

文章编号: 1671-6612 (2010) 04-133-05

基于视觉的机器人在管道检测中的远程控制研究

陈应松¹ 周 瑜²

(1. 成都电子机械高等专科学校机电系 成都 610031;
2. 重庆铁马工业集团有限公司军品设计研究所 重庆 400050)

【摘 要】 研究了在管道环境下, 基于视觉的机器人管内运动导航问题。提出了一种机器人管道内的视觉导航策略, 研究了障碍物识别、弯道识别关键技术; 根据管道检测机器人系统的特点, 设计了基于 C/S 模型的网络实时视频传输系统, 采用 MPEG4 视频编码器对图像进行编解码。实验显示所研制的系统不仅能保证机器人图像传输的实时性, 而且能实现多信息的同步。

【关键词】 机器视觉; 管道机器人; 运动导航; 同步技术

中图分类号 TP302 文献标识码 A

Research Remote Control based on Robot Vision in Pipeline Inspection

Chen Yingsong¹ Zhouyu²

(1. Department of electro_mechanism Chengdu Electromechanical College, Chengdu, 610031;
2. Chongqing TieMa Industries Corporation Military Products Design Research Institute, Chongqing, 610031)

【Abstract】 In order to improve the intelligent level of pipe inspection robot, the motion navigation based on robot vision in pipe environment are investigated. A visual navigation strategy in pipeline and the key technology of the obstacles and elbow pipe identified are proposed. According to the actual demand of pipeline inspection robotic system, a new of network real-time video transmission system based on C/S model was designed, which uses MPEG4 video encoder to compress and decompress the digital image. Experiment shows that the system can not only guarantee real-time transmission but also realize the synchronization of multi-information.

【Keywords】 robot Vision; pipeline inspection robot; motion navigation; synchronous technology

0 引言

管道是工业、能源、军事装备、城市建筑等领域中使用广泛的物料运输手段, 城市污水、天然气和工业物料运输、给排水和建筑物的通风系统等, 均使用大量复杂隐蔽的管道。保障这些管道系统的安全性和有效性至关重要。但是随着使用年限的增加, 管道不可避免地会出现老化、裂缝、腐蚀或者受到外来施工的破坏。如果不及时处理, 一旦发生事故不但给国家带来巨大的经济损失, 对环境也会造成严重的污染^[1]。因此, 定期对管道进行勘察和维护, 就显得非常必要。为提高管道的寿命, 就必须对管道进行有效的检测维护, 管道检测机器人作为

满足该需要而产生。管道检测机器人是针对油、气等输送管道的检测、喷涂、接口焊接、异物清理等维护检修作业所研制的一种特种机器人, 它能进入人所不及、复杂多变的非结构管道环境中, 通过携带的无损检测装置和作业装置, 对工作中的油气管道进行在线检测、清理、维护, 以保障管道的安全和畅通无阻地工作。

管道检测机器人是集无损检测技术、机器人控制技术、计算机技术、数据分析和处理等多项技术于一体的实用化工程。国外关于管道检测机器人的研究始于 20 世纪四十年代, 90 年代初得到了迅猛发展。日本 Osaka 煤气公司的 Y.Kawaguchi 研制的

作者简介: 陈应松 (1971-), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向机器人视觉控制。
收稿日期: 2010-03-09

管道检测机器人系统携带彩色摄像头,并通过棱镜改变成像方向,采用光纤进行通信,可以检测管径为 $\Phi 200\text{mm}$ 的铁管。日本横滨国立大学研制的用于检测污水排放管道的机器人^[2],采用视觉伺服定位方式。德国 Bernhard Klaassen 等人研制的多关节蠕虫式管道检测机器人系统 MAKRO。美国纽约煤气集团公司开发的长距离、无缆方式的管道检测机器人系统 EXPLORER。近些年来,国内管道机器人的研究也取得了快速发展,具代表性的有哈尔滨工业大学研制的管道探伤与喷涂机器人^[3],上海交通大学研制的履带式管道机器人^[4],以及清华大学研制的管道清淤机器人^[5]等。

人力很难进入管道环境,视觉对管道检测机器人具有重要意义,利用视觉,可以识别管内环境、识别机器人的姿态(是否有转体,相对于作业位置的距离等),从而进行自主导航控制。同时,机器人不仅需要能自主导航,同时也要通过网络来进行远程控制。管道检测机器人系统是一个网络化的控制系统,包括作业机器人和机器人工作站形成的局域网控制系统,通过网络进行观察和控制。本文阐述了在管道环境下,基于视觉的机器人管内运动导航技术问题,设计了一种新型的、基于网络的管道检测机器人远程信息交换结构,对机器人的远程控制提供底层支持。

1 整体结构

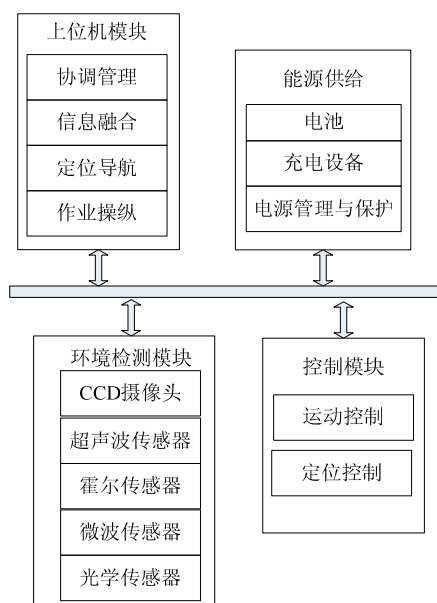


图1 管道机器人总体结构图

管道机器人系统由四部分组成:管道机器人行走装置、作业操纵装置、机器人控制系统和通信系统。结构上采用上下位机的形式,包括如图1所示的四个功能模块:上位机模块、感知检测模块、控制模块和电源模块。

2 管道机器人的视觉系统

管道机器人系统装备有高分辨率彩色摄像头、光学传感器、超声波传感器、微波传感器,以实现管道无损检测。采用机器视觉技术可以有效地克服现有传感器的不足,对各个传感器的信息进行融合,有利于提高其控制性能和自主能力。摄像头可 360° 全方位的旋转,能方便地获取、传输、存储管道内的视频数据,作为分析判断管道内壁腐蚀状况、几何形状异常、堵塞、断裂、泄漏的重要依据,并可利用机器人自身精确的定位系统对缺陷进行定位,通过携带的检测装置对关键部位实施进一步的定量检测。

2.1 视觉导航策略

管道检测机器人视觉系统类似于人类视觉系统的感觉机构,能够以智能和灵活的方式对其周围环境做出反应,并结合应用目标完成具体任务。管道机器人在管道内运动时,希望机器人遇到前方有障碍物时,能通过视觉系统自动识别障碍物;进入弯道前,能提前识别弯道,并采取相应的运动速度协调控制;遇到“T”型管道时,能根据设定的任务,实现自动转向控制。策略图如图2所示。

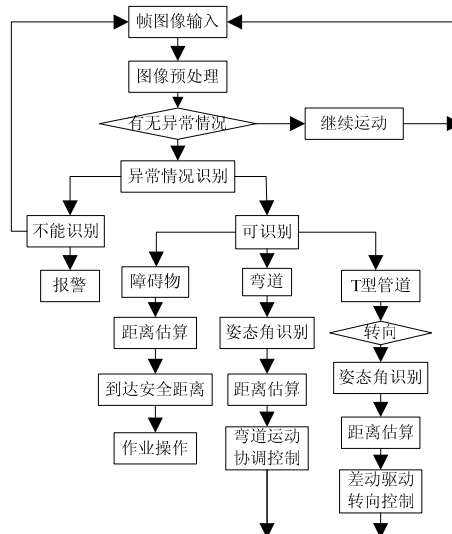


图2 视觉导航策略图

2.2 照明

因为管道是封闭的,管道内本身没有环境光源,机器人进入管道后,为了观察管道的内部情况,获取视频图像,需要配置照明系统。照明是影响视觉系统输入图像质量及视觉算法的重要因素。本文采用荧光灯作为光源,这是一种单一光源的照射方式,类似点光源,可以使管道内壁在整个圆周方向照射均匀。由于照射角度的设置,在机器人摄像机位置观察到的前方管道内壁表面面元的反射光线是漫反射,漫反射使管道内壁表面面元在所有方向得到均匀的反射光线,从不同方向观察,表面面元具有同样的亮度,这对图像成像是有利的,获得的管道内表面图像清晰、柔和。

对于同一个光源,反射光强度与入射光强度成正比,同一材料的表面面元可以认为具有相同的反射率。根据光学原理,当照明系统光源的强度一定时,光能到达管道内壁表面的强度与表面离光源的距离的平方成反比。可见,随着管道内壁表面面元到光源距离的增加,其漫反射光强度将减弱,表面亮度变小,直至变暗看不清楚。因此,可以根据漫反射强度的不同程度将管道内壁表面面元大致分为明区、灰区、暗区三个区域,可选用不同的阈值表示。如图3所示。

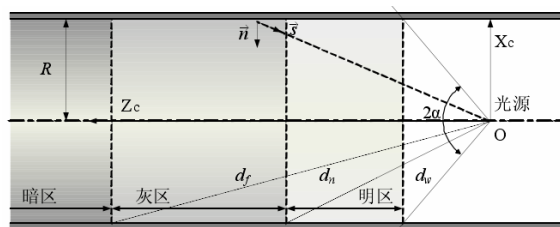


图3 管道内壁光照区图

2.3 图像预处理

管道机器人的场景是动态的,图像采集时往往会产生环境噪声,加上图像在采集、转换、传输中还会受到成像设备的影响,因此在检测前要对图像进行去噪处理。系统采用基于小波变化的阈值化方法对序列图像进行去噪处理。对小波变化域系数进行筛选是小波阈值化去噪的关键,小波系统的筛选主要依赖于阈值化和阈值的选取。基于小波变换的阈值化去噪方法如下:

- (1) 计算初始小波变换系数 w 。
- (2) 计算每一层小波系数的阈值 δ_j 。

如果阈值太小,去噪后的信号仍然有噪声存

在;相反阈值太大,重要图像特征将被滤掉,引起偏差。系统采用文献[6]的算法,阈值与噪声的方差成正比,其计算公式为:

$$\delta_j = \sqrt{2 \log N_j} \sigma_j \quad (1)$$

式中, σ_j 为第 j 层噪声的方差。

(3) 计算新的小波系数 W_δ 。

小波系数选取采用“软阈值化”,绝对值小于阈值 δ 的小波系数,被划分为噪声,数值用零代替;绝对值大于阈值 δ 的小波系数数值用 δ 来缩减。

$$W_\delta = \begin{cases} \text{sgn}(W)(|W| - \delta), & |W| \geq \delta \\ 0, & |W| < \delta \end{cases} \quad (2)$$

$\text{sgn}()$ 是符合函数,当数值大于零,符号为正;反之,符号为负。

(4) 计算小波逆变换,完成目标场景的去噪。

2.4 障碍物的识别

如果可能有障碍物进入机器人视野时,由于光照角度,障碍物表面明显比暗区和灰区的数学期望图像的像素平均灰度亮,利用灰度阈值对障碍物进行区域分割,系统采用帧间差分法,帧间差分法直接比较相邻两帧对应像素点的灰度值,差分图像的定义式为:

$$f_d(x, y, t_1, t_2) = f(x, y, t_2) - f(x, y, t_1) \quad (3)$$

再对差分图像进行阈值处理,可以减小一些微小运动的干扰,保留图像中具有显著变化的区域。定义如下:

$$f_{out}(x, y, t) = \begin{cases} 1, & f_d > T \\ 0, & f_d = T \\ -1, & f_d < T \end{cases} \quad (4)$$

确定了障碍物后,需要进一步估算障碍物的距离。管道的空间结构及其与视觉坐标系的相对位置是已知的,可以在估算障碍物距离的视觉定位中加以利用。

2.5 弯道的识别

当判断可能有管道进入机器人视野时,需要进一步对弯道进行确认。对比图4中没有弯道和图5存在弯道的图像差别,可以看出,由于弯道曲率造成光照角度的变化,有弯道的图像中央整体变亮,暗区已明显退化,在靠近弯道方位的一侧,有明显的圆弧阴影轮廓线。因此,可以利用这一特征来对弯道进行识别。首先测试暗区范围内的所有像素的平均灰度值,如果大于设定的阈值,则进行图像分割,提取圆弧阴影轮廓线,并计算机器人与管道平

面之间的相对姿态角,预估到达弯道的距离。如果小于设定的阈值,则转入障碍物的识别处理,阈值可以通过实验确定。通过灰度阈值对图像进行分割,可以将物体域及背景二值化,1 为物体,0 为背景。根据实验数据,图像分割的灰度阈值取为 30-40 之间,小于分割阈值的属于物体域 M ,大于分割阈值的为背景域 M 。对分割后的图像进行形态学闭运算,并取中轴变换,进行骨骼化处理。通过分析,识别出弯道,当机器人到达弯道时,就可以运用机器人通过弯道的运动速度协调控制使机器人顺利通过弯道。

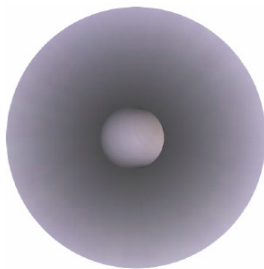


图 4 没有弯道

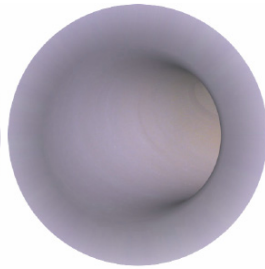


图 5 有弯道

3 基于网络的远程控制

管道检测机器人系统是一个网络化的远程控制系统。机器人与地面工作站组成局域网,地面工作人员通过网络来远程监测、控制机器人的运动和检测作业。管道检测机器人远程控制结构包括底层控制和高层控制。底层控制由硬件和软件模块组成,包括传感器、执行机构及信息交换系统,是机器人远程控制的基础。本文介绍一种基于 C/S 模型的网络信息传输系统,该系统在服务器方和本地客户方均采用了多线程模式,将视频捕获压缩、传输、解压缩、灯模块分配在不同的线程中运行,以提高传输速率和效率。

3.1 视频图像传输

管道检测机器人系统,检测作业由机器人在地下管道内进行,对机器人实施远程监测、控制是通过地面工作站进行的。因此,本实验系统的通讯主要是地面和管道内信息之间的交换,为了实时显示管内的视频图像,本系统实现了基于网络的视频图像传输。在基于 Windows XP 平台的 VisualC++6.0 编程环境下,利用 Socket 网络通信接口分别实现了服务器端和客户端的应用程序。服务器端的主线程利用 CCD 彩色摄像机输入视频信号到图像采集

卡,负责采集视频数据,用 Socket 建立和客户端的连接,并将数据传送出去,同时开启一个预览窗口,便于操作人员控制。客户端负责用 Socket 和服务器连接,接收服务器传送过来的视频信号,解码并实时播放,同时开启另一个线程负责图像检测、管内检测等。

3.2 服务器端

服务端安装在管道机器人本体的嵌入式系统中,服务器系统启动之后就建立一个 Socket,一旦检测到客户端发过来的网络连接,就与客户端建立连接,此后如果接收到客户端传送请求,就开启一个传送线程将数据压缩打包传送给客户端,同时开启另一个线程把采集压缩后的数据在本地回放。如果尚未开始采集数据,那么将暂停发送。操作者点击传送按钮之后,系统就开始获取视频数据,此时数据的传输正式开始。

服务器端采用了双缓冲技术,每个缓冲区对应一个线程,每个线程处理不同的事情。一个线程负责从图像采集卡缓存中取出视频数据,将其压缩后放入缓冲区;另一个线程是 Socket 通信线程,负责从缓冲区中读出压缩的视频数据,发送给客户端,然后释放内存空间交由采集和压缩线程存放后续数据。

3.3 客户端

客户端安装在地面控制站的工控计算机中,在客户端,完成图像数据的接收和回放,同时接收服务器另一台计算机传输的各检测参数,并与图像信息协调,在同一界面中显示。实现图像延时,既可以在服务器端也可以在客户端。在服务器端,可以先设定延时时间,等待到达延时时间再将数据包从发送缓冲区取出、发送。在客户端,待等待时间到达后,再从接收缓冲区把数据取出、回放。考虑到图像信息和其他信息显示要协调在同一台客户计算机上,因此,为接收数据方便,采用在客户端延时显示的方法,对接收到的帧进行计数,待帧数达到延时时间再显示图像。

3.4 TCP 协议和 UDP 协议的联合使用

基于 Socket 的 Client / Server 模式的应用设计有两种通讯服务类型:一种是面向连接的 TCP 协议,另一种是无连接的 UDP 协议。管道机器人控制命令的传输要求是可靠、准确、及时,而命令本身占用极小的网络带宽。鉴于命令传输的特点,为

了保证控制命令的正确传输,采用面向连接的 TCP 来设计客户机和服务器之间的命令传输协议。而实时图像的传输不同于传统的下载整个文件后播放的方法,它要求图像的实时传输和实时播放,要求服务器发送稳定的图像数据流,客户方一边接收数据一边恒速的播放,因此采用无连接的 UDP 协议实现,服务器数据的获取是通过 CCD 摄像机获得机器人作业现场的图像,经由视频采集卡,将图像转化为 24 位的帧彩色位图图像,然后将图像送入视频编解码器,对图像进行压缩。

4 性能测试系统实验

管道检测机器人实验系统主要由二部分组成,一是运行在管道内的机器人本体,二是监控机器人工作状况的地面工作站。根据现有的实验系统和有关的实验条件对管道检测机器人进行了相关的实验。实验结果表明,采用 Microsoft VisualC++6.0 编写的服务器端和客户端软件在 WindowXP 下运行良好,传送 640×480 的图像速度能达到 10s 以上,同一帧图像从在服务器端捕捉到客户端回放之间的时间延时为 $100\text{ms} \sim 120\text{ms}$ 。可以胜任实时传输管道内的视频图像信息及控制信号的任务,地面机动控制站监视器上的图像清晰、失真小;控制灵活可靠,实时性好;机器人在管道中的运动平稳,能有效地识别障碍物及弯道的识别,能够协调控制并实现转向。

5 结束语

本文研究了在管道环境下,基于视觉的机器人管内运动导航问题。根据管道环境中的光照模型和成像特点,提出了一种机器人管道内的视觉导航策略,研究了障碍物识别、弯道识别等关键技术问题。根据管道检测机器人系统的特点,设计了基于网络的管道检测机器人远程信息交换系统,对机器人的远程控制提供底层支持,系统基于 C/S 模型的网络实时视频传输系统,采用 MPEG4 视频编码器对图

像进行编解码,并实现了图像和检测信息的同步,获得较好的图像质量。但要建立较为完善的,适应复杂管道环境的管道检测机器人还任重道远,是下一步的研究工作。

参考文献:

- [1] 甘晓明,徐滨士,董世运.管道机器人的发展现状[J].机器人技术与运用,2003,22(6):5-10.
- [2] M DEPINNA, R D OWEN, B SIMON. High energy X-ray inspection services for in-service NDE of flexible riser piping[C]. Proceedings of the 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Canada: Vancouver, BC, 2004:1079-1096.
- [3] 邓宗全,李金彪.野外大口径管道焊缝 X 射线检测机器人[J].哈尔滨工业大学学报,1997,29(1):47-48.
- [4] 吕恬生,宋钮,沈海东.履带式管道机器人的自适应模糊控制[J].上海交通大学学报,1997,31(9):68-71.
- [5] 孙建宇,杨向东,汪劲松,等.新型下水管道自动清淤机器人[J].给水排水,1997,23(3):54-55.
- [6] 姬江涛,王建中.基于机器视觉的机器人武器目标跟踪系统[J].机器人技术,2008,24(1):238-239.
- [7] 张云伟.煤气管道检测机器人系统及其运动控制[D].上海:上海交通大学,2007.
- [8] 孙浩,王程,王润生.基于多传感器融合的运动平台运动目标检测[J].计算机应用,2008,28(4):973-975.
- [9] 陈卫东,张飞.移动机器人的同步定位与地图创建研究进展[J].控制理论与应用,2005,22(3):455-459.
- [10] R Madhavan, H F Durrant-Whyte. 2D map-building and localization in outdoor environments[J].Journal of Robotics Systems, 2005,22(1):45-63.
- [11] 李鹏,马书根,李斌,王越超.具有自适应能力管道机器人的设计与运动分析.机械工程学报,2009,45(1):154-161.
- [12] 蔡自兴,贺汉根,陈虹.未知环境中移动机器人导航控制研究的若干问题[J].控制与决策,2002,17(4):385-390.
- [13] 羊劲松,郭毓.网络环境下的机器人遥操作研究[D].南京:南京理工大学,2004.