

# 配管検査ロボットに関する研究開発

## —第4報：自己位置推定に関する提案—

前田 弘文\*・伊藤 嘉基\*\*

## Research and development about a piping inspection robot

### —Report 4: Proposal of localization—

Hirofumi Maeda\*

#### Abstract

This paper describes study and development of a piping inspection robot. Maintenance of drainpipes is essential and has to be performed regularly. Accordingly, we have been developing a small robot which is convenient to carry. To enable the robot to run in several types of pipes, self-localization is required to prevent itself from tumbling. A basic summary of the robot and the methods of self-localization are described in this paper.

#### 1. 緒 言

我国では昭和40年代以降、下水道事業の実施都市が急増し、各地で下水道整備の普及が促進されてきた。これまでに全国の下水道施設は、管路総延長約460,000 [km]、下水処理場数約2,200ヶ所となっている。そのため、管理施設の増加とともに、長期使用施設の老朽化が顕在化している。下水管渠の標準的耐用年数は50年とされており、すでにこの年数を超える下水管渠の延長は約10,000 [km]以上となっている。また、管渠布設後30年が経過すると道路が陥没する箇所が急増する傾向もある。このような背景から、排水管・下水管の維持管理は重要であり、継続的に行っていかなければならない。しかし、実際に管内を検査する作業は、人が行うには過酷であり、検査範囲も広大である。そこで、近年ではロボットを用いた検査が活発に行われている。ところが、これらのロボット検査にも問題があり、有線による外部制御・外部電源が主流であることから、ロボットシステム全体が大掛かりなものとなっている。そのため、メンテナンス性が悪く、高価なシステムとなっている。

そこで、本研究ではこれまで研究してきたレスキューロボットのノウハウを活かし<sup>[1][2]</sup>、自律で持ち運びが容易な小型配管検査ロボットの開発を行ってきた<sup>[3]~[7]</sup>。小型配管検査ロボットは、安価で軽く、持ち運びが容易である。また、自律制御で検査を行うために、複数の配管を同時に検査できるという大き

な特徴を有している。しかし、ロボットが小型であることから、転倒を防止するためにタイヤ交換を行い、複数の管径に対応しなければならない。このことは、タイヤ交換によるタイムロスだけでなく、交換時の部品の紛失、タイヤ・交換工具の運搬、コストなど数多くの問題を抱えることに繋がった。そこで我々は、直進制御によってロボットの転倒を防止することで、1種類のタイヤで複数の管径に対応する方法を提案した。本論文では、直進制御を行うために必要となる自己位置推定について述べる。

#### 2. 小型配管検査ロボット

小型配管検査ロボットを図2-1に示す。



図2-1 小型配管検査ロボット

\*情報工学科

\*\*技術支援センター

この小型配管検査ロボットは直径 150 [mm]もしくは 200 [mm]の配管内を撮影しながら異常箇所を検査する。また、マンホールの真下を検知し、検査開始地点に戻ってくる。さらに、障害物を検知した場合は、その障害物を押し除けることができるか判断し、不可能な場合は検査を中断し帰還する。以下に、動作手順の詳細を示す (図 2-2)。

#### ①発進

まず、ロボットの電源は予め地上にて入れておく。次にロボットを発進させるが、その方法には 2 つある。1 つ目は、地上にいる作業者がワイヤーによってロボットを配水管に下ろし、地上に設けた PC から無線 LAN によってスタート信号を送信する方法である。2 つ目は、作業者がロボットを持った状態で直接階段を降り、ロボットを設置した後にロボット上部に設置されたスタートスイッチを押す方法である。また、1 つ目の方法については、カメラ映像を PC 画面に映し出す機能も搭載している。これは、地上から設置する際のサポートとして用意しているものである。なお、スクリーニング検査中の画像表示については、家庭用無線 LAN の通信距離が最大 40 [m]であることから行うことができない、またスタンドアローンで処理を行うため、その必要もない。

#### ②前進および管内撮影

ロボットは前進しつつ、管内を撮影する。その際、検査終了地点を検知するために、前方上部に取り付けられた上方向への距離センサを作動し、壁面との距離を随時計測している。なお前進動作には、継ぎ目の段差や陥没・へどろによるスリップなどでロボットが転倒しないための直進制御を組み込んでいる。制御方法については、後で詳細に述べる。また、進行途中で障害物がある場合、一定力で一定時間、障害物を押し付けることで、それ以上の前進が可能であるかの判断を行う (前方接触センサを使用)。前進が不可能な場合においては、管内撮影を中止し動画を保存した後、後進動作に入る (④へ移行)。

#### ③終端検知

②の距離センサによって検査終了地点を検知した場合、管内撮影を中止し、動画を保存した後、後進動作に入る。

#### ④後進

後進時は、直進時同様、直進制御を行いながら後方上部の距離センサによって、検査開始地点の検知を

行う。

#### ⑤始点検知

後方上部の距離センサによって検査開始地点を検知した場合、ロボットの動作を停止し、無線 LAN によって地上に設けた PC (作業者) に停止したことを通知した後、待機する。

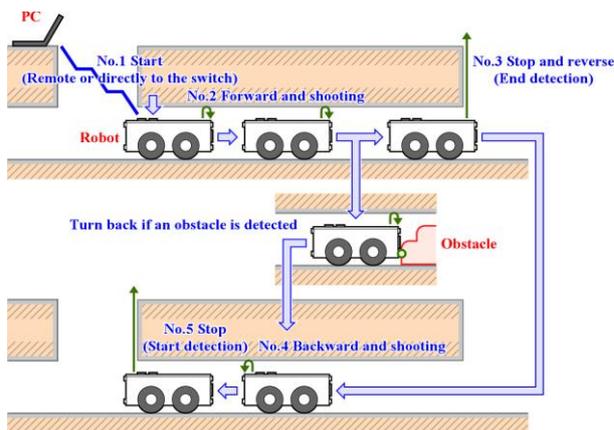


図 2-2 動作手順

### 3. 小型配管検査ロボットの自己位置推定

小型配管検査ロボットの検査対象は、硬質ポリ塩化ビニル管などで、壁面にタイヤが乗り上げ、転倒する恐れがある。そのため、従来の配管検査ロボットでは配管の管径に合わせたおわん型のタイヤに変更することで転倒を抑制し、人がモニタ越しに遠隔操作することで転倒を防止してきた。そこで、我々は小型配管検査ロボットに直進制御を組み込むことで、これまで人がモニタ越しで行ってきた遠隔操作を自動化することで、完全なスタンドアロンを実現した。しかし、現在実装されている直進制御では、従来のロボットと同じく、配管の管径に対応するタイヤに交換しなければ転倒を防止することはできない。そこで本論文では、直進制御の精度向上に必要な小型配管検査ロボットの自己位置推定について示す。

#### 3. 1 重力加速度に関する条件式

小型配管検査ロボットには、加速度センサを搭載しており、そのセンサ値より重力加速度方向を算出することができる。この重力加速度方向から配管内におけるロボットの姿勢 (ロール, ピッチ) は、式(1)の条件式を満たす。なお、それぞれの変

数は以下と定義する.

${}^o\alpha_r$  :  $x$  軸の回転角度 (絶対座標系)

${}^o\beta_r$  :  $y$  軸の回転角度 (絶対座標系)

${}^o\gamma_r$  :  $z$  軸の回転角度 (絶対座標系)

${}^o x_r$  : ロボットの  $x$  座標 (絶対座標系)

${}^o y_r$  : ロボットの  $y$  座標 (絶対座標系)

${}^o z_r$  : ロボットの  $z$  座標 (絶対座標系)

$f_l$  : ロボットの左前輪

$f_r$  : ロボットの右前輪

$b_l$  : ロボットの左後輪

$b_r$  : ロボットの右後輪

${}^o x_i$  : ロボットのタイヤの  $x$  座標 (絶対座標系)

${}^o y_i$  : ロボットのタイヤの  $y$  座標 (絶対座標系)

${}^o z_i$  : ロボットのタイヤの  $z$  座標 (絶対座標系)

${}^r x_i$  : ロボットの  $x$  座標 (ロボット座標系)

${}^r y_i$  : ロボットの  $y$  座標 (ロボット座標系)

${}^r z_i$  : ロボットの  $z$  座標 (ロボット座標系)

${}^r a_x$  : 加速度センサの  $x$  成分 (ロボット座標系)

${}^r a_y$  : 加速度センサの  $y$  成分 (ロボット座標系)

${}^r a_z$  : 加速度センサの  $z$  成分 (ロボット座標系)

$${}^o\alpha_r = -\tan^{-1} \frac{{}^r a_y}{{}^r a_z}$$

$${}^o\beta_r = -\tan^{-1} \frac{{}^r a_x}{{}^r a_z}$$

$$\begin{aligned} {}^o p_i &= \begin{bmatrix} {}^o x_i \\ {}^o y_i \\ {}^o z_i \end{bmatrix} (i = f_l, f_r, b_l, b_r) \\ &= \begin{bmatrix} \cos {}^o\gamma_r & -\sin {}^o\gamma_r & 0 \\ \sin {}^o\gamma_r & \cos {}^o\gamma_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} \cos {}^o\beta_r & 0 & \sin {}^o\beta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin {}^o\beta_r & 0 & \cos {}^o\beta_r \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos {}^o\alpha_r & -\sin {}^o\alpha_r \\ 0 & \sin {}^o\alpha_r & \cos {}^o\alpha_r \end{bmatrix} \\ &\quad \begin{bmatrix} {}^r x_i \\ {}^r y_i \\ {}^r z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^o x_r \\ {}^o y_r \\ {}^o z_r \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

### 3. 2 タイヤの接地点に関する条件式

小型配管検査ロボットは、配管検査中にタイヤが管の壁面に接触する。しかし、配管が円柱であるため、全ての4つのタイヤが接地することはない、通常は3点、ロボット本体が振動している際は2点のみが接地する。なお今回は、振動時は考慮しないため、接地は3点とし、円の公式より式(2)の条件式を満たすものとする。なお、それぞれの変数は以下と定義する。

${}^s y_i$  : ロボットのタイヤの  $y$  座標 (パイプ座標系)

${}^s z_i$  : ロボットのタイヤの  $z$  座標 (パイプ座標系)

$r_s$  : パイプの半径

$\theta_s$  : 地面に対するパイプの傾き

$$\begin{aligned} {}^s y_i &= \left( {}^r x_i \cos {}^o\beta_r + {}^r y_i \right. \\ &\quad \left. + {}^r z_i \cos {}^o\alpha_r \sin {}^o\beta_r \right) \sin {}^o\gamma_r \\ &\quad + \left( {}^r y_i \cos {}^o\alpha_r - {}^r z_i \sin {}^o\alpha_r \right) \cos {}^o\gamma_r \\ &\quad + {}^o y_r \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
{}^s z_i = & \left( {}^r y_i \cos {}^\circ \alpha_r \sin \theta_s \right. \\
& \left. - {}^r z_i \sin {}^\circ \alpha_r \sin \theta_s \right) \sin {}^\circ \gamma_r \\
& + \left( - {}^r x_i \cos {}^\circ \beta_r \sin \theta_s \right. \\
& \left. - {}^r y_i \sin {}^\circ \alpha_r \sin {}^\circ \beta_r \sin \theta_s \right. \\
& \left. - {}^r z_i \cos {}^\circ \alpha_r \sin {}^\circ \beta_r \sin \theta_s \right) \cos {}^\circ \gamma_r \\
& + \left( {}^r x_i \sin {}^\circ \beta_r \cos \theta_s \right. \\
& \left. + {}^r y_i \sin {}^\circ \alpha_r \cos {}^\circ \beta_r \cos \theta_s \right. \\
& \left. + {}^r z_i \cos {}^\circ \alpha_r \cos {}^\circ \beta_r \cos \theta_s \right) + {}^\circ z_r \cos \theta_s
\end{aligned}$$

$$r_s^2 = {}^s y_i^2 + {}^s z_i^2 \quad (2)$$

### 3.3 x成分の取り扱い

3.1, 3.2より, 未知変数6つに対し, 条件式が5つ導出できた. そこで, 未知変数の1つである, 小型配管検査ロボットのx成分(x軸は配管内におけるロボットの進行方向)について考える. x成分は検査時に小型配管検査ロボットが実際に進んだ距離を意味する. そのため, x成分は小型配管検査ロボットに搭載されたエンコーダによって, オドメトリから別途算出することができる. そこで, x成分を原点座標に常に重ねる(x成分を無視する)ことで未知変数を5つに減らすことができ, その結果5つの条件式より自己位置推定が可能となる.

しかし実際には, 式(2)の円の公式の中に三角関数が含まれることから, 解を求めることができない. そこで, 数値解析によって $\gamma_r$ を求めた(図3-1).

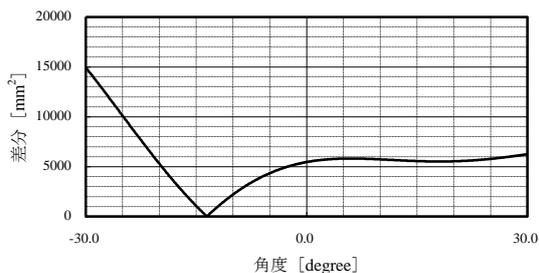


図3-1 数値解析

## 4. 結 言

本論文では, 小型配管検査ロボットの自己位置推定について述べた. また, 自己位置推定を実現する上で必要となる条件式についても述べた.

今後は, 小型配管検査ロボットに実装の上, 直進制御の精度向上を行っていく予定である.

## 参考文献

- [1] 前田 弘文, 五百井 清, 大坪 義一, 小林 滋, 高森 年: レスキューロボットにおけるデバイス管理を容易にするためのミドルウェア開発, 日本機械学会講演論文集 No.115-1, p.123~124, (2011)
- [2] 前田 弘文, 小林 滋, 高森 年: レスキューロボットにおけるデバイス管理を容易にするためのシステム開発, 弓削商船高等専門学校紀要 第34号, pp.48~53, (2012)
- [3] 二宮 綾香, 藤田 和友, 佐々木 俊一, 後藤 幹雄, 前田 弘文: 配管検査ロボットのための試作機設計, 日本機械学会第43回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 716, (2013)
- [4] 藤田 和友, 伊藤 嘉基, 前田 弘文: 配管検査ロボットのためのモジュール化, 第14回システムインテグレーション部門講演会(SI2013), pp.1297~1300, (2013)
- [5] 藤田 和友, 佐々木 俊一, 後藤 幹雄, 伊藤 嘉基, 前田 弘文: モジュール化による配管検査ロボットの小型化, 日本機械学会第44回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, 613, (2014)
- [6] 前田 弘文, 河村 拓弥, 藤田 和友, 伊藤 嘉基, 佐々木 俊一, 後藤 幹雄: 配管検査ロボットに関する研究開発-第1報: 小型化のための試作機設計-, 弓削商船高等専門学校紀要 第36号, pp.79~82, (2014)
- [7] 前田 弘文, 伊藤 嘉基, 佐々木 俊一, 後藤 幹

雄：配管検査ロボットに関する研究開発－第  
2 報：メンテナンス向上のための試作機設計－,  
弓削商船高等専門学校紀要第 37 号, pp.75～  
79, (2015)