自律型小型配管検査用ロボットの開発
(寄木細工の手法を用いたハードウェアのモジュール化)前田 弘文^{*1}, 黒住 亮太^{*2}Development of a small autonomous pipe inspection robot
(Modularization of hardware using the technique of wooden mosaic work)Hirofumi MAEDA^{*1} and Ryota KUROZUMI^{*2}^{*1} National Institute of Technology, Yuge College
1000 Shimoyuge, Yuge, Kamijima-cho, Ochi-gun, Ehime 794-2593, Japan^{*2} Kobe City College of Technology
8-3 Gakuenhigashimachi, Nishi-ku, Kobe-shi, Hyogo 651-2194, Japan

Received 6 December 2015

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 sewer pipe 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 sewer pipe 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. Furthermore, we got a hint from "a secret box", one of Japanese traditional "wooden mosaic works" and assembled the module without using a single screw. This thesis details our work developing the small, autonomous pipe inspection robot and its specifications, including the updated hardware and software of the robot. The structure of the contrived "wooden mosaic work" was described. Its utility was confirmed through practical experimentation on its movement.

Key words : Exploration robot, Wooden mosaic work, Mobile robot, Robot control, Water pipe, Distributed processing system

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(日本下水道新技術機構, 1992).

現在使用されている配管検査用ロボットの代表的なものとして, 国外では, IBAK 社の Panoramo, iPEK 社の DigiSewer, RICO 社の RPP, 国内では東芝テリー株式会社の VCM561L, 株式会社北菱のメカモグ, 株式会社キュー・アイの TKC-3900 などが挙げられる. これらの配管検査用ロボットは, オペレーションや制御システム,

No.15-00635 [DOI:10.1299/transjsme.15-00635], J-STAGE Advance Publication date : 13 June, 2016

^{*1} 正員, 国立弓削商船高等専門学校 情報工学科 (〒794-2593 愛媛県越智郡上島町弓削下弓削 1000)^{*2} 正員, 神戸市立工業高等専門学校 機械工学科 (〒651-2194 兵庫県神戸市西区学園東町 8-3)

E-mail of corresponding author: maeda@info.yuge.ac.jp

電源などを搭載した運搬車をマンホール付近に設置し、制御システムとケーブルによって接続されたロボット本体（自走車）のみを配管内に投入する方法を採用している。この方法は、制御部と電源部を地上に設置することでロボット自身を軽量化できるだけでなく、有線による遠隔操作が可能であることから、不測の事態においてもオペレーターが即時対象でき、信頼性が高い。しかしその一方で、運搬車を乗り入れる場所を確保するために、道路を一部通行止めにしなければならないことや、検査のために複数の作業員を必要とする問題がある。また、システム全体が大掛かりなことから、ラーニングコストが高く、メンテナンスなどの作業時間もかかり、高価なシステムになってしまう。そこで、現在主流となりつつある方法が、配管検査用ロボット単体で検査が可能なスタンドアローンタイプである。スタンドアローンタイプは、安価で軽く、持ち運びが容易で、少人数で作業が行える。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。国外においては、研究レベルであればMAKROやMAIRO (Birkenhofer et al., 2007, Rome et al., 1999, Streich and Adria, 2004)、商品レベルではRedZone社のSolo Robotsなどが有名であるが、国外での標準的な配管直径が200 [mm]以上であることから、国内で検査が求められる直径150 [mm]の配管には対応できない。また国内においては、北九州産業学術推進機構 (FAIS) が開発した管太郎 (Ahrary et al., 2006, 2007, Amir et al., 2007, 内田, 石井, 2009) がある。この管太郎は、完全自律を目指したもので、ハの字配置型クローラといわれる独自の機構を有し、管径150 [mm]から250 [mm]と幅広い管径に対応できる。さらに、この管太郎は株式会社石川鉄工所によって、もぐりんこシリーズとして製品化されている。このもぐりんこシリーズは管太郎の自律部分を省くことで低コストを実現するとともに、ロボット単体（スタンドアローンタイプ）による自律走行スクリーニング検査を商品レベルで実現している。しかし、スタンドアローンタイプは国外・国内ともにまだ種類も少ない。

そこで我々は、近年急激に小型化が進む組み込みPCやセンサなどを配管検査用ロボットに搭載することで、さまざまな自律制御に適用し、今まで以上に検査員の負担を減らせるものが構築できるのではないかと考えた。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 (石井他, 2010, 前田他, 2011, 2012)、スクリーニング検査（動画撮影のみ）を目的とした自律で持ち運びが容易な小型配管検査用ロボットの開発を行ってきた (二宮他, 2013, 藤田他, 2013, 2014, 前田他, 2014, 2015)。またこの小型化を行う上で、部品も小型化し、部品点数自体が増えたことで、メンテナンス性が悪くなる問題が発生したが、機能別単位でモジュール化することで解消した。しかし、各モジュールがねじで固定されていることから、ねじを取り外すために時間を要するだけでなく、ねじを破損するなどの問題も発生した。さらに、ロボット本体も小型化したことで、ねじを本体内部に落としてしまうケースが増加し、ねじを取り除く作業など、時間のロスが著しく大きくなってしまった。そこで、我々は日本の伝統工芸品である「箱根寄木細工」の一つである「秘密箱」に手がかりを得て、ねじを使用しないモジュールの組立てを考案した。本論文では最初に、自律型小型配管検査用ロボットを実現する上で必要となる設計要件について述べる。次に今回考案した寄木細工構造について触れる。続いて、最新の自律型小型配管検査用ロボットのハードウェアおよびソフトウェアの詳細について述べる。最後に、最新の自律型小型配管検査用ロボットの動作確認および計測実験を行い性能を示す。

2. コンセプト

自律型小型配管検査用ロボットを研究開発する上で、企業の要望を受け、以下の2つのことを最重要課題とした。

- ①スクリーニング検査（動画撮影のみ）を行う際、管内閉鎖時にロボット自身がその状況を検知し、一旦停止した後に出発側（検査開始側）のマンホールまで帰還できる。ただし、帰還時にスタックする場合はその限りではない。その場合は、非常事態として命綱であるワイヤーもしくはロープによって、ロボットを巻き取り回収する（下記の本体条件⑤、操作条件③）。
- ②修理や掃除などのメンテナンスを行う際、可能な限り分解工数を減らすことで作業時間を短縮し、人件費を削減する。また修復不可能な部品が検出された際は、部品交換によって修理時間の短縮を行う（下記の本体条件⑥）。

また、試作機（最新版）の性能比較対象には、東芝テリー株式会社の VCM561L を用い、同等もしくはそれ以上の性能を目指すことで、実用性を高めることとした。性能比較対象を VCM561L とした大きな要因としては、自走車として販売実績があることと、適用管径が 150～200 [mm] で、入手が容易であるためである。また、国内で自律化に成功し、販売されているもぐりんこ 150 も参考対象とした。なお管太郎については市販品ではないが、もぐりんこ 150 より性能が優れていることから、今後試作機を改良していく上で、比較対象の一つに挙げる必要があると考えている。表 1 に VCM561L ともぐりんこ 150 の重要な仕様を示す。この仕様を基に、企業の意見を踏まえた上で定めた今回の試作機の仕様が以下の通りである。

Table 1 Specifications of VCM561L and Mogurinko150

Item	Specifications	
	VCM561L	Mogurinko150
Model number	VCM561L	Mogurinko150
Pipe diameter	150 mm or 200 mm	150 mm
Video pixel	410,000 pixels	440,000 pixels
Speed	0 - 18 m/min	13.7 m/min
Battery runtime	- (External power supply)	About 6 hours
Waterproof and dustproof	IP68	Drip-proof
Weight	About 10 kg	5.4 kg

検査条件①：調査対象管渠の勾配は 1/100 とする。

検査条件②：調査対象管渠は、管径 150 [mm] もしくは 200 [mm] の全長最大 100 [m] とする。

検査条件③：調査対象管渠は直線とし、途中で管が曲がることはないものとする。

本体条件①：小型配管検査用ロボットは、管径変換ユニットを用い、管径 150 [mm] と 200 [mm] に対応する。

本体条件②：小型配管検査用ロボットの本体サイズは、VCM561L 程度とする。

本体条件③：小型配管検査用ロボットの本体重量は、VCM561L 以下とする。

本体条件④：小型配管検査用ロボットは、防水防塵仕様（IP67 以上）とする。

本体条件⑤：非常事態（スタック時）に小型配管検査用ロボットを回収するためのフックを取り付ける場所を確保する。

本体条件⑥：小型配管検査用ロボットのメンテナンスを簡単化するためにモジュール化する。

操作条件①：オペレータの操作は、スタート指示のみとする。ただし、緊急時は除く。

操作条件②：小型配管検査用ロボットは、自律制御によって終点側（検査終了側）のマンホールにて停止し、後進する。

操作条件③：操作条件②の途中で管内が閉鎖されている場合、小型配管検査用ロボットは自律制御でその閉鎖状態を感知し、停止した後に後進する。

操作条件④：操作条件②もしくは操作条件③の後、小型配管検査用ロボットは自律制御で、出発側（検査開始側）のマンホールにて停止し、待機する。

走行条件①：小型配管検査用ロボットは、最高速度 10 [m/min] 以上で直進（一定速）する。

走行条件②：小型配管検査用ロボットは内部バッテリーを有し、100 [m] 以上の走行が可能な容量とする。

走行条件③：小型配管検査用ロボットは、ステアリング機能を必要としない。

映像条件①：映像をリアルタイムで外部に出力する機能は必要としない。

映像条件②：内部記憶媒体に映像データを蓄積する。

映像条件③：LED の輝度はパラメータによって調整する。

映像条件④：カメラは 41 万画素以上とする。

3. ハードウェア

Ver. 1.00 では、小型配管検査用ロボットとして管径 150 [mm] に対応し、カメラ部分を除く基本機能を制御用基板に組み込み、実現した (図 1(a)). Ver. 3.00 では、メンテナンス性を向上するために、各機能をハードウェア単位でモジュール化することができるか検証するための試作機を制作した (図 1(b)). そして Ver. 3.00 とは別に、Ver. 3.10 にてハードウェアに関する条件を除く、組み込み系の条件を満たしたシステムを実現した (図 1(c)). 最終的に、Ver. 3.00 と Ver. 3.10 の成果を踏まえ、全ての条件を満たした Ver. 4.00 を実現することができた (図 1(d)). 以下に、Ver. 4.00 の詳細について述べる.

Fig. 1 Small autonomous pipe inspection robot : (a) Except for the camera function, the basic functions were incorporated into the control board. (b) Hardware has verified that it can modularized for each function. (c) The robot satisfying the condition of the embedded system was fabricated. However, conditions on the hardware are excluded. (d) This robot satisfies all the conditions.

今回、最新の自律型小型配管検査用ロボットをモジュール化するにあたり、日本の伝統工芸品である箱根寄木細工の一つである秘密箱に手がかりを得た。

箱根寄木細工とは、様々な種類の木材を組み合わせ、それぞれの色合いを生かした模様を描く木工技術である。その箱根寄木細工の中には、代表的作品ともいえる秘密箱がある。秘密箱は江戸後期の 1830 年頃から製作されているといわれ、箱にほどこされている仕掛けを決まった手順で解除しないと箱の蓋が開かない構造となっている。秘密箱が箱根寄木細工によって作られている理由としては、表面（蓋部分）に寄木細工の装飾を施すことで見た目だけでなく、木材の繋ぎ目（仕掛け）も隠す役割を担っているからである。

我々は、この秘密箱の釘を使わない技法と定められた手順を踏まなければ箱が開かず、部品を分解できないという特徴に着目した。前者については、釘を使わず、木材のみをスライドさせるだけで、ひとつの箱に仕上げるのであらば、ロボットにおいても、ねじを使わずに、モジュールをスライドさせるだけで、組み立てれるのではないかと考えたからである。また後者についても、定められた手順を踏まえなければ分解できないのであらば、スライドする（分解する）方向以外において、はめあいの構造となり、互いの部品が押し合う状況を作ること、防水性を高められるのではないかと考えた。

そこで最新の自律型小型配管検査用ロボットでは、ロボット全体を秘密箱に見立て、以下の 8 つのモジュールに分解した (図 2)。なお、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] である。

Fig. 2 Hardware modularity : Decomposed into eight modules (Main unit, Front unit, Rear unit, Camera control unit, Drive control unit, Gear unit, Tire unit, Battery).

本体ユニット :

本体ユニットは、他のユニットを搭載した状態で、防水防塵仕様（IP67 以上）になるように設計している。試作機であるためケース部分（蓋を除く本体部分）は複数の部品を組み合わせた構造になっており、繋ぎ目には溝を設け、接着剤を流し込むことで防水性を高めている。製品化などを行う際は、鋳造や削り出しによる一体化構造が望ましいが、加工時間やコスト、試作による作り直しの関係で今回はこの方法を採用した。なお、本体の上蓋については、一般的なゴムによる防水加工を施している。また、本体ユニットの前後には接触時にセンサに力を伝えるためのバンパー、後方にはロボットがスタックした際にロボットを回収するための命綱の付け口を設けている。さらに、IP67 仕様の充電用コネクタ、電源スイッチ、動画保存用 USB の取り付け口なども搭載している（図 3）。

Fig. 3 Main unit : The bumper is provided on the front and rear of the main unit. And, the opening of the lifeline is provided on the rear.

フロントユニット :

フロントユニットには、接触センサ（株式会社秋月電子通商 FSR402）とライト（株式会社秋月電子通商 OSW4XME1C1E-100）の他に、USB カメラとして logicool 社製の HD Webcam c525 を搭載している。また、画角 185 [degree]を有する魚眼レンズを USB カメラのレンズ先端に取り付けている。魚眼レンズは組立てた際、本体ユニットから突き出て外気に触れるため、本体ユニットと接触する場所にはゴムによる防水を施している。

- リアユニット： リアユニットは、フロントユニットと同様に接触センサとライトを搭載している。また、後方上面の壁を検知するための距離センサ（株式会社秋月電子通商 GP2Y0A21YK）も搭載している。
- カメラ制御ユニット： カメラ制御ユニットには、組み込み用 PC として SolidRun 社の CuBox-i4 Pro を搭載しており、カメラ制御を中心とした処理を行う。また、前方上面の壁を検知するための距離センサと複数の USB を接続するための USB ハブ（サンワサプライ株式会社 USB-HMB406BK）も搭載している。
- 駆動制御ユニット： 駆動制御ユニットには、バッテリーから得られた電圧を変換するための変圧基板とハードウェアを制御するための駆動系制御用基板、姿勢を検知するための加速度センサ（住友精密工業株式会社 CXL17LF3）を搭載している。
- ギアユニット： ギアユニットは動力である駆動用モータと、その動力を前輪、後輪に伝えるためのギアによって構成される。また、ギアユニットを分解することなく、駆動用モータだけを取り外すために、取り外し用の穴を設ける工夫を施している（図 4）。そのためギアそのものが故障しない限り、ギアボックス部分を分解する必要がなく、車軸周りの防水機能を全てモジュール内に格納することができる。その結果、ギアユニットが外気に触れる部分については、本体ユニットとギアユニットが接触する箇所に一般的なゴムによる防水加工を施すのみで防水性を確保することができる（図 4）。駆動用モータには、近藤科学株式会社の KRS-4034HV ICS を使用している。KRS-4034HV ICS はロボット専用の RC サーボモータであり、近藤科学が独自開発した通信規格 ICS3.5（半二重）を使用することで、デジタル通信によるコマンド指令が可能となる。その結果、コマンド指令送信時（PWM 信号）に発生するノイズをカットすることができるだけでなく、モータパラメータなどの細かい設定を行うこともできる。また、モータ角度の取得やモータの速度フィードバックおよび位置フィードバックを行うことが可能で、今回は速度フィードバックを用いることで、車輪の動力部として使用している。さらに RC サーボモータは、本来ラジオコントローラに使用される目的で開発されたものであることから、モータ内に制御基板やモータドライバが内蔵されたコンパクトな作りとなっており、モータそのものがモジュールとして機能する。

Fig. 4 Gear unit : The gear unit is provided with a removal hole of the motor.

タイヤユニット： タイヤユニットは、タイヤとホイールからなるユニットで、直径 150 [mm]の配管に対応している。また追加タイヤユニットを取り付けることで、直径 200 [mm]の配管にも対応する (図 5)。さらにタイヤを御碗形にすることで、ロボットの直進性を向上させ、転倒抑制に繋げている。

Fig. 5 Tire unit : Tire corresponds to the pipe with a diameter of 150mm. By attaching an additional tire unit, it also corresponds to the pipe with a diameter of 200mm.

バッテリー： バッテリーは近藤科学株式会社の ROBO パワーセル HVD タイプ 10.8V-800mAh (Ni-MH) を 2 個搭載し、USB カメラ・カメラ制御ユニット (制御用バッテリー) とそれ以外 (駆動用バッテリー) の 2 つに分けて接続・搭載している。

最後に、考案したモジュールの格納方法について述べる。ただし本来の秘密箱と違い、メンテナンス性を損なわないようにする (分解作業の手間を増やさない) ために、複雑な構造はとらず、シンプルに分解できるよう溝を設けて代用する工夫を施している。

まず最初に本体ユニットに設けられた溝 (スライドガイド) に沿わす形で、フロントユニットを本体前方に嵌め込む (図 6(a))。この溝によって、フロントユニットは本体の中央内側方向にしかスライドすることができなくなる。次に、ギアユニットについても本体の溝に沿わす形で、左右に嵌め込む (図 6(b))。この際、ギアユニットの前方がフロントユニットに接触することで、フロントユニットは本体中央内側へのスライドが抑制され、ギアユニットを取り除かない限り、フロントユニットを取り除くことができなくなる (図 6(c))。またここで重要な点は、ギアユニットがフロントユニットに接触することで前方に押し出す形となり、本体ユニットとフロントユニットの接触しているゴム部分が押されることで、本体内部の気密性が高まり、防水性がさらに向上することである (図 6(d))。ここで本来ならば、複数モジュールによる嵌合いによって累積誤差が大きくなるため、各部品に高い加工精度を要求しなくてはならないという問題が発生するが、このゴム部分の伸縮を利用し、加工精度に幅を持たせることで問題を回避している。そしてバッテリーを内蔵した後、駆動制御ユニットを上から嵌め込むことで、フロントユニットも同様に、ギアユニットを左右に押し出す形となり、防水性が高まる (図 6(e))。さらに、フロントユニット、カメラ制御ユニットの順に嵌め込んでいくことで、ねじを使わずにモジュールの全てを本体ユニット内部に格納することができる (図 6(f), 図 6(g))。最後に、電気配線を行った上で本体ユニットの上蓋を取り付け、外側からタイヤを取り付けることでロボットの全体の組立てが完了する (図 6(h))。

Fig. 6 Modularization of hardware using the technique of wooden mosaic work : (a) The front unit is fitted to the front of the body along the groove of the body. (b) The gear unit is fitted on the left and right sides of the body along the groove of the body. (c) As the front of the gear unit is brought into contact with the front unit, the front unit is suppressed slide to the body center inside. (d) As the rubber part is pressed, increasing air tightness of the internal body. (e) By a form to push the gear unit to the left and right, waterproof is enhanced. (f) First fit the front unit to the main unit. Next, fit the camera control unit to it. (g) All of the modules without the screw are stored in the main body unit. (h) The entire assembly of the robot is completed.

4. ソフトウェア

駆動系制御用基板についても改良を重ねてきた。Ver. 1.00 では、CPU に H8/3052F を使用し、A/D 変換によるセンサ値の読み取り、I/O によるスイッチ制御、LED 制御、LCD 制御、PWM と LED ドライバによるライト調整などの基本的な機能を実装した (図 7(a))。Ver. 3.00 では、駆動用モータのノイズ (ジッタ現象) を軽減するため、速度指令をアナログ通信 (PWM) からデジタル通信 (ICS3.5) へと変更し、それに伴い CPU も H8/3052F から SH7125F へ変更した (図 7(b))。そして、Ver. 3.10 では USB 経由で外部命令を受け取る機能を実装するとともに、専用基板を製作した (図 7(c))。最終的には、Ver. 4.00 にてモジュール化に伴い基板の分割を行った (図 7(d))。

(a) Ver. 1.00

(b) Ver. 3.00

(c) Ver. 3.10

(d) Ver. 4.00

Fig. 7 Drive system control board : (a) It have implemented the basic functions using the H8/3052F. (b) A speed command has been changed from analog communication (PWM) to the digital communication (ICS3.5). (c) It implements the function of receiving an external instruction via USB. (d) It is divided for the sake of a module.

駆動系制御用基板は USB によって接続された組み込み PC (CuBox-i4 Pro) からのコマンドによって制御されており、図 8 に示すように、①～⑤の動作手順を行うことで、自律スクリーニング検査 (自律動画撮影) を可能としている。なお、途中でロボットがスタックした際は命綱 (取り付け口に取り付けたワイヤーもしくはロープ) によって回収する。またスタックしたかどうかについては、無線 LAN の通信可能領域であればロボットからの救助信号で判断し、領域外であれば計測時間 (計測距離 $\times$ 2 / 速度) から判断する。

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。なお、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]であることもあり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、下記で詳細に述べる。また、進行途中に障害物がある場合、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・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. 8 Sequence of actions : ① Start ② Forward and shooting ③ Stop and reverse ④ Backward and shooting ⑤ Stop

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用ロボットには、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、重力加速度は下記の式で表現することができる。また、自律型小型配管検査用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。

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

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、下記の式のように 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用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。

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

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

5. 寄木細工手法の評価実験および計測実験

最新の自律型小型配管検査用ロボットにおいて、寄木細工の手法を用いることでメンテナンス性が向上したことを実際の組立てによって確認した。組立ての評価は、本体ユニットの中が空の状態から、タイヤユニット以外のユニットを組み込み、本体ユニットに蓋をするまでの時間を計測することで行った。なお、寄木細工の手法の評価を行うために、配線の接続および蓋のねじ留めは行わないこととした。1 人の作業者が 10 回の組立て作業を行った結果、65 [sec] から 79 [sec] の時間を有し、平均は 74.2 [sec] となった。また比較対象として、3 人の作業者に対して、M3-10 のねじをねじ穴に 10 本留める時間の計測をそれぞれ 3 回ずつ行った。これは、ロボットの本体部分を構成する 6 つのユニット（本体ユニットとタイヤユニット以外）を寄木細工ではなく、10 個のねじで本体ユニットに組み付ける場合を想定して行ったものである。その計測結果は、113 [sec] から 196 [sec] となり、早い作業者で平均 137.6 [sec]、遅い作業者で平均 171.3 [sec]、全体平均で 150.6 [sec] となった。この結果から、もし故障箇所が一番最後に取り外すモジュール（フロントユニット）であったとしても、そのモジュールを取りはずし、

モジュールを入れ替えて元に戻す時間 ($72.3 \times 2 = 144.8$ [sec]) は、ねじを 10 本留める時間と変わらないことが分る。ここでねじで組み付けた場合を想定する。もしその際、故障箇所が 1 つに限定され、かつその箇所の固定ねじが 1~2 本であるならば、寄木細工の手法よりも早く部品の交換が可能となる。しかし、2 つ以上の故障箇所、もしくは 3 本以上のねじによる固定がなされていれば、寄木細工の手法の方が交換時間は短縮される。前者と後者を比較した場合、後者の方が圧倒的に起こりえる確率は高く、このことから寄木細工の手法を用いることは、組立て・分解時間においても十分有効な方法と成り得る。

次に寄木細工の手法を用いた本試作機においても、2 章で示したコンセプトに基づいて、基本性能を十分に満たしているか、以下の 4 つの項目について実施し、確認を行った。

1. 直進制御の評価実験
2. バッテリ駆動時間計測実験
3. 直進速度計測実験
4. 牽引力計測実験

5・1 直進制御の評価実験

まず最初に、駆動用モータ KRS-4034HV ICS の個体差の確認を行った。5 個のモータについて 10 回の測定を行い、それぞれの平均を比較した結果、内部で速度フィードバックを行っていることもあり、個体差はほぼ見られず、下記の関係式が成り立った。なお、 D は速度指令値 (無単位)、 ω は角速度 (rad/sec) を表している。

$$\omega = 13/500(D - 7500) \quad (7250 \leq D \leq 7750) \quad (4)$$

次にフロントに取り付けられたカメラの動画映像を無線 LAN によって受信されることを確認した。また、スクリーニング検査の映像は、側面の映像部分が重要である。そのため、魚眼レンズの画角が仕様通り 185 [degree] を確保していることと、ロボット自身 (ねじなどの突起物) が映像内に写り込んでいないことを確認した。

最後に自律型小型配管検査用ロボットが管内で移動中に転倒せず、直進制御によって常に管の中心線上を走行することを確認した。実験方法としては、管内でロボットを約 0.15 [m/sec] で走行させた後、①管を左に約 20 [degree] 傾けロボット自身の姿勢を強制的に傾ける、②管の傾きを固定し、ロボットが管の中心線上を直進するまで待つ、③管を右に約 20 [degree] 傾けロボット自身の姿勢を強制的に傾ける、④管の傾きを固定し、ロボットが管の中心線上を直進するまで待つ、の①~④の動作を繰り返した。図 9 は③から④の実験結果の一例を表しており、撮影した実験動画から時間とロボットの姿勢の関係を示したものとなっている。図 9 の最初の 0~約 210 [msec] が③の管を傾けた動作区間 (約 18 [degree]) であり、それ以降が④の動作区間となり、420 [msec] の時間をかけてロボットの傾きが管の中心線上に (0 [degree]) 収束していることが分かる。また、その他の実験結果から管を約 20 [degree] 傾けた際、管の中心線上に 400~600 [msec] 程度で収束することを確認した。なお、実験には通常の硬質ポリ塩化ビニル管 VU では、すべりにくいことから、摩擦が少ない北海紙管株式会社のホッカイボイド (管内径 200 [mm]、長さ 2 [m]) を使用し、 $K_p = 1.5$ [sec²/m] (式(2)と式(3)) とした。

また現在多くのロボットが管径変換ユニットによって管径のサイズの違いに対応しているが、直進制御によって常に管の中心線上を走行することが可能であることから、管径変換ユニットを交換することなく、管径 400 [mm] のサイズまで 1 台のロボットで対応できるのではないかと我々は考える。その根拠には加速度センサによる予備実験結果があり、その実験結果から管径が 400 [mm] より大きくなるとロボットが走行している管の底面が平面に近い状態となることで、 a_y が小さくなり (管に対してロボットのロール方法の傾きが検知できず) 蛇行を判断することが難しくなると予測できたためである。また、この問題を解決するためには、新たに 1 軸ジャイロセンサ (ヨー方向) をロボットに搭載し、平面走行状態での蛇行を検知する方法などが考えられる。

Fig. 9 Confirmation of traveling control : Tube used in the experiment is Hokkaiboido.

5・2 バッテリー駆動時間計測実験

自律型小型配管検査用ロボットは走行条件①と走行条件②から、最高速度 10 [m/min]以上で 100 [m]を往復したとして、最低でも 20 分以上稼働できる内部バッテリーを搭載しなければならない。

そこで、満充電のバッテリー (Ni-MH 10.8 [V] 800 [mAh], 各 1 個) を用いて、バッテリー駆動時間の計測実験を行った (図 10)．実験には、アロン化成株式会社の硬質ポリ塩化ビニル管 VU (管内径 150 [mm], 長さ 2 [m]) を使用し、ライトの光度を最高値 (約 300 [lm]) に設定した状態でスクリーニング検査を繰り返した．この計測実験を 10 回行った結果、駆動用バッテリーの駆動時間が 20～25 分程度、制御用バッテリーの駆動時間が 2 時間程度であった．次に、後方に取り付けられたライトがスクリーニング検査とはまったく関係なく、検査開始地点にいる検査員に対して、ロボットが引き返してきたことを知らせるためのものであることから、前進時はライトを消し、後進時には検査員が目視できる 50 [lm]程度に設定して、実験を行った (前方は約 200 [lm])．その結果、駆動用バッテリーの駆動時間を 40 分程度まで引き延ばすことに成功した (10 回の計測結果)．

今回、試作機としては十分なバッテリー容量を有しているが、製品としては不十分である．しかし、ロボット内部にはまだ十分な空間があり、駆動用バッテリーと制御用バッテリーを 1 つに (並列接続) し、同社の ROBO パワースセル F3-2100 タイプ (LiFe 9.9 [V] 2100 [mAh]) を複数搭載することで、対応できる。

Fig. 10 Measurement experiment of battery-powered time : A rigid polyvinyl chloride pipe VU was used in the measurement. In addition, the intensity of the pattern was prepared two types.

5・3 直進速度計測実験

自律型小型配管検査用ロボットの最高速度は 10 [m/min]以上を設計目標とした (走行条件①)．そこで、満充電の状態でアロン化成株式会社の硬質ポリ塩化ビニル管 VU (管内径 150 [mm], 長さ 2 [m]) を使用し、最高速度を

計測したが、速度にばらつきが出てしまった ($0.20 \sim 0.23$ [m/sec]). これは、タイヤの形状が御梔形であり、タイヤの側面の一部が管内に接触したためと思われる。そこで、正確な速度を計測するために、図 11 で示すように水平な机の上を使用して、最高速度の計測を 10 回行った。その結果、最高速度が $0.22 \sim 0.23$ [m/sec]であることを確認した。この最高速度を分速に直すと $13.2 \sim 13.8$ [m/min]となり、目標の 10 [m/min]はもちろんのこと、もぐりんこ 150 と同等の速度 (13.7 [m/min]) が出せることが分かった。

また、今回使用したモータはトルクタイプ (KRS-4034HV ICS) のものであり、ハイスピードタイプ (KRS-4032HV ICS) に変更することで、2 倍程度の速度を出すことが可能で、VCM561L の最高速度を上回ることができる。

Fig. 11 Measurement experiment of straight velocity : The measurement was performed with a rigid polyvinyl chloride pipe VU and plane.

5・4 牽引力計測実験

自律型小型配管検査用ロボットの前後の接触センサには、株式会社秋月電子通商の FSR402 を使用しており、感圧範囲が $0.2 \sim 20$ [N]である。また、管内の障害物を掻き分けることができるかどうか（移動可能な障害物であるかどうか）については 10 [N]程度あれば判断が付く。そこで、重量計に設置した錘に紐を結びつけ、その紐を自律型小型配管検査用ロボットでアロン化成株式会社の硬質ポリ塩化ビニル管 VU (管内径 150 [mm], 長さ 2 [m]) 内を牽引させたが、直進速度計測実験と同様に牽引力にかなりのばらつきがでた ($34 \sim 45$ [N])。これは、タイヤの形状が御梔形であることで、タイヤの側面の一部が管内に接触し、摩擦が増したことが原因だと思われる。そこで直進速度計測実験と同様に机の上で計測を行った (図 12)。なお、紐にはナイロン製のものを使用し、計測時にロボットが左右に揺れることから従動輪は使用せず、直接表面摩擦が小さい机のアルを利用することで、紐に生じる摩擦を抑えた。その計測結果から、牽引力が約 $33 \sim 39$ [N] (10 回の計測結果) であることが確認され、目標牽引力の 4 倍程度の値を得た。よって、5・3 で述べたハイスピードタイプのモータに変更することも可能である。

Fig. 12 Measurement experiment of tractive force : The measurement was performed with a rigid polyvinyl chloride pipe VU and plane.

6. 結 言

本論文では、自律型小型配管検査用ロボットを実現する上で必要となる機能を示すとともに、これまで開発してきた自律型小型配管検査用ロボットについて触れた。また、最新の自律型小型配管検査用ロボットのハードウェアおよびソフトウェアの詳細についても述べた。最後に、寄木細工の手法によって組立て作業の時間を短縮できるか検証し、その上で動作確認・計測実験による性能評価を行った。

本寄木細工の手法は、ねじの破損や落下の防止だけでなく、組立て時間においても有効であることを示せた反面、以下の2つの課題が残された。

1. 寄木細工の手法を用いることは、組立て作業時間の短縮に繋がったが、嵌合う際に配線の取り回しにかかりの時間を割いてしまった。そのため、配線についてもモジュール化に適用したワンタッチ接続などのような工夫を施す必要がある。
2. 組立ておよび分解作業には、予め定められた手順に沿って行う必要があり、故障の原因となるモジュールを取り外す場合などに無駄な作業が生じる。この問題を解決するためには、寄木細工の手法の利点を生かしたまま、複数の組立て手順が行える新たな手法を提案する必要がある。

今後は上記の2つの課題を解決していくとともに、自律型小型配管検査用ロボットの課題として、直進制御の評価をより正確に行い、更なる改良を行っていく予定である。そこで以下の4つを目前の課題とする。

- ・寄木細工の手法で生じた2つの課題を解決する。
- ・直進制御の軌跡を正確に計測するための装置を開発する。
- ・開発した装置を用いて、転倒時などの管内軌跡を計測し、解析する。
- ・直進制御の評価を踏まえて、より良い制御方式を提案し、検証実験を経て最適な制御を導き出す。

文 献

- Ahrary, A., Kawamura, Y. and Ishikawa, M., A laser scanner for landmark detection with the sewer inspection robot KANTARO, Proceedings of the IEEE International Conference on System of Systems Engineering(2006), pp.310-315.
- Ahrary, A., Kawamura, Y. and Ishikawa, M., An automated intelligent fault detection system for inspection of sewer pipes, IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.127, No.6(2007), pp.943-950.
- Birkenhofer, C., Regenstein, K., Zöllner, J. M. and Dillmann, R., Architecture of multi-segmented inspection Robot KAIRO-II, DOI: 10.1007/978-1-84628-974-3_35, In book: Robot Motion and Control(2007), pp.381-389.
- 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(2013), pp.1297-1300.
- 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(2014), 613.
- 石井良典, 大坪義一, 小林滋, 小林泰弘, 山本祥弘, 梅田栄, 海藻敬之, 前田弘文, 高森年, 田所諭, 閉鎖空間内探索ロボットのための遠隔操縦システムの開発, 第11回システムインテグレーション部門講演会(2010), pp.1238-1241.
- 日本下水道新技術機構, 下水道用施設管理ロボットの開発基礎調査, 下水道新技術研究所年報(1992), pp.43-52.
- 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), pp.123-124.
- 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, Vol. 34(2012), pp.48-53.
- 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, Vol. 36(2014), pp.79-82.
- 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, Vol. 37(2015), pp.75-79.

- Nassiraei, A. A. F., Kawamura, Y., Ahrary, A., Mikuriya, Y. and Ishii, K., Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot "KANTARO", IEEE International Conference on Robotics and Automation(2007), pp.4088-4093.
- 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(2013), 716.
- Rome, E., Hertzberg, J., Kirchner, F., Licht, U. and Christaller, T., Towards Autonomous Sewer Robots: the MAKRO Project, Urban Water, Vol. 1(1999), pp. 57-70.
- Streich, H. and Adria, O., Software approach for the autonomous inspection robot MAKRO, in Proceedings of the 2004 IEEE International Conference Robotics and Automation(2004), pp. 3411-3416.
- 内田裕和, 石井和男, 下水管調査ロボットのビジョンシステムを用いたひび割れ検出方法に関する基礎研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2009(2009), 1A1-C02.

References

- Ahrary, A., Kawamura, Y. and Ishikawa, M., A laser scanner for landmark detection with the sewer inspection robot KANTARO, Proceedings of the IEEE International Conference on System of Systems Engineering(2006), pp.310-315.
- Ahrary, A., Kawamura, Y. and Ishikawa, M., An automated intelligent fault detection system for inspection of sewer pipes, IEEE Transactions on Electronics, Information and Systems, Vol.127, No.6(2007), pp.943-950.
- Birkenhofer, C., Regenstien, K., Zöllner, J. M. and Dillmann, R., Architecture of multi-segmented inspection Robot KAIRO-II, DOI: 10.1007/978-1-84628-974-3_35, In book: Robot Motion and Control(2007), pp.381-389.
- Fujita, K., Ito, Y. and Maeda, H., Modularization for a piping inspection robot, 2013 Symposium on System Integration(2013), pp.1297-1300(in Japanese).
- Fujita, K., Sasaki, T., Goto, M., Ito, Y. and Maeda, H., Miniaturization of the piping inspection robot by modularization, 44rd Graduation Research Presentation Lecture of Student Members of the JSME(2014), 613(in Japanese).
- Ishi, R., Ohtsubo, Y., Kobayashi, S., Kobayashi, Y., Yamamoto, Y., Umeda, S., Kaiso, T., Maeda, H., Takamori, T. and Tadokoro, S., Development of remote control system for search and rescue robot in confined space, 2010 Symposium on System Integration(2010), pp.1238-1241(in Japanese).
- Japan institute of wastewater engineering technology, Development foundation survey of sewerage facilities management robot, Sewer new technology Annual report of the Institute(1992), pp.43-52(in Japanese).
- Maeda, H., Ioi, K., Ohtsubo, Y., Kobayashi, S. and Takamori, T., Proceedings of the JSME, No.115-1(2011), pp.123-124(in Japanese).
- Maeda, H., Kobayashi, S. and Takamori, T., Development of system for rescue robots to facilitate device management, Bulletin of National Institute of Technology, Yuge College, Vol. 34(2012), pp.48-53(in Japanese).
- Maeda, H., Kawamura, T., Fujita, K., Ito, Y., Sasaki, T. and Goto, M., Research and development about a piping inspection robot -Report1:Prototype design for a miniaturization-, Bulletin of National Institute of Technology, Yuge College, Vol. 36(2014), pp.79-82(in Japanese).
- Maeda, H., Ito, Y., Sasaki, T. and Goto, M., Research and development about a piping inspection robot -Report2:Prototype design for maintenance improvement-, Bulletin of National Institute of Technology, Yuge College, Vol. 37(2015), pp.75-79(in Japanese).
- Nassiraei, A. A. F., Kawamura, Y., Ahrary, A., Mikuriya, Y. and Ishii, K., Concept and design of a fully autonomous sewer pipe inspection mobile robot "KANTARO", IEEE International Conference on Robotics and Automation(2007), pp.4088-4093.
- Ninomiya, A., Fujita, K., Sasaki, T., Goto, M. and Maeda, H., Prototype design for a piping inspection robot, 43rd Graduation Research Presentation Lecture of Student Members of the JSME(2013), 716(in Japanese).
- Rome, E., Hertzberg, J., Kirchner, F., Licht, U. and Christaller, T., Towards Autonomous Sewer Robots: the MAKRO Project, Urban Water, Vol. 1(1999), pp. 57-70.
- Streich, H. and Adria, O., Software approach for the autonomous inspection robot MAKRO, in Proceedings of the 2004 IEEE International Conference Robotics and Automation(2004), pp. 3411-3416.
- Uchida, H. and Ishii, K., Basic research on crack detection for sewer pipe inspection robot using image processing, Proceedings of the 2009 JSME Conference on Robotics and Mechatronics(2009), 1A1-C02(in Japanese).