

AR 技術を用いた小型配管検査ロボットの自己位置計測

山下 綾香 生産システム工学専攻 2 年 134005
指導教員 前田 弘文

A Study of Self-localization of a Small Autonomous Robot for Piping Inspection by ARToolKit

Ayaka Yamashita and Hirofumi Maeda (Adviser)

ABSTRACT

Since 1965, the number of cities constructing and operating sewerage systems had been on the rise, with waterway overhaul now prevalent in many parts of Japan. However, as the number of facilities under management has increased, their decrepitness has become obvious. The average service life of drainage has been determined to be 50 years, but in reality, 30 years after pipes are built there is a tendency for rapid road subsidence and cave in. This situation stressed to us the importance of regular drainage maintenance and inspection. In line with this, recently, robots have been actively used for inspection to reduce workload. However, the full system for the robots becomes large scale, resulting in high expense and poor maintenance. In this study, to solve these problems, we used the idea of a rescue robot, which we have been developing over a long period, to develop a small, portable inspection robot. Now, we are at the stage of verifying the ability to control the straight travel of the robot, and a instrument for three-dimensional location measurement is essential to track the movement of the robot in the pipe. Therefore, we create an economical three-dimensional location measurement instrument, and propose three types of calibration for accuracy improvement.

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 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^{[1][2]}、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^{[3][7]}。自律型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。現在は、自律型小型配管検査ロボットの自律制御のひとつである

直進制御について検証する段階にあり、そのためにロボットの位置を計測するための機器が必要となっている。しかし、管内での移動軌跡を計測するためには、3次元位置計測器が必要であり、高価で大掛かりなものになってしまう。そこで我々は、安価で3次元位置計測が行えるARToolKitに着目した。ARToolKitとは1台のWebカメラとマークのみで3次元位置計測が行える便利なソフトウェア（ライブラリ）のことである。本論文では、3次元位置計測器におけるソフトウェアの誤差、ハードウェアの誤差、カメラによる誤差の3つの誤差について述べる。また、この3つの誤差に対するキャリブレーション手法を提案する。

2. 自律型小型配管検査ロボット

2.1 小型配管検査ロボットの概要

自律型小型配管検査ロボットをFigure 1に示す。ロボットのサイズは329.0 [mm] (W) ×132.6 [mm] (D) ×107.0 [mm] (H)、本体重量は約4.8 [kg]で、駆動時間20 [min]、最高速度0.23 [m/sec]、牽引力39 [N]の性能を有する。



Fig. 1 自律型小型配管検査ロボット

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自律で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、不可能な場合は中断し帰還する。以下に、動作手順の詳細を示す (Figure 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。

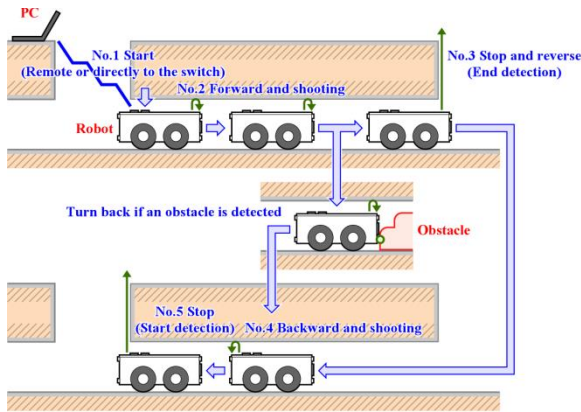


Fig. 2 動作手順

2. 2 直進制御

次に、②と④で使用している直進制御について述べる。直進制御を搭載することは、先で述べたように、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であることはもちろんのこと、カメラのレンズが管に対して正面を向くことで映像が鮮明になる（合成・加工がしやすい）ことが挙げられる。

自律型小型配管検査ロボットには、姿勢を検知するための加速度センサが搭載されている。右手直行座標系において、ロボットの正面を x 軸の正方向、ロボットの重力方向を z 軸の負方向とし、重力加速度を g [m/sec²]、加速度センサの x 成分、 y 成分、 z 成分をそれぞれ、 a_x [m/sec²]、 a_y [m/sec²]、 a_z [m/sec²]、加速度センサの姿勢を絶対座標から見た場合の x 軸周りの姿勢角度、 y 軸周りの姿勢角度、 z 軸周りの姿勢角度をそれぞれ、 α [rad]、 β [rad]、 γ [rad] とすると、重力加速度は式 (1) で表現することができる。また、自律型小型配管検査ロボットの傾きを検知するために、加速度センサ値から g を算出する必要はなく、 α が含まれる a_y 、もしくは a_z を計測すればよい。さらに、 α の変化量（傾き）が少ないことから、少しの傾きでも変化量が大きくなる a_y を計測することが望ましい。

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} -g \sin \beta \\ g \sin \alpha \cos \beta \\ -g \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix}$$

そこで駆動系制御用基板では、重力加速度の y 成分 (a_y) を取得し、0 に収束するように制御をかけている。具体的には、式 (2) (3) のように 0 からの差分 (= 重力加速度の y 成分) に比例ゲインを掛け、その増加量分を左右のモータ指令速度に加える形で、自律型小型配管検査ロボットが常に管の中心線上を走行する制御を行っている。なお、 D_d は両車輪への基準となるモータ指令速度 (無単位)、 D_l は左車輪へ実際に与えるモータ指令速度 (無単位)、 D_r は右車輪へ実際に与えるモータ指令速度 (無単位)、 K_p は比例ゲイン (sec²/m) を表している。

$$D_l = D_d + K_p(0 - a_y) \quad (2)$$

$$D_r = D_d - K_p(0 - a_y) \quad (3)$$

3. 3次元位置計測器

3. 1 3次元位置計測器の概要

Figure 3 に 3次元位置計測器の 3D モデルを示す。この装置は上部に取り付けられたカメラによって下部のマーカを検出するものとなっている。また、下部のマーカを取り付けた床面は 6 自由度を有しており、自由に姿勢を変えることが可能である (Figure 4)。これにより、配管内で傾いたロボットと同じ状態を表現することが可能となり、ARToolKit の精度を現場と近い状態で検証することができる。なお、本体のサイズは 822 [mm] (W) × 139.6 [mm] (D) × 816 [mm] (H) となっている。



Fig. 3 位置計測器の全体像

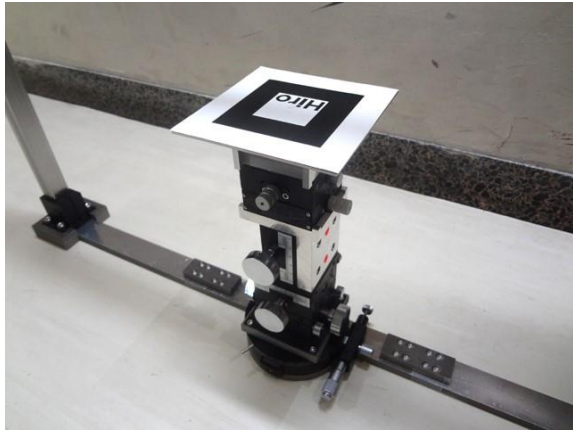


Fig. 4 位置計測器のマーカ部分

次に、マーカ部分の各リンク機構の 3D モデルを Figure 5 ~Figure 10 に示す。リンク機構はそれぞれ x 軸方向に $-20 \sim +20$ [mm], y 軸方向に $-20 \sim +20$ [mm], z 軸方向に $0 \sim +20$ [mm], x 軸回りに $-25 \sim +25$ [degree], y 軸回りに $-20 \sim +20$ [degree], z 軸回りは $-180 \sim +180$ [degree] (無限回転), 駆動することができる。ただし, x 軸方向と y 軸方向については, フレーム側の駆動を使用することで, それぞれ x 軸方向に $-350 \sim +350$ [mm], z 軸方向に $0 \sim +520$ [mm] の駆動が可能となる。

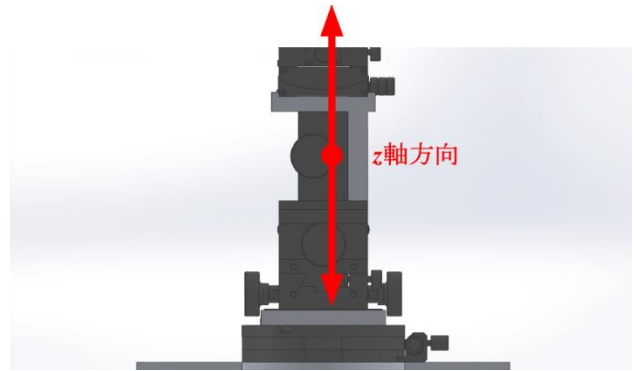


Fig. 7 z 軸方向の駆動

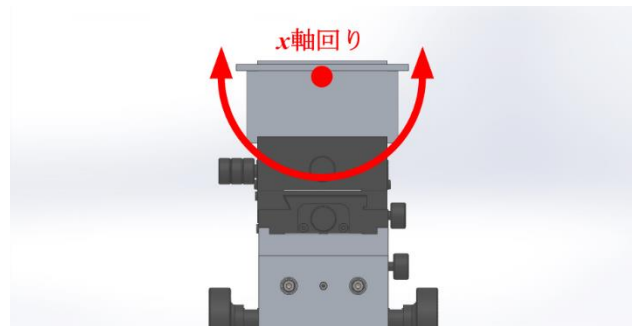


Fig. 8 x 軸回りの駆動

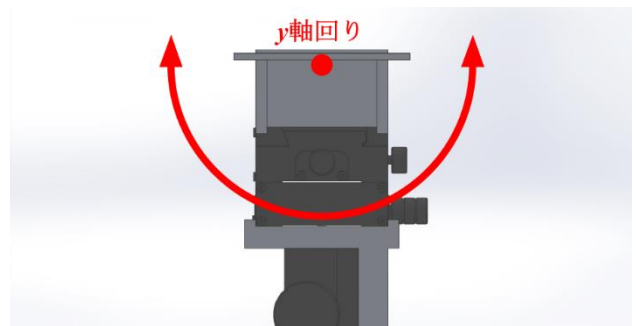


Fig. 9 y 軸回りの駆動

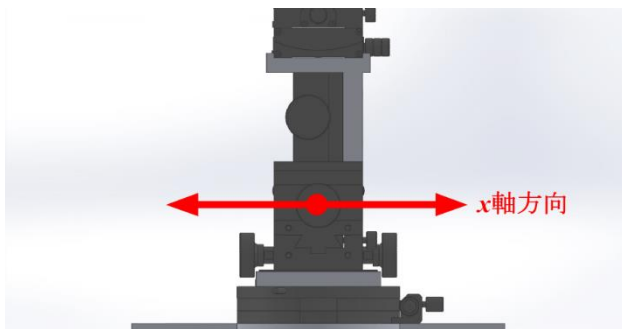


Fig. 5 x 軸方向の駆動

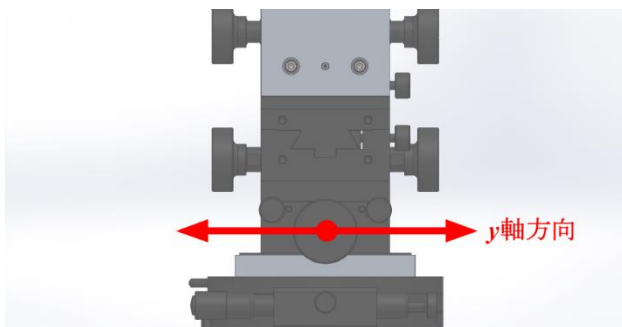


Fig. 6 y 軸方向の駆動

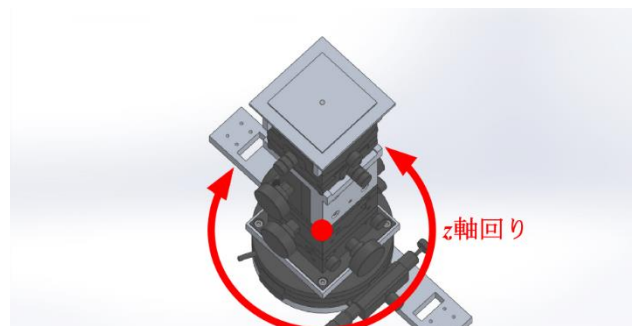


Fig. 10 z 軸回りの駆動

3.2 ソフトウェアキャリブレーション

3次元位置計測器には、光の影響によって位置・姿勢情報が安定しない現象（ジッタ）が起こる。これを修正するためには、直前の情報も考慮し再帰的に位置・姿勢情報を算出する方法をとらなければならない。そのために Figure 11 の `arGetTransMatCont` 関数を用いて座標変換行列を取得する。

| | |
|-----|---|
| 書式 | : double arGetTransMatCont(ARMarkerinfo* marker_info, double prev_conv[3][4], double center[2], double width, double conv[3][4]); |
| 機能 | : 前回求めた座標変換行列と今回のマーカ情報から座標変換行列を生成する |
| 戻り値 | : 0 |

Fig. 11 arGetTransMatCont 関数

ARToolkit では、カメラとマーカ間の座標に対して、整合性を取るために、Fig. 11 の `arGetTransMat` 関数の第2引数、第5引数のように、3行4列の座標変換行列を用いる。式(4)が実際の `double conv[3][4]` の座標変換行列になる。また、`double prev_conv[3][4]` は前回求めた座標変換行列である。なお、 $r_1 \sim r_9$ は回転行列、 $t_x \sim t_z$ は平行移動行列を表している。

$$\begin{bmatrix} conv[0][0] & conv[0][1] & conv[0][2] & conv[0][3] \\ conv[1][0] & conv[1][1] & conv[1][2] & conv[1][3] \\ conv[2][0] & conv[2][1] & conv[2][2] & conv[2][3] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

この座標変換行列は式(5)に対応し、4行目を省略したもとなっている。なお、 $[X_c Y_c Z_c 1]^T$ はカメラ座標系、 $[X_m Y_m Z_m 1]^T$ はマーカ座標系を表している。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_x \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_y \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.3 カメラキャリブレーション

使用するカメラによって焦点距離やレンズの歪みなどの特性（カメラパラメータ）が異なる。このパラメータはカメラ画像からマーカの3次元位置・姿勢を求める計算に使用され、デフォルトは様々なカメラに対応するために広い範囲で設定されている。そのため、より高精度の計測を行うためには、使用するカメラのパラメータを取得する必要がある。

取得する方法には簡易的な1ステップキャリブレーションと、高精度なパラメータが取得可能で3次元計測向きの2ステップキャリブレーションの2通りがある。今回は3次元計測を行うため2ステップキャリブレーションを使用することとした。Figure 12 と Figure 13 に1ステップキャリブレーションと2ステップキャリブレーションの手順をそれぞれ示す。

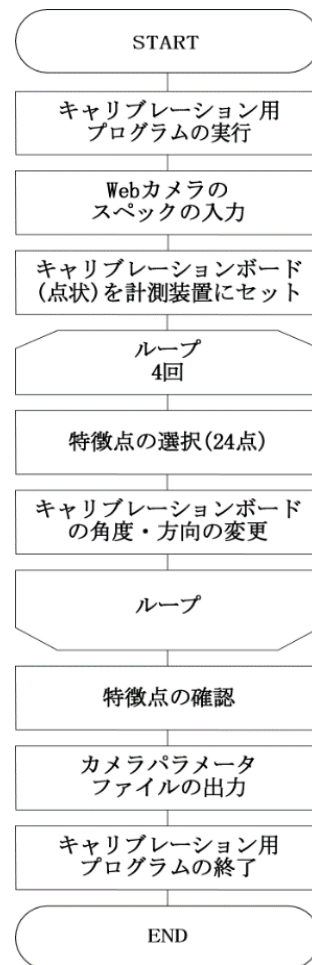


Fig. 12 1ステップキャリブレーション

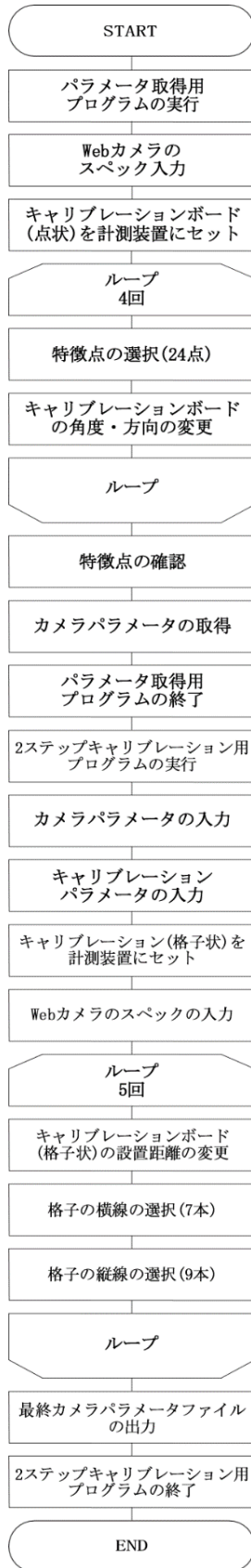


Fig. 132 ステップキャリブレーション

3. 4 ハードウェアキャリブレーション

3次元位置計測器のカメラ側には組み付け誤差があり、床面側には加工誤差と組み付け誤差があるため、これらの影響により原点座標にも誤差が生じる。そこで、この誤差を修正するために、ハードウェアキャリブレーションを行う。ハードウェアキャリブレーションには、Figure 14の8つのマーカ（中心のマーカは動作確認用）を使用し、以下の4つの手順を経て補正する。

- ① 8つのマーカの位置・姿勢情報を1000フレーム取得する
- ② 各1000個のデータの中から位置の最頻値を求める
- ③ ②の最頻値から算出した4つの対角線の距離の中で最も大きい成分をそれぞれ抽出し、中心の位置情報を算出する
- ④ 中心の位置情報を元にキャリブレーションを行う

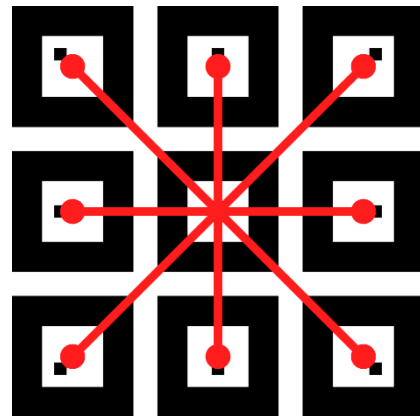


Fig. 14 キャリブレーション用マーカ
(直線は対角の位置関係を表す)

4. 新ハードウェアキャリブレーション

4. 1 ハードウェアキャリブレーションの問題点

3.4で述べたこれまでのハードウェアキャリブレーションは平面を対象としたものであり、傾き誤差（3次元）を考慮していない。そのため、カメラの真下の位置（目標位置）に基準ARマーカを寄せられるものの傾きまでは修正できない。そこで、この問題点を改善するために新しいキャリブレーション手法を提案する。

4. 2 新ハードウェアキャリブレーション手法

3次元でのキャリブレーションを行うためには、カメラの真下の目標位置を算出し、マーカの姿勢も考慮して3次元目標位置へ移動させなければならない。カメラの真下の3次元目標位置の算出には、6軸ステージとカメラから見たマーカの3次元座標を合わせた仮想9軸のマニピュレータとして順運動学を解く。そして、マーカを3次元目標位置へ移動するために、3次元目標位置に対する6軸ステージの逆運動学を解くことにより各ジョイントの移動距離・角度を求める。

5. 結言

本論文では、計測対象となる自律型小型配管検査ロボットの概要と直進制御について述べた。また、直進制御を検証するための3次元位置計測装置について述べるとともに、その計測装置に必要となる3つのキャリブレーション手法として、ソフトウェアキャリブレーション、カメラキャリブレーション、ハードウェアキャリブレーションについて詳細を述べた。さらに、ハードウェアキャリブレーションにおいて、2次元から3次元への拡張による精度向上を目的とした新キャリブレーション手法についても触れた。

今後は、実際に自律型小型配管検査ロボットの直進制御評価を行い、それとは別にキャリブレーションの自動化の開発も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 (2011), p.123~124.
- [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 (2012), pp.48~53.
- [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) (2013), pp.1297~1300.
- [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 (2014), pp.79~82.
- [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 (2015), pp.75~79.