

氏名	^{アフラリ} Ahrary ^{アリレザ} Alireza
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	生工博甲第58号
学位授与の日付	平成19年3月23日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	自律型検査ロボットのビジョンシステムに関する研究
論文審査委員	主査 教授 粟生 修 司 " 石 川 眞 澄 " 永 松 正 博 " 林 初 男 " 山 川 烈

学位論文内容の要旨

Pipe walls in sewer systems are prone to be damaged due to aging, traffic and chemical reactions, through which inflow such as rainwater and groundwater seeps into pipe systems. Regional city government reports state that this inflow amounts to approximately 30% of the total flow. In addition to the inflow of groundwater into the sewer pipes, outflow from damaged systems also occurs, contaminating the surrounding environment.

Conventional inspection of a sewer pipe system is carried out using a cable-tethered robot with an onboard video camera system. This robot is connected to the outside of sewer system by a cable. The cable is used for energy supply, transmission of commands from a human operator to the device, data transmission back to an operator, a life-line in case the device gets stuck in the pipe, and measuring the distance traveled. An operator remotely controls the movement of the robot and the video system. By this video-supported visual inspection, any notable damages or abnormalities are recorded in video stream. The reliability of this system depends on the experience of an operator. The system is also prone to human error, and tends to be time consuming and expensive. Consequently, effective autonomous robot capable of online identification and extraction of objects of interest such as cracks from sensory signals is of immediate concern.

Based on the above, we design a prototype autonomous mobile robot, KANTARO, for inspecting sewer pipes. It is able to move autonomously in 200-300mm diameter sewer pipes, to smoothly turn 90 degrees at a junction, and to go down a step. KANTARO carries all required resources such as a control unit, a camera, a 2D laser and an IR sensor. Damages or abnormalities in sewer pipes are detected based on recorded sensory data. In this thesis, I focus on an automated fault detection system, navigation system, and stereo vision system for autonomous inspection robots such as KANTARO.

Robust detection of cracks and other faults in sewer pipes based on sensory data is another important challenge. However, all related previous works focused on specific types of faults in pipes, hence were unable to detect multiple types of faults. Accordingly, a truly automated fault detection system is currently not available in the real world. I propose a method for detecting faulty areas based on images, and an automated intelligent system designed to facilitate diagnosis of faulty areas in a sewer pipes system. The system utilizes image analysis and efficient techniques for providing the location and the number of faults in a sewer pipe system. In contrast to the conventional manual system, the proposed system can automatically detect faults and move in real time. Its detection performance is 100%, when the false positive rate is 34%. This ratio is said to be acceptable for sewer inspection, and the reduction of time and cost is also realized.

Another central issue in developing an autonomous sewer robot is its navigation. Navigation of an autonomous sewer robot based on a map of sewer pipe system is not applicable as it is, because large slips in sewer pipes tend to produce erroneous odometry information, causing unreliable localization. It is to be noted that data from Global Positioning System (GPS) are not available in underground sewer pipe systems. Accordingly, an autonomous robot has to estimate the current position based on local features.

Navigation of an autonomous sewer robot is composed of the following tasks. Firstly, estimation of the current position based on salient local features such as manholes, inlets and pipe joints. Secondly, finding a path. Thirdly, following the path in the real sewer pipe system. Resulting maps of the sewer pipe system describe pipes, manholes and other local features, which contribute to localization. I propose a method for navigation of an autonomous inspection robot based on fusion of single camera images and IR sensor data. It is capable of self localization, which cannot be done by the conventional methods. We also conduct experiments for sewer robot navigation in a dry sewer test field at FAIS-RDSO, Kitakyushu. They succeed in detecting local features and show high performance of self localization by using sensory information. In addition to using a single camera in the above proposed methods, I also use a stereo camera to see the performance of stereo vision for navigation, which is described as follows.

Stereo matching is an essential issue in computer vision. Recently, many stereo matching algorithms based on segmentation, graph cuts and so on have been proposed. Because the disparities change continuously in sewer environment, these methods are not applicable to sewer systems and are computationally expensive. I propose a cooperative stereo matching algorithm using Sum of Squared Differences (SSD) and Linear Computation (LC) measures, which can be implemented in a real-time system. It is a robust algorithm for sewer inspection in robot vision. The algorithm produces an easy-to-understand distance map of the sewer, emphasizing the feature region. The computational time by this algorithm is about 1/5 compared with that by other algorithms such as the conventional SSD. In order to reduce the computational time, I also propose a fast stereo matching algorithm using interpolation. The computational time by the proposed algorithm is only 1/20 of those by the conventional algorithms such as the SSD. Hence it is suitable for our real-time sewer vision system.

The above stereo matching algorithm is utilized for proposing another method for navigation which is based on stereo camera images and laser scanner data. Experimental results of self localization show high performance in providing the appropriate distance. We also design a new mobile laser scanner for KANTARO. The locations of landmarks in sewer pipe system are estimated successfully based on measurements. The laser scanner is fast enough to continuously scan relevant pipe sections in the presence of landmarks, while the KANTARO moves at ordinary inspection speed of less than 15cm/s. Also moving the KANTARO in our sewer test field by using the proposed method is done successfully.

学位論文審査の結果の要旨

本論文は、下水道管の多種類の欠陥検出および管内のナビゲーションが行える検査ロボットを開発し、その有効性を実証することが目的である。下水道システムは時間による劣化や交通・化学反応などにより損傷を受け易く、検査を効率的に行いたいという社会的ニーズがある。従来はケーブルで引っ張ったロボットにビデオカメラを搭載し、オペレータがロボットの移動およびビデオシステムを遠隔操作してきたが、その性能はオペレータの経験に依存し、ヒューマンエラーがあり、時間やコストがかかる。オンラインで欠陥検出を行い、センサー信号からクラックなどの欠陥検出が可能な効率的な自律的ロボットの構築が目下の課題である。

そこでプロトタイプとして自律的下水道ロボット「管太郎」を設計した。内径 200–300mm の管内を移動し、分岐点で 90 度滑らかに回転し、段差を降りるといったことを自律的に遂行できる。管

太郎は制御ユニット、カメラ、2次元レーザー、赤外線センサーを搭載している。

下水道管のクラックや他の欠陥をセンサー信号に基づいてロボストに検出することは重要な課題である。従来は特定のタイプの欠陥のみを対象としてきたおり、複数タイプの欠陥を扱うことが出来なかった。本論文では、画像に基づいた欠陥領域を検出する方法、およびこの領域を診断できる自律的な知的システムを提案する。このシステムは画像解析および下水道パイプ中の欠陥の場所と個数を効率的に求める手法を用いる。従来法とは対照的に、実時間で欠陥検出を自動的に行うことができ、実験の結果、第一種の過誤が34%の場合、第二種の過誤を0%にすることが可能であることが分かった。

もう一つの課題は下水道管の中のナビゲーションであり、管内の大きな滑りがオドメトリ情報の誤差を大きくし、得られた位置の信頼性を低下させる。従って自律的ロボットが局所特徴に基づいて現在位置を知る必要がある。

自律下水道ロボットのナビゲーションは、第一にマンホール、水の流入口、パイプ接続部などの目立つ局所特徴に基づいて現在位置を推定すること、第二に進むべき径路を見つけること、第三にこの径路に沿って進むことから構成される。ここではカメラと赤外線センサーの統合に基づくナビゲーション法を提案する。これにより従来法では不可能であった自己位置推定を可能にする。

実験的に構築した乾燥した下水道システムを用いた実験を行い、センサー情報に基づいて局所特徴を検出することに成功した。この実験結果に基づいて、単眼カメラと赤外線センサーにより欠陥検出とナビゲーションが可能であることを実証した。ステレオカメラとレーザスキャナを併用した実験も行ったが、さらに良い性能は得られなかったので、単眼カメラと赤外線センサーで十分であることが判明した。

実際の下水道に適用する際の一日に処理できる下水道の長さや単位距離あたりのコストを試算し、いずれも現状と比較して相当程度の性能向上が見られることを確認した。

以上のように、本論文は下水道の欠陥検出およびナビゲーションを行う自律移動ロボットを設計し、その有効性をさまざまな角度から実証し、現実的な有効性を明らかにすることに成功しており、欠陥検出および移動ロボットの分野に寄与するところが大きい。本論文に関し、論文調査員および公聴会出席者から、画像処理用フィルタの選択基準、フィルタが有すべき性能、カメラシステム、画像処理時の閾値の環境依存性、画像処理で用いたハフ変換、パノラマ画像の役割などに関する質問が出されたが、いずれも著者の的確な説明により質問者の理解が得られた。

以上により、論文調査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が博士（工学）の学位に十分値するものであると判断した。