

振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁を用いた多軸空気圧マニピュレータの位置制御

○谷和弘太郎(立命館大学) 平井慎一(立命館大学)

1. 緒言

近年、産業用ロボットの活動の幅は増加する一方である。しかし、ロボットによる作業が適しているとされる単純作業の繰り返しのような作業でも、周囲の環境や対象の形状・形質のために、人間がその作業を行っているという現場は決して少なくない。例として、お弁当の中身を詰める作業があげられる。お弁当は同じ具材を同じ容器の同じ場所に詰める単純な作業の繰り返しであるにもかかわらず、多くの場合人間がこの作業を行っている。今後、こういった分野にも少しずつロボットが浸透されていくと考える[1]。なぜなら、お弁当の製造は鮮度を保つため消費地の近くで行われるため、人件費の安い海外で製造を行うことができない。また、少子高齢化のため日本における人件費が高くなりつつある[2]。さらにこのような仕事に人が集まりにくくなっている[3]。つまり、こういった人と同じワークスペースで働くロボットや限られた場所で働くロボットに需要があると考えられる。

一般的なロボットのアクチュエータとしては、高精度の位置制御が可能な高出力の電気モータが用いられることが多い[4]。しかしながら、これらのモータには減速機を取り付けなければならず、全体として重量が増加する。また、サイズやエネルギー損失も大きい。電気モータではこの問題を解決することは難しい。空気圧アクチュエータはこの問題を解決する。空気圧アクチュエータには、エアシリンダや空気圧ゴムアクチュエータなどがある。これらの空気圧アクチュエータはスペースを取らず、軽量である。さらに、ダイレクトに関節を駆動させることができる[5]。このため、エネルギー損失を抑えることができる。また、空気圧は圧縮機で空気を圧縮することで、機械的運動を発生する。空気を使用するため、汚染の心配はない。構造がシンプルであり、安価である。空気の圧縮性が高いため、過負荷に強い[6]。タンクやフィルタといった大型となる動力源だけを工場の隅に置き、タンクと繋がったチューブとそれを制御する空気圧弁を備えたスリムなロボットだけを作業場に配置すれば、作業スペースを取らず人や製品を傷つけにくい軽作業用産業ロボットが可能である。これを実現するために制御弁の高性能化・小型化は欠かせない。

現在、さまざまな会社から電磁ソレノイド弁タイプの小型空気圧弁が販売されており、今後の発展が予測される。しかしながら、現在の小型空気圧弁では未だに数十 mm 以上とサイズは大きい。大きいこともあり、ロボット内部組み込むことが困難である。よって、駆動部の近くには配置せず多数の弁をひと

まとまりにして新たに設けたスペースに設置するのが一般的である。しかし、弁から空気圧アクチュエータまでの長い配管で圧力が減少するため、エネルギー損失も大きい。よって、駆動部付近に直接制御弁を設置するほうがロボットの即応性やエネルギー損失の点で優位であると考えられる。

そのため、現在販売されている小型と呼ばれる空気圧弁よりさらにコンパクトな空気圧弁の開発と、小型空気圧弁を利用したロボットの制御が求められる。このため、小型化が容易で、また流量も十分に確保することのできる全く新しい構成の弁として、振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁を提案してきた[7]。そして、振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁と駆動回路の小型化を実現してきた。さらに、振動駆動式無拘束ポペット弁の流量を制御し、空気圧駆動マニピュレータの肩関節の関節角度を制御できることを確認した。本報告では、駆動する関節を増やし、空気圧駆動マニピュレータの手先の位置を制御する検証実験を行った結果を述べる。

2. 振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁の概要

2.1 駆動原理

本弁は PZT アクチュエータの振動によって内部の無拘束状態のポペットが跳躍し、駆動する空気圧弁のため、振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁と名付けられた。ここでは本弁の構造と駆動原理について述べる。以降、振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁を無拘束弁と呼ぶ。

給気口から圧縮した空気を供給すると、ケース内と排気口との間に差圧が生じ、ポペットがオリフィスの穴を塞ぐように密着し、図 1 に示すような閉状態となる。この状態で PZT アクチュエータに正弦波を印加すると、PZT アクチュエータとともにオリフィスが振動する。オリフィスからの撃力によってポペットが跳躍運動を行い、それによって隙間が生じ、図 1 に示すような開状態となり空気を放出する。

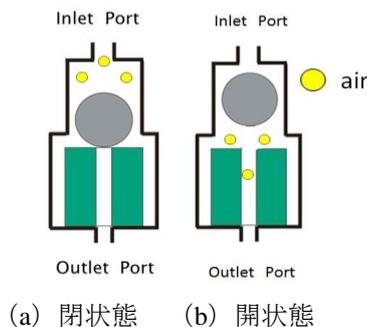


図 1 駆動原理

2.2 構造

図 2 に無拘束弁の構造を示す。無拘束弁は主にポペット、オリフィス、PZT アクチュエータ、全体を覆うケース、そして蓋となるベースというパーツから成り立っており、比較的単純な構造である。現在、この無拘束弁は供給圧力 0.5MPa で 10L/min 以上の流量を発揮できる。また、重量 1.8g、直径 7mm、高さ 9mm の円筒形である。

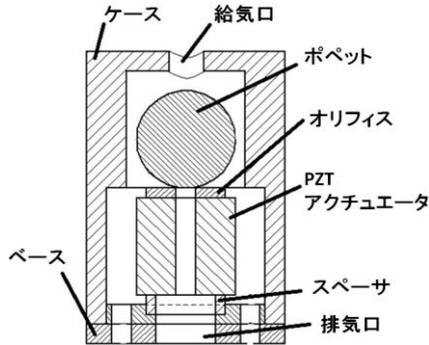


図 2 振動駆動式無拘束ポペット空気圧弁の構造

2.3 駆動環境

図 3 に本研究の空気圧供給と流量計測システムの構成について示す。まず、大気中の空気をコンプレッサにより圧縮し、タンク 1 内に取り込む。フィルタ 1, 2 で大気中の空気に含まれている水分、塵、埃、油分などを取り除く。不純物が取り除かれた空気は電空レギュレータによって圧力が制御され、その空気はタンク 2 へと蓄積される。再び別のタンクに空気が蓄積されることによって、ある程度の時間は安定した空気圧を供給できる。タンク内の空気は再びフィルタによって不純物が取り除かれて弁へ流れ込む。弁とフィルタの間には流量計が取り付けられており、弁内に供給された空気量を計測することが可能である。Pneumatic Actuator は空気圧駆動マニピュレータにあたる部分である。また、Pneumatic Actuator と Pump2 と Pneumatic Valve を除くシステム全体を Pump1 と称す。

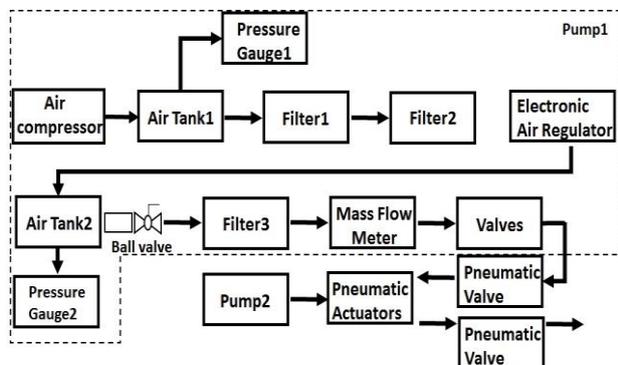


図 3 実験環境のシステム構成

3. 空気圧駆動マニピュレータ

3.1 構造

実験で使用する空気圧駆動マニピュレータを図 4 に示す。図 5 にマニピュレータの関節軸間の長さを示す。図 6 に各関節の可動域と関節軸の配置を示す。このマニピュレータはエアシリンダ自体の高い強度を生かし、上腕部、前腕部の軸にエアシリンダを組み込んで、各腕節の構造部材の大部分をエアシリンダに兼ねさせる内骨格構造をしている。そして、エアシリンダの直線運動を軸回りの回転運動へ変換するコンパクトな送りねじ機構によって回転運動も可能である。この内骨格構造により、人間の腕とほぼ同じ大きさで 7 自由度をもち、関節の大きな運動可動域をもつ軽量なロボットアームを実現している [8]。本報告では、回転軸を固定して実験を行う。



図 4 マニピュレータの全体写真

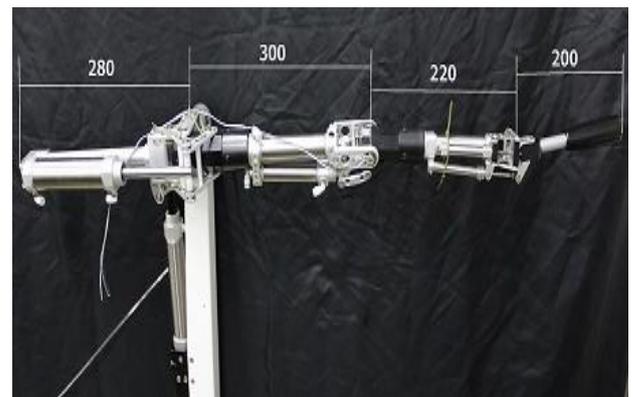


図 5 マニピュレータの関節間長さ

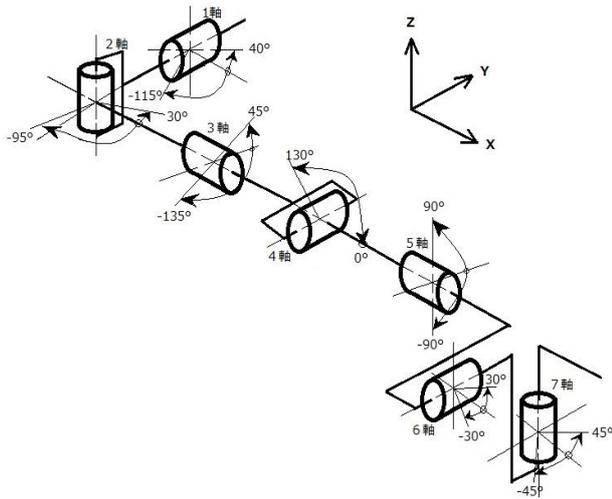


図 6 各関節角の可動域

3.2 駆動環境

図 7 にシリンダと弁の接続方法を示す。実験で使用するマニピュレータのエアシリンダは複動型であり、両側に空気の供給口がついている。通常、この両側の圧力を制御して、目標位置で同じ圧力になるように制御すればシリンダを目標とする地点で静止させることができる。しかし、この方法では最低 4 台の弁を同時に制御しなくてはならない。非駆動側に 0.2MPa の一定圧を付加すると、制御する弁の数は最低 2 台で済み、制御を簡単になると考えられる。

次に図 8 にシリンダの制御回路を示す。ポテンシオメータから得られた信号により、マイクロコンピュータで目標角・目標位置に達しているかどうかを判断して、モータドライバに信号を送る。モータドライバで無拘束弁に付加する電圧を制御し、空気の供給量・排気量を調節する。Arduino UNO と Circuit2 を除くシステム全体を Circuit1 と称す。

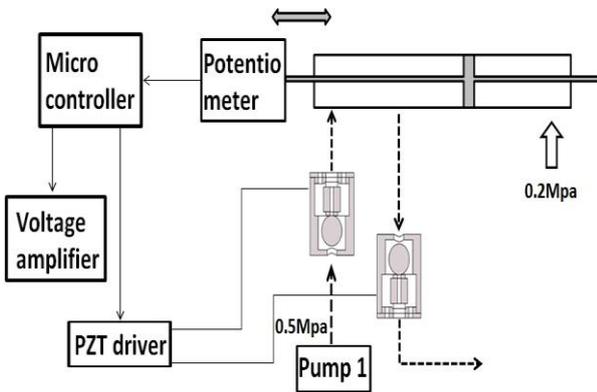


図 7 無拘束弁駆動のシステム構成

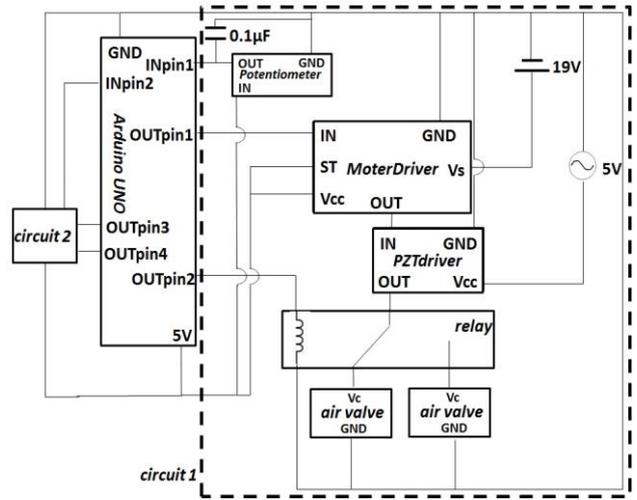


図 8 制御回路

4. 手先の位置制御実験

4.1 実験構成

無拘束弁を先述した空気圧駆動マニピュレータに接続し、マニピュレータの位置制御を試みる。P 制御を用いて弁に付加する電圧を制御することにより、流量制御を行う。第 3 軸と第 5 軸を同時に制御することで手先の位置を制御することが可能であるか検証する。

0.2MPa の一定圧をシリンダの非駆動側の部屋に加え、各関節を初期位置（第 3 軸は 45 度、第 5 軸は 90 度）まで動かす。また、重力による影響をなくすため、第 1 軸を地面に対して水平に固定する。目標位置から逆運動学により、各関節の目標角を計算する。図 9 に計算上の原点と軸を示す。求めた目標角に対し、各関節に流入する空気量を制御することで、手先を目標位置に制御する。目標位置を $(X, Y) = (5 \text{ cm}, 40 \text{ cm})$ とする。流量を制御するための駆動電圧の比例ゲインは、初期位置の状態で最大流量が得られる値を選定した。

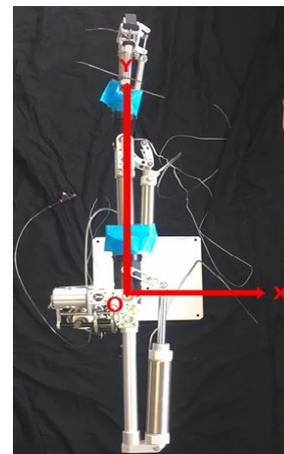


図 9 空気圧駆動マニピュレータの座標軸

4.2 実験結果と考察

図 10 に第 3 軸の関節角の推移を示す. 図 11 に第 5 軸の関節角の推移を示す. 図 12 に手先の位置の推移を示す. 第 3 軸・第 5 軸は目標角に対してそれぞれ 8 度, 2 度ほどずれた位置で収束した. その結果, 目標位置から X 軸方向に 4 cm 程度の誤差を残し収束した.

第 3 軸が目標角に対し, 大きく定常偏差を残し収束したことは, シリンダの非駆動方向側に加えた一定圧が原因であると考えられる. 初めは 0.2MPa の一定圧が加えられている. 次に, 反対の駆動方向の部屋に圧力が加わることにより, 0.2MPa の一定圧が挿入された部屋の体積は減少する. 体積が減少したことにより, 非駆動側のシリンダの部屋内の 0.2MPa の圧力よりも徐々に高い圧力に変化する. よって, 非駆動側のシリンダ部屋内の圧力が上昇したため, それに比例し反発力も大きくなり, 1 サンプル時間当たりの角度変化が小さくなったと考えられる.

また, 本実験では P 制御を用いて手先の位置制御を行った. そのため, 目標値に近づくにつれて無拘束弁に付加する電圧も小さくなる. よって, 目標位置付近では弁の流量が十分でないため, 定常偏差が残る.

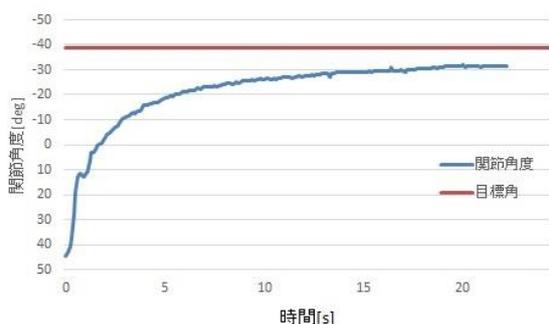


図 10 第 3 軸の関節角度

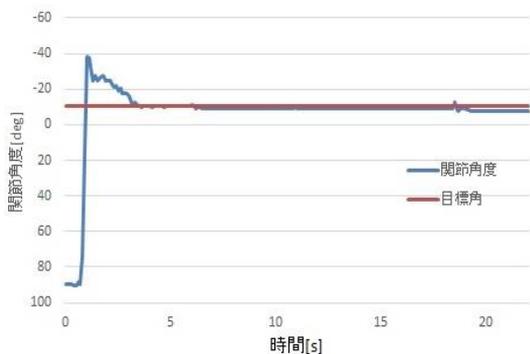


図 11 第 5 軸の関節角度

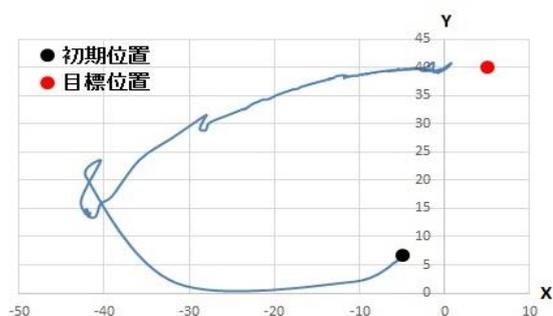


図 12 目標位置 (5 cm, 40 cm) のときの手先位置

5. 結言

本報告では, 第 1 軸を地面に対して水平に固定し, 第 3 軸と第 5 軸を駆動させることにより, 空気圧駆動マニピュレータの手先の位置を制御した. これにより, 無拘束弁は小型でありながら流量制御ができ, ロボットアームにも使用可能であることが確認できた.

今後は, PI 制御などの新たな制御則を検討して誤差を小さくすることや, さらに駆動関節を増やし, 手先の位置制御を行うことを今後の課題とする.

参考文献

- [1] 一般財団法人機械振興協会: RT (ロボットテクノロジー) による産業波及効果と市場分析, 2008.
- [2] 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング: 調査レポート『大企業における「2020 年問題」』, <http://www.murc.jp/thinktank/economy/analysis/research/report-140317.pdf>, 2014.
- [3] 厚生労働省: 労働経済動向調査(平成 26 年 11 月), <http://www.mhlw.go.jp/toukei/itiran/roudou/koyou/keizai/1411/dl/roudoukeizaidouko.pdf>, 2014.
- [4] 古藪陽太, 川淵一郎, 星野聖: エアシリンダの内骨格とするヒト型ロボットアームの制御, 電子情報通信学会論文誌. A, 基礎・境界 J88-A(11), 1318-1325, 2005-11-01.
- [5] D.Shin, I. Sardellitti, and O. Khatib.: A Hybrid Actuation Approach for Human-Friendly Robot Design, Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotic and Automation, pp. 1747-1752, 2008.
- [6] 川村貞夫, 野方誠, 田所論, 早川恭弘, 松浦貞裕: 制御アクチュエータの基礎, 41 頁, コロナ社, 2011.
- [7] 平井慎一: 振動駆動マイクロ空気圧弁, 計測と制御, 56(4), 258-261, 2017.
- [8] 淵上幸太, 古藪陽太, 阿波野朋樹, 川淵一郎, 小川博教, 星野聖: 剛性調整可能な空気圧式ロボットアーム, SICE システムインテグレーション部門講演会(SI2004) 論文集, 747-748, 2004.