

令和元年6月18日現在

機関番号：55201

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K18013

研究課題名(和文) チューブポンプの脈動モデルの構築と繰返し制御理論に基づく脈動抑制制御

研究課題名(英文) Formulation of Flow Fluctuation Model of Tube Pump and its Suppression Control Based on Repetitive Control

研究代表者

加藤 健一 (Kato, Kenichi)

松江工業高等専門学校・電子制御工学科・講師

研究者番号：70553600

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：U字状に曲げられたチューブを複数のローラによって押しつぶし、そのローラを公転させることによってチューブ内の液体を移送させるチューブポンプは、多くの分野で用いられている。しかし、このポンプの送液は瞬間的な流量・流速変動、さらには逆流を伴う脈動流となることが知られている。本研究ではこれに対して、各ローラをうまく運動させて脈動の少ない送液を実現させることを目的に、その脈動のモデル化や機構、制御に関する考察を行った。具体的には、理論上無脈動となる各ローラの非等速動作を割り出し、その動きを実現する非円形歯車の設計や繰返し制御による制御の有効性の検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

チューブポンプを血液ポンプとして用いた場合、流路の強い流れや圧力変動が、赤血球の損傷や破壊を促進する可能性があるとの指摘がある。また、サンプリングレートが低いといった流量計を用いた場合には、計測精度の低下を招く恐れがある。エアチャンバやアキュムレータといった衝撃緩和装置の設置や送液タイミングをずらした複数のポンプの運動による方法などもあるが、頻繁に送液回路を更新する場合や固形物などを含む送液を行いたい場合などには、使用後の装置洗浄や取り替え、分岐・合流する特殊なチューブを使用する必要がある。本研究によって、これらの問題を多少なりとも緩和出来たのではないかと考える。

研究成果の概要(英文)：Tube pump transfers liquid inside an elastic tube by moving rollers that squeeze the tube from the outside. This working principle enables a simple design free from watertight requirement, clean and contamination-free transfer due to the non-contact nature and easy re-configuration by changing the tube and the liquid at the same time. However, under the simplest implementation with U-shaped tube and revolving two rollers at constant speed, flow fluctuation is inevitable when one roller leaves the tube and negative pressure is generated by the tube restoration. In this research, the problem to reduce the flow fluctuation via open-loop control of the roller speed was considered. The ideal speed of each roller could be determined from the tube deformation model and realized and tested with two motors configuration. Tracking to the periodic reference speed was achieved by repetitive control. Then the same control strategy could be realized with single motor and non-circular gears.

研究分野：メカトロニクス、ロボティクス

キーワード：チューブポンプ 脈動抑制 モデリング 繰返し制御 実機検証

## 1. 研究開始当初の背景

U字状に曲げられたチューブを複数のローラによって押しつぶし、そのローラを公転させることによってチューブ内の液体を移送させる図1のようなチューブポンプは、液体が機械要素と接触しない、チューブを取り替えるだけで容易に液種交換が可能、研磨剤などの固形物や腐食剤を含む液体の移送が可能、複数のローラが設置されたホイールを一つのモータで回転させるシンプルな構造でできている、といった特徴から多くの分野で用いられている。とりわけ、容易なチューブ交換と固形物を含む送液を可能にする点は、このポンプを使う大きな利点となっている。しかしながら、このポンプは通常すべてのローラが同じ速度で公転するため、ローラがチューブから離脱する際のチューブの復元体積分に相当する液量を補填できず、その送液は瞬間的な流量・流速変動、さらには逆流を伴う脈動流となることが知られている。例として、市販のポンプを一定の電圧で駆動させて得られた流量波形を図2に示す。液体には常温の水道水を用いた。瞬間的な逆流(流量計の都合上、0[ml/min]として計測されている)とその後の強い送液が周期的に発生している。

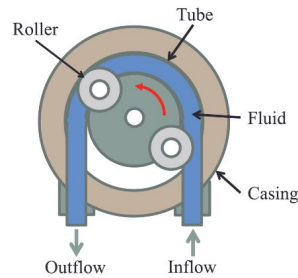


図1：一般的なチューブポンプ

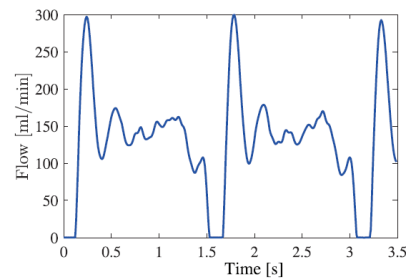


図2：脈動流の一例

多くの場合、チューブポンプの脈動流は問題とはならないが、血液ポンプとして用いた場合、流路の強い流れに伴うせん断力や圧力変動が、溶血、すなわち赤血球の損傷や破壊を促進する可能性があるとの指摘がある(川橋他, 1994)。また、サンプリングレートが低い、応答速度が遅い、逆流計測ができないといった流量計を用いた場合には、計測精度の低下を招く恐れがある。脈動の少ない送液を実現したい場合、通常はエアチャンバやアキュムレータといった衝撃緩和装置の設置や、ダブルプランジャーポンプなどに代表される送液タイミングをずらした複数のポンプを連動させるなどの方法が採られる(内田他, 1987, 渡辺他, 2005)。しかし、頻繁に送液回路を更新する必要がある場合や固形物などを含む送液を行いたい場合などにおいては、使用後の装置洗浄や取り替え、分岐・合流する特殊なチューブを使用する必要などがあり、手間や費用を要する。単一経路のチューブを直線状に配置し、複数のフィンガで押し付けるといったチューブポンプに関する研究開発なども行われているが、フィンガと同数のアクチュエータを要する(谷口他, 2014)。

## 2. 研究の目的

本研究は、図1のローラ間の相対速度が可変な場合において、その脈動流の低減化実現を目的として行った。発想自体は、チューブポンプの各ローラをうまく連動させることができれば脈動の少ない送液が実現できるのではないかと、いった非常にシンプルなものであるが、このようなチューブポンプにおいてそれらをどのように動かせば理論上一定の流量・流速が得られ、かつローラ同士を接触させずに送液を永續させることが出来るか、モデルを構築して明らかにすることを目的とした。また、複数のアクチュエータを使用するのではなく、単一のモータによるその低脈動流の実現を目指した。一方で、複数のアクチュエータによって各ローラをそれぞれ独立に駆動し、かつ吐出口付近に流量計を設置して、その情報を元に各ローラを制御可能な場合に、低脈動流を実現する各ローラの理想動作を自動で獲得ができないか検討を行った。

## 3. 研究の方法

まず、図3のモデルにもとづき、理論上一定の流量・流速が得られる各ローラの理想周期動作を導出した。2つのローラを有するチューブポンプを対象とし、それらは独立に駆動させることができるとともに、チューブを押しつぶすローラの半径は微小で、それを動かすリンクは限りなく細いものと仮定した。詳細は割愛するが、片方のローラがチューブから離れていく際に生ずる単位時間当たりの流量減少量が、もう片方のローラの押し上げによって補填され、結果として一定の流量が吐出されるような関係式を構築することにより、各ローラの理想周期動作を導出することができた。そこで、図4のような実験機を製作し、この内容の有効性を確認した。実機検証においては、各ローラそれぞれに対応するモータで動かす事によって理論の有効性を検証した。ただし、各ローラのチューブとの接触・非接触にあわせてそれらモータへの負荷が変動し、導出した理想周期動作の実現が困難と予想されたため、繰返し制御理論を適用

することで、その動作を精密に再現した。また、各ローラの理想動作は周期的であるため、非円形歯車を利用すれば単一のモータで全てのローラを駆動できると考えられた。そこで、非円形歯車を新たに設計・製作し、実験を行った。

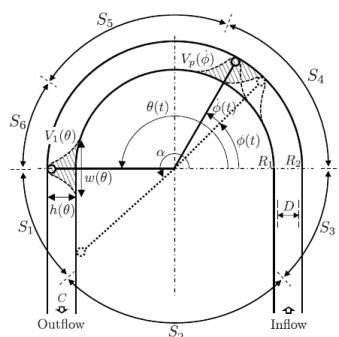


図3：低脈動化のためのモデル図

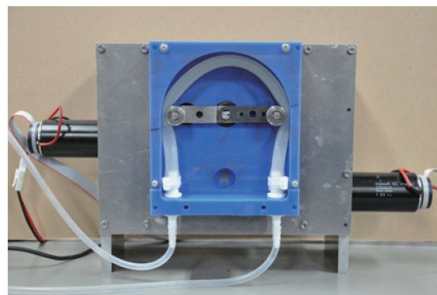


図4：検証用実験機

#### 4. 研究成果

図5に実験結果を示す。一般的なチューブポンプと比べて、本研究の方法では脈動が低減化されていることが分かる。しかしながら、ポンプの吐出口付近に流量計を付加し、低脈動流を実現する各ローラの理想動作を自動で獲得する試みについては、検討を行ったものの見通しが付かずその目標を果たせなかった。今後の課題としたい。

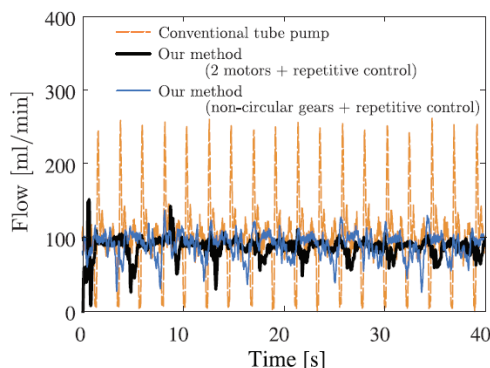


図5：実験結果

#### < 引用文献 >

- 川橋正昭, 平原裕行, ローラー型血液ポンプ, ターボ機械, Vol.22, No.1, pp.35-39, 1994.
- 内田哲男, 後藤敬典, 飯田忠三, ペリスタ型ポンプの脈流の特性とその除去, 分析化学, Vol.36, No.1, pp.54-56, 1987.
- 渡辺邦洋, 今里直樹, 板垣昌幸, フローインジェクション分析法による鉄鉱石中の鉄の精密定量, 分析化学, Vol.54, No.8, pp.693-699, 2005.
- 谷口浩成, 田内寿治, 小林正樹, 門脇信傑, 無音駆動型 SMA チューブポンプの試作と特性評価, 日本AEM学会誌, Vol.22, No.2, pp.268-273, 2014.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

1. 加藤健一, 三澤遥介, 妹尾秀人, 梶井伸之介, 遠藤大生, 平田健太郎, 非円形歯車と繰返し制御を用いたチューブポンプにおける低脈動流化の実現, 日本機械学会論文集, Vol. 84, No. 864, 2018. (DOI: 10.1299/transjsme.17-00474) 【査読有】

〔学会発表〕(計5件)

1. 加藤健一, 梶井伸之介, 繰返し制御と非円形歯車を用いた低脈動チューブポンプの開発, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, 2A2-05a1, 2016.
2. K. Katoh, H. Senoh and K. Hirata, Ideal operation model and experimental

verification for non-pulsating flow tube pumps, Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2016), pp.2126-2131, 2016.

3. 西尾元紀, 加藤健一, 繰返し制御の応用によるチューブポンプの無脈動動作の獲得, 日本機械学会中国四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会論文集(CD-ROM), 216, 2016.
4. 梶井伸之介, 川上慎二, 加藤健一, チューブポンプの無脈動動作実現のための非円形歯車設計, 日本機械学会中国四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会論文集 (CD-ROM), 305, 2016.
5. 加藤健一, 妹尾秀人, 脈動モデルと繰返し制御にもとづく U 字型チューブポンプの脈動低減化, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 1P1-B09, 2015.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。