

管内走行ロボットの研究 (第2報)

—— 移動機構の改良 ——

田 口 幹

Development of In-pipe Inspection Robot (2nd Report)

—— Improvement of In-pipe Locomotion ——

Kan TAGUCHI

Abstract

The author already reported that he had been developing an in-pipe robot to trail some work units such as inspection sensors in small radius (50 mm) pipeline.

In 1st report, the fundamental mechanism for in-pipe locomotion was discussed. In this report, the second model of in-pipe locomotion robot, in which the in-pipe locomotion mechanism is improved and the inspection payload is increased, is treated. The robot consists of 3 units, two locomotion units on both ends and payload unit in the middle part.

The robot has also a steering arm on its each end to move along not only the straight pipeline but also the T-joint and 50 mm radius elbow joint at the maximum speed (100 mm/sec).

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く、その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となる。また、このような管を人間が管内部より直接検査が可能であるには、かなり内径の大きな管に限られ、内径の小さなパイプ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、このようなパイプを内部から検査するロボットの開発が待たれている。なお、ここで想定したような現場において、検査とは目視検査がほとんどであり、点検用機材としては小型のTVカメラ程度で充分である。

管内移動機構としてはいくつかの開発例が報告されている。例えば、福田らはすでに2種の管内移動ロボットを発表している^{1,2)}。また、藤田らもガス管の検査用

に2種類試作している³⁾。

そこで本研究では、比較的小径の管を内部から点検などを行うロボットを開発することを目的とし、すでに最も基本的な移動機構を開発し、報告した^{4,5)}。

走行実験によって得られた結論を基に本報告では、前報で報告したモデルをベースとし、その移動機構の改良を試みると同時に実際に検査器材を搭載することを想定して本体内部スペースの拡大を図ることを目的とし、以下に示すような管内走行ロボットを設計・試作したので報告する。

まず前報のモデルで実現した、

- (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) 出発点に帰って来ることができる。
- (5) 比較的高速に移動できる。

を満足した上で、

(6) 本体を連結し、検査装置や制御回路を搭載するスペースをつくるための中間ユニットと、前後2両の駆動ユニットとの3両編成とする。

(7) 駆動ユニットはさらに軽量化し全体としての駆動力を増強し、ペイロードの増加を図る。

ただし、前報と同様、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こととした。

2. 本研究で試作したロボットの概要

2.1 移動体本体形状

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。本研究では前回試作したロボットの本体形状と同様に、Fig. 2-1に示すような円柱と球の組合せをユニットとし、このユニットを3両連結した3両編成とした。

その有効体積 V は、すでに前報で検討したように各部の寸法を Fig. 2-1 の記号によって表せば、次式のような関係がある。

$$V = \pi \cdot r^2 (4/3 \cdot r + h) \quad (2-1)$$

また Fig. 2-2 で1つのユニットがT字管を通過する時、T字管の対称性により $\theta = 45^\circ$ の時が最悪条件にな

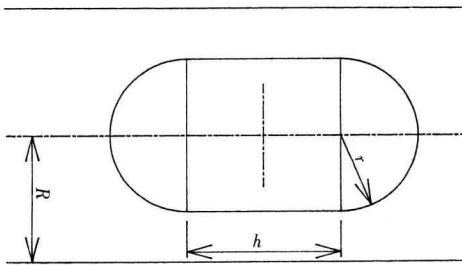


Fig. 2-1. Configuration of unit

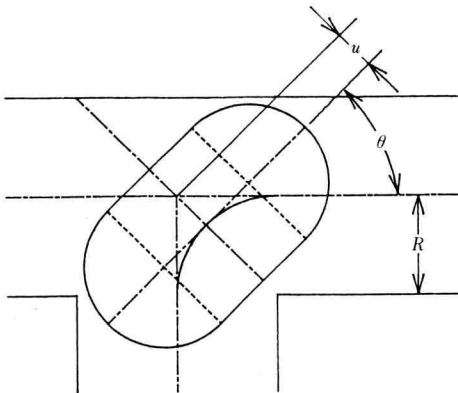


Fig. 2-2. Situation inside pipe under worst condition ($\theta = 45^\circ$)

り、 $\theta = 45^\circ$ における断面は長径と単径の比が $1:\sqrt{2}$ の楕円であるという条件から、ロボット本体の各ユニットの中心点が管の中心線からずれる距離を u とするとさらに

$$2R \leq (R-u) \cos \theta + 1/2 \cdot h \cos \theta + r \quad (2-2)$$

$$r = \sqrt{R^2 - u^2} \quad (0 < u < \sqrt{2}R) \quad (2-3)$$

$$r = R - u \quad (0 \leq u < \sqrt{2}R) \quad (2-4)$$

という条件が加わる。

これらの条件を満たす本体各部の寸法 r , h と体積 V との関係を、Fig. 2-3 に表す。T字管内部を本体がなめらかに移動するために、T字管内通過時におけるロボット本体の各ユニットの中心点の軌跡を半径 R の円弧とすると、幾何学的制約から

$$u = R(\sqrt{2} - 1) \quad (2-5)$$

となり u がこの値をとる h , r , V の最大値は、 V_0 を半径 R の球の体積として

$$h = 54 \quad [\text{mm}]$$

$$r = 45.5 \quad [\text{mm}]$$

$$V = 1.4243 V_0$$

となる。

本年度は3ユニットの連結構造としたのでユニット間に連結機構を設ける必要がある。既に述べたように各ユニットの形状は Fig. 2-1 の形状であり各ユニットの前後に方向転換用のステアリング機構または連結機構をとりつける。T字管を通過する条件からユニット間の連結間隔はユニットの寸法にも依存するので、コンピュータシミュレーションによってロボット全体の体積を大きくするように定めた。その結果ユニットの寸法を

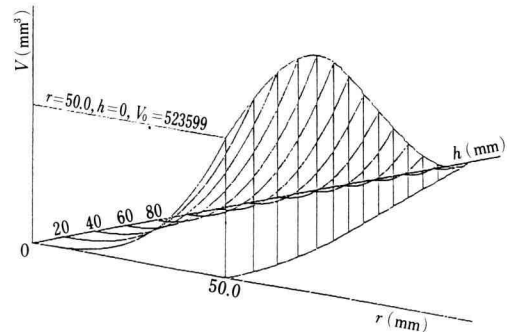


Fig. 2-3. Relation among r , h and unit volume

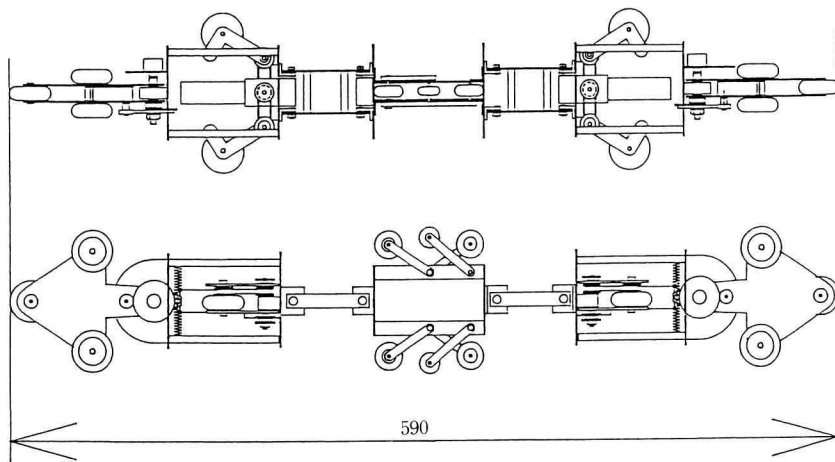


Fig. 2-4. General view of in-pipe locomotion robot

$h=80$ [mm]

$r=35$ [mm]

連結間隔=0 [mm]

とすることにした。その結果各ユニットの体積は

$$V=0.931 V_0$$

となる。

管内移動ロボットの本体中央におく中間ユニットについては、連結機構により前後のユニットにつなぎ、駆動機構などは一切搭載しないペイロードのためのスペースとした。

前報のモデルでは、管内を走行するための移動機構が本体内有効体積のほとんどを占めており、それ単体では本来の目的である点検作業などを行うことはできない。今回の試作モデルでは、駆動用のモータをよりトルクの大きなもの一つとし、後で述べるステアリング駆動用のサーボモータをステアリングアーム部に搭載し、また、本体に制御回路を搭載した。これらのことにより、中間ユニットに点検用機材を搭載可能なスペースを確保することができた。試作した管内移動ロボット全体の概形を Fig. 2-4 に示す。

中間ユニットは本体全体のロールと中間車両のヨー方向の回転を防止するために、計6個の車輪で管内面の左右方向を突っ張る形を採った。また、各車輪にはT字管やエルボー管の通過、管内面のギャップなどに対応するため、 ± 10 [mm] のサスペンション・ストロークを持たせた。サスペンションはスイング・アーム方式とし、許容スペースの関係からアームは片持ちとし

た。

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ためには、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。このため前報では、本体前後に Fig. 2-5 に示すような先端部にタイヤの付いた7節リンクのステアリングアームを取り付けた。しかし、実際にこの試作ロボットで走行実験を

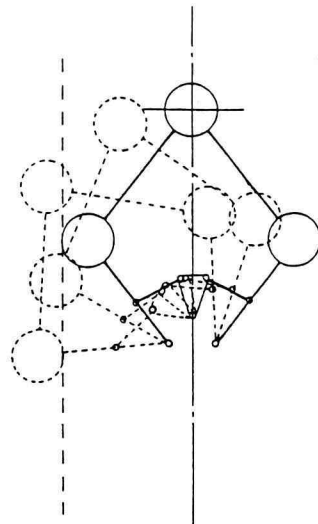


Fig. 2-5. Steering arm of previous prototype robot

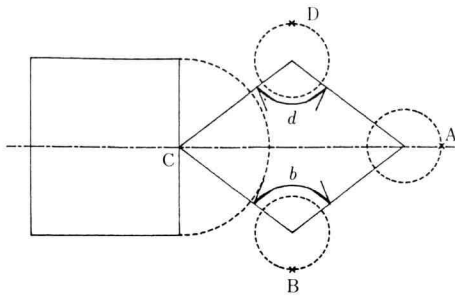


Fig. 2-6. Skelton diagram of steering mechanism

行った結果、3つのタイヤの中心を結ぶ3角形の形状を変化させなくともステアリング動作が可能であることがわかったので、今回試作した管内走行ロボットでは、ステアリングアームはプレートに3つのタイヤを固定した簡単なモデルとした。さらにこのプレートの間の空間には、ステアリング駆動用の小型サーボモータを設置することにした。また、このステアリング機構は、前報のモデル同様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本体を常に管の中心部に保持する機能も持っている。

このステアリングアームは、前報の場合と同様に以下の条件が必要となる。

(1) ステアリング機構各部の長さ(Fig. 2-6で、AD, AB, BC, CD)等は、対象としている管の内径 100 [mm] を越えない。

(2) ステアリング機構の各タイヤは直進時には管の

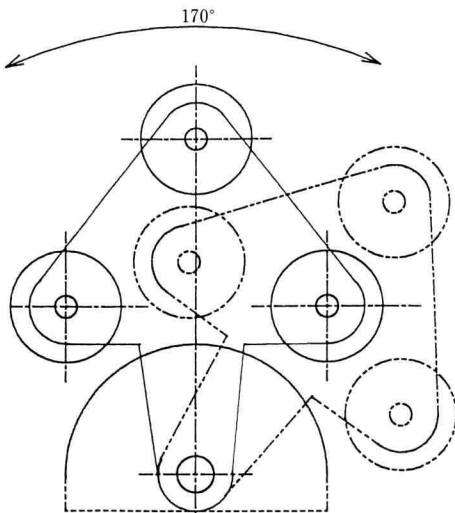


Fig. 2-7. General view of steering mechanism

内側から突っ張って本体の姿勢を保持するため DB 間の距離は 100 [mm] でなければならない。

(3) さらに、ステアリング機構のタイヤは、駆動力を持っておらず、ステアリング機構全体を左右に振って、本体をガイドさせ、全体の駆動輪の駆動力によってロボットを押し進める機構としているため、Fig. 2-6における $\angle b$, $\angle d$ は常に鈍角でなくてはならない。

(4) T 字管で分岐方向へ進行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。

以上のような条件を満たし駆動機構のスペースの兼ね合いを満たすため、ステアリング機構は、Fig. 2-7 のような形とした。

本ロボットの方向転換は、ステアリング部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 (85°) まで振り、方向転換後に元の位置へ戻

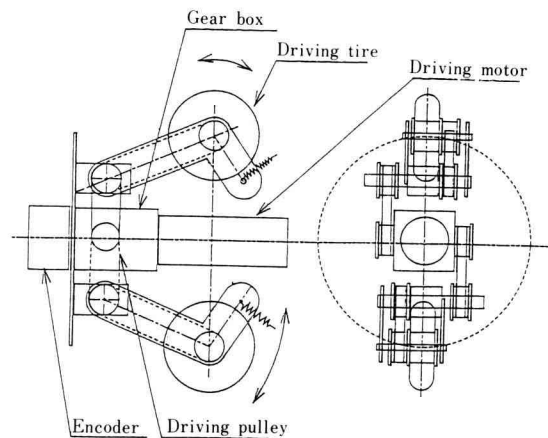


Fig. 2-8. Driving mechanism

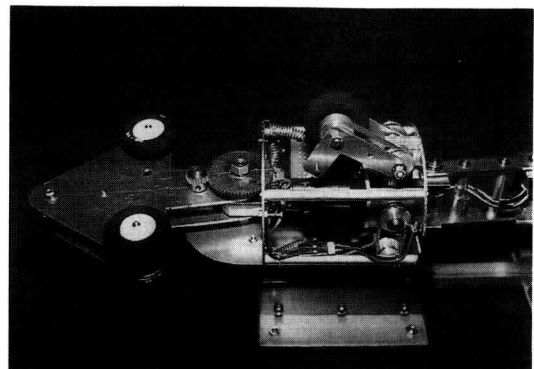


Photo 3-1 Driving unit

すことによって行う。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で良い。しかし T 字管の分岐方向へは、上記の場合とは異なり、交差部分にステアリング部が達したときに一時停止し、進行したい方向へステアリング部を 30° だけ振り、再び前進することによって分岐方向へ進入する。

駆動方法は Photo 3-1 および Fig. 2-8 に示すように車輪によるものとし、駆動輪の動力源としては、小型直流モータを用い、走行に十分なトルク及び進行速度を得るためにギアで減速し、プーリ・ベルトを介して駆動輪に動力を伝えている。またこの駆動輪は、 ± 10 [mm] のサスペンション機能を持ちグリップ力の向上をはかり、管内におけるギャップと T 字管の通過の際の上下方向の幅の変化に対応している。

3. 本ロボットの基本動作

以上のような方針で実際に Photo 3-2 および Table 3-1 に示すような管内走行ロボット設計・試作し、アクリル製のパイプ (T 字部、エルボー部は塩化ビニール製) を用いて走行実験を行った。

その結果本ロボットは、直管内において 100 [mm/s]

の移動速度と 7.36 [N] (750 [g]) の牽引力を発生した。また、管内に設置した凹凸面についても走行実験を行い、上下方向に高さ 10 [mm] の凸部と、深さ 5 [mm] の凹部を通過する事ができた。

今回は、水平面に設置された配管内の走行を想定

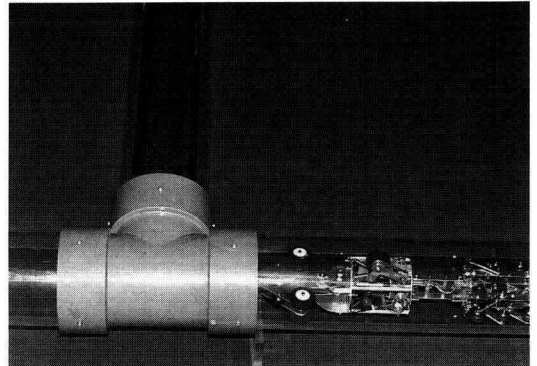


Photo 3-3 Locomotion through T-pipe (1)

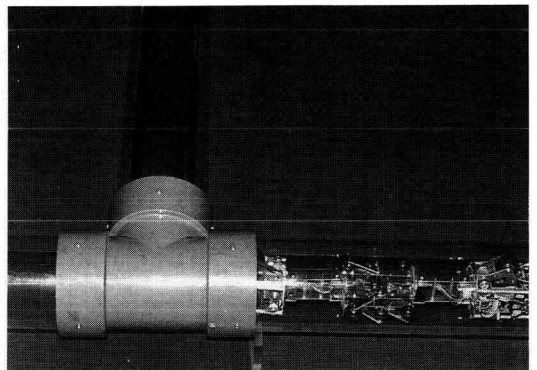


Photo 3-4 Locomotion through T-pipe (2)

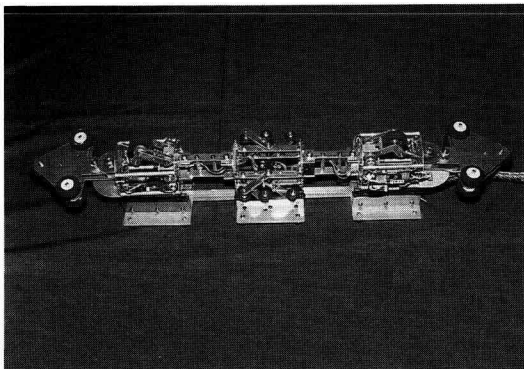


Photo 3-2 Pilot model of in-pipe locomotion robot

Table 3-1. Dimensions and weight of robot

Total length	590 [mm]
Total width	104 [mm]
Total height	110 [mm]
Total weight	720 [g]

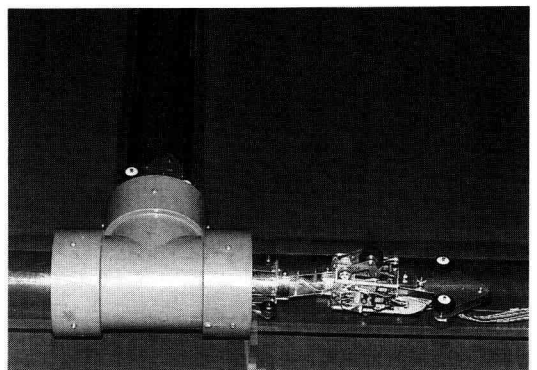


Photo 3-5 Locomotion through T-pipe (3)

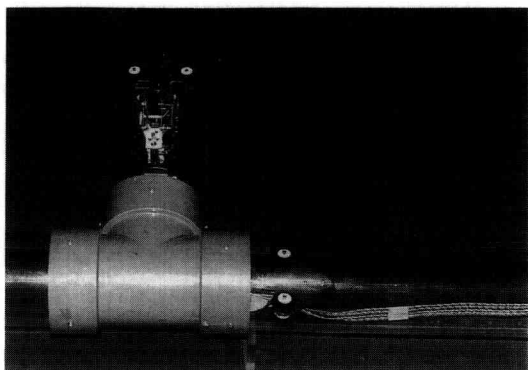


Photo 3-6 Locomtion through T-pipe (4)

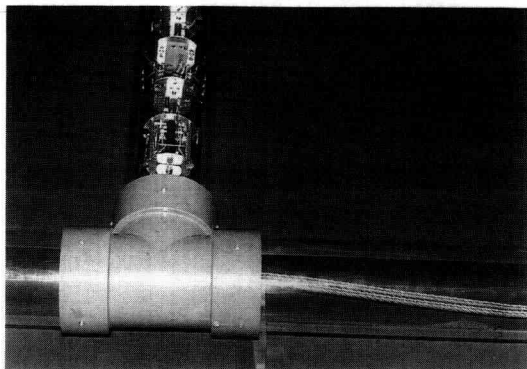


Photo 3-7 Locomtion through T-pipe (5)

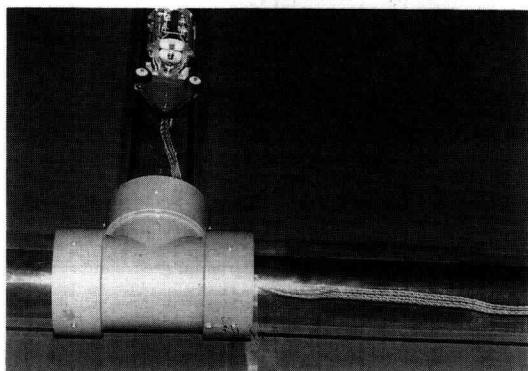


Photo 3-8 Locomtion through T-pipe (6)

していたが、本体重量と駆動力から管を垂直に立てた状態でも、上昇する事が可能であった。

T字管及びエルボー管における走行実験では、ステアリング機構の特性を充分に発揮し、満足できる結果を得る事ができた。エルボー管とT字管で突き当りに

壁のある場合においては、速度一定のままでの通過が可能であり、T字管で突き当りに壁のない場合においては、直前で一時停止の後、スムーズに任意の方向への進行が可能であった。また、同じ経路による管路内の往復も可能であった。Photo 3-3~3-8にT字管走行時の様子を示す。

4. 結論及び今後の課題

本研究では、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 字管を任意の方向へ進行でき、半径 50 [mm] のエルボー管を通過可能な、3 両編成の管路内走行ロボットを設計試作した。このロボットについて前章のような各種の実験を行った結果、今回試作したロボットは、以下のように当初目的とした仕様を充分満足するものである事が確認できた。

- (1) 平面内の T 字管を任意の方向へ進行する事ができた。
- (2) エルボー管を通過する事ができた。
- (3) 同じ経路を通り、出発点へ帰着する事ができた。
- (4) 配管内における、凹凸などのギャップを通過する事ができた。
- (5) 前報で報告したロボットを上回る移動性能を得ることができた。
- (6) ロボット各部についての剛性は、充分である事がわかった。

なお、本研究、特にロボットの制作は本研究室の卒業研究生風間隆彦君、鈴木寛治君の協力によって行なわれた。記して感謝の意を表わしたい。

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) 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)
- 4) 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)
- 5) 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)