

1 インチ用配管作業ロボットの開発

宮川 豊美* 鈴森 康一* 木村 正信* 長谷川 幸久*

Development of Micro Inspection Robot for Small Piping

Toyomi Miyagawa*, Koichi Suzumori*, Masanobu Kimura* and Yukihiisa Hasegawa*

A micro inspection robot for 1-inch pipes was developed. The robot can undertake visual inspections inside piping and collect small objects. It is 110 [mm] long, has an external diameter of 23 [mm], and weighs 16 [g]. The robot is equipped with a high-quality micro CCD camera and a two-digit hand for manipulating small objects in pipes. It is propelled by a micro electromagnetic motor. The wheels, which are driven by planetary reduction gears and worm gears, press against the pipe wall and enable the robot to travel inside even in vertical pipes and curved pipes. It travels at a speed of about 6 [mm/s] and the pulling force exerted is approximately 1 [N]. In this report the robot system, the various micro technologies used in the development of the robot, including the micro actuator, micro reduction gears, micro robotics hands, and micro CCD camera, and the specifications of the robot are presented.

Key Words: Micro Robot, Micro Actuator, Inspection Robot, Mobile Machine

1. はじめに

原子力発電所や化学プラントなどに設置されている配管は、施設の安全確保のためにその健全性を確認する必要がある。この作業は、配管の外部から人間が検査診断する方法が一般的に実施されている。埋設配管や小口径配管の内部のような人間が直接検査できない狭隘箇所については、分解点検や工業内視鏡などを管内に挿入して検査を行っている。しかしながら、複雑な形状の管や挿入距離が長いと挿入操作に技術が必要とされたり、検査に時間がかかるなどの問題があった。そのため、点検作業の自動化、効率化のために管内を自走しながら点検可能なロボットの研究が各所で行われている。

点検用のテレビカメラを搭載し、管内を移動しながら検査を行うことが可能な管内点検ロボットは、口径が 150 [mm] 以上の大口径用に開発されている [1] [2]。1~2 インチ配管を対象にした細管内移動ロボットとしては、車輪駆動の管内走行ロボット [3]~[6]、流体アクチュエータを用いた管内移動ロボット [7] [8] が提案されている。また、内径 20 [mm] 以下の配管を対象として、圧電素子、超磁わい素子などを用いた微小管内移動ロボット [9]~[12] も発表されている。一方、筆者らは 2 インチ管を対象に車輪駆動の遊星車輪機構 [13] を提案し、空気圧駆動のフレキシブルマイクロアクチュエータ (FMA) [14] と組み合わせた配管点検ロボットを開発・報告している [13]。このロボットは、

エルボ管、T 字管、垂直部が通過でき、先端にテレビカメラと照明を搭載して、モックアップ試験でロボットの基本機能を確認している。

このように配管点検ロボットは管径やその使用環境に適用した開発が行われていたが、1 インチ程度の小口径配管を対象としたものは移動機構だけであり、配管内を移動しながら目視検査が可能なものは大口径用に限定されていた。また、配管内では点検だけでなく異物の回収や堆積物のサンプリングなどの作業を行う必要があり、このような作業を可能にするためには小形カメラと汎用性の高いハンドを備えた配管作業ロボットを開発することが必要不可欠である。

そこで、本研究では 1 インチ配管内 (内径 24 [mm]) を移動して、配管内の目視点検と異物の回収が可能な配管作業ロボットの開発を行った。開発の課題としては、目視点検と異物回収を行うそれぞれの構成要素およびロボットの小型化、垂直管や曲管を通過できる走行性能の確保である。開発した配管作業ロボットは、小形テレビカメラと FMA で構成したハンドを用いることでロボットの小型・軽量化を実現し、減速機が内蔵された高出力電磁モータと先に提案した遊星車輪機構を利用した移動機構で走行性能を確保した [15]。本報告では、開発した 1 インチ用配管作業ロボットの構成、その要素技術を説明し、実験による速度、牽引力などの基本動作性能について報告する。

2. ロボット開発の仕様

配管内部の検査に従来から利用されている工業内視鏡は、管外からの操作により数インチから極細径配管までの観察が可能

原稿受付 1998 年 1 月 29 日

*株式会社東芝

*Toshiba Corporation

である。しかし、配管の曲管部の数が多い場合や部位までの距離が長くなると操作性は極度に低下し、目標部位への到達が困難である。しかも得られる画像の画素が少なく、検査としての目視性能を満足するものではなかった。また、配管内には据付作業時や保守点検時に入り込んだ小石や金属片などの異物が存在することも多く、この異物を回収するための機構が必要である。そこで、配管内を自由に走行できる移動機構に目視検査を行う観察機構と異物の回収を行う回収機構を搭載させたロボットを実現することを目指した。本配管作業ロボットの開発にあたっては、以下に示す仕様を満足するように設計を行った。

(1) ロボットは、観察機構と回収機構を備え、1 インチ配管の内部を自走しながら配管内の目視点検や異物回収の作業ができる構造とする。

(2) 観察機構は配管内面の状態が観察でき、傷や異物を認識できる小形カメラとする。

(3) 回収機構は管内の異物(大きさが3[mm]程度)を挟み持ち上げることのできるハンドとする。

(4) 垂直管および二つ以上ある曲管部を有する配管内を通過できるものとする。

3. 配管作業ロボットの構成

3.1 全体構成

前章の仕様を満足させるロボットの設計を行い、開発した配管作業ロボットの構成を Fig. 1 に、管内を移動しているロボットの外観を Fig. 2 に示す。ロボットは管内を走行する移動機構の先端にマイクロカメラとマイクロハンドが搭載されている。大きさは直径23[mm]、長さ110[mm]で、質量は16[g]である。移動機構は中央部にゴム製チューブ(フレキシブルリンク)を配置し、その前後に遊星歯車機構と車輪列から構成された車輪走行ユニットを組み合わせた構成である。車輪は管軸に対して放射状に配置され、前輪には4個の車輪が一体化された車輪列が2組、後輪には3組の車輪列が取り付けられている。これらの車輪列を管壁に押し付けながら、車輪の回転力で管内を走行する。カメラは小形で高分解の映像が得られる CCD カラーカメラ [16] を用い、ハンドはコンパクトで多自由度の動作が可能な FMA を用いて構成されている。カメラとハンドの微妙な位置合わせをさせる作業部回転機構には扁平形状のアクチュエータで高トルクを出力できる空圧ワブルモータ [17] を用いた。また、Fig. 3 に配管作業ロボットのシステム構成を示す。制御装置は、ロボットの動作を制御するモータドライバとハンドおよびワブルモータを動作させる電磁弁などで構成されている。ロボット本体には、電磁モータ(M)、FMA(A)、ワブルモータ(M)とテレビカメラなどを搭載し、ロボット本体と制御装置はケーブルで接続されている。ケーブルはカメラ用の電線、モータ用の電線およびハンド・ワブルモータ用のエアチューブから構成されている。ロボットの操作はオペレータが搭載したカメラ映像を見ながらコントロールペンダントで行う。コントロールペンダントでは、ロボットの前・後進、停止とハンドの各種動作、カメラとハンドを搭載した作業部の回転を操作できる。

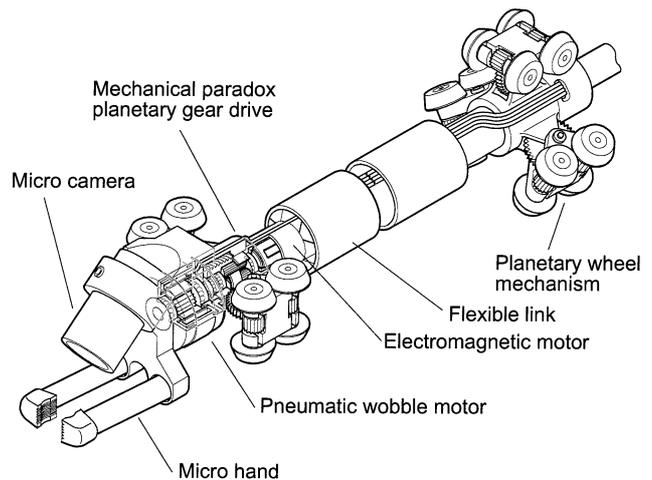


Fig. 1 Configuration of micro inspection robot

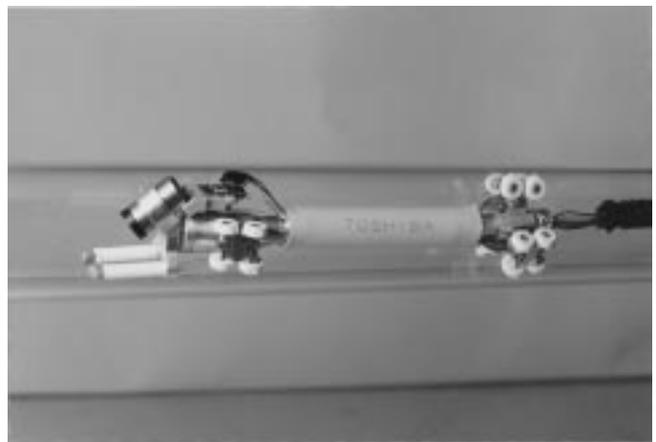


Fig. 2 The outline of micro inspection robot

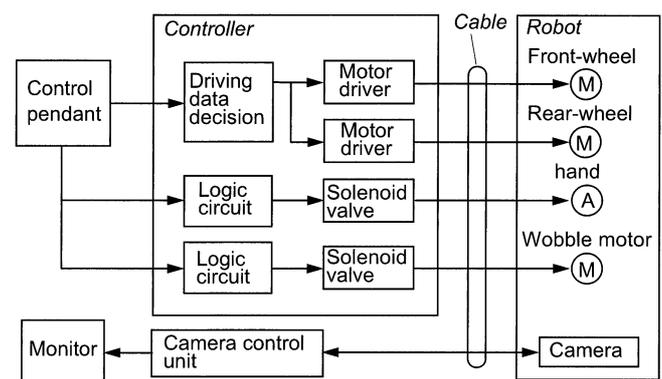


Fig. 3 Configuration of micro inspection robot control system

3.2 車輪走行ユニット

3.2.1 遊星車輪機構

移動機構を構成している車輪走行ユニットは遊星車輪機構と呼ばれるもので、車輪の管壁への押し付けと、管内径変化に対応できる特長を持っている。Fig. 4 に遊星車輪機構の基本構成

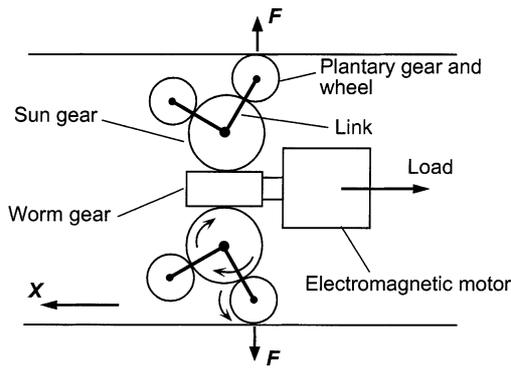


Fig. 4 Structure of the planetary wheel mechanism

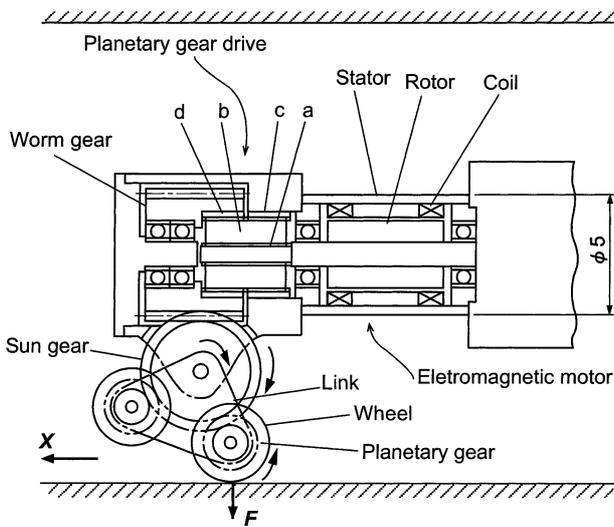


Fig. 5 Cross-sectional view of wheel mechanism

図を示す．電磁モータの回転はウォームギヤ，太陽歯車（ウォームホイール），遊星歯車と伝達され，遊星歯車と軸を共有する車輪を駆動する．遊星歯車は太陽歯車の中心軸回りを回転できるリンクに支えられている．Fig. 4 に示す方向にロボットが移動する場合，各歯車は矢印の方向に回転し，太陽歯車で駆動される車輪が管壁に当たるまで公転する．そして車輪の公転は止められ，車輪が自転して推進力を発生する．したがって，管内径の変化に応じて車輪の公転角度を変化させて，車輪が管壁に常に接触するようにしている．もう一つの特長は，負荷が進行方向とは逆方向に作用した場合，公転軸が回転しようとするため車輪を管壁に押し付けるくさび効果が作用することである．このため，管軸方向の負荷に応じて車輪のグリップ力が変化し，スリップを防止することができる．車輪の材質はシリコンゴムである．ウォームギヤと噛み合う太陽歯車は，噛み合い効率を考慮してはすば歯車を使用した．はすば歯車のねじれ角はウォームギヤの進み角と同じ角度とした．

3.2.2 モータ・減速機

移動機構における動力源はロボットの走行性能を満足させる高出力なアクチュエータが要求される．そこで，小形で制御が容易な減速機を内蔵した電磁モータを採用した．Fig. 5 に動力

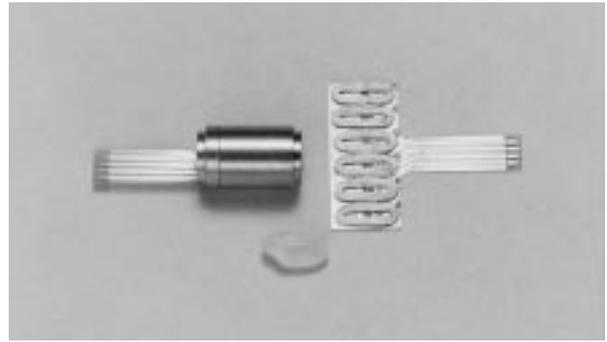


Fig. 6 The outline of micro motor (ϕ 5 [mm])

部の断面図を示す．動力部は電磁モータの出力軸に遊星歯車減速機とウォームギヤを直結させた構造になっている．モータは高効率，高トルク化を実現するために4極6コイルで構成した．ステータヨークを兼用するモータケースの内側に薄形の空心コイルを配置し，その内側で軸受に支持された希土類磁石からなるロータが回転する構造である．スペース節約のため，ブラシおよびロータ位置を検出する位置センサを省いた構成となっている．大きさは外径5 [mm]，長さ8 [mm] である．ロータは4極に着磁された希土類磁石（SmCo）であり，軸を挿入し，接着固定されている．ステータは絶縁と配線を兼ねたフレキシブル基板に6個のコイルが等配に固定され，モータケースの内側に円筒状となるように成形されている．Fig. 6 に電磁モータの外観とコイルアセンブリを示す．コイルは直径0.06 [mm] の銅線を35ターン巻いてある．電磁モータの出力特性は，ブラシレス駆動させた場合の無負荷回転数，無負荷電流，直流抵抗を測定し，直流モータの計算式 [18] より算出した．コイル印加電圧が4 [V] の場合に始動トルクは0.17 [mNm]，最大出力は0.214 [W] であり，最大効率は22 [%] の値を得た．この特性は従来サイズ（外径5 [mm]）の2極3コイル構造のモータと比較して各項目とも2倍の値であり，高効率，高出力化を実現した．なお，この配管ロボットでは低速域から高速域までモータを安定して駆動させる必要があり，シンクロナス駆動を適用している．

減速機は構造が単純で1段で高減速比が得られる不思議遊星歯車減速機構 [19] を利用したものである．Fig. 5 に示す歯車 a, b, c, d はモジュール0.05 で歯数はそれぞれ12, 29, 69, 72 である．Fig. 7 に遊星歯車減速機の外観を示す．この減速機の減速比は1/162 で，従来減速機 [19] と同サイズでありながら減速比は4倍である．移動機構の動力部はモータと減速機を同軸上に一体化し，さらに減速機の出力軸をウォームギヤの内空に直結させることで短縮化を図った．モータ軸の回転は，1/1620 に減速されて車輪に伝達されている．

3.3 フレキシブルリンク

フレキシブルリンクは薄肉構造のゴム製チューブから構成されている．エルボ管のような曲がった配管を通過するときは，フレキシブルリンクが管形状に沿って変形して曲管を通過する．このリンク内部にはカメラやハンドのケーブル類が挿通されている．



Fig. 7 The outline of micro planetary gear drive (ϕ 5 [mm])

3.4 マイクロカメラ

ロボット先端部に装着したマイクロカメラは、配管内面の傷や異物の目視点検に要求される高画質を得るために、1/4 インチ総画素数 41 万画素の CCD カラーカメラを搭載している。Fig. 8 にカメラヘッド部の外観を示す。カメラヘッド部の大きさは直径 7 [mm]、長さ 12 [mm] で、質量は 1.2 [g] である。マイクロカメラは、カメラヘッド部とカメラ制御部とをカメラケーブルで接続する、カメラヘッド分離型構造となっている。カメラヘッド部は、撮像レンズ・光学ガラス・CCD・出力回路で構成され、カメラケーブルにより CCD を駆動する水平駆動パルス・垂直駆動パルス・CCD 出力信号・電源等を得ている。カメラケーブルは、直径 2.8 [mm] 12 芯の極細シールド線を用いている。また、カメラ制御部では CCD からの信号をデジタル信号処理する回路、CCD の露光時間を自動制御する電子アイリス機能、自動白バランス機能などをもち、水平解像度 470TV 本・垂直解像度 350TV 本の高精細な TV 画像を得ている。Table 1 にマイクロカメラの主な仕様、使用したレンズ仕様を示す。

Fig. 9 に CCD カメラの断面図を示す。カメラヘッド部は小形細形化するために TOG (TAB On Glass) 実装 [16] を用いて構成した。従来の CCD 撮像素子は、セラミックパッケージ内に収納し、ワイヤボンディングにより配線しカバーガラスを付け封止していた。これをマイクロカメラに用いると、パッケージの大きさでカメラヘッド形状が決まり小形化が難しい。TOG 実装は、CCD チップをそのまま基板に実装するため CCD チップサイズとほぼ同等のパッケージ外形を実現することができる。TOG 実装の構成部品は、CCD の画素ピッチとレンズから入る光線の空間周波数成分との折り返し歪みを避けるための光学フィルタ、TAB (Tape Automated Bonding) 基板および CCD チップである。光学フィルタはカラー画像を得るために不要な 700 [nm] 以上の波長をカットする近赤外カットフィルタが蒸着されている。Fig. 9 に示すように外径 6.4 [mm]、厚み 1.6 [mm] の撮像部が得られ、マイクロカメラの外径を 7 [mm] にすることができた。CCD 信号出力部は、フレキシブル基板を用い、撮像部と熱圧着により接合し、カメラケーブルをフレキシブル基板に直接ハンダ付けすることで信号出力部をコンパクトにし、カメラヘッドの小形化を実現した。



Fig. 8 The outline of micro CCD camera head

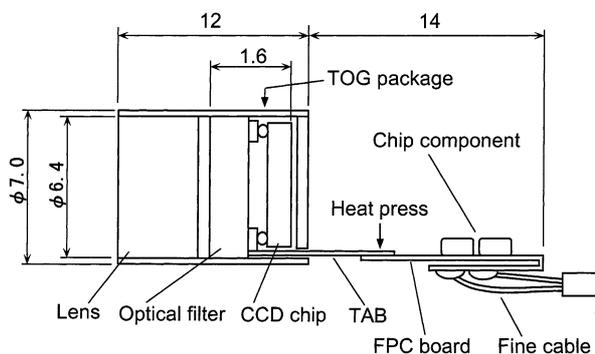


Fig. 9 Cross-sectional view of micro CCD camera

Table 1 Micro camera and lens specifications

Size	ϕ 7.0×12 mm
Weight	1.2 g
CCD	1/4 inch, 410,000 pixels
Video output	NTSC system
Resolution	More than 470 lines(H), More than 350 lines(V)
Standard intensity	400 lx (F2.5, 3000K)
Lens	f3.4mm F5.6 Picture angle 56.4° (H), 41.5° (V)
Power	DC 12V, 5W

3.5 マイクロハンド

管内における異物の回収や堆積物のサンプリングにおいて、汎用性の高いハンドが要求されることが多い。このような作業を行うには、コンパクトな構造の多自由度のハンドが必要であり、空気圧で駆動される FMA を用いた。FMA は繊維とゴムの複合材料からできた空気圧アクチュエータで、内部の三つの圧力室の内圧制御により任意方向への湾曲と長手方向への伸縮の、計 3 自由度の動作ができる [14]。

今回、直径 3 [mm]、長さ 15 [mm] の FMA を Fig. 10 に示すように、2 本用いてハンドを構成した。圧力調整には、それぞれの圧力室ごとに、外径 0.5 [mm]、内径 0.2 [mm]、長さ 1.5 [mm] の送気チューブ (テフロンチューブ) を通じて、電磁ソレノイド弁によるオンオフ制御を適用した。通常最もよく使うハンド姿勢として、Fig. 10 に示すように、五つのモード

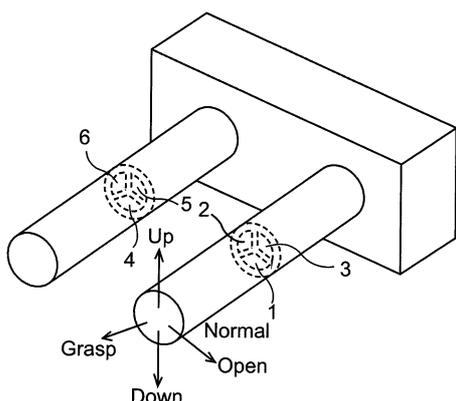


Fig. 10 Configuration of micro hand

Table 2 Micro hand drive pattern

	Valve 1	Valve 2	Valve 3	Valve 4	Valve 5	Valve 6
Normal	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Up	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
Down	OFF	ON	ON	OFF	ON	ON
Open	OFF	ON	OFF	OFF	ON	OFF
Grasp	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	ON
Pick-up	Normal → Open → Down → Grasp → Up					
Place	Up → Grasp → Open → Normal					

(Normal , Up , Down , Open , Grasp) を設定し、それぞれ、Table 2 に示すような駆動パターンで各弁を駆動している。また、連続動作モードとして、Pick-up、Place の 2 モードを設定し、ボタン一つで、拾い上げ、置き動作を実行できる。一方、FMA は軸方向への伸縮動作が可能であるが、今回は挟み持ち上げる動作を主に設定しているため、ハンドを伸縮させるモードの設定は行っていない。

この 2 指 6 自由度ハンドにより、管壁上にある、大きさ 1 ~ 4 [mm]、質量 1 ~ 3 [g] の対象物を拾い上げ、回収することができる。動作速度はステップ応答で定数約 0.5 [s] である。また、本ハンドは、1) 耐水、耐塵構造である、2) 柔軟で対象物への形状適応性があるので、色々な形や柔らかさの物体に対して安定した把握ができる、3) 軽量、といった、配管ロボット搭載用に適した特長を持つ。

3.6 作業部回転機構

配管内で目視点検を行いながら異物などの回収作業を行うには、作業部の微妙な位置合わせが必要である。そこでカメラとハンドを搭載した台座を管軸回りに旋回させるために、空圧ワブルモータを搭載している。空圧ワブルモータは低速ではあるが扁平構造で小形・高トルクが発生できるモータで本用途に適している。一般にマイクロロボットでは、ロボットを構成する各部品の小形化に比べて電線や配管の細径化は容易でなく、これらケーブル類の剛性によるアクチュエータへの負荷は過大になりがちである。本ロボットにおいても、ハンドとカメラにつながるチューブやケーブルの剛性力は高く、従来の電磁モータを用いたのでは、減速機のスペースが大きく、扁平形状が要求される本ロボットの設計には適用できない。

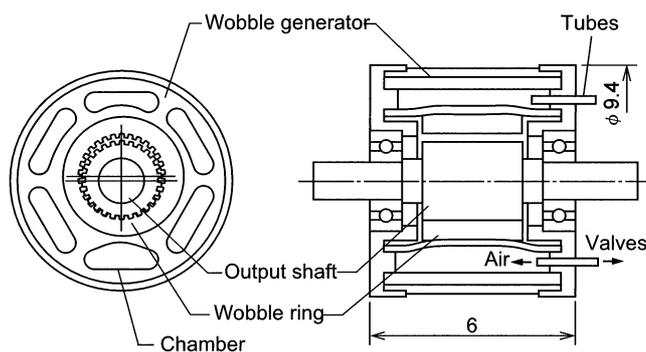


Fig. 11 Cross-sectional view of pneumatic motor



Fig. 12 Outline of the pneumatic wobble motor

Table 3 Pneumatic wobble motor drive pattern

	valve 1	valve 2	valve 3	valve 4	valve 5	valve 6
step 1	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
step 2	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF
step 3	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF
step 4	OFF	OFF	OFF	ON	ON	OFF
step 5	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON
step 6	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	ON

Fig. 11、Fig. 12 に、開発した空圧アクチュエータの断面構造および分解写真をそれぞれ示す。ワブルジェネレータは、シリコーンゴム製で、内部に六つの圧力室を有する。各圧力室はチューブを通じて Table 3 のシーケンスで順に加圧していくと、公転リングが公転運動を行う。一方、公転リングと出力軸にはそれぞれ内歯車と外歯車が形成されているが、それらは歯数が 1 枚異なるため、公転リングの公転に伴って歯の噛み合いが 1 枚ずつずれていき、出力軸が自転する。

いま、公転リングの公転速度 ω_2 と出力軸の自転速度 ω_1 の間には次の関係が成り立つ。

$$\omega_1/\omega_2 = (z_1 - z_2)/z_1$$

ただし、 z_1 、 z_2 はそれぞれ出力軸、公転リングの歯数を表す。本ロボットに搭載したモータでは、 $z_1 = 35$ 、 $z_2 = 36$ であり、 $\omega_1/\omega_2 = -1/35$ となる。すなわち、公転リングを 35 回転させると出力軸は逆向きに 1 回転する。この際、摩擦損失がないとすれば、公転リングのトルクは 35 倍に拡大されて出力軸に伝

わかることになる．このように空圧ワブルモータは，低速，高トルクを特徴としている．

一方，公転リングの公転分解能は6[step/rev.]であるため，出力軸は210[step/rev.]の分解能をもつステッピング動作が実現できる．仕様トルク以下では，脱調はまったく生じないので，動作範囲の制限もコントローラにおいて容易に設定できる．本ロボットでは，動作範囲を $\pm 30^\circ$ に設定している．また，最大速度は20[rpm]，最大トルクは7[mNm]である(実測値)．この発生トルクは同サイズの電磁モータに比べて10倍以上大きな値である．

4. 本ロボットの基本動作

試作したロボットを内径24[mm]の透明アクリル製パイプを用いて基本動作の実験を行った．Fig. 13に示すように配管は2箇所のエルボ(管中心の曲率が120[mm]，150[mm])を有し，管内壁は汚れのないきれいな状態のものである．実験はこの配管を垂直状態に設置して行った．その結果，A点からスタートし垂直管と2箇所のエルボ管を通過してB点まで走行することができた．水平直管での計測で，最大移動速度6[mm/s]，最大牽引力1[N]の性能を得た．Fig. 14に曲率半径120[mm]のエルボ管通過の様子を示す．エルボ管通過では車輪の移動量が車輪間で異なるように車輪の変形やスリップが生じて，車輪同士の移動量に差をつけている．また，垂直管の上昇から降下に向を切り替えるときは，前後の車輪が同時に切り替えを行うと落下してしまうので，前後の車輪のどちらか一方が管壁に接触しているように切り替えるタイミングを変えることで落下しないようにしている．

搭載したCCDカメラは直径0.025[mm]のタングステンワイヤを認識することができ，目視点検に必要な性能が十分得られている．Fig. 15は空圧ワブルモータ回転前と回転後のカメラ映像である．空圧ワブルモータが回転することで管壁の半周程度までの点検が可能であった．異物を模擬した3[mm]角の対象物に対して，カメラ映像を見ながらハンド，空圧ワブルモータのマニュアル操作で拾い上げ，回収させることが容易に行えた．また，拾い上げ時のハンドと対象物との位置合わせも

スムーズに行うことができた．Fig. 16に3[mm]角の対象物を拾い上げ，回収する様子を示す．なお，本ロボットにおいては管軸に対してロボットが大きく回転してしまうと作業部位への位置決めができなくなってしまう．これに関してはねじれ動作が可能なFMAを用いた設計を行えばロボットを管軸に対して回すことが可能となる．



Fig. 14 Locomotion through a vertical elbow-joint

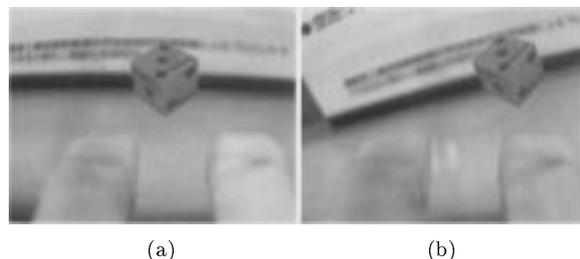


Fig. 15 Camera image (a) Rotation of wobble motor: 0 [degree] (b) Rotation of wobble motor: 30 [degree]

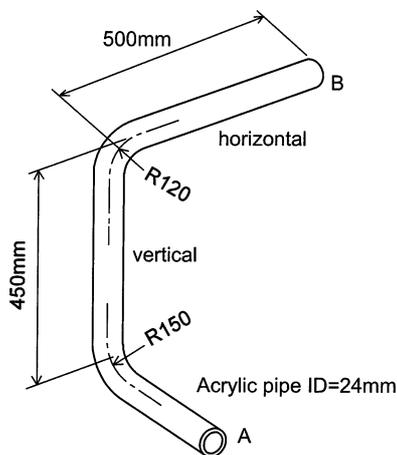


Fig. 13 Configuration of test pipe

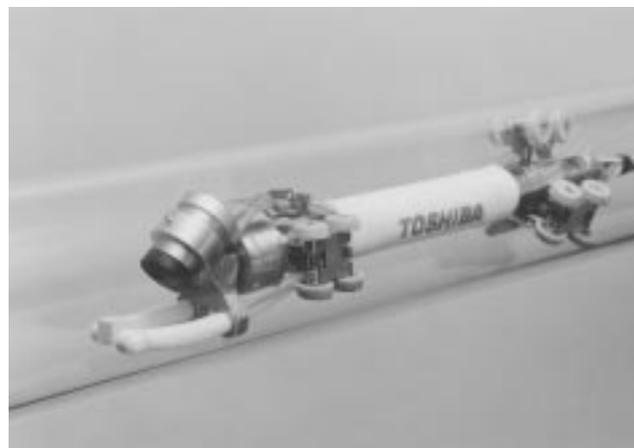


Fig. 16 Collect of small object

5. 結 言

試作および動作実験より得られた結果を以下にまとめる。

(1) 1 インチ配管内での作業を目的に、CCD カメラと多自由度ハンドを搭載し 1 インチ配管内を自由に移動し、目視検査と異物回収など作業ができる配管作業ロボットを試作した。試作したロボットの大きさは直径 23 [mm]、長さ 110 [mm] で、質量は 16 [g] である。

(2) 搭載したカメラは小形軽量であるとともに、管壁の目視検査ができる性能であることを確認した。

(3) 配管内の対象物を FMA ハンドと空圧ワブルモータで構成した作業機構で容易に回収することができる。

(4) 水平、垂直面内のエルボ管の通過が可能であった。

今後は、ケーブル牽引用移動機構を連結させることで走行距離の拡大とカメラ視野変更機構による管内全周の検査が可能になるように高機能化を進める。また、対象とする配管形態に応じた設計により、様々な配管の点検作業への適用を検討する。

参 考 文 献

- [1] 藤田明孝：“ガス導管検査ロボット”，ロボット 69 号，pp.29-34，1989.
- [2] 藤原茂，金原了二，岡田徳次，実森毅：“分散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，vol.12，no.2，pp.318-327，1994.
- [3] 福田敏男，細貝英実：“管内走行検査ロボットの研究”，日本機械学会論文集（C 編），vol.52，no.477，pp.1584-1588，1986.
- [4] S. Iwashita, I. Hayashi, N. Iwatsuki and K. Nakamura: “Development of In-pipe Operation Micro Robots,” Proceeding of the 5th International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp.41-45, 1994.
- [5] 田口幹，河原崎徳之：“ユニット型小口径配管内走行検査ロボットの開発”，日本ロボット学会誌，vol.15，no.2，pp.230-235，1997.
- [6] 広瀬茂男，大野英隆：“25 mm ガス管検査用移動機構の開発”，第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.257-258，1997.
- [7] 福田敏男，細貝英実，上村昌宏：“柔軟構造形管内走行検査ロボット用水素吸蔵合金駆動ゴム製ガスアクチュエータとその応用に関する研究”，日本機械学会論文集（C 編），vol.55，no.514，pp.1377-1384，1989.
- [8] M. Takahashi, I. Hayashi, N. Iwatsuki, K. Suzumori and N. Ohki: “The Development of In-pipe Microrobot Applying the Motion of a Earthworm,” Proceeding of the 5th International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp.35-40, 1994.
- [9] 福田敏男，細貝英実，大山浩明：“管内検査ロボットの研究”，日本機械学会論文集（C 編），vol.57，no.537，pp.1661-1666，1991.
- [10] 青島伸一，森光武則，辻村健：“圧電素子を用いた細径管移動機械に関する基礎的研究”，日本機械学会論文集（C 編），vol.55，no.516，pp.1934-1940，1989.
- [11] T. Idogaki, H. Kanayama, N. Ohya, H. Suzuki and T. Hattori: “Characteristics of Piezoelectric Locomotive Mechanism for an In-pipe Micro Inspection Machine,” Proceeding of the 6th International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp.193-198, 1995.
- [12] T. Suzuki and M. Satho: “In-Pipe Miniature Mobile Robot with Worm Wheel Mechanism,” 第 34 回計測自動制御学会学術講演会予稿集，pp.847-848，1995.
- [13] K. Suzumori and A. Abe: “Applying Flexible Micro-actuators to Pipeline Inspection Robots,” Transactions of the IMACS/SICE International Symposium on Robotics, Mechatronics and Manufacturing Systems, pp.515-520, 1993.
- [14] 鈴森康一：“フレキシブルマイクロアクチュエータに関する研究”，日本機械学会論文集（C 編），vol.55，no.518，pp.2547-2552，1989.
- [15] 宮川豊美，鈴森康一，木村正信，長谷川幸久：“小口径配管作業ロボットの開発”，第 15 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，pp.255-256，1997.
- [16] M. Segawa, M. Kimura, K. Ooi and S. Sugi: “A Micro Miniaturized CCD Color Camera Utilizing a Newly Development CCD Packaging Technique,” IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol.41，no.3，pp.946-953，1995.
- [17] 鈴森康一，堀光平：“空圧ワブルモータの開発”，日本機械学会第 74 期通常総会講演論文集（IV），pp.128-129，1997.
- [18] T. Ito and M. Okamura: “Development of Ultra Small DC Motor,” Proceeding of the 3rd International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp.27-33，1992.
- [19] K. Hori and A. Sato: “Micro-Planetary Reduction Gear,” Proceeding of the 2nd International Symposium on Micro Machine and Human Science, pp.53-60，1991.



宮川豊美 (Toyomi Miyagawa)

1960 年 11 月 29 日生。1984 年芝浦工業大学工学部機械工学科卒業。1985 年株式会社東芝入社。以来、メカトロニクス、マイクロメカニズムの研究・開発に従事。1996 年精密工学会技術賞受賞。日本機械学会会員，精密工学会会員。

(日本ロボット学会正会員)



木村正信 (Masanobu Kimura)

1949 年 9 月 5 日生。1968 年大森工業高校電気科卒業。1969 年株式会社東芝入社。以来、ビデオカメラの研究・開発に従事。現在、マルチメディア技術研究所主査，映像情報メディア学会会員。



鈴森康一 (Koichi Suzumori)

1959 年 4 月 3 日生。1982 年横浜国立大学卒業。1990 年同大学博士課程修了。工学博士。1984 年株式会社東芝入社。以来、ロボット、メカトロニクス、マイクロマシンの研究・開発に従事。1991 年日本機械学会技術奨励賞，1992 年日本ロボット学会技術賞，1993 年日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門業績賞受賞。IEEE，日本機械学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)



長谷川幸久 (Yukihisa Hasegawa)

1963 年 6 月 3 日生。1988 年岐阜大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。同年株式会社東芝入社。以来、マイクロメカニズム，小形モータの研究・開発に従事。電気学会，精密工学会会員。