

日本機械学会論文集  
Transactions of the Japan Society of  
Mechanical Engineers

別 刷

63巻 611号 C編

(平成9年7月)

社団法人 日本機械学会

## 流体駆動形配管検査ロボットの運動解析\*

金子 真<sup>\*1</sup>, 冷水 一也<sup>\*2</sup>  
辻 敏夫<sup>\*1</sup>, 今村 信昭<sup>\*3</sup>

## Dynamic Behavior of Pipe Inspection Robot Driven by Fluid Force

Makoto KANEKO, Kazuya HIYAMIZU,  
Toshio TSUJI and Nobuaki IMAMURA

This paper discusses the dynamic behavior of a pipe inspection robot driven by fluid force. The robot is composed of an inspection part, insertion roller, floats and cables to connect the floats. The robot receives not only drag force but also lift force through each float implemented in every link unit. Through simulation, we found that according to the shape of the pipe, there exists an optimum fluid velocity which provides the inspection position at the center of the pipe. Such optimum velocity is a function of mechanical impedance existing in the robot itself and the radius of curvature. We show a method which keeps the inspection part parallel to the pipe axis irrespective of the position of the center of the radius of pipe. We also consider the dynamic behavior of the inspection part under various parameters, such as the radius of pipe curvature, mechanical impedance of the robot, and the fluid flow rate.

**Key Words:** Mechatronics and Robotics, Moving Robot, Robot, Pipe Inspection Robot, Fluid Force Driven Robot, Simulation, Curved Pipe

## 1. はじめに

火力, 水力, 原子力いずれの発電方式であってもエネルギー源に違いはあれ, 最終段階では熱エネルギーを蒸気エネルギーに変換し, 最後はタービンを回転させて発電するという運転形態が基本になっている。これらの発電プラントでは, 安全な電源供給を行うため, 定期的に配管検査が実施される。配管系の検査には配管の外部から超音波診断装置等を使って配管内部に生じている亀裂の大きさや位置を推定する外部検査方式<sup>(1)</sup>と配管内に直接 TV カメラ等を挿入して亀裂を直接検査する内部検査方式<sup>(2)(3)</sup>がある。直接視ができる内部検査方式が信頼性の面では優れているものの, 数十メートルにも及ぶ配管内を移動させるためのメカニズム設計の難しさがこの方式の普及を遅らせている。一方で, メカニズムに頼るのではなく, 配管という特殊性を逆に利用して内部に水や空気といった流体を流し, 多数の抵抗体で流体力を受け取って配管内を移動する流体駆動形配管検査ロボットがそのシンプル

さを武器に最近にわかに注目を集めてきた。この流体駆動形配管検査ロボットは, 図1のように抵抗体, 連結ワイヤ, 検査部, 挿入機構部の計四つの部分から構成され, 外部から供給される流体によって配管内部を移動する。したがってロボットは自分の力で能動的に動くことはできなくて, 抵抗体が流体から受ける抗力と揚力によって受動的に運動する。このような多連結形ロボットの流体力学的挙動はきわめて複雑で, 事実検査中にロボットが自励振動を起こしたり, 検査が終わって, ロボットを引き寄せようとしてもロボットが管壁にはりついたまま出てこなかったり, といったような現象が問題化してきている。

本研究では, 以上のような流体駆動形配管検査ロボットの必要性和その問題点を踏まえた上で, このような流体駆動形配管検査ロボットの動的挙動について数値解析的に考察することを目的としている。本論文で

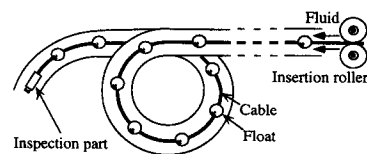


Fig. 1 An overview of the pipe inspection robot

\* 原稿受付 1996年9月4日.

<sup>\*1</sup> 正員, 広島大学工学部(☎739 東広島市鏡山1-4-1).

<sup>\*2</sup> 広島大学大学院.

<sup>\*3</sup> 正員, 神綱リサーチ(株)(☎651-22 神戸市西区高場台1-5-5).

は、(1)ロボットの管壁はつき現象をシミュレーションで確認するとともに、その対応策として流体を出口側から圧送する方法が有効である、(2)曲管の形状によってはロボット先端の検査部を配管中心部に位置決めする最適流速が存在する、(3)ロボットの幾何学的形状およびインピーダンスパラメータが同一であっても、配管の曲率半径によって、検査部のダンピング効果は大きく変化する、といった結果について報告する。

2. 解析モデル

シミュレーションモデルを図2に示す。配管は、曲率半径  $R$  の一様形状を有しているものとする。ロボットのケーブルは直線ばねと直線ダンパでモデル化し、各フロート部は回転ばねと回転ダンパでモデル化する。ただし、各関節にはアクチュエータはなく、ロボットは受動的にしか運動できないものとする。各フロートの形状は球形とする。フロートと管壁との接触は点接触とし、フロートと管壁との接触判定は、配管の中心から表面までの距離を計算し、それが配管の外側にあるか内側にあるかを調べることにより行う。これは、フロートの管軸からの変位を  $s$  (曲率中心方向を正とする) とすると、フロートが配管に接触している条件は  $|s| \geq (L-d)$  で表すことができる。管壁は硬いばねでモデル化し、フロートが配管に接触している場合、フロートが管壁面を押す変位に応じてフロートは式(1)または(2)で表される力を管壁から受けるものとする。

(i)  $|v| \neq 0$  のとき

$$f_{pipe} = (-K_{pipe}h)n + \mu_d(-K_{pipe}h)\text{sgn}(t^T v)t \dots\dots\dots(1)$$

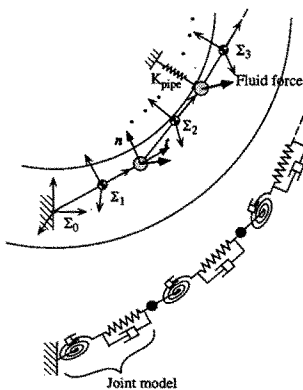


Fig. 2 Simulation model

$$\text{sgn}(w) = \begin{cases} 1 & w < 0 \\ -1 & w > 0 \end{cases}$$

$f_{pipe}$ : フロートが管壁より受ける力

$K_{pipe}$ : 管壁の等価ばね定数

$n$ : 管軸の法線方向の単位ベクトル(曲率中心方向を正とする)

$t$ : 管軸の接線方向の単位ベクトル ( $t^T n = 0$ )

$v$ : フロートの速度ベクトル

$h$ : フロートが管壁面を押す変位置量

$\mu_d$ : 動摩擦係数

(ii)  $|v| = 0$  のとき

$$f_{pipe} = (-K_{pipe}h)n + f_t t \dots\dots\dots(2)$$

$$\left| \frac{f_t}{K_{pipe}h} \right| < \mu_s$$

$\mu_s$ : 静摩擦係数

$f_t$ : フロートが管壁から受ける接線力

本ロボットのような多リンク形ロボットの流体力学的挙動は極めて複雑であり、ロボットが受ける流体力を現実的にモデル化することは一般に極めて困難である。そこで、各フロートが受ける流体力を、式(3)のように管軸に平行な向きの力(抗力)と垂直な向きの力(揚力)との二つに分ける。抗力は、流速が変わらない限り一定とし、渦等によって発生する非定常流体力は考えないものとする。一方、配管内の中心からずれた位置におかれた球が流体によって及ぼされる揚力に関してはほとんど報告がなく、Fritschingらによる数値解析の結果<sup>(4)</sup>やHoらによる実験結果<sup>(5)</sup>が報告される程度である。これらの研究では、いずれも中心からずれた球に対して、中心に戻るような揚力が働くことが示されている。また、管壁近傍での球に作用する力についてもあまり研究例がない。ただし、平板近傍の円柱に作用する流体力についてはZdravkovichの研究がある<sup>(6)</sup>。それによると、円柱が管壁に近づくと円柱を管壁から離すような揚力が円柱に作用すると報告されている。したがって、FritschingらやHoらが報告したモデルと同じ枠内で揚力を評価できる。以上の点を踏まえ、本研究では、管軸からの変位に比例した大きさの揚力が管軸に向かう方向に働くものとし、式(5)でモデル化する。

$$f_{fluid} = f_{drag}t - f_{lift}n \dots\dots\dots(3)$$

$f_{fluid}$ : フロートが受ける流体力

$$f_{drag} = C_D(Re)\bar{U}^2\rho S \dots\dots\dots(4)$$

$$f_{lift} = C_L(Re)\bar{U}^2\rho S \frac{s}{L-d} \dots\dots\dots(5)$$

$f_{drag}, f_{lift}$ : 抗力, 揚力

$C_D$ : 抗力係数

- $C_L$ : 揚力係数  
 $\bar{U}$ : 管内平均流速  
 $S$ : フロート(球)の投影面積  
 $s$ : 管軸からの変位  
 $L$ : 配管の半径  
 $d$ : フロートの半径  
 $Re$ : レイノルズ数  $\left( = \frac{\bar{U}L}{\nu} \right)$   
 $\nu$ : 動粘性係数  
 $\rho$ : 密度

ロボットを圧送するためには流速をある程度大きく設定する必要があり, この場合  $\bar{U}$  が大きくなるため, 管内は高レイノルズ数領域での流れになる. 一般に, 高レイノルズ数領域では  $C_D$  や  $C_L$  は  $Re$  に依存しにくくなる<sup>(7)</sup>. 以上の点を踏まえて,  $C_D$ ,  $C_L$  は流速に対して一定とした.

### 3. 基礎式

**3.1 記号の説明** 本文中に用いるおもな記号を以下に示す.

$A_{i,j}$ :  $\Sigma_j$  座標系から  $\Sigma_i$  座標系への変換行列  $\in R^{3 \times 3}$

$e_i$ : 関節  $i$  の回転軸方向の単位ベクトル  $\in R^{3 \times 1}$

$a_i$ : 関節  $i$  の並進方向の単位ベクトル  $\in R^{3 \times 1}$

$\theta_i$ : 関節  $i$  の軸  $e_i$  まわりの回転角

$x_i$ : 関節  $i$  の軸  $a_i$  上の並進変位

$\omega_i$ : 関節  $i$  の回転角速度ベクトル  $\in R^{3 \times 1}$

$x_i$ : 関節  $i$  の並進変位ベクトル  $\in R^{3 \times 1}$

$W$ : 慣性行列  $\in R^{2n \times 2n}$

$P$ : 関節駆動力ベクトル  $\in R^{2n \times 1}$

$F$ : 各フロートに働く流体力, 管壁からの抗力および摩擦力による関節駆動力ベクトル  $\in R^{2n \times 1}$

$V$ : 各関節に働く遠心力およびコリオリの力の和の項で構成されるベクトル  $\in R^{1 \times 2n}$

$K$ : 剛性行列  $\in R^{2n \times 2n}$

$B$ : ダンピング行列  $\in R^{2n \times 2n}$

$m_i$ : リンク  $i$  の質量

$I_i$ : リンク  $i$  の慣性テンソル  $\in R^{3 \times 3}$

$f$ : 各フロートに働く流体力, 管壁からの抗力および摩擦力ベクトル  $\in R^{3 \times 1}$

添字

$i$ : 基準座標系の側から各リンク, または各関節につけた番号

rot: 回転関節

trans: 並進関節

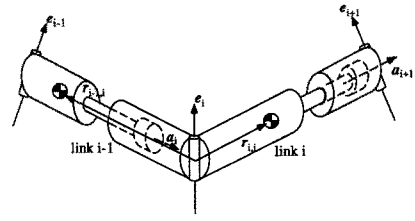


Fig. 3 Two d. o. f. joint model

**3.2 運動方程式** 本研究では  $n$  リンクロボットの運動方程式の導出に appel 法<sup>(8)(9)</sup>を用いる. ロボットの各リンクは, フロート部の回転とケーブルの伸縮という2種類の自由度を備えている. これを, 図3のように各連結部には一つの回転と一つの並進の計二つの自由度の関節があるとみなす. そして, 関節の変位ベクトルを次のようにおく.

$$q = [\theta_1, x_1, \theta_2, x_2, \dots, \theta_n, x_n]^T \in R^{2n \times 1} \quad \dots (6)$$

$\Sigma_i$  座標系からみたリンク  $i$  の質量中心の回転角加速度, 並進加速度は次式で表される.

$$\dot{\omega}_i = \Gamma \dot{q} + \Phi \in R^{3 \times 1} \quad \dots (7)$$

$$\ddot{x}_i = \Omega \dot{q} + \Theta \in R^{3 \times 1} \quad \dots (8)$$

ここで,

$$\Omega = [\beta^i, \eta^i, \beta^i, \eta^i, \dots, \beta^i, \eta^i, 0, \dots, 0] \in R^{3 \times 2n}$$

$$\Theta = [\delta^i] \in R^{3 \times 1}$$

$$\Gamma = [\alpha^i, 0, \alpha^i, 0, \dots, \alpha^i, 0, 0, \dots, 0] \in R^{3 \times 2n}$$

$$\Phi = [\gamma^i] \in R^{3 \times 1} \quad \dots (9)$$

$$\alpha_j^i = A_{i,i-1} \alpha_j^{i-1} \in R^{3 \times 1}$$

$$a_j^i = e_j \in R^{3 \times 1}$$

$$\gamma^i = A_{i,i-1} \gamma^{i-1} + \dot{\theta}_i (\omega_i \times e_i) \in R^{3 \times 1}$$

$$\beta_j^i = A_{i,i-1} \beta_j^{i-1} - A_{i,i-1} (\alpha_j^{i-1} \times r'_{i-1,i})$$

$$+ \alpha_j^i \times r'_{i,i} \in R^{3 \times 1}$$

$$\beta_j^i = \alpha_j^i \times r'_{i,i} \in R^{3 \times 1}$$

$$\eta_j^i = A_{i,i-1} \eta_j^{i-1} \in R^{3 \times 1}$$

$$\eta_j^i = a_j \in R^{3 \times 1}$$

$$\delta^i = A_{i,i-1} \delta^{i-1} - A_{i,i-1} (\gamma^{i-1} \times r'_{i-1,i})$$

$$- A_{i,i-1} [\omega_{i-1} \times (\omega_{i-1} \times r'_{i-1,i})] \times \gamma^i \times r'_{i,i}$$

$$+ \omega_i \times (\omega_i \times r'_{i,i}) + 2x_i (\omega_i \times e_i) \in R^{3 \times 1}$$

$$r'_{i-1,i} = r_{i-1,i} - x_i a_i \in R^{3 \times 1}$$

$$r'_{i,i} = r_{i,i} \in R^{3 \times 1} \quad \dots (10)$$

結局, ロボットの運動方程式は次式で表される.

$$W \ddot{q} = P + F - V^T + Kq + B \dot{q} \quad \dots (11)$$

ここで,

$$W = \sum_{i=1}^n W_i$$

$$V = \sum_{i=1}^n V_i \quad \dots (12)$$

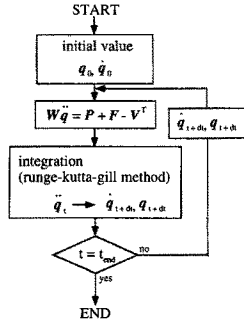


Fig. 4 Flowchart for simulation

$$P = [P_1^{rot}, P_1^{trans}, \dots, P_n^{rot}, P_n^{trans}]^T \dots\dots\dots (13)$$

$$F = [F_1^{rot}, F_1^{trans}, \dots, F_n^{rot}, F_n^{trans}]^T \dots\dots\dots (14)$$

$$K = \text{diag.}[K_1^{rot}, K_1^{trans}, \dots, K_n^{rot}, K_n^{trans}] \dots (15)$$

$$B = \text{diag.}[B_1^{rot}, B_1^{trans}, \dots, B_n^{rot}, B_n^{trans}] \dots (16)$$

$$W_i = m_i \Omega^T \Omega + \Gamma^T \Gamma$$

$$V_i = m_i \Theta^T \Omega + \Phi^T \Gamma_i \Gamma - u^T \Gamma$$

$$u = (I_i \cdot \omega_i) \times \omega_i \in R^{3 \times 1} \dots\dots\dots (17)$$

このように、Appel 法によって導出されたロボットの運動方程式は漸化式で運動が表現されているため、リンク数が容易に変えられるという利点を有している。

また、フロートに働く流体力、管壁からの抗力および摩擦力による関節駆動力は次式で表される。

$$F_i^{rot} = \sum_{k=0}^{n-i} [f_{i+k}, e_i, r_k]$$

$$F_i^{trans} = a_i^T \left( \sum_{k=0}^{n-i} f_{i+k} \right)$$

$$r_k^i = \sum_{l=0}^k r_{i+l, i+l}^i - \sum_{l=0}^{k-1} r_{i+l, i+l+1}^i \dots\dots\dots (18)$$

**3.3 解析手法** 運動方程式を加速度  $\ddot{q}$  の関数と考へ、ある時刻において、各関節の変位、速度および各フロートに働く外力を運動方程式に代入し、そのときの各関節の加速度を求める。この加速度を微小時間区間にわたって数値積分することによって微小時間経過後の各関節の速度、変位を求める。以上の計算を初期時刻から終端時刻まで微小時間ごとに逐次行い、ロボットの運動を求める。数値積分は Runge-Kutta-Gill 法を用いる。この解析法のフローチャートを図 4 に示す。

4. シミュレーション結果

**4.1 定常状態での基本的挙動** 以上のモデルおよび解析手法に基づいて、定常状態でのロボットの基本的な挙動について二次元平面でシミュレーションを行った。シミュレーションで使用したパラメータを表 1 に示す。配管は曲率中心が単一(円形配管)とする。

Table 1 Parameters for simulation

| Link number                        |                          | 1     | 2, ..., 9 | 10    |
|------------------------------------|--------------------------|-------|-----------|-------|
| Mass                               | cable[kg]                | 0.97  | 0.97      | 0.97  |
|                                    | float[kg]                | 0.34  | 0.34      | 0.34  |
| Link length [m]                    |                          | 0.1   | 0.1       | 0.1   |
| Float diameter [m]                 |                          | 0.02  | 0.02      | 0.02  |
| Spring constant                    | $K^{rot}$ [Nm/rad]       | 0.2   | 0.2       | 0.2   |
|                                    | $K^{trans}$ [N/m]        | 2000  | 2000      | 2000  |
| Damping factor                     | $B^{rot}$ [Nms/rad]      | 0.2   | 0.2       | 0.2   |
|                                    | $B^{trans}$ [Ns/m]       | 5000  | 5000      | 5000  |
| Initial displacement               | $\theta_i$ [rad]         | 0.253 | 0.505     | 0.505 |
|                                    | $x_i$ [m]                | 0.1   | 0.1       | 0.1   |
| Initial velocity                   | $\dot{\theta}_i$ [rad/s] | 0     | 0         | 0     |
|                                    | $\dot{x}_i$ [m/s]        | 0     | 0         | 0     |
| Spring constant of pipe wall [N/m] |                          | 10000 |           |       |
| Radius of curvature of pipe [m]    |                          | 0.2   |           |       |
| Pipe diameter [m]                  |                          | 0.05  |           |       |
| Drag coefficient $C_D$             |                          | 1     |           |       |
| Fluid velocity $\bar{U}$ [m/s]     |                          | 5     |           |       |
| Lift coefficient $C_L$             |                          | 0.1   |           |       |

ロボットの自然状態はまっすぐのびた状態(各回転関節の相対角度がすべて零)とし、ロボットの初期姿勢は、各回転関節に一定量の変位を与えて配管の管軸に沿うような姿勢に設定する。この状態を初期状態とし、 $t=0$  で自由運動状態に設定するとともに流速を零から既定値まで時間  $t$  に対して式(17)のように直線的に変化させる。

$$u = \begin{cases} \bar{U}^t & 0 \leq t < T \\ \bar{U}^T & T \leq t \end{cases} \dots\dots\dots (19)$$

$u$ : 管内流速  
 $T$ : 時定数

$t \geq 0$  においてロボットは、各関節やリンクに設定されたインピーダンス(回転関節および並進関節の剛性、ダンピング、リンクの質量)に応じて加速度運動をはじめめるが、やがてダンピングによって運動は減衰し、十分大きな  $t (\gg T)$  において定常状態に落ち着く。この場合、設定する  $\bar{U}$  によってロボットの最終姿勢は大きく二つに分けることができる。 $\bar{U}$  が比較的小さい場合、管壁に沿ってロボットを曲げようとする抗力や配管中心部にフロートを近づけようとする揚力よりも関節ばねの復元力のほうが大きくなり、結果としてロボットは図 5(a) のように外側の管壁にはりついた状態となる。一方、 $\bar{U}$  が大きくなると、逆に流体力が関節ばねの復元力に打ち勝ち、結果としてロボットは図 5(b) のように先端リンクを除いて管壁の内側にはりついた状態になる。さらに  $\bar{U}$  を大きくすると図 5(c) のようにロボット先端まで配管の内側にはり

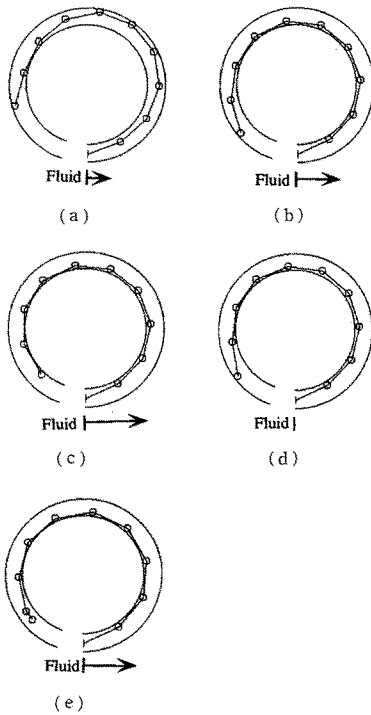


Fig. 5 Simulation results

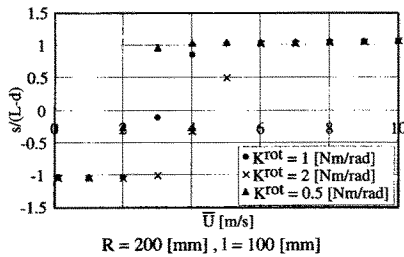


Fig. 6 Position of the inspection part

ついた状態になる。図5(d)は、この状態で  $u=0$  にした場合の結果である。このようにしてロボットが配管にはりついた状態で  $u=0$  にするとロボットは管壁にはりついたまま元の状態に戻らない。このようなはりつき現象は実際のロボットでも起こる可能性がある。一方、図5(e)は(d)の状態から  $u=-\bar{U}$ 、つまり流体を出口側から流した場合の結果である。このように流体を出口側から圧送すると、はりつき現象は簡単に解消される点に留意されたい。図6は、流速  $\bar{U}$  と平衡状態での検査部位置との関係を示したもので、検査部位置は配管の半径で無次元化している(曲率中心方向を正とする)。ただし、関節剛性をパラメータとしている。図6より、関節剛性に応じて検査部を中心部に位置決めできるような最適流速  $\bar{U}_{opt}$  が存在し

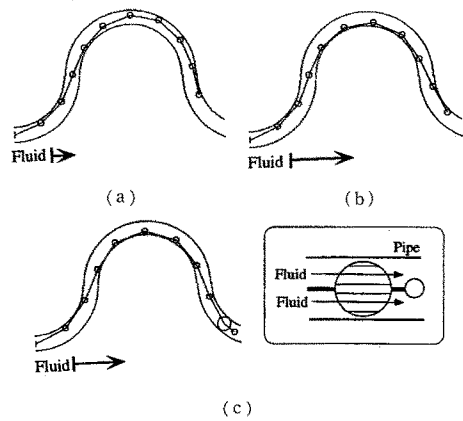


Fig. 7 Simulation result

ていることがわかる。したがって、検査部にTVカメラ等がついていれば、外部から先端位置がモニターできるから、ロボットの進行に応じて検査部を絶えず管中心に位置決めするように流速  $\bar{U}$  を調節することができる。

一方、配管検査ロボットで重要なことは、ロボット先端にとりつけた検査部を配管の中心部に位置決めするとともに、検査部のセンサ(例えばTVカメラ)を管軸に沿うように制御することである。ここで、検査部を含む最終リンクが連結されている回転関節の回転剛性が零、つまり回転フリーになっている状態を想定する。このような状態で、第  $2n-1$  関節(関節数はリンク数  $n$  の2倍)が配管中心にくるように流速を調整すると、検査部を含む最終リンクは流体力によって自動的に管軸に沿う姿勢となる。図5(f)は、このような状態でシミュレーションにより検証したものである。ここで、最終リンクを短くしたのは、フロートが受ける抗力により生じる内側に曲げるモーメントを小さくして、先端が内側によせられるのを防ぐためである。

次に、配管の曲率中心が複数個存在する場合(S字形配管)でのロボットの基本的挙動についてシミュレーションを行った。パラメータは表1と同じものを使用した。この状態から先のシミュレーションと同様に管内の流速を直線的に変化させると、 $\bar{U}$  が比較的小さい場合、ロボットは図7(a)のような状態となる。図7(a)より、配管の曲率中心がジャンプする付近でロボット先端が配管の曲率中心に近い側にはりついてしまう領域が存在する。一方、 $\bar{U}$  が大きくなると、ロボットは図7(b)のような状態となる。図7(b)より、 $\bar{U}$  が大きくなってもロボット先端は配管の曲率中心に近い側にはりついたままである。このように、S字

形配管の場合、 $\bar{U}$ を増加させても先端を中心部に位置決めできるような流速は必ずしも存在しない。この場合、先端を配管の中心部に位置決めする方法として以下のような手法が考えられる。ロボットの第  $n-1$  番めのフロートの径を大きくすることにより第  $2n-1$  関節(最終リンクが連結されている回転関節)を絶えず配管の中心部近傍に位置決めさせることを考える。そして第  $2n-1$  関節の回転剛性を零とすれば、最終リンクは流体力によって自動的に管軸に沿う姿勢となる。図7(c)は、このような状態をシミュレーションにより検証したものである。フロート径を大きくすると流体が流れにくくなり不都合が生じるが、図7(c)のようにフロートに大きな穴をあけて流体がフロート内を通過できるようにしておけば、この問題を解消できる。また、この方法は円形配管内のロボットについても応用できるため、最適速度  $\bar{U}_{opt}$  にこだわる必要はなくなる。また、S字形配管の場合でも、ロボットの管壁はりつき現象が確認された。

4.2 配管の形状とロボット先端の動的挙動との関係

ロボット先端の検査部が振動することは、管内壁を検査する上で好ましくない。ここでは、ロボット先端の管軸の法線方向の挙動と配管曲率との関係について調べる。抗力は、一定と仮定しているため、ロボット先端は一定量伸びるが、これによって先端部の振動が誘発されることはないので、先端の振動的挙動を調べるシミュレーションでは抗力を0Nとしている。はじめに、円形配管に対して図8のように単純化したモデルでシミュレーションを行った。ロボットの先端のみを極端に重くし、その他の部分をできるだけ軽くし、揚力は先端のみにかかるように設定した。また、

各関節にはダンピングは存在するが、回転剛性は零としている。ロボットの初期姿勢は、図9のように種々の配管に対してそれぞれ配管の管軸に沿った状態からさらに先端の回転関節だけを0.1 rad内側に回転させた姿勢とし、この状態からロボットを自由振動させる。ただし、リンクパラメータ(リンク長等)等はすべて表1と同一に設定している。図10はいろいろな曲率半径の配管に対して、ロボット先端の管軸の法線方向の変位の時間的変化を調べたものである。図10より、ロボット先端はフロートに作用する揚力によって振動をはじめめるが、時間がたつにつれて関節のダンピング効果によって振動が減衰しているようすがわかる。ここで、配管の曲率半径によって減衰のしかたに差が見られる点に留意されたい。ロボット先端の運動を近似的に正弦運動とみなし、式(18)のような振動の減衰率<sup>(11)</sup>を定義する。

$$\xi = \frac{|x_1|}{|x_2|} = \exp\left[\frac{\pi\lambda_s}{\sqrt{1-\lambda_s^2}}\right] \dots\dots\dots (20)$$

$x_1, x_2$ : 振動の極値

$\lambda_s$ : シミュレーション結果から推定された減衰係数

それぞれの曲率半径でのシミュレーション結果から減衰係数を推定した結果を図11に●印で示す。

一方、ロボットの各関節に備わっているインピーダンスからロボット先端のインピーダンスに換算し、得られた剛性、粘性、慣性から減衰係数に変換することもできる<sup>(12)</sup>。

$$A_e = (JA_s J^T)^{-1} \dots\dots\dots (21)$$

$A_e, A_s$ : ロボット先端(作業空間)、関節空間でのインピーダンス行列

$J$ : ヤコビ行列

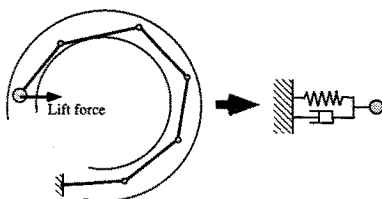


Fig. 8 An extreme model

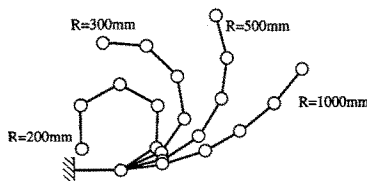


Fig. 9 Initial postures of the robot

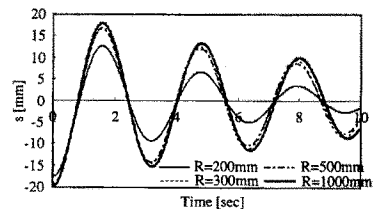


Fig. 10 Simulation results

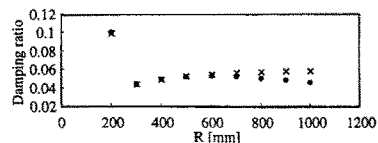


Fig. 11 Damping ratio at the end point of robot

$A_e$  は基準座標系  $\Sigma_0$  からみたもので、これを管軸方向基準のインピーダンス  $A_t$  に変換すると、

$$A_t = H^T A_e H \dots \dots \dots (22)$$

$H$  :  $\Sigma_0$  から  $\Sigma_n$  への回転行列

この  $A_t$  は各要素を  $b_{ij}$  とすると、式(21)によって減衰係数  $\lambda_e$  を算出することができる。

$$\lambda_e = \frac{c_{11}}{2\sqrt{m_{11}k_{11}}} \dots \dots \dots (23)$$

$k_{11}$  : 剛性に関して得られた  $A_t$  の管軸法線方向成分  
 $c_{11}$  : 粘性に関して得られた  $A_t$  の管軸法線方向成分  
 $m_{11}$  : 慣性に関して得られた  $A_t$  の管軸法線方向成分  
 図11の×印は、この  $\lambda_e$  をプロットしたものである。図11より、曲率半径  $R$  が極端に大きい場合を除いて  $\lambda_e$  と  $\lambda_e$  は極めてよく一致していることがわかる。これより、極限的なモデルに対して本シミュレーションプログラムの妥当性が検証できたことになる。

次に、より一般的なモデルとして各リンクに同じ質量(1.315 kg)を、各回転関節に同じばね定数(1.0 Nm/rad)のばねを与えてシミュレーションを行った。ここで、ロボットの自然状態は、まっすぐのびた状態を自然状態とした場合、先のシミュレーションの結果からわかるようにロボット先端が配管にはりついてしまつて動的挙動を調べることができないので、ロボット先端を管軸近傍に位置させるために管軸に沿った状態に設定した。図12は流体を流さない場合で、いろいろな曲率半径の配管に対して、ロボット先端を振動させたときのロボット先端の管軸の法線方向の変位の時間的変化を調べたものであり、図13はロボットの各リンクまたは各関節に備わったインピーダンスより計算したロボット先端の管軸の法線方向の減衰係数を示したものである。図13より、減衰係数は、 $R=1000$  mm から  $R=300$  mm までの間はわずかに減少しているが、 $R=200$  mm になると大きく増加している。これに対して、図12をみると、ロボット先端の挙動は、 $R=200$  mm の場合には他の場合と比べて強いダンピング効果が現れており、この傾向は減衰係数の傾向と一致する。図14にそれぞれの曲率半径での口

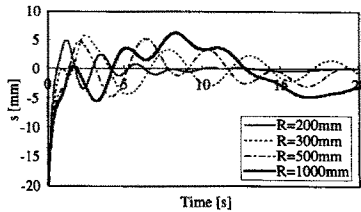


Fig. 12 Simulation results

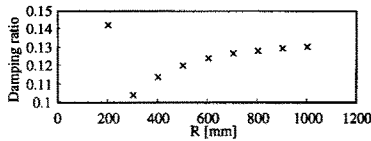
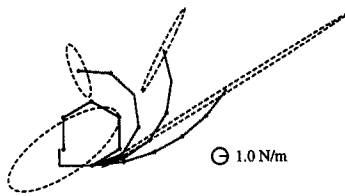
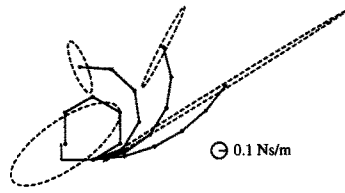


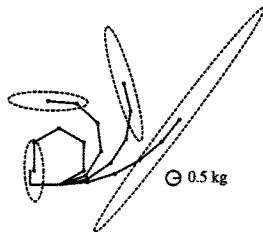
Fig. 13 Damping ratio at the end point of robot



(a) Stiffness



(b) Viscosity



(c) Inertia

Fig. 14 Impedance ellipses at the end point of robot

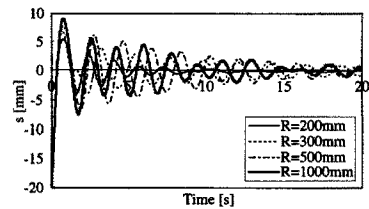


Fig. 15 Simulation results

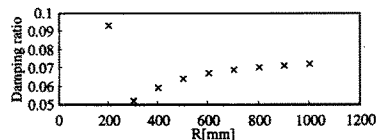


Fig. 16 Damping ratio at the end point of robot



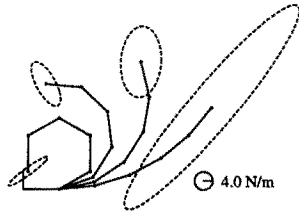


Fig. 17 Stiffness ellipses at the end point of robot

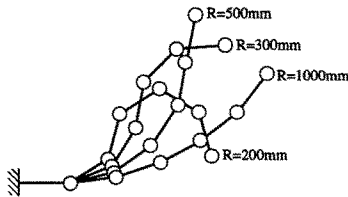


Fig. 18 Initial posture of the robot

ロボット先端のインピーダンスだ円を示す。図 14 より、剛性、粘性の管軸の法線方向成分は、 $R=200\text{ mm}$  になると同じ割合で増加しているのに対し、慣性の管軸の法線方向成分はそれほど変化していない。その結果、式(21)からもわかるように、減衰係数は  $R=200\text{ mm}$  になると大きく増加する。以上より、配管の曲率半径がある程度小さくなると、ロボット先端では強いダンピング効果が現れる。図 15 は流体を流した場合のシミュレーション結果で、図 16 はロボットの各リンクまたは各関節に備わったインピーダンスに、各フロートに働く揚力を等価的に直線ばねに置き換え、これから換算されるロボット先端での剛性と各関節のばねが先端に作り出す剛性を考慮して計算したロボット先端の管軸の法線方向の減衰係数である。図 17 に、揚力が先端に作り出す剛性のだ円を示す。配管の曲率半径によってだ円が大きく変化しているが、この剛性の管軸の法線方向成分は、配管の曲率半径に関係なく一定となっている。以上より、この場合のロボット先端の減衰係数は、揚力が作り出す剛性に加わるために、流体を流さない場合と比べて全体的に小さくなっているが、傾向は流体を流さない場合と変わらない。

次に、S 字形配管について同様のシミュレーションを行った。配管の曲率半径の大きさを変えると、ロボットの姿勢は図 18 のように変化する。 $R=1000\text{ mm}$  のときには、円形配管の場合と同じ姿勢になっている。図 19 はいろいろな曲率半径の配管に対して、ロボット先端の管軸の法線方向の変位の時間的な変化を、図 20 はロボットのインピーダンスから換算したロボット先端の管軸の法線方向の減衰係数  $\gamma_n$  を示してい

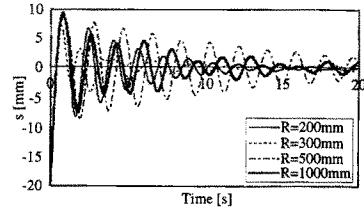


Fig. 19 Simulation results

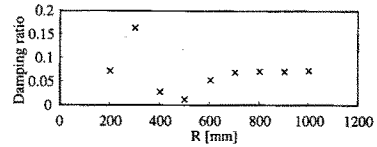


Fig. 20 Damping ratio at the end point of robot

る。図 20 より、この場合、円形配管の場合と異なり、配管の曲率半径によって複雑に変化している。図 19 をみると、配管の曲率半径によって振動の減衰に大きな差がみられるが、例えば減衰係数の小さい  $R=500\text{ mm}$  の場合では振動は減衰しにくくなっていて、図 20 の減衰係数の傾向とほぼ一致している。したがって、S 字形配管の場合、円形配管の場合のようにある程度配管の曲率半径が小さくなるとロボット先端のダンピング効果が強くなるとは限らないが、配管の曲率半径によってロボット先端のダンピング効果は大きく変化する。この場合もロボット先端のインピーダンスからこの原因を明快に説明することができる。

このように、ロボットの各リンクまたは各関節に備わっているインピーダンスが同じであっても、配管の形状が変わるだけでロボット先端の検査部のダンピング効果は変化することがわかる。実際の検査では、ロボットが配管内部を移動すると検査部の減衰係数が変化し、不安定な状態になる場合があることに注意が必要だと考えられる。

## 5. 結 論

本論文では、流体駆動形配管検査ロボットを二次元でモデル化し、シミュレーションにより曲管内でのロボットの動的挙動について調べた。得られた結果は、以下のとおりである。

(1) 各フロートに流体力が働く場合、抗力がある程度大きい場合にはロボットは管壁の曲率中心に近い側にはりつき、この状態から流体を止めてもロボットははりついたまま元の状態に戻らないはりつき現象がシミュレーションでも確認できた。

(2) 検査部付近のフロート径を大きくし、検査部

を含む最終リンクが連結されている回転関節の剛性を零とすれば、配管内の任意の位置で検査部は管軸中心に沿うような位置、姿勢となり、検査作業に都合がよい。

(3) ロボット先端の管軸の法線方向の減衰係数は、配管の曲率半径によって変化する。

本研究は H 8 年度中国電力技術研究財団からの研究助成によって行われたものの一部である。最後に、この研究テーマを御提供いただいた三菱重工高砂研究所の大道武生主幹(前室長)に心より感謝の意を表す。

### 文 献

- (1) 細貝英実・福田敏男, 自律形配管診断ロボットの研究, 機論, 51-467, C(1986), 1655-1662.
- (2) 福田敏男・細貝英実, 管内走行検査ロボットの研究, 機論, 52-477, C(1986), 1584-1588.
- (3) 藤原茂・金原了二・岡田徳次・実森毅, 分節型主要配管内検査点検ロボットの開発, 日本ロボット学会誌, 12-2 (1994), 318-327.
- (4) Fritsching, U. and Bauckhage, K., The Behavior of Spherical Particles in Laminar Shear Flow-A Numerical and Experimental Approach, *Proceeding of The Int. Conf. Multiphase Flows*, (1991), 415-418.
- (5) Ho, B. P. and G. Leal, L., Inertial migration of rigid spheres in two-dimensional unidirectional flows, *J. Fluid Mechanics*, 65 (1974), 365-400.
- (6) Zdravkovich, M. M., Modelling interference between a subsea pipeline and seabed, *Proc. of Int. Conf. Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, Coventry, England, September, 22-24(1982)*, 339-344.
- (7) 豊倉富太郎・亀本喬司, 流体力学, (1976), 235, 実教出版株式会社.
- (8) Vukobratovic, M. and Potkonjak, V., *Scientific Fundamentals of Robotics 1(Dynamics of Manipulation Robotos)*, (1982), 128, Springer-Verlin Heidelberg New York.
- (9) 増田隆広・有本卓・二川暁美・宮崎文夫, アッペル法による閉ループ力学系の運動解析, 日本ロボット学会誌, 4-1 (1986), 9-15.
- (10) 吉川恒夫, ロボット制御基礎論, (1988), 95, コロナ社.
- (11) 亘理厚, 機械力学, (1969), 10, 共立出版.
- (12) Khatib, O., A unified approach for motion and force control of robot manipulators; The operational space formulation, *IEEE J. robotics and autom.*, RA-3-1 (1987), 43-53.