

攪拌槽ジャケット内のメンテナンス用ロボットの開発 Development of Maintenance Robot for Stirred Tanks

精密工学専攻 27号 三戸大輔
Daisuke Sannohe

1. 緒言

近年、科学技術の成熟に伴って機器や設備の機能・性能面だけでなく安全性・エネルギー効率なども注目され求められるようになってきている。Fig.1 に示す攪拌槽もそのような機器の一つである。攪拌槽は様々な化学的プロセスで反応容器として用いられており、生産性の観点から槽内を薬液の反応に適した温度に保つことが望まれる。そこで、攪拌槽は混合したい溶液を溜める内容器（シェル）とその外周に設けた外容器（ジャケット）の二重構造から成っており、それらの隙間（以下、ジャケット内）に熱媒または冷媒を注入させることで槽内の温度調節を行っている。

しかし、現在その熱媒・冷媒に含まれる不純物がジャケット内壁へ付着し熱伝達の妨げとなることで、生産性・品質の低下を招く現象が問題となっている。それにも関わらず、ジャケット内全体の検査・清掃方法が存在しない。これは、ジャケット入口やジャケット内の隙間が 40-70[mm]程度と狭小に設計されており、手作業による付着物の除去が困難であることや、Ariga ら⁽¹⁾が報告しているような 270[mm]程度の広い壁面間を移動可能なロボットは存在するが、上記の様な狭小空間に対応したロボットが無いことに起因している。

そこで本研究では、狭小空間の移動に適した蠕動運動型移動機構を用いて、ジャケット内の検査・清掃を可能にするロボットの開発を目的としている。検査用ロボットでは主に Fig.1 のエリア A を移動し壁面の状態を確認し、清掃用ロボットではエリア B に堆積した付着物を掘削・除去することを目的としている。各詳細は 2.1 節及び 3.2 節で述べる。

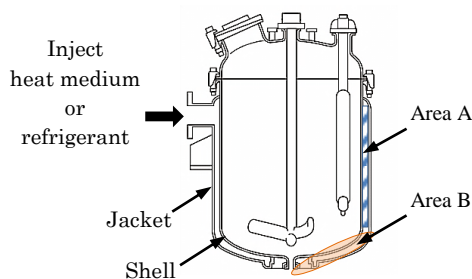


Fig.1 Cross-sectional view of stirred tank

2. 検査用ロボット

2.1 X型蠕動運動ロボットの概要

Fig.2 に検査用 X 型蠕動運動ロボット（以下、X 型ロボット）の外観を示す。検査ロボットではジャケット内の任意の

場所へ行き、付着物のサンプル採取や観察をさせることを想定している。本ロボットは移動のための蠕動運動を行う人工筋肉部と、方向転換を行うためのサーボモータを中心に備えた X 型ジョイント部の、二つの部分から成る。X 型ジョイント部は ABS 製の二つのパーツが立体的に交差し、モータにより接続された構造となっている。

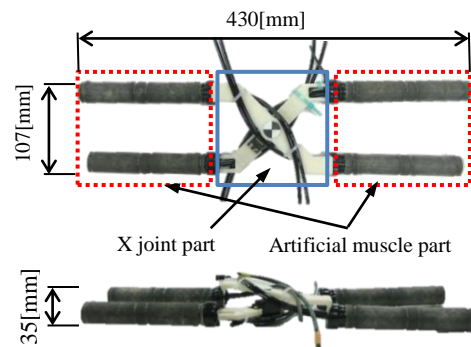


Fig.2 Appearance of the X-shaped robot

2.2 人工筋肉部の概要

本ロボットは人工筋肉 1 ユニットをミミズの体節 1 つに見立てており、人工筋肉部の各脚は 2 ユニット連結して X 型ジョイント部に接続されている。1 ユニットの外観を Fig.3 に、4 ユニットにおける蠕動運動による移動原理を Fig.4 に示す。また、人工筋部の内部構造を Fig.5 に示す。本ロボットはユニット内部に工具やカメラを搭載することを想定しており、その空間を設けるために内部に蛇腹（ペローズ）状のチューブを使用している。このペローズチューブとゴム膜との隙間（チャンバー）に空気が供給されることでゴム膜が膨張する。ゴム膜にはカーボン繊維が軸方向に沿うように内包されており、カーボン繊維には伸縮性はないため空気を供給した際半径方向には膨張するが、軸方向には拘束され収縮する。この収縮力と収縮量をアクチュエータとして用いている。

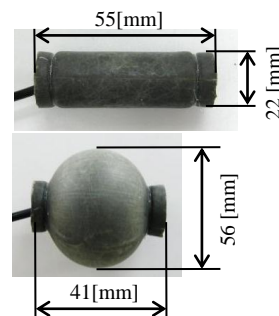


Fig.3 Artificial muscle

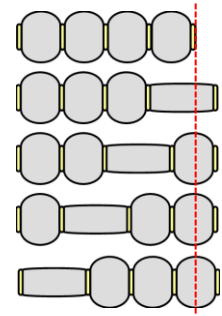


Fig.4 Motion pattern

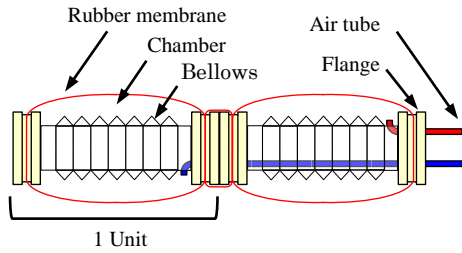


Fig.5 Mechanism of artificial muscle part

2.3 理論速度

1 ユニットの収縮量を r [mm], 伸長しているユニット数を波長 l , 伸長しているユニットを何ユニットずつ後方に送るかを s , 送りを行う時間間隔を動作間周期 t とすると, ロボットの理論速度 v は以下の式より求めることができる.

$$v = \frac{rns l}{Nt} \quad (1)$$

式(1)より求めた理論速度は 2.43[mm/s]である.

2.4 走行実験

実験では壁面とアクリル板を用いて 50[mm]幅の垂直二平面間を作り, ロボットに走行させた. 実験の様子を Fig.6 に, 動画解析結果を Fig.7 に示す. Fig.6 中の数字は, 各フランジに付けた動画解析用の標点のうち, 実際に解析に用いた点である. 走行実験の結果, 垂直二平面間において水平方向に安定した走行ができることを確認した. 前進速度は 2.53[mm/s], 降下速度は 0.64[mm/s]であった. 前進速度については, ほぼ理論通りといえる. 垂直方向に降下した原因については, Fig.7(b)の拡大図を見ると周期的な波形が見られることから, ロボットの構造的な問題, とりわけ人工筋が平行になっていないことが影響しているのではないかと考える. また, 波形が周期的になっていない部分では, 人工筋肉の膨張に伴ってアクリル板がたわみ, 十分な壁面の把持ができず滑りが生じたと考える.

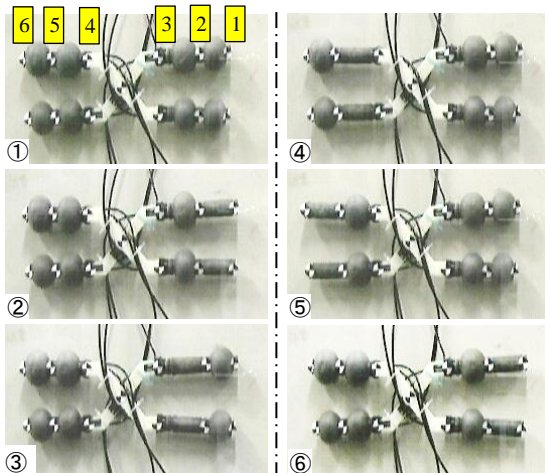


Fig.6 Horizontal movement

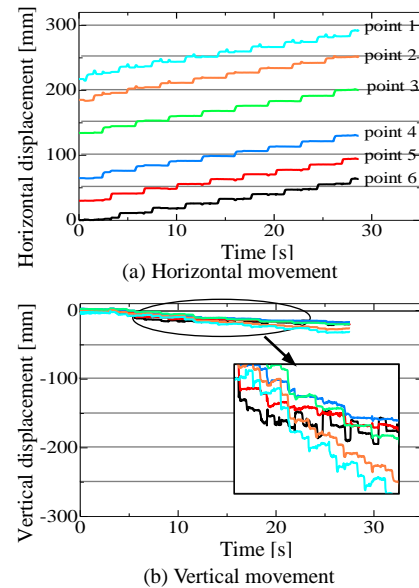


Fig.7 Analysis result of horizontal locomotion

2.5 方向転換動作実験

本ロボットは X 型ジョイント部のモータと壁面把持をするユニットの組み合わせによって方向転換を行う. まず, X 型ジョイントの対角上に位置する脚一組で壁面を把持させ, その後, 壁面把持をしていないもう一組をモータにより回転させる. 同様の操作を繰り返すことで方向転換が完了する.

90 度方向転換させた際の様子を Fig.8 に示す. 意図した通りの動作により方向転換動作を実現することができた.

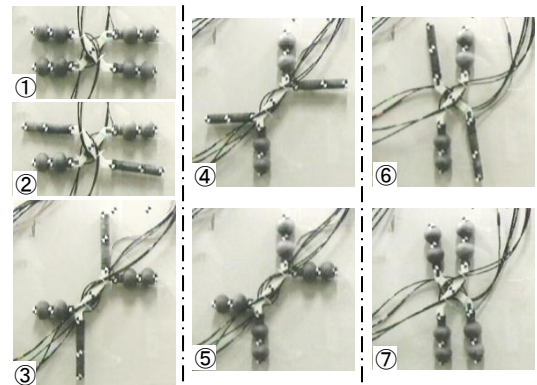


Fig.8 Turning motion

3. 清掃用ロボット

3.1 清掃方法の概要

清掃は大まかな付着物除去と局所的に行う綿密な付着物除去の二つの工程に分け, それぞれ別の清掃方法をとることとした. 以下では大まか付着物除去についてのみ述べる.

Fig.9 に大まか清掃方法の概略図を示す. この清掃方法では, まず, 攪拌槽両側面にあるノズルに水平ワイヤーを渡す. 次に, ブラシ等の工具を数か所に取り付けた垂直ワイヤーを攪拌槽底部のノズルから入れ, 水平ワイヤーに固定する. そ

して、垂直ワイヤーを回転・上下運動させることで取り付け
た工具によって付着物を掻きとる。垂直ワイヤーが一周する
ように水平ワイヤーを操作し、この作業を繰り返し行うこと
でジャケット内全体を清掃することができる。と考える。

しかし、攪拌槽の中部から底部にかけては多量の付着物が
堆積し、ジャケット内が完全に埋まっていることもあるため、
垂直ワイヤーを通すことが困難である。そこで、まず底部ノ
ズルまでの道を確保するため、堆積物を掘削するロボットを
開発する。

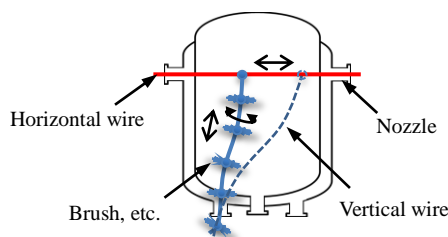


Fig.9 A schematic of cleaning method

3.2 ロボットの要求仕様と掘削方法の概要

本研究では第一目標として、普及率の最も高い壁面間
60・70[mm]を有する攪拌槽を対象とした、10[mm/s]で走行可
能なロボットの開発をしている。Fig.10 に掘削方法の概要を
示す。掘削には本研究室で以前より研究されている蠕動運動
型ロボット⁽²⁾⁽³⁾を採用した。清掃は水道管の清掃に用いられ
ているFig.11のような清掃ワイヤーを搭載したロボットを側
面ノズルから入れ、誘導された清掃ワイヤーをジャケット外
から回転・出し入れすることで付着物を掘削していく。

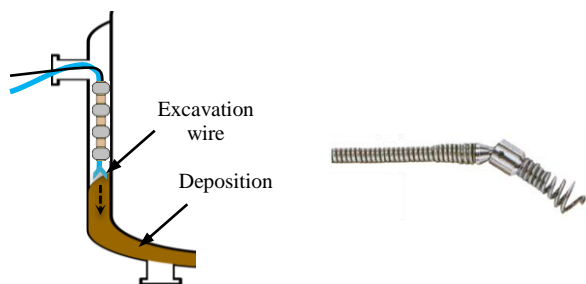


Fig.10 A schematic of cleaning method

Fig.11 Excavation wire

3.3 ユニットの設計

3.3.1 ユニットの構造

Fig.12 にユニットの外観を示す。基本的構造は X 型ロボッ
トと同様であるが、本ロボットでは内部に清掃用ワイヤーを
通すため、ユニットの保護として Fig.13 のように押しパネを
ベローズチューブの内部に採用している。

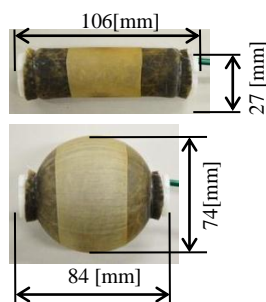


Fig.12 Appearance of a unite

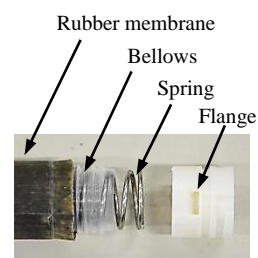


Fig.13 Inner structure of a unit

3.3.2 ユニット数と伸縮時間

10[mm/s]を達成するために求められる動作間周期 t を算出
した結果が Table.1 である。5 ユニットでは波長 l を 2 として
いる。また、収缩量 r には 60[mm]壁面間で測定した収缩量
14.5[mm]を用いた。ユニットの収縮時間は、電磁弁により
供給圧力を制御することで調整することができるが、伸長時
間は人工筋肉の弾性に依存しており能動的に制御すること
ができない。そのため、伸長時間のみに注目し、それが求め
られる動作間周期（以下、要求伸長時間）を満たしていれば
良い。

Table.1 Required extension time

The number of units	Required extension time [s]
4	0.36
5	0.58

3.3.3 排出穴の決定

試作したユニットに実使用時と同様の 8[m]エアチューブ
を繋ぎ、伸長時間を測定したところ 1.11[s]であり、要求伸長
時間を達成できないことが分かった。そこでフランジにエア
排出穴を設け、伸長速度の向上を図った。Table.2 に要求伸長
時間を達成できる最小の穴径 1.4[mm]と、あけることができ
る最大の穴径 1.8[mm]での伸長時間を示す。穴径 1.9[mm]以
上では伸長速度は向上するもののエアコンプレッサのタン
ク容量が不足することを実験的に確認した。穴径 1.4[mm]で
は 5 ユニットにおける要求伸長時間を達成できるが、4 ユニ
ットにおける要求伸長時間は最大穴径 1.8[mm]でも達成でき
ないことが分かった。このことを踏まえロボットは 5 ユニッ
トにすることとした。尚、収縮時間は伸長時間に揃えた。

Table.2 Measured result of extension time

Hole diameter [mm]	Extension time [s]
1.4	0.56
1.8	0.52

3.4 排出穴が把持力に与える影響

清掃ワイヤーの回転により誘起された振動を抑えるには、

26[N]程度の把持力がユニットに必要であることが実験よりわかっている。そこで排出穴の存在が把持力に影響を与えるかを検証するため、排出穴なし、穴径 1.4[mm]、穴径 1.8[mm]の三種類のユニットにおいて膨張外径を約 74[mm]にそろえ、70[mm]幅の錆びた鉄板間で把持力を測定した。その結果を Table.3 に示す。

実験の結果、ユニットの把持力は膨張外径に依存し、排出穴の影響はないことが分かった。これより、排出穴を設けることで伸長速度を向上させる手法が有用であると言える。

Table.3 Measured result of grip force

Hole diameter [mm]	Expansion diameter [mm]	Grip force [N]
No hole	74.5	48.8
1.4	74.4	47.1
1.8	74.4	47.7

3.5 掘削用ロボット

Fig.14 に開発した掘削用ロボットの外観を示す。本ロボットは五つのユニットと四つジョイント部から構成されている。ジョイント部はノズルの通過を容易にするためのもので、金属板を使用することで可動方向を拘束し、清掃ワイヤーを使用した際に姿勢が傾くのを抑制することを図っている (Fig.15)。



Fig.14 Appearance of the robot for excavation



Fig.15 Joint part

3.6 走行実験

掘削用ロボットに清掃ワイヤーを搭載し、アクリル板で設けた 60・70[mm]幅の垂直二平面間、60[mm]幅の攪拌槽モックアップを垂直下向きに走行させた。挙動の一例として 70[mm]幅での実験における先頭ユニットの動画解析結果を Fig.16 に示す。また、理論速度との比較を Table.4 に示す。いずれの実験においても、安定した周期的な波形が得られ蠕動運動による移動ができていたことが確認できたが、移動速度は理論値と大きくかけ離れている。これは、ユニットが伸長しきる前に膨張したユニットが壁面を把持してしまい、収縮量を十分に生かせていないことが原因だと考える。水平方向のブレの変位は先頭ユニットが最大であり、特に 1・2 ユニ

ットが同時に伸長状態のとき大きな変位を生じていた。また、ブレは方向・変位量ともに一定ではなく実験のたびに様々な値を示したことから、ロボットの構造上の問題ではなく清掃ワイヤーの挿入方向や巻癖などが影響しているものと推測する。

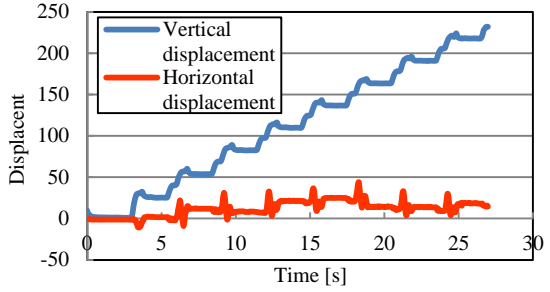


Fig.16 Analysis result

Table.4 Comparison of experimental speed with theoretical speed

Interval of walls [mm]	Theoretical speed [mm/s]	Experimental speed [mm/s]
70	14.3	9.5
60	10.4	7.3
60 (mock-up)	10.4	5.6

4. 結言

攪拌槽ジャケット内の検査を目的とした X 型ロボット、大まかな付着物除去を目的とした清掃用ロボットの開発を行った。X 型ロボットでは垂直壁二面間での走行が可能であることを確認した。清掃用ロボットでは蠕動運動による移動ができていたことが確認できたが、移動速度に問題があり膨張のタイミングなどを改善する必要があることがわかった。

5. 今後の展望

X 型ロボットでは、実物の攪拌槽での走行実験、X 型ジョイント部のノズル通過可能な構造への改良、走行速度向上などを行う。清掃用ロボットでは水平方向のブレ抑制、走行速度向上、実物攪拌槽での堆積物の掘削・除去実験などを行う。

6. 参考文献

(1) Anna Ariga, Tsukasa Kobayashi, Tomoyuki Yamaguchi, and Shuji Hashimoto, “Wall Climbing Robot in Narrow Space with Pantograph-type Structure”, Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2008) (2008), pp.3028-3033

(2) Taro Nakamura, Takashi Kato, Tomohide Iwanaga and Yoichi Muranaka, “Development of a Peristaltic Crawling Robot Using Servo Motors Based on the Locomotion Mechanism of Earthworms”, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2006) pp.4342-4344, (2006)

(3) K. Adachi, M. Yokojima, Y. Hidaka, and T. Nakamura, “Development of multistage type endoscopic robot based on peristaltic crawling for inspecting the small intestine”, Proceedings of IEEE Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2011), pp.904-909