

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：34315

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25630099

研究課題名(和文)プラスチック膜材料による極軽量多自由度マニピュレータの運動制御

研究課題名(英文) Motion Control of Ultra-lightweight Multi-DOF Manipulators made by Plastic Films

研究代表者

川村 貞夫 (Kawamura, Sadao)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号：20186141

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：4自由度のインフレータブルロボットアームを製作した。関節の回転トルクを効率良くリンクに伝達するための関節部を設計開発した。関節部内の積層要素に空気圧の加圧によって、要素の法線方向の力を制御する。この方式で、関節角速度をフィードバック信号に利用することによって、擬似的粘性を生み出すことに成功した。これはFPGAを利用した高速ビジョンによって達成された。リンクの曲げが発生する場合にも有効なビジュアルフィードバック制御法を開発し、3自由度の本ロボットアームに適用した。その結果、1mm以下の位置決めが達成され、プラスチック材料の空気圧駆動システムとしては、従来達成できない精度を実現した。

研究成果の概要(英文)：An inflatable robot arm with 4DOF was developed in this research. A special joint was designed to effectively transmit the torque generated by the actuators. By pressurizing a multi-layer element in the joint, the normal force to the multi-layer element is controlled to generate appropriate tangential force. Basing on this idea, quasi-viscosity was produced by using feedback control of joint angular velocity. It was implemented by high speed visual feedback of FPGA. A new visual feedback control method was developed for inflatable robot arms which is applicable for flexible links. An inflatable robot arm with 3DOF was successfully controlled by the developed method. It was experimentally confirmed that the robot could stop within 1mm error from desired positions. This result cannot be reached by previous control methods.

研究分野：ロボティクス

キーワード：ロボットアーム インフレータブル 空気圧駆動 ビジュアルフィードバック制御

1. 研究開始当初の背景

産業用ロボットに代表される従来のロボットアームに比して、極端に重量を低減したロボットは、新しい利用分野が期待される。たとえば、人に対する安全性を保證する際に、極軽量であることは有利である。それによって、ロボットは産業分野だけでなく、人と機械的に接触する生活支援分野への応用が広がる。本研究では、ロボット運動部分の極軽量化が、安全性の本質的保証に重要と考える。そこで、ゴム材料ではなく、より軽量のプラスチック材料による可膨張構造を、本体とアクチュエータに利用する。このようなロボットでは、柔軟性が高いため剛体構造のロボットに比して、位置決めや振動制御が困難である。そこで、本研究ではプラスチック材料の積層型受動要素により、位置決め精度や振動抑制を改善し、カメラ情報のセンサフィードバックにより運動性能を向上させる。全体として、材料・構造・要素・制御を統合して、高速・高精度な極軽量多自由度ロボット実現法を明らかにすることが目的である。

2. 研究の目的

本研究では、主な材料としてプラスチックフィルム状材料であるポリエチレン (Polyethylene) (以下, PE) とポリプロピレン (Polypropylene) (以下, PP) などを用いてロボットアームを開発した。また、リンクにおいてインフレータブル (Inflatable) 構造を用いている。インフレータブル構造とは、非伸縮性の柔らかい材料から作られた袋状の構造のことであり、その袋状構造の内部に圧力をかけることによって膨張し一定の形状を形成し一定の剛性を持つ構造である。インフレータブル構造は、内圧によって材料自体の剛性によらず高い剛性を持つことができる。また、内圧をかけない時は剛性が落ち平坦化することができるため、収納に有利である。一般的には、ゴムボート (Inflatable boat) やインフレータブル宇宙ステーション (Inflatable space station) などに用いられる。このような材料と構造を用いて、ロボットアームを構成することで極軽量・柔軟化を実現している。本研究で用いた4自由度インフレータブルロボットアーム図1に示す。

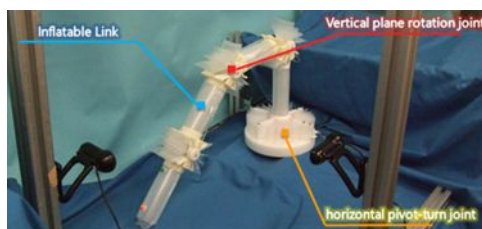


図1. 4自由度インフレータブルロボットアーム

3. 研究の方法

インフレータブルリンク

本ロボットアームにはリンクの極軽量化と

同時に柔軟化を実現するためにインフレータブル構造を用いている。この時リンクの材料は伸びない材料が適しているため、比較的弾性変形を行わない高分子材料であるPEを用いている。さらに、材料の剛性の強化のため、PEのリンクの外側にPPを溶着している。本インフレータブルリンクはPEのシートを用いてそれらを溶かし熱溶着することで構造を作っている。

本研究で開発したインフレータブルリンクは、内部に空気の配管を通すために改良した構造である。リンクの内部に配管を通すことによって配管の剛性もリンクの剛性として利用することができる。インフレータブルリンクはPEのシートを図2のように切り取り同じ2枚のシートを重ね、図2に示した線に沿って熱溶着を行い4つの袋を作る、それから両端の袋を溶着することで四角錐の形成する。リンクに内圧をかけることによって膨張し内部に空路を持つリンク構造となる。実際に製作したリンクを図3に示す。

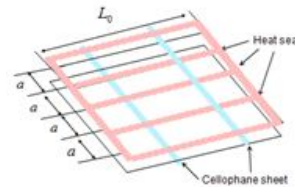


図2. リンクのシート



図3. インフレータブルリンク

袋型アクチュエータ

本ロボットアームのアクチュエータは、その全重量の削減のため空気圧駆動によるアクチュエータを用いる。ここで、ゴムのアクチュエータは加圧時に膨張し弾性体として変形するため、その変形に大きなエネルギーを使う。その反面、非伸縮性材料であるプラスチックフィルムアクチュエータを用いると加圧によって比較的少ないエネルギーを使うためエネルギー効率がいい。また、ゴムアクチュエータはゴムが膨張した時に外膜が薄くなり耐久性が減少する。それを防ぐためにはアクチュエータの外膜を厚くする必要があり比較的高重量となる。したがって、本研究では、非伸縮材料であるPEを用いてアクチュエータを製作した。

本研究に用いたアクチュエータはインフレータブルリンクと同様に熱溶着方式から袋状に制作する。アクチュエータの製作は、まず、PEのシートを図4のように12枚分切り取る。2枚を重ね図4に示した面を熱溶着し、切り取ったシートを5セット制作する。このように

作成したシートを重ね合わせ、シートの周りを熱溶着しつづけることによって図5のような形状にする。本アクチュエータの重量は、4.3[g]であった。

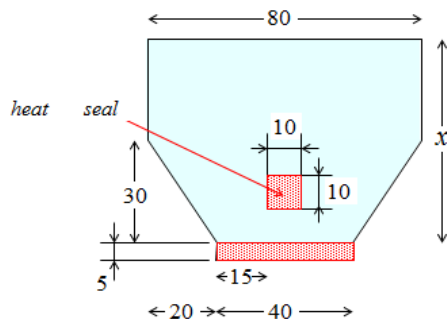


図4. アクチュエータ用シート

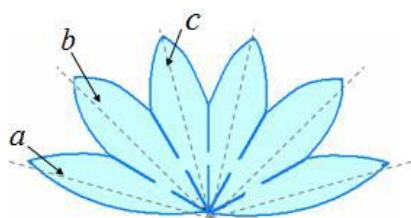


図5. アクチュエータ形状

本研究で提案したアクチュエータにおいては、アクチュエータの内圧、アクチュエータの開いた角度とアクチュエータの出力トルクにおいて特別な関係を持っている。本アクチュエータは、内圧によって発生トルクが線型的に増加する。また、アクチュエータの膨張率によって発生トルクが異なる。

関節構造部

本ロボットアームは根元側に回転軸関節を設け、軸周りでの回転を実現した。その材料はポリアセタールであり、NCによって形状を製作した。回転軸関節は、土台、回転部品、袋状アクチュエータの3つの構造から構成されている。回転軸関節の4つのアクチュエータにおいて、対角線上に配置されたアクチュエータは同じ空気室となっており、加圧時に同じ圧力となる。したがって、4つのアクチュエータは2つの空気室となり、拮抗する空気室の内圧の差によって駆動力を受け回転動作を行う。その動作の写真を図6に示す。

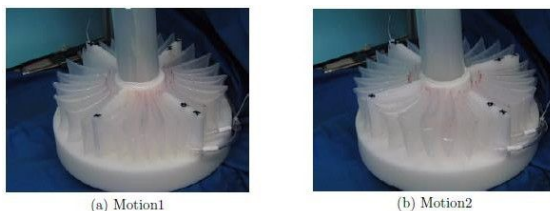


図6. 回転軸関節の駆動

また、本ロボットアームにおいては、リン

クの擦れれが大きく、アクチュエータの発生力が効率的に利用できないため、本ロボットアームの関節部に比較的剛体を取り付けることによって関節部の擦れ現象を防ぐ。平面内回転関節の材料は、ABS樹脂であり、3Dプリンター(MSYS社, uPrint)で製作した。リンクを差し込むことができるようになっており、リンクを加圧させることによってリンクと関節部を固定する。また、部品にはアクチュエータの力を受ける面が存在し、その面の間にPE製のアクチュエータを配置する。平面内回転関節には、2つのアクチュエータが配置されており、そのアクチュエータの差圧によってそれぞれのアクチュエータがトルクを発生させ関節部の駆動力となる構造を持っている。その動作の写真を図7に示す。

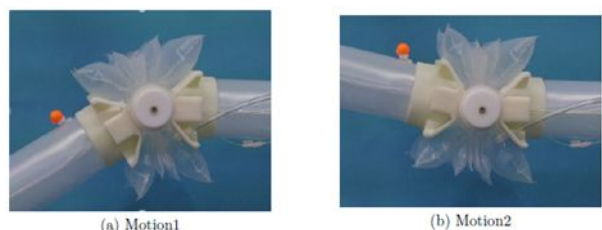


図7. 平面内回転関節の駆動

この平面内回転関節の全体重量は67.3[g]である。また、ロボットアームの振動と精度向上のため積層型可変粘性要素を取り付けた。

可変粘性要素

可変粘性要素(Variable viscous element)は、積層化されている面において面にかかる垂直抗力Nを加圧によって制御することで関節に発生する摩擦を変えることができる。その構造を図8に示す。

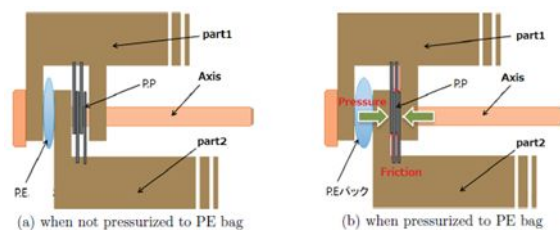


図8. 可変粘性要素の構造

粘性効果の検証には可変粘性要素を用いて実験を行った。その実験の環境を図9に示す。本実験において、剛体関節にカーボンのリンクを取り付け、手先に500[g]の荷重をかけ重力下で振り運動を行った。運動開始時の関節角度は約50[deg]であり、アクチュエータの駆動力は用いていない。また、関節の角度と角速度は関節中心とリンクの手先に取り付けたLEDの位置を高速カメラから読み取り画像の高速処理のためFPGAを用いて計算し可変粘性要素の圧力を制御することによって取得した。その実験結果を図10に示す。

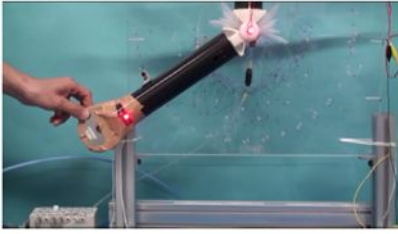


図 9 . 粘性効果確認実験の様子

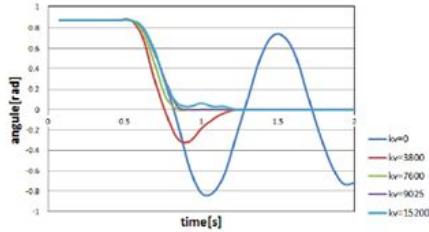


図 10 . 粘性効果確認実験の実験結果

図 10 において K_v は粘性係数を決めるゲインである．本実験結果から，可変粘性要素において粘性の効果が実現できることを確認した．

視覚フィードバック制御

ロボットアームは全体構造の軽量化のため，今回，ステレオカメラによる視覚フィードバック制御を用いた．ここで，リンクのたわみ等を許容可能な視覚フィードバック制御を用いる必要があるため，キャリブレーションが不要な視覚フィードバック制御を用いた．制御におけるアクチュエータの目標圧力は，

$$P_{di1} = P_{si1}(\hat{q}_{di}) - \frac{P_{ri}}{2}$$

$$P_{di2} = P_{si2}(\hat{q}_{di}) - \frac{P_{ri}}{2}$$

$$\mathbf{P}_r = \mathbf{K}_p \mathbf{J}^T (\mathbf{X}_d - \mathbf{X}) + \mathbf{K}_I \int \mathbf{J}^T (\mathbf{X}_d - \mathbf{X}) dt$$

から決まる．ここで， P_{di_j} は関節の j 番アクチュエータの目標圧力， $P_{si_j}(\hat{q}_{di})$ は関節の j 番アクチュエータの基準圧関数である． \mathbf{P}_r は関節トルク圧力， \mathbf{X}_d は，ロボットの目標手先位置， \mathbf{X} はカメラから計測したロボットの手先位置， \mathbf{J}^T はパラメータにおいて誤差を含むロボットのヤコビ行列である．

3 自由度インフレイタブルロボットアームの視覚フィードバック制御を行った．用いたカメラは logicool 社製の Web カメラであり，フレームレートは 30 [fps] であり，画素数は 640x480 [pixel] で撮影した．ロボットの手先位置はマーカーの色重心を算出することで計測している．

本ロボットアームにおいてはアクチュエータの配置位置のずれや関節部の摩擦などによって関節部にヒステリシスを持ってお

り，同様なアクチュエータの圧力においてもロボットの手先位置の再現性がよくないため，その手先位置の誤差をフィードバック制御によって補正している．今回は，制御中の全時間において目標位置でのヤコビ行列の各要素の推定値を定数として利用している．その実験結果を図 11 に示す．

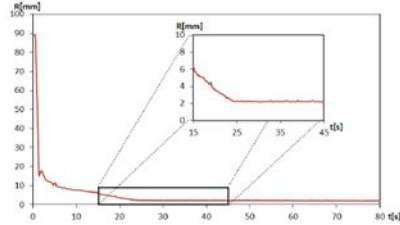


図 11 . 視覚フィードバック制御の実験結果

本実験においてロボットの手先位置は，約 20 [s] に収束しており，その時の手先位置精度は 2.1 [mm] を記録した．最終的な誤差はレギュレータの圧力の分解能の限界によって生じたものであると考えられる．また，収束時間についてはステレオカメラの高画素のデータの画像処理に時間がかかり，サンプリングタイムが 300 [ms] で非常に高かったため遅くなり，サンプリングタイムを早くすることによって高速に収束できると考えられる．

4 . 研究成果

本研究では，インフレイタブル構造を持つ極軽量・柔軟ロボットアームを設計製作した．本ロボットアームは主にポリエチレン，ポリプロピレン，ABS 樹脂などの高分子材料を用いて製作した．本研究で用いたリンクは，インフレイタブル構造を用いることで 200 [mm] のリンク長において約 10 [g] で製作できた．また，内部の圧力を変化させることで剛性を変えることができる．本ロボットアームに用いた袋状アクチュエータは，一関節において拮抗的に取り付けられ 2 つのアクチュエータの差圧によってトルクを発生させる．アクチュエータ単体の重量は 4.3 [g] であり，非常に軽量である．本アクチュエータは，一般的な空気圧駆動アクチュエータと異なるトルク特性を持っており，本研究ではその特性を確認した．

本ロボットアームの関節部には，軸周りの回転の実現やリンクがねじれる現象を防ぐために比較的剛性を持った ABS 樹脂を用いて平面内回転関節，旋回軸関節を用いた．平面内回転関節の重量は 67.3 [g] であり，旋回軸関節は可動部において 110.3 [g] であった．鉛直平面内回転関節には，可変粘性要素を用いた．FPGA と高速度カメラを利用した視覚フィードバック制御において，可変粘性要素のブレーキ効果と擬似的粘性効果を実現・確認した．

視覚フィードバックによる PI 制御を用いて 3 自由度ロボットアームを制御した結果，

手先位置精度は 2.1[mm]であった。本ロボットアームの構造を用いるとロボット全体が非常に軽量かつ柔軟であり、人との衝突においても安全であることから家庭用ロボットやエンタテインメントロボットなどに活用できると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 8 件)

- [1] Hye-Jong KIM, Yuto TANAKA, Akihiro Kawamura, Sadao Kawamura and Yasutaka NISHIOKA, “Development of Inflatable Robot Arm Systems Controlled by Joystick”, IEEE RO-MAN2015, 2015.8.31 ~ 2015.9.4, 神戸国際会議場(兵庫県), to be present
- [2] Hye-Jong KIM, Yuto TANAKA, Akihiro Kawamura, Sadao Kawamura and Yasutaka NISHIOKA, “Improvement of Position Accuracy for Inflatable Robotic Arm Using Visual Feedback Control Method”, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronic, 2015.7.9, 釜山(韓国), to be present
- [3] 金 慧鍾, 田中悠登, 河村晃宏, 川村貞夫, 西岡靖貴, “操作型4自由度インフレーターロボットアームの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015.5.18, 京都市勧業館「みやこめっせ」(京都府)
- [4] 金 慧鍾, 田中悠登, 西岡靖貴, 河村晃宏, 川村貞夫, “インフレーターロボットアームのピックアンドプレイス作業の試み”, 日本ロボット学会学術講演会, 2014.9.4, 九州産業大学(福岡県)
- [5] 金 慧鍾, 堀池幸祐, 西岡靖貴, 河村晃宏, 川村貞夫, “軽量柔軟インフレーターロボットアームのセンサフィードバック制御”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014.5.28, 富山市総合体育館(富山県)
- [6] 金 慧鍾, 堀池幸祐, 西岡靖貴, 河村晃宏, 川村貞夫, “軽量柔軟インフレーターロボットアームの動特性”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2014.5.28, 富山市総合体育館(富山県)
- [7] 金 慧鍾, 脇谷茂希, 堀池幸祐, 西岡靖貴, 河村晃宏, 川村貞夫, “極軽量インフレーター構造ロボット用関節構造部の設計と実現”, 日本ロボット学会学術講演会, 2013.9.6, 首都大学東京 南大沢キャンパス(東京都)
- [8] 金慧鍾, 西岡靖貴, 川村貞夫, “インフレーター構造を持つ極軽量ロボットアームの開発”, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2013.5.23, つくば国際会議場(茨城県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

川村 貞夫 (KAWAMURA SADAO)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 20186141

(2)研究分担者

下ノ村 和弘 (SHIMONOMURA KAZUHIRO)

立命館大学・理工学部・准教授

研究者番号: 80397679

西岡 靖貴 (NISHIOKA YASUTAKA)

滋賀県立大学・工学部・助教

研究者番号: 70609734