管径適応型管内移動ロボットの研究 —第 10 報：管形状自動適応走行の実現—

Pipe inspection robot adaptive to pipe diameter
- 10th report: Automatic adjustability to diameter and curve of pipe-

桑田 明菜 (岡山大) 正 鈴森 康一 (岡山大)
○ 安富 雄大 (岡山大) 正 脇元 修一 (岡山大)

Akina KUWADA, Okayama University, akinath@act.sys.okayama-u.ac.jp
Koichi SUZUMORI, Okayama University
Yudai ADOMI, Okayama University
Shuichi WAKIMOTO, Okayama University

In this paper, the purpose is to realize self-propelling ability of a snake like robot which travels in pipes. The robot consists of thirteen intelligent actuators and each actuator has a DC motor and a micro processor including a motor driver and communication function. Three control algorithms, force control, adjusting controls to changing pipe diameter and to curved pipe are proposed and programmed in the processors. As the experimental results, automatically the robot can negotiate several kinds of pipes such as different diameter, elbow shape, T branch shape and vertical setting without overloaded. We showed the utility of three algorithms.

Key Words: Robot, snake like robot, intelligent actuator, in-pipe inspection robot,

1. 緒言

これまでに、様々な研究機関で配管検査ロボットが開発されているが[1]、[2]、管径の変化、屈曲管、垂直管すべてに対応するものは少なく、実用化には至っていない。本研究では小径の各種配管に対応可能な検査ロボットの研究を行っている。これまでに、「正弦波駆動機構」と呼ぶ駆動方式を用いた試作機 1～3 号機を開発し、この推進機構の有効性を確認した[3]、[4]。ロボットは、DC モータを内蔵したリンクを直列に結合した構造であり、各モータを順に位相差をつけた正弦波状に駆動することで、正弦波を構成する。ロボットは管壁にグリップし摩擦力を利用して推進力を得る。各関節の指令値は式(1)で表される。

$$R(i) = A \sin \left\{ \frac{2\pi}{T} t - 2\pi \frac{i-1}{x} \right\} + C \quad (1)$$

ここで、 i は関節の番号、 A は振幅、 T は周期、 t は時間、 x は 1 波長を構成するリンクの数、 C は正弦波の中心軸をずらすためのオフセットである。ここで、リンク数を x とした構成での駆動を x リンク 1 波長駆動と定義する。

本報では、異口径管、屈曲管に自動適応するための管形状適応制御について述べる。

2. 管形状適応制御

種々の形状を有する配管内を自律駆動するには、管壁を押し付ける力を制御することと、各リンクが管形状に自動適応することが必要である。本報では、ロボットの押し付け力を制御し、様々な管形状に自動適応するために、押し付け力制御、管径適応制御、屈曲管への適応制御であるオフセット適応制御の 3 つの制御から構成される管形状適応制御を実現した。

本章では、1 つのインテリジェントアクチュエータ[3]を用いて行った 3 つの適応制御実験について述べる。

2.1 押し付け力制御

本節では、制御の簡素化をはかるため、力センサや電流センサを用いずインテリジェントアクチュエータの押し付け力

を制御する方法を提案する。モータの過負荷や管壁との滑りを防ぐために、ロボットが管壁を押し付ける力を制御することが重要である。正弦波駆動を用いる場合、リンクが管壁に接触したときにモータの回転が停止するため、エンコーダの値から管壁への接触を検知することができる。管壁に接触したときのモータの力を制御することで押し付け力の制御が可能である。

管壁接触時におけるモータへの印加電圧に対するインテリジェントアクチュエータの力出力を測定した。図 1 に実験の様子を示す。フォースゲージをリンク先端に直角に当て、インテリジェントアクチュエータの角度が $0 \sim 75$ [deg] の範囲でインテリジェントアクチュエータの力出力を測定した。モータへの印加電圧は PWM で制御し、デューティ比を $10 \sim 50\%$ に設定した。その結果を図 2 に示す。この結果より、インテリジェントアクチュエータの先端の位置に関わらず、出力は一定であり、その出力は印加電圧のデューティ比に比例することがわかった。ただし、デューティ比 50% での駆動では力出力が低下した。これはモータの定格トルクとギアの効率を考慮するとインテリジェントアクチュエータ先端の最大出力が 6.0 [N] となるためである。

Fig. 1 Appearance of the force control experiments

Fig. 2 Relation between angle and force

2.2 管径適応制御

管径の変化に自動適応するため、目標正弦波の振幅 A を制御する。リンクが管壁に接触したとき、モータの回転が停止するため、リンクの屈曲角度は目標値から大きくずれる。このずれが発生したとき、その位置を管壁として新たな目標値を設定する。また、リンクが管壁に接触していない場合、大きなずれが 1 周期の間で生じないため、振幅の目標値を大きく設定する。

この制御と押し付け力制御を適用したインテリジェントアクチュエータを用いて実験を行った。実験の様子を図 3 に示す。押し付け力制御では、8.5、31、50%と 3 段階のデューティ比を用いた。実験結果を図 4 に示す。インテリジェントアクチュエータを正弦波状に駆動し、目標正弦波は周期 T を 3.1 [s/cycle]、位相差 λ を 0 [deg]、オフセット C を 0 [deg]とした。実験では、配管の代わりに 2 つの障害物を用い、一方には押し付け力を測定するために、フォースゲージを取り付けた。

Fig. 3 Appearance of experiment of adjustability to amplitude

Fig. 4 Adjustability to amplitude
(Duty ration: 31%, distance: 40→80→40 [mm])

デューティ比 31%時の実験結果を図 4 に示す。2 つの障害物間の距離に関わらず、押し付け力は約 3.0 [N]の一定出力となった。また、障害物間の距離を長くすると、目標振幅が自動で大きくなり、障害物間の距離を短くするとモータの管壁との接触時間が 1.1[s]から 0.7[s]に短くなっていることから目標振幅が自動で小さくなることがわかる。また、デューティ比 8.5、50%での駆動実験ではそれぞれ 1.5、5.0 [N]での力制御を実現した。これらの実験により管径適応制御と押し付け力制御の有効性が確認された。

2.3 オフセット適応制御

屈曲した配管へ自動で適応するためには、オフセット C を制御し、目標正弦波の中心を変化させる必要がある。管内を直進している時、図 5 の 1 に示すように、リンクはプラス方向とマイナス方向に均等に駆動する。しかし、屈曲管にリンクがさしかかった図 5 の 2 の状態では、リンクの振り幅は不均等になる。ここで、プラス方向、マイナス方向の振れ角が均等になるようにリンクの振動の中心を図 5 の 2 から 3 へ変化させる。同様に、図 5 の 3 から 4、4 から 5 へ振動の中心を変化させることで、ロボットは屈曲管をスムーズに走行できる。インテリジェントアクチュエータの 1 周期間の最大角度と最小角度を用いて、管壁にリンクが接触した位置を把握し、駆動範囲の中心を計算して推定する。その値を新しいオフセットと定義する。このオフセットは 1 周期ごとに時間 $t = nT$ ($n=1,2,3,\dots$)の時に更新する。ただし位相差 λ によって、オフセット変更時にオフセットの変化する方向とインテリジェントアクチュエータの駆動方向が異なる場合が生じ、リンクの動作が不安定になる場所がある。例えば、位相差 $\lambda = \pi/4$ のとき負方向にオフセットが変化すると、正回転していたリンクがオフセット更新時に瞬間的に逆回転した後、再び正回転を行うため、非常に不安定な動作となる。そこでオフセットの変化方向とオフセット更新時の駆動方向を一致させるため、位相差によって更新のタイミングを $\pm T/4$ ずらす。オフセットの更新タイミングを表 1 に示す。表内の 0 は $t = nT$ ($n=1,2,3,\dots$)、 $+T/4$ は $t = nT + T/4$ ($n=1,2,3,\dots$)、 $-T/4$ は $t = nT - T/4$ ($n=1,2,3,\dots$)のときにオフセットを更新することを示している。

インテリジェントアクチュエータを用いてオフセット適応制御実験を行った。図 3 に示す通り、リンクへ正弦波状を構成する信号を送信して駆動を行い、振幅 A を 54 [deg]、周期 T を 3.1 [s]、位相差 λ を 0 [deg]とした。障害物は駆動開始から 2 周期目にアクチュエータの中心からプラス側に 20 [mm]、4 周期目にマイナス側に 40 [mm]の位置にそれぞれ一周期の間のみ設置した。

実験結果を図 6 に示す。3 周期目では、正弦波形が負方向に移動し、5 周期目では、正方向に移動している。また、3 周期目のオフセットの更新は $t = nT + T/4$ ($n=1,2,3,\dots$)におこなっている。これらの実験結果より、オフセット適応制御の有効性が示された。

Table 1 Timing of update offset

Different phase λ	Sift direction of offset : +	Sift direction of offset : -
$0 < \lambda < \pi/2$	0	$+T/4$
$\pi/2 < \lambda < \pi$	$-T/4$	0
$\pi < \lambda < 3\pi/2$	$+T/4$	0
$3\pi/2 < \lambda < 2\pi$	0	$-T/4$

* $+T/4$: delay for $T/4$ $-T/4$: hasten for $T/4$

Fig. 5 The model of offset control

Fig. 6 Improved adjustability to offset

3. 基礎実験

前章で述べた 3 つの制御方法から構成される管形状適応制御をロボット全体に適用し、ロボットの性能評価実験を行った。押し付け力制御は、デューティー比を 16、31、47 % の 3 段階で設定し、これを Low、Middle、High と定義する。以下の実験ではこの設定を用いる。

3.1 牽引力

$\phi 68[\text{mm}]$ の塩ビ管を用いてロボットの牽引力をフォースゲージで測定した。周期 T を 1.0 [s] とし $x=6$ (これを 6 リンク 1 波長駆動と呼ぶ) でロボットを水平面内で駆動させた。ロボットの後尾リンクに紐を取り付けることによりフォースゲージにロボットを固定させた。実験の様子を図 7 に、実験結果を表 2 に示す。

これらの実験からロボットの牽引力は押し付け力に比例することがわかる。また、ロボットの質量は 1166 [g] であるため、押し付け力を Low に設定した場合であっても、牽引力はロボットの自重を上回るため、垂直管の走行が可能である。

Fig. 7 Measurement of traction force in vinyl chloride pipe

Table 2 Average of traction force	
Gripping force	Average of traction force [N]
Low	12.7
Middle	16.1
High	19.2

3.2 垂直管

$\phi 56$ 、68、83 [mm] の塩ビ管を使用し垂直管におけるロボットの動作実験を行った。実験の様子を図 8 に、各管径における上方向の走行速度を表 3 に示す。ロボットは垂直管を上・下方向へ走行可能であり、また管内での停止動作も実現した。

Fig. 8 Appearance of experiments with vertical pipes (ϕ 68 [mm])

Table 3 Velocity in vertical pipes

Diameter [mm]	Velocity [mm/s]
56	0.49
68	20.0
83	19.5

3.3 適応管径測定

配管に見立てた板を用いて水平面内での適応管径測定実験を行った。図 9 に実験の様子を示す。板の距離が 40~220 [mm] の範囲において、ロボットの管内移動速度を測定した。正弦波駆動の動作周期 T は 1.0~3.0 [s] に設定した。これは板の距離が長くなり各リンクの振幅が大きくなると周期 T が 1.0 [s] ではモータが追従しないためである。また、板の距離が 145 [mm] を超えると 6 リンク 1 波長駆動では管壁に十分グリップできなくなったため、板の距離が 145 [mm] 以上の実験では 8 リンク 1 波長駆動で実験を行った。

実験結果を図 10 に示す。X 軸は板の距離、Y 軸はロボットの移動速度を示す。なお、走行速度は周期に依存するため、ここでは移動速度を、ロボットが 1 周期の間に進んだ距離として定義する。グラフ内の曲線は 6 リンク 1 波長駆動時の理論値を、プロット点は実験結果を示す。この実験結果から本機は 40~220 [mm] の範囲で走行が可能で、最高速度は板の距離が 190 [mm] のとき 48.5 [mm/s] であることが確認された。前報までに本機を用いてマニュアル制御で行った実験結果は最高速度が 40.6 [mm/s] であったことから約 1.2 倍の向上が確認された。

Fig. 9 Measurement of the adjustability to pipe diameter

Fig. 10 Relation of the distance between plates and velocity

4. 管内走行実験

管形状適応制御の有用性を示すために、多種の配管を用いて実験を行った。前報[3]では異口径管や屈曲管走行時、マニュアル操作であったため、頻繁にロボットへ過負荷がかかり、走行速度が減速することがあった。また、オペレータの可視範囲外での駆動は不可能であった。本章では、ロボットの形状を配管の形状に自動で適応させることでこれらの問題を解決した。

4.1 異口径管

異口径管通過実験には、 $\phi 50$ 、 56 、 83 、 107 [mm]の塩ビ管を用い、 $\phi 56$ - 83 [mm]、 $\phi 50$ - 107 [mm]、 $\phi 83$ - 107 [mm]の組み合わせで行った。実験の様子を図 11 に示す。管径適応制御を適用することで、ロボットは管径に即した振幅を得ることが可能となり、また押し付け力制御により十分なグリップ力を得て配管を過負荷なくスムーズに走行できた。

Fig. 11 Appearance of experiments with different diameter pipes ($\phi 107 \leftarrow 50$ [mm])

4.2 屈曲管

屈曲管通過を実験するため、 $\phi 56$ 、 83 、 107 [mm]の塩ビ屈曲管を用いて管内走行を行った。この実験では管径適応制御を適用することで、ロボットは管径に即した振幅を得ることが可能となり、また押し付け力制御により過負荷なく十分なグリップ力を得てスムーズにエルボ管と T-字管内を自動走行できた。ただし T 字管を走行する場合、オペレータが分岐点で左右どちらの分岐管に進入するかを指令することで、マスタ回路は先頭 2 リンクに指示した方向のオフセットを指令し、ロボットを屈曲させ、指示した方向の配管へ進行する。先頭リンクが分岐管に進入すると、後方のリンクは管形状適応制御により屈曲管を走行することが可能となる。実験の様子を図 12 に示す。ロボットはオフセット制御により自動的にオフセット C を変え、 $\phi 56$ 、 83 、 107 [mm]のエルボ管と $\phi 83$ 、 107 [mm]の T 字管を自動的にスムーズに走行することが可能となった。

Fig. 12 Appearance of experiments with T-shaped pipes ($\phi 107$ [mm])

5. 結論

本論文では配管の形状に自動適応する制御方法を提案し、多種の配管を用いた実験により、その有効性を示した。

インテリジェントアクチュエータを用いて、管内移動ロボットが最適なグリップを行うための力制御を実現し、配管径に自動適応する制御である管径適応制御と、屈曲管への自動適応制御であるオフセット制御を行った。これにより、管径の変化と屈曲に自動的に適応することが可能となった。

これら 3 種類の制御方法を適用したインテリジェントアクチュエータを用いて管内移動ロボットを構築し、各種形状の配管内での実験を行った。異口径管走行実験では管径に自動的に適応することでオペレータからの指令なしにスムーズな走行を実現した。また、エルボ管走行実験ではオフセット適応制御により、オペレータからの指令なしに屈曲に対応した走行を実現し、T-字管走行実験では先頭リンクに進行方向を指示することで自動走行を実現した。

これらの実験結果より管形状適応制御の有効性を実証した。

謝 辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金特定領域研究(課題番号 16078209)「多自由度メカトロニクス用インテリジェントアクチュエータの研究」の一部として実施しました。

文 献

- [1] A. Brunete, E. Gambao, J.E. Torres, and M. Hernando, "A 2 DoF Servomotor-based Module for Pipe Inspection Modular Micro-robots", *Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1329-1334, 2006
- [2] M. Ono and S. Kato, "Modelling of Bulging Friction Brake Mechanisms for a New In-pipe Inspection Microrobot", *Proc. of the IASTED International Conference on Modelling and Simulation*, pp. 96-101, 2006
- [3] S. Wakimoto, K. Suzumori, M. Takata and J. Nakajima, "In-Pipe Micro Robot Adaptable to Changes in Pipe Diameter", *Journal of Robotics and Mechatronics*, pp. 609-615, 2003
- [4] A. Kuwada, Y. Adomi, K. Suzumori, T. Kanda, S. Wakimoto, N. Kadowaki, "Snake-like Robot Negotiating Three-Dimensional Pipelines", *IEEE Robotics and Biomimetics*, 2007