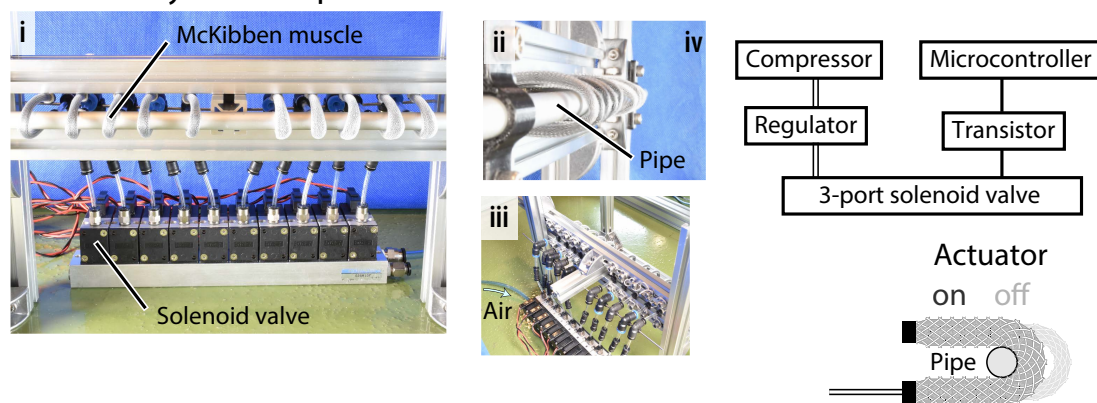
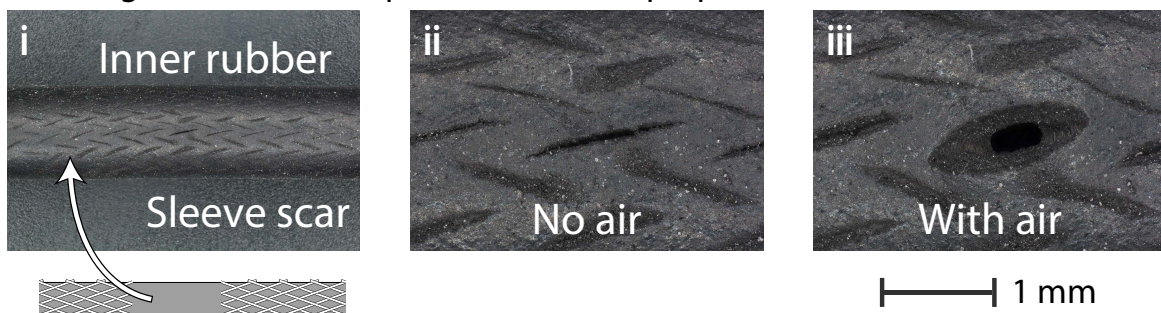
A Durability test setup**E Damage mode 2 (more pronounced with proposed method)**

Fig. 2.5: (A) Durability test equipment and driving system. (B) Repetitions number before breaking with respect to D/d ratio. (C) Repetitions number before breaking with respect to the thin McKibben muscle's angle. (D) Surface of the inner rubber tube caused breaking mode 2.

した接着剤を塗布していない人工筋については、4つのサンプルは破損モード2で、1つのサンプルは破損モード1で破損した。一方、巻き付け角を 90 deg とした接着剤を塗布した人工筋は全て破損モード2によって 20,000 回程度で破損した。45 deg と 90 deg において接着剤を塗布してい

ない人工筋，接着剤を塗布した人工筋，それぞれ 1 つのサンプルが 1,000,000 回までの耐久試験に耐えた。

図 2.4D において，測定したデータのうち，圧力が 0.3 MPa から 0.5 MPa の間のある圧力 P_i を境にして，それ以上の場合提案手法が有効であることが確認された。また，印加する圧力が高くなるほど損傷しやすくなることが確認された。0.3 MPa を印加した際，接着剤を塗布した人工筋は 3 つのサンプルが破損モード 2 で破損し，2 つのサンプルが 1,000,000 回まで耐えた。接着剤を塗布していない人工筋は 0.3 MPa において 5 つすべてのサンプルで 1,000,000 回まで耐えた。また，0.7 MPa を印加した際には接着剤を塗布した人工筋では 2 つのサンプルが破損モード 1 で，3 つのサンプルが破損モード 2 で破損した。0.7 MPa といった高い圧力を与えた際には徐々にパーティション構造が破壊されることが確認された。

図 2.5B,C,D の結果から本研究での提案手法によって，急峻に屈曲させられた状態での人工筋の耐久性を向上できることが確認された。これらの条件においては，接着剤によるパーティション構造が人工筋の繰り返し駆動で破損しなかったことが考えられる。しかし，図 2.5B の D/d が 6 mm 以上の場合，C の人工筋の角度が 90 deg の場合，圧力が 0.3 MPa の場合において提案手法より通常的人工筋のほうが多くの繰り返し駆動に耐えた。これらの条件下における人工筋の破損は，曲げ角度が急ではない，圧力が低いなどの理由から破損モード 1 での破損が起こりづらく，破損モード 2 による破損が主となっている。破損モード 2 での破損が主となる場合に接着剤を塗布した人工筋の耐久性が低下していることから，接着剤を塗布したスリーブのほうが接着剤を塗布していないスリーブよりもゴムチューブを傷つけやすいことが考えられる。このスリーブ痕は使用圧力が 0.5 MPa と高いこととスリーブの線径が 0.16 mm と小さいこと，接着剤の微小な棘に起因する。よって，使用圧力を定格の 0.3 MPa とするか，スリーブの線径を太くし，表面を滑らかにすることによってこれらを解決することができること考えられる。急激な曲げとして考えられる人工筋の角度が 67.5 deg 以下， D/d が 6 以下の場合，径 4 mm の人工筋を用いたいずれの場合に関しても 1000 倍以上の耐久性を示し，最大で 10,000 倍以上の耐久性を示した。

破損モード 2 による影響を抑えるため，接着剤を用いずにスリーブの編み方を変えることによってスリーブの繊維同士の位置関係のずれを防ぐ手法なども考えられる。しかし，接着剤を塗布していない場合にも破損モード 2 による損傷は確認されたため，数百万回といった回数の繰り返し駆動においても耐久性が必要な場合には，ゴムチューブに自己修復作用を与え人工筋が自ら微細な破損を修復するといった手法が有用となるだろう。

2.5 まとめ

本章では細径人工筋の屈曲状態での繰り返し駆動における耐久性の向上について述べた。まず，細径人工筋の曲げ状態での駆動時における破損原因を明らかにした。そして，曲げ状態での高耐久化のためにスリーブの繊維が交差した部分に接着剤を塗布する新しい手法を提案した。接着剤の上で転がしたスリーブの表面を電子顕微鏡により観察することによって接着剤の微細なパーティション構造が形成されていることが確認された。また，通常的人工筋と同程度の収縮率，同

様の柔軟性を有することを確認した。そして、耐久試験を行った結果、以下の条件で接着剤塗布による人工筋の耐久性向上への有効性が確かめられた。

1. 人工筋の径に対する巻き付けるパイプ径の比率 D/d が一定の値 $(D/d)_t$ より小さい場合 ($5 < (D/d)_t < 7.5$)
2. 巻き付け角度が一定の角度 ϕ_t 以下の場合 ($67.5 \text{ deg} < \phi_t < 90 \text{ deg}$)
3. 人工筋への印加圧力がある一定の圧力 P_t 以上の場合 ($0.3 \text{ MPa} < P_t < 0.5 \text{ MPa}$)

これらの条件はいずれも人工筋を直線状に配置して 0.3 MPa で使用する場合に比べて厳しい条件である。逆に、上記の逆場合、つまり厳しくない条件においてはスリーブがゴムチューブを傷つけることによる破損によって、接着剤を塗布した人工筋の耐久性は接着剤を塗布していない人工筋の耐久性を下回った。スリーブがゴムチューブを傷つけることによる人工筋の破損は接着剤の有無に関わらず生じるが、接着剤を塗布した場合の方がその影響が大きいことが耐久試験によって確かめられた。

本章で提案した接着剤の塗布による人工筋の耐久性向上法を用いることで、直線状だけでなく、屈曲させた状態での人工筋の利用が可能となりロボットの設計方法の幅を広げることが可能である。次章では、テンセグリティ内の三角形の周囲に人工筋を巻き付けて配置することによるテンセグリティの大変形手法について示す。

第 3 章

細径人工筋の巻き付けによるテンセグリティモジュールの大変形

3.1 本章で実現するテンセグリティの変形について

3.1.1 構造の変形量の定義

本章では、細径人工筋を屈曲させて配置することで人工筋の 20% の収縮率からテンセグリティ構造を大変形させる手法を提案する。この手法を用いて、単体のテンセグリティにおいて、伸縮、曲げ、ねじり、把持を実現させる。これらをモジュールとして組み合わせることで高機能なテンセグリティを実現させることが可能となる。また、細径人工筋駆動型のテンセグリティの静力学によるシミュレーションを用いることで、設計パラメータの最適化を可能とする。

本研究で用いる Six-bar tensegrity の伸縮、曲げ、ねじり変形具合を示すための高さ、曲げ角度、ねじり角度はテンセグリティの底面 $A_1^1 B_1^1 C_1^1$ の三角形とテンセグリティの上面 $A_2^2 B_2^2 C_2^2$ の三角形の位置関係の変化によって定義する (図 3.2B)。

まず本研究において、テンセグリティ構造の各頂点は図 3.1 に示すように、 $A_1^1, A_2^2, B_1^1, B_2^2, C_1^1, C_2^2, A_2^2, A_2^2, B_2^2, B_2^2, C_2^2, C_2^2$ と名付ける。テンセグリティの高さに関しては、上面の三角形の重心と底面の三角形の重心間の距離と定義する。つまり、テンセグリティの高さ H は上面と底面の三角形の頂点の位置ベクトルを用いて、

$$\mathbf{O}_1 = \frac{1}{3} (\mathbf{A}_1^1 + \mathbf{B}_1^1 + \mathbf{C}_1^1) \quad (3.1.1)$$

$$\mathbf{O}_2 = \frac{1}{3} (\mathbf{A}_2^2 + \mathbf{B}_2^2 + \mathbf{C}_2^2) \quad (3.1.2)$$

$$H = |\mathbf{O}_1 - \mathbf{O}_2| \quad (3.1.3)$$

と表される。

次に、図 3.2C に示すような A_2^2 が上方へ変位する場合のテンセグリティの曲げを考える。このときのテンセグリティの曲げ角度は、上面の三角形の重心と A_2^2 を通る直線と底面の三角形のなす角度として定義する。上面の三角形の重心から A_2^2 へのベクトル $\mathbf{a}$ は

$$\mathbf{a} = \mathbf{A}_2^2 - \mathbf{O}_2 \quad (3.1.4)$$

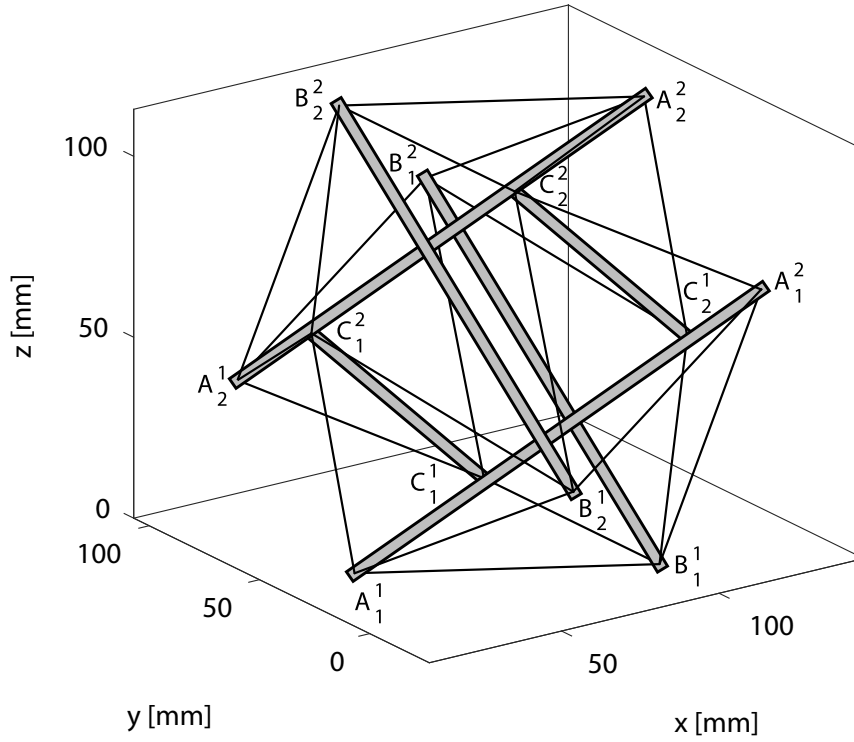


Fig. 3.1: Node labeling of the tensegrity structure used in this study.

として表され、底面の三角形の法線ベクトル $\mathbf{n}$ は

$$\mathbf{n} = (\mathbf{B}_1^1 - \mathbf{A}_1^1) \times (\mathbf{C}_1^1 - \mathbf{A}_1^1) \quad (3.1.5)$$

として表される。これらの変数を用いて、テンセグリティの曲げ角度 θ は

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{n}}{|\mathbf{a} - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n}|} \right) \quad (3.1.6)$$

と表される。

テンセグリティのねじり角は上面の三角形と底面の三角形のなす角度として表す (図 3.2D)。初期状態において、理想的にはベクトル $\mathbf{O}_1\mathbf{A}_1^1$ とベクトル $\mathbf{A}_2^2\mathbf{O}_2$ 、ベクトル $\mathbf{O}_1\mathbf{B}_1^1$ とベクトル $\mathbf{B}_2^2\mathbf{O}_2$ 、ベクトル $\mathbf{O}_1\mathbf{C}_1^1$ とベクトル $\mathbf{C}_2^2\mathbf{O}_2$ はそれぞれ等しい。そこで変形時のテンセグリティにおけるこれらのベクトルのなす角度の平均値をねじり角と定義する。つまり、ねじり角 ψ は

$$\psi = \frac{1}{3} \left(\cos^{-1} \frac{\mathbf{O}_1\mathbf{A}_1^1 \cdot \mathbf{A}_2^2\mathbf{O}_2}{|\mathbf{O}_1\mathbf{A}_1^1| |\mathbf{A}_2^2\mathbf{O}_2|} + \cos^{-1} \frac{\mathbf{O}_1\mathbf{B}_1^1 \cdot \mathbf{B}_2^2\mathbf{O}_2}{|\mathbf{O}_1\mathbf{B}_1^1| |\mathbf{B}_2^2\mathbf{O}_2|} + \cos^{-1} \frac{\mathbf{O}_1\mathbf{C}_1^1 \cdot \mathbf{C}_2^2\mathbf{O}_2}{|\mathbf{O}_1\mathbf{C}_1^1| |\mathbf{C}_2^2\mathbf{O}_2|} \right) \quad (3.1.7)$$

と表される。

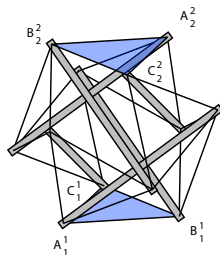
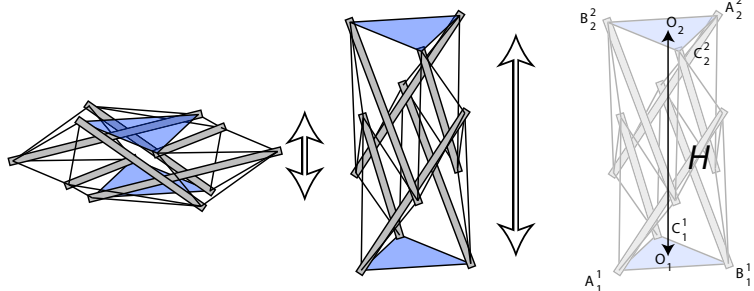
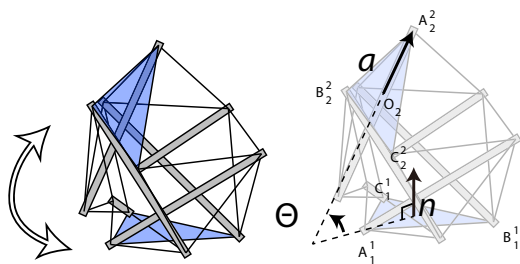
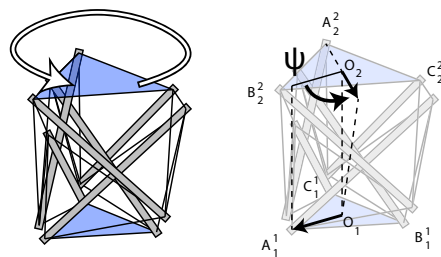
A Initial state**B Contraction and stretch****C Bend****D Torsion**

Fig. 3.2: Definition of deformation magnitude of the tensegrity structure.

3.1.2 先行研究

これまでにテンセグリティの伸縮変形、曲げ変形、ねじり変形に関する研究は行われているものの、それらの変形は受動的であることや変形量が小さいなどの点でモジュール化を目的とした変形としては適さない。

受動的な伸縮変形としては例えば、外力により伸縮を行うもの [18] がある。また、能動的な収縮変形を行うものに関してはおよそ 25% 程度の軸方向の収縮変形を行うもの [17] がある。しかし、伸長変形を行うためのアクチュエータは配置されておらず、復元力はテンセグリティの引張り部材による力のみとなる。

曲げ変形を行うテンセグリティロボットの研究は多く行われている [81, 82, 18, 12]。しかし、多くの曲げ変形は外部からの力による受動的な変形を行うもの [81, 82, 18] や、長く連なったテンセグリティにおいて小さな曲げ変形を行うもの [18, 12] である。長く連なったテンセグリティにおいては軸方向に長いほど曲げ角度は大きくなりやすく、径が大きいほど曲げ角度は小さくなりやすい。このため、曲げ角度を軸方向の長さを径方向の長さで割った値により規格化した値を用いて先行研究を考えると、38 deg [18], 26 deg [12] と小さい。

Six-Bar Tensegrity において、ねじり変形を実現した研究は筆者が知る限りこれまでに存在しない。他のテンセグリティ構造においても、伸縮や曲げと比較してねじり動作に関する研究は数が少ない。また、それらのテンセグリティの変形量も 1 段あたり 20 deg 以下であり、ロボットモジュールとして十分とは言えない [72, 83, 18]。さらに、他の変形モードを組み合わせることが

難しい対称性の低いテンセグリティ構造を用いていると同時に、軸方向の柔軟性を有していない [72, 83], 外部からの力による受動的なねじり動作である [18, 84] といった点で本研究の目的には不向きである。

本章では、先行研究より大きな構造変形を能動的な変形として実現する手法について述べる。

3.2 細径人工筋を用いたテンセグリティの部分的変形

細径人工筋の収縮率は 20% 程度と小さい。人工筋を用いてテンセグリティを大変形させるためには、この 20% の収縮率を考慮した適切な人工筋配置を行う必要がある。本節では、テンセグリティの圧縮部材の長さが不変であることを利用した二種類の人工筋の配置法を提案する。圧縮部材部分に人工筋を配置することで人工筋の全長を稼ぐことができ、ゴム紐部分の長さを大きく変化させることが可能となる。

3.2.1 テンセグリティ内の三角形の扁平化

一つ目の人工筋の配置法は第 1 章で述べた、テンセグリティ内の三角形の周囲に人工筋を巻き付ける方法 (図 3.3A) である。ここで考える三角形は Six-bar tensegrity 内に存在する 1 本のストラットの端点と、その端点から最も近い位置に存在するストラット、それらをつなぐ 2 本のゴム紐から成る ($\alpha_1\alpha_2\beta$)。この周囲に人工筋を配置することで、人工筋駆動時に三角形を扁平させ、ストラットの端点 β とストラット $\alpha_1\alpha_2$ を接触させることができるというものである。さらに、人工筋をたるませて配置することで、第 1 章で述べたように三角形の受動的な広がり許容する。Six-bar tensegrity は 6 本のストラットを有し、ストラットの端点を 12 個持つため、それぞれの端点に対して人工筋を巻き付ける三角形がある。また、本論文においてテンセグリティ内の三角形と呼ぶものは全て、1 本のストラットの端点と別のストラットから成る $\alpha_1\alpha_2\beta$ に合同な三角形を意味する。

3.2.2 テンセグリティ内の二頂点の接近

二つ目の人工筋配置法は、テンセグリティの 2 つの頂点間の収縮率を上げるために有効な手法である (図 3.3B)。本手法では、接近させたい 2 つの頂点を含む二本のストラットとそれらをつなぐ張力部材を経由するように人工筋を配置する。圧縮部材の長さが不変であるため、人工筋の収縮が全て 2 点間の接近に変換される。単純に 2 点をつなぐように人工筋を配置した場合には 20% の収縮に限られるが、張力部材部分にも人工筋を配置することで二点の収縮率を 100% とすることが可能である。

ここで述べた二頂点の接近を二つ組み合わせて図 3.3A のような変形を実現させることも可能であるが、用いる人工筋の本数を少なくするために本研究では三角形の扁平化には 1 本の人工筋で三角形を囲う手法を用いる。

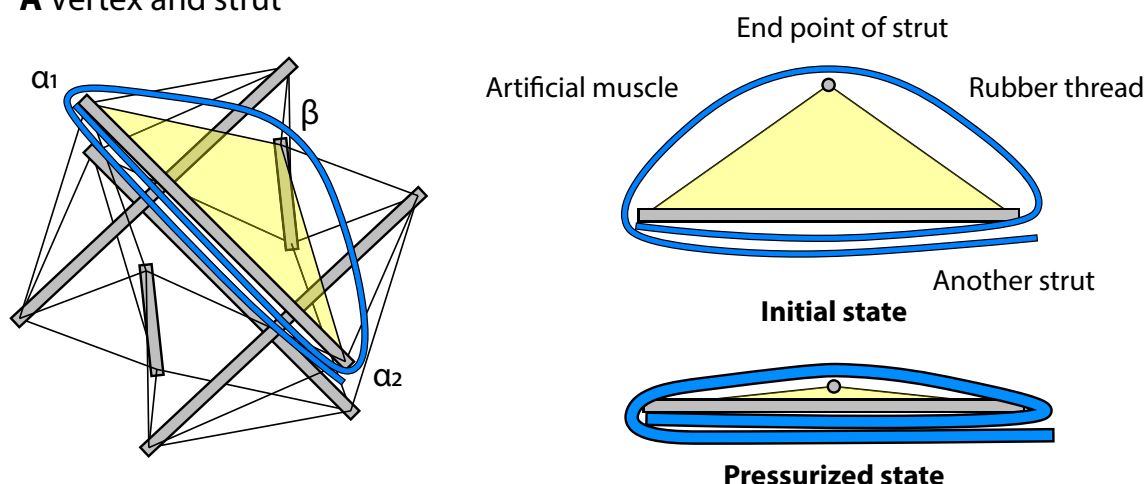
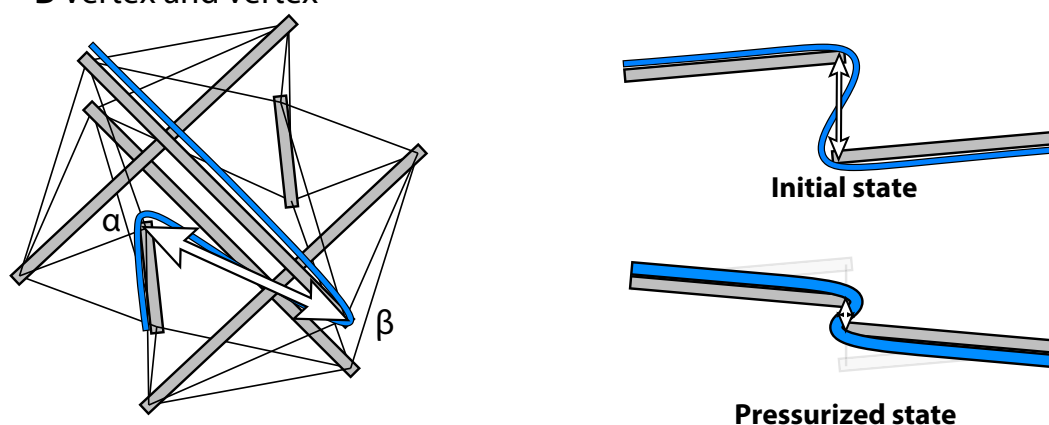
A Vertex and strut**B Vertex and vertex**

Fig. 3.3: Method for attaching artificial muscles to the tensegrity structure. (A) Attachment scheme to bring a node and a strut closer. (B) Attachment scheme to bring two nodes closer.

3.3 テンセグリティ構造全体の変形手法

3.3.1 伸縮，曲げの実現手法

テンセグリティ構造を外力によって収縮させるように変形させた際，テンセグリティ内の 6 つの三角形が受動的に扁平させられることが確認された．このため，逆に図 3.3A に示す人工筋により三角形を扁平させる手法を用いて 6 つの三角形を変形させることで，テンセグリティ構造全体が大きく収縮させられる変形が実現できると考えた．この考えのもと，テンセグリティ内の 12 個の三角形の周囲に人工筋を取りつけ，テンセグリティに様々な変形を与えることを考える．人工筋が構造に与える影響を考慮することで，収縮変形のみでなく，伸長変形，曲げ変形が実現でき

ると考えられる。

まず、1 本的人工筋が与えるストラットの端点の高さ方向の変位への影響について、 A_1^1 を例にして考える。 A_1^1 の高さ方向の変位に大きく影響を与える人工筋は図 3.4A.i,ii に示す 2 本である。それぞれ、 $A_1^1 C_1^1 C_1^2$, $A_2^2 C_2^2 C_2^1$ を囲むように配置してある人工筋である。図 3.4A.i に示す人工筋を収縮させる際、点 A_1^1 はストラット $C_1^1 C_1^2$ 方向へ引張を受けるため、 A_1^1 は上方向の力を受ける。そして、図 3.4A.ii に示す人工筋を収縮させると A_1^2 は $C_2^2 C_2^1$ の方向へ引張を受ける。このとき、ストラット $A_1^1 A_1^2$ には下方向の力が加わり、 A_1^1 は下方向の力を受ける。よって、 A_1^1 を上方向に変位させる場合は図 3.4A.i の人工筋を駆動させ、 A_1^1 を下方向に変位させる場合は図 3.4A.ii の人工筋を駆動させればよい。これより、構造内の 12 本的人工筋は、構造の上面と底面に位置するストラットの 6 つの端点に対してそれぞれ上方向と下方向への変位をもたらす人工筋として考えることができる。

構造全体に収縮変形を生じさせるためには上面と底面の端点をそれぞれ近づけるように、図 3.4B.i に示す矢印に対応する 6 本的人工筋を駆動すればよいと考えられる。逆に、構造全体に伸長変形を生じさせるためには、上面と底面を引き離すように、図 3.4B.ii に示す矢印に対応する 6 本的人工筋を駆動すればよいと考えられる。さらに、曲げ変形を生じさせる場合は、上面の三角形と底面の三角形に傾きを与えるために図 3.4B.iii の矢印のようにそれぞれの端点を変位させるための人工筋に空圧を印加すればよいと考えられる。図 3.4B.iii の人工筋配置を回転、反転させた人工筋配置により他の 5 方向への曲げが実現されることが考えられる。図 3.4 において、駆動させる人工筋が巻き付けられた三角形の頂点 (図 3.4A.i では A_1^1) を丸印で示している。

実際には、テンセグリティの変形は駆動させる人工筋の力と引張部材の張力全てのつり合いによって決定されるため、上記のように単純ではない。3.4.2 項では、静力学シミュレーションを用いて上記の考えの通り変形させることができることを示す。

3.3.2 ねじりの実現手法

Six-Bar Tensegrity は図 3.5A に示すように 4 つの層から成る。三角形 $A_1^1 B_1^1 C_1^1$ を含む層を第一層、三角形 $A_2^1 B_2^1 C_2^1$ を含む層を第二層、三角形 $A_1^2 B_1^2 C_1^2$ を含む層を第三層、三角形 $A_2^2 B_2^2 C_2^2$ を含む層を第四層と呼ぶことにする。これらの層を用いてテンセグリティ構造のねじり変形について考える。

テンセグリティ構造を z 軸方向にねじれさせることは第一層と第四層の三角形の間でねじりを生じさせることを意味する。構造全体を z 軸方向にねじれさせる場合、各層の三角形同士の間でねじりが生じることになる。このため、逆に各層の三角形同士の間でねじり変形を生じさせることでテンセグリティ構造全体をねじれさせることができると考えられる。

図 3.5A 右図のように二つの三角形の頂点同士を近づけることで、2 つの三角形間でねじりが生じる。三角形の頂点同士の接近は図 3.3B に示す手法を用いることで実現可能である。図 3.5A に示す 3 本の矢印に対応する 3 本的人工筋を配置し、駆動することで 2 層の三角形間のねじりを実現することができる。テンセグリティの 4 層の三角形を 2 組に分けそれぞれの組において図 3.5A に示すようなねじりを生じさせることを考える。4 つの三角形を 2 組に分ける方法は第 1 層とペ

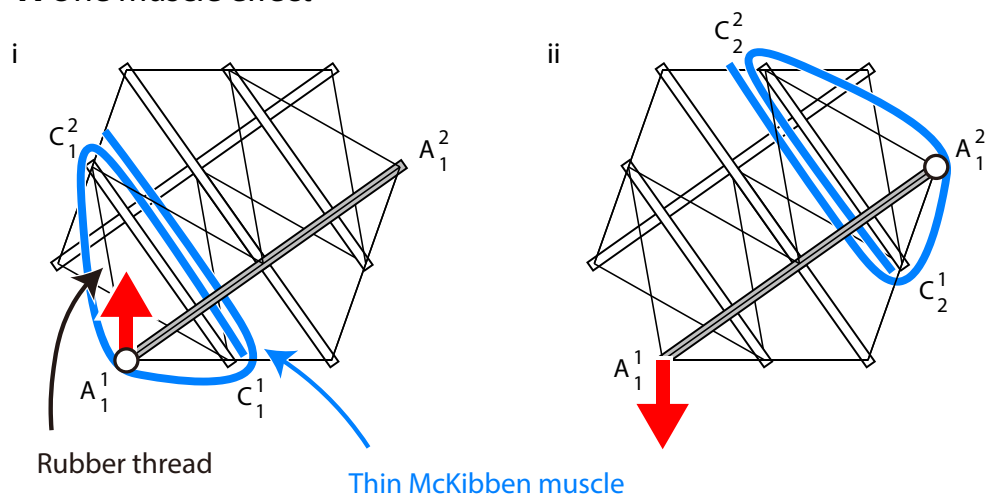
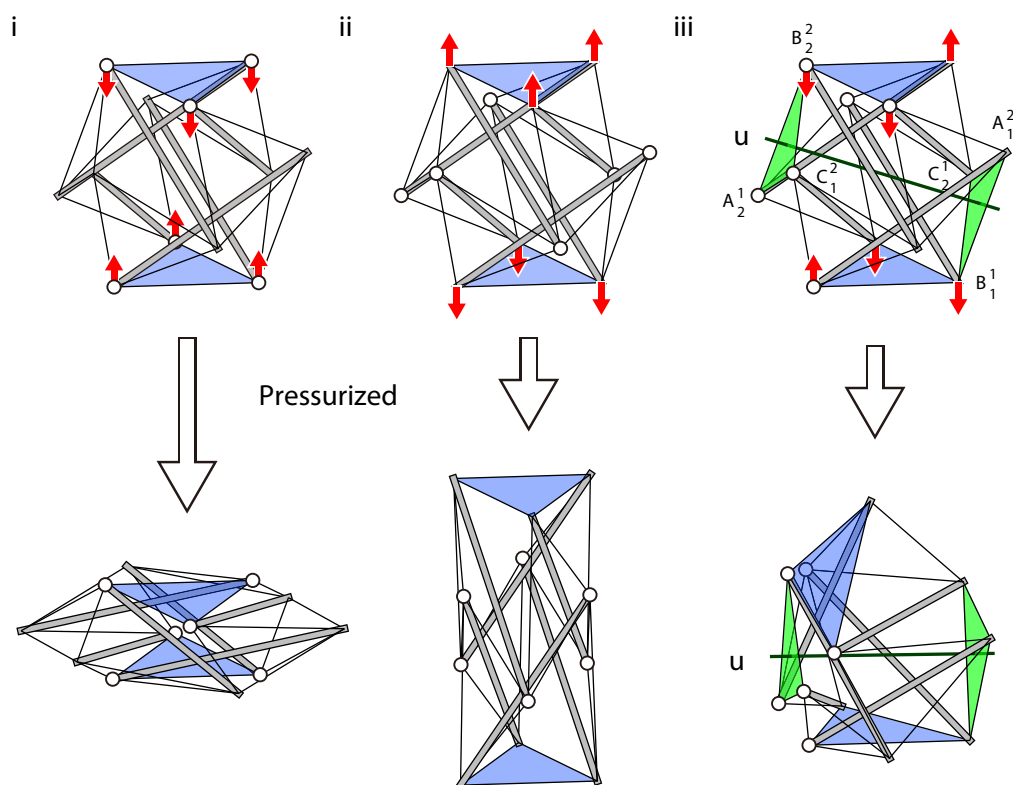
A One muscle effect

B Deformation concept


Fig. 3.4: (A) Two artificial muscles that affect the height displacement of A_1^1 when using the "4/3 muscle winding" method. To give an upward displacement to A_1^1 , the artificial muscle in (i) should be driven, and to give a downward displacement, the artificial muscle in (ii) should be driven. (B) Artificial muscles to be driven and the deformation at that case.

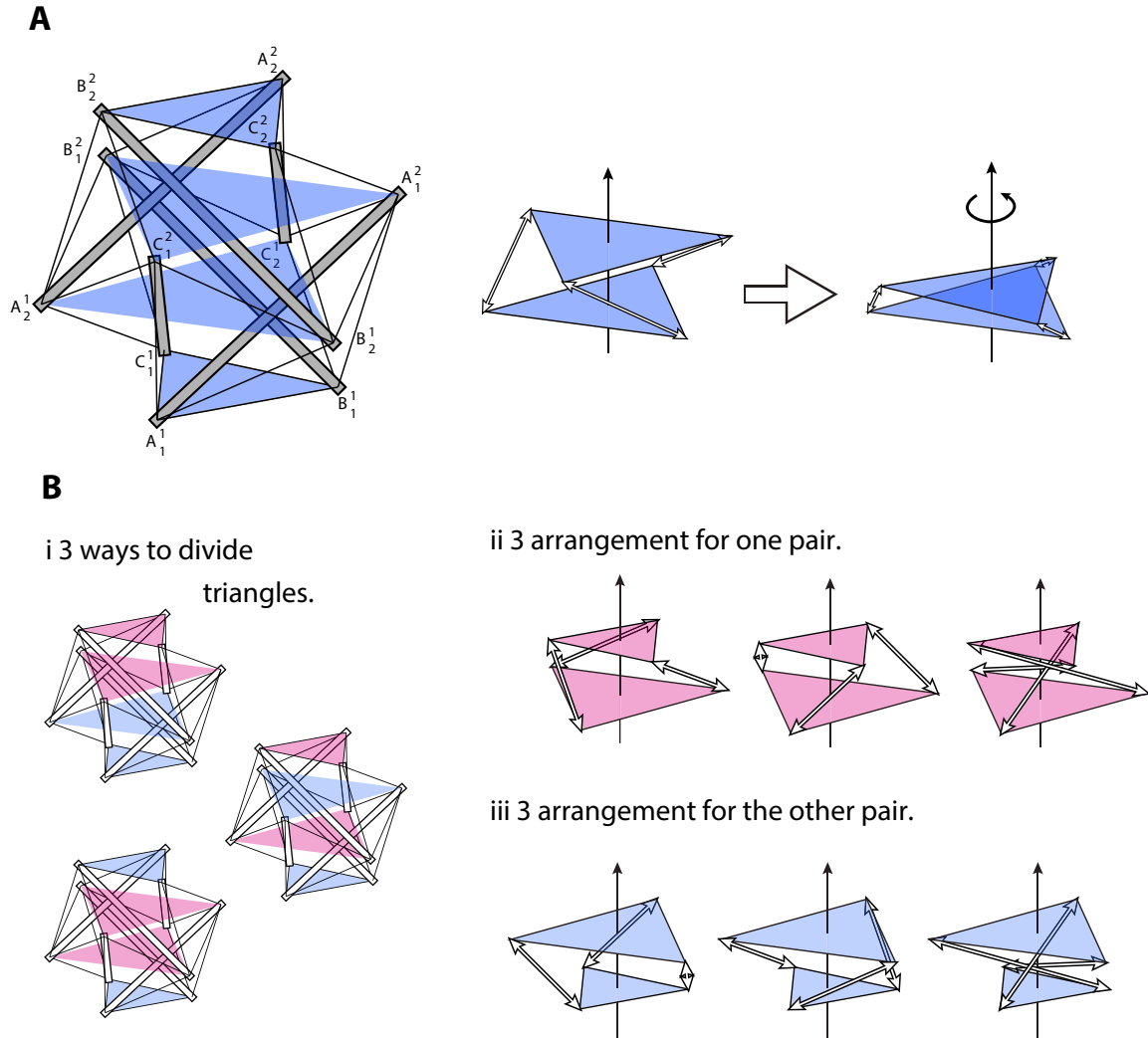


Fig. 3.5: (A) Torsional deformation between triangles due to proximity between two points. (B) (i) Three ways to divide the four triangles into two pairs. Three methods to place artificial muscles between (ii) red, and (iii) blue triangles. Considering (i), (ii), and (iii), there are $3 \times 3 \times 3 = 27$ placement methods of the artificial muscles.

アになるものを考えることで3通りとなる(図3.5B.i). 二つの三角形の間に人工筋を配置する方法は図3.5B.ii,iiiに示すように3通りである. このため, テンセグリティ構造を z 軸方向にねじれさせる可能性のある人工筋の配置法は4つの三角形の分け方とそれぞれの三角形同士のねじらせ方を考えることで $3 \times 3^2 = 27$ 通り存在する. テンセグリティ構造はゴム紐の弾性力と人工筋の荷重の全てのつり合いにより変形が求まり, 非常に複雑であり, 変形の推定が困難である. このため3.4.3項では, ねじりを生じさせる可能性のある27通りの全ての人工筋の配置法についてシミュレーションを行い, テンセグリティにねじりを生じさせるための最適な人工筋の配置法を決定する.

3.4 テンセグリティのモデル化と設計

3.4.1 収縮，ねじり，曲げ変形のための運動学と静力学

テンセグリティ構造の解析として静的 [85] および動的解析 [86, 87] や，構造の安定性解析 [88, 89] がこれまでに行われている．しかし，人工筋は長さによって力が変わるため，長さを考慮した解析が必要である．そのため，本研究では，従来のテンセグリティの運動学解析と人工筋の変位，力特性を連成した解析を行う．

伸縮，曲げ，ねじりは一つの軸周りの対称性をもつ変形である．曲げ変形に関しては，図 3.4B.iii に示す u 軸周りの対称性を有する変形である．これは丸印が u 軸について対象であることを考えることでわかる．このため収縮，曲げ，ねじりの変形シミュレーションを行うためには，一つの軸まわりに対称性をもつ構造の変形をシミュレーションを行うことができればよい．曲げ変形のシミュレーションでは， z 軸まわりに対称な変形のシミュレーションを行った後 z 軸が u 軸に重なるように回転させることでシミュレーションを行う．そこで，1 つの軸まわりに対称性を有する構造の頂点を表すための変数の設定を行い，それらの変数を用いてゴム紐と人工筋の荷重を考慮した静力学的解析を行う．

テンセグリティ構造の各頂点の名前は図 3.1 に示す通りであり，圧縮部材の長さは L とする．また，テンセグリティ構造の X_1^i で表される頂点を含む圧縮部材の集合を構造 I， X_2^i で表される頂点を含む圧縮部材の集合を構造 II と呼ぶことにする． z 軸まわりに対称性をもつ変形を考慮することができるよう，8 つの変数 $r_1, \theta_1, \phi_1, r_2, \theta_2, \phi_2, h, \psi$ を用いて 12 個の頂点を表す．変数の設定方法とそれらの変数を用いた各頂点の座標を以下に示す．

まず，圧縮部材の傾きを θ_1, ϕ_1 を用いて表すことで，圧縮部材 $A_1^1 A_1^2$ の位置は式 (3.4.1), (3.4.2) のようになる．ここで，角度 θ_1 は $A_1^2 - A_1^1$ の極角であり， ϕ_1 は $A_1^2 - A_1^1$ の方位角である．

$$A_1^1(r_1, \theta_1, \phi_1) = (0, 0, 0)^T, \quad (3.4.1)$$

$$A_1^2(r_1, \theta_1, \phi_1) = \begin{pmatrix} L \sin \theta_1 \cos \phi_1 \\ L \sin \theta_1 \sin \phi_1 \\ L \cos \theta_1 \end{pmatrix}. \quad (3.4.2)$$

そして，テンセグリティ構造の底面の三角形の 1 辺を r_1 ，高さを h とすると，構造 I に対するテンセグリティ構造の中心 $P(r_1)$ は式 (3.4.3) のように表される．

$$P(r_1) = \left(\frac{1}{2} r_1, \frac{\sqrt{3}}{6} r_1, \frac{h}{2} \right)^T. \quad (3.4.3)$$

構造 I の残りの頂点の座標は， A_1^1, A_1^2 を $P(r_1)$ を中心として z 軸方向に回転させることで得られる．つまり， $i = 1, 2$ で

$$B_1^i(r_1, \theta_1, \phi_1) = R_z \left(\frac{2}{3} \pi \right) (A_1^i - P(r_1)) + P(r_1), \quad (3.4.4)$$

$$C_1^i(r_1, \theta_1, \phi_1) = R_z \left(\frac{4}{3} \pi \right) (A_1^i - P(r_1)) + P(r_1). \quad (3.4.5)$$

と表される。ただし、 $\mathbf{R}_z(\theta)$ は z 軸まわりに θ 回転させる回転行列である。ここで構造 II の座標を得る方法は次の通りである。(i) まず、構造 I でのパラメータ r_1, θ_1, ϕ_1 を r_2, θ_2, ϕ_2 に置き換える。 θ_2 はこのときの $\mathbf{A}_2^1 - \mathbf{A}_2^2$ の極角、 ϕ_1 は $\mathbf{A}_2^1 - \mathbf{A}_2^2$ の方位角であり、 r_2 は構造の上面の三角形の一片の長さである。次に、 $P(r_2)$ に対して対称移動させる。ここで $P(r_2)$ の位置ベクトルは式 (3.4.3) の r_1 を r_2 に置き換えることで求められる。(ii) $P(r_2)$ を中心として z 軸方向に ψ 回転させる。 ψ はテンセグリティのねじれ角度を表す変数である。(iii) 構造 I と構造 II に対するテンセグリティ構造の中心 $P(r_1), P(r_2)$ を一致させるように構造 II の各頂点を $\mathbf{P}(r_2) - \mathbf{P}(r_1)$ だけ平行移動させる。(i) から (iii) をまとめて式にすると、構造 II のすべての頂点はそれぞれ式 (3.4.6) のように求まる。ただし、 $\mathbf{X} = \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ であり、 $i = 1, 2$ である。

$$\mathbf{X}_2^i = \mathbf{R}_z(\psi) \{ \mathbf{P}(r_2) - \mathbf{X}_1^{3-i}(r_2, \theta_2, \phi_2) \} + \mathbf{P}(r_1). \quad (3.4.6)$$

上記の変数を用いることで、 z 軸周りの対称性をもつ変形を行うテンセグリティ構造の 12 点の頂点を 8 つの変数を用いて表すことが可能である。これらの変数を用いて静力学解析を行うことができる。

用いるゴム紐と人工筋の特性はすべて [90] で用いられている引張試験機によって測定した。本章におけるプロトタイプ製作の際、モジュールによって 2 種類のゴム紐のいずれか、また、人工筋は径 2 mm または 4 mm のいずれかを用いている。これらの特性を測定した。測定値は全て 5 つのサンプルに関する測定値の平均値を用いた。測定したゴムひもの自然長で規格化した長さ l_{rubber} と荷重の関係を図 3.6 に示す。解析を簡単にするためにヒステリシスを無視し、行きと帰りの中間の値を用いることとする。最小二乗法を用いて多項式関数に近似し、ゴムひもの長さ l_{rubber} に対する荷重の関数 $f(l_{\text{rubber}})$ を求める。このときの近似関数の最高次数は、誤差ベクトルのノルムが測定値の最大値の 1% 以下となるように定めた。ゴム紐 1 に関しては 9 次関数、ゴム紐 2 に関しては 11 次関数とした。人工筋の圧力と収縮力、圧力と収縮率、収縮率と収縮力の関係を図 3.6 に示す。この 2 つのグラフから、人工筋に圧力 P を印加したときの荷重と収縮率の関係は線形に近似することができる。よって、人工筋の長さが l_{muscle} のときの人工筋にかかる荷重は圧力 P を印加したときの収縮力 $g_{\text{max}}(P)$ と収縮率 $r_{\text{max}}(P)$ 、また、圧力を印加しない場合の人工筋の長さ $l_{\text{muscle},0}$ を用いて次のように求まる。

$$g(l_{\text{muscle}}) = \left(1 - \frac{l_{\text{muscle},0} - l_{\text{muscle}}}{r_{\text{max}}(P)l_{\text{muscle},0}} \right) g_{\text{max}}(P). \quad (3.4.7)$$

人工筋は空圧を入れた場合、収縮率が 0% から最大収縮率の間では線形ばねのようにふるまう。このため、ここでは人工筋をばねと見なすことで人工筋の弾性エネルギーを考える。ゴムひもの荷重 $f(l_{\text{rubber}})$ と人工筋の荷重 $g(l_{\text{muscle}})$ をそれぞれの長さで積分することで、ゴム紐と人工筋の弾性エネルギー $F(l_{\text{rubber}}), G(l_{\text{muscle}})$ はそれぞれ次のように求まる。

$$F(l_{\text{rubber}}) = \int f(l_{\text{rubber}}) dl_{\text{rubber}}, \quad G(l_{\text{muscle}}) = \int g(l_{\text{muscle}}) dl_{\text{muscle}}. \quad (3.4.8)$$

各ゴム紐の長さは配置されている 2 つの頂点間の距離として表すことができるため、式 (3.4.1)-(3.4.6) を用いることで、 $r_1, \theta_1, \phi_1, r_2, \theta_2, \phi_2, h, \psi$ の 8 つの変数によって表される。人工筋

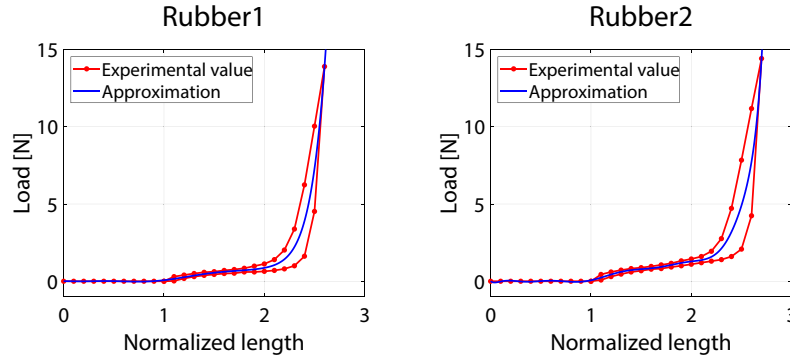
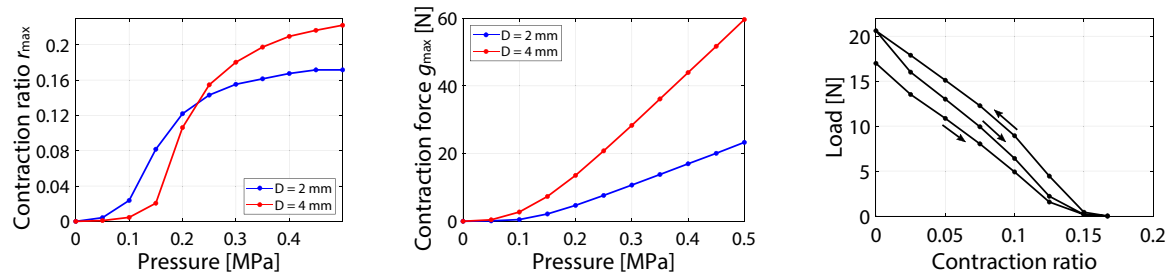
A Rubber thread**B Thin McKibben muscle**

Fig. 3.6: (A) Load on the rubber thread used in the tensegrity structure with respect to normalized length by natural length. (B) Force characteristic of thin artificial muscles.

の長さは配置されている経路上の圧縮部材と引張部材の長さで見なすことができる．例えば，図 3.4A.i に示す人工筋の長さは $\ell = |A_1^1 C_1^1| + |A_1^1 C_1^2| + 2|C_1^1 C_1^2|$ と表される．このようにして，ゴム紐の長さ l_{rubber} と人工筋の長さ l_{muscle} は全て 8 つの変数によって表すことができる．それぞれのゴム紐，人工筋が有するポテンシャルエネルギーは式 (3.4.8) を用いて，ゴム紐，人工筋の長さから算出可能である．テンセグリティ構造の全てのポテンシャルエネルギーはゴム紐のポテンシャルエネルギーと 6 本の人工筋のもつポテンシャルエネルギーの和として，式 (3.4.9) の通り求まる．

$$U(r_1, \theta_1, \phi_1, r_2, \theta_2, \phi_2, h, \psi) = \sum_{\text{all}} F + \sum_{\text{all}} G. \quad (3.4.9)$$

ここで， $\sum_{\text{all}} F$ はゴム紐の全ポテンシャルエネルギーであり， $\sum_{\text{all}} G$ は人工筋の全ポテンシャルエネルギーである．このポテンシャルエネルギーを 8 つの変数により偏微分することで以下のように 8 本の力のつり合い式が得られる．

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial r_1} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \theta_1} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \phi_1} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial r_2} = 0, \\ \frac{\partial U}{\partial \theta_2} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \phi_2} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial h} = 0, \quad \frac{\partial U}{\partial \psi} = 0. \end{aligned} \quad (3.4.10)$$

このつり合いの式を数値的に解くことで，人工筋に空圧 P を印加した場合の 1 本の軸まわりに対称な変形を行うテンセグリティ構造の静力学シミュレーションを行うことが可能である．人工筋

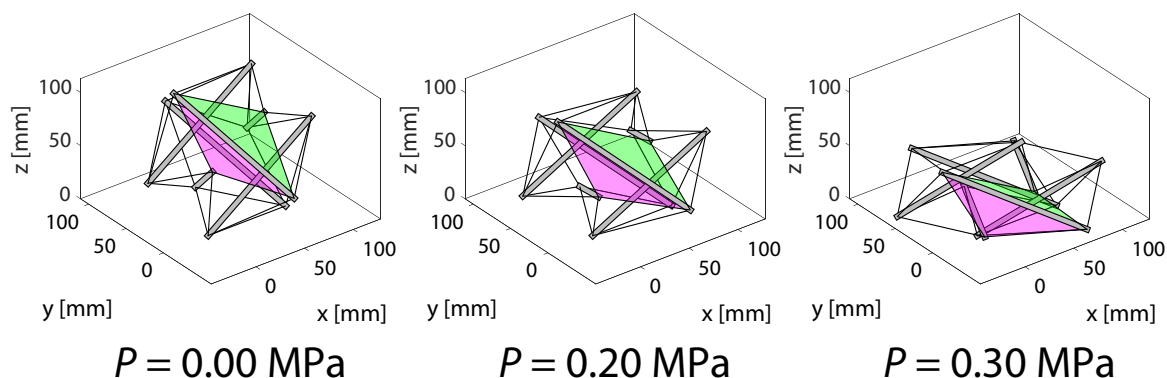
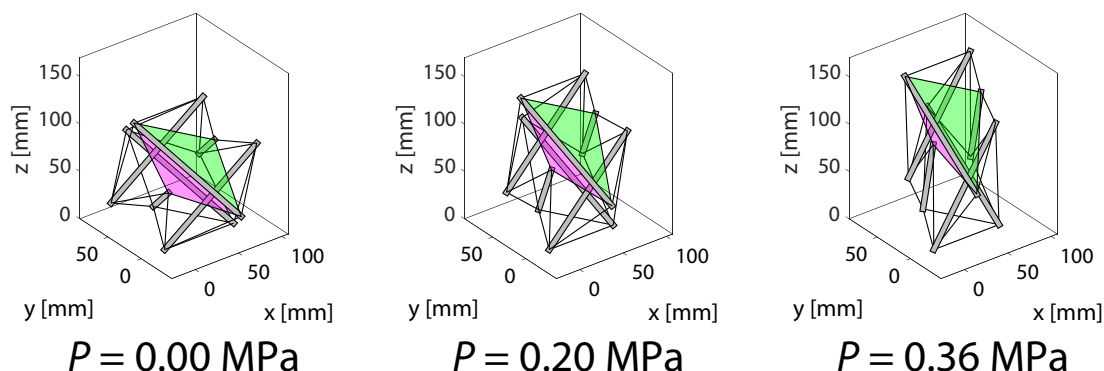
A Contraction**B Stretch**

Fig. 3.7: Simulation of tensegrity deformation: (A) Contraction and (B) Stretch.

の圧力を変化させたときの構造の変形を計算するには、式 (3.4.7) を用いて圧力一定とした場合の長さに対する人工筋の荷重を計算し、これをもとに人工筋の弾性エネルギー、テンセグリティ全体のポテンシャルエネルギーを求め、式 (3.4.10) を計算すればよい。

3.4.2 伸縮，曲げモジュールの設計**伸縮変形**

伸縮変形には径 2 mm の細径人工筋，ゴム紐 1 を用いて解析を行う。ただし，人工筋は 1.1 倍の長さにしてたるませた状態を考慮しており，シミュレーションでは人工筋がたるんでいる場合は構造に影響を与えないようにした。式 (3.4.10) を数値的に解くことで，ゴム紐の自然長は 50 mm とした場合のテンセグリティの収縮，伸長に関するシミュレーションを行った。この結果を図 3.7 に示す。シミュレーション内において 20% の人工筋の収縮率からテンセグリティの収縮，伸長を実現できることが確かめられた。さらに，このシミュレーションを用いることで設計パラメータを最適化することが可能である。

図 3.6A に示す通り，ゴム紐はひずみと荷重の間に強い非線形性を有する。このため，ゴム紐の自然長は一つの設計パラメータであり，テンセグリティ構造の変形に大きな影響を与える可能性

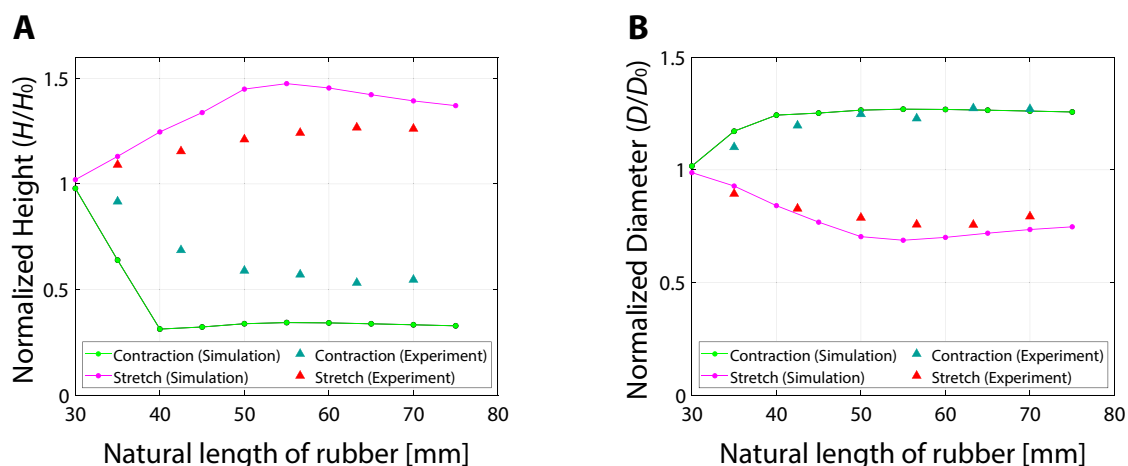


Fig. 3.8: (A) Diameter and (B) height, normalized by their initial values, with respect to the natural length of the rubber thread.

がある。伸縮を行うモジュールをロボットへ応用する際には、軸方向の変形と、径方向の変形の大きさが重要となる。ここでは、ゴム紐のプリストレッチによる軸方向・径方向に関する構造の変形への効果について検討する。

シミュレーションを用いて、ゴム紐の自然長に対する構造の変形を計算した。ゴム紐の自然長に対する軸方向、径方向の長さの変化を図 3.8 に示す。実際のテンセグリティでは図 3.14 に示すようにテンセグリティの頂点の部品と圧縮部材が接触し、それ以上圧縮部材同士が近づくことができない。このため、シミュレーション上においても圧縮部材同士の距離が頂点の部品 12 mm と圧縮部材の半径 3 mm の計 15 mm になった時点でそれ以上の変形は起こらないものとした。

図 3.8 には 3.5.1 節でのプロトタイプを用いた測定値をあわせて示す。テンセグリティ構造を変形させた状態でその両側に二枚の平行な板を置き、その間隔を測定することで変位量を求めた。実際のテンセグリティでの長さの測定では図 3.14 に示す部品も合わせた長さを測定したため、シミュレーション上でこの長さを加えている。人工筋に 0.4 MPa 印加した場合の収縮変形では自然長が 40 mm 以上ではそれほど変化はなく、伸長変形の場合は自然長が 50 mm 程度で最も変形しやすいことが読み取れる。ここで、テンセグリティの張力部材はたるまないほうが好ましいとされるため [91]、ゴム紐の自然長は可能な限り短いほうが望ましい。このため、テンセグリティを十分に変形させることができ、かつ、ゴム紐がたるみづらいという点からゴムひもの自然長は 50 mm が最適である。

曲げ変形

曲げ変形には径 4 mm の人工筋、ゴム紐 2 を用いた。曲げ変形のシミュレーションの一例としてゴム紐の自然長が 50 mm であるテンセグリティ構造の変形の解析結果を図 3.9 に示す。図 3.9 では、図 3.4B.iii の上面と底面に位置するストラットの端点が矢印に示す方向に変位し、構造全体として大きな曲げ変形を生じている様子が確認された。伸縮変形と同様に、人工筋は配置する経路長に対して 1.1 倍の長さにしてたるませた状態を考慮しており、シミュレーションでは人工筋

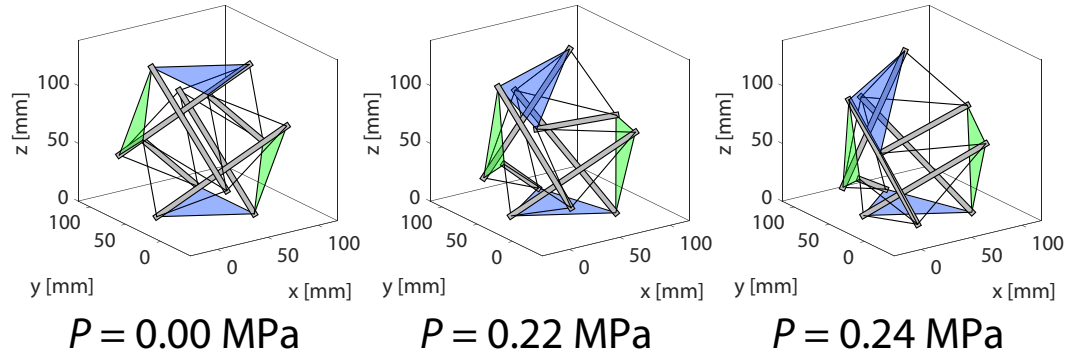


Fig. 3.9: Simulation of tensegrity deformation: Bending.

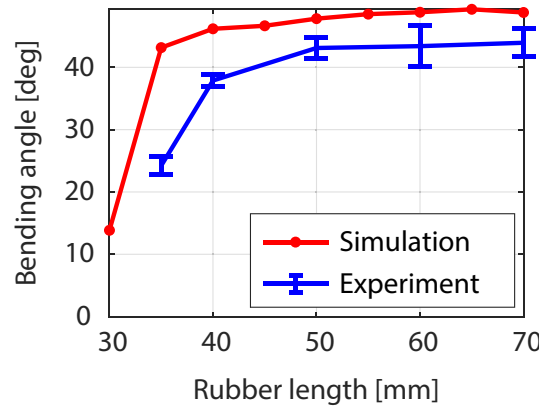


Fig. 3.10: Bending angle of the bend module with respect to the natural length of the rubber thread when the 0.4 MPa is applied to the artificial muscles.

がたるんでいる場合は構造に影響を与えないようにした。このため、0.18 MPa 程度までは構造が変形していない。また、実際のテンセグリティ構造でのストラットの接触条件を考慮した。図 3.4B.iii において $A_2^1 A_2^2$ と $B_2^2 B_2^1$ の間に空圧を印加した人工筋が 2 本存在するためストラットの径 8 mm と人工筋の加圧時の径 6 mm を考える必要がある。このため、 $A_2^1 A_2^2$ と $B_2^2 B_2^1$ の距離が $6 + 8 \times 2 = 22$ mm になった時点でシミュレーションを停止させた。ゴム紐の自然長に対する人工筋駆動時のテンセグリティ構造の曲げ角度を図 3.10 に示す。実験値に関しては 3.5.1 節のプロトタイプの変形を 5 回ずつ測定した平均値を用いており、エラーバーは測定データの標準偏差を示している。図 3.10 においてシミュレーション、実験とともにゴム紐の自然長が短いときにはテンセグリティの曲げ角度が小さく、ゴム紐の自然長がある程度長くなるとテンセグリティの曲げ角度は一定となる傾向が確認された。このため、実機においてはゴム紐の自然長が 50 mm であれば十分な変形をもたらすことができる。伸縮モジュールと同様に、ゴム紐の自然長はこのプロトタイプでは 50 mm とするのが最適であると考えられる。

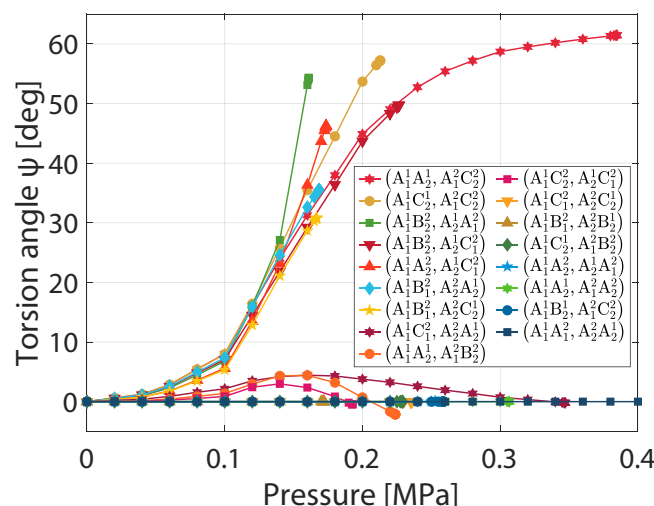


Fig. 3.11: Simulation result of torsion angle ψ with respect to pressure applied to the artificial muscles and in all placement methods that can cause torsion. In this study, the larger torsion angle at the point of 0.4 MPa is considered superior. The data are shown up to the point where strut-to-strut contact occurred in the simulation. For those without data at 0.4 MPa, the torsional angle at strut-to-strut contact occurred was used to optimize the artificial muscles arrangement.

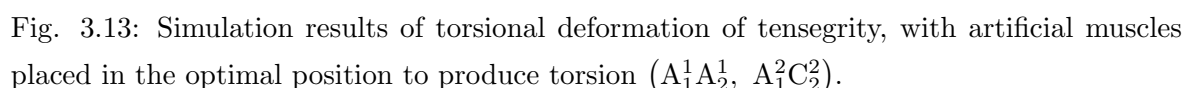
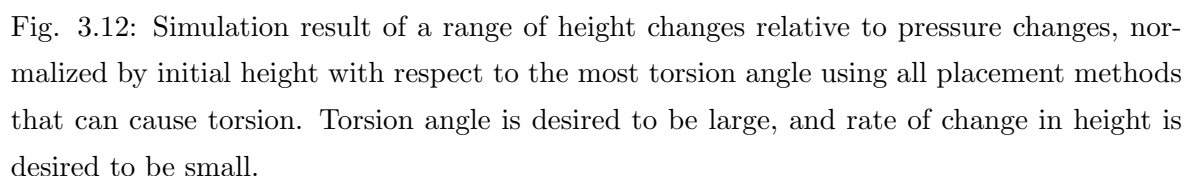
3.4.3 ねじりモジュールの設計

ねじり変形には径 2 mm の人工筋，ゴム紐 2 を用いた．ねじりモジュールを設計する際，伸縮や曲げなどを伴わないほうがモジュールとして用いやすい．このため，ねじり角を大きくすることに加え，伸縮，曲げを小さくするような設計を行う．図 3.5 で示した配置法では曲げを生じることではない．このため，構造の高さ方向の変化の大きさを考慮して人工筋の配置法の最適化を行う．

まず，図 3.5 における人工筋の配置法の表記を定義する． A_1^1 と A_2^2 を近づけるための人工筋とそれに軸対称な二本の人工筋， A_1^2 と C_2^2 を近づけるための人工筋とそれに軸対称な二本の人工筋を考える．このような人工筋の配置法を本章では $(A_1^1 A_2^1, A_1^2 C_2^2)$ と表記することにする．このとき，テンセグリティ構造には 6 本の人工筋が配置されることとなる．人工筋の配置法は合計 27 通りあり，全ての場合に関してシミュレーションを行い，最適な人工筋の配置法を探索する．

ゴム紐の自然長は 60 mm とした．実際のテンセグリティにおいて，圧縮部材同士の間には径 3 mm 程度の人工筋が存在し，圧縮部材の径が 6 mm であるため 9 mm までしか近づくことができない．このため，シミュレーションにおいても圧縮部材同士の距離が 9 mm となった点でシミュレーションを終了する．

Six-Bar-Tensegrity は上下反転させると元の構造と鏡像の関係となり，ある人工筋の配置法に対して鏡像となる人工筋の配置法が存在する．例えば， $(A_1^1 A_2^1, A_1^2 C_2^2)$ と $(A_2^2 A_1^2, A_2^1 C_1^1)$ の人工



筋の配置は鏡像の関係である．このような鏡像の関係となる人工筋の配置法は 10 組存在する．残りの 7 つの配置法に関してはその鏡像がそれ自身となる． $(A_1^1 C_1^2, A_2^2 C_1^1)$ がその例である．このため，シミュレーションの結果については鏡像が存在する 10 組に関しては最もねじれる角度が正である場合の配置法のみを示し，残りの 7 つの配置法と合わせて 17 個のデータに関する結果を示す．人工筋の印加圧力に対するねじり角のシミュレーション結果を図 3.11 に示し，最大ねじり角に対する圧力の変化による高さの変化率を図 3.12 に示す．図 3.11 に示す通り，最もねじれる場合の人工筋の配置法は $(A_1^1 A_2^2, A_1^2 C_2^2)$ であり，61.4 deg のねじり，この配置法における高さの変化率は 10% 程度であることが図 3.12 から読み取れる．30 deg 以上ねじれる人工筋の配置法は 7 通り存在し，その中で $(A_1^1 A_2^2, A_1^2 C_2^2)$ は高さの変化率も最も小さいことから，この配置法がテンセ

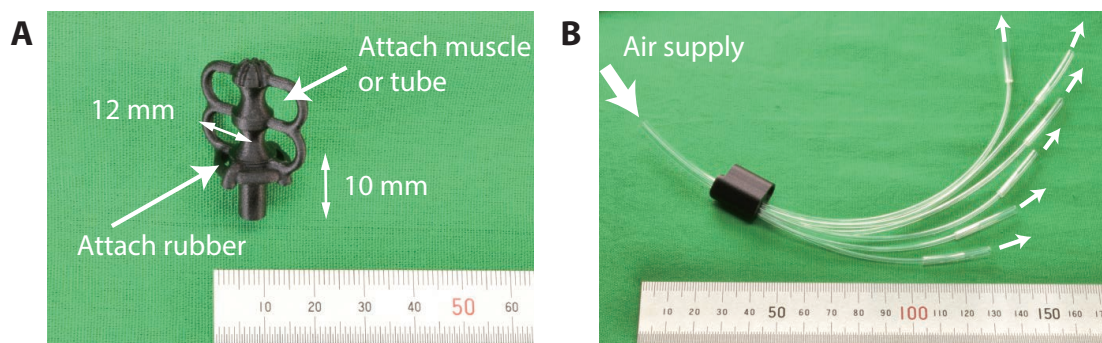


Fig. 3.14: (A) Component to be attached to the tip of the strut. (B) Fittings to split one tube into six tubes.

グリティにねじりを生じさせるための最適な配置法であるといえる。このため、 $(A_1^1 A_2^1, A_1^2 C_2^2)$ はねじり角と、ねじりに伴う軸方向の変化の両方において最も優れているため、最適な配置法といえる。この配置法を用いたテンセグリティのシミュレーションによるねじり変形を図 3.13 に示す。第 1 層と第 2 層の三角形同士がねじり、第 3 層と第 4 層の三角形同士がねじり、構造全体として大きくねじれていることがわかる。

3.5 テンセグリティの構造変形評価

3.5.1 設計

圧縮部材には長さ $L = 130$ mm, 外径 $D = 6$ mm のプラスチック素材を用いた。圧縮力による座屈を防止するため、中に長さ 110 mm, 太さ 2.5 mm の竹串を 3 本入れた。また、3.4.1 節で示した荷重変位をもつゴム紐を用いる。圧縮部材の先端に図 3.14A の部品を取り付けることでゴム紐を固定する。この部品の 4 つの穴のうち 3 つには人工筋を取り付け、残りの 1 つには人工筋に取り付けるチューブを通し固定する。図 3.14B に示す継ぎ手を 3D printer (Mark Two, Markforged) を用い、短炭素繊維強化ナイロン樹脂 (Onyx, Markforged 社) のフィラメントにより製作した。この部材を用いることで 1 本のチューブから供給される空圧で 6 本の人工筋に同時に空圧を印加することを可能となる。

3.5.2 伸縮, 曲げモジュール

伸縮変形

ゴム紐の自然長が 50 mm のテンセグリティに人工筋に空圧を印加した様子を図 3.15 に示す。印加した軸方向の長さとの比較を図 3.16 に示す。収縮変形では軸方向に 40% 程度の縮みと径方向に 25% 程度の伸びを実現した。また、伸長変形では軸方向に 25% 程度の伸びと径方向に 20% 程度の縮みを実現した。これにより、収縮変形から伸長変形へ変化させたときは軸方向に 65%, 径方向に 45% の変化を生じさせることが可能

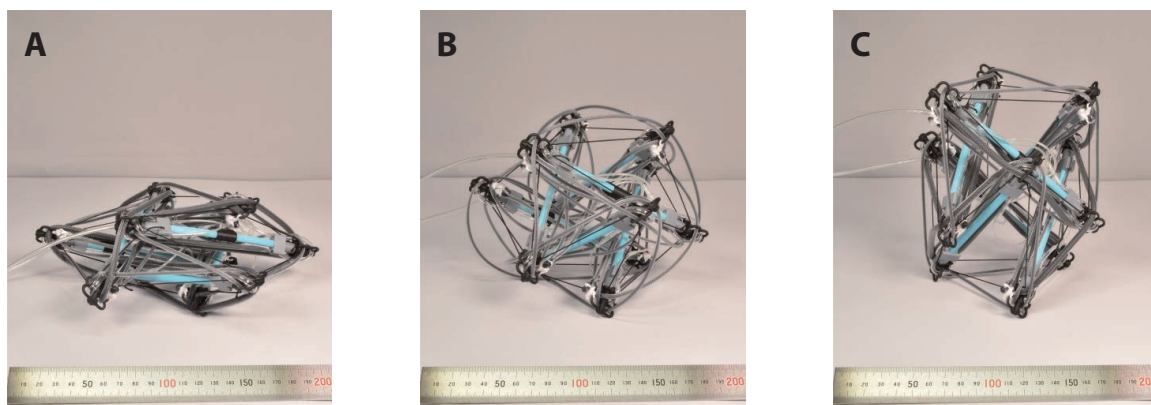


Fig. 3.15: (A) Contracted state. (B) Initial state. (C) Stretched state.

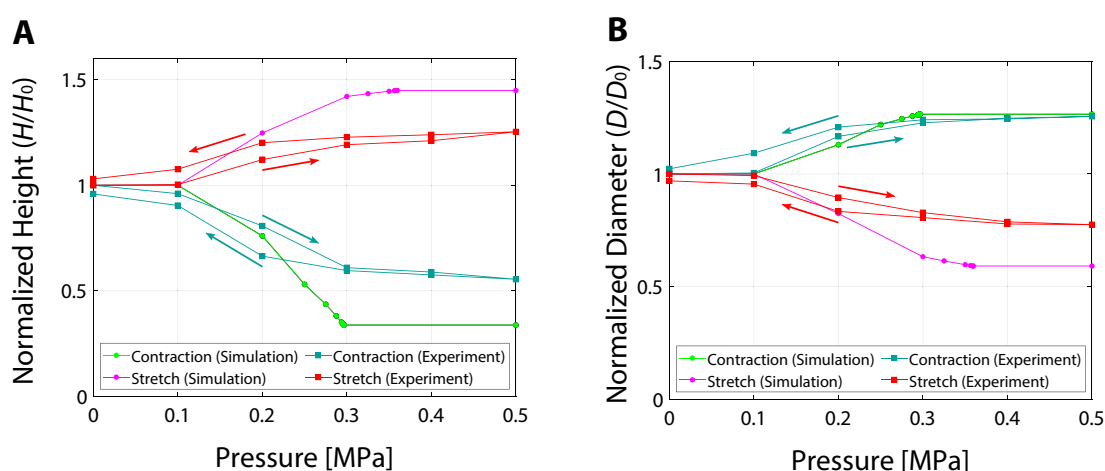


Fig. 3.16: (A) Diameter and (B) height, normalized by their initial values, with respect to the applied pressure to artificial muscles when the natural length of rubber thread is 50 mm.

である。ここでシミュレーションと実験との間の誤差を生じさせている原因の一つとして人工筋が曲がる点における大きな摩擦力があげられる。

これにより、先行研究 [17] の軸方向変形率 25% に比して、およそ 2.6 倍の 65% という大きな軸方向変形率を実現した。

曲げ変形

自然長 50 mm のゴム紐を用いたテンセグリティ構造の人工筋による曲げ変形、伸縮変形の様子を図 3.17 に示す。図 3.17B,C に示す収縮変形、伸長変形が可能である。図 3.17D,E,F,G,H,I は 6 方向への曲げ変形である。それぞれの変形では右上の図に示す矢印のように端点を変位させるための人工筋に空圧を印加している。

最適化されたゴム紐の自然長 50 mm のテンセグリティの人工筋に空圧を印加したときの曲げ角度の変化を図 3.18 に示す。人工筋に印加する空圧とテンセグリティの曲げ変形の間には図中

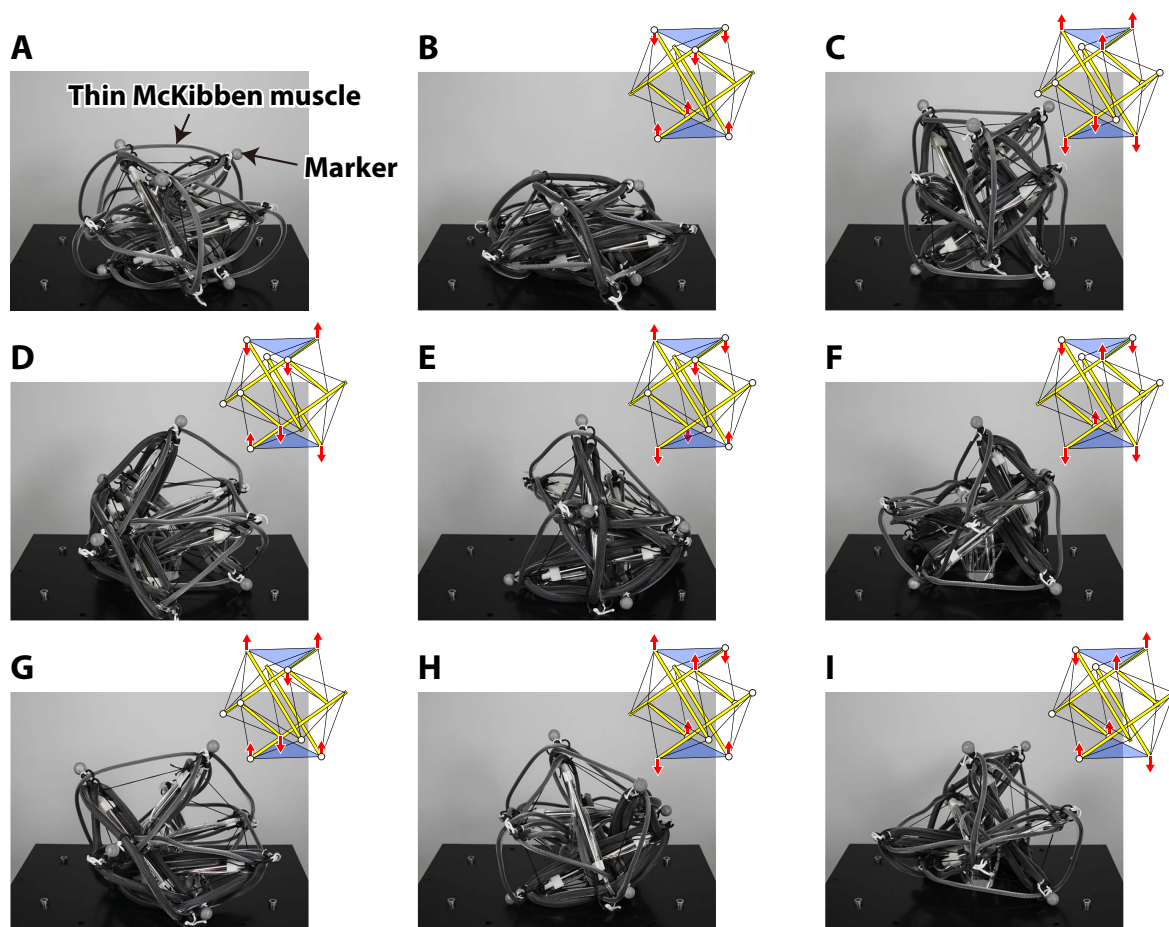


Fig. 3.17: Deformations of bend module. (A) Initial state. (B) Contraction. (C) Stretching. (D)-(I) Bending in six different directions. Method of driving the artificial muscles is shown at the upper right of each picture.

の矢印に示す方向のヒステリシスが存在することが確認された。空圧を 0.4 MPa 印加したとき 43 deg 程度曲がることが確認された。

図 3.10 の結果を得るために用いたテンセグリティ構造のプロトタイプを図 3.17A に示す。本研究ではテンセグリティ構造のストラットとして外径 6 mm, 内径 5.4 mm, 長さ 130 mm のステンレスパイプを用いた。また、アクチュエータとして図 3.6B に特性を示す径 4 mm の人工筋を用いた。

本章で開発した曲げモジュールの曲げ角度を他の研究のテンセグリティの曲げ角度と比較する。テンセグリティの軸方向の長さ ℓ が長いほど曲げ角度は大きくなりやすく、径 d が大きいほど曲げ角度は小さくなりやすいと考えられる。このため、変形後の曲げ角度を変形前のテンセグリティの ℓ/d で除することで規格化した曲げ角度を用いて比較を行う。ストラットの長さを L とすると単一の six-bar tensegrity の高さは $\ell = \sqrt{3}L/2$ であり、径は $d = \sqrt{42}L/6$ である。このため、43 deg を ℓ/d で除すると本研究における曲げモジュールの ℓ/d で規格化した曲げ角度は 54 deg 程度となる。[18] のテンセグリティの ℓ/d の値は Fig. 2E より 2.4 程度であり、曲げ

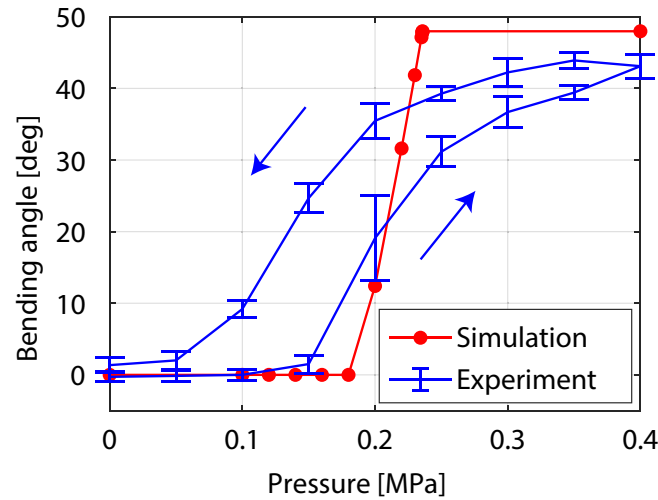


Fig. 3.18: Bending angle of the bend module with respect to the pneumatic pressure applied to the artificial muscles.

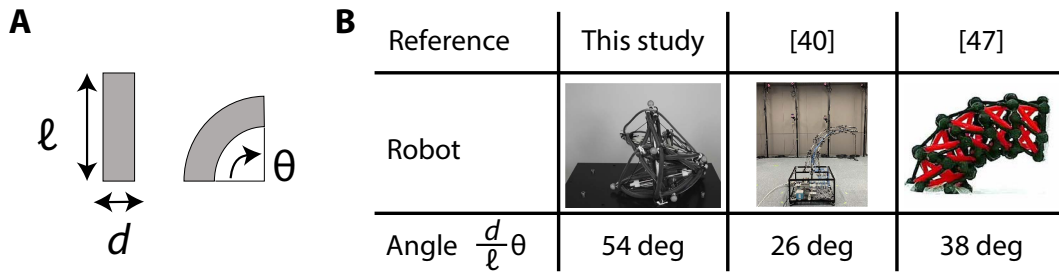
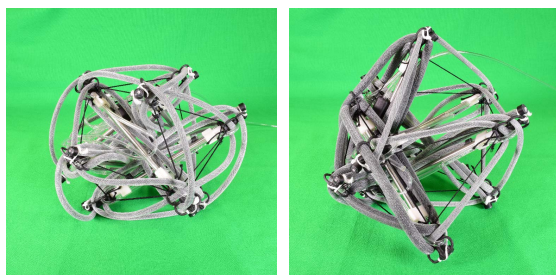
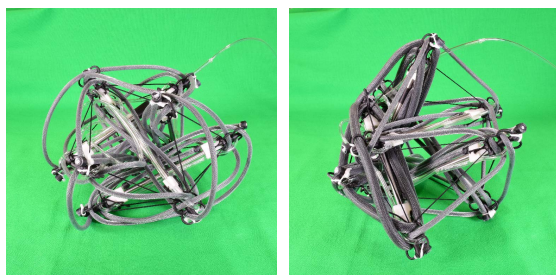


Fig. 3.19: Comparison with bending angles of tensegrity in other studies

角度は Fig. 2H より 90 deg 程度である．このため， ℓ/d で規格化した曲げ角度は 38 deg 程度である．また，[12] のテンセグリティの変形前の ℓ/d の値は FIGURE 3 より 7 程度であり，また FIGURE 11 より最大での曲げ角度でも 180 deg 未満であることがわかる．このため， ℓ/d で規格化した曲げ角度は 26 deg 未満である．よって，本研究で開発した曲げモジュールの曲げ角度は先行研究のテンセグリティの曲げ角度の 1.4 倍，2.1 倍と大きく上回る結果となった．

ここで，第 2 章で開発した耐久性を向上させた細径人工筋を用いたテンセグリティモジュールの耐久性について述べる．図 3.20A に，接着剤を塗布した人工筋を用いたテンセグリティモジュールと接着剤を塗布していない人工筋を用いたテンセグリティモジュールの変形について示す．一つのモジュールには 12 本の接着剤を塗布した人工筋を取り付けている．テンセグリティに人工筋を取り付けた際の曲げの大きさとしては， D/d の大きさが 0.5 から 2.5 の間に収まり，曲げ角度は 10 deg 程度であった．この条件において，曲げ変形を行うための 6 本の人工筋へ空圧の印加，排気を繰り返すことで耐久性を測定した．0.5 MPa の空圧を 2 秒印加，2 秒排気を繰り返した．その結果，接着剤を塗布していない人工筋を用いたテンセグリティでは，100 回程度の繰り返し動作の後に 1 本の人工筋が破損した．一方で，接着剤を塗布した人工筋を用いた場合には，

A Soft tensegrity module**i. With adhesive****ii. Without adhesive**

Initial state

Pressurized state

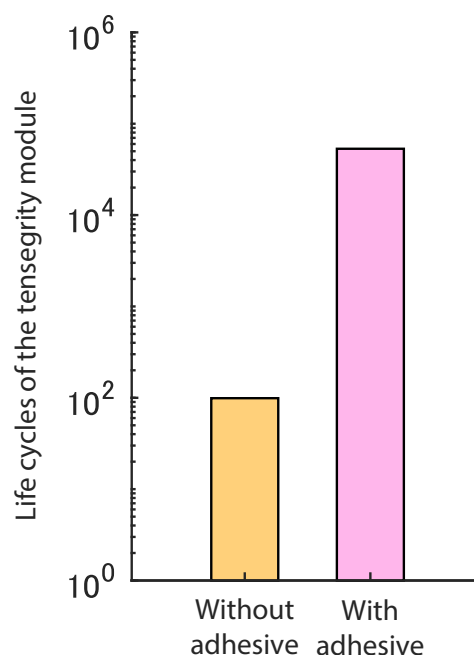
B Module durability test with 0.5 MPa

Fig. 3.20: (A) Bending deformation of soft tensegrity modules with and without the adhesive. (B) Durability test results of one tensegrity module.

50,000 回以上の繰り返し動作に耐えることができた。

3.5.3 ねじり，把持モジュール**ねじり変形**

5.6 節で求めたテンセグリティのねじりのための最適な人工筋の配置法には鏡像の関係となる配置法 ($A_2^2A_1^2$, $A_2^1C_1^1$) が存在する。この 2 組の人工筋の配置法を 1 つのテンセグリティ構造に同時に適用し、両方向にねじれるテンセグリティを製作する。このとき、1 つのテンセグリティ構造には合計 12 本の人工筋が取り付けられることとなる。

人工筋に印加する圧力を 0.00 MPa から 0.40 MPa の間で 0.05 MPa 間隔で空圧を変化させていき、テンセグリティの変形を測定した。テンセグリティの変形の測定のためにモーションキャプチャを用いた。

図 3.21A のようにテンセグリティ構造の全ての頂点にモーションキャプチャのマーカーを取り付けマーカーの位置を測定した。これらのデータをもとにテンセグリティの姿勢を計算する方法は次の通りである。まず、モーションキャプチャのマーカーの座標からテンセグリティの頂点の座標を計算する。モーションキャプチャのマーカーの半径は 5.5 mm であり、図 3.14 の人工筋の取り付け部分の長さは 18 mm である。このため 1 本の圧縮部材に対して 23.5 mm×2 だけ短く

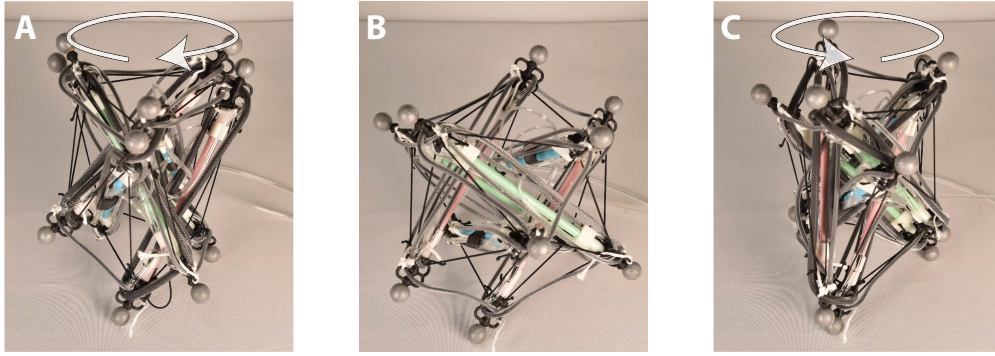


Fig. 3.21: (A) Deformation in tensegrity structure. (A) When pressure of 0.4 MPa is applied to $(A_2^2A_1^2, A_2^1C_1^1)$. (B) Initial state. (C) When pressure of 0.4 MPa is applied to $(A_1^1A_2^1, A_1^2C_2^2)$.

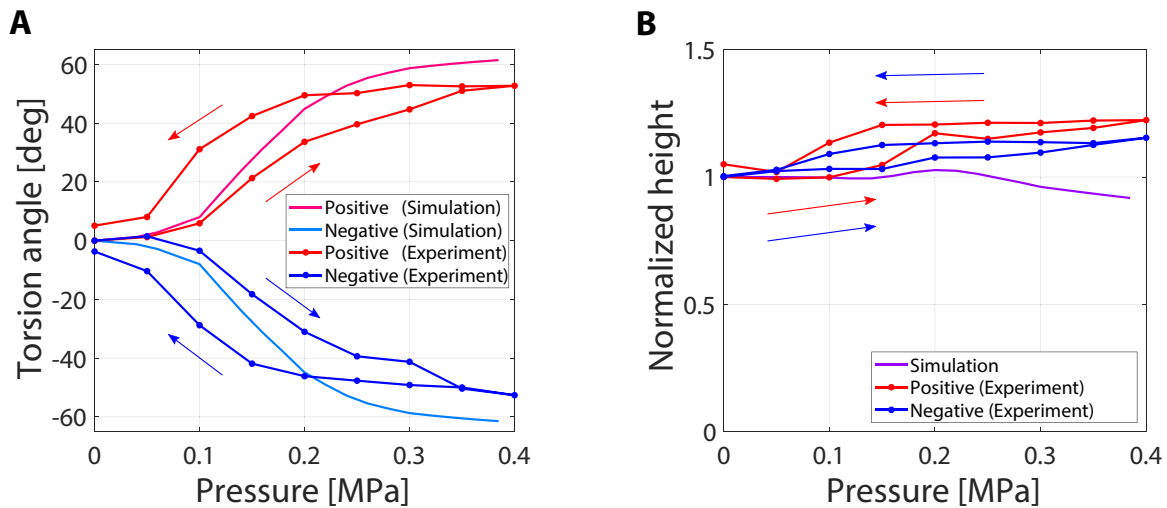


Fig. 3.22: Experiment result of (A) torsion angle and (B) height normalized by initial value with respect to the pressure applied to the artificial muscles.

なるように構造の頂点を補完する．次に $A_1^1B_1^1C_1^1$ の重心と $A_2^2B_2^2C_2^2$ の重心を通るテンセグリティ構造の軸 ℓ が z 軸平行になるようにロドリゲスの回転公式を用いて構造の座標変換を行ったのち、平行移動を行うことで ℓ と z 軸を一致させる．

以上の測定方法によって、人工筋の印加圧とテンセグリティのねじり角度、高さの変化との関係は図 3.22 に示すように得られた．ねじり角と高さの変化は人工筋に加える圧力を 0.0 MPa から 0.4 MPa まで増加させ、0.0 MPa まで戻すまでの変化を記録した．図 3.22 に示す矢印はデータの取得順を示している． $(A_1^1A_2^1, A_1^2C_2^2)$ の配置法では 52.7 deg, $(A_2^2A_1^2, A_2^1C_1^1)$ の配置法では -52.6 deg のねじりを実現した．高さ方向に関しては、シミュレーションでは -9.2% から +2.7%, 実験での正方向のねじりでは -0.7% から 22%, 負方向のねじれでは 0% から 15% 程度の変化を生じた．シミュレーションでは人工筋の印加圧が 0.2 MPa 以上となる時構造の高さ

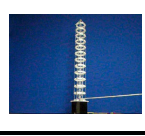
Reference	This study	[72]	[47]
Robot			
Angle/stage	± 25 deg ($\pm 50/2$ deg)	4 deg (40 deg/10)	20 deg (100 deg/5)

Fig. 3.23: Comparison with torsion angles of tensegrity in other studies

が低くなるのに対して実際の構造では高くなった。これは人工筋の重さや構造の自重の影響や、人工筋が加圧時に径方向に膨らむことが考えられる。初期状態において人工筋の重さや自重により構造が軸方向に収縮する場合、人工筋駆動時の構造の高さが相対的に高くなる。また、シミュレーションでは考慮していない人工筋の加圧時の径方向の膨張によってテンセグリティの変形が妨げられていることが考えられる。

この実験から Six-Bar Tensegrity において、高さの変化を 10% 程度に抑えた状態で 100 deg 以上のねじり変形を生じさせられることが確認された。これは [72] の中で紹介されているねじり変形は 1 段で 4 deg を大きく上回る大きさのねじりである。また、軸方向の柔らかさを失わずにねじり変形を実現することができた。さらに、[18] で用いられている 5 段のテンセグリティ構造は 40% の高さ変化に伴い 1 段あたり 20 deg ねじれる。Six-Bar Tensegrity は 2 段のテンセグリティとして考えることができ、10% 程度の高さ変化にも関わらず 1 段で ± 25 deg のねじり、つまり 50 deg のねじりを実現できた。このため、[18] に対して 2.5 倍程度のねじり角であり、ねじりに伴った高さ方向の変化が非常に小さいことがわかる。また、人工筋を用いることにより受動的でなく、能動的なねじり変形を生み出すことができることが示された。

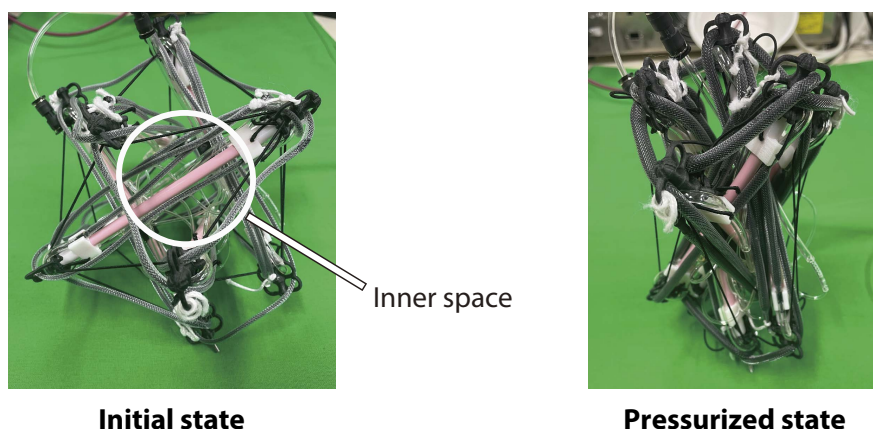
実現されたねじり変形は先行研究 [18, 72, 83] に対して 2.5 倍程度の大きさであり、曲げ変形を伴わず、高さの変化も 10% 程度と小さいため、モジュールとして容易に用いることができることを示した。

把持機能

ねじりモジュールでは取り付けした人工筋のうち 6 本に空圧を印加することで正方向のねじり、残りの 6 本に空圧を印加することで負方向のねじりが実現できる。この正方向と負方向へのねじりのために配置されている 12 本全ての人工筋に空圧を印加することでグリップモジュールが実現される。

このグリップモジュールは図 3.24A から図 3.24B のように 6 本のストラットが人工筋によって構造の軸に向かって力を受け内部容積が小さくなることを利用する。この変形を用いることで 6 本のストラットの中に配置された物体を把持することができると考えられる。そして、テンセグリティと人工筋の柔軟さによって物体形状に適応して把持を行うことができると考えられる。把持モジュールを用いた物体の把持検証として 3 種類の径のアルミ棒を把持する実験を行った。把

A Tensegrity Gripper



B Gripping force

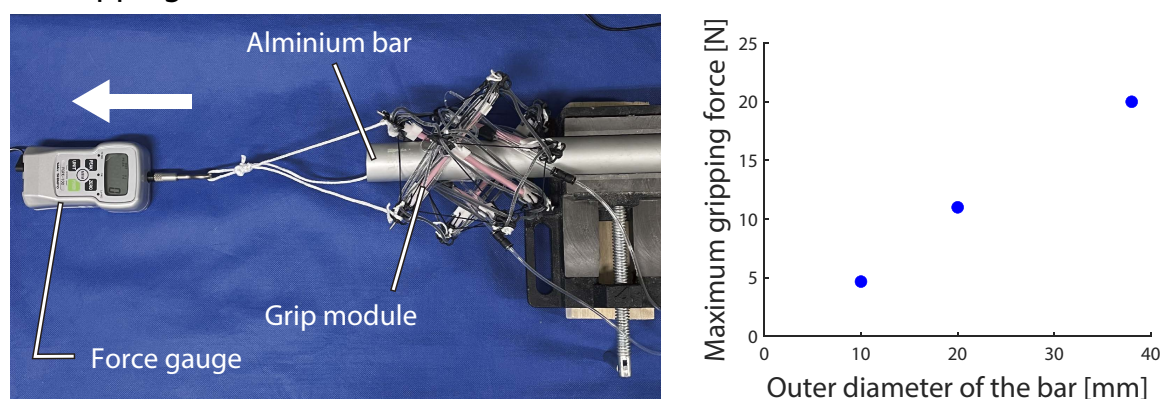


Fig. 3.24: (A) Deformation of the tensegrity gripper. (B) Gripping force of a tensegrity gripper.

持モジュールの中にアルミ棒を配置し、把持モジュールの人工筋に空圧を 0.4 MPa 印加した。この状態で外部から引張荷重を与え、最大引張荷重を測定した。測定で用いた実験装置を図 3.24A に示す。アルミ棒を固定させた状態でテンセグリティ構造をフォースゲージによって紐で引張り、最大引張荷重を記録した。アルミ棒の外径には 10 mm, 20 mm, 38 mm の 3 種類を用いた。

実験の結果を図 3.24B に示す。アルミ棒の外径が大きくなるほど、最大引張力は大きくなった。さらに、このテンセグリティモジュールの質量は 77 g であるため、外径 10 mm のアルミ棒においても自重の 5 倍以上の質量の物体を、外径 38 mm のアルミ棒においては自重の 20 倍以上の物体を把持することができると考えられる。そして、テンセグリティと細径人工筋の柔軟さによって外径 10 mm から外径 38 mm までのアルミ棒を把持することにより、物体の形状への適応性が示された。

3.6 まとめ

本章では、細径人工筋をテンセグリティ内に屈曲させた状態で配置することによるテンセグリティの能動的な大変形の実現手法について述べた。まず、構造内への人工筋の配置法として、ストラットの端点と別のストラットを近づけさせるための人工筋の配置法、二つの端点を近づけるための人工筋の配置法を提案した。そして、これらの人工筋の配置法をもとにして、静力学シミュレーションを用いることで、伸縮、曲げ、ねじり変形を行うテンセグリティ構造を設計した。製作したモジュールにおいて、収縮変形では軸方向に 40% 程度の縮みと径方向に 25% 程度の伸びを、伸長変形では軸方向に 25% 程度の伸びと径方向に 20% 程度の縮みを、曲げ変形では 6 方向への 43 deg 程度の曲げを、ねじり変形では +52.7 deg と -52.6 deg のねじりを実現した。いずれの変形においても先行研究に比して、2 倍以上の大きさの変形を能動的な変形で実現することができた。さらに、第 2 章での接着剤による耐久性向上を行った人工筋を用いることでテンセグリティモジュールの耐久性を 500 倍向上できることを示した。そして、ねじり変形を実現させるための人工筋配置を用いることによって、把持動作を実現できることを示した。

第4章

巻き付けテンセグリティモジュールによるロボット

4.1 巻き付けテンセグリティのロボットへの適用

前章までに細径人工筋を用いて大きな変形を生じさせることのできるテンセグリティの伸縮モジュール、曲げモジュール、ねじりモジュールに関する設計、開発について述べた。本章ではこれらのモジュールを組み合わせたテンセグリティロボットへの応用例を示す。

まず、細径人工筋を用いてテンセグリティを大変形させる場合の利点、欠点について述べる。細径人工筋を三角形の周囲に配置して構造の大変形を行う場合、任意の変形間を直接遷移することが可能であり、能動的な動作、高速な動作を得意とする。第6章に示す受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合、異なる変形状態へ遷移させる際、一度外力のかからない初期状態を経由する必要がある。これに対し、細径人工筋による能動的な駆動は、中間状態を介さない自在な遷移を可能にする。逆に、欠点としては、ストラット部分を大きく伸展させることができない点にある。細径人工筋は1.1倍程度にたるませた長さで配置されているため、ストラット部分を伸展させようとし場合、人工筋の長さによる制約を受け、大きく伸展させることができない。この点は第6章に示す受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合の利点となる。

本章では、任意の変形間を直接遷移可能である特徴を活かして能動的な動作を行うモジュールを組み合わせたロボットの応用例を示す。複雑な動作を行うソフトテンセグリティロボットを開発する際、通常その設計は容易ではない。しかし、本研究で開発したモジュールの機能を組み合わせることによって、複雑な動作を実現できるロボットを容易に開発することができることを示す。例えば、天吊り型のアームを考える場合、アーム先端の姿勢を上下方向とねじり方向に動作させたい場合には、収縮モジュールとねじりモジュールを上下方向に連結させればよい。このように所望の動作、機能をモジュールの変形要素に分解することで、モジュールを組み合わせることによって容易にロボットを実現させることができる。

ロボットへの応用例として、移動ロボット、物体の運搬を行うロボット、操作を行うロボットの3つを示す。移動ロボットに関しては伸縮モジュールを連結したインチワーム型ロボットにより、大きな伸縮変形を用いることで壁をグリップしながら能動的な推進力を生み出すことができ

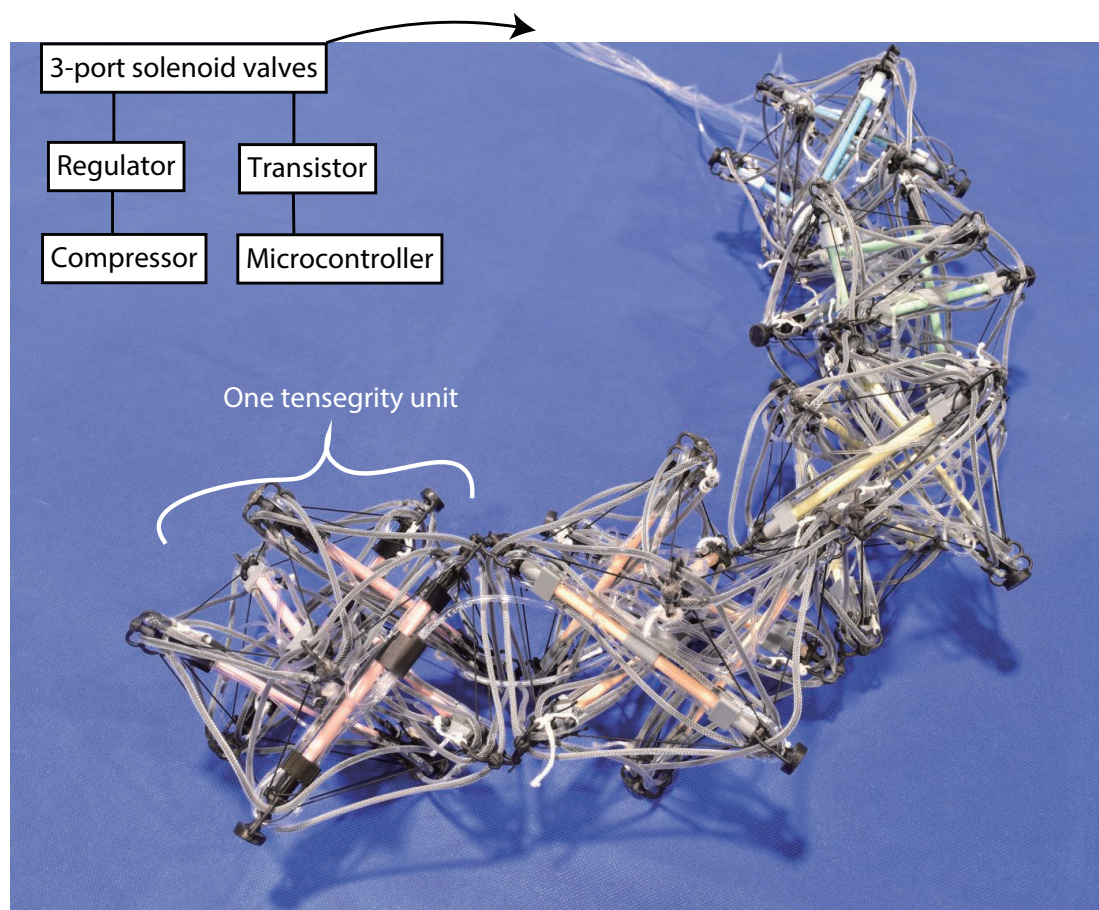


Fig. 4.1: Tensegrity locomotion robot consisting of five contractile modules.

ることを示す。運搬を行うロボットとしては、自重に抗して大きく曲げ動作が可能でありピックアップアンドプレース作業を行うことができることを示す。またボールの投球を行うことができるほど素早い動作が可能であることを示す。操作を行うロボットとしてはねじり動作によりペットボトルキャップの取り外しといった複雑な動作が可能であることを示す。そして、いずれのロボットにおいても、従来のテンセグリティロボットでは実現困難であった動作を行うことができることを示し、細径人工筋駆動の大変形テンセグリティモジュールの有用性を示す。

4.2 インチワーム型ソフトテンセグリティロボット

第2章で設計した伸縮モジュールを5つ連結させたインチワームロボットの全体像とその制御図を図4.1に示す。1つのモジュールに対して人工筋の配置の仕方の収縮と伸長に対してそれぞれ2組の人工筋が存在するため、5つのモジュールで合計10組の人工筋が存在する。この10組の人工筋の制御について説明する。まず、コンプレッサーからの空圧をレギュレータによって0.4 MPaに調節する。そして、10個の電磁バルブをマイコンによって制御することで5つのテンセグリティの変形を制御する。この制御系を用いて図4.2に示すシーケンスによりロボットを動

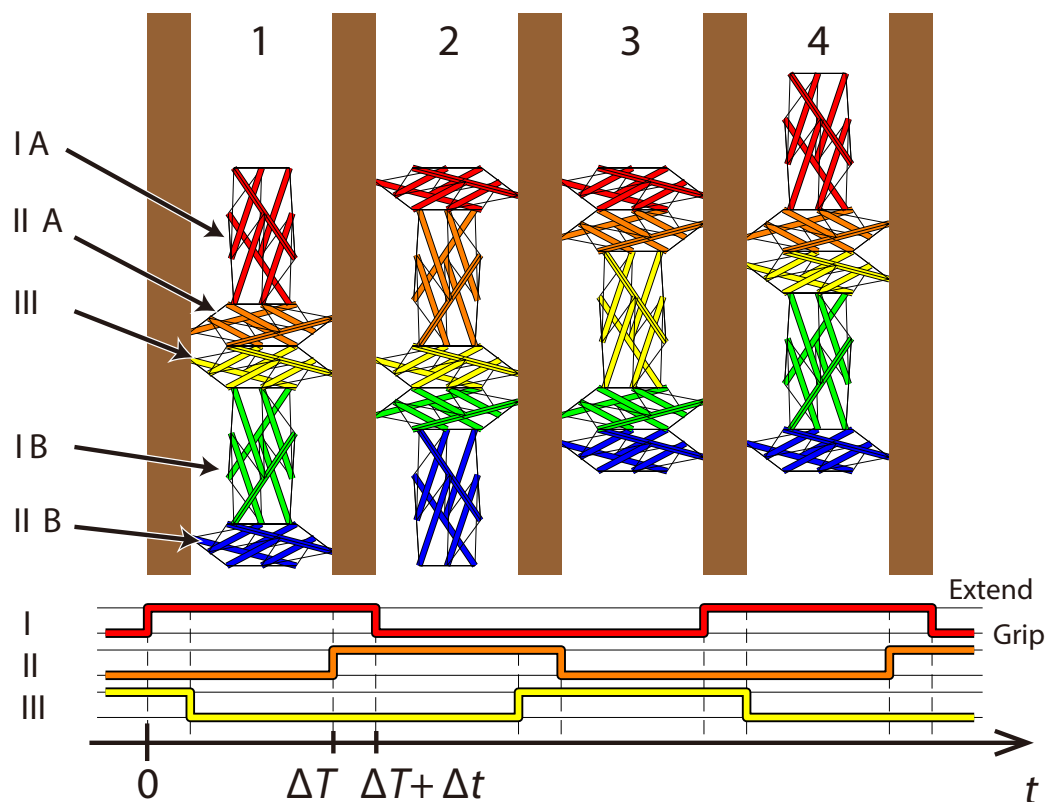


Fig. 4.2: Driving principle of the tensegrity robot and the control signal.

かす。製作したロボットの質量は、空圧チューブを除いて 397 g であった。また、実験を行う際はロボットが壁をグリップするように、1つのテンセグリティ構造につき図 4.1 に示すゴム (Tango Black) 製の滑り止めを 2 つ取り付けた。

図 4.2 がロボットの駆動方法である。各ユニットを図 4.2 に示すように呼ぶと、 I_A と I_B 、 II_A と II_B はそれぞれ同じ動きをする。そして、他をグリップさせた状態で $I \rightarrow II \rightarrow III$ と伸ばすユニットを変化させていくことで、波を送る向きと反対方向にテンセグリティロボットが移動する。

4.2.1 経路幅の変化への適応性

まず、壁の間隔がロボットの駆動特性に与える影響を示す。壁と壁の間隔を 150 mm から 240 mm に 10 mm ずつ変化させ、ロボットの移動実験を行った。壁と壁の間隔が 150 mm, 200 mm, 240 mm のときのロボットが移動の様子を図 4.3 に示す。いずれも中央のユニットのみ進行方向に伸び、他のユニットは壁をグリップするようにテンセグリティが変形しているときの様子である。壁の間隔を変えたとき、テンセグリティロボットはその柔らかさから壁を押し付けるようにして変形している様子がみられる。このときのロボットが移動する速さを図 4.4 に示す。速さを測定する際、図 4.2 のシーケンスを 5 周期分行き、移動した距離から速さを計算した。また、テンセグリティ構造が十分に変形できるよう、図 4.2 に示すシーケンスの間隔は 2.0 s とした。壁の間隔が 210 mm のとき壁の両側をしっかりとグリップすることが確認され、それ以上間隔

を広げると図 4.3 の間隔が 240 mm のときのように、グリップしていない箇所が確認された。また、壁の間隔が狭いときはテンセグリティ構造の径方向への変形量が小さくなり、それに伴い軸方向への変形も小さくなった。しかし、壁を押し付けながら前進することが確認された。このとき、軸方向に対してねじれるように回転する様子も確認された。

4.2.2 湾曲経路への適応性

次に湾曲した環境への適応性について示す。図 4.5A は壁の間隔が 210 mm のまっすぐな狭隘部を進む様子であり、図 4.5B は曲率半径が 550 mm、壁の間隔が 210 mm である曲がった狭隘部を進む様子である。このときの駆動方法はどちらも同じであり、4.2.3 節に示す ΔT , Δt はそれぞれ $\Delta T = 0.6$ s, $\Delta t = 0.2$ s である。これにより、同じ駆動方法にも関わらず、ロボットは周囲の環境に受動的に適応して移動することが確認された。

4.2.3 垂直方向の推進

次に重力方向の移動について示す。滑り止めを 1 ユニットに対して 6 つ取り付けると図 4.5C のように内径 210 mm のパイプの中を垂直に登っていくことができた。ただし、水平を移動する場合とは異なり、シーケンスの時間間隔を短くしてしまうとグリップできずに落ちてしまう。このため、シーケンスの時間間隔は長くする必要がある。図 4.5C では $\Delta T = 1.0$ s, $\Delta t = 0.2$ s としている。この実験から水平面上の移動だけでなく、重力方向の運動も可能であることがわかる。

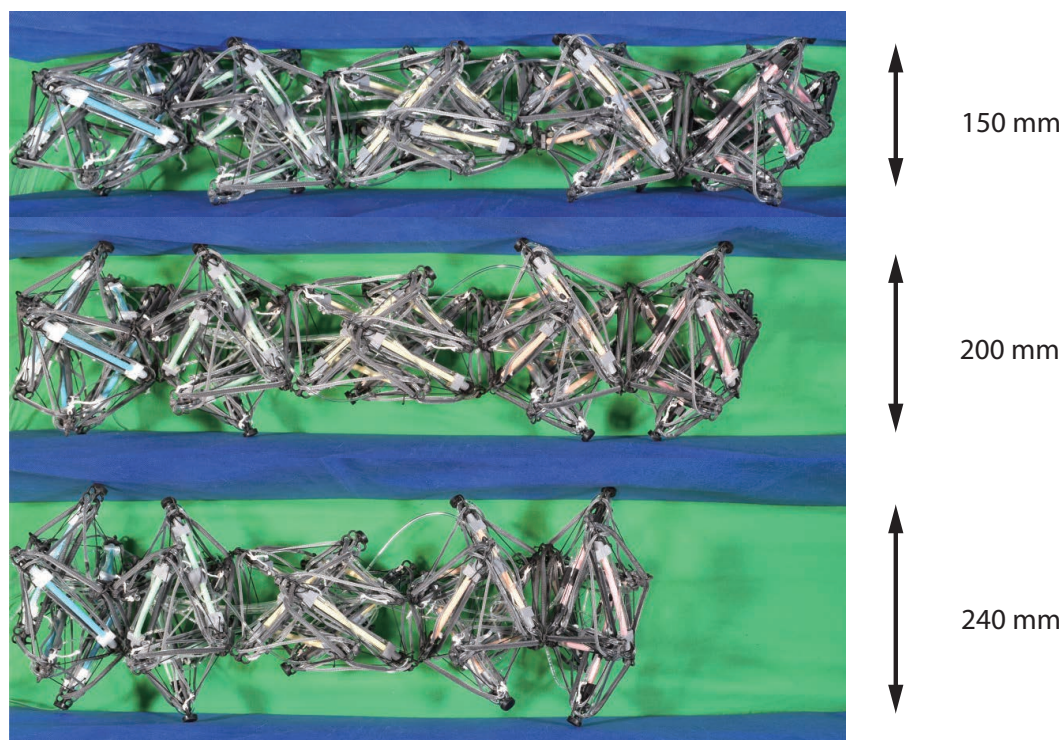


Fig. 4.3: Adaptation of the robot to the width of the wall.

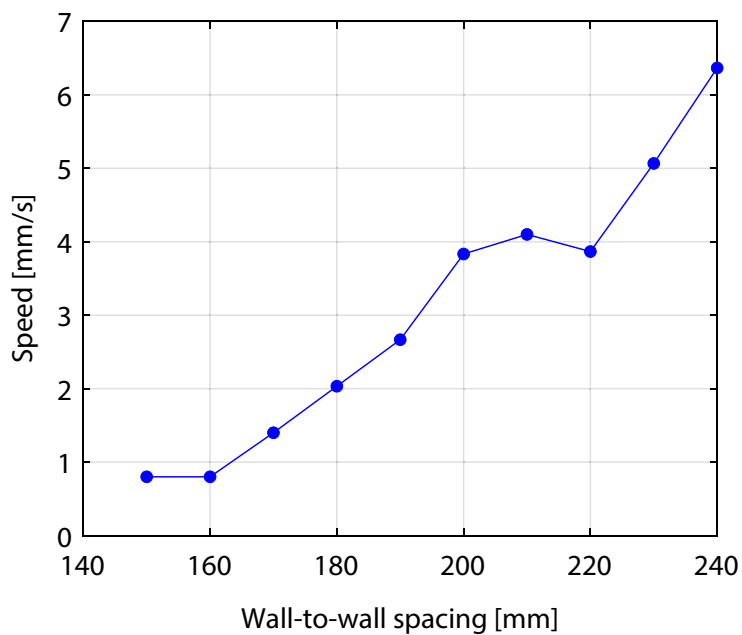


Fig. 4.4: Speed of the robot with respect to wall-to-wall spacing.

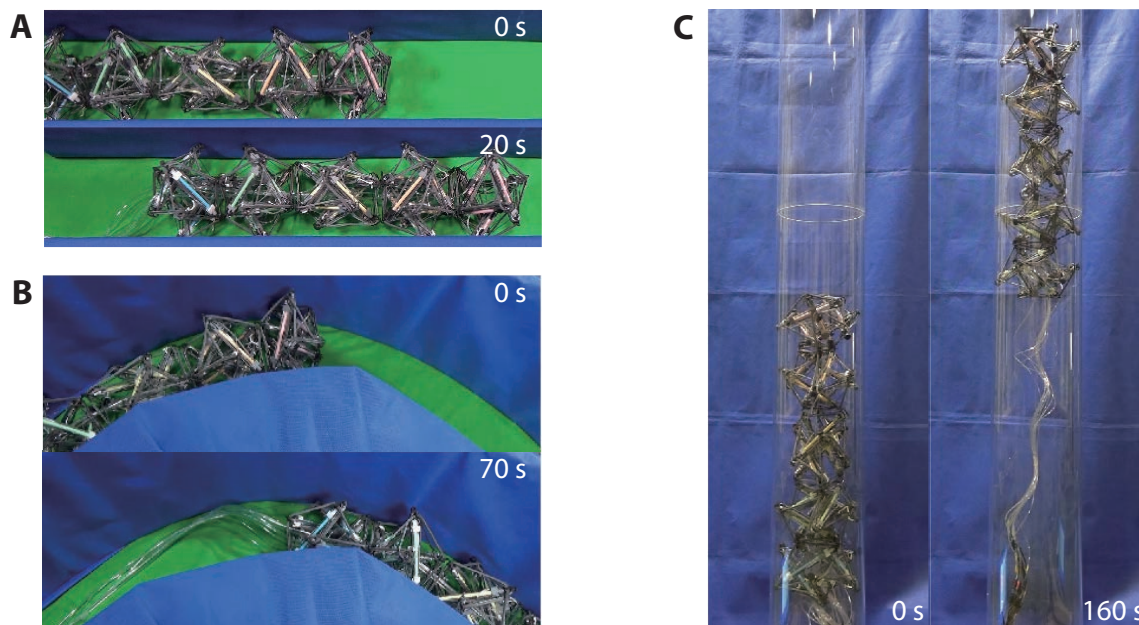


Fig. 4.5: (A) Moving along a straight path. (B) Moving along a curved path. (C) Vertical tube climbing demonstration.

よって、未知の環境においても水平方向のみでなく、重力方向にも移動できることが考えられ、3次元的な環境に適応して環境を探索することができると考えられる。

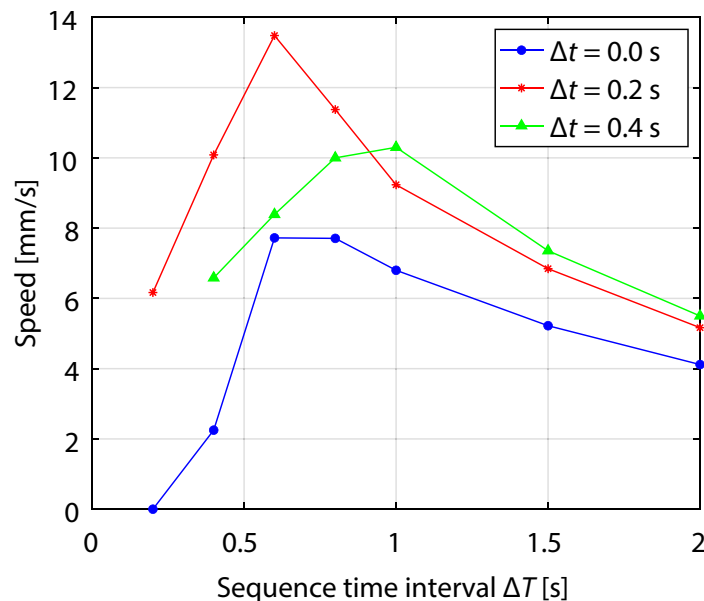


Fig. 4.6: Speed of the robot with respect to sequence time interval ΔT when the wall spacing is 210 mm.

駆動周波数の与える影響

最後にシーケンスの時間間隔がロボットの駆動特性に与える影響を示す。このテンセグリティロボットは一般的なインチワーム機構と異なり、軸方向の動きと径方向の動きが連動している。これにより、例えば図 4.2.1→2 では II が伸びきる前に I がグリップしてしまい、II が進行方向に伸びる量が減少してしまう。このため、図 4.2 に示す制御図のようにグリップさせる動作を Δt 遅らせる。 $\Delta t = 0.0, 0.2, 0.4$ s として、シーケンスの時間間隔 ΔT の変化に対するロボットの移動する速さの変化を図 4.6 に示す。このとき、壁と壁の間隔は 210 mm として、シーケンスの時間間隔 ΔT を 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0 s として実験を行った。時間間隔 ΔT が長いときは人工筋が十分に縮むことができ、テンセグリティ構造を十分に変形させることが可能である一方、1 サイクルの時間が長くなるため、移動する速さは遅くなった。また、時間間隔が短いときは人工筋が十分に縮まずにテンセグリティが変形しなくなるために速さが遅くなった。効率よく移動させるために導入した Δt に関しては、 $\Delta t = 0.2, 0.4$ s としたとき、ともに $\Delta t = 0.0$ s の場合よりも速く移動することが確認された。このように、テンセグリティロボットは軸方向と径方向が連動するという一般的なインチワーム機構と異なる特徴を有するが、空圧を印加するタイミングをずらすことで効率よく移動させることができるという結果が得られた。

4.2.4 フィールド試験

テンセグリティロボットの地中移動実験を行った。図 4.8 に示すように 2 m 程度の 10 本の空圧チューブを用いてロボットと電磁弁を接続することでロボットの制御部分が砂による影響を受



Fig. 4.7: Behavior of the tensegrity robot inducing propulsion from contact with a mud wall.

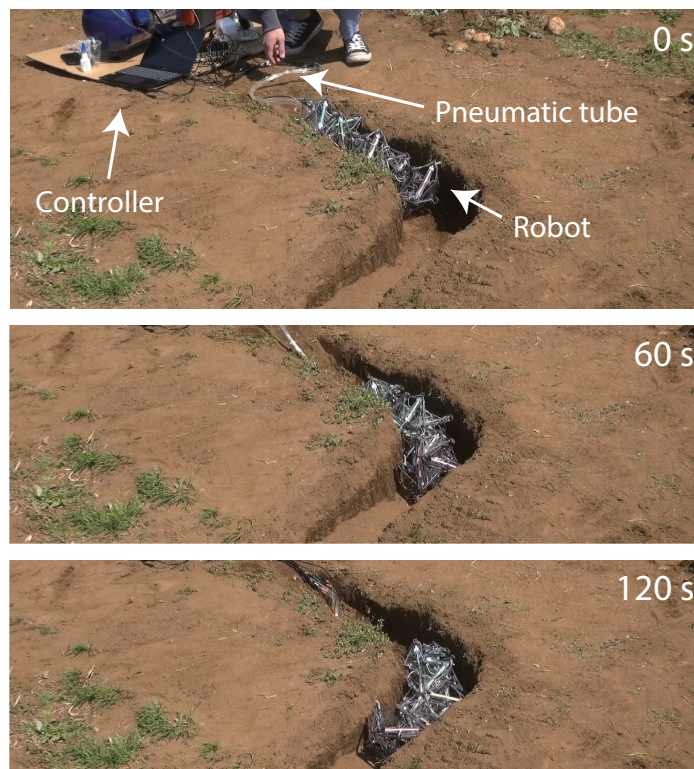


Fig. 4.8: Tensegrity robot movement on a curved path in the field test.

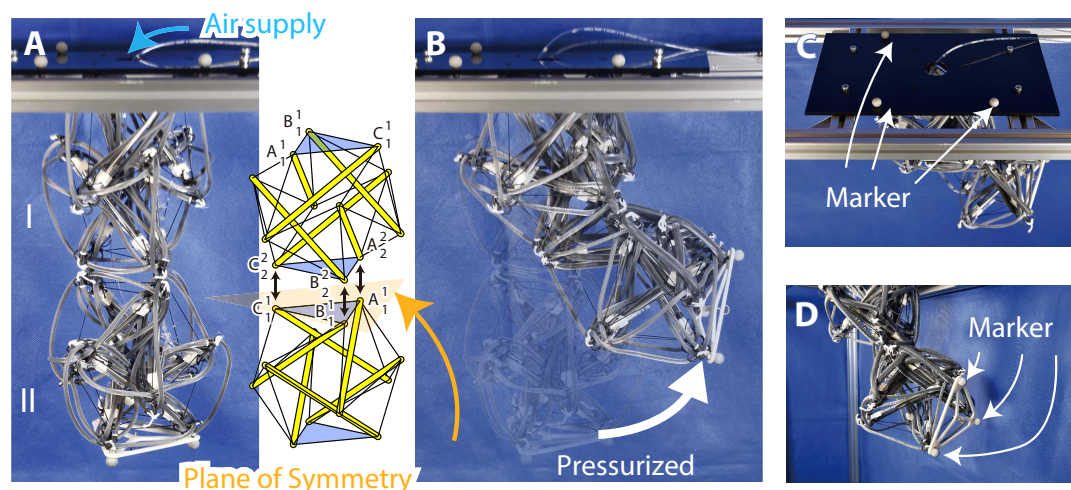


Fig. 4.9: (A) Developed tensegrity arm consisting of two bend modules. The two structures are connected so that they are mirror images respect to the plane of symmetry. (B) Bending deformation when 0.4 MPa is applied to the artificial muscles. (C,D) Motion capture markers attached to the tensegrity arm.

けることなくロボットが地中を移動できるようにした。実験では図 4.2.2 の湾曲部と同じように、曲率半径が 550 mm の湾曲部となるよう土によって経路を再現した。そして上から板をかぶせることで洞窟のような環境を製作し、その中の移動実験を行った。また、本実験においては電源としてポータブル電源を用いた。

シーケンスの時間間隔を $\Delta T = 1.0$ s, グリップする動作を軸方向に伸ばす動作に対する遅らせ時間を $\Delta t = 0.2$ s とすることでロボットを駆動させた。図 4.7 に示すように、ロボットが壁との接触から推進力を生み出し地中に潜っていく様子が確認された。

そして図 4.8 のように、地中においてもこのロボットは構造の柔らかさによって環境形状に適応して移動することが確認された。

これらの実験によって、このテンセグリティロボットが実際の自然環境においても環境形状に適応して移動することが可能であることが確認された。

4.3 曲げ動作を利用したソフトテンセグリティアーム

4.3.1 設計

図 4.9A に示すように第 3 章で開発した曲げモジュールを 2 つ連結させ、曲げ変形可能なテンセグリティロボットアームを製作した。このとき、二つのモジュールが面对称となるようにモジュール同士を接続した。テンセグリティ構造は人工筋を駆動していない初期状態では上面と底面の三角形は正三角形である。しかし、人工筋に空圧を印加したとき、上面と底面の三角形のそれぞれの辺の長さは異なる。そこで、二つのモジュールの境界を対称面として鏡像の関係となる

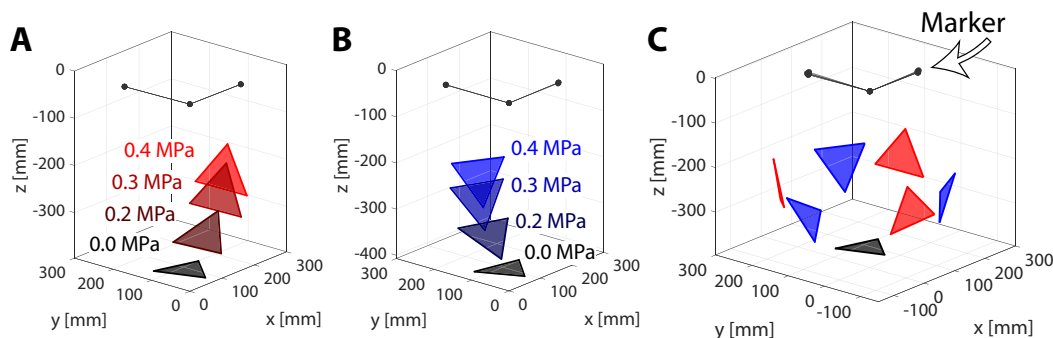


Fig. 4.10: Trajectory of the arm tip when the pneumatic pressure is varied. There are two patterns shown in (A) and (B). As shown in (C), the arm tip can move in six directions.

人工筋に空圧を印加する．接続に関しては，モジュール I の A_2^2 とモジュール II の A_1^1 ，モジュール I の B_2^2 とモジュール II の B_1^1 ，モジュール I の C_2^2 とモジュール II の C_1^1 をそれぞれゴム紐で結びつけた．また，アームの重さは 412 g であった．そして，図 4.9A に示す通り，アームの根本（つまり，モジュール I の $A_1^1 B_1^1 C_1^1$ ）は板に固定した．

図 4.9D に示すようにモジュール II の先端に 3D printer で製作した三角形の部材を取り付けた．三角形の中心にはフックが取り付けられており，おもりを吊ることができるようになっている．また，図 4.9C,D に示すようにアームを取り付けた板の上に 3 点，アームの先端に 3 点モーションキャプチャのマーカーを取り付けた．このマーカーの位置を測定することで図 4.9B のようにテンセグリティを変化させたときの先端の動きを測定できる．図 4.9B は人工筋に 0.4 MPa を印加した際の様子を示している．

4.3.2 無負荷時における性能評価

第 3 章で示した通り一つのモジュールの曲げ変形のための 12 本の人工筋の駆動方法は 6 通りある．2 つのモジュールはモジュールの接続面が対称面となるように鏡像の関係となる人工筋に空圧を印加するため 2 つのモジュールを接続させたアームの曲げ変形のさせ方も 6 通りある．ここで，先端の三角形のうち一点のみを上方向へ変位させる変形の一つを図 4.10A に，先端の三角形の 2 点を上方向へ変位させる変形の一つを図 4.10B に示す．それぞれ，人工筋に 0.0 MPa, 0.2 MPa, 0.3 MPa, 0.4 MPa を印加した場合の図 4.9D に示すアーム先端のモーションキャプチャのマーカーの位置を示す．また，このとき，継ぎ手を用いることで空圧ホース 1 本により駆動させる人工筋全てに空圧を供給している．

6 通りの曲げ変形を行ったときのアーム先端の位置 6 つを図 4.10C に示す．これらは 0.4 MPa を印加した際の先端のモーションキャプチャのマーカー位置であり，6 方向への曲げが実現できることが示された．図 4.10C では，先端の三角形のうち 1 点を上方向に変位させたもの（図 4.10A のパターン）を赤色で，2 点を上方向に変位させたもの（図 4.10B のパターン）を青色で表示している．

ただし，図 4.10A と図 4.10B のパターンでの変形の曲げ角度の大きさは異なった．それぞれ

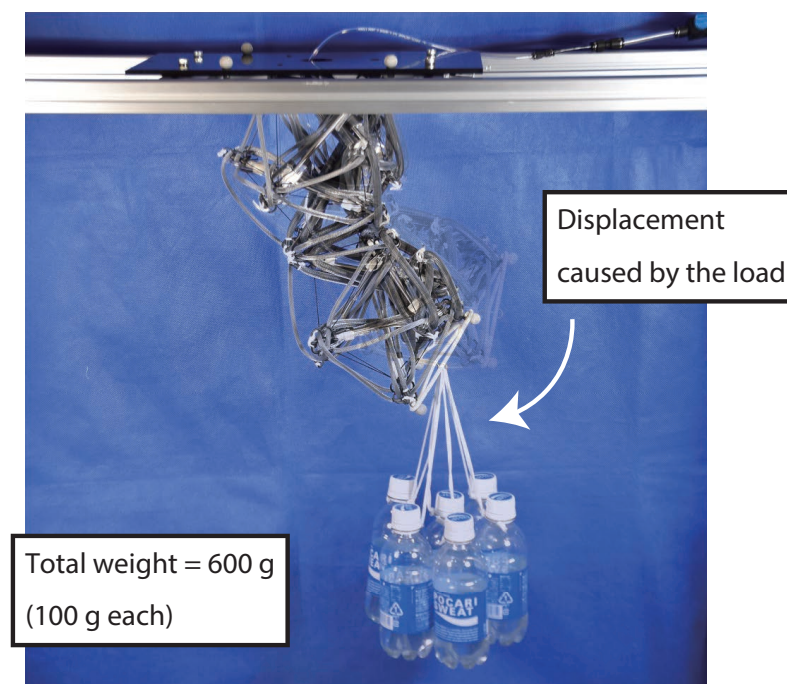


Fig. 4.11: Deformation when a total of 600 g weight is suspended at the tip of the arm with the arm bent.

のパターンでの 3 方向への変形曲げ角度の平均値は図 4.10A のパターンが 83.2 deg であり、図 4.10B のパターンが 75.8 deg であった。曲げ角度として図 4.9C の 3 点のモーションキャプチャから成る平面と図 4.9D の 3 点のモーションキャプチャから成る平面との間の角度を用いた。単体の構造での曲げ変形は理想的には全ての方向で等しいが、アームの先端と根本の 3 点が正三角形を保つように拘束が働くことで、曲げ変形に影響を与えていることが考えられる。

4.3.3 外力印加時の性能評価

人工筋によりテンセグリティアームを屈曲させた状態から先端におもりを吊るしていったときの曲げ角度の変化を記録した。人工筋に 0.4 MPa の空圧を印加して図 4.10A の変形をさせたのち、100 g のおもりをひとつずつ加えていき、600 g までおもりを増やしていき、その後、おもりを 100 g ずつ取り除いていった。このときのおもりによってアームの根元にかかるモーメントとアームの曲げ角度の変位の関係を図 4.12 に示す。モーションキャプチャの座標からモーメントアームを計算し、おもりの重力との積を用いてモーメントを算出した。テンセグリティアームの質量は 412 g でありながら、700 Nmm 程度のモーメントを受けても初期状態での曲げ角度が 83.2 deg に対して 23 deg ほどしか変位しないことが確認された。これより曲げモジュールを用いて自重に対して 1.5 倍程度重い物体を重力に逆らって操作することなどができると期待される。

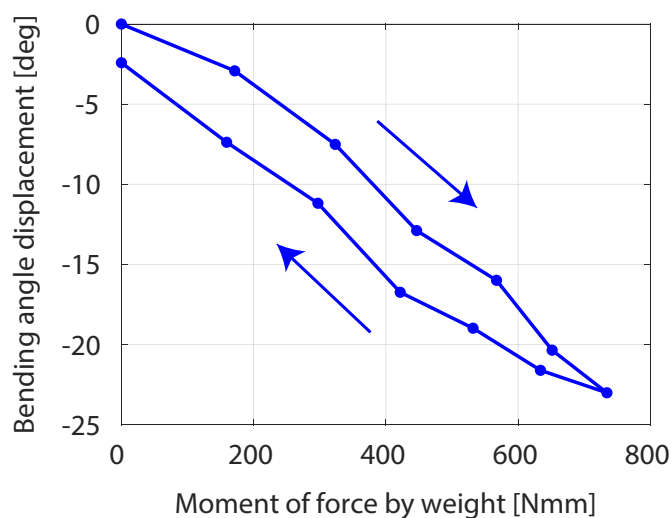


Fig. 4.12: The bending angle displacement of the arm when a moment is applied to the root of the arm by a weight.

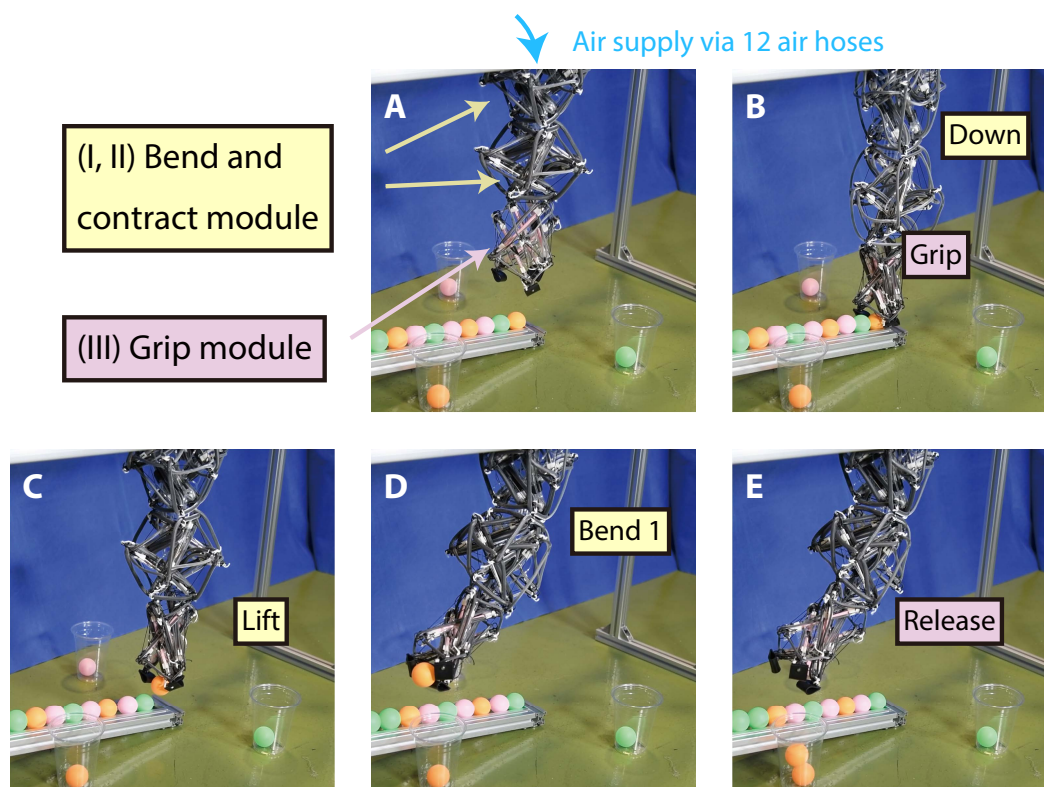


Fig. 4.13: Demonstration of the tensegrity arm with grip module attached to pick and place of balls. (A) Initial state. (B) Down the arm and grip the ball. (C) Lift the arm. (D) Move and sort balls according to their colors in three directions. (E) Release the ball.

4.3.4 天吊り型アームによるピックアンドブレース

図 4.13A に示すようにロボットアームの先端に第 4 章で述べたグリップモジュールを取り付けた曲げモジュールは曲げ変形だけでなく収縮変形も行うことができるため、単体の伸縮モジュールなしに収縮機能も担うことができる。このグリップモジュールは 70 g 程度であり、図 4.3.3 で実験を行ったおもりによる負荷の範囲内であり、グリップモジュールの重心のずれによるモーメントの増加を考慮してもアームの十分な曲げ変形が期待される。そこで、直径が 40 mm, 重さ 2.3 g のボールのピックアンドブレースを行う実験を行った。

実験装置は図 4.13A に示す通りで、アーム下側にボールを並べるためのアルミフレームによるレールを配置した。レールを傾けた状態で配置することで、先頭の物体を把持すると 2 つ目以降の球形の物体が下方へ転がる仕組みとなっている。これにより、アームの下側に常に物体が存在し、連続的にアームによる物体の把持を行うことができるようにしてある。また、13 本の空圧ホースがアームに取り付けられている。12 本は曲げモジュールの人工筋に 1 本ずつ取り付けられており、二つのモジュール間では接続面を対象として鏡像となる人工筋同士が空圧ホースでつながれている。そして残りの 1 本の空圧ホースはグリップモジュールを駆動させるためのものである。この 13 本の空圧ホースの内空圧を印加するホースを決定するために 13 個のソレノイドバルブを用いた。

3 色のボールをそれぞれアームから 3 方向に配置されたカップに仕分ける実験を行った。図 4.13A の初期状態では曲げモジュール I, II はどちらも収縮した状態である。まず、図 4.13B に示すように曲げモジュールの人工筋に空圧を印加しない状態とすることでアーム先端を下方向へ変位させる。0.5 s 後にグリップモジュールを駆動させることでボールを把持する。そして、0.5 s 後、図 4.13C に示すように曲げモジュールを再び収縮状態とすることでボールを持ち上げ、さらに 0.5 s 後図 4.13D に示すように色に合わせた方向へ曲げモジュールを駆動させることでボールをカップの上側へ移動させた。その 0.5 s 後図 4.13E に示すようにグリップモジュールによってボールを離すことでボールのピックアンドブレースを行った。そして、0.5 s 後に図 4.13A の状態に戻し、その 1 s 後に図 4.13B へ変形させることで連続的な操作が可能である。このため 1 つのボールを仕分ける時間は 3.5 s である。また、3 色のボールを仕分ける際、図 4.13D に示すように図 4.10A に示すパターンの変形を用いることでボールを移動させた。3 色のボールはそれぞれ 3 方向に配置されたカップに仕分けることができた。ただし、ここでは 3 色のボールの配置をあらかじめ決めており、画像認識などは行っていない。本デモンストレーションでは、ソフトテンセグリティアームの曲がる方向にカップを配置している。カップの位置の調整後は、9 割以上の確率でボールをカップの中に入れることに成功した。

4.3.5 曲げ動作を利用した投球動作

第 2 章で提案した接着剤を塗布することで耐久性を向上させた細径人工筋を用いて図 4.14A に示すソフトテンセグリティロボットアームを製作した。ここでは、ダイナミックな動きにおいても耐久性の向上が期待されることを示す。

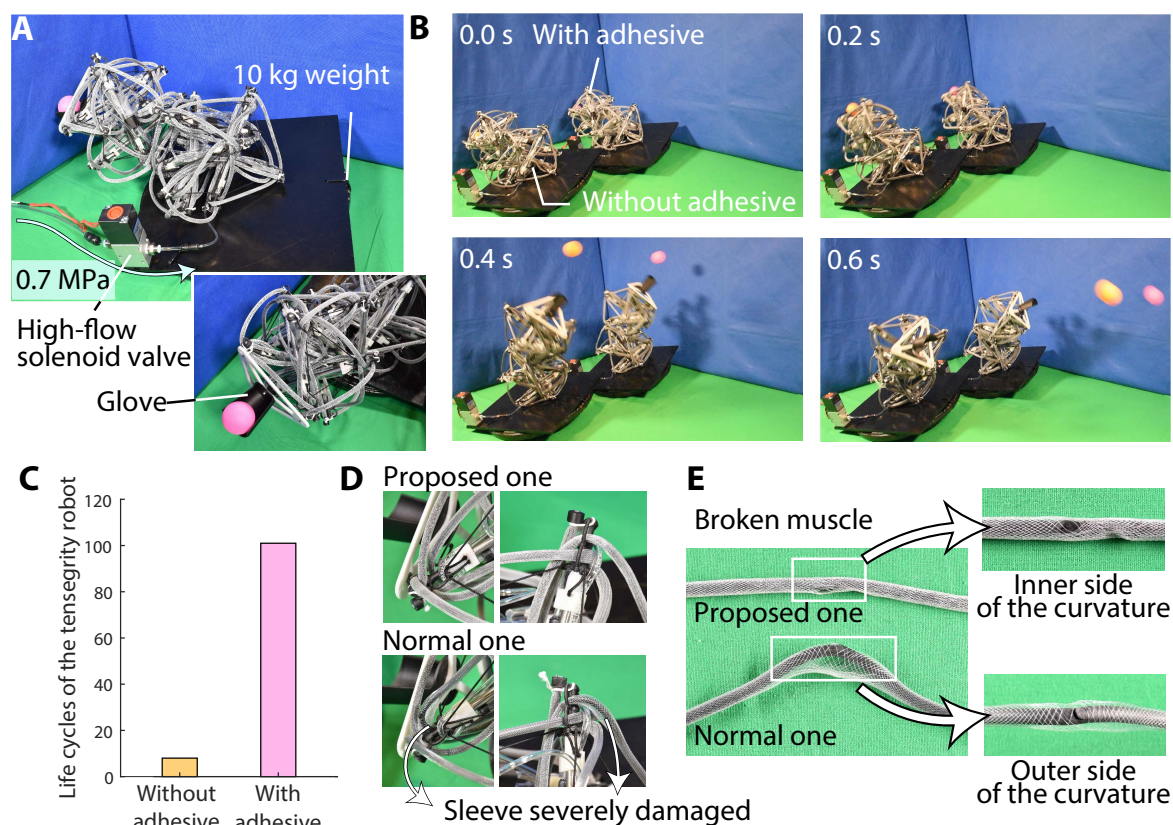


Fig. 4.14: (A) Ball throwing tensegrity arm driven by thin pneumatic artificial muscles. (B) Ball throwing experiment of two types of arms. One is with thin McKibben muscles with the proposed method; the other is with normal thin McKibben muscles. (C) Repetitions number before breaking one artificial muscle of the two types of arms. (D) Appearance of the artificial muscle sleeve after repetitive throwing experiment. (E) Appearance of the broken artificial muscle.

図 4.14A に示すテンセグリティアームに取り付けた人工筋は屈曲部分だけでなく、全ての部分において接着剤を塗布している。また、大流量を扱うことのできるソレノイドバルブ (200E1, KOGANEI) を用いた。また、流量が絞られることを防ぐためにチューブや継ぎ手の有効断面積は 3 mm^2 以上となるようにした。さらにダイナミックな動作を行うため、テンセグリティアームは 10 kg のおもりの上に取り付けた。また、アーム先端にボールを保持するための 3D printer で製作したグローブを取り付けることで投球動作を可能とした。

投球実験の様子を図 4.14B に示す。0.7 MPa という高圧力を用いて、さらに絞りをを用いないことによる大流量によってテンセグリティアームは素早く動作することができた。ボールの飛距離は通常的人工筋を用いたアームでは 1000 mm 、提案した人工筋を用いたアームでは 800 mm 程度であった。この飛距離の差は接着剤による摩擦の影響が考えられる。

そして、過酷な条件による投球を繰り返すことで、通常的人工筋を用いた場合は 8 回の投球で

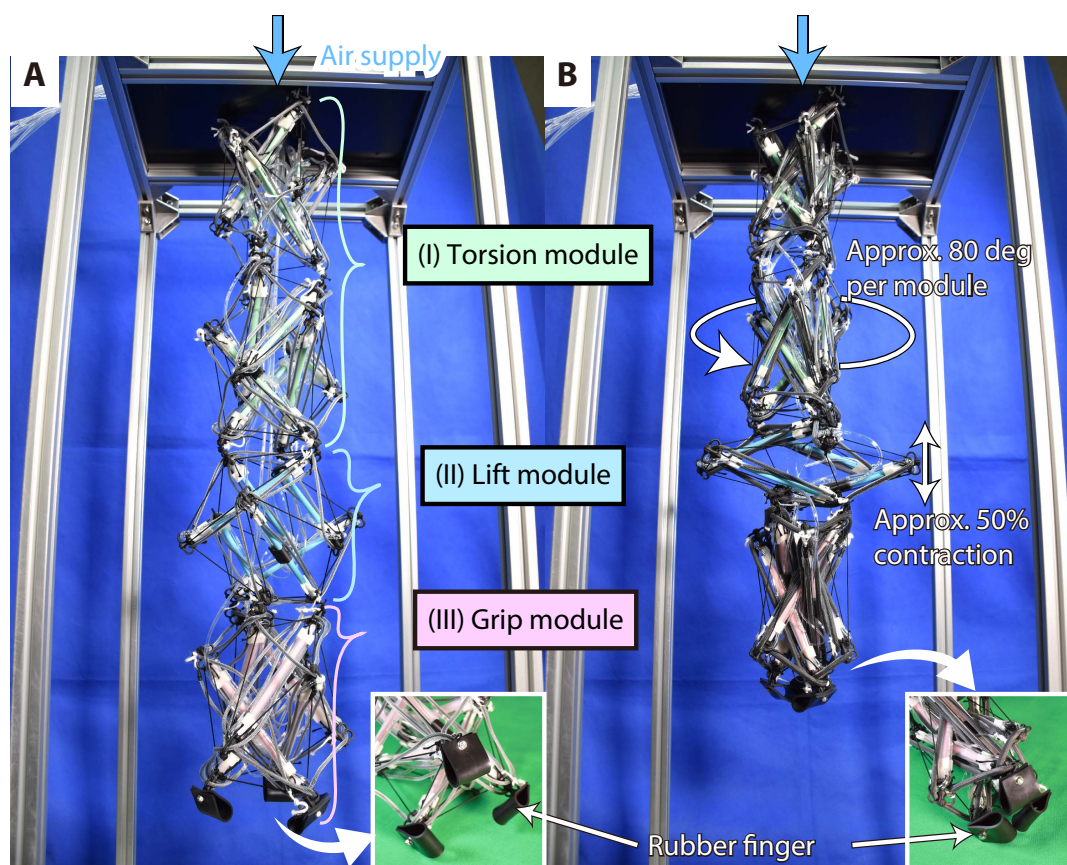


Fig. 4.15: Tensegrity arm consisting of two modules that can torsion, a module that can lift and a module that can grip. (A) Initial state. (B) Pressurized state.

人工筋が破損した一方，提案する手法を用いた場合には 101 回もの投球を行うことができた (図 4.14C)．そして，実験後の人工筋の様子を図 4.14D に示す．0.7 MPa をかけた場合においても通常の人工筋のスリーブが大きく変形する一方で，提案する手法を用いた場合，スリーブの損傷は小さいことが確認された．実際に損傷した人工筋の様子を図 4.14E に示す．通常の人工筋は屈曲の外側で破損した一方，接着剤を用いた人工筋は屈曲の内側で破損した．これは，0.7 MPa を加え，人工筋が何度も打ち付けられることで，内側の接着剤が剥がれてしまったことが考えられる．ただし，スリーブの損傷は小さいことが確認された．

4.4 ねじり操作可能なソフトテンセグリティマニピュレータ

4.4.1 設計

製作したテンセグリティアームの全体像を図 4.15 に示す．このテンセグリティアームは 4 つのモジュールからなり，ロボットアームの重量は空圧チューブを除いて 291 g である．上から 2 つのモジュール I はねじりモジュール，モジュール II は伸縮モジュールの収縮変形のみを行う収縮

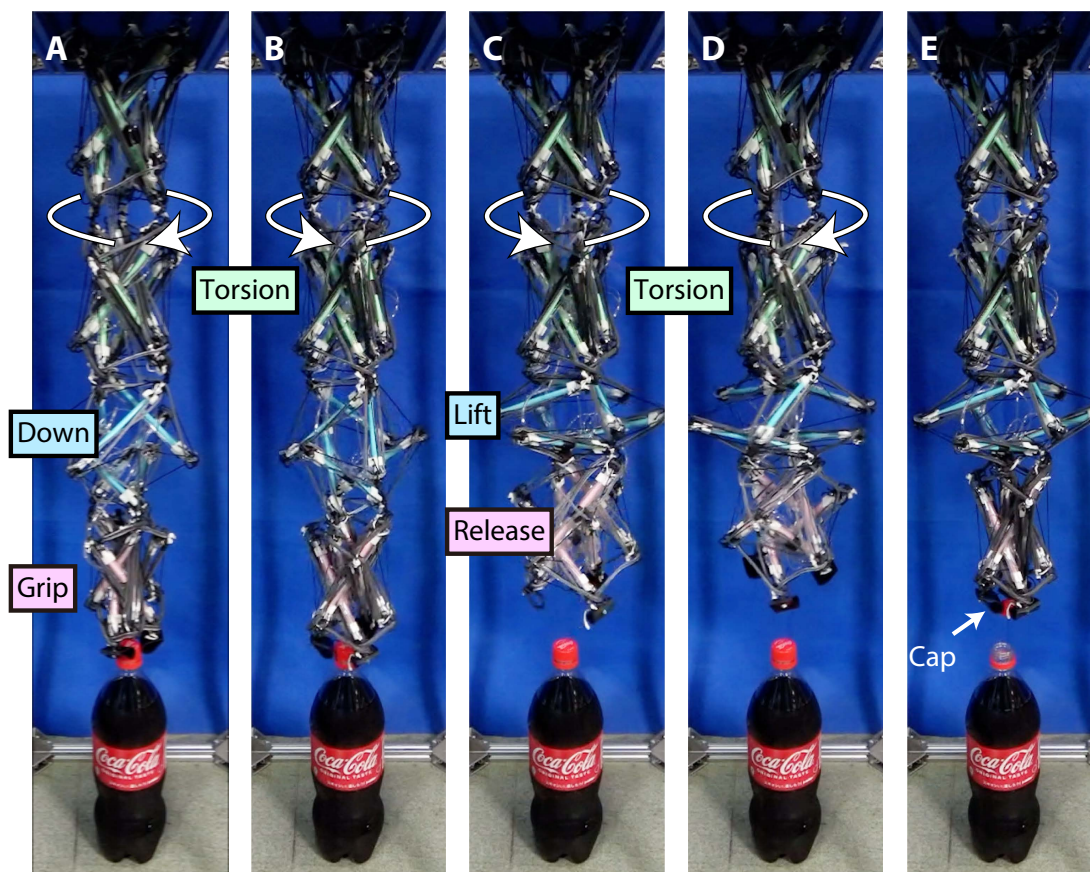


Fig. 4.16: (A) Module II showing arms down while Module III grips the cap. (B) Torsion the arm in the direction to loosen the cap with the Module I. (C) Module III releases the cap and Module II lifts the arm. (D) Torsion Module I back to its original state. (E) After turning the cap four times, the cap could be removed by lifting the arm without releasing the cap.

モジュール，そして，一番下のモジュール III はグリップモジュールである．上下に動作させる収縮モジュールはそれよりも下に配置されるテンセグリティの自重を支える必要があるため，なるべく下部に配置するとよい．このため，このテンセグリティアームにおいてはねじりモジュールを上部に収縮モジュールを下部に配置している．モジュール I をねじり，モジュール II を収縮，モジュール III をグリップさせた状態が図 4.15B の通りである．

4.4.2 ペットボトルキャップの回転操作

テンセグリティアームでペットボトルのキャップを取り外す実験を行った．このテンセグリティアームは前節で述べたロボットと同様，ソレノイドバルブを用いた空圧システムを用いて駆動される．実験の様子を図 4.16 に示す．ただし，キャップは初期状態で少し緩ませた状態としており，全ての動作はフィードフォワード制御のみを用いている．まず，図 4.16A において

モジュール I を負の向きにねじらせた状態であり、モジュール II は収縮させていない状態、モジュール III はキャップをグリップさせた状態である。図 4.16A から図 4.16B でモジュール I を正の向きにねじることで、アーム先端のモジュール III は約 160 deg 回転しキャップを緩めることができた。1 つのモジュールで 100 deg のねじりが生じたが、負荷をかけた状態ではねじり角が 1 つのテンセグリティあたり 10 deg 程度減少することとなった。さらに図 4.16C でキャップを離しアームを持ち上げ、図 4.16D でモジュール I を負の向きにねじれた状態に戻すことができる。これによって、図 4.16A から図 4.16D の動作を繰り返すことが可能である。(A) から (D) までは 3.5 秒 (アームを下すのに 0.5 秒、キャップをグリップするのに 1.0 秒、アームをねじるのに 0.5 秒、キャップを離すのに 0.5 秒、アームを持ち上げるのに 0.5 秒、アームをねじって元に戻すのに 0.5 秒) の時間を要する。キャップを 4 回回したのち離すことなくアームを持ち上げることで図 4.16E のようにペットボトルキャップを取り外すことができた。

4.4.3 ドライバを用いたねじの取り付け操作

また、このソフトテンセグリティアームによるドライバーを用いてねじを締める実験を行った。ドライバを把持している状態でねじりモジュールを駆動させた場合、回転がドライバに伝わると考えられる。一方で、ドライバを把持していない状態でねじりモジュールを駆動させた場合、ドライバには回転が伝達されなくなる。このため、ねじを締める方向にアーム先端を回転させるときはドライバを把持し、ねじを緩める方向にアーム先端を回転させるときはドライバを放す。これにより、このテンセグリティアームを用いて図 4.17A-E のように連続的にねじを回転させることができた。大きなトルクを発生させる点においては課題が残されているが、ゆるんだ状態のねじを回転させる程度のトルクを発生させることはできた。

4.5 まとめ

本章では、任意の変形間を直接遷移可能である特徴を活かして能動的な動作を行うロボットの応用例として、移動ロボット、ロボットアーム、マニピュレータの 3 つのテンセグリティモジュールロボットを製作し、動作を検証した。

伸縮モジュールを 5 つ連結させたインチワームロボットは構造の柔軟性により壁の幅の変化、湾曲形状において受動的な形状適応性を示し、能動的な推進力によって移動することができた。さらに構造の軽量さによってパイプの中を重力に逆らって登ることができていることが確認された。また、フィールド試験として行った地中移動実験においても土でできた壁をグリップしながら移動することが確認された。

伸縮、曲げ、グリップを行うモジュールの機能を組み合わせることによって曲げ動作を行うソフトテンセグリティアームを製作し、効果的な動作が可能であることを確認した。曲げ動作を行うソフトテンセグリティアームに第 2 章における人工筋の耐久性手法を用いて投球動作を行った場合、10 倍以上耐久性が向上することが確認された。

ねじり、伸縮、グリップを行うモジュールの機能を組み合わせることによってねじり操作を行

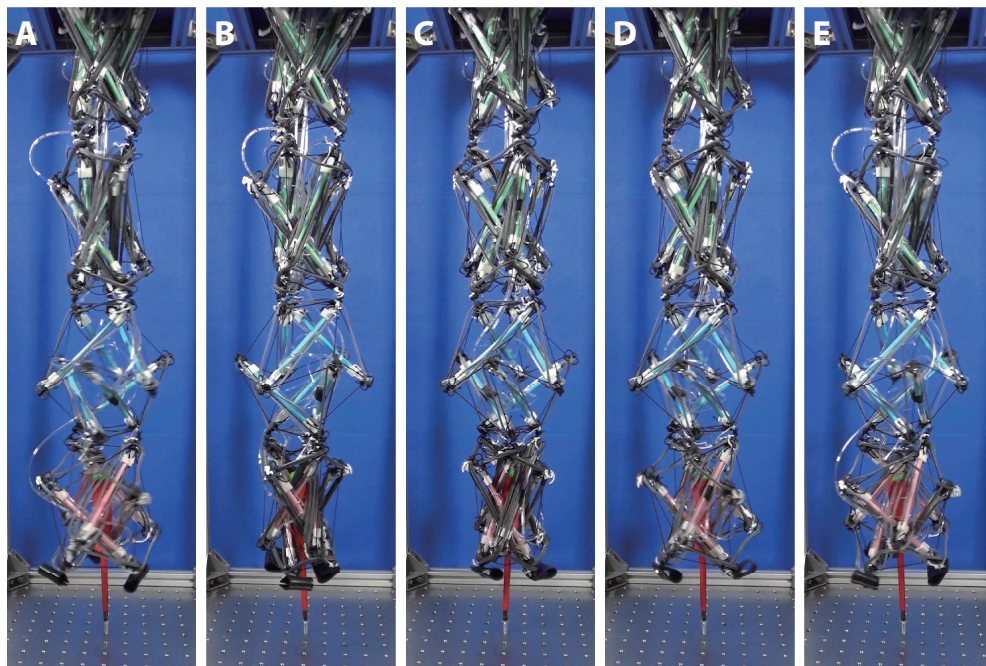


Fig. 4.17: Tensegrity arm movement experiment. (A) Initial state. (B) Grasp the driver. (C) Rotate the arm tip in the direction to tighten the screw. (D) Open the gripping module of the arm. (E) Restore the initial state.

うソフトテンセグリティマニピュレータを製作した。このマニピュレータを用いることによってペットボトルキャップを回すデモンストレーション、ドライバーを用いてねじを操作するデモンストレーションを行った。

本章で示した移動ロボット、ロボットアーム、マニピュレータの動作検証により、提案した細径人工筋を用いたテンセグリティの大変形手法が有用であることを示すことができた。

第 5 章

非加圧時に受動的伸長性を有する空圧人工筋

本章ではテンセグリティ内の三角形を変形させるための二つ目の手法のために必要なマッキベン型人工筋における受動的伸長性の実現について述べる。

5.1 従来の空気圧人工筋の受動的伸長性

生体の筋肉とマッキベン型人工筋の違いの大きな違いの一つとして、マッキベン型人工筋が外力によって伸びづらいという点がある。マッキベン型人工筋はスリーブとゴムチューブから構成され、スリーブは伸長性の低い繊維から成る。このため、マッキベン型人工筋を引き延ばそうとした際、スリーブの編み角が 0 度となるまで伸び切ると、それ以上伸びづらくなる。この外力による伸長性を本論文では受動的伸長性と呼ぶ。生体の筋肉はアクチンフィラメントとミオシンフィラメントの相互作用により駆動し、外力を加えると伸長させられる。マッキベン型人工筋の受動的伸長性の低さは、人工筋を用いて拮抗駆動を行う際に問題となる。

人工筋を用いてプーリとアームから成るロボットアームを駆動する場合、一方向へ回転させる際には 1 本の人工筋を取り付けることで変位させることができる。一本の人工筋のみを用いた場合、初期状態に戻すためには反対側にばねなどを取り付けることで復元力を生じさせる必要がある。この復元力を生じさせるため、また、両方向への回転を可能とするために、2 本の人工筋を利用した拮抗駆動が広く用いられる [92, 93, 94]。しかしこの場合、一方の人工筋を駆動したとき逆側の人工筋の受動的伸長性が低いために、人工筋の収縮が困難となる (図 5.1A)。

人工筋を用いて拮抗駆動を行う際、片側の人工筋がもう一方の人工筋の収縮を阻害することを防ぐために、一般的に人工筋を取り付ける紐はたるませて配置される (図 5.1B)。紐がたるまされている場合、人工筋の収縮率の一部はたるませた紐を引き延ばすために利用され、ロボットアームは人工筋の 20% の収縮率を生かすことができない。さらに、人工筋の収縮力を最大限に生かすことができないという課題がある。人工筋の収縮力は収縮率が 0% の点で最大の出力を出すことができるが、はじめに紐をたるませている場合、人工筋が与えられる力は小さくなる。この収縮率損失や収縮力の利用困難性がマッキベン型人工筋を用いたロボット開発において、大きな制限

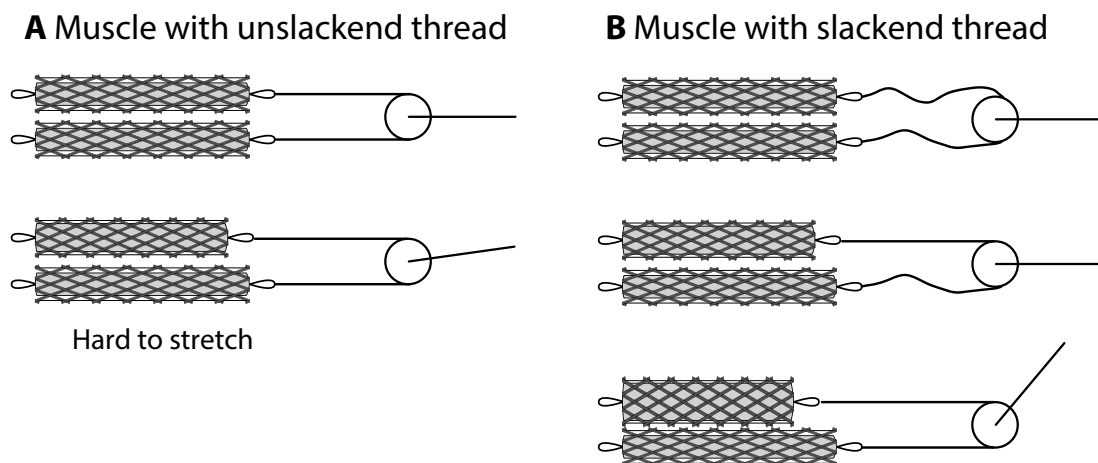


Fig. 5.1: (A) Antagonistic actuation without slack. The movement of the robotic arm is severely restricted because the non-actuated muscle does not extend. (B) Antagonistic actuation with slack. The range of motion of the robotic arm is reduced due to the initial slack.

を与え、アプリケーションの幅を狭めている。より効果的にマッキベン型人工筋を用いるためにはこの収縮率の損失をなくすことが求められる。

この考えのもと、これまでに外力によって伸びる収縮タイプのマッキベン型人工筋が開発されてきた [95][96][97]。[95] は細径の人工筋を編み込むことで収縮率を損なうことなく、15% 弱の伸長が可能である。また、[96][97] では、通常的人工筋に対して、外力による伸びを実現するための elongation part を直列に接続することで伸長動作を実現している。しかし、[95] では伸長率が構造的に決定され 15% より大きな伸長率を実現することができず、[96][97] では伸長率を高めようとした場合に収縮しない elongation section の割合が増え、全体としての収縮率が低下する。さらに、いずれにおいても、複雑な構造をしているために、生産性が低く、簡易的なロボットアームにしか応用されていない。

そこで、本章では外力による伸長を可能とする構成の空気圧型人工筋を提案する。本章で提案する拮抗駆動用マッキベン型人工筋は従来のマッキベン型人工筋にゴム紐と伸びない紐のみから成る 1 本の紐を追加した非常に単純な構成をしているため、ロボットへの適用が容易である。まず 5.2 節で非加圧時に受動的伸長性を有するための最も簡易的な構成に関する人工筋を製作し、本人工筋の基礎的な物理特性、耐久性について考察する。

受動的伸長性を有する人工筋を用いることによって空圧シリンダとの組み合わせによる拡大変形が可能となる。ただし、空圧シリンダを用いた拡大変形を伴うテンセグリティの剛性変化を実現させるためには受動的伸長性に加えて、人工筋の剛性変化が必要となる。そこで、挿入するゴム紐として、二種類のゴム紐を用いることによって任意の長さから収縮可能かつ受動的伸長性を有する人工筋を提案する。

そして、拮抗駆動を用いたロボットアームの駆動アクチュエータとして本章で提案する受動的

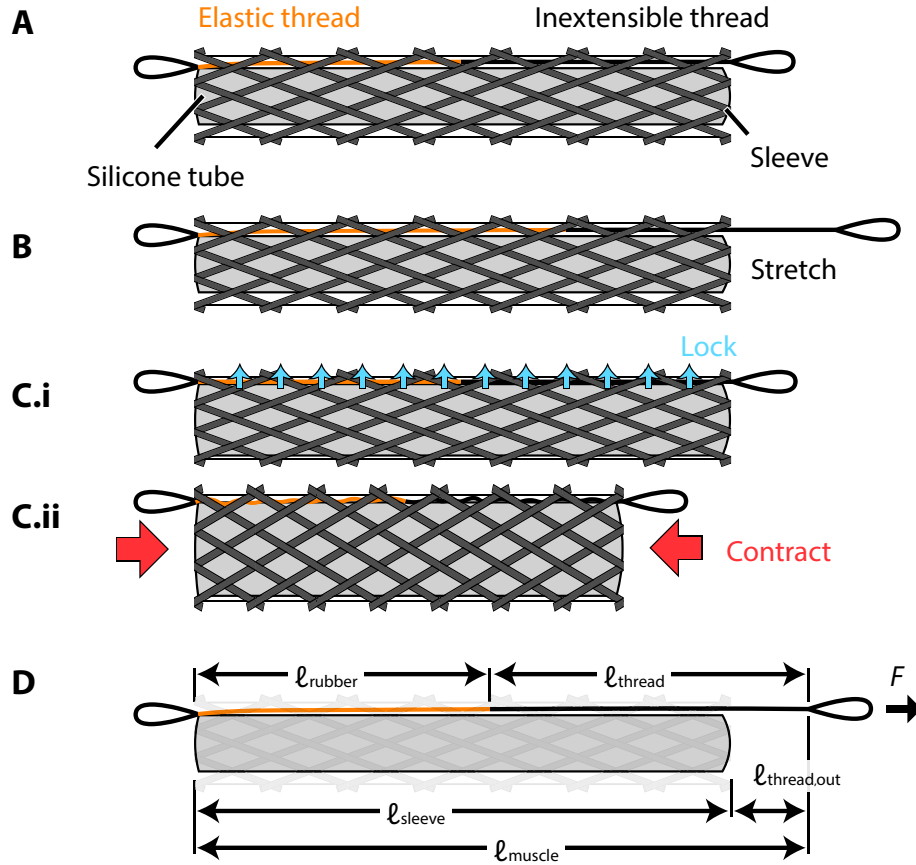


Fig. 5.2: (A) Structure of the proposed stretchable artificial muscle. (B) Extension of the artificial muscle is achieved by stretching the inner rubber thread. (C) Contraction mechanism: (C.i) Inner silicone tube presses the thread against the sleeve, locking it in place. (C.ii) Sleeve contraction pulling the locked thread, which buckles into a wavy pattern within the sleeve. (D) Internal structure and variables, where $\ell_{thread,out} = 0$ mm at $F = 0$ N.

伸長性を有する人工筋を用いることによって駆動範囲が広がることを示すことにより，提案する人工筋の有用性を示す．任意の長さから収縮可能かつ受動的伸長性を有する人工筋については，第 6 章でのテンセグリティへの適用することでその有用性を示す．

5.2 受動的伸長性を有する人工筋の基礎的検討

本研究で提案する伸長可能な人工筋の基本的な構成を図 5.2 に示す．本アクチュエータはマッキベン型人工筋の内部のゴムチューブとスリーブの間にゴム紐，伸長不可能な糸を追加した構成をしている．ゴム紐と糸は直列に接続され，ゴム紐の左端が内部のゴムチューブの左端に固定されている（図 5.2A）．また，スリーブの両端はゴムチューブの両端と固定している．このため，スリーブとゴムチューブの間で滑りが生じることはない．

空圧を印加していない状態では、右側の糸を引っ張ると、ゴム紐の弾性によって伸長することが可能である (図 5.2B)。スリーブとゴムチューブが伸びることはないが、力を受ける左右の紐の間の長さが伸びるために拮抗駆動等に用いることが可能である。一方で、空圧を印加することでゴムチューブが膨らみスリーブが収縮する。このとき、ゴムチューブがゴム紐、糸をスリーブに押し付け、繊維ジャミング [98] のように摩擦力でロックされたのち (図 5.2C.i), スリーブの拘束により人工筋が収縮する (図 5.2C.ii)。このため、左右の紐の距離を空圧印加前に対して人工筋の長さの約 80% に接近させることが可能である。ただし、紐を引っ張った状態で空圧を印加させた場合、図 5.2C.i から図 5.2C.ii にかけて糸とスリーブの間に滑りが生じ、アクチュエータの収縮長さが若干減少する現象が確認されている。この点においては 5.2.2 節で滑り距離を実験にて評価する (図 5.5A 参照)。紐がスリーブとゴムチューブから受ける摩擦力によって外部からの引っ張りを支えることが可能である。

5.2.1 提案する人工筋の製作方法

本節で提案する人工筋の製作方法を図 5.3 に示す。本研究における人工筋の製作方法には [99] を参考にした。長さ約 200 mm の人工筋を製作する方法を示す。

まず、図 5.3A に示すように、外径 10 mm 内径 8 mm のチューブ 200 mm に外径 8.4 mm の空圧継ぎ手を挿入する。空圧チューブと空圧継ぎ手の間に接着剤 (LOCTITE401) をつける。そして、外径 3 mm のゴム紐と外径 0.5 mm の伸長不可能な紐とシリコンチューブをホースクランプを用いて取り付ける。接着剤とホースクランプによりシリコンチューブ内に空圧を印加したときに空気が漏れることを防ぐことができる。また、左側のホースクランプにゴム紐の結び目を固定する (図 5.3A)。ここで、ゴム紐と伸縮不可能な紐は図 5.3B に示すように接着した。図 5.3B.i に示すようにゴム紐の先端の毛をほつれさせ、接着剤 (LOCTITE401) を一滴たらし、ゴム紐の毛を紐にまわりつかせるようにした (図 5.3B.ii)。これによりしっかり接着することが可能である。ゴム紐の長さは 50 mm とした。右側のクランプの輪に糸が通るように、ホースクランプを固定する。このときシリコンチューブがクランプの輪に入らないよう注意することが重要である。糸がスライドするためのクランプの輪にシリコンが入り込むと糸に摩擦力が働きスライドしづらくなってしまう。また、図 5.3A のように左右のホースクランプの輪の部分を同じ向きに固定する。

次にゴムチューブとスリーブとの接合である。スリーブとゴムチューブの位置関係がずれないようにホースクランプで固定する必要がある。右側のホースクランプにおいて糸のスライドは可能なまま、スリーブをホースクランプにより固定するため、スリーブを図 5.3C.iii に示す形にする必要がある。このとき、220 mm のスリーブの繊維がほどけるのを防ぐために初めに接着剤を用いて 15 mm 程度固めておく (図 5.3C.i)。接着剤を乾燥させる際、中に外径 8 mm の空圧チューブ 2 本を挿入することで断面サイズを固定した (図 5.3C.ii)。その後、図 5.3C.iii の形にカットする。そして、スリーブの中にゴムチューブ、ゴム紐、糸を通し、両側をホースクランプで固定する。ここで、図 5.3D に示すようにシリコンチューブをカットしておくことでホースクランプの輪にシリコンチューブが入りこみ、糸に摩擦がかかることを防ぐ。また、初めに取り付け

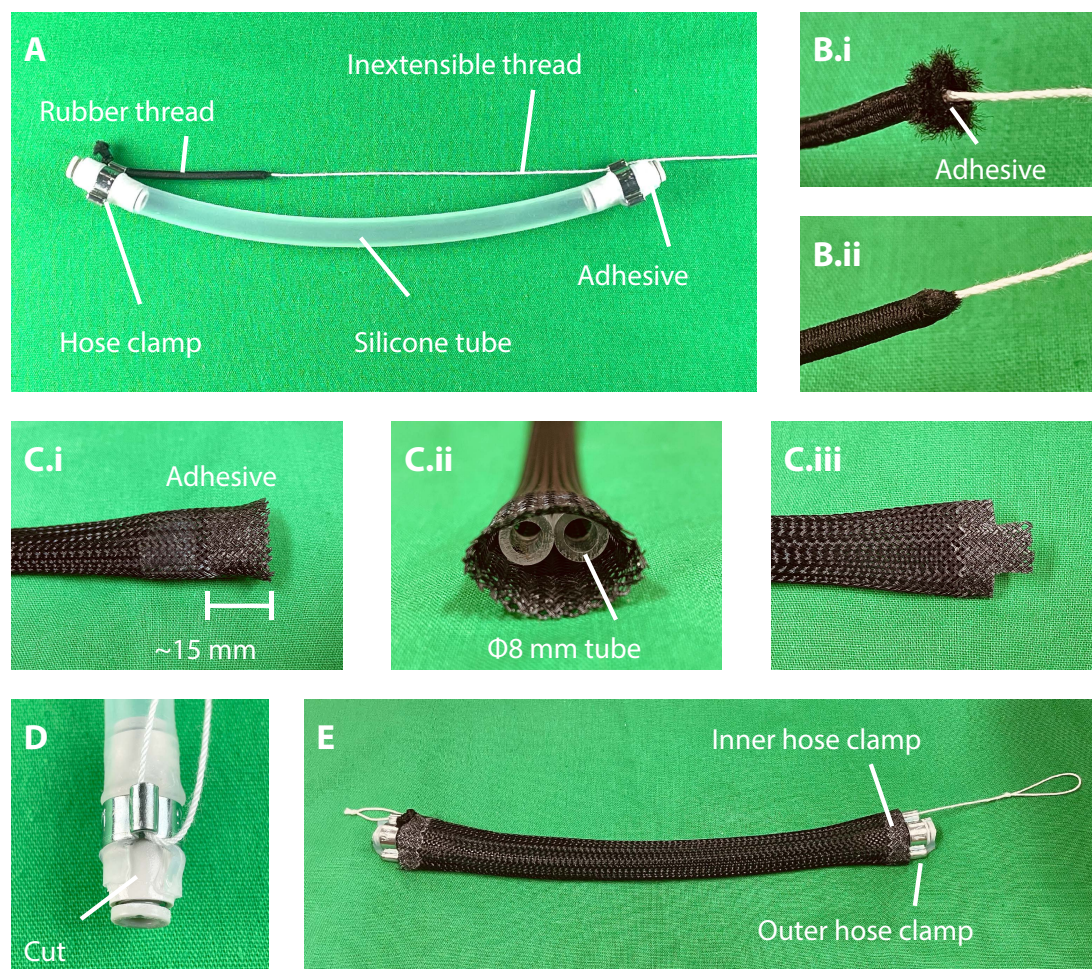


Fig. 5.3: Fabrication of stretchable muscle. (A) Internal structure assembly. (B) Connection between rubber thread and inextensible thread. (C) Sleeve preparation. (D) Cutting of silicone tube. (E) Sleeve installation.

ホースクランプと同じ角度で 2 つ目のホースクランプを取り付けることで糸をスライドできるようにする

以上の工程により伸長可能な人工筋を製作することができる。

5.2.2 提案する受動的伸長性を有する人工筋の特性評価

負荷がない場合の提案する人工筋の特性

本節で提案した人工筋と通常的人工筋の無負荷時における特性について図 5.4 に示す。通常的人工筋に関しても 200 mm のゴムチューブ、220 mm のスリーブを用いて製作したものを用いて特性を測定した。また、図 5.4 のデータを得るために、5 つのサンプルにおいてデータを取得し、その平均値を用いた。

図 5.4A は人工筋の無負荷時の収縮率を示している。外側のホースクランプ間のスリーブの長

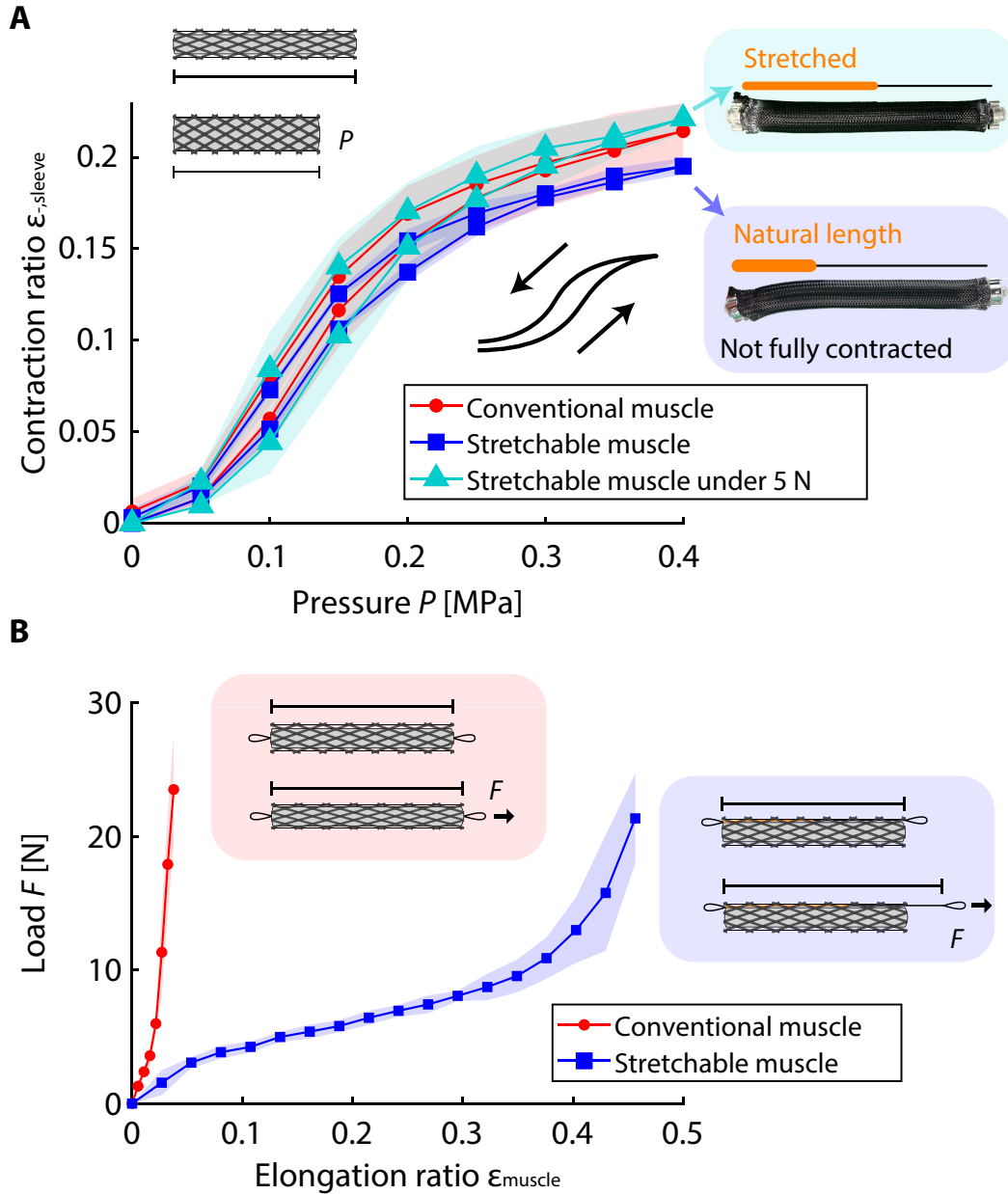


Fig. 5.4: Performance evaluation of conventional and stretchable artificial muscles. The plots display the mean values with shaded regions representing standard deviation (sample size = 5). (A) Sleeve contraction ratio as a function of applied pressure, without sleeve-thread slippage effects. The stretchable muscle achieves typical contraction ratios under load but shows a 2% lower ratio when unloaded, as the rubber thread cannot contract. (B) Load as a function of elongation ratio under unpressurized conditions.

さを測定した。通常的人工筋に対して本章で提案する人工筋の収縮性能は2から3%程度小さくなった。これは人工筋のスリーブとゴムチューブの間に挿入したゴム紐の太さによるものである。図に示すようにゴムチューブの直径によってスリーブが収縮することができず、ゴム紐を挿入し

ていない側に湾曲した。これにより、提案する人工筋の収縮率は低下する。このため、ゴム紐の長さはなるべく短いほうが望ましく、細いことが望ましいと考えられる。

図 5.4B に人工筋の伸び率に対する荷重を示す。人工筋の片側のひもをロードセルに固定し、両側から引張り延ばした際の荷重を記録した。通常の人工筋は延ばされた際にスリーブが細くなり、内部のゴムチューブの外径に一致したところでそれ以上延ばすことができなくなる。一方で、提案した人工筋は内部のゴム紐の荷重によって伸長することが可能である。通常の人工筋ではスリーブの長さを、提案する人工筋では左端から初期状態における右端のひも部分までの長さを用いて伸長率を計算している。この測定結果から、提案した手法により外力による伸長性を大幅に向上させることができることが示された。伸長時の荷重特性はアプリケーションに合わせて内部のゴム紐を選定することで容易に変更可能である。

負荷がある場合の提案する人工筋の特性

次に人工筋に負荷を加えた場合の特性について図 5.5 に示す。図 5.5 に示すデータは一つのプロットに対して 5 回測定し、その平均をとった。

糸にかかる荷重に対するスリーブと糸の滑りを図 5.5A に示す。人工筋を垂直に配置し、紐におもりをつるすことで一定の荷重を加えた。このときに、0.4 MPa を印加し、滑った変位を測定した。滑りの変位は図中に示すとおりである。荷重が 3 N 程度までの場合には、人工筋にかかる荷重が大きいほど滑り幅が大きくなることが確認された。しかし、3 N 以上の荷重を加えた場合には 6% 未満でおおよそ一定となった。これらの滑り変位は人工筋の収縮率に対して小さく、ある程度大きな荷重をかけた場合にも人工筋として機能すると考えられる。また、提案する人工筋の有効な収縮率は図 5.4A に示すスリーブ部分の収縮率と図 5.5A に示す滑り量の差で求められる。例えば、5 N の負荷を加えた状態で 0.4 MPa を印加した時の収縮率はスリーブの収縮率 19% から滑り量 5% の差を考えることで約 14% 程度となる。加えて、約 40% の外力による伸長性を有するため、拮抗駆動等のアプリケーションによっては有用なものとなる。

本章で提案するマッキベン型人工筋の空圧印加時の荷重変位線図を図 5.5B に示す。空圧を 0.4 MPa 印加し、片側をロードセルに固定した状態で人工筋の両端を引張り、ロードセルの値を記録した。この測定を一つのプロットに対して 5 回行い、その平均をとった。また、ここでは糸がたるむことのないように、初めに 5 N の力で引っ張った状態で空圧を印加した。このとき、20 N 程度の力がかかるまでほとんど紐が滑り始めることはなく、伸長させた長さが長いほど、荷重が大きくなった。伸長率の増加による荷重の増加は、ゴム紐の長さの増加によるものであると考えられる。本章で提案する人工筋では、空圧を印加することで糸がゴムチューブとスリーブの間に押さえつけられることで生じる摩擦力によりロックされる。ここで製作した人工筋の場合、ゴムひもが外径 3 mm、伸長しないひもが外径 0.5 mm であったため、ロックされる力は外径の大きいゴム紐側に大きく依存する。このため、人工筋を伸長させることで、ゴム紐の長さが長くなり、伸長変位が大きくなるほどゴム紐とスリーブ、ゴムチューブとの接触面積が大きくなり、摩擦力が大きくなっていると考えられる。

以上より、収縮率に大きな差はなく、外力に対する伸び変形を実現することができていることが確認できた。

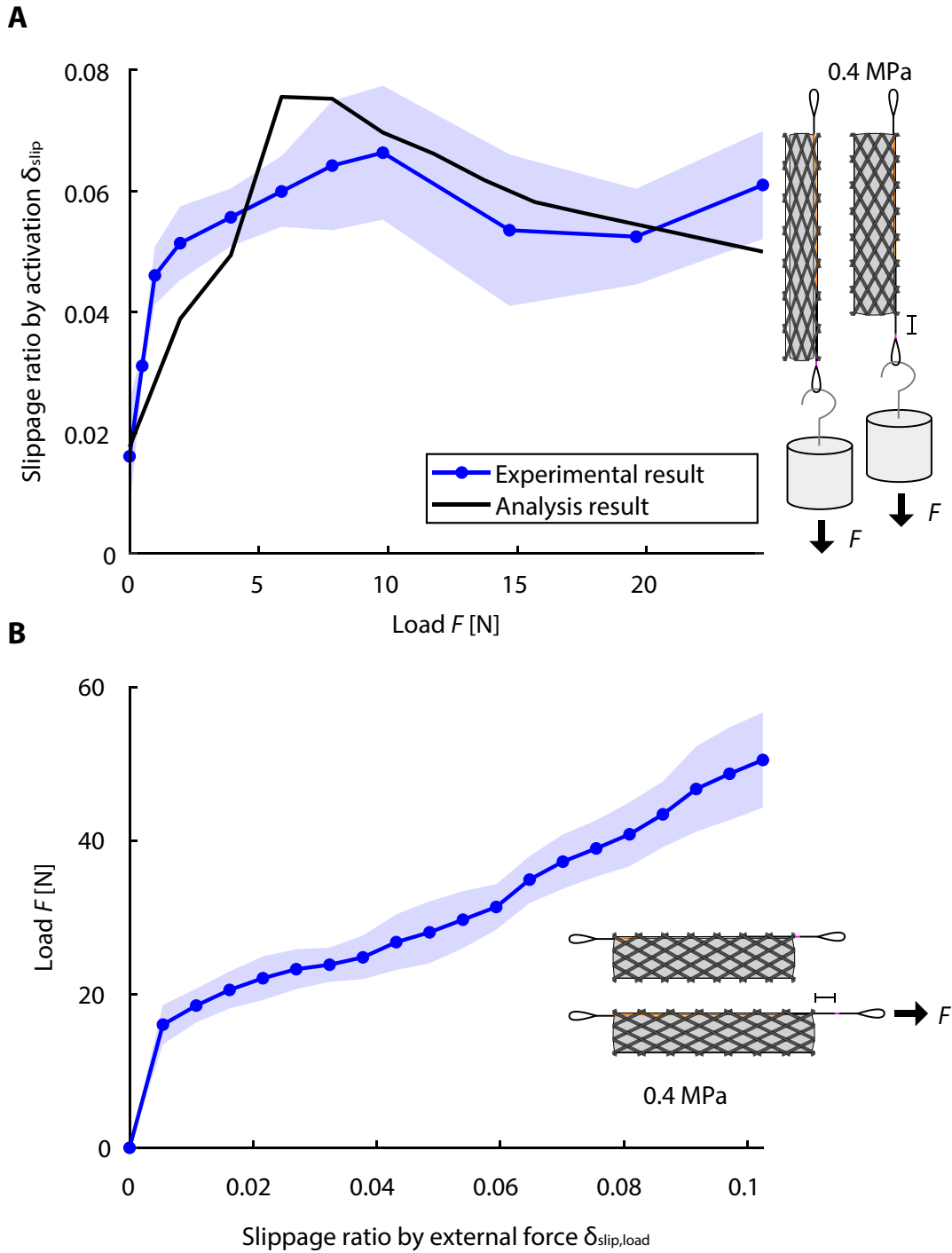


Fig. 5.5: Sleeve-thread slippage under different conditions. The plots display the mean values with shaded regions representing standard deviation (sample size = 5). (A) Slippage during pressurization to 0.4 MPa. (B) Force-induced slippage after applying 0.4 MPa.

5.2.3 空圧印加時の人工筋の力学モデル

空圧印加時の糸とスリーブの間の滑りの現象に関して議論する．糸とスリーブの間の滑りは低

圧において糸をグリップする力が小さいことに起因すると考えられる。人工筋に 0.4 MPa の圧力を印加する際、シリコンチューブ内の圧力は 0 MPa から 0.4 MPa まで連続的に増加する。その際、圧力が小さいうちは糸に働く摩擦力が外部の荷重よりも小さく、摩擦により糸引っ張ることができない (図 5.6A.ii)。圧力が増加し、糸がスリーブ、シリコンチューブから受ける摩擦力が荷重を支えられるようになった時点でスリーブが糸をロックし、スリーブの収縮とともに糸が変位し始める (図 5.6A.iii)。糸が変位し始めるまでに収縮したスリーブの長さ分が糸とスリーブの間の滑りとなる。

一方で、ゴム紐部分に関しては実験の観察からスリーブとの間では滑りが確認されなかった。これは図 5.6A.ii により説明される。本研究においてゴム紐は径 3 mm のものを、伸びない紐には径 0.5 mm のものを用いている。このため、シリコンチューブが膨らむことで圧力が小さい時点でもゴム紐と伸びない糸のつなぎ目においてスリーブに段差ができる。スリーブが収縮する際にこの段差にスリーブが引っ掛かりゴム紐とともに収縮したと考えられる。ゴム紐と伸びない糸のつなぎ目には左側からゴム紐の弾性力が、右側から外力がかかり、その差分の力がつなぎ目からスリーブの段差に対して働く。この力は実験を行った範囲内ではスリーブがつなぎ目における段差を超える程大きくなく、ゴム紐とスリーブの間では滑りが生じなかったと考えられる。

伸びない糸の滑りに関しては、スリーブ内の圧力に対する糸に働く摩擦力が重要となる。この摩擦力はスリーブの径、シリコンチューブの径、糸の径、圧力に起因すると考えられる。本項で用いたシリコンチューブのスリーブを用いない場合の圧力と径の大きさの関係は図 5.6B に示す通りである。空圧が 0.11 MPa となった時に大きく膨らんだ。それ以上圧力を大きくした場合にはシリコンゴムが破裂したため測定していない。そこで、スリーブの内径を d_{sleeve} 、シリコンチューブが膨らもうとする外径を d_{silicone} 、糸の外径を d_{thread} としたとき、摩擦力が次のように示されると考えられる。

$$f_{\text{thread}} = \mu \alpha (d_{\text{silicone}} + d_{\text{thread}} - d_{\text{sleeve}}) P \quad (5.2.1)$$

ここで α はそれぞれの径の関係と圧力から摩擦に対応する垂直抗力を求めるための係数であり、 μ は摩擦係数である。紐はロックされたのち、次の瞬間に収縮させられることでたるみを生じるため、式 (5.2.1) ではスリーブ内の糸すべての長さではなく、右端部分のある一定の長さにかかる摩擦力を考えている。シリコンチューブの外径は図 5.6B から求められ、点線に示すように 0.11 MPa を超えた場合には 0.11 MPa における外径を用いた。また、

$$\frac{L_0}{\cos \theta_0} = \frac{L}{\cos \theta}, \quad \frac{\pi d_{\text{sleeve},0}}{\sin \theta_0} = \frac{\pi d_{\text{sleeve}}}{\sin \theta}. \quad (5.2.2)$$

からスリーブの外径は初期状態のスリーブの外径と収縮率を用いて求めることができ、図 5.6B のとおりである。 θ はスリーブの編み角であり、 θ_0 は初期状態でのスリーブの編み角である。これらの値を用いて摩擦力を計算し、荷重に達した点でのスリーブの収縮率が伸びない糸部分の滑り率である。糸をロックする圧力を $P_{\text{thread,lock}}$ とすると、糸部分での滑り率 $\delta_{\text{slip,thread}}$ は

$$\delta_{\text{slip,thread}} = \varepsilon_{-, \text{sleeve}}(P_{\text{thread,lock}}) \quad (5.2.3)$$

となる。ゴムひも部分ではスリーブとの間に滑りを生じないため、人工筋全体に対する滑り率

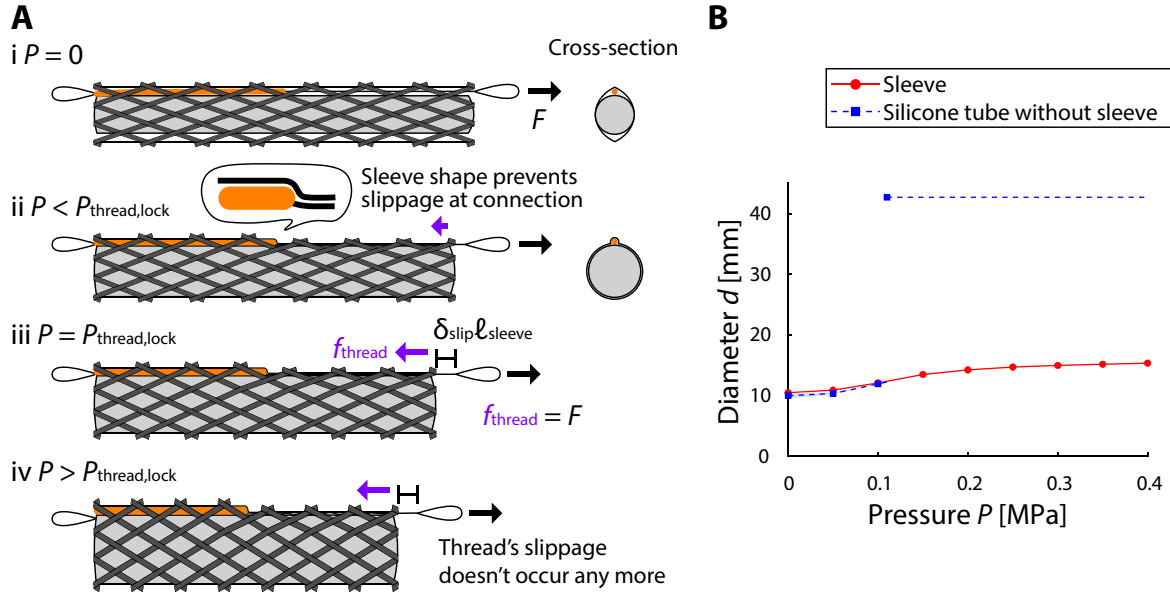


Fig. 5.6: (a) Detailed analysis of slippage mechanism from Fig. 5.2A to C.ii. (b) Diameter of the sleeve and unconstrained silicone tube.

δ_{slip} は

$$\delta_{\text{slip}} = \frac{\ell_{\text{sleeve},0} - \ell_{\text{rubber},0}}{\ell_{\text{sleeve},0}} \delta_{\text{slip,thread}} \quad (5.2.4)$$

と表される。

以上のモデルを用いて計算した滑り率の解析結果が図 5.5A の黒線である。式 (5.2.1) における $\mu\alpha$ を $1 \text{ N}/(\text{MPa} \cdot \text{mm})$ とした場合を示している。また、初期状態ではスリーブの断面は円が扁平した形状をしているが、ここでは簡単のために円であると仮定している。ここで、荷重をかけた場合には図 5.4B の青線に示すように、ゴム紐が伸び、スリーブ内の伸びない紐の長さの割合が短くなることを考慮している。このため、荷重が大きくなるほど、伸びない紐部分における滑り率 $\delta_{\text{slip,thread}}$ は大きくなるが、スリーブの長さに対する紐の長さの割合が短くなる。よって、式 (5.2.4) の関係から、荷重が増えても全体の滑り率が増加しなかったと考えられる。また、解析結果と実験結果の誤差は本モデルで考慮しなかった動学的な現象、摩擦の圧力に対する非線形性などが影響していると考えられる。

$$\varepsilon_{-, \text{muscle}} = \varepsilon_{-, \text{sleeve}} - \delta_{\text{slip}} \quad (5.2.5)$$

となる。次に以下の式で表される空圧印加後に荷重を加えた場合のスリーブと糸と間の滑り率 $\delta_{\text{slip,load}}$ を実験により測定した。

$$\delta_{\text{slip,load}} = \frac{\ell_{\text{thread,out},P,F} - \ell_{\text{thread,out},P}}{\ell_{\text{sleeve},0}} \quad (5.2.6)$$

$\ell_{\text{thread,out},P,F}$ は空圧を印加した後に荷重をかけた際のである外に出ている糸の長さ ℓ_{thread} である。スリーブが収縮すると同時に糸は内部でたるんだ状態となっている。糸を引っ張ること

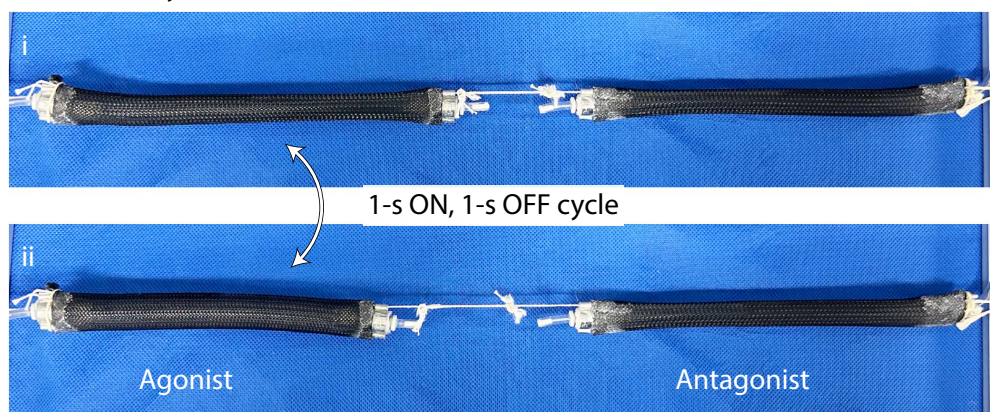
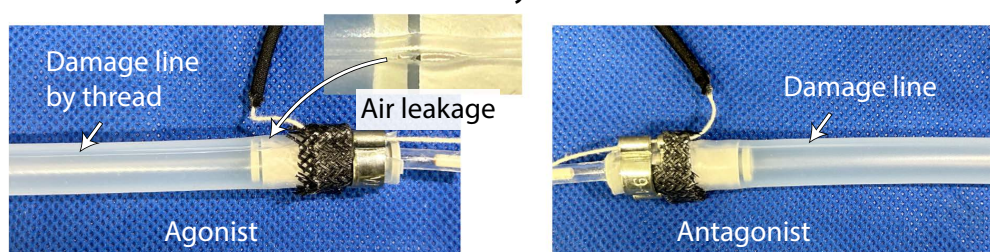
A Durability test**B Inner silicone tube after durability test**

Fig. 5.7: Durability test of McKibben muscles with passive stretchability.

るみが解消していき、張力を張った部分の長さが増えていくことでその糸の部分の長さが増えるにつれて摩擦力が増えていったと考えられる。

5.2.4 受動的伸長性を有する人工筋の耐久試験

本節で提案する人工筋は通常的人工筋に対してゴム紐と糸があり、シリコンチューブに擦れる、そこで、スリーブの内部に追加した糸の人工筋に与える耐久性の影響を実験的に確認した。

実験の様子を図 5.7A に示す。主動筋と拮抗筋を直列に連結させ、主動筋が破損するまで耐久試験を行うことで主動筋として使う場合と拮抗筋として使う場合の耐久試験を行った。人工筋においてシリコンチューブを用いる場合、シリコンチューブの耐久性の観点から 0.3 MPa の使用が推奨される。このため、本研究においても 0.3 MPa における耐久性を確認した。空圧を印加していない状態でどちらのゴム紐も 5 N 程度で引っ張られるように内部のゴム紐が伸ばされた状態とした。1 秒間隔で空圧の印加、排気を繰り返した。

5 本的人工筋を用いて耐久試験を行った。その結果、1 本は追加した糸と関係ない部分において 2250 回でシリコンチューブが破損し、残り 4 つの人工筋では図 5.7B に示すように、糸が擦れることでシリコンチューブに傷がつくことで平均 2955 回（標準偏差 838 回）で破損した。また、拮抗筋側においても糸による傷が確認された。シリコンチューブの伸びはマッキベン型人工筋に適しているものの、傷による破損を受けやすく [77]、耐久性に問題がある。このため、耐

久性を気にしなくてはならないアプリケーションにおいては、より耐久性の強いゴムを使用すべきである。また、自己修復作用をゴムチューブに与える手法等も有効であると考えられる。

5.3 任意の長さで駆動可能な人工筋

前節における人工筋構成では、非加圧時に受動的伸長性を実現しており、基礎的な特性と力学モデルから本人工筋の特性を明らかにすることができた。しかし、弾性紐が外力によって引き延ばされた状態で人工筋を駆動した際に問題が生じる。伸ばされていない状態で人工筋に空圧を印加した際には、スリーブの右端部分が伸びない紐を掴んで収縮するため、人工筋の全長を収縮させることができる。一方で、伸ばされた状態で人工筋に空圧を印加した際には、スリーブの右端が弾性紐を掴むため、人工筋の収縮は弾性紐が引き延ばされることに利用される。その結果、人工筋の全長を収縮することが困難となる（図 5.8A）。また、この場合、人工筋の剛性は弾性紐の剛性に依存し、人工筋の剛性を高くすることができない。空圧人工筋を引張部材とするテンセグリティの剛性は人工筋の剛性に依存するため、人工筋の剛性変化はテンセグリティ構造全体の剛性変化を生じさせるために重要である。

本節では任意の長さまで伸長させられた状態において収縮可能、かつ剛性変化可能な人工筋の構成を提案する。本節で提案する人工筋の構成を図 5.8B に示す。ゴムチューブとそれを覆うスリーブから構成される通常のマッキベン型人工筋に対して一本の紐を追加した構成を有する。前節の人工筋構成との違いは追加する紐における弾性部分が 2 種類の弾性部材からなる点である。追加する紐は、ばね定数 k_1 のゴム、ばね定数 k_2 のゴム紐、そして弾性を有さない紐の 3 つの要素からなる。ゴムのばね定数 k_1 はゴム紐のばね定数 k_2 に対して非常に大きいものとする。また、ばね定数 k_1 のゴムは 6 倍程度の長さまで伸長可能で、ばね定数 k_2 のゴム紐は繊維によっておおわれており、2.5 倍程度まで伸長可能である。そして、これらのゴムは伸ばし切るとそれ以上伸ばすことができなくなる。本章では k_1 のゴムをゴム 1、 k_2 のゴムをゴム 2 と呼ぶことにする。ゴム 1、ゴム 2、inextensible thread はこの順で直列に連結されており、マッキベン型人工筋のゴムチューブとスリーブの間に挿入され、ゴムの端点が人工筋の端点に固定される。

二種類のゴムを用いた紐を外力によって伸ばすとき、ばね定数の小さなゴム 2 が先に伸びきり、その後、ゴム 1 が伸び始める。伸びきったゴム紐はそれ以上伸ばすことができなくなり、弾性を有さない紐のようにふるまう。スリーブのが掴む紐の部分が伸びない紐または伸び切ったゴム紐であれば、人工筋に空圧を印加した際に、人工筋は収縮し、剛性を高くすることが可能である（図 5.8B）。

5.3.1 人工筋の設計

任意の伸長長さにおいて人工筋の剛性変化を可能とするためには、人工筋をどの状態まで伸ばした際にもスリーブが掴む紐部分が伸びない紐、または伸びきった紐となるように各パラメータを決定する必要がある。ゴム 2 が伸び切る外力を F_2 とし、このときのひずみ率を $\varepsilon_{\max,2}$ とする

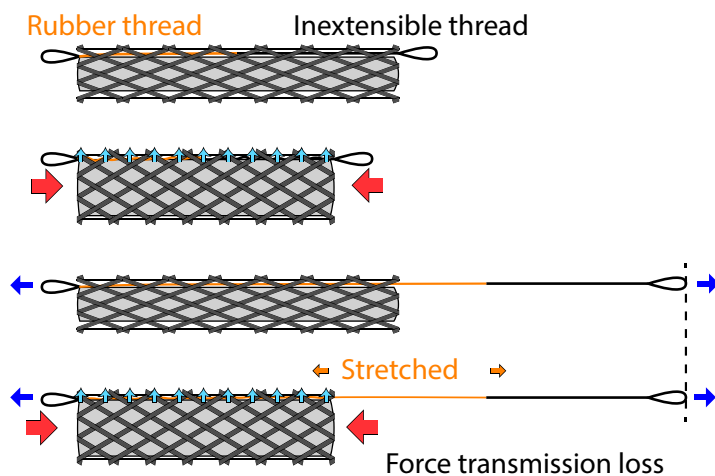
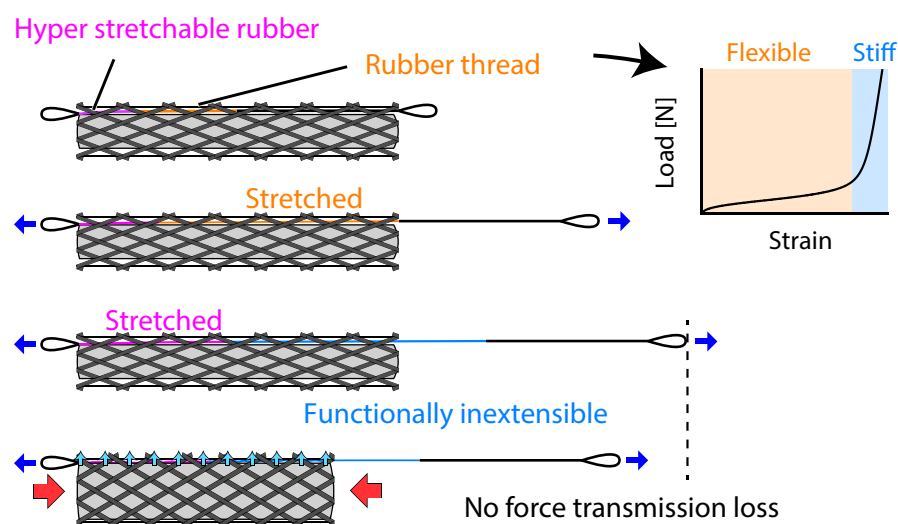
A Stretchable McKibben muscle**B Lossless stretchable McKibben muscle**

Fig. 5.8: (A) Single rubber configuration: Force transmission fails when the cord exits the sleeve. (B) Dual rubber configuration: The artificial muscle achieves contraction proportional to the sleeve's contraction ratio at any length.

と、次の関係が成り立つ。

$$F_2 = f_2(\epsilon_{\max,2}) \quad (5.3.1)$$

ただし、関数 f_2 はひずみに対するゴム 2 の荷重である。また、ゴム紐が伸びきる長さはゴム紐の荷重変位線図において、線形部分から傾きが上昇する点である。外力が F_2 以下の場合には、ゴム 2 が伸びきっていないため、スリーブはゴム 2 ではなく、伸びない紐部分を掴む必要がある。そのため、力 F_2 がかったときにゴム紐がスリーブ内にある必要がある。この条件を数式を用いて

表すと次のようになる。

$$(1 + f_1^{-1}(F_2))\ell_{\text{rubber1}} + (1 + \varepsilon_{\text{max},2})\ell_{\text{rubber2}} < \ell_{\text{sleeve}} \quad (5.3.2)$$

ただし、 ℓ_{sleeve} はスリーブの長さ、 $\ell_{\text{rubber,1}}, \ell_{\text{rubber,2}}$ は 2 種類のゴム紐の初期長さ、関数 f_1 はゴム 1 のひずみに対する荷重である。式 (5.3.2) を満たすとき、任意の長さにおいて空圧を入れた際に、力を伝達させて収縮させることができる。

本人工筋を設計する際に重要な 2 つ目の要素は人工筋の最大の伸び率である。ゴム 2 の最大ひずみ率と同様に、ゴム 1 の最大ひずみ率を $\varepsilon_{\text{max},1}$ 、人工筋の最大ひずみ率を $\varepsilon_{\text{max,muscle}}$ としたとき、次の関係が成り立つ。

$$\varepsilon_{\text{max,muscle}}\ell_{\text{muscle}} = \varepsilon_{\text{max},1}\ell_{\text{rubber1}} + \varepsilon_{\text{max},2}\ell_{\text{rubber2}} \quad (5.3.3)$$

式 (5.3.3) から計算される人工筋の伸び長さがロボットの設計において必要となる人工筋の伸び長さを超えるように $\ell_{\text{rubber1}}, \ell_{\text{rubber2}}$ の長さを決定すればよい。

そして、人工筋を設計する際に考えるべき 3 つ目の要素として、人工筋にかかる荷重を各材料が支持することができるかという点がある。人工筋が伸びない紐を掴んで収縮する際には、伸びない紐が人工筋の荷重を支持できるかを考える必要がある。人工筋が伸ばされ、ゴム 2 を掴んで収縮する際には、伸びない紐とゴム 2 が人工筋の荷重を支持することができるかを考える必要がある。これらのひもの破断強度以上の荷重が人工筋にかからないようにロボットを設計するべきである。

上記の三点を考慮して人工筋の各パラメータを決定する。本研究における各パラメータの決定方法を以下に示す。まず、ゴム 2 はゴム 1 に対して非常に剛性が低くなくてはならない一方、荷重を支えることができる必要がある。そこで、ゴム 1 には大きな最大ひずみを有するが、ある程度硬い外径 3 mm、内径 1.8 mm の天然ゴムを 2 本用い、ゴム 2 には剛性が非常に低いが、繊維に覆われていることで荷重を支持することが可能な径 1 mm の天然ゴムを 4 本用いることとした。荷重を繊維が受けることができ、径 1 mm の天然ゴムは 1 本で 25 N 程度まで支持可能である。4 本用いることで 100 N 程度の支持が可能であると考えられる。ゴム 2 が伸びきるのに必要な力 F_2 は 2.0 N であり、最大ひずみ率 $\varepsilon_{\text{max},2}$ は 1.4 であった。このとき、ゴム 1 のひずみ $f_1^{-1}(F_2)$ は 0.5 となる。多様な変形を行うテンセグリティのための人工筋には、 $\varepsilon_{\text{max,muscle}}$ 2.2 倍の長さ程度までの伸長特性が必要となる。ゴム 1 の最大伸長率 $\varepsilon_{\text{max},1}$ は 4.5 程度である。そして、スリーブの長さ ℓ_{muscle} は 200 mm とした。

以上の変数を式 (5.3.2), (5.3.3) に代入し、連立方程式を解くことで、 $\ell_{\text{rubber1}}, \ell_{\text{rubber2}}$ の満たすべき範囲が得られる。これらを満たすように本研究ではゴム 1 の長さを 35 mm、ゴム 2 の長さを 60 mm とした。

ここで、5.2 節における人工筋構成 (図 5.10A 中央) での人工筋の最大伸長率を考える。任意の長さで収縮可能とするには、ゴム紐が常にスリーブ内に存在する必要がある。4.5 倍の最大ひずみを有するゴムを用いた場合、伸びきった状態においてもゴムがスリーブ内にとどまる必要がある。このため、ゴムの自然長は 35 mm 程度にしておく必要がある。伸びない紐の長さを 165 mm としたとき、ゴム紐が最大の長さまで伸ばされた際の人工筋の長さは 360 mm となる。よって人工

筋の最大ひずみは 1.8 程度となり、本章で設計した人工筋のような 2.2 倍の伸長を実現することはできない。この考察により、本研究で提案する 2 種類のゴム紐からなる紐を挿入した受動的伸長性を有する人工筋の有用性を確認することが可能である。

5.3.2 人工筋の製作方法

人工筋の製作方法を記す。ゴム 1 を図 5.9A.i に示す。外径 3.2 mm、内径 1.8 mm の天然ゴム (KOKUGO Co., Ltd) を用いた。まず、輪の部分が 37 mm となるように天然ゴムチューブをより糸により結び、固定した。37 mm としておくことで最終的に利用可能なゴム 1 の長さは 35 mm となる。次に、図 5.9A.ii に示すように、ゴム 1 の輪と、ゴム 2 の輪がつながるようにゴム 2 を回しかけた。この時、ゴム紐が 115 mm となるようにすることで後に 60 mm となる。そして、伸びない紐としてマイクロナイロンコード (Atwood Rope MFG 社) を用いた。前節における力学モデルから、スリーブとゴムチューブと伸びない紐における摩擦力が本人工筋のグリップ力に大きな影響を与えることが示されているため、スリーブとゴムチューブとの間の摩擦力が大きな糸を用いた。図 5.9A.iv に示すように、マイクロナイロンコードの長さは 115 mm となるように結び目を作った。マイクロナイロンコードとゴム紐はより糸で結び、接着剤 (LOCTITE 401) をたらすことで接着した。この結び目は可能な限り小さくすることが望ましい。そして、天然ゴムチューブとゴム 2 を結合する。図 5.9A.vii に示すように、ゴム 2 の結び目が天然ゴムにより隠されるよう接着剤で固定した。これは結び目が大きくなり、スリーブ、ゴムチューブとの摩擦が大きくなることを防ぐためである。また、接着剤をつける際は、紐にのみ塗布し、天然ゴムには触れないようにした。接着剤が天然ゴムに付着することで耐久性が著しく低下してしまう。

内部のゴムチューブについては外径 8.4 mm、内径 6 mm の天然ゴムチューブを用いた。長さは 230 mm とした。そして、片側に外径 8 mm、長さ 15 mm のプラスチックのロッドをを挿入し、LOCTITE 401 により固定した。通常の人工筋と異なり、紐をスリーブの外に出す必要があり、内部のゴムチューブがスリーブから飛び出し、割れてしまう可能性がある。ゴムチューブが飛び出すことを防ぐため、図 5.9B.iv に示すように、先端付近はゴムチューブをひもで結び、膨らまないようにした。さらに、上から接着剤で固定した。

スリーブの長さは 250 mm とした。先端は接着剤を用いて固定した。さらに、図 5.9C.iv に示すように、スリーブを折り返し、3D プリント部品により固定することでスリーブ先端を強化した。スリーブの先端では紐がすれるために、このように強化する必要がある。以上の紐、ゴムチューブ、スリーブをカシメを用いて組み合わせることで人工筋を製作することが可能である (図 5.9D)。

5.3.3 人工筋の特性

製作した人工筋を図 5.10B に示す。図 5.10B.i に示すように人工筋を伸長させていない状態から空圧を印加することで人工筋は収縮可能である。図 5.10B.ii に示すように、人工筋を 30% 程度伸長させた場合、空圧の印加によってゴムチューブとスリーブは伸びない紐を掴み人工筋は収縮する。さらに、図 5.10B.iii に示すように人工筋を 60% 以上伸長させた場合、空圧を印加するこ

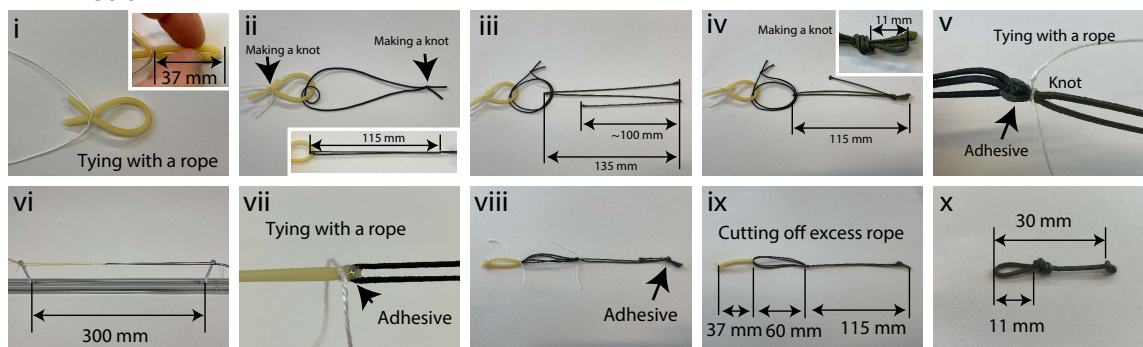
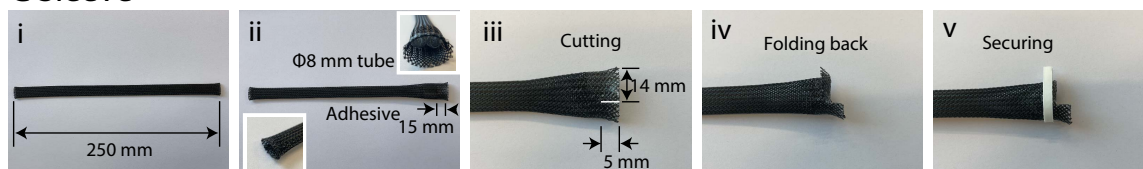
A Thread**B Rubber tube****C Sleeve****D Assembling**

Fig. 5.9: Fabrication method of lossless stretchable McKibben muscle. (A) Fabrication method of inserted thread. (B) Fabrication method of rubber tube. (C) Fabrication method of sleeve. (D) Assembling of artificial muscle.

とでゴムチューブとスリーブはゴム 2 を掴む。この状態において、ゴム 2 はそれ以上の伸展が困難となっている。このため、ゴム 2 は伸びない紐のように振る舞い、人工筋を駆動することで力の伝達が可能であり、人工筋全体の長さはスリーブの収縮分だけ短くなる。

測定した人工筋の荷重特性を図 5.10C,D に示す。図 5.10C は人工筋の長さに対する荷重を示している。測定では、INSTRON 社の引張試験機 (Instron5965, INSTRON 社) を用いた。人工筋の初期長さにおいて空圧を印加し、空圧を一定に保ったまま、人工筋の端点同士の距離を短くしていき、荷重が 0 N となった点で、人工筋の端点同士の距離を長くしていき、初期状態まで戻した。人工筋の端点同士の距離を 1 mm/s で変化させていった。受動的伸長性を有する人工筋に空圧を印加した際には、スリーブと挿入した紐の間で 2 から 3% 程度の滑りが生じた。また、紐の挿入によって少しのスリーブの収縮率の損失が生じ、通常のマッキベン型人工筋に比べて 5% 程

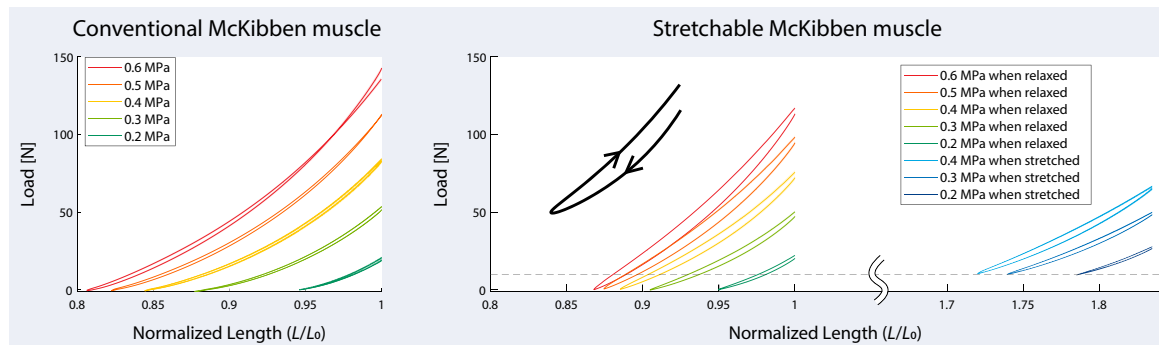
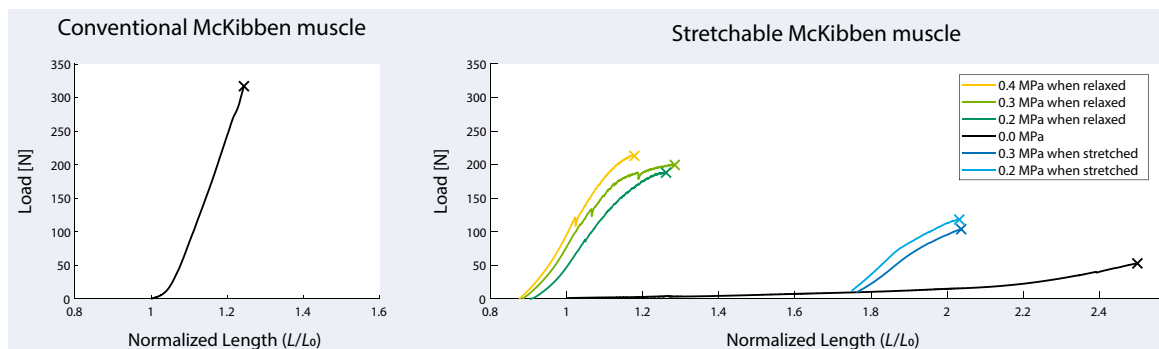
A Activation performance of stretchable muscle**B** Contractile performance of muscles**C** Passive stretchability of muscles

Fig. 5.10: (A) Activation performance of lossless stretchable McKibben muscle. (B) Contractile performance of conventional McKibben muscle and lossless stretchable McKibben muscle. (C) Passive stretchability of conventional McKibben muscle and lossless stretchable McKibben muscle.

度収縮率が小さくなった。駆動時には滑りが生じるが、一度紐を掴んだのちは、100 N 以上もの力を発生させることができていることが図 5.10C 右図から確認できる。また、受動的伸長性を有する人工筋では、伸ばされた状態における収縮特性を測定した。図 3.15 に示すテンセグリティ内の人工筋の長さまで引き延ばしたのちに空圧を印加した。このとき、ゴム 2 はスリーブの外に出た状態となっており、空圧を印加することでスリーブは伸びきったゴム紐 2 を掴む。ゴム 2 は伸びきった状態となっており、人工筋のスリーブの収縮率が 0 となった点においても 10 N 程度の荷重が残った状態となっている。伸ばされた状態で 0.5 MPa 以上の空圧を印加した際、ゴム 2 が破断してしまったため、0.4 MPa までのデータを示している。これらのデータは 5 回のデータの

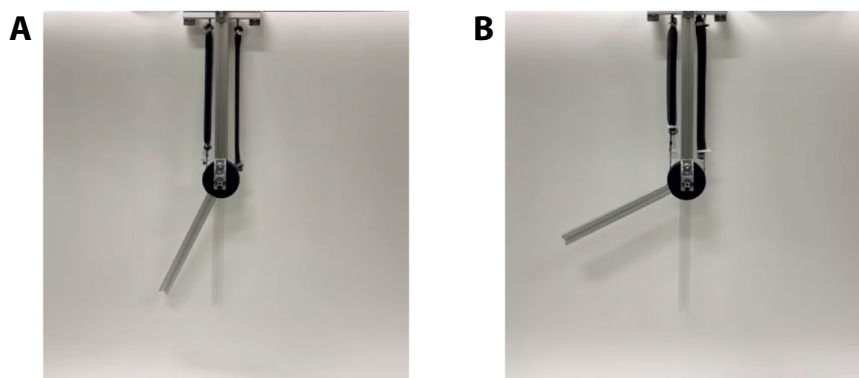


Fig. 5.11: Motion of a robotic arm using antagonistic actuation. (A) Case using standard artificial muscles. (B) Case using stretchable artificial muscles.

平均値と標準偏差を示している。

図 5.10D には破壊するまでの引張試験の結果を示している。通常の人工筋においては、空圧を印加していない状態での引張試験の結果を示す。引張試験の結果、300 N 程度の荷重を加えた際にホースクランプ部分の接合がずれることで破損した。受動的伸長性を有する人工筋においては、空圧を印加していない状態、初期長さにおいて空圧を印加した状態、伸長させたときに空圧を印加した状態、の 3 つの状態において引張試験を行った。空圧を印加して収縮しきった状態から引張を行ったときの荷重を示す。1 mm/s で引き延ばしていった。空圧を印加していない状態では 2.5 倍程度の伸長が実現できており、通常の人工筋に比して、剛性が非常に低く、伸びやすいことが確認できる。

初期長さにおいて空圧を印加した状態から引張試験を行ったとき、空圧を印加していないときの人工筋の初期長さを超えたあたりから、スリーブにグリップされた紐が滑り始め、最終的には伸びない紐とゴム 2 の接続部またはゴム 2 が破損した。伸ばされた状態で空圧を印加された人工筋の引張試験では、ゴム 2 部分の破断強度に達した際に、破断した。空圧を印加していない際の荷重特性と空圧を印加した際の荷重特性を比較することで収縮、剛性変化を行えていることが確認できる。

5.4 拮抗駆動型ロボットアームへの適用

受動的伸長可能な人工筋を用いて、ロボットアームへの適用を行った。ここでは、5.2 節に示す 1 種類のゴム紐から成る人工筋を用いた。ロボットアームはベアリングとアルミフレーム、3D プリント部品を用いて製作した。プーリの直径は 55 mm とした。プーリの両側に人工筋を取り付け、片側の人工筋を駆動することによってロボットアームの動作を検証した。この様子を図 5.11 に示す。どちらの場合も 5 N 程度のプリテンションをかけて人工筋を取り付けた。図 5.11A に通常の人工筋 2 本を用いたものであり、図 5.11B は受動的伸長性を有する人工筋 2 本を用いたものである。通常の人工筋では、右側の人工筋が伸び切り、ロボットの駆動範囲が減少している様子

が確認された。このときのロボットアームの回転角度は 25 deg 程度であった。一方で、受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合には、スリーブは引き延ばされることがないため、駆動した人工筋が収縮しきり、ロボットアームの駆動範囲が減少されていないことが確認できた。この時のロボットアームの回転角度は 63 deg 程度であった。よって動作範囲は 2.5 倍に上昇したことがわかる。

5.5 まとめ

本章では生体とマッキベン型人工筋の大きな違いの一つであった、マッキベン型人工筋における外力による受動的伸長性の実現について述べた。従来のマッキベン型人工筋のスリーブとゴムチューブの間に伸びる紐と伸びない紐から成る 1 本の紐を挿入することのみにより、非加圧時に受動的伸長性を有し、加圧時に従来のマッキベン型人工筋と同様に収縮することが可能であることを示した。

さらに、挿入する紐として剛性の異なる 2 種類のゴム紐と伸びない紐を連結させた際には、任意の長さからスリーブの収縮長さ分だけ収縮することのできる人工筋を実現できることを示した。製作した人工筋は 0.5 MPa の空圧印加によって 13% 程度収縮し、非印加には 2.2 倍の受動的伸長性を有することを示した。また、0.5 MPa の空圧を印加した際、最大で 100 N 程度の収縮力を発生させることが可能で、その場合にもスリーブとゴムチューブの間に働く紐への摩擦力によって紐がずれないことを確認した。

受動的伸長性を有する人工筋を拮抗駆動によるロボットアームに適用することによって、従来のマッキベン型人工筋を用いた場合よりもロボットアームの駆動範囲が 2.5 倍に大きくなることを示すことができた。

この受動的伸長性を有する人工筋を用いることによってテンセグリティ内の三角形の扁平化、また三角形の受動的な広がりを実現させることが可能である。このため、細径人工筋による三角形の扁平化の場合と同様に、第 3 章で示したようなテンセグリティの大きな伸縮変形を実現できると考えられる。

繰り返し駆動に関する耐久性に関しては、挿入する紐のつなぎ目が擦れることによって破損することを明らかにした。機械的な安定性の高いゴム製のゴムチューブを用いる、自己修復作用を有するゴムチューブを用いる等の手法により、今後耐久性を向上する必要がある。

第 6 章

受動的伸長性を持つテンセグリティモジュールの大変形

本章では第 5 章で開発した受動的伸長性を有する人工筋を用いてテンセグリティ構造を大変形させる手法について述べる。受動的伸長性を有する人工筋を用いることで三角形の扁平化、受動的な広がり の許容を実現させることが可能である。この手法を用いることで第 3 章で示した三角形の扁平化によるテンセグリティの大変形を生じさせられることを示す。さらに受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合、空圧シリンダとの組み合わせによる拡大変形を伴い、剛性変化可能なテンセグリティを実現できる。

第 3 章で示したように細径人工筋を用いることでソフトテンセグリティロボットの先行研究と比べて、大きな変形を実現させることを示した。しかし、細径人工筋を用いた場合、伸縮、曲げ、ねじりのようにある一方向への変形は可能であるが、構造全体を拡大するような変形を実現させることは困難である。そこで、テンセグリティの引張部材として受動的伸長性を有する人工筋を、圧縮部材として伸縮可能なストラットを用いることを考えた。一般的に、テンセグリティの大きさはストラットの長さにより定まる。このため、ストラットを伸展させることにより、テンセグリティの拡大変形を実現させることが可能である。第 5 章で述べた人工筋は受動的な伸長を許容するため、テンセグリティの引張部材として受動的伸長性を有する人工筋、圧縮部材として空圧シリンダを用いたとき、空圧シリンダによって構造を変形させることが可能である。

そこで本章ではまず、通常的人工筋を用いた場合と受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合におけるテンセグリティの柔軟性について比較し、細径人工筋を用いた場合と同様に三角形の扁平化による構造の大変形を実現できることを示す。次に、空圧シリンダの伸展による拡大変形が可能なテンセグリティの設計について述べる。空圧シリンダの伸展による構造変形後、5.3 で述べた任意の長さから収縮可能な人工筋を駆動することによってテンセグリティの剛性変化を行うことができることを示す。そして、30 個のアクチュエータから成るテンセグリティを駆動するための、遺伝的アルゴリズムを用いた最適化手法の構築について述べる。これにより、拡大変形、剛性変化が可能なテンセグリティを適切に変形させることが可能となり、テンセグリティのロボットへの応用の幅を広げることが可能となる。

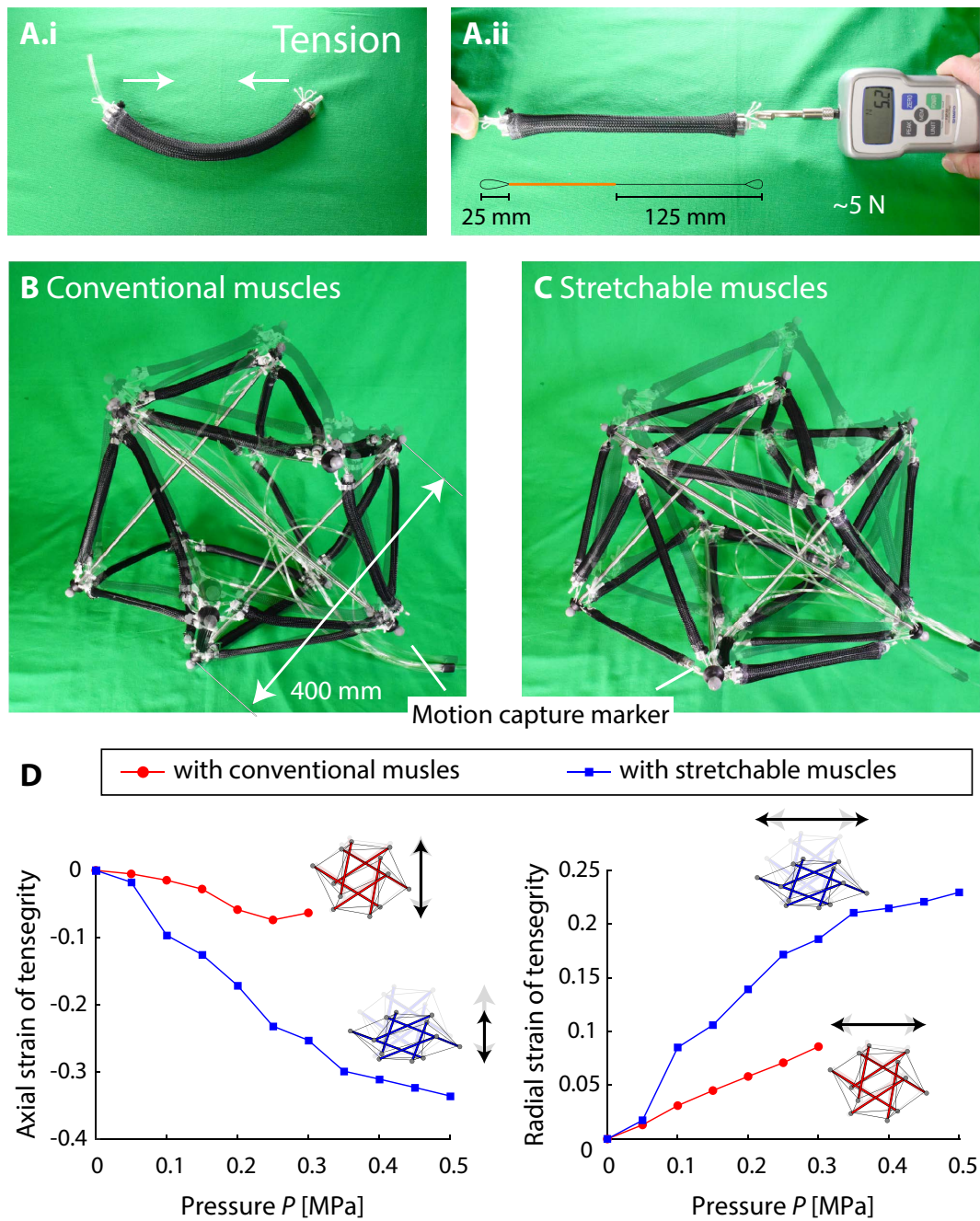


Fig. 6.1: (A) Stretchable artificial muscle generating 5 N tension at initial length. (B), (C) Tensegrity deformation using conventional (B) and stretchable artificial muscles (C). (D) Axial and radial strain versus applied pressure, where strain represents the length change indicated by arrows. Tensegrity visualization from motion capture data (red: with conventional McKibben muscles, blue: with stretchable muscles).

6.1 受動的伸長性を有する人工筋を用いた三角形の扁平化による変形

ここでは、受動的伸長性を有する人工筋を用いた三角形の扁平化により、テンセグリティの大変形が実現可能であることを収縮変形を用いて示す。テンセグリティの引張部材として、通常の外力によって伸びにくい人工筋と第 5 章で提案した受動的伸長性を有する人工筋を製作し、それらの収縮変形の比較を行う。これにより、人工筋に受動的伸長性を与えることで三角形の扁平化による構造の大変形が実現されることを示す。

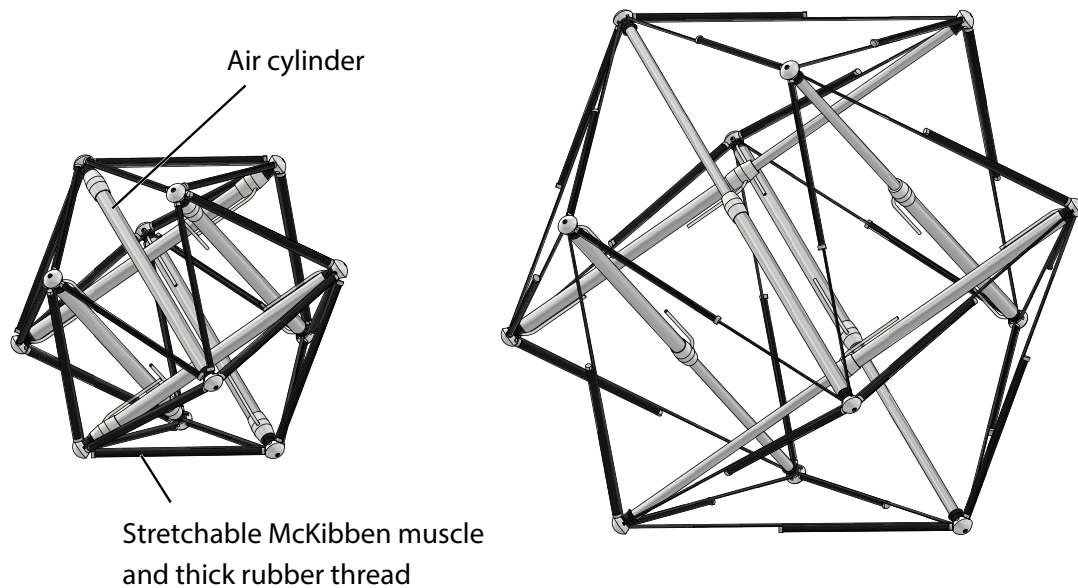
通常の人工筋においてもスリーブの長さが 200 mm、取り付け部間 230 mm の人工筋を用いてテンセグリティ構造を製作した (図 6.1B)。ただし、通常の人工筋を用いた場合、張力を発生させるために少し延ばした状態で固定した。人工筋が外力によって伸びないため、受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合に比べて、硬い構造となる。また、図 6.1C に示すように 5.2 節に示す伸長可能な人工筋 24 本から成るテンセグリティを製作した。

構造の変形の仕方の違いを検証するために第 3 章における収縮変形をにより変形の大きさを比較する。モーションキャプチャのマーカを 12 個の頂点に固定しモーションキャプチャを用いて構造の変形を測定した。第 3 章における収縮変形を生じさせる際に扁平させられる 6 個の三角形を扁平させるための 12 本の人工筋に空圧を印加した場合の軸方向のひずみと径方向のひずみを図 6.1D に示す。通常の人工筋を用いた場合には人工筋が拮抗することで大きく収縮することができず、張力が非常に大きくなり、0.35 MPa を加えた時には接続部分が破壊された。このため、通常の人工筋を用いたものについては 0.3 MPa までのデータを示している。0.3 MPa における変形を比較したとき、提案手法を用いた場合、通常の人工筋を用いた場合に比べて軸方向に 4.0 倍、径方向に 2.2 倍といった大きなひずみを実現することができた。図 6.1D からわかる通り、本稿で提案した人工筋を用いた場合には軸方向、径方向共に変位が大きくなった。これにより、人工筋に受動的伸長性を与えることで、テンセグリティの大変形を実現できることが示された。

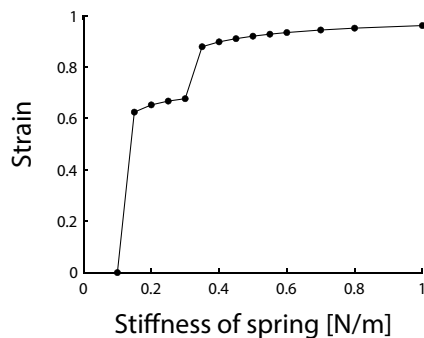
6.2 空圧シリンダと受動的伸長性を有する人工筋によるテンセグリティの設計

本節では、引張部材として空圧人工筋、圧縮部材として空圧シリンダを有するテンセグリティを取り扱う。第 5 章で述べた受動的伸長性を有する人工筋をテンセグリティの引張部材として受動的伸長性を有する人工筋、圧縮部材として空圧シリンダを用いたとき、空圧シリンダによって拡大変形を実現させることが可能である。従来のマッキベン型人工筋は空圧の印加によって 20% 程度の収縮が可能であるが、外力による受動的な伸長性が小さい。このため、テンセグリティを構成する全ての引張部材として受動的伸長性が小さい従来のマッキベン型人工筋を用いた場合 [50] には、構造全体としての柔軟性は小さく、構造の変形量を大きくすることは困難である。

A Large deformable and Variable Stiffness Tensegrity



B Self-weight effect



C Rubber thread

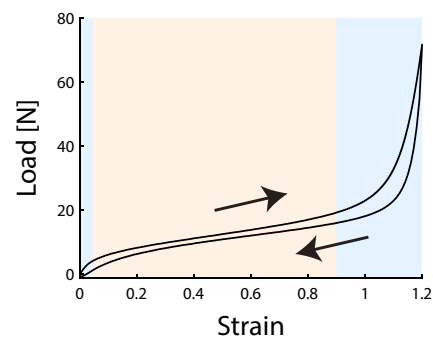


Fig. 6.2: (A) Tensegrity capable of large deformation and variable stiffness, composed of six pneumatic cylinders and 24 stretchable artificial muscles. (B) Strain of the tensegrity structure versus the stiffness of the tension members. (C) Load on the rubber threads constituting the tensegrity.

提案するテンセグリティ構造を図 6.2A に示す。圧縮を受ける部材として空圧シリンダを用い、引張を受ける部材として受動的伸長性を有する人工筋と荷重を受けるための太いゴム紐を並列に配置した構成を用いている。図 5.10D に示すように、空圧を印加していない人工筋は剛性が小さいため、太いゴム紐を用いることによってテンセグリティ形状を保たせることとした。

図 6.2A に示すように、大きさの異なる 2 つの状態においてテンセグリティ構造が形状を保つ必要がある。形状を保つための復元力は引張部材の張力である。この復元力がテンセグリティの形

状を維持できるかを考えてゴム紐の自然長を設計する必要がある。

ここで考えるべき点がテンセグリティの自重による影響である。自重により大きく変形させられない、また、外力によって変形させられた際に初期形状に戻すことのできる復元力が必要である。本研究においてテンセグリティにバッテリーや電磁弁を含む駆動システムを搭載する場合、最大で 2.5 kg 程度になると見積もられる。そこで、この自重を支えられるように設計する。引張部材の剛性が小さい場合、テンセグリティは自重によって大きくつぶされてしまう。しかし逆に、剛性を大きくさせすぎた場合には、空圧シリンダを伸展させるために必要な力が大きくなってしまう。空圧シリンダを伸展させる力は印加する圧力と内径に依存する。通常空圧システムにおいて使用可能な空圧は 0.7 MPa 程度までであるため、それをもとに内径は計算される。空圧シリンダが出力可能な力にも制限があるため、可能な限り、張力部材の剛性は小さいほうが良い。これらを考慮すると、テンセグリティの自重を支えるのに必要最低限の剛性を与えるのが望ましい。

6.2.1 静力学シミュレーションを用いた設計

本研究では Rhinoceros の Grasshopper を用いてシミュレーションを行った。Grasshopper は、3DCAD のソフトウェア Rhinoceros 上で動作するビジュアルプログラミング言語である。部材の配置や力のつり合い計算といった複雑な幾何学的条件を自動化・最適化に適している。Grasshopper を用いて人工筋と空圧シリンダ、合計 30 個のアクチュエータの力のつり合いを数値的に解くことで変形のシミュレーションを行うことが可能である。Six-bar tensegrity の初期姿勢をもとに静力学シミュレーションを行った。テンセグリティを構成する空圧シリンダの収縮時の長さを 400 mm、伸展時の長さを 720 mm とした。

まずはじめに、引張部材にどの程度の剛性を与えることで自重を支えられるかについて議論する。ここでは引張部材を線形ばねと考え、引張部材の剛性が構造変形に与える影響を考える。自重による構造変形の静力学シミュレーションにおいては、テンセグリティの質量は頂点に存在すると考えることができる。そこで、テンセグリティの 12 個の頂点に z 軸負方向への一定荷重を与えることで自重を再現した。テンセグリティの質量が 2.5 kg であると考え、12 個の頂点には 2.0 N 程度の z 軸方向の力を与えればよいことになる。引張部材の剛性に対するテンセグリティの自重による変形の大きさを図 6.2B に示す。24 本の引張部材には全て同じ剛性を与えており、人工筋を駆動していない場合の自重のみによる変形を考慮している。自重の影響を考えない場合のテンセグリティの高さによって正規化した高さを示している。引張部材の剛性が 0.1 N/mm の場合には自重によって完全に扁平させられた変形となる。剛性が 0.3 N/mm の場合には 40% 程度変形させられる。図 6.2B から、自重を支えるためには、線形ばねの場合、0.4 N/mm 以上が必要となる。

しかし、0.4 N/mm 以上の剛性を有する線形ばねを用いた場合、空圧シリンダによる変形が困難となる。例えば、0.4 N/mm の剛性を有する引張部材を 245 mm から 440 mm まで変形させるとき（図 6.2A）、80 N 程度張力が増加する。このとき、空圧シリンダには 200 N 程度の伸展力を与えなくては、空圧シリンダを伸展させることができない。テンセグリティの引張部材として線形ばねを用いて構造を大変形をさせる場合には、変形の大きさに対して線形的に空圧シリンダ

に必要な力が大きくなってしまふ。このため、本研究で取り扱うような大変形を伴うテンセグリティの張力部材として線形ばねは適さない。

そこで、非線形のばねの利用を考える。ゴム紐の非線形性を図 6.2C に示す。図 6.2C に示すゴム紐では、自然長から少し延ばし始めた際には荷重変位線図における傾き、つまり剛性が大きい。5% 程度伸ばしたのちからは剛性が非常に小さくなる。さらに、伸ばしていくと剛性が再び大きくなる。このような非線形ばねを用いる場合、テンセグリティの自重を支えるためにはゴム紐のひずみが 0 に近く剛性が大きい部分を用いるとよい。ゴム紐は 5% 程度伸ばされると剛性が低くなり、空圧シリンダの伸展が容易になる。本研究では、自重を支えることができ、かつ、線形ばねを用いた場合に比べて空圧シリンダの伸展が容易に実現可能なこの特性を有するゴム紐をテンセグリティの引張部材として用いる。さらに、ゴム紐を伸ばして再び剛性が大きくなった領域を用いることでテンセグリティの剛性を高めることが可能で、テンセグリティの剛性変化に利用できる。

テンセグリティがつぶされた状態から初期姿勢へ変形可能であるかに重要なのはゴム紐の荷重変位線図に現れるヒステリシスの帰りの剛性である。本研究で用いる図 6.2C に示すゴム紐の特性は、ヒステリシスの帰りの剛性が 0.4 N/mm 程度となるように、本研究では径 3 mm のゴム紐と径 4 mm のゴム紐をそれぞれ 1 本ずつ組み合わせたゴム紐を用いた。このゴム紐を用いたテンセグリティにおいて、人工筋を駆動していない場合に空圧シリンダが 720 mm を伸展させるために必要な力は 120 N 程度であった。これをもとに空圧シリンダには 0.5 MPa を印加した際に 120 N を発生させられるようにシリンダ内径を 18 mm とした。

受動的伸長性を有する人工筋と太いゴム紐を並列に配置したアクチュエータは長さで荷重の間に強い非線形性を有する。また、人工筋は空圧を印加している場合と印加していない場合でばね特性が大きく異なる。これらの測定した力特性をもとにシミュレーション内の人工筋に非線形性を持たせた。シミュレーション内では二種類の非線形ばねを切り替えることで人工筋に空圧を印加しているか、印加していないかを再現した。空圧を印加していない場合には長さ 400 mm で、剛性の非常に高い線形ばねとして近似した。具体的には、空圧を印加していない場合には、長さ 229 mm までは 0 N/mm、229 mm から 472 mm までは 0.17 N/mm、472 mm 以上では 2.56 N/mm とし、空圧印加時には長さ 210 mm までは 0 N/mm、210 mm から 470 mm までは 3.38 N/mm、470 mm 以上では 5.77 N/mm とした。これらは第 5 章における人工筋の力に関する測定データと図 6.2C に示す太いゴム紐の力から計算した値である。空圧を印加した際の空圧シリンダは一定の力 (0.5 MPa の場合の伸展力 127 N) で伸展する部材として扱った。シミュレーションの結果としてシリンダの長さが 720 mm を超えた場合には、長さ 720 mm で剛性が非常に高い線形ばねとして近似して再びシミュレーションを行うことでシリンダの長さが 720 mm となるようにした。

空圧シリンダは外径 20 mm 内径 18 mm のアルミパイプと外径 16 mm 内径 14 mm のアルミパイプを用いて図 6.3 に示すように自作した。空圧を印加する部分に関しては 3D プリンタを用いて製作した。それぞれの部品を接着する際にはエポキシ接着剤を用いた。これにより空気の漏れを防ぎつつ接着することが可能である。伸展させていない状態では長さが 400 mm であり、空圧印加により 400 mm の 1.8 倍の 720 mm まで伸展する。製作した空圧シリンダの質量は 1 本

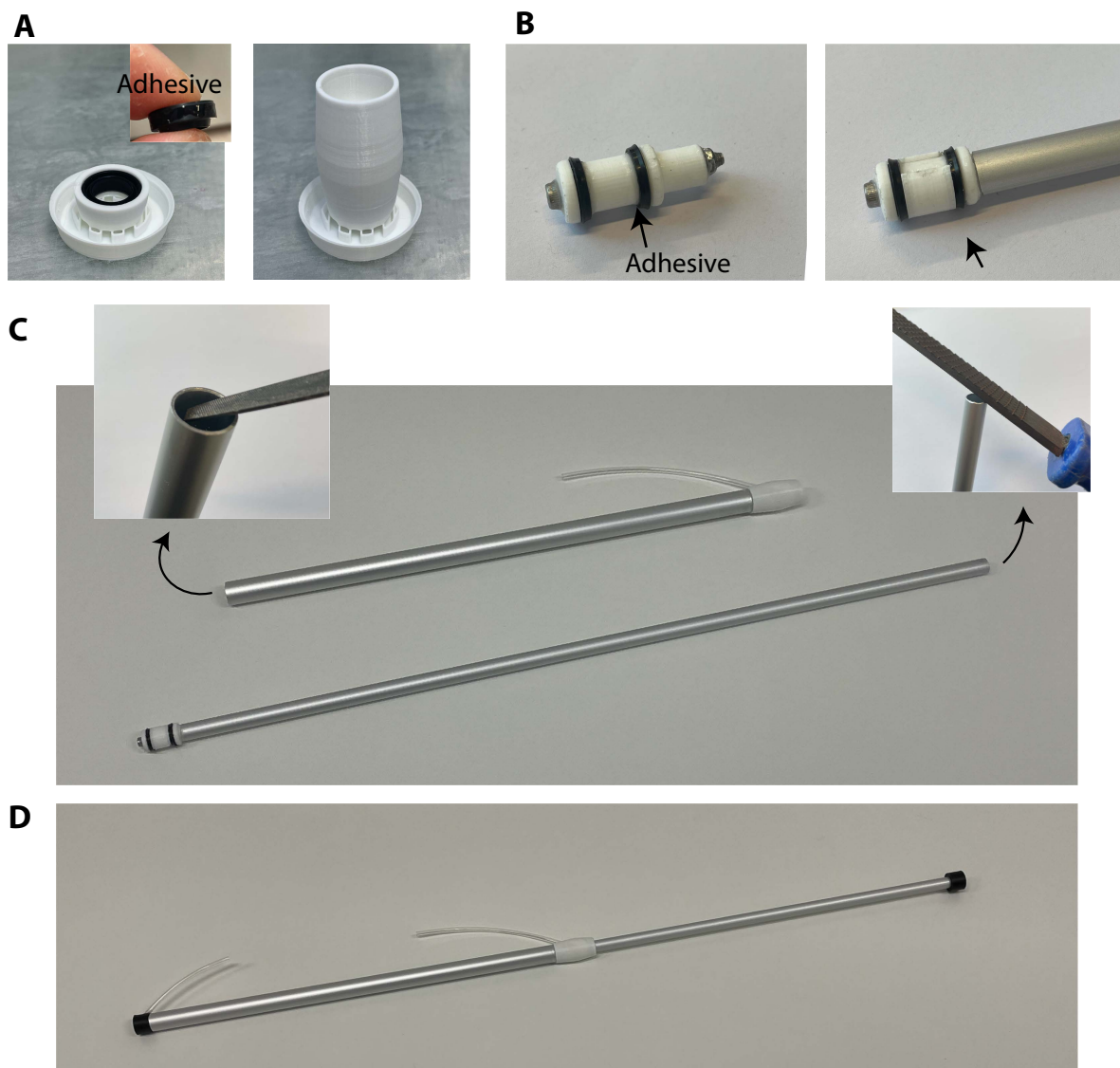


Fig. 6.3: Fabrication method of air cylinder. (A), (B) 3d printed component. (C) Inner tube and Outer tube. (D) Assembled air cylinder.

あたり 140 g であった。人工筋と空圧シリンダはワッシャーを用いてゴム紐の結び目を固定している。ワッシャーとねじにより力を受けることが可能となり、張力部材に 100 N 程度の荷重がかかっても破損せずに力を支えることが可能となる。

テンセグリティの自重を支えるために、空圧シリンダの長さが 400 mm であるときにゴム紐のひずみが 0 に近い部分が利用されるようにする。プリストレッチが小さすぎるとすぐにゴム紐がたるんでしまう。これらを考慮して、ゴム紐が 5% のプリストレッチを有するように自然長を 230 mm とした。

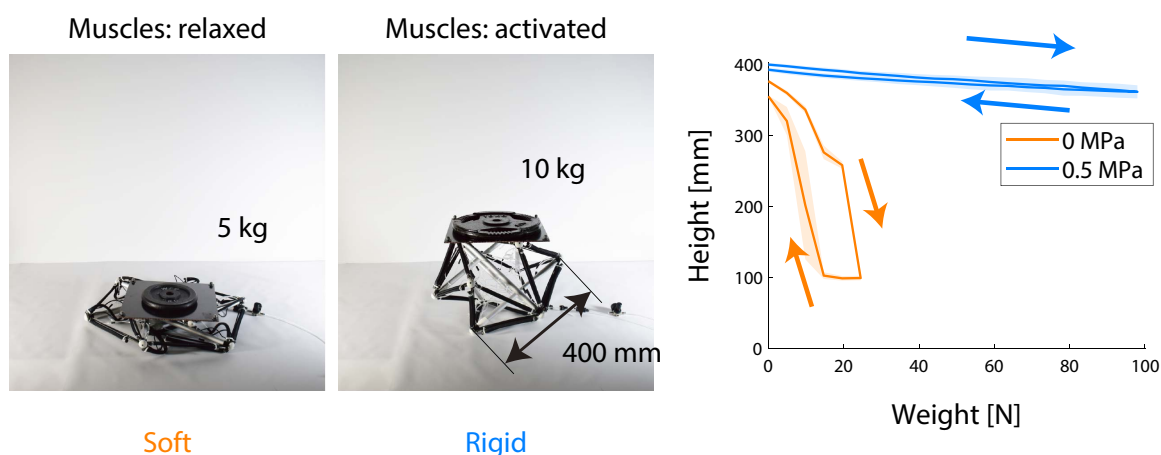
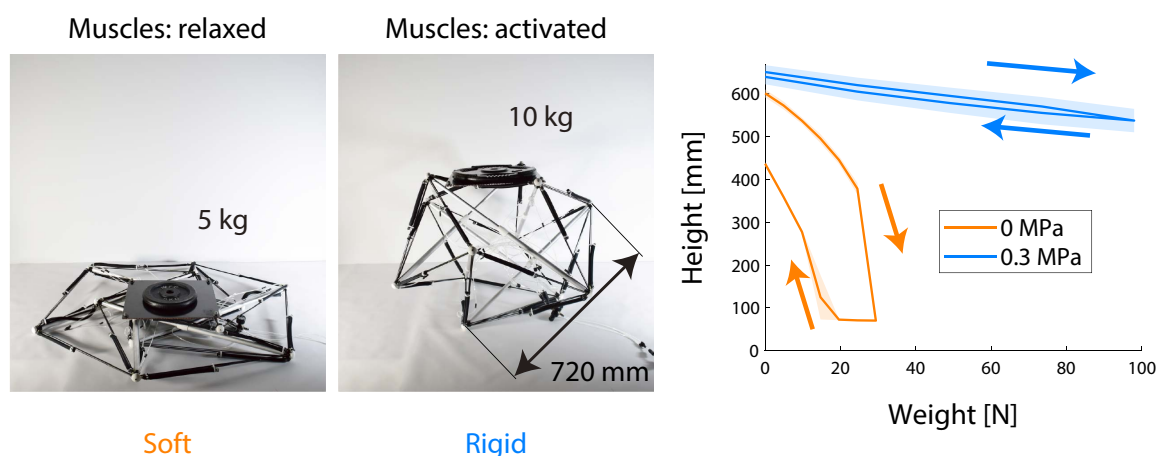
A Small state**B Large state**

Fig. 6.4: Stiffness change of the tensegrity structure. (A) State with the pneumatic cylinder contracted. (B) State with the pneumatic cylinder extended. Stiffness is increased by applying pneumatic pressure to all artificial muscles after extending the cylinder.

6.3 人工筋駆動によるテンセグリティの剛性変化

第 5 章で提案した人工筋は任意の長さにおいて駆動可能で、空圧を印加することで剛性を変化させることが可能である。空圧シリンダ、人工筋ともに駆動させずにテンセグリティが小さい状態にあるときには、柔軟な構造である。この状態から人工筋に空圧を印加することで構造の形状を保ったまま剛性を高めることが可能である。人工筋を駆動した場合と駆動していない場合のテンセグリティの柔軟性の比較を図 6.4A に示す。テンセグリティ構造の上におもりを載せたときのテンセグリティの高さを測定した。人工筋を駆動させていない状態では 25 N 加えた場合に完全に扁平させられた状態となった。完全に扁平させられた状態においても空圧シリンダに体積があ

るため、高さは 0 となっていない。人工筋に 0.5 MPa を印加した場合には、10 kg の重りを載せた状態、つまり 100 N 程度の負荷を与えても構造がつぶさされることはなかった。空圧を印加していない場合の構造のコンプライアンスは 0.24 N/mm、0.5 MPa を印加した場合の構造の剛性は 1.99 N/mm であった。これらの剛性は 0 N から 10 N の負荷をかけた時のグラフの傾きから計算した。人工筋を 0.5 MPa 印加することによって剛性が 8.3 倍に増加することが確認された。

空圧シリンダを展開して構造を大きくした状態においても人工筋を駆動させること剛性を高めることが可能である (図 6.4B)。ただし、この場合には人工筋内に挿入したゴム 2 がスリーブの外に出された状態となっている。このゴム 2 の破断強度は 100 N 程度であり、印加する空圧は 0.3 MPa とした。空圧を印加していない場合には 30 N の負荷を与えた際に完全に構造がつぶれた。0.3 MPa を印加した際には 100 N の負荷を与えた場合にも完全に構造がつぶれることはなかった。空圧を印加していない場合の構造の剛性は 0.15 N/mm、0.3 MPa を印加した場合の構造の剛性は 0.80 N/mm であった。これらの剛性は 0 N から 10 N の負荷をかけた時のグラフの傾きから計算した。人工筋を 0.3 MPa 印加することによって剛性が 5.3 倍に増加することが確認された。

任意の長さにおいて剛性変化が可能な人工筋を用いているため、空圧シリンダや複数の人工筋を駆動して構造を変形させたのちに駆動していない人工筋を駆動することによって構造の変形を大きく変えることなく剛性を高めることが可能である。

ここで、アクチュエータの空圧を排気する際には、人工筋の空圧を排気した後、空圧シリンダの空圧を排気する必要があることが実験により明らかとなった。これは、人工筋に空圧を印加した状態で、外力によって縮められた後に空圧を排気すると人工筋内に挿入した紐が初期位置へ戻らないことに起因する。人工筋内部の紐は結び目が大きくなっている。このため、人工筋が受動的に伸ばされた状態から初期長さに戻される場合に、紐同士の結び目がスリーブの先端に引っ掛かることがある。人工筋の空圧を印加した状態で、外力によって縮められた場合、紐が屈曲することによって結び目がスリーブに引っかかる確率が高くなってしまう。このため、テンセグリティの空圧を排気する場合、人工筋、空圧シリンダの順番で排気する必要がある。この点に関して、結び目がなくなるような人工筋構成を利用することは一つの解決策である。例えば、定荷重ワイヤ等の初期長さの数場合以上伸びる物を用いること紐同士の結び目をなくすることが可能であり、スリーブの先端で紐が引っ掛かる確率を大幅に下げることが可能となる。

6.4 遺伝的アルゴリズムを用いた駆動最適化

本テンセグリティは 6 本の空圧シリンダと 24 本の人工筋から構成されている。このテンセグリティの特性を理解するために、ある特定の変形を実現させるために駆動すべきアクチュエータの組み合わせを遺伝的アルゴリズムを用いて探索する。30 個のアクチュエータの駆動の組み合わせは 10 億通り以上存在し、すべての場合の変形について計算することは困難である。また、ON/OFF の 2 値によるアクチュエータの駆動方法を最適化する場合、勾配降下法は適さない。そこで、本研究では、複雑で広大な探索空間を持つ問題に対して有効である遺伝的アルゴリズムを用いる。Grasshopper 内のコンポーネントを用いることで遺伝的アルゴリズムを用いた設計パラ

A Search space

Combination of
activated Muscles a | 0 to $2^{24}-1$
Combination of
activated Cylinders b | 0 to 2^6-1

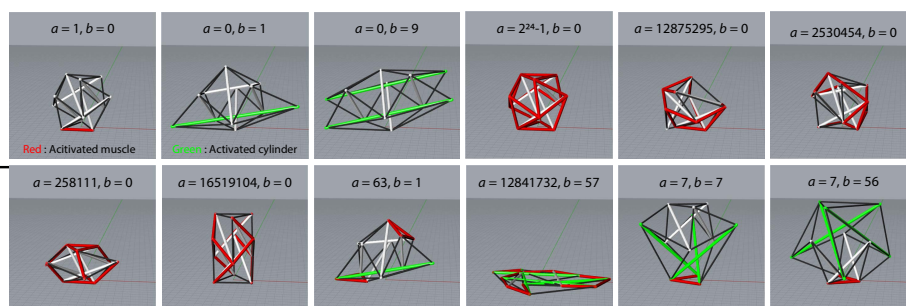
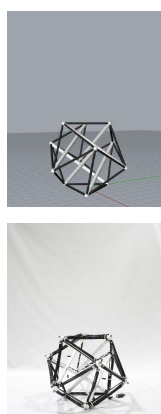
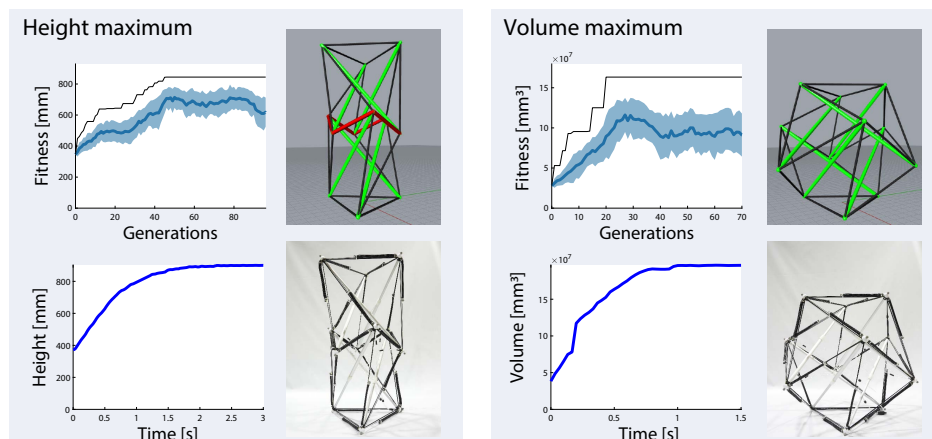
**B Initial state****C Evolutionary algorithm**

Fig. 6.5: Optimization of actuator combinations using an genetic algorithm. (A) Search space. (B) Initial state. (C) Optimization and experimental validation of actuator combinations maximizing height and volume.

メータの最適化を行うことが可能である。合計 30 個のアクチュエータの駆動方法は全部で 2^{30} 通りある。このうち、いくつかの例を図 6.5A に示す。ここで、駆動する人工筋の組み合わせを変数 a を用いて表しており、0 と 1 からなる 24 桁を 10 進数表記した値を有する。駆動する空圧シリンダの組み合わせは同様に変数 b を用いて表す。例えば、 $a = 1$ の場合、1 個目の人工筋のみを駆動させた状態を示しており、図 6.5A の左上の通りの変形が生じる。

30 個すべてのアクチュエータはそれぞれ駆動するかしないかの 2 通りの状態のどちらかであり、遺伝的アルゴリズムによる最適化の探索範囲は a が 0 から $2^{24} - 1$ 、 b が 0 から $2^6 - 1$ の状態である。ここでは、構造の高さの最大化、体積の最大化の 2 つの最適化例を示す。目的関数は高さ、体積である。遺伝的アルゴリズムにおける人口は 50 とした。50 世代最適解が変化しない場合には最適かシミュレーションをその時点で停止した。

テンセグリティの高さは上面の三角形の重心から底面の三角形の重心までの距離とした。高さを最大化した場合の駆動方法は図 6.5C 左に示す通りである。左上に示す図は目的関数値の推移を示しており、各世代の平均値と標準偏差、最適値を示している。高さの最大化の最適化では 46 世代目で解を得た。右上図には高さを最大化する駆動方法におけるシミュレーションにおける変形を、右下図には実際のテンセグリティの変形を示している。シミュレーションの結果と大差な

いことが確認できる。また、左下図には空圧を印加した際のテンセグリティの高さの時間応答を示している。

テンセグリティの体積はテンセグリティの 20 個の頂点から成る 20 面体の体積として計算した。体積の最大化においては 20 世代で解を得た。体積を最大とするには空圧シリンダのみを展開する場合となった。

遺伝的アルゴリズムを用いることで、高さ、体積だけでなく、ロボットとして用いるときに生じさせたい変形を生じさせるための最適なアクチュエータの駆動の組み合わせを探索することが可能である。

6.5 まとめ

本章では第 5 章で開発した受動的伸長性を有する人工筋を用いたテンセグリティの大変形実現手法について述べた。テンセグリティ内の三角形を扁平させるように変形させることによって第 3 章で示した大きな収縮変形を生じさせることのできる柔軟なテンセグリティを実現できることを示した。そして、受動的伸長性を有する人工筋を引張部材として用いることによって、圧縮部材として 1.8 倍の長さまで伸展する空圧シリンダの利用が可能であることを示した。空圧シリンダの伸展を用いることによって、人工筋のみによる大変形のみならず、テンセグリティの拡大変形を実現することができることを示した。また、受動的伸長性を有する人工筋は任意の長さから収縮可能であるため、構造変形後、構造の変形を大きく変えることなく、人工筋駆動により剛性を 5 倍以上高めることが可能であることを示した。さらに、本テンセグリティの駆動最適化のために遺伝的アルゴリズムによる最適化システムを構築した。

第 7 章

拡大変形を伴うソフトテンセグリティ ロボット

7.1 拡大変形を伴うテンセグリティのロボットへの適用

前章では受動的伸長性を有する人工筋を用いたテンセグリティの大変形について述べた。本章ではこれらのモジュールを組み合わせたテンセグリティロボットへの応用例を示す。

まず、受動的伸長性を有する人工筋を用いてテンセグリティを大変形させる場合の利点、欠点について述べる。テンセグリティのストラットとして伸展可能な空圧シリンダを用いることができるため、第 4 章で示した細径人工筋によるテンセグリティモジュールの伸縮、曲げ変形のような一方向への変形のみならず、全方向へさらに大きく広がる拡大変形を行うことが可能である点が利点である。逆に、異なる変形状態へ遷移させる際、一度外力のかからない初期状態を経由する必要があるといった欠点がある。これは人工筋の特性によるものである。第 5 章で提案した受動的伸長性を有する人工筋は任意の長さから収縮可能であるが、スリーブの収縮長さ分だけしか収縮させることができない。このため、空圧を印加する際の人工筋の長さが重要となる。ここで、図 7.1 に、テンセグリティ構造収縮時とテンセグリティ構造伸長時におけるある一本の人工筋を示す。テンセグリティ構造収縮時にはこの人工筋は伸ばされた状態である。テンセグリティ構造伸長時には初期長さから収縮させられた長さとなる。これを考慮すると、テンセグリティ構造の収縮変形から伸長変形に遷移させるためには、人工筋を一度初期長さに戻す必要があり、人工筋の空圧を全て排気して初期状態を経由する必要がある。この欠点により、例えば、第 4 章で示したテンセグリティアームのように能動的な力を発生させる必要があるアプリケーションには適さない。

本章では、拡大変形が有用であるロボットへの応用を示すことで受動的伸長性を有する人工筋を用いたテンセグリティの大変形手法の有用性を示す。拡大変形を伴うテンセグリティモジュールは小さな形態のモジュールとして移動可能であり、移動後の環境において空圧シリンダの伸展を伴う拡大変形を行うことで、周囲の環境や構造を支えるといったことが可能になると考えられる。

このような移動と拡大変形を組み合わせたテンセグリティモジュールの有用性を示すために、

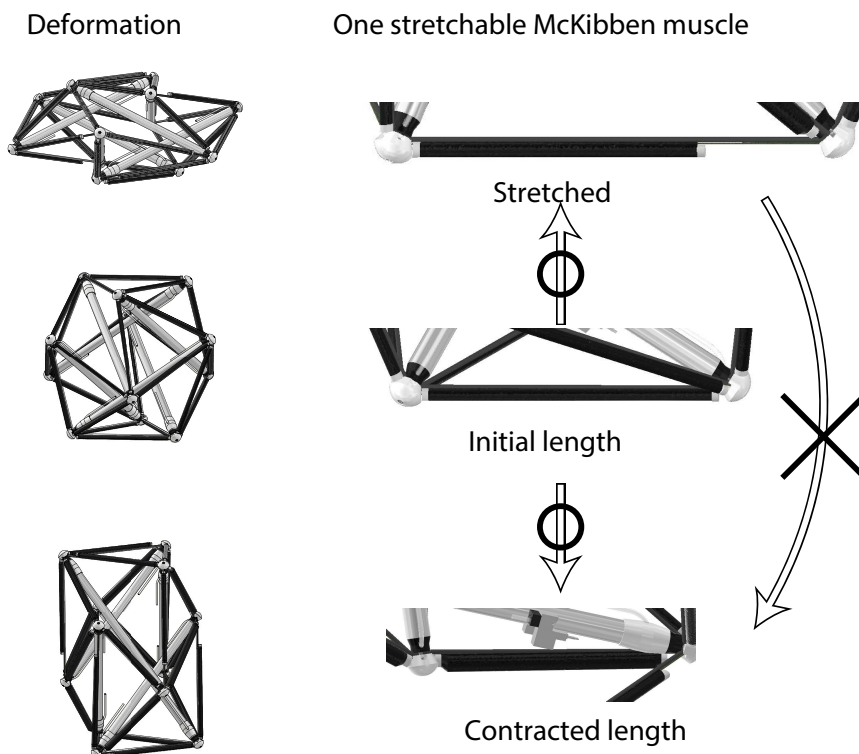


Fig. 7.1: Feasibility of transitions between tensegrity deformation modes based on the passive stretchability of artificial muscles.

転がりと拡大変形を行うソフトテンセグリティロボット、インチワーム機構による推進と拡大変形を行うソフトテンセグリティロボットの 2 つについて示す。転がりを行うソフトテンセグリティロボットでは、崩れかけた構造の下の方へ転がっていき、空圧シリンダの伸展による拡大変形を行うことにより、構造物を持ち上げて支えるという一連の動作を実現させる。インチワーム機構により移動するソフトテンセグリティロボットでは、複数のモジュールを組み合わせることで狭隘空間において推進力を発生させることで移動可能で、移動後に展開可能であることを示す。

そして、ロボットへの適用を行うことで得られた知見として、本研究における 2 つの三角形の扁平化手法によるテンセグリティの大変形のメリット、デメリットを比較してまとめる。

7.2 転がりと展開を行うソフトテンセグリティロボット

ここでは、崩れかけた構造を支持するためのテンセグリティロボットについて述べる。ロボットはまず、崩れかけた構造の下の方へロボットが転がっていく。そして、構造の下まで移動した際に、テンセグリティを展開させることで崩れかけた構造を支えることが可能となる。

このロボットの駆動には、転がり変形と展開変形が必要となる。これらの変形のための最適な駆動方法を遺伝的アルゴリズムを用いて最適化し、転がって展開するといった一連の動作を実現

させる。

遺伝的アルゴリズムを用いた変形の最適化

転がりを実現させるために、6.1 節に示す収縮変形を用いることによって人工筋の駆動を用いる。床と垂直でない軸方向に収縮を行うことによってテンセグリティ構造の重心を支持多角形からずらすことで転がりができると考えられた。しかし、簡易実験の結果、構造の重さの偏りから遷移できない面があった。このため、6.1 節に示す収縮変形をもとに、遺伝的アルゴリズムを用いて、最も転がりやすい駆動方法を探索する。

本ロボットでは、3 本の引張部材からなる面が常に床と接触するように転がりを行うように設計する。転がりを実現させるために重要な要素は重心の位置である。テンセグリティは 3 点で床と接しており、この支持三角形から重心を床に降ろした点までの距離が最も離れている場合、もっとも転がりやすいと考えられる。この距離を目的関数として、駆動する人工筋の組み合わせを 6 章で示した遺伝的アルゴリズムを用いて最適化した。またこのとき、別の面への転がりを防ぐために、遷移する面ではロボットが安定し、遷移する面に隣接する 3 つの面においてはロボットが不安定となるようにした。具体的には、隣接する面を底面とした場合に構造が転がらずに安定する場合には目的関数の値に 0 を乗じた。これによって、ロボットは次の面に安定して遷移することが可能である。初期状態に一つの遺伝子として 6.1 節に示す収縮による転がり変形を与えた。これにより転がり可能な組み合わせをもとに、より良い駆動組み合わせを探索できるようにした。また、テンセグリティを展開する際は、6.4 節に示した高さを最大化する変形を用いることで構造を支持することとした。

この転がりを連続して行うことによってロボットは移動することが可能である。本研究では、追従すべきラインに沿ったロボットの駆動信号を自動的に生成可能なように Grasshopper を用いてシミュレーションを行った。障害物がある際などにその障害物をよけるような軌道に沿った転がりを生成する。一つの状態において、ロボットは三方向への転がりが可能である。全ての状態においてどの方向に転がるべきかを計算した。図 7.2B に示すように 60 世代目で最適値を得た。

転がり移動を行う際にはどの方向に転がれ場良いかを選択する必要がある。Six-bar tensegrity は構造の対称性により、三方向への転がりが可能である。各位置においてどちらへ転がるべきであるかを Grasshopper を用いて計算する。図 7.2C のようにのよう Grasshopper において、追従するラインを設定する。このとき、転がり可能な 3 つの次の面のうち、テンセグリティの重心がラインのゴール側に近い点のうち、最もラインに近い点に転がりを行うようにする。全ての点においてこの操作を繰り返すことでテンセグリティの移動するルートを生成することが可能である。同時に駆動する人工筋のパターンの時系列データを出力することによって、そのまま Arduino に信号を与えることが可能である。

これらの転がりを行うための駆動パターンの時系列データ、展開を用いてテンセグリティを用いた崩れかけた構造の支持が可能となる。

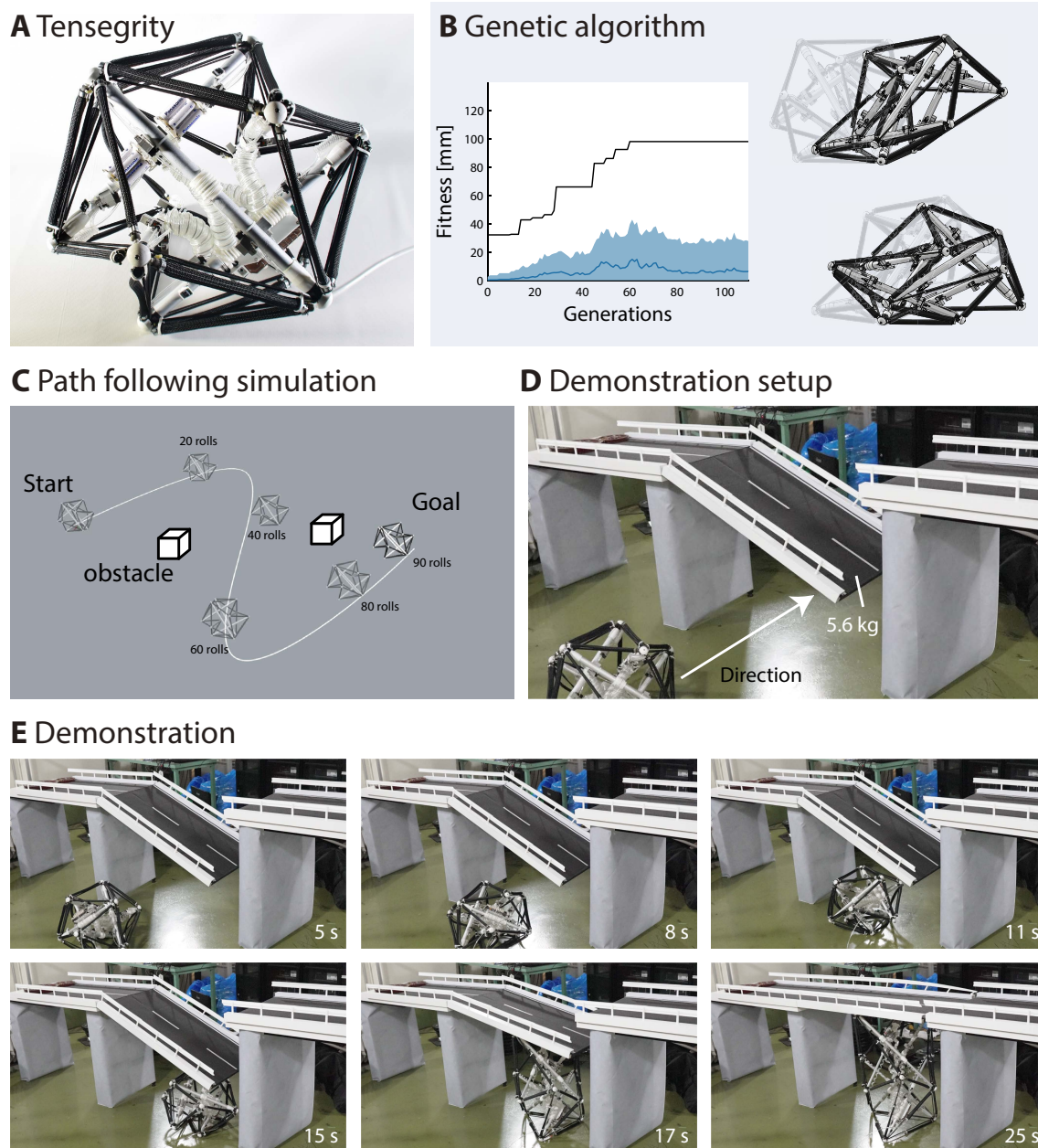


Fig. 7.2: (A) Tensegrity robot equipped with a battery, valves, control system, and sensors. (B) Optimization of rolling deformation using an evolutionary algorithm. (C) Simulation-based generation of actuation patterns for path following. (D) Overview of the demonstration setup for the rolling bridge-support robot. (E) Experimental demonstration of the bridge-supporting robot.

ロボットの設計

テンセグリティロボットを動作させるために、Arduino Mega を用いた。また、ロボットの姿勢を確認するために IMU を取り付けた。24 本の人工筋を駆動するために、24 個のソレノイドバルブを、空圧シリンダを伸展させる用のソレノイドバルブ、収縮させる用のソレノイドバルブをそれぞれ 1 つずつ取り付けた。ここでは、6 本の空圧シリンダを同時に伸展させる。また、ロボットの上部に障害物があるかを検知するためにロボットの 8 方に 8 つの距離センサを取り付けている。駆動源として単三電池を 6 つ直列に連結させたものを 2 列並列にして用いている。このため乾電池からは 9 V 程度の電圧を得ることができる。DCDC コンバータを用いて 24 V に昇圧させ、シンクドライバを用いることでソレノイドバルブの開閉を行う。このテンセグリティの重さは 2.2 kg 程度であった。

7.2.1 デモンストレーション

デモンストレーションの様子を図 7.2D に示す。ここでは、崩れかけた高架を再現した。長さ 910 mm、幅 600 mm、高さ 18 mm の木材の板を用いた。黒色のやすり、白いテープを木材に張り付けることによって道路を表現した。板 1 枚分の重さは 5.6 kg であった。板は 3 枚用意し、端の 2 枚は机の上に乗せた。真ん中の崩れかけた高架を再現するための板は蝶番を用いて奥側の板に取り付けた。また、崩れかけた高架を再現する板と手前側の板を釣り糸を用いて結ぶことによって、崩れかけの高架を再現した。

まず、ロボットは高架の下へ向かって直進するように移動させる。このため、図 7.2 を用いて直進するための駆動パターンを得た。転がり際には、搭載された IMU を用いて転がりきったことを確認した後、人工筋の排気を行い、初期形状へ戻す。そして、次の転がりへと遷移する。さらに、IMU を用いて上方向を向く距離センサを特定し、ロボットの上方に物があった場合には、それを崩れかけの高架であると認識し、ロボットの展開を行う。これによって、ロボットは高架の下まで移動し、展開することを自動的に行うことができる。実験の様子を図 7.2E に示す。4 回転がったのちに、ロボットの上方に高架を検知し、展開を行うことで、崩れかけの高架を一時的に支えるデモンストレーションに成功した。

7.3 展開動作可能なインチワーム型ソフトテンセグリティロボット

拡大変形可能なテンセグリティをモジュールとして用いたインチワーム型の移動ロボット（図 7.3A）について述べる。

テンセグリティ構造が第 3 章で述べた変形と同様の収縮、伸長変形を実現させることが可能であることをシミュレーションにより確認した（図 7.3B）。各モジュールは進行方向に伸びる変形、壁をグリップするように進行方向と垂直方向に伸びる変形を行うことが可能である。この二種類

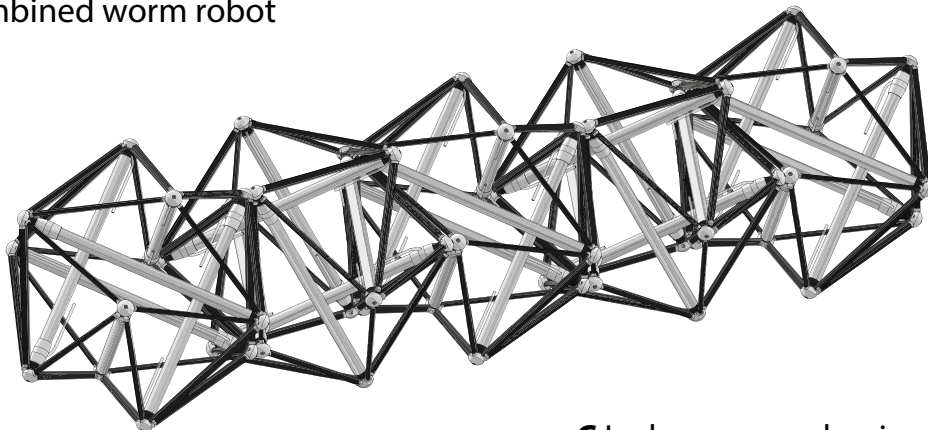
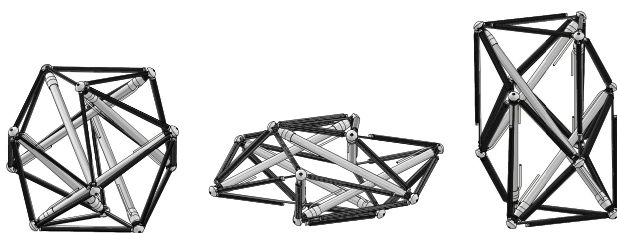
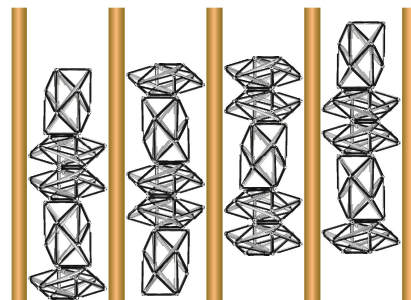
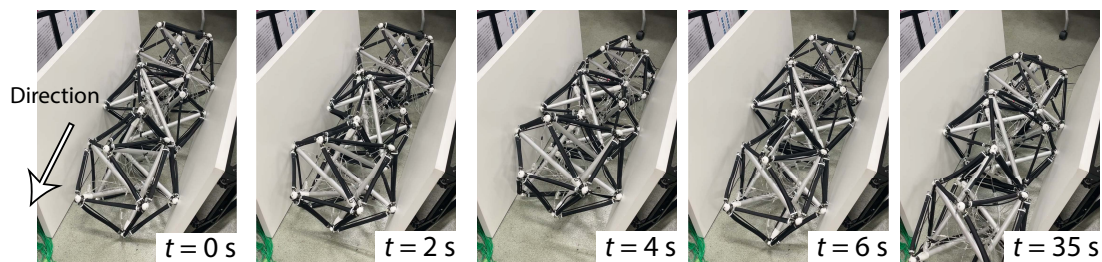
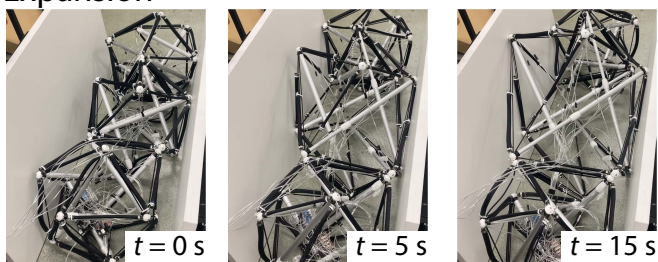
A Combined worm robot**B Module deformation****C Inchworm mechanism****D Locomotion****E Expansion**

Fig. 7.3: (A) Mobile robot composed of combined tensegrity structures. (B) Deformation of individual structures. (C) Actuation patterns for locomotion. (D) Locomotion of the physical robot. (E) Structural deployment, showing the expansion of the central unit.

の変形を組み合わせ、図 7.3C に示すようにインチワーム機構によって推進可能である。進行方向に伸びる変形を前から後ろへと変化させていくことによってロボットは前進することが可能である。

ただし、図の収縮変形から伸長変形へ遷移させる場合、一度初期状態を経由する必要がある。これは受動的な伸長が可能な人工筋が伸ばされた状態で駆動した際に収縮はできるものの、初期長さから収縮させた場合の長さと異なるためである。このため、各ステップの詳細は図 7.3D に示すとおりである。

7.3.1 ロボットの設計

ここでは簡単のために 3 つのテンセグリティモジュールから成る移動型ロボットを製作した。モジュールを駆動するために Arduino Mega を用いた。それぞれのモジュールが収縮を行う用の人工筋を駆動するためのバルブ、伸長を行う用の人工筋を駆動するためのバルブを搭載した。さらに、空圧シリンダを伸展させるためのバルブを用いた。Arduino mega と 7.2 で述べた駆動システムと同様のシステムを用いることで各モジュールを駆動させることが可能である。

7.3.2 デモンストレーション

各ステップ間は 2 秒間とした。ロボットの動作の様子を図 7.3E に示す。さらに、各モジュールは空圧シリンダによる展開が可能である。このため、狭い空間に入り込んでいき、空間を支えるように展開することが可能である。

この展開動作は、崩れかけた空間の支持に利用可能である。さらに、空間形状の認識に利用することも可能である。テンセグリティは柔軟な構造であるため、その構造体を有するロボットは周囲の環境形状に適応しながら移動することができる。ロボットの周囲の環境形状を推定するためにロボットが展開することで、ロボットは周囲の環境形状に合わせた変形を行う。このロボットの形状を認識することによって、周囲の道環境形状を推定することが可能である [91]。

7.4 2 つの三角形の扁平化手法によるテンセグリティ大変形の比較

本研究では Six bar Tensegrity と呼ばれるテンセグリティ構造の大変形のために重要な三角形の扁平化手法として 2 つの手法を提案した。1 つ目の手法は細径人工筋を三角形の周囲に巻き付ける手法であり、2 つ目の手法は受動的伸長性を有する人工筋を用いる手法である。これらの手法を用いることでテンセグリティの大変形を実現させ、ソフトテンセグリティロボットへの応用について述べた。ここでは、ソフトテンセグリティロボットへの適用を行うことで明らかとなったそれぞれの手法におけるメリット、デメリットについて述べる。

2 つの手法における大きな違いとして、任意の状態から三角形を扁平可能か、三角形の受動的な広がり量の大きさの違い、人工筋の屈曲の有無の 3 つがある。受動的伸長性を有する人工筋は伸

長させられた状態で空圧を印加した場合、スリーブの収縮長さ分だけ人工筋は収縮し、最小長さまで収縮することはできない。このため、三角形が受動的に広げられた状態において空圧を印加しても三角形は完全に扁平させられることはない。細径人工筋を三角形の周囲に巻きつけた場合には、どの状態であっても空圧を印加することで完全に扁平させることができる。これが三角形の扁平化に関する違いである。受動的伸長性を有する人工筋では三角形の一边の長さを二倍以上伸長させることが可能である。細径人工筋を周囲に巻きつけた場合、人工筋をたるませた分のみ三角形を受動的に広げることは可能であるが、人工筋の長さは 1.1 倍程度にしかたるませていないため、受動的な広がり大きさは小さい。これが三角形の受動的な広がり量の大きさの違いである。そして、三角形の周囲に細径人工筋を巻きつける場合、人工筋は屈曲させられるが、受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合、人工筋は直線状に配置される。これらの任意の状態から三角形を扁平可能かどうか、三角形の受動的な広がり大きさの違い、人工筋の屈曲の有無に起因するテグリティ構造の変形におけるメリット、デメリットが存在する。

任意の状態から三角形を扁平させられる場合、テグリティの 2 種類の変形間を直接遷移させることが可能である。一方で、受動的に広げられた状態から三角形を扁平させられない場合には一度三角形を初期状態に戻した後に、三角形を扁平させる必要がある。このため、細径人工筋による巻き付けを用いる手法では 2 種類の変形を遷移させる際、初期状態を経由する必要がなく、能動的かつ素早い動作が可能である。一方で、受動的伸長性を有する人工筋を用いる手法では 2 つの変形間を遷移するためには、初期状態を経由する必要がある。そのためには空圧を一度排気し、初期状態に戻ったのちに次の変形を行う必要がある。このため、能動的な変形が得意でなく、変形に時間を要するといったデメリットがある。

三角形の受動的な広がり量が大きい場合、ストラットの長さを大きく伸展させることが可能となる。テグリティのストラットして空圧シリンダのような伸展可能な部材を用いることで、人工筋の収縮による変形のみならず、ストラットの伸展を組み合わせた拡大変形、大きな構造変形が可能である。細径人工筋の巻き付けを行う手法に比べ、受動的伸長性を有する人工筋を用いる手法の方が受動的な広がり量が大きく、ストラットの伸展を用いた構造の変形が大きくなる。

人工筋を屈曲させた場合、第 2 章で述べた屈曲部分における人工筋の耐久性の課題に加えて、摩擦力の問題が生じる。構造の簡略化の観点から本研究では人工筋の屈曲部においてプーリは用いておらず、屈曲部分において摩擦力が大きくなっている。これにより細径人工筋の巻き付けを用いる手法では、シミュレーションの値と実測値との間の差が大きくなっていることが考えられる。一方で、受動的伸長性を有する人工筋を用いる手法では、人工筋を屈曲させることによる摩擦力が生じない。このため、シミュレーションによる変形の予測の容易さが異なる。また、油圧人工筋を用いて大きな力を出す場合、屈曲部分では人工筋が直線状に変形するような力が生じる。このため、屈曲部分においては人工筋ではなく屈曲可能なチューブに置き換えることが望ましく、手法 1 を用いる場合、屈曲部において収縮率の損失が生じてしまう。また、人工筋を屈曲させて巻きつける場合、受動的伸長性を有する人工筋を用いる場合よりも人工筋のスリーブ部分の長さが 3 倍弱程度に長くなる。人工筋の長さが長くなるほど、それに比例して外部との接触等による損傷の可能性が高まる。このため、アクチュエーションの動作の予測可能性、収縮性能、アクチュエータの耐久性等のアクチュエーションの信頼性等に関しては、人工筋を屈曲させて用いる手法

よりも受動的伸長性を有する人工筋を用いた手法の方が優れていると考えられる。

以上の 3 つの特徴から能動的かつ素早い動作を行うソフトテンセグリティロボットの実現のためには細径人工筋の巻き付けを用いた方が望ましい。ただし、屈曲部の摩擦の影響を考慮してシミュレーションを行う必要がある。ストラットの伸展を組み合わせた大変形を用いたい場合には受動的伸長性を有する人工筋を用いた方が望ましい。2 つの手法において、それぞれメリット、デメリットが存在する。このため、本研究で提案した大変形を有するソフトテンセグリティロボットを利用する場合、実現させたい動作に応じて、どちらの手法を用いるかを選定する必要がある。

7.5 まとめ

本稿では、空圧シリンダと受動的伸長性を有する人工筋から成るテンセグリティモジュールのロボットへの適用について述べた。拡大変形が有用となるロボットの応用例として、転がりと拡大変形を行うソフトテンセグリティロボット、インチワーム機構による推進と拡大変形を行うソフトテンセグリティロボットの 2 つについて示した。転がりをを行うロボットに関しては、第 6 章で構築した最適化システムを用いることによって転がり変形の最適化を行った。そして、崩れかけた構造物の下まで転がりによって移動していき、展開することで構造物を持ち上げ、支持するソフトテンセグリティロボットを実現した。さらに、インチワーム型の移動型ロボットによるデモンストレーションを行い、拡大変形可能なテンセグリティの有用性を検証した。

そして、本研究で提案した 2 種類の三角形の扁平化によるテンセグリティの大変形手法についての比較を行った。

第 8 章

結論

8.1 本研究の成果

本論文では、大変形可能なソフトテンセグリティロボットを実現するための伸縮、曲げ、ねじり、拡大等の基本的な大変形を行う軽量なテンセグリティモジュールの機構構成法、アクチュエーション方法について述べた。軽量なテンセグリティモジュールを構成するために人工筋による駆動を採用した。収縮率の小さな人工筋を用いてテンセグリティの大変形を実現させるための手法として、構造内の三角形の扁平化を組み合わせる手法を提案した。三角形の扁平化の実現手法として、テンセグリティ構造に人工筋を巻き付ける手法と、テンセグリティの引張部材に受動的な伸びを許容する人工筋を用いる手法を提案した。それぞれの手法の実現のために、大きく屈曲させた状態での人工筋の耐久性向上、及び受動的な伸びを許容する人工筋の開発を行った。これらの要素技術を用いることで、従来のソフトテンセグリティロボットの変形量に比して伸縮、ねじり、曲げ、拡大といった大きな変形が可能となることをシミュレーションと実験により示した。さらに、大変形を行うテンセグリティモジュールのロボット応用を行うことにより、その有用性を示した。

第 1 章では、本研究が対象とするソフトテンセグリティロボットについて先行研究との比較から、テンセグリティの大変形の必要性を述べた。そして、大変形を実現させるための要素技術として屈曲状態における細径人工筋の耐久性向上、人工筋の受動的伸長性の実現が重要であることを示した。

第 2 章では、細径人工筋の屈曲状態での耐久性向上手法として、人工筋のスリーブに接着剤を塗布する手法を提案した。細径人工筋を屈曲に配置した状態において繰り返し駆動させたときの破損機序がスリーブの繊維同士の位置関係のずれであることを明らかにし、接着剤を用いた微細なパーティション構造をスリーブの繊維状に形成する手法を提案した。顕微鏡を用いて微細なパーティション構造が形成されていることを確認し、耐久試験を行った結果、提案手法が屈曲状態の細径人工筋の耐久性を最大で 10,000 倍以上向上させることを示した。

第 3 章では、細径人工筋をテンセグリティ構造のストラット部分と弾性紐部分を経由するように配置することによって、ストラット部分の人工筋の収縮率を弾性紐部分の変形に用いることができるといった観点から、2 通りの人工筋配置法を提案した。これらを組み合わせることで、テン

セグリティ構造において、従来研究に比して大きな変形での伸縮、ねじり、曲げといったモジュールにおける基本的な変形要素を実現できることを、静力学シミュレーション、実験をもとに実証した。

第 4 章では、第 3 章で実現したテンセグリティの伸縮、ねじり、曲げ、把持動作を組み合わせることによって、移動型ロボット、ロボットアーム、マニピュレータへの応用を行った。まず、5 個のテンセグリティモジュールの伸縮変形を組み合わせることによってインチワーム型の移動ロボットを実現した。次に、ロボットアームでは曲げ変形を行う 2 個のテンセグリティモジュールと把持動作を行うテンセグリティモジュールを連結させることで、ピックアンドプレースを行うロボットアームを実現した。そして、ねじり変形を行う 2 個のテンセグリティモジュール、収縮を行うテンセグリティモジュール、把持動作を行うテンセグリティモジュールを連結させることでねじり操作可能なマニピュレータを実現した。

第 5 章では、通常のマッキベン型人工筋のゴムチューブとスリーブの間に、弾性を有する紐と、弾性を有さない紐から成る 1 本の紐を挿入することによって、従来のマッキベン型人工筋に受動的伸長性を与える手法を提案した。簡易的に製作したプロトタイプにより、受動的伸長性を有する人工筋の受動的伸長性、収縮性、収縮時のスリーブと紐との間の滑りについて測定した。これらの基礎特性をもとに空圧印加時の受動的伸長性を有する人工筋の力学モデルを構築した。この力学モデルをもとに、任意の長さから収縮可能な人工筋の構成を提案した。力特性を測定し、空圧非印加時に 100% 以上の受動的伸長性を有しながら、空圧印加時には 100 N 程度の力を生じさせることが可能であることを示した。さらに、受動的伸長性を有する人工筋を拮抗駆動で動作するロボットアームへ適用し、従来の人工筋を用いた場合に比べて動作範囲が広がることを確認した。

第 6 章では、第 5 章で開発した受動的伸長性を有する人工筋を用いたテンセグリティ構造の大変形を行った。テンセグリティ構造は拮抗駆動システムの一つであり、張力部材に受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合、構造全体が柔軟性を有することを示した。そして、人工筋を駆動することによって、通常的人工筋を用いた場合に比べて変形が大きくなることを示した。さらに、テンセグリティの圧縮部材として空圧シリンダを用いることによって、テンセグリティの拡大変形が可能となることを示した。所望の変形量を与えるために駆動すべき空圧シリンダと人工筋の組み合わせを得るために、遺伝的アルゴリズムによる最適化システムを構築した。

第 7 章では、拡大変形可能なテンセグリティ構造を用いて、崩壊した橋を一時的に支えるソフトテンセグリティロボット、狭隘部への侵入が可能なソフトテンセグリティロボットの開発を行った。遺伝的アルゴリズムを用いることで転がり変形を最適化し、転がり変形を行った。バッテリーや電磁弁等の駆動システムをロボット内に搭載することで、空圧源からの 1 本の空圧チューブによって転がり、展開を実現できることを示した。さらに、拡大変形可能なテンセグリティ構造を連結させることで、インチワーム型の移動ロボットを実現させることができ、狭隘部へ侵入し、展開できることを確認した。

本研究ではテンセグリティ構造を大変形させるための構造内の三角形の扁平化手法として、細径人工筋をたるませて三角形の周囲に配置する手法と、受動的伸長性を有する人工筋を用いる手法を提案した。細径人工筋を用いた場合には、任意の変形間で遷移が可能であるのに対し、受動的伸長性を有した場合には、2 種類の変形間を遷移する際には初期状態を経由する必要がある、さ

らに初期状態により負荷がかかる場合、変形に影響を与えることを明らかにした。そして、細径人工筋を用いた場合にはストラット部分の長さ変化を生じさせることが困難であるのに対して、受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合にはストラットの長さ変化が可能であることを明らかにした。このため、大変形が必要となる場合には受動的伸長性を有する人工筋を用いるほうが望ましく、能動的な動作や高速な動作が必要となる場合には細径人工筋を用いる方が望ましい。

8.2 今後の展望

第 2 章で述べた細径人工筋の曲げ状態での繰り返し駆動における耐久性向上では、大きく屈曲させた場合において大幅な耐久性向上を実現した。しかしながら、0.5 MPa 以上の高い空圧を用いた場合、いずれの条件においてもスリーブがゴムチューブに傷をつけることで 100 万回以内の繰り返し駆動で破損することが明らかになった。このため、耐久性向上のためには本研究で述べた手法のみならず、内部のゴムチューブに自己修復作用を与えるべきであると考えられる。人工筋に自己修復作用を与え、寿命を延ばすことで耐久性が必要となる用途への人工筋の利用が可能となるだろう。さらに、屈曲状態においても高い耐久性を有する細径人工筋はソフトテグリティロボットにとどまらず、その他の軽く柔軟なソフトロボットの実現に広く活用できるだろう。

また、第 5 章で提案した受動的伸長性を有する人工筋は生体と人工筋との大きな違いであった外力による受動的な伸長性を実現させたものである。この受動的伸長性を有する人工筋を用いることによって、従来の生体模倣ロボットよりも生物に近いロボットを実現することが可能であるだろう。しかしながら、この受動的伸長性を有する人工筋は伸長させられた状態から空圧を印加しても最小長さまで収縮しないといった課題を抱えている。最小長さまで収縮させるためには、人工筋が初期長さまで戻された後に空圧を印加する必要がある。生体の筋肉はアクチンフィラメントとミオシンフィラメントの相互作用により収縮するため、任意の長さから最小長さまで変位可能である。このため、本研究で実現した受動的伸長性は生体の受動的伸長性を完全に再現できているとは言えない。

この点は本研究におけるテグリティへの適用においても問題を生じさせる原因となっている。細径人工筋を用いた場合には、二つの変形を遷移する際、初期状態を経由せずに直接遷移することが可能である。しかし、本研究で提案した受動的伸長性を有する人工筋を用いた場合には、二つの変形を遷移する際、初期状態を経由する必要がある。これは人工筋が伸ばされた状態で駆動されたときに最小長さまで収縮できないことに起因する。任意の長さから最小の長さまで収縮させることのできる人工筋を開発することで、本研究で提案した二種類の三角形の扁平化手法によるテグリティの大変形の利点を組み合わせた変形手法を実現させることが可能となる。つまり、任意の変形間を能動的に遷移可能、かつ、拡大変形可能なソフトテグリティロボットを実現させることが可能となる。任意の長さから最小長さまで収縮可能な人工筋はソフトテグリティロボットのみならず、あらゆる生体模倣ロボットへの応用が可能である。

テグリティの大変形を用いたロボット応用に関して、本研究では、インチワーム型ロボット、曲げ可能なロボアットアーム、ねじり操作可能なマニピュレータ、転がりロボットへの応用を行った。これらは本研究におけるテグリティの大変形手法により実現できるロボットのデモ

ンストレーションとして行った。本研究では簡単のために、モジュールを索状に連結させた構成について取り扱ったが、平面的、または立体的にモジュールを組み合わせることも可能である。アプリケーションに合わせたモジュールの組み合わせ方の最適化を行えるようにすることで、様々な場面でのソフトテンセグリティロボットの利用を容易化することができると考えられる。また本研究では、一つの Six-bar Tensegrity が単体として機能し、かつ、モジュールとして組み合わせることによる移動方法を実現できることを示した。未知環境において動作する際に、単体で動作する場合と、モジュールとして動作する場合を切り替えるためには、自律的な連結性能が重要となるだろう。自律的な連結性能を有することによって環境に合わせてロボットが自律的に動作することが可能となる。

さらに、本研究ではテンセグリティのアクチュエーション方法を主題として扱った。テンセグリティ構造のセンシングやそのセンサデータを用いたフィードバックなどの点には研究の余地がある。本研究で用いたテンセグリティ構造は構造の自由度の数と引張部材の本数が一致しているため、全ての引張部材の長さをセンシングすることによってテンセグリティ構造の形状を計算することが可能である。このような長さを推定するセンサを用いたテンセグリティの形状認識は、例えば、周囲の環境形状認識のために用いることができる。第 4 章で示したように、ソフトテンセグリティロボットはその構造の柔軟性から、周囲の環境形状に合わせて動作することができる。このとき、周囲の環境形状を反映させたようにソフトテンセグリティロボットが変形する。このため、周囲の環境形状に柔軟に適応して動作するソフトテンセグリティロボットの形状を認識することで周囲の環境形状を推定することが可能となる。また、第 6 章で示した拡大変形可能なテンセグリティを用いることによって、より広い空間においてもテンセグリティが展開した際に、壁にぶつかるまで広がることが可能となり、より多くの環境において形状を推定することが可能となる。人の立ち入ることの困難な環境において環境を探索するロボットとして利用することが可能となるだろう。

付録 A

本研究で用いた空圧システムに関する製作技術

本研究では 0.5 MPa 程度の空圧を用いた。空圧システムを製作する際に用いた自作の継ぎ手等についてここに記す。ここに示す継ぎ手に関する長期的な耐久試験等を行っていないが、0.7 MPa の空圧を印加しても空気の漏れがないことは確認済みである。空気の漏れを確認するためには、空気漏れが発生する可能性のある部分を水に沈めた状態で空圧を印加することで空気が漏れているかどうかについて確認した。

接着剤

まず、空圧継ぎ手において重要なのは空気の漏れを防ぐことである。空気の漏れを防ぐためには、 o リングやゴム板などを挟む、シールテープを使う、接着剤を用いるなどの方法がある。本研究における自作の継ぎ手においては接着剤が非常に有効であった。接着剤にはドイツの会社である HENKEL が出している LOCTITE 401 を主に使用した。

空圧チューブ同士の接続

まず、接着剤を使わなくてもチューブ同士を接続することのできる方法について記す。PISCO の外径 4 mm、内径 2.5 mm のチューブの中に外径 3 mm、内径 2 mm の空圧チューブを図 A.1 に示すように、圧入のようにはめ込むことでポリウレタンチューブの弾性により、接着剤なしでも十分に継ぎ手として機能する。2 mm 程度差し込んでおくことで 0.7 MPa 程度をかけても外れることはなかった。手で引っ張ると外せるため、使い勝手が良く、試作において多く用いた。

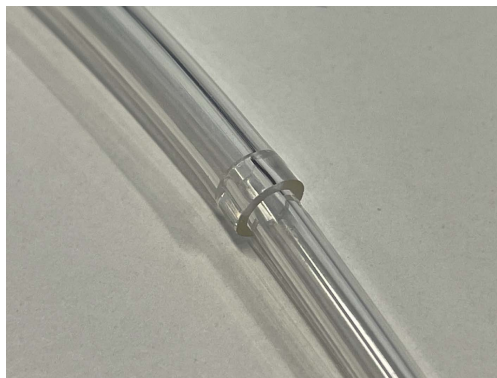


Fig. A.1: Adhesive-free connection between a 4 mm tube and a 3 mm tube.

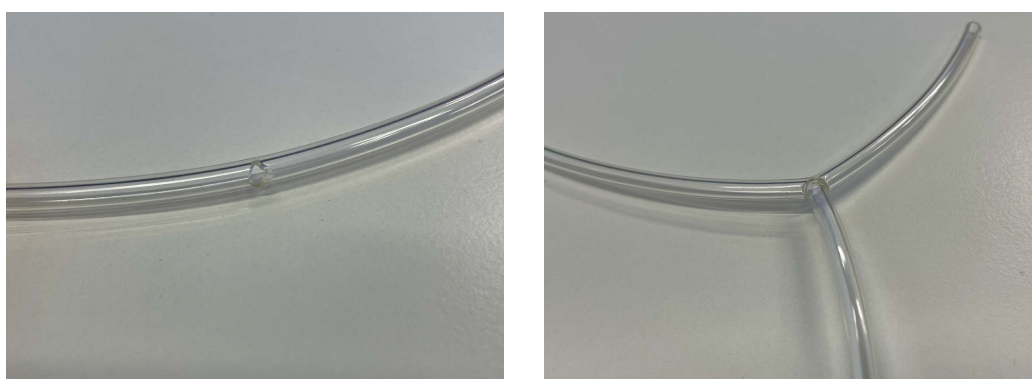


Fig. A.2: Fabrication of a T-shaped pneumatic tube.

二股の空圧チューブ

二股の継ぎ手を用いる場合、図 A.2 に示すように空圧チューブのみから製作することも可能である。まず、外径 4 mm の空圧チューブに直径 4 mm の円よりも小さめの穴を開ける。ニッパーやドリルを用いることによって穴をあけることが可能である。この穴に対して別の外径 4 mm の空圧チューブを差し込む。この際、チューブの弾性によってある程度固定されて少し振っても抜けないくらいになっていることが重要である。この 2 つのチューブの間に LOCTITE をたらすことで、二股の空圧チューブを製作することが可能である。面同士の接着ではないため強い力で引っ張ってしまうと抜けてしまうが、0.7 MPa 程度の空気圧によって抜けることはない。穴のサイズを変更することで別のサイズの空圧チューブを用いることも可能である。さらに、これを組み合わせることによってさまざまな空圧回路を製作することも可能である。



Fig. A.3: Fabrication of a pneumatic plug

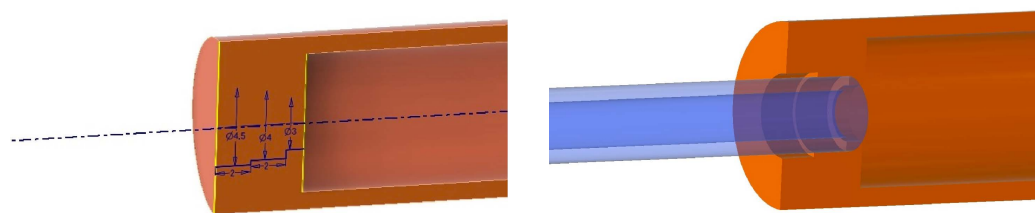


Fig. A.4: Fabrication of 3D-printed pneumatic fittings.

空圧プラグ

研究における試行錯誤の際には空気の流れを封じたい場合があった．空圧プラグも自作可能である．まず，空圧チューブの中に同じくらいのサイズの導線（他の物でも可）を挿入する．先端を LOCTITE につけて 30 分待つことによって空圧プラグとして機能する．このとき，シリコーンゴムの上に LOCTITE をたらしておき，チューブの先端をつける程度で十分である．また，この方法と二股の空圧チューブの自作法を組み合わせることで直角に曲がった空圧チューブを自作することも可能である．通常，空圧チューブを直角に曲げてしまうと空気が通らなくなってしまうため，直角に曲がったチューブが欲しい場合には有効である．逆に，空圧チューブを折り曲げることで簡単に空気の流れを防ぐことができるため（外径 4 mm，3 mm のチューブであれば可能であることを確認済み），一時的に空気を流したくない場合にはこの方法が有効である．

3D プリンタを用いた継ぎ手の製作

そして最後に，3D プリンタを用いた継ぎ手の製作について示す（図 A.4）．複雑な継ぎ手でも軽く製作することが可能である．また，上に記したチューブ同士の接続に比べて，強く引っ張っ



Fig. A.5: Driving principle of the tensegrity robot and the control signal.

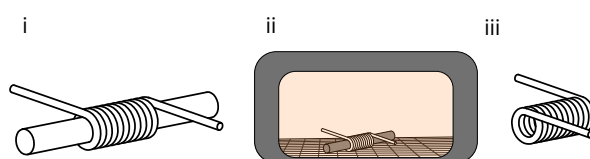


Fig. A.6: Method to make a spiral tube.

でも抜けない丈夫な継ぎ手が製作可能である。外径 4 mm のチューブを挿入するためには図のような穴を作る。内径 4.5 mm の穴は接着剤を入れるためのものである。そして、内径 4 mm の穴はチューブを掴むためのもので、接着剤をつけやすくすることが可能である。

3D プリンタには Markforged の Mark two を用いた。フィラメントの素材や 3D プリンタによっては壁面から空気が漏れてしまうことがあるため、注意が必要である。壁面から空気が漏れる場合には LOCTITE 401 等を用いて流路を防ぐ必要がある。同様に反対側に外径 1.8 mm のチューブを 6 本取り付けすることで 1 本の外径 4 mm のチューブから 6 本の外径 1.8 mm のチューブに分岐させる継ぎ手を製作することが可能である (図 3.14)。

電磁バルブでの自作継ぎ手への利用

SMC の電磁バルブ (SY113-5L-M3) は 1 つ 15 g 以下であり、電磁バルブをロボットに搭載したいときには便利であった。しかし市販の状態では、電磁バルブに空気を送るためのマニホール드가アルミでできているために一定程度の質量がある。そこで、下の写真のような 3D プリンタ製の継ぎ手を製作した。これにより、3 ポートのソレノイドバルブをたった 15 g 程度で用いることが可能となった。

A.0.1 スパイラルチューブを用いた配線の単純化

第 7 章における形態変化可能なテンセグリティロボットでは、空圧シリンダの伸展に伴い、構造全体が大きく変形する。この際、人工筋や空圧シリンダへの空圧チューブ、センサやバルブへ

の導線をつなぐ距離が変化する．このため、空圧チューブや導線の配線がロボットの変形を阻害しないように配置する工夫が必要であった．そこで、本研究では螺旋状に巻かれたポリウレタンチューブを使用した．ポリウレタンチューブはアニール処理をすることによってらせん状に固定することが可能である．

ポリウレタンチューブを外径 10 mm のアルミパイプに巻き付け、チューブ先端を固定した．そして、80 度に保ったオープンに 30 分放置した．その後、螺旋の向きが反対になるように巻きなおすことで螺旋チューブの復元力を増加させている．

また、ポリウレタンチューブの内側に 8 本の AWG30 の導線を入れることで導線を螺旋形状にした．まず、摩擦を軽減させるためにポリウレタンチューブ内にシリコンオイルを入れ、針金をポリウレタンチューブの中に通す．そして、8 本の導線を針金に引っ掛け、針金を引っ張ることで導線を通した．その後、ポリウレタンチューブを螺旋状に固定し、アニール処理を施した．

この螺旋チューブを用いることによってロボットの変形を阻害することのない空圧チューブ、導線を配置することが可能である．

参考文献

- [1] Haig Beck, Jackie Cooper, et al. *Kurilpa Bridge*. Images Publishing, 2012.
- [2] Kenneth Snelson. The art of tensegrity. *International journal of space structures*, Vol. 27, No. 2-3, pp. 71–80, 2012.
- [3] Manhattan Toy Company. <https://www.manhattantoy.com/collections/skwish/products/skwish-natural>.
- [4] 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.
- [5] Andrew P. Sabelhaus, Jonathan Bruce, Ken Caluwaerts, Pavlo Manovi, Roya Fallah Firoozi, Sarah Dobi, Alice M. Agogino, and Vytas SunSpiral. System design and locomotion of superball, an untethered tensegrity robot. In *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 2867–2873, 2015.
- [6] Massimo Vespignani, Jeffrey M. Friesen, Vytas SunSpiral, and Jonathan Bruce. Design of superball v2, a compliant tensegrity robot for absorbing large impacts. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2865–2871, 2018.
- [7] Davide Zappetti, Roc Arandes, Enrico Ajanic, and Dario Floreano. Variable-stiffness tensegrity spine. *Smart Materials and Structures*, Vol. 29, No. 7, p. 075013, jun 2020.
- [8] Yezheng Kang, Jianhuan Chen, Tianyi Yan, Hao Wang, Yanjun Wang, and Genliang Chen. Design and analysis of a flexible struts v-expander tensegrity robot for navigating pipes. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 202, p. 105757, 2024.
- [9] Davide Zappetti, Yi Sun, Matthieu Gevers, Stefano Mintchev, and Dario Floreano. Dual stiffness tensegrity platform for resilient robotics. *Advanced Intelligent Systems*, Vol. 4, No. 7, p. 2200025, 2022.
- [10] Josep M. Mirats-Tur and Josep Camps. A three-dof actuated robot. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 18, No. 3, pp. 96–103, 2011.
- [11] 網干雄城, 柴田瑞穂, 平井慎一. ストラット駆動によるテンセグリティロボットの転がりと跳躍. 第18回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 102–107. 日本ロボット学会, 2013.
- [12] Shuhei Ikemoto, Kenta Tsukamoto, and Yuhei Yoshimitsu. Development of a modular tensegrity robot arm capable of continuous bending. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 8, , 2021.

- [13] John Rieffel and Jean-Baptiste Mouret. Adaptive and resilient soft tensegrity robots. *Soft robotics*, Vol. 5, No. 3, pp. 318–329, 2018.
- [14] Robert L Baines, Joran W Booth, and Rebecca Kramer-Bottiglio. Rolling soft membrane-driven tensegrity robots. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 4, pp. 6567–6574, 2020.
- [15] Jinwook Jeong, Injoong Kim, Yunyeong Choi, Seonghyeon Lim, Seungkyu Kim, Hyeongwoo Kang, Dylan Shah, Robert Baines, Joran W. Booth, Rebecca Kramer-Bottiglio, and Sang Yup Kim. Spikebot: A multigait tensegrity robot with linearly extending struts. *Soft Robotics*, Vol. 11, No. 2, pp. 207–217, 2024.
- [16] Sydney Spiegel, Jiefeng Sun, and Jianguo Zhao. A shape-changing wheeling and jumping robot using tensegrity wheels and bistable mechanism. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 28, No. 4, pp. 2073–2082, 2023.
- [17] Davide Zappetti, Stefano Mintchev, Jun Shintake, and Dario Floreano. Bio-inspired tensegrity soft modular robots. In *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems*, pp. 497–508. Springer, 2017.
- [18] Hajun Lee, Yeonwoo Jang, Jun Kyu Choe, Suwoo Lee, Hyeonseo Song, Jin Pyo Lee, Nasreena Lone, and Jiyun Kim. 3d-printed programmable tensegrity for soft robotics. *Science Robotics*, Vol. 5, No. 45, p. eaay9024, 2020.
- [19] Richard Buckminster Fuller. Tensegrity. *Portfolio and Art News Annual*, Vol. 4, pp. 112–127, 1961.
- [20] Dylan S Shah, Joran W Booth, Robert L Baines, Kun Wang, Massimo Vespignani, Kostas Bekris, and Rebecca Kramer-Bottiglio. Tensegrity robotics. *Soft robotics*, 2021.
- [21] Valentín Gómez Jàuregui. *Tensegrity Structures and their Application to Architecture*. Books & Science. Editorial Universidad de Cantabria, 2020.
- [22] Kenneth Snelson and Eleanor Heartney. Kenneth snelson, art and ideas. *Kenneth Snelson, Marlborough Gallery, NY, accessed Feb*, Vol. 10, p. 2016, 2013.
- [23] Yixiang Liu, Qing Bi, Xiaoming Yue, Jiang Wu, Bin Yang, and Yibin Li. A review on tensegrity structures-based robots. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 168, p. 104571, 2022.
- [24] George M. Whitesides. Soft robotics. *Angewandte Chemie International Edition*, Vol. 57, No. 16, pp. 4258–4273, 2018.
- [25] K. Suzumori, S. Iikura, and H. Tanaka. Flexible microactuator for miniature robots. In *[1991] Proceedings. IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 204–209, 1991.
- [26] Hui Dong, Jiahao Gan, Rongbiao Xia, Zongxing Lu, Bingxing Chen, and Muhao Chen. Adaptive tensegrity foot design for quadruped robots in unstructured terrains. *Smart Materials and Structures*, Vol. 34, No. 2, p. 025011, 2025.
- [27] Jonathan Dessi-Olive, James Case, Michael Koller, and Vinay Teja Meda. Self-deploying tensegrity structures with inflatable struts. In *Proceedings of IASS annual*

- symposia*, Vol. 2019, pp. 1–8. International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2019.
- [28] Offer Shai, Itay Tehori, Avner Bronfeld, Michael Slavutin, and Uri Ben-Hanan. Adjustable tensegrity robot based on assur graph principle. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol. 43833, pp. 257–261, 2009.
- [29] Cornel Sultan and Robert Skelton. Deployment of tensegrity structures. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 18, pp. 4637–4657, 2003.
- [30] Kyunam Kim, Lee-Huang Chen, Brian Cera, Mallory Daly, Edward Zhu, Julien Despois, Adrian K Agogino, Vytas SunSpiral, and Alice M Agogino. Hopping and rolling locomotion with spherical tensegrity robots. In *2016 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS)*, pp. 4369–4376. IEEE, 2016.
- [31] Omar Aloui, Raphael Zufferey, William Stewart, Mohammad Askari, Simon Jeger, and Dario Floreano. Collision-resilient winged drones enabled by tensegrity structures. *Advanced Robotics Research*, p. 202500050, 2025.
- [32] Davide Zappetti, Seung Hee Jeong, Jun Shintake, and Dario Floreano. Phase changing materials-based variable-stiffness tensegrity structures. *Soft robotics*, Vol. 7, No. 3, pp. 362–369, 2020.
- [33] Kazuma Shimomura, Kazuki Abe, Issei Onda, Masahiro Watanabe, and Kenjiro Tadakuma. Variable stiffness tensegrity mechanism. In *2025 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 1294–1300, 2025.
- [34] S. Mintchev, D. Zappetti, J. Willemin, and D. Floreano. A soft robot for random exploration of terrestrial environments. In *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 7492–7497, 2018.
- [35] Jonathan Kimber, Zongliang Ji, Aikaterini Petridou, Thomas Sipple, Kentaro Barhydt, James Boggs, Luke Dosiek, and John Rieffel. Low-cost wireless modular soft tensegrity robots. In *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pp. 88–93, 2019.
- [36] Jonathan Mi, Wenzhe Tong, Yilin Ma, and Xiaonan Huang. Design of a variable stiffness quasi-direct drive cable-actuated tensegrity robot. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 10, No. 9, pp. 8626–8633, 2025.
- [37] Shiyang Lu, William R Johnson III, Kun Wang, Xiaonan Huang, Joran Booth, Rebecca Kramer-Bottiglio, and Kostas Bekris. 6n-dof pose tracking for tensegrity robots. In *The International Symposium of Robotics Research*, pp. 136–152. Springer, 2022.
- [38] Kyunam Kim, Adrian K Agogino, and Alice M Agogino. Rolling locomotion of cable-driven soft spherical tensegrity robots. *Soft robotics*, Vol. 7, No. 3, pp. 346–361, 2020.
- [39] Kyunam Kim, Deaho Moon, Jae Young Bin, and Alice M. Agogino. Design of a spherical tensegrity robot for dynamic locomotion. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 450–455, 2017.

- [40] Kyunam Kim, Adrian K. Agogino, Deaho Moon, Laqshya Taneja, Aliakbar Toghyan, Borna Dehghani, Vytas SunSpiral, and Alice M. Agogino. Rapid prototyping design and control of tensegrity soft robot for locomotion. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*, pp. 7–14, 2014.
- [41] Kyunam Kim, Adrian K. Agogino, Aliakbar Toghyan, Deaho Moon, Laqshya Taneja, and Alice M. Agogino. Robust learning of tensegrity robot control for locomotion through form-finding. In *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 5824–5831, 2015.
- [42] Lee-Huang Chen, Brian Cera, Edward L. Zhu, Riley Edmunds, Franklin Rice, Antonia Bronars, Ellande Tang, Saunon R. Malekshahi, Osvaldo Romero, Adrian K. Agogino, and Alice M. Agogino. Inclined surface locomotion strategies for spherical tensegrity robots. In *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4976–4981, 2017.
- [43] Brian T Mirletz, In-Won Park, Thomas E Flemons, Adrian K Agogino, Roger D Quinn, and Vytas SunSpiral. Design and control of modular spine-like tensegrity structures. In *World Conference of the International Association for Structural Control and Monitoring (IACSM)*, No. ARC-E-DAA-TN15559, 2014.
- [44] Jan Petrš, Ryota Kobayashi, Fuda van Diggelen, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, and Dario Floreano. Evolutionary codesign and fabrication of tensegrity joints with integrated pneumatic artificial muscles. *Advanced Intelligent Systems*, Vol. 7, No. 9, p. 2500310, 2025.
- [45] Satoshi Yagi, Sunhwi Kang, Shiqi Yu, and Hamed Mahzoon. Evaluation of shape-changing tensegrity structure robot for physical human-robot interaction. In *2019 IEEE International Conference on Advanced Robotics and its Social Impacts (ARSO)*, pp. 20–24, 2019.
- [46] Tianyuan Wang and Mark A Post. A symmetric three degree of freedom tensegrity mechanism with dual operation modes for robot actuation. *Biomimetics*, Vol. 6, No. 2, p. 30, 2021.
- [47] Tianyuan Wang, Mark A Post, and Andy M Tyrrell. Articulating resilience: Adaptive locomotion of wheeled tensegrity robot. *Electronics*, Vol. 11, No. 4, p. 666, 2022.
- [48] Christopher S Chen and Donald E Ingber. Tensegrity and mechanoregulation: from skeleton to cytoskeleton. *Osteoarthritis and Cartilage*, Vol. 7, No. 1, pp. 81–94, 1999.
- [49] Babar Jamil, Namsoo Oh, Jin-Gyu Lee, Haneol Lee, and Hugo Rodrigue. A review and comparison of linear pneumatic artificial muscles. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, pp. 1–13, 2023.
- [50] Yuusuke Koizumi, Mizuho Shibata, and Shinichi Hirai. Rolling tensegrity driven by pneumatic soft actuators. In *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1988–1993, 2012.

- [51] HF Schulte. The characteristics of the mckibben artificial muscle. *The application of external power in prosthetics and orthotics*, pp. 94–115, 1961.
- [52] Ryan M. Robinson, Curt S. Kothera, Robert M. Sanner, and Norman M. Wereley. Nonlinear control of robotic manipulators driven by pneumatic artificial muscles. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 21, No. 1, pp. 55–68, 2016.
- [53] Ryan M. Robinson, Curt S. Kothera, and Norman M. Wereley. Variable recruitment testing of pneumatic artificial muscles for robotic manipulators. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 20, No. 4, pp. 1642–1652, 2015.
- [54] Hiroaki Tanaka, Tsung-Yuan Chen, and Koh Hosoda. Dynamic turning of a soft quadruped robot by changing phase difference. *Frontiers in Robotics and AI*, Vol. 8, , 2021.
- [55] Yoichi Masuda, Kazuhiro Miyashita, Kaisei Yamagishi, Masato Ishikawa, and Koh Hosoda. Brainless running: A quasi-quadruped robot with decentralized spinal reflexes by solely mechanical devices. In *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 4020–4025, 2020.
- [56] Koh Hosoda, Takashi Takuma, Atsushi Nakamoto, and Shinji Hayashi. Biped robot design powered by antagonistic pneumatic actuators for multi-modal locomotion. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 56, No. 1, pp. 46–53, 2008. Human Technologies: “Know-how” .
- [57] Nathan Delson, Thomas Hanak, Kevin Loewke, and Daniel N Miller. Modeling and implementation of mckibben actuators for a hopping robot. In *ICAR’05. Proceedings., 12th International Conference on Advanced Robotics, 2005.*, pp. 833–840. IEEE, 2005.
- [58] Shuichi Wakimoto, Koichi Suzumori, and Jungo Takeda. Flexible artificial muscle by bundle of mckibben fiber actuators. In *2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, pp. 457–462, 2011.
- [59] Shunichi Kurumaya, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori. Design of thin mckibben muscle and multifilament structure. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 261, pp. 66–74, 2017.
- [60] Shunichi Kurumaya, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, and Shuichi Wakimoto. Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles. *Robomech Journal*, Vol. 3, No. 1, p. 18, 2016.
- [61] Atsuhiko Niikura, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Megu Gunji, Kent Mori, Ryuma Niiyama, and Koichi Suzumori. Giraffe neck robot: First step toward a powerful and flexible robot prototyping based on giraffe anatomy. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 3539–3546, 2022.
- [62] Hana Ito, Shoma Tanaka, Yunhao Feng, Hiroyuki Nabae, Yasuji Harada, Akira Fukuhara, and Koichi Suzumori. A canine musculoskeletal robot for investigating biomechanical functions during locomotion. *Advanced Robotics Research*, p. e202500170, 2025.

- [63] Guirec Maloisel, Espen Knoop, Christian Schumacher, and Moritz Bächer. Automated routing of muscle fibers for soft robots. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 37, No. 3, pp. 996–1008, 2021.
- [64] Yonggan Liu, Yang Yang, Yan Peng, Songyi Zhong, Na Liu, and Huayan Pu. A light soft manipulator with continuously controllable stiffness actuated by a thin mckibben pneumatic artificial muscle. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 25, No. 4, pp. 1944–1952, 2020.
- [65] Kentaro Barhydt and H. Harry Asada. A high-strength, highly-flexible robotic strap for harnessing, lifting, and transferring humans. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 8, No. 4, pp. 2110–2117, 2023.
- [66] Nobuhiro Takahashi, Hayato Takahashi, and Hideki Koike. Soft exoskeleton glove enabling force feedback for human-like finger posture control with 20 degrees of freedom. In *2019 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, pp. 217–222, 2019.
- [67] Tomoki Abe, Shoichiro Koizumi, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori, Nao Sato, Michiko Adachi, and Fumi Takamizawa. Fabrication of “18 weave” muscles and their application to soft power support suit for upper limbs using thin mckibben muscle. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 4, No. 3, pp. 2532–2538, 2019.
- [68] Shoichiro Koizumi, Shunichi Kurumaya, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori. Braiding thin mckibben muscles to enhance their contracting abilities. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 3, No. 4, pp. 3240–3246, 2018.
- [69] Tatsuhiko Hiramitsu, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, and Gen Endo. Experimental evaluation of textile mechanisms made of artificial muscles. In *2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pp. 1–6, 2019.
- [70] Yuki Funabara. Prototype of a fabric actuator with multiple thin artificial muscles for wearable assistive devices. In *2017 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 356–361, 2017.
- [71] Yuki Funabara. Flexible fabric actuator realizing 3d movements like human body surface for wearable devices. In *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6992–6997, 2018.
- [72] Robert E Skelton and Mauricio C De Oliveira. *Tensegrity systems*, Vol. 1. Springer, 2009.
- [73] In-Won Park and Vytas SunSpiral. Impedance controlled twisted string actuators for tensegrity robots. In *2014 14th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2014)*, pp. 1331–1338, 2014.
- [74] G.K. Klute, J.M. Czerniecki, and B. Hannaford. Mckibben artificial muscles: pneumatic actuators with biomechanical intelligence. In *1999 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (Cat. No.99TH8399)*, pp. 221–226, 1999.
- [75] Wenjuan Du, Shugen Ma, Bin Li, Minghui Wang, and Shinichi Hirai. Force analytic

- method for rolling gaits of tensegrity robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 21, No. 5, pp. 2249–2259, 2016.
- [76] Charbel Tawk, Geoffrey M. Spinks, Marc in het Panhuis, and Gursel Alici. 3d printable linear soft vacuum actuators: Their modeling, performance quantification and application in soft robotic systems. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 24, No. 5, pp. 2118–2129, 2019.
- [77] G.K. Klute and B. Hannaford. Fatigue characteristics of mckibben artificial muscle actuators. In *Proceedings. 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Innovations in Theory, Practice and Applications (Cat. No.98CH36190)*, Vol. 3, pp. 1776–1781 vol.3, 1998.
- [78] Suzumori Koichi, Seita Shukushi, and Wakimoto Shuichi. Mckibben artificial muscle, 2016. Japan patent JP2016-173117A.
- [79] Bertrand Tondou. Modelling of the mckibben artificial muscle: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 23, No. 3, pp. 225–253, 2012.
- [80] Qin Tu, Yanjie Wang, Donghai Yue, and Frank Agyen Dwomoh. Analysis on the impact factors for the pulling force of the mckibben pneumatic artificial muscle by a fem model. *Journal of Robotics*, Vol. 2020, pp. 1–11, 2020.
- [81] Steven Lessard, Jonathan Bruce, Erik Jung, Mircea Teodorescu, Vytas SunSpiral, and Adrian Agogino. A lightweight, multi-axis compliant tensegrity joint. In *2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 630–635. IEEE, 2016.
- [82] Wen-Yung Li, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori. New soft robot hand configuration with combined biotensegrity and thin artificial muscle. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 5, No. 3, pp. 4345–4351, 2020.
- [83] Nguyen Kim Pham and Edwin A Peraza Hernandez. Design exploration of a tensegrity-based twisting wing. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Vol. 83990, p. V010T10A072. American Society of Mechanical Engineers, 2020.
- [84] Vishal Ramadoss, Keerthi Sagar, Mohamed Sadiq Ikbali, Jesus Hiram Lugo Calles, Raghuveer Siddaraboina, and Matteo Zoppi. Hedra: A bio-inspired modular tensegrity robot with polyhedral parallel modules. In *2022 IEEE 5th International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, pp. 559–564, 2022.
- [85] Sergi Hernández Juan and Josep M. Mirats Tur. Tensegrity frameworks: Static analysis review. *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 43, No. 7, pp. 859–881, 2008.
- [86] Hidenori Murakami. Static and dynamic analyses of tensegrity structures. part 1. nonlinear equations of motion. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 20, pp. 3599–3613, 2001.
- [87] Hidenori Murakami. Static and dynamic analyses of tensegrity structures. part ii. quasi-static analysis. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 38, No. 20, pp.

- 3615–3629, 2001.
- [88] Gunnar Tibert and Sergio Pellegrino. Review of form-finding methods for tensegrity structures. *International Journal of Space Structures*, Vol. 18, pp. 209–223, 12 2003.
 - [89] Cornel Sultan and Robert Skelton. The prestressability problem of tensegrity structures: Some analytical solutions. *International Journal of Solids and Structures - INT J SOLIDS STRUCT*, Vol. 38, , 07 2001.
 - [90] Shunichi Kurumaya, Koichi Suzumori, Hiroyuki Nabae, and Shuichi Wakimoto. Musculoskeletal lower-limb robot driven by multifilament muscles. *Robomech Journal*, Vol. 3, pp. 1–15, 2016.
 - [91] Wen-Yung Li, Atsushi Takata, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori. Shape recognition of a tensegrity with soft sensor threads and artificial muscles using a recurrent neural network. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 6, No. 4, pp. 6228–6234, 2021.
 - [92] B. Tondu and P. Lopez. Modeling and control of mckibben artificial muscle robot actuators. *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 20, No. 2, pp. 15–38, 2000.
 - [93] Bong-Soo Kang, Curt S. Kothera, Benjamin K. S. Woods, and Norman M. Wereley. Dynamic modeling of mckibben pneumatic artificial muscles for antagonistic actuation. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 182–187, 2009.
 - [94] Xinyi Chen, Wenxin Zhu, Wenyu Liang, Yilin Lang, and Qinyuan Ren. Control of antagonistic mckibben muscles via a bio-inspired approach. *Journal of Bionic Engineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 1771–1789, 2022.
 - [95] Gihyeok Na, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori. Braided thin mckibben muscles for musculoskeletal robots. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 357, p. 114381, 2023.
 - [96] Shoma Tanaka, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori. Back-stretchable mckibben muscles: Expanding the range of antagonistic muscle driven joints. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 8, No. 9, pp. 5331–5337, 2023.
 - [97] Shoma Tanaka, Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori. Fiber jamming mechanism for back-stretchable mckibben muscles. In *2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 48–53, 2024.
 - [98] Bilige Yang, Robert Baines, Dylan Shah, Sreekalyan Patiballa, Eugene Thomas, Madhusudhan Venkadesan, and Rebecca Kramer-Bottiglio. Reprogrammable soft actuation and shape-shifting via tensile jamming. *Science Advances*, Vol. 7, No. 40, p. eabh2073, 2021.
 - [99] Keisuke Naniwa, Yoichi Masuda, Daisuke Nakanishi, Daisuke Ura, and Sugimoto Yasuhiro. A musculoskeletal robot tool kit: Recipes for open source artificial muscles and experimental environments (in japanese). In *The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomech)*, pp. 2A2–M08, 2022.

© 2022 IEEE. Reprinted, with permission, from Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori, “Soft Tensegrity Robot Driven by Thin Artificial Muscles for the Exploration of Unknown Spatial Configurations,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, February, 2022.

© 2023 IEEE. Reprinted, with permission, from Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Large Torsion Thin Artificial Muscles Tensegrity Structure for Twist Manipulation,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, January, 2023.

© 2023 IEEE. Reprinted, with permission, from Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Active-Bending Six-Bar Tensegrity Modular Robot Driven by Thin Artificial Muscles,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, September, 2023.

© 2024 IEEE. Reprinted, with permission, from Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Zebing Mao, and Koichi Suzumori, “Enhancement of Thin McKibben Muscle Durability Under Repetitive Actuation in a Bent State,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, November, 2024.

© 2025 IEEE. Reprinted, with permission, from Ryota Kobayashi, Shoma Tanaka, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “McKibben Muscle With Elastic Thread Embedded in Parallel Extending Range of Motion of Muscle-Driven Robots,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, January, 2025.

業績一覧

学術論文

- [1] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori, “Soft Tensegrity Robot Driven by Thin Artificial Muscles for the Exploration of Unknown Spatial Configurations,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 5349-5356, 2022.
- [2] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Large Torsion Thin Artificial Muscles Tensegrity Structure for Twist Manipulation,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 8, No. 3, pp. 1207-1214, 2023.
- [3] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Active-Bending Six-Bar Tensegrity Modular Robot Driven by Thin Artificial Muscles,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 8, No. 11, pp. 7400-7407, 2023.
- [4] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Zebing Mao, Gen Endo, and Koichi Suzumori, “Enhancement of Thin McKibben Muscle Durability Under Repetitive Actuation in a Bent State,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 9, No. 11, pp. 9685-9692, 2024.
- [5] Ryota Kobayashi, Shoma Tanaka, Hiroyuki Nabae, Gen Endo and Koichi Suzumori, “McKibben Muscle With Elastic Thread Embedded in Parallel Extending Range of Motion of Muscle-Driven Robots,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 10, No. 3, pp. 2534-2541, 2025.

招待講演

- [1] Ryota Kobayashi, “Tensegrity Robots Driven by Thin Pneumatic Artificial Muscles,” *ROBOSOFT 2022 Tensegrity Workshop*, 2022.
- [2] Ryota Kobayashi, “Soft Tensegrity Robots Driven by Thin McKibben Muscles,” *International Seminar on Science & Robotics*, 2023.
- [3] Ryota Kobayashi, “Soft Tensegrity Modules with Thin Artificial Muscles and Their Robotic Applications,” *IROS 2023 Tensegrity Robotics Workshop*, 2023.

- [4] Ryota Kobayashi, “Stretchable McKibben Muscles and Their Application to Tensegrity Robots,” RoboSoft 2025 Tensegrity Workshop, 2025.

査読付き国際会議発表

- [1] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, Koichi Suzumori, “Soft Tensegrity Robot Driven by Thin Artificial Muscles for the Exploration of Unknown Spatial Configurations,” the 2022 IEEE-RAS International Conference on Soft Robotics (RoboSoft2022), 2022.
- [2] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, “Large Torsion Thin Artificial Muscles Tensegrity Structure for Twist Manipulation,” the 2023 IEEE-RAS International Conference on Soft Robotics (RoboSoft2023), 2023.
- [3] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Active-Bending Six-Bar Tensegrity Modular Robot Driven by Thin Artificial Muscles,” the 2024 IEEE-RAS International Conference on Soft Robotics (RoboSoft2024), 2024.
- [4] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Zebing Mao, Gen Endo, and Koichi Suzumori, “Enhancement of Thin McKibben Muscle Durability Under Repetitive Actuation in a Bent State,” the International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2025), 2025.
- [5] Ryota Kobayashi, Shoma Tanaka, Hiroyuki Nabae, Gen Endo and Koichi Suzumori, “McKibben Muscle With Elastic Thread Embedded in Parallel Extending Range of Motion of Muscle-Driven Robots,” the 8th IEEE-RAS International Conference on Soft Robotics (RoboSoft2025), 2025.

査読なし国際会議発表

- [1] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, “Soft Tensegrity Gripper,” ROBOSOFT 2023 Soft Grippers: From the Labs to the Market, 2023.
- [2] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Ball Throwing Tensegrity Robot Driven by Thin Pneumatic Artificial Muscles,” IROS 2023 Tensegrity Robotics Workshop, 2023.

国内会議発表

- [1] 小林亮太, 難波江裕之, 遠藤玄, 鈴森康一, “細径人工筋駆動型ソフトテンセグリティロボット”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2022.

- [2] 小林亮太, 難波江裕之, 遠藤玄, 鈴森康一, “ソフトテンセグリティーロボットの地中移動実験”, 第 40 回日本ロボット学会学術講演会, 2022.
- [3] 小林亮太, 難波江裕之, 鈴森康一, “ねじり動作を行うソフトテンセグリティーロボット”, 第 23 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2022.
- [4] 小林亮太, 難波江裕之, 鈴森康一, “大ねじり変形と把持動作の組み合わせによるソフトテンセグリティーロボット”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023, 2023.
- [5] 小林亮太, 難波江裕之, 鈴森康一, “大曲げ変形が可能なソフトテンセグリティーモジュール”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023, 2023.
- [6] 小林亮太, 難波江裕之, 鈴森康一, “大きな収縮変形を生じるテンセグリティーモジュールの軸方向発生力”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023, 2023.
- [7] 小林亮太, 難波江裕之, 鈴森康一, “曲げ動作を行うソフトテンセグリティーロボット”, 第 41 回日本ロボット学会学術講演会”, 2023.
- [8] 小林亮太, “高い形状適応性を有するソフトテンセグリティーロボット”, 身体性認知科学と実世界応用に関する若手研究会 (ECSRA), 2023.
- [9] 小林亮太, 難波江裕之, 鈴森康一, “屈曲状態での連続駆動における細径マッキベン型人工筋の高耐久化”, 第 24 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 (SI2023), 2023.
- [10] 小林亮太, 難波江裕之, 遠藤玄, 鈴森康一, “高耐久化した細径マッキベン型人工筋を用いたソフトテンセグリティーロボットアームの投球実験”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2024, 2024.
- [11] 小林亮太, 難波江裕之, 鈴森康一, “並列に配置した弾性紐によるマッキベン型人工筋の受動的伸長”, 第 43 回日本ロボット学会学術講演会, 2025.
- [12] 小林亮太, 難波江裕之, 鈴森康一, “受動的伸張性を有するマッキベン型人工筋と空圧シリンダによるソフトテンセグリティーロボット”, 第 26 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会, 2025.

表彰

- [1] 小林亮太, 第 23 回計測自動制御学会 システムインテグレーション部門講演会 優秀講演賞, 計測自動制御学会, 2022.
- [2] Ryota Kobayashi, Best Poster Award, IEEE RoboSoft 2023 Soft Grippers: From the Labs to the Market, 2023.
- [3] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, Best Paper Award Finalist, 2023 IEEE International Conference on Soft Robotics, 2023.
- [4] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, Best Poster Award, IROS 2023 Tensegrity Robotics Workshop, 2023.
- [5] 小林亮太, 第 39 回 日本ロボット学会研究奨励賞, 2024.

本論文に関係しない業績

学術論文

- [1] Zebing Mao, Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Multimodal Strain Sensing System for Shape Recognition of Tensegrity Structures by Combining Traditional Regression and Deep Learning Approaches,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, Volume 9, Issue 11, pp. 10050-10056, 2024.
- [2] Jan Petrs, Ryota Kobayashi, Fuda van Diggelen, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, and Dario Floreano, “Evolutionary Co-Design and Fabrication of Tensegrity Joints with Integrated Pneumatic Artificial Muscles,” *Advanced Intelligent Systems*, Volume 7, Issue 9, 2500310, 2025.

査読あり国際会議発表

- [1] Shoma Tanaka, Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Fiber Jamming Mechanism for Back-Stretchable McKibben Muscles,” the 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2024), 2024.
- [2] Shoma Tanaka, Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Time-Lag Generation Mechanical Valve for Enhancing Time Response of Back-Stretchable McKibben Muscles,” the 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2025), Page 679-683, 2025.
- [3] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori, “Soft Linear Actuator Utilizing Electrically Vibrating Threads,” the 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2025), Page 70-75, 2025.
- [4] Zebing Mao, Jianhui Wang, Zijie Meng, Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, “Multimodal Strain Sensing System for Shape Recognition of Tensegrity Structures by Combining Traditional Regression and Deep Learning Approaches,” 2025 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2025.

査読なし国際会議発表

- [1] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori, “Preliminary Study on Soft Tensegrity Modules for Morphological Robotic Applications,” RoboSoft 2024 Shape Morphing in Soft Robots: Debates, Challenges and Opportunities, 2024.
- [2] Hiroyuki Nabae, Ryota Kobayashi, and Koichi Suzumori, “Preliminary Study on Application of Tensegrity Module Driven by Thin McKibben Muscles to Variable-diameter Wheels,” The 8th Jc-IFTToMM International Symposium in conjunction with The 31st Jc-IFTToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms, 2025.

国内会議発表

- [1] 小林亮太, 難波江裕之, 遠藤玄, 鈴森康一, “導電性をもつ糸による搬送機構の提案”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2022.

受賞

- [1] Shoma Tanaka, Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, and Koichi Suzumori, The IEEE/SICE SII2024 Best Soft Robotic Paper Award, The 2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2024), 2024.
- [2] Ryota Kobayashi, Hiroyuki Nabae, Gen Endo, and Koichi Suzumori, Best Demo Award, RoboSoft 2024 Shape Morphing in Soft Robots: Debates, Challenges and Opportunities, 2024.

謝辞

本論文は筆者が東京工業大学，東京科学大学工学院機械系機械コースに在学中，鈴森康一名誉教授，遠藤玄教授，難波江裕之准教授の御指導の下に執筆したものです。

始めに，学士課程と修士課程での指導教員としてお世話になった鈴森康一名誉教授に心より感謝申し上げます。高校生の時に訪れたオープンキャンパス以来興味のあった鈴森研究室への配属が決まったときには本当に嬉しかったことを覚えています。研究室所属時には，研究成果を出せるかわからず，学士課程を卒業できるかすら不安でした。そんな中での「僕が指導してきた学生のほとんどが卒業できた」という言葉には若干の不安が残りましたが，心から面白いと思える研究を目指させる指導のおかげで，研究活動を楽しむことができました。指導教員が鈴森先生でなければ，研究をここまで楽しいと思い熱中することはなかったと思います。また，博士課程への進学を勧めていただいたり，EPFL との共同研究，スイスへの留学のきっかけを作ってくださいたり，多くの貴重な経験をさせていただきました。5年間もの間，何かに悩んでいる際には常に励ましの言葉を頂き，精神的にも本当に助けられました。

博士課程の初めの1年半の間指導教員を引き受けてくださった遠藤玄教授に感謝申し上げます。ゼミや学会の発表練習等で意見を頂いたり，四脚ロボットに関する知見を頂きました。博士課程の最後の1年間指導教員を引き受けてくださった難波江裕之准教授に感謝申し上げます。研究を進めるうえで様々なご意見を頂きました。投稿論文の執筆時や博士論文執筆時に非常にお世話になりました。博士論文執筆時や発表練習において助言をいただいた有賀崇紘助教に感謝いたします。そして，本博士論文審査を引き受けて下さった前田真吾教授，塚越秀行教授，中西洋喜教授に心よりお礼申し上げます。

また，研究室の多くの先輩，同期，後輩に大変お世話になりました。まず，高田さんに心より感謝申し上げます。高田さんは毎日12時間以上研究室におり，その姿に圧倒されておりました。論文の書き方を含め研究に関する様々なことを教えていただきました。学部4年生の頃にひたすら研究を頑張れたのは高田さんの影響が大きかったと思います。Jang さん，Sarin さん，Chris さん，謝君には，国際学会での英語の発表練習に付き合ってくださいました。初めての国際学会のときには英語での発表に大きな不安を感じていましたが，先輩方に手伝っていただいた練習や多くの学会発表を通して，自信をもって研究発表できるようになりました。また，日々の研究活動において様々な助言や考えるきっかけを頂いた石川さんに感謝いたします。修士課程までは同期の穴倉，島津，鎮目，大澤さん，岩原，定近，Na 君に大変お世話になりました。特に穴倉君とは一緒に夜遅くまで残って毎日のように夜ご飯へ行き，一緒に研究を行い，励みになりました。もっと遅くまで一緒に研究していた Na 君とは限界まで研究をする日が多くあり，とても楽しかった

です。そして、修士課程を終えて同期が就職してからは多くの後輩にもお世話になりました。児玉君や、坂口君、栗原君、笹井君には物を作る際に様々な相談をさせていただきました。感謝申し上げます。また、児玉君、長谷川君、坂口君をはじめとして共に博士進学をする後輩が多くいたことは私にとっても心強かったです。そして、毎日ご飯と一緒に食べてくれた後輩に感謝いたします。時に退屈な作業しかない日々もありましたが、楽しく過ごすことができました。様々な事務的な手続きをしていただいた鈴木さんをはじめとする秘書の方々に感謝いたします。

また、学会で出会った多くの方々にも感謝しております。東京大学 JSK の河原塚さんには論文執筆において大きな影響を受けました。私が修士 1 年の時の ROBOMECH で初めて会ったときにジャーナルは 2 週間あれば書けると言っていたのが衝撃的で、私も成果が出た時には素早く投稿できるよう心掛けていました。また、JSK の井上君のワイヤ駆動ロボット CubiX は本当に面白く、自分も何かもっと面白い研究をしたいと感じていました。第 5 章の伸びる人工筋やその応用である第 6 章、第 7 章の拡大変形を伴うテンセグリティはそんな中で思いつくことができたアイデアです。自分の中で心から面白いと思える研究ができ、良い刺激を受けられました。重宗先生には、私が博士課程へ進学するかどうか迷っていた時からお世話になりました。常に厳しい道を選ぶようにしていると仰っていたことが頭に残っており、自分も一旦博士に進学してみようと思うことができました。多田隈先生は、初めて会ったときから私の顔を覚えてくださっていて、私のテンセグリティの研究をいつも褒めていただき、非常に励みになっていました。平井先生には、先生の研究室でも昔テンセグリティの研究をしていたということで、私のテンセグリティロボットの研究に興味を持っていただき、嬉しかったです。また、初めての国際学会の参加の際に羽田空港で飛行機の乗り方を親身に教えてくださりました。多くの国際学会や留学を経て、今では一人で海外へ行けるようになりました。そして、RoboSoft や IROS といった国際学会でのワークショップで話す機会をくださった John Rieffel 先生、Xiaonan Sean Huang 先生に感謝いたします。私が学生であることを知ってか、知らずにかはわかりませんが、私の研究を気に入ってくださり招待講演をさせていただいたことは本当に嬉しかったです。招待講演を行うことは私にとって本当に恐怖とも思える経験でしたが、ひたすら頑張ってみればなんとかなると思えるようになることができました。

そして、留学を受け入れてくださった Laboratory of Intelligent Systems, EPFL の Dario Floreano 教授にも心より感謝申し上げます。英語を理解できていないことも多くあったにも関わらず、スイスで様々な機会を与えてくださり、非常に充実した異なる環境での研究生生活を送ることができました。また、LIS で一緒にテンセグリティの研究を行っていた Jan, Alex に感謝いたします。また、Fuda とは foosball の練習を一緒にしたり、日頃から色々手伝ってもらい、本当にお世話になりました。

そのほか、博士課程での生活を支えてくれた高校生時代の友人や、学内外で出会った友人、スイスで出会った友人に感謝いたします。日本の工学の発展に寄与できるよう、これからも一生懸命頑張っていこうと思います。

最後に、私の博士進学を応援し、食費や生活費で支えてくれた親、姉に心より感謝申し上げます。ありがとうございました。

小林亮太