

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	バルーン型ジャコメッティアーム 2 号機の試作
Title(English)	
著者(和文)	武市将, 鈴森康一, 遠藤玄, 難波江裕之
Authors(English)	Masashi Takeichi, Koichi Suzumori, Gen Endo, Hiroyuki Nabae
出典(和文)	第34回日本ロボット学会学術講演会 予稿集, Vol. , No. , RSJ2016AC2U1-05
Citation(English)	Proceedings of the 34th Annual Conference of the Robotics Society of Japan, Vol. , No. , RSJ2016AC2U1-05
発行日 / Pub. date	2016, 9
Note	このファイルは著者（最終）版です。 This file is author (final) version.

バルーン型ジャコメッティアーム2号機の試作

○武市将(東京工業大学) 鈴森康一(東京工業大学)

遠藤玄(東京工業大学) 難波江裕之(東京工業大学)

1. 緒言

これまで開発されてきたロボットの多くは、金属製のボディにモータ・センサ・リンク機構を用いて構成されている。これらのロボットは年々高性能化・高機能化が進む一方、重量の増加やシステムの複雑化も伴う。これらは扱いづらい・暴走時に危険であるといった問題につながり、しばしば現場投入の弊害になる。そこで我々は、こうしたロボットとは真逆ともいえる新しい考え方として「Giacometti Robotics」を提案している[1]。Giacometti Roboticsでは、そのロボットが持つ本質機能のみに特化し、他のあらゆる機能を削ぎ落とした極めて軽量で簡素なロボットの実現を目指している。Giacomettiはスイス出身の20世紀の彫刻家で、あらゆる肉を削ぎ落し非常に細長くシンプルな彫刻が有名である。この彫刻が我々の抱くロボット像のイメージに近いのでそう名付けた。Giacometti Roboticsにおけるロボットは扱いやすく周りに危害を加えにくいので、今後のロボティクス分野の新たな一領域になるのではないかと考えている。Giacometti Roboticsの例として、これまで長尺軽量細径な6脚のロボット[2]や長尺、細径なロボットアーム[3]を提案・試作した。筆者らはインフレータブルな構造材を用いた軽量で安全なロボットアームであるバルーン型ジャコメッティアームを試作しており[4]、本稿ではそのロボットアームを改良したバルーン型ジャコメッティアーム2号機の試作を行った。

バルーン型ジャコメッティームは, **Giacometti Robotics**の特徴である安全性, 簡素な構造を活用することで, 災害現場での初期観察を目的としている. このような目的でこれまでに開発された長尺アームの例として, **CEA LIST**の**AIA**[5], **OCロボティクス社**の**Snake-arm Robots**[6], **東工大**の**Mini 3D CT-Arm**[7]などがある. **AIA**は高機能で環境耐性も高いが, 全体でかなりのパワーを必要とするため事故時のリスクが高い. **Snake-arm Robots**や**Mini 3D CT-Arm**はどちらもワイヤ駆動であるが, 機構が複雑でワイヤの張力にも限界があり, 10mを超える長さのものはできていない. 他に災害現場で使われるロボット

は、小型無人機いわゆるドローンや、階段やがれきを走破する脚型・クローラ型ロボットなどがある。これらについて表1のように比較を行った。ジャコメッティアームはその他のロボットに比べ、安全性・扱いやすさ・コストにおいて優れており、これらは現場投入の判断を決める重要な要素であろう。ジャコメッティアームと最も近い位置づけにあるものはドローンである。ジャコメッティアームの捜査範囲はドローンに劣るものの、墜落したときの危険性が少なく据置型で電池交換が不要であるため連続した観察に使えるという点で有利である。

前述したように筆者らは、ヘリウムを充填したインフレータブルな構造材と後述する細径McKibben型人工筋肉を用いたバルーン型ジャコメッティアームを試作した[4]。しかし、この試作では

- ・アームモデル化が不十分かつ可動域増大のための2関節筋配置に起因する精度の低下
- ・組み立ての作業工程が多く、多大な時間が必要
- ・各節をワイヤでつないでいることによる、関節の動作不良

といった問題があった。今回は、関節角度に関するモデル化ならびに実験により制御精度を高めた。また、全体の組み立てを単純なものし作業時間を減らすため、ロボットアームの構造を大幅に変更した(図1)。

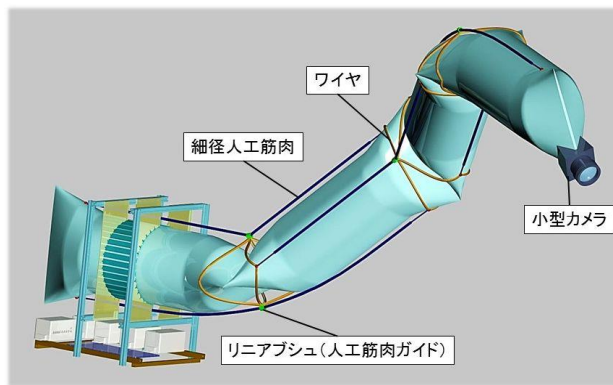


図 1 開発するバルーン型ジャコメッティアーム 2 号機 (3 節モデル) の概略図

表1 災害現場で使われる従来のロボットとの比較

	作業範囲	稼働時間	安全性	扱い易さ	精度	可能な作業	コスト
ジャコメッティアーム	☆☆	☆☆☆	☆☆☆	☆☆	☆	☆	☆☆☆
従来の長尺ロボットアーム	☆	☆☆☆	☆	☆	☆☆	☆☆☆	☆
小型無人機（ドローン）	☆☆☆	☆	☆☆	☆☆☆	☆	☆	☆☆
クローラ型・脚型ロボット	☆	☆☆	☆	☆	☆☆	☆☆☆	☆

2. バルーン型ジャコメッティアームの構成

バルーン型ジャコメッティアームはアクチュエータに我々が開発した細径 McKibben 型人工筋肉を用いている[8]. この細径 McKibben 型人工筋肉は、直径 1.8mm, 質量 1g/m, 0.3MPa 印加時に最大収縮率 26%, 最大収縮力 14N と従来のアクチュエータに比べ非常に大きな「発生力/自重」比を持つ.

また、構造材をインフレータブルなものし、内部にヘリウムを充填させた. この細径 McKibben 型人工筋肉とインフレータブルな構造材の組み合わせは

- ・アクチュエータ自体が数 g なのでヘリウムの浮力による自重補償が可能
 - ・ワイヤ駆動のように基部でプーリ軸間に働く莫大な圧縮力が発生しないため、インフレータブルな構造材も座屈することなく使用可能
 - ・アームの自重を全てヘリウムで補償しているので、節の延長時も各関節の駆動に必要なトルクに変化がなく、出力が限定された細径 McKibben 型人工筋肉でも駆動可能
- といった利点がある.

3 節のバルーン型ジャコメッティアーム 2 号機の概観図を図 1 に示す. このロボットアームは全ての節が一体となっている. 関節部では熱溶着により、アームを窄めることでピッチ軸あるいはヨー軸まわりのみ回転可能な構造となっている (図 2). 先端に取り付けたカメラ (CP-100B, 本体は 2g) で観察を行う. 人工筋肉は構造材の上下あるいは左右に関節をまたぐように配置されており、その中間にリニアブッシュ (オイレス #80 ブッシュ(80B)) のガイドを付けることで、内側に曲がるときは人工筋肉の経路長が短くなることを防ぎ、外側に曲がるときは構造材の中心軸を通る回転軸に垂直な面からズレないようにする役割を果たしている. 将来的には、20 節、20m、20 自由度のロボットアームを開発予定である.

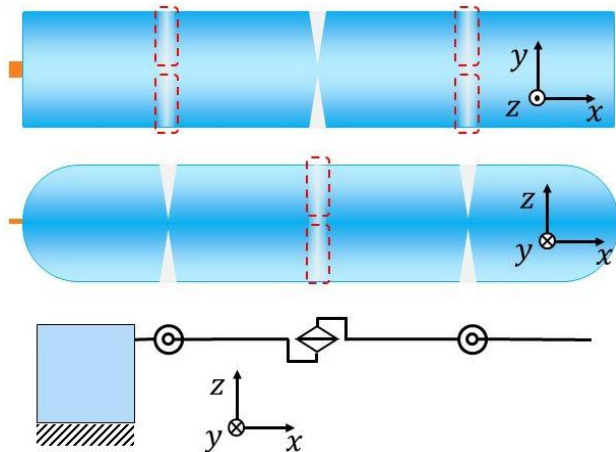


図 2 バルーン型ジャコメッティアーム 2 号機熱溶着部分 (点線囲い) と軸配置概略図

3. 運動学モデル

人工筋肉は収縮率・収縮力・印加圧の 3 つのパラメータが相互に作用しあう. 収縮率・収縮力決定時に要求される印加圧は既に実験的に求めた[4]. 関節角度に応じ、適切な収縮率・収縮力を求めるために、ロボットアームのリンクと人工筋肉の経路に関するモデルを構築した. 入力は印加圧のみで出力は収縮力・収縮率である. 関節が曲がった時に人工筋肉が内側にある場合 (図 3) と、外側にある場合 (図 4) の 2 種類について考察した. 人工筋肉は図 3 では A-H-C を通り、図 4 では M-P-O-Q-N を通っている. 常に関節に 0.3Nm のトルクを発生させることとした. 図 3 では、幾何的な関係から、

$$AH = (1 - \epsilon)L_{\text{pam}}/2 \quad (1)$$

$$BH = L_{\text{wire}}/2 \quad (2)$$

が得られる. ここで ϵ は人工筋肉の収縮率, L_{pam} は人工筋肉の長さ, L_{wire} は点 H にあるリニアブッシュを通した両端が B, D で結ばれているワイヤの長さである. また、静力学的な釣り合いから

$$\mathbf{F}_{\text{in}} + \mathbf{F}_{\text{w}} = t\mathbf{AC} \quad (3)$$

$$\mathbf{L}_{\text{EC}} \times \mathbf{F}_{\text{in}} + \mathbf{L}_{\text{ED}} \times \mathbf{F}_{\text{w}} = [0 \ 0 \ 0.3 + \alpha]^T \quad (C_y > H_y) \quad (4)$$

$$\mathbf{L}_{\text{EC}} \times \mathbf{F}_{\text{in}} = [0 \ 0 \ 0.3 + \alpha]^T \quad (C_y > H_y) \quad (5)$$

が成り立つ. ここで t は式(3)を満たすスカラー量, α は実験から得られる補正項, $\mathbf{L}_{\text{AB}}$ は点 A から点 B に向かう長さ AB のベクトル, A_y は点 A の y 座標である.

図 4 に関しても同様に幾何学的な関係から、

$$MP + PO = (1 - \epsilon)L_{\text{pam}}/2 \quad (N_y > P_y) \quad (6)$$

$$MO = (1 - \epsilon)L_{\text{pam}}/2 \quad (N_y < P_y) \quad (7)$$

が得られる. また、静力学的な釣り合いから

$$\mathbf{F}_{\text{pm}} = \mathbf{F}_{\text{out}} \times \left(\frac{L_{\text{QN}}}{QN} + \frac{L_{\text{QP}}}{QP} \right) \quad (8)$$

$$\mathbf{L}_{\text{EN}} \times \mathbf{F}_{\text{out}} + \mathbf{L}_{\text{EQ}} \times \mathbf{F}_{\text{pm}} = -[0 \ 0 \ 0.3 + \beta]^T \quad (N_y > P_y) \quad (10)$$

$$\mathbf{L}_{\text{EN}} \times \mathbf{F}_{\text{out}} = -[0 \ 0 \ 0.3 + \beta]^T \quad (N_y < P_y) \quad (11)$$

が成り立つ. ここで β は実験から得られる補正項である. これらのモデルから得られた人工筋肉の経路長 $(1 - \epsilon)L_{\text{pam}}$ と収縮力 $F_{\text{in}}, F_{\text{out}}$ を図 5 に示す. 図 5 では、 α, β は 0 としてある.

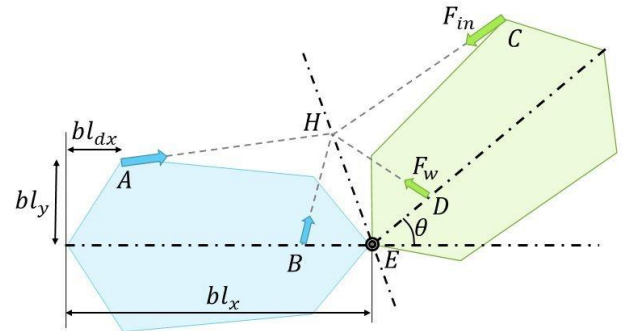


図 3 関節が曲がった時に内側にある人工筋肉の経路と力の関係を表したモデル図

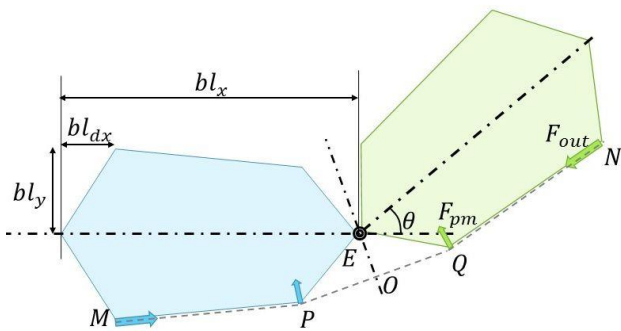


図 4 関節が曲がった時に外側にある人工筋肉の経路と力の関係を表したモデル図

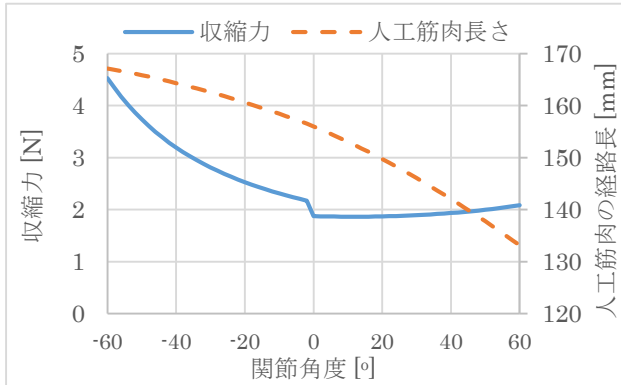


図 5 モデルから得られた関節角度に応じた収縮力と人工筋肉の経路長の関係

また実際の関節に 0.3Nm のトルクを与え、そのときの角度と人工筋肉の経路長、収縮力の関係調べる実験を行った。この結果を図 6 に示す。モデルと実験では大きく離れている部分が 2 つあった。0 度～40 度付近で真ん中が凹んでいるが、モデルではその影響が若干しか現れていない。50 度～60 度の付近の差はバルーンどうしの干渉による影響と考えられる。この影響は -60 度～-50 度にも現れるとみられる。バルーンの干渉による抵抗は釣り合いに用いている 0.3Nm のトルクと同程度以上発生するので、外側の人工筋肉の出力を減らし、内側の人工筋肉の出力を高めればよいといえる。この 2 つと 0 度付近を滑らかに繋ぐ補正項を加えた。加えた補正項は以下の項目である。

$$\alpha = 0.05 \times \frac{(\theta - 20)^2}{400} - 0.05 \quad (0 \leq \theta \leq 40)$$

$$\alpha = 0.15 \times \frac{(\theta - 20)^2}{400} - 0.25 \quad (50 \leq \theta)$$

$$\beta = 0.3 \times \theta / 2 \quad (0 \leq \theta \leq -2)$$

$$\beta = -0.3 \quad (-40 < \theta \leq -2)$$

$$\beta = -0.25 \times \frac{(40 - \theta)^2}{400} - 0.3 \quad (\theta \leq -40)$$

この結果は同じく図 6 に示してある。これにより、人工筋肉の経路長から算出した収縮率と収縮力に応じ適切な圧力を加えることで関節角度を任意に変更可能となった。

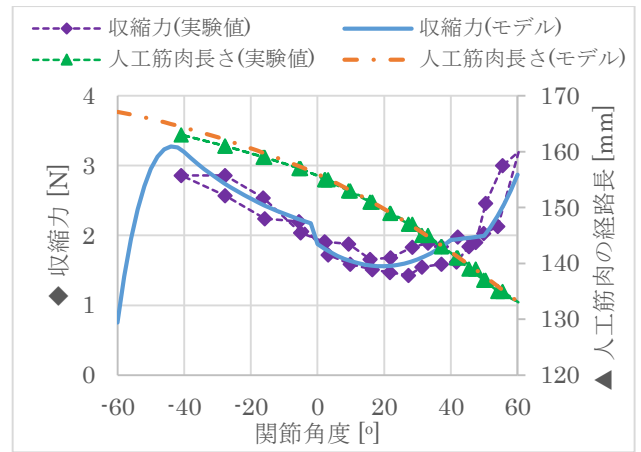


図 6 実験から得られた関節角度に応じた収縮力と人工筋肉の経路長の関係とそれを元に補正項を加えたモデルから得られた収縮力と人工筋肉の経路長

4. 実験

4.1 1 節による基礎特性確認

3 章でモデル化を行ったので、そのモデルをもとに 1 節を用いて指令角度と実際の角度の関係について調べた。その様子を図 7 に、結果を図 8 に示す。0 度付近は ± 15 度程度ずれているが、それ以外は概ね一致しており、これによりリンクのモデルの有用性を確認できた。0 度付近で大きくずれている理由としては、0 度が特異点で不安定な状態になりやすいということと、人工筋肉の往復運動にヒステリシスがあることがあげられる。



図 7 バルーン型ジャコメッティアーム 2 号機の 1 節を用いた指令角度と実際の角度の比較実験の様子

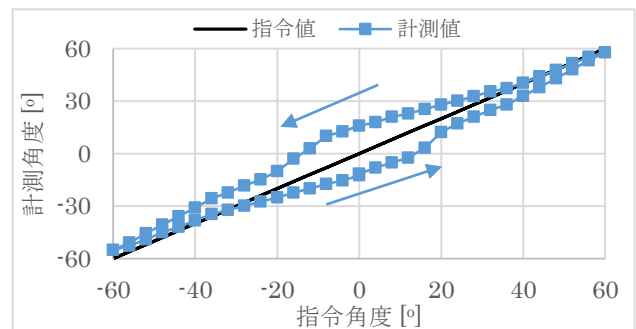


図 8 モデルから得られた情報を用いた指令値と計測値の比較実験

4.2 3 節による節延長時の動作実験

4.1 でモデルを適用した場合の有用性を確認できたので、これを延長し 3 節のバルーン型ジャコメッティアーム 2 号機で動作実験を行った。その様子を図 9 に示す。また、先端にカメラを取り付け、初期観察に十分な映像を取得可能か検証した。その様子を図 10 に示す。組み立てに際し、人工筋肉を印加前の構造材に取り付けた状態であれば、根本節からヘリウムを加えるだけで組み立て可能であるので、1 号機の 1/3 ほどに時間を短縮できた。この実験では、4.1 の実験同様 0 度付近においては指令値と異なる関節角度であったが、目視で修正可能な範囲であり、各関節の良好な動作が確認できた。また、シミュレーション上ではおおよそ高さ 4m、幅 3m のワークスペースがあり、実際の実験では高さ 3m 幅 2.8m の廊下全てにアーム先端が行き届くことを確認した。カメラ映像では天井や壁際・床の様子を観察することが出来たことから有用性を確認できた。



図 9 3 節の動作実験の様子



図 10 先端にカメラを搭載し、カメラから周囲の状況を確認する実験の様子

5. 結果

今回バルーン型ジャコメッティアーム 2 号機について、節のモデル化と 1 節・3 節モデルの試作・実験を行った。これらにより以下のことが確認できた。

- ・関節角度に応じた人工筋肉の長さや収縮力を算出するモデルを構築し、実機でほぼ予想どおり

動作することを確認した

- ・全ての節を一体で設計することで、組み立て時間の短縮を確認した

今後の課題として、以下のことがあげられる。

- ・0 度付近の動作に関し、ヒステリシスを考慮したより精度の高いモデルの構築
- ・実際に 20 節を繋げた片持ち 20m のバルーン型ジャコメッティアーム 2 号機の製作・実験

謝辞

本研究は JSPS 科研費 15K13907 の助成を受けて実施しました。

参考文献

- [1] K. Suzumori, "New Pneumatic Artificial Muscle Realizing Giacometti Robotics and Soft Robotics", in Okinawa, Japan, The 6th International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (ICMDT 2015), 2015, No.15 – 204, pp. 4 – 5.
- [2] Ahmad Athif MOHD FAUDZI, Koichi SUZUMORI, Satoshi KITANO, Shunichi KURUMAYA, "Giacometti Six-legged Walking Robot - Leg Design Mechanism using Soft actuator – “ ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016, 1A1-06b6(1) ” - “ 1A1-06b6(2) ”, 2016-06-10
- [3] 稲岡敬之, 鈴森康一, ” 超長尺軽量細径ロボットアームの試作 ”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2015, 1A1-A10(1) ” - “ 1A1-A10(3), 2015.
- [4] 武市将, 鈴森康一, ” バルーン型ジャコメッティアームの試作 ” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016, 2A1-17a6(1) ” - “ 2A1-17a6(3) ”, 2016-06-10
- [5] Y. Perrot, J. J. Cordier, J. P. Fricconneau, L. Gargiulo, E. Martin, J. D. Palmer, A. Tesini, “ITER articulated inspection arm (AIA): R&d progress on vacuum and temperature technology for remote handling”, Fusion Engineering and Design, Volumes 75–79, November 2005, Pages 537–541, Proceedings of the 23rd Symposium of Fusion Technology — SOFT 23
- [6] OC Robotics, <http://www.ocrobotics.com/>, accessed: February 29, 2016.
- [7] A. Horigome, H. Yamada, G. Endo, S. Sen, “Development of a coupled tendon-driven 3D multi-joint manipulator”, Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on, pp.5915 – 5920, 2014.
- [8] 高岡真幸, 鈴森康一, 脇元修一, 他, ” 生体模倣ロボット機構実現に向けた多繊維構造マッキベン人工筋 ”, 第 14 回システムインテグレーション部門講演会(SI2013) システム構成学論文集第 6 巻, pp.1767-1770, 2013.