

# 管内走行ロボットの研究 (第3報)

—— 計算機制御への拡張 ——

田 口 幹\*・河原崎 徳之\*

Development of In-pipe Inspection Robot (3rd Report)

—— Extension for Computer Control ——

Kan TAGUCHI and Noriyuki KAWARAZAKI

## Abstract

We have already reported the fundamental mechanism for an in-pipe inspection robot which can move in a small radius (50 mm) pipeline.

In this report, the authors describe the third model of in-pipe inspection robot that is extended for computer control. In order to be controlled automatically, the robot should know the shape of pipeline, the status of the robot and the locomotion distance, the robot has various sensors including tactile sensors, an encoder and a roll sensor.

Using the informations from these sensors, the robot can move along not only within straight pipelines but also elbows or T-joints automatically.

## 1. はじめに

発電所や化学プラント、パイプラインなどにおける配管設備の検査作業は、現在のところ人間が配管の外部より行っている場合が多い。しかし、これらの配管は、複雑に入り組んでいたり、断熱材によってカバーされていたり、または地中に埋設されていたりすることも多い。そのうえ、長さも膨大であるため、その検査作業は人間にとって大変な重労働である。また、このような管を内部より直接検査が可能であるのは、かなり内径の大きな管に限られ、内径の小さな管を内部から検査するということはほとんど行われていないのが現状である。そのため、配管を内部から検査するロボットのニーズは非常に高く、既にいくつかの移動機構が開発されている。福田ら<sup>1,2)</sup>は車輪駆動およびゴム製ガス圧アクチュエータを用いた2種の管内走行ロボットを発表している。また、ハサミ機構をもつ車輪型の管内走行ロボット<sup>3)</sup>も報告されている。藤田ら<sup>4)</sup>

は、クローラ型および重連車輪型のガス管検査ロボットを開発した。しかし、現在実用化されている管内検査ロボットは多くが遠隔操縦型であり、ロボット自身が管の状態を判断し自動的に移動するものではない。また、管の長さが膨大になると人間の負担が大きくなりロボットの作業効率も低下する。そこで、管の形状などを自分で判断し、自律的に管内を移動できることが望ましい。

本研究では、比較的小口径管を対象とした管内走行ロボットを開発し、その移動機構についてはすでに報告<sup>5-7)</sup>した。その後、本体に各種センサを取り付け、パソコンを用いた自動制御可能なロボットを設計・製作したので報告する。

本管内走行ロボットは、以下の仕様を満足するように設計・製作した。

- (1) 内径 100 [mm] の配管を対象とする。
- (2) T字管において任意の方向へ進行できる。
- (3) エルボー管を通過できる。
- (4) 出発点に帰ることができる。
- (5) 比較的高速に移動できる。
- (6) パソコンを利用した自動制御を可能とする。

平成2年9月28日受理

\* 機械システム工学科

(7) 管内の大きな凸凹は考えないものとする。

ただし、配管は水平面内にあるものとし、電源や制御信号は外部から有線で供給する。

## 2. 本ロボットの機構

### 2.1 ロボット本体の形状

管内移動ロボットでは管内部という条件から、できるだけ大きな有効体積を持つのが望ましい。そこで、本研究ではロボットは、円柱と球の組合せをユニットとし、これを3両連結して構成する。前後を駆動ユニットとし、中央に各種センサなどを搭載する中間ユニットをおき、これを連結機構により前後ユニットにつなげる。連結機構は、水平面内での移動を対象としているため、2自由度をもつ2節リンク機構とする。本ロボットの基本形状を Fig. 2-1 に示す。

ユニットの有効体積は、昨年度までに十分検討されており、本年度の試作ロボットはステアリング機構や連結機構の改良のため、ユニット寸法を

$$h = 80 \text{ [mm]}$$

$$r = 35 \text{ [mm]}$$

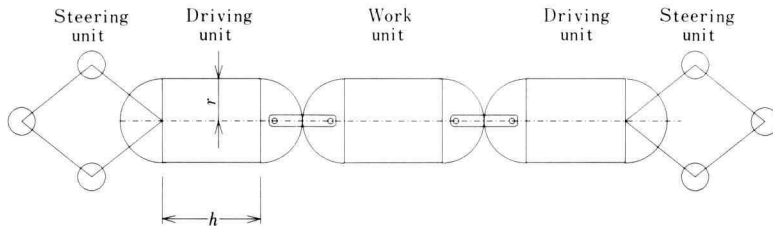


Fig. 2-1. Structure of in-pipe inspection robot

とした。

ただし、 $h$  は円柱部の長さ、 $r$  は球部の半径である。

### 2.2 ステアリング機構

ロボット本体がT字管において任意の方向に進行できるようにするには、T字管通過時に進行したい方向に積極的にステアリングを行う必要がある。このため、本年度の試作ロボットも Fig. 2-2 に示すような先端にタイヤのついたステアリング機構を本体前端部と後端部に取り付けた。このステアリング機構は、直管部ではピッチおよびヨー方向の姿勢変化を防ぐとともに、常に本体を管の中央部に保持する機能をもっている。

ステアリング機能は、以下の条件を満たすことが必要である。

(1) ステアリング機構の各部の長さ (Fig. 2-2 で AD, AB, BC, CD) は、対象としている管の内径 100 [mm] を越えてはならない。

(2) ステアリング機構の各タイヤは、管の内側から突っ張って本体の姿勢を保持するため、タイヤの弾性を考慮して DB 間の距離は 100 [mm] より大きくなくてはならない。

(3) ステアリング機構のタイヤは駆動力を持つてお

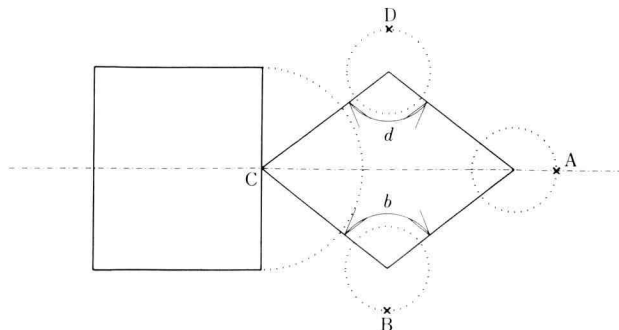


Fig. 2-2. Skelton diagram of steering mechanism

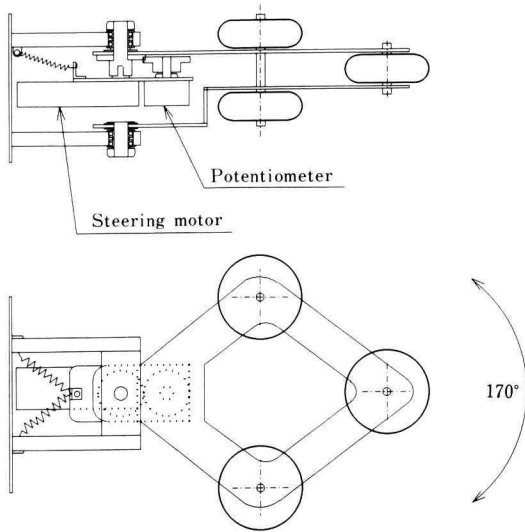


Fig. 2-3. General view of steering mechanism

らず、ガイド機構全体を左右に振って本体をガイドさせ、駆動輪の駆動力によって本体を押し進める機構としている。このため、Fig. 2-2における $\angle b$ 、 $\angle d$ は常に鈍角でなくてはならない。

(4) 屈曲部を通過するためには、ガイド機構の先端部が管の半径50 [mm] を越えて動作できなくてはならない。

上記の条件より設計したステアリング機構の構造をFig. 2-3に示す。ロボットが屈曲部に到達した時点でステアリング用モータを駆動し、進行したい方向に頭を振れば、その後はステアリング機構にガイドされ、駆動輪の推進力によって本体が方向転換できる。また、ステアリング角度はポテンショメータで検出し、直流サーボ機構により制御している。

### 2.3 駆動ユニットの機構

本ロボットは、車輪による駆動方式を採用している。移動用動力源としては、減速機が一体となった小型直流ギヤードモータを採用した。このモータを使用することにより、機械効率 $\eta=70\%$ 、タイヤと壁の間の摩擦係数 $\mu=0.3$ と仮定すると計算上は約100 [mm/s]の移動速度と6 [N]程度の牽引力を得ることが可能である。さらに、プーリーベルトを介して駆動輪に動力を伝えている。管内の凸凹に対処するため比較的大径のスポンジタイヤによって駆動する。駆動輪は本体の方

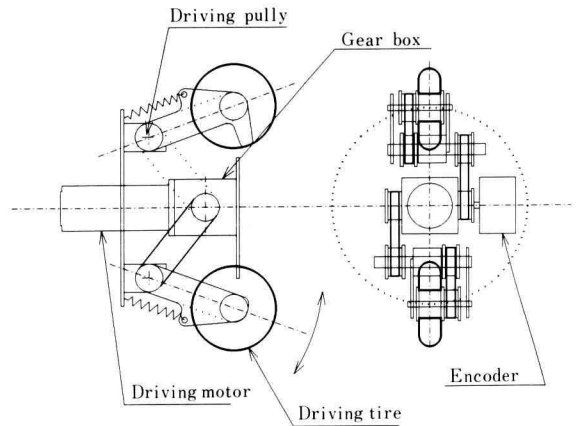


Fig. 2-4. Driving mechanism

向転換時に走行抵抗となる恐れのあるため、その配置は本体の運動を考慮した上で、特に方向転換時の走行抵抗の低減を考える必要がある。このため、駆動輪を上下に2つ配置した駆動ユニットをロボット本体の前後に配置する。これによって方向転換時の抵抗を最小にし、なおかつ本体ピッチ方向の姿勢変化を抑えることができる。また、試作した管内走行ロボットでは、駆動輪の直径を30 [mm]とし各15 [mm]程度のストロークをもつリンク機構によるサスペンション機構をつける。この機構により、かなり大きな凸凹面での走行が可能である。また、タイヤのグリップ力も十分大きくなる。

以上のような検討から、駆動系はFig. 2-4に示すようなユニット構造とする。このユニットはメンテナンスし易く、スペースも十分小さくすることができる。

## 3. センサ系と計算機制御

### 3.1 計算機制御の概念

これまでの試作機は、すべてマニュアル制御であったが、今回はパソコンによる自動制御を実現した。システムの構成はFig. 3-1に示すように、インタフェース回路を介してパソコン(PC-9801VM2)によりロボットを制御する。

### 3.2 センサ系

パソコンによる制御を行うためには、管の形状・ロボットの状態を把握する必要がある。そのため、ロボ

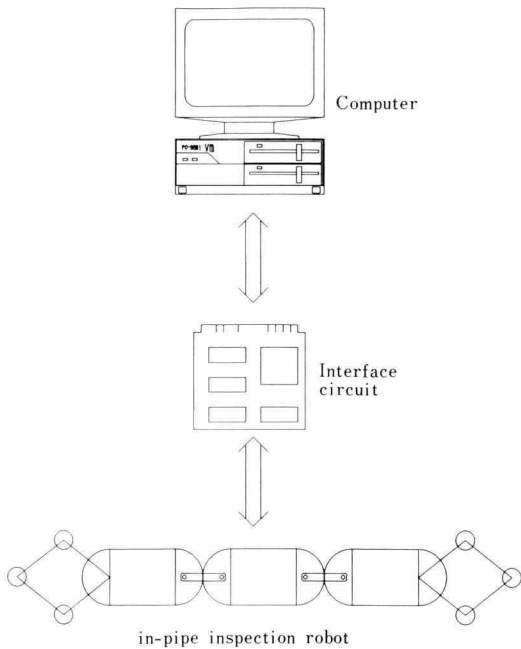


Fig. 3-1. Computer control system

ト本体に各種センサを取り付けた。

管の状態を知るためには、マイクロスイッチによる接触センサを用いた。Fig. 3-2 に示すように管内面との接触により管の屈曲部や分岐部を知ることができる。これらのセンサは前後の対応する 2 個を 1 組としたが、これは前進・後退のときそれぞれ同じ機能をするからである。接触センサは Fig. 3-3 に示すように 6 個取り付けた。また、それぞれのセンサの機能は Table 3-1 に示す。

屈曲部を通過するにはステアリング動作を行わなければならない。そのタイミングを知るため前部駆動

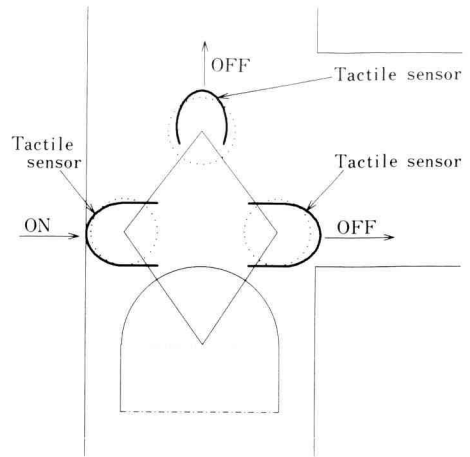


Fig. 3-2. General view of tactile sensors

モータにエンコーダを取り付けた。これにより本体の移動距離がわかり、ステアリング動作のタイミングを知ることができる。なお、エンコーダの出力信号は近似正弦波であるため、中間ユニットに搭載した波形整形回路を通してコンピュータに移動距離に応じたパルスを送る。

さらに、屈曲部を通過するとき本体がロールしてしまう可能性がある。そこで、振子とフォトインタラプタを組み合わせたセンサを中間ユニットに取り付け、本体のロールを検出する。

Table 3-1. Function of tactile sensor

sensor No.	function
1, 6	detect of front wall
2, 5	detect of left space
3, 4	detect of right space

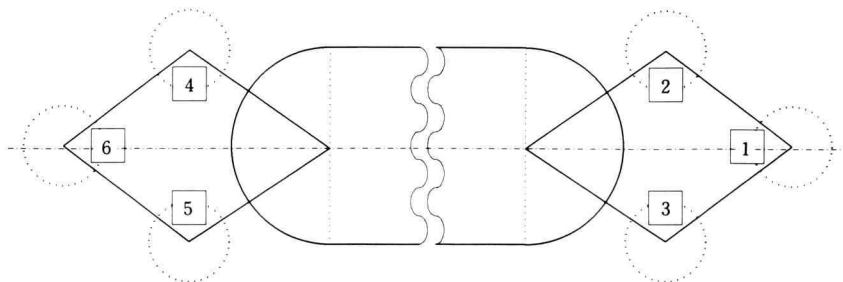


Fig. 3-3. Setting position of sensors

Table 3-2. Sensor informations

sensor	information
tactile sensor	shape of in-pipe
encoder	distance of robot movement
photo interrupter	rolling
potentiometer	setting angle

ステアリング系におけるモータの制御は、サーボ機構により行う。モータの角度検出はポテンショメータで行い、ステアリング角度が設定範囲を越えないようにステアリング機構の両側にリミッタを付けている。

ロボット本体の各種センサおよびその検出情報を Table 3-2 に示す。

### 3.3 制御方法

マニュアル制御によりロボットの方向転換を行う場合には、先端が方向転換を行う点に到達したときに、進行したい方向へ最大角度(80°)まで振り、方向転換後に元の位置へ戻す。これは、前部ユニット、後部ユニットを問わず同様であり、またこの際に本体の移動速度は一定のままが良い。T字管において突き当りに壁がない場合の方向転換は以下のように行う。まず、T字管の分岐部(ステアリング部の側部のセンサで感知できる)で一時停止し、進行したい方向へステアリングを30°切り、ステアリング部の先端が枝部に進入した後(ステアリング部の先端部のセンサで感知できる)さらにステアリングを振り、その後は壁から反力を受けながら再び前進することによって行う。

計算機制御する場合には、各種センサの情報を取り込み、マニュアル制御の時と同様な方法で駆動モータおよびステアリングモータを制御することができる。

## 4. 管内走行実験

水平面に設置したアクリル製(T字部、エルボー部は塩化ビニル製)の配管内においてマニュアルおよび自動制御による走行実験を行った。その結果、本ロボットの基本性能は直管内において、移動速度100 [mm/s] 牽引力6.37 [N] (650 [g])であった。また、マニュアル制御においては、管内に設置した凸凹面での走行実験を行い上下方向に高さ10 [mm]の凸部と深さ5 [mm]の凹部を通過することができた。

T字管およびエルボー管における走行実験では、マ

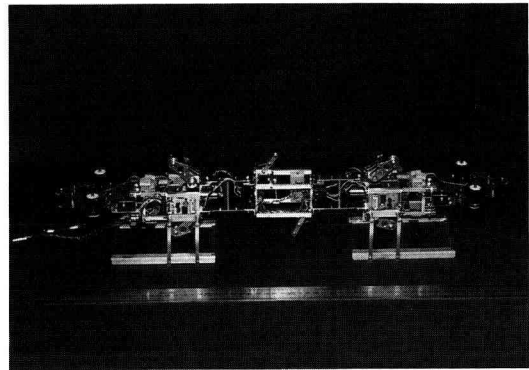


Photo 4-1. General view of in-pipe inspection robot

Table 4-1. Dimensions and weight of robot

Total length	600 [mm]
Total width	96 [mm]
Total height	115 [mm]
Total weight	680 [g]

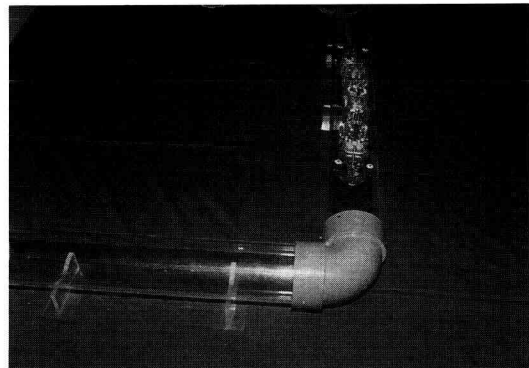


Photo 4-2. Locomotion through elbow pipe (1)

ニュアル制御、自動制御ともステアリング機構の特性を十分に発揮し、満足できる結果を得ることができた。また、同じ経路による管路内の往復も可能であった。

製作したロボットを Photo. 4-1 および Table. 4-1 に、エルボー管走行実験のようすを Photo. 4-2~4-5 に示す。

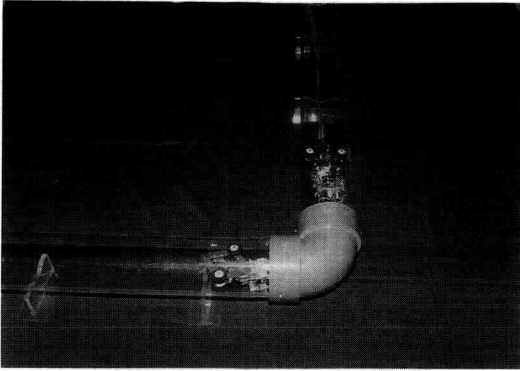


Photo 4-3. Locomotion through elbow pipe (2)

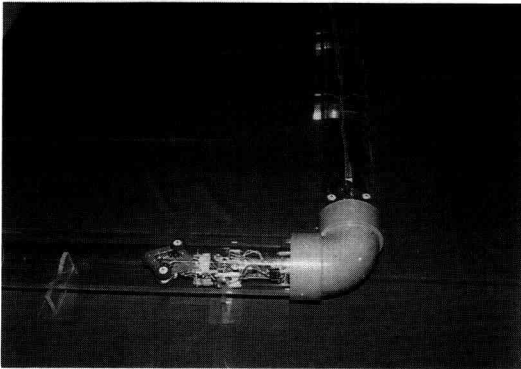


Photo 4-4. Locomotion through elbow pipe (3)



Photo 4-5. Locomotion through elbow pipe (4)

## 5. おわりに

水平面内にある内径 100 [mm] の配管 (4 インチ管) を対象として, T 字管, エルボー管を通過可能な 3 両編成の管路内走行用ロボットを設計・試作し, 計算機制御を実現した。その結果, 以下のような結論を得た。

- (1) マニュアル制御と同様に計算機制御により T 字管・エルボー管を通過させる事ができた。
- (2) 同じ経路を通り出発点へ帰着できた。
- (3) 小さなギャップを通過する事ができた。
- (4) パソコンを用いて自動制御による管内移動ロボットの操作が可能となった。
- (5) マイクロスイッチ等の各種センサの情報は自動制御を行うのに十分であった。

また, 本体のロールに対する防止・修正が今後の課題である。さらに, より小型化して 4 インチ以下の管への適用, ステアリングの自由度をふやして垂直管へ拡張する事などが考えられる。

なお, 本研究, 特にロボットの製作は本研究室の卒業研究生, 堀真哲君, 前野勝哉君の協力によって行われた。記して感謝の意を表したい。

## 参 考 文 献

- 1) 福田ら: 管内走行検査ロボットに関する基礎的研究, 第 3 回知能移動ロボットシンポジウム (1986)
- 2) 福田ら: 管内検査ロボットの研究, 第 6 回日本ロボット学会学術講演会 (1988)
- 3) 岡田徳次: 自己適応形管内走行ロボット, 計測自動制御学会論文集, Vol. 21, No. 7 (1985)
- 4) 藤田ら: ガス導管検査用ロボットの開発について, Robot No. 59 (1987)
- 5) 田口ら: 管内走行ロボットの研究, 第 6 回日本ロボット学会学術講演会 (1988)
- 6) 田口ら: 管内走行ロボットの研究, 第 7 回日本ロボット学会学術講演会 (1989)
- 7) 田口ら: 管内走行ロボットの研究, 神奈川工科大学研究報告 B 理工学編第 13 号 (1989)