

基于路径识别的移动机器人视觉导航

张海波 原 魁 周庆瑞

(中国科学院自动化研究所高新技术创新中心, 北京 100080)

摘 要 跟随路径导引是自主式移动机器人广泛采用的一种导航方式,其中视觉导航具有其他传感器导航方式所无法比拟的优点,是移动机器人智能导航的主要发展方向。为了提高移动机器人视觉导航的实时性和准确性,提出了一个基于路径识别的视觉导航系统,其基本思想是首先用基于变分辨率的采样二值化和形态学去噪方法从原始场景图像中提取出目标支持点集,然后用一种改进的哈夫变化检测出场景中的路径,最后由路径跟踪模块分直行和转弯两种情况进行导航计算。实验结果表明,该视觉导航系统具有较好的实时性和准确性。

关键词 自主式移动机器人 视觉导航 路径识别

中图法分类号: TP242.62 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2004)07-0853-05

Visual Navigation of a Mobile Robot Based on Path Recognition

ZHANG Hai-bo, YUAN Kui, ZHOU Qing-rui

(Hi-tech Innovation Centre, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract Guidance using path following is widely applied in the field of autonomous mobile robots. Compared with the navigation system without vision, visual navigation has obvious advantages as rich information, low cost, quietness, innocuity, etc. This paper describes a navigation system which uses the visual information provided by guide lines and color signs. In our approach, the visual navigation is composed of three main modules: image-preprocessing, path-recognition and path-tracking. First, image-preprocessing module formulates color models of all kinds of objects, and establishes each object's support through adaptive subsampling-based binarization and mathematical morphology. Second, path-recognition module detects the guide lines through an improved Hough transform algorithm, and the detected results including guide lines and color signs integrate the path information. Finally, calling different functions according to the movement of straight-going or turning, path-tracking module provides required input parameters to motor controller and steering controller. The experimental results demonstrate the effectiveness and the robustness of our approach.

Keywords computer perception, autonomous mobile robot, visual navigation, path recognition

1 引 言

导航技术是移动机器人的一项核心技术,其难度远远超出人们最初的设想,其主要原因有:一是环境的动态变化和不可预测;二是机器人感知手段的不完备,即很多情况下传感器给出的数据是不完全、不连续、不可靠的^[1]。这些原因使得机器人系统在复杂度、成本和可靠性方面很难满足要求。

目前广泛应用的一种导航方式是“跟随路径导引”,即机器人通过对能敏感到的某些外部的连续路径参照线作出相应反应来进行导航^[2]。这种方法和传统的“硬”自动化相比大大增加了系统的灵活性,其具有代表性的系统有:Control Engineering 公司安装的导线引导系统,它是通过检测埋在地下的引导导线来控制行进方向,其线路分岔则通过在导线上加载不同频率的电流来实现^[3];Egemin Automation 公司生产的 Mailmobile 机器人则安装

有主动式紫外光源,并通过 3 个光电探头来跟随由受激化学物质构成的发光引导路径^[4];Macome 公司为自动驾驶车辆则开发了一种磁引导单元,它是通过磁通门传感器检测磁带来进行车辆导航^[5]。从导航的观点来讲,这些引导方法的优点在于不会迷路,但是最大的缺点是功能单一,无法在行进的同时完成目标识别、绕过障碍等其他行为,而且,在安装维护成本、灵活性、抗干扰能力等方面与用户的期望尚有距离,从而限制了机器人产品的推广使用。

视觉方法是近年发展起来的一种先进导航方法,其和非视觉类传感器相比,视觉传感器具无噪声、无有害影响、信息量大等特点。在实际应用中,只需在路面上画出路径引导线,机器人就可以通过视觉导航系统来控制自身行走。相对于埋设导线、磁条,安装发光带等方法而言,这种方法进一步增强了系统的灵活性,并且降低了成本。为识别引导路径,Ishikawa 采用了一种状态转移算法,并利用了系统中事先存储的 110 种不同的场景模式^[6];Beccari 还采用了一组特定的模板来检测不同的转弯路口^[7]。但是这些方法都有以下共同的缺陷:其一是为了提高视觉处理速度,检测方法不同程度依赖于确定的场景模式或模板,这样当机器人在运动过程中出现较大的偏差时,几乎不可能再回到正确路径上来;二是在检测目标时,仅考虑了当前帧场景图像,而没有充分利用以前目标识别的信息,从而在实时性和准确性两方面都会受到影响。

笔者研制开发了一个视觉导航系统,它是通过识别路径引导线和标志信息来为移动机器人提供视觉导航。由于只采用了单目视觉传感器,因此系统的成本和复杂度都得到了降低。为了使之真正做到稳健快速,在图像预处理、路径识别和路径跟踪等各个环节都充分考虑到算法的实时性与鲁棒性(见主要算法描述)。

2 软件流程

视觉导航系统软件由图像预处理、路径识别和路径跟踪 3 个主要模块组成,其工作流程如图 1 所示。

机器人视觉系统的原始输入图像是经图像采集卡 A/D(模拟量/数字量)转换之后得到的连续数字图像。系统工作时,首先,图像预处理模块对原始输入图像以合适的分辨率和分割阈值挑选出对机器人有用的各类目标点(包括路径中的引导线、转弯标

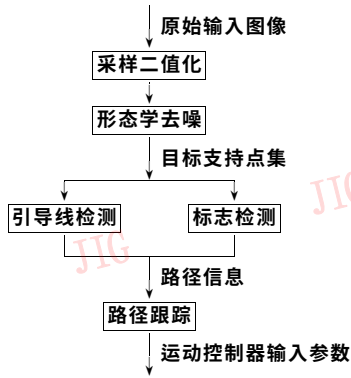


图 1 视觉导航工作流程图

志、目的地标志等),并剔除其中的噪声点,而这些点的集合则构成目标的支持点集(support);然后,路径识别模块根据目标支持点集来检测场景中的引导线和各类标志,而引导线和标志综合起来就可以得到所需的路径信息;最后,路径跟踪模块根据路径识别模块所提供的路径信息,分直行和转弯两类情况调用不同的计算模块来为移动平台的运动控制系统提供输入参数。

3 主要算法描述

快速、稳定、准确是移动机器人视觉导航的目标,为实现该目标,本文充分利用了图像序列信息,并且摒弃了过于复杂的处理算法,提出了一种基于路径的改进算法。改进后的算法在准确理解道路图像的前提下,每帧图像的处理时间不超过 40ms,可以满足系统实时性的要求(25 帧/s)。

3.1 图像预处理

3.1.1 彩色图像二值化

对彩色图像进行二值化处理,不仅可以减少目标识别的计算量,还可以降低识别复杂度。本系统中原始输入图像为(384×288)像素的 YUV 格式图像^[8],显然,如果对所有 110 592 个像素点都进行二值化处理,在运算时间上是一笔不小的开销。为此,笔者采用了如下一种基于变分辨率的智能采样方法:

(1)在初始化阶段,即不具备目标的先验知识时,以一种较低的分辨率对整幅图像中的像素点进行采样,并首先选出 $N \times M$ 个像素点作为目标候选采样点;

(2)进入目标稳定跟踪阶段后,再根据目标上一时刻在图像中的位置和大小设置搜索子窗口。由于窗口内采样的分辨率可以随窗口尺寸自动变化,因

此可以在不至于丢失目标的前提下选择足够低的分辨率,以减少处理时间;

(3)当目标或者机器人的运动发生突然变化时,则有可能在搜索窗口内丢失目标,这时可以返回步骤 1 重新进行全局搜索。

上述步骤 3 虽会降低图像处理的效率,但是由于这种情形出现的概率很小,因此这种采样方法仍然节约了大量的处理时间。

接下来再对采样点进行二值化处理。由于成像质量的原因,图像中存在很多孤立的噪声点,它们有可能正好被抽取作为目标候选采样点,因此如果直接对这些采样点进行阈值分割,则结果并不理想。为了减少这类噪声的干扰,对于每一个候选点 (i, j) ,可选取一个 2×2 的邻域内的 4 个像素点 (i, j) 、 $(i, j+1)$ 、 $(i+1, j)$ 和 $(i+1, j+1)$ 分别进行颜色阈值判定,如果在该候选点的邻域中被判定为目标点的像素总数超过某一设定值,则判定该候选点为目标点。

3.1.2 数学形态学去噪

多数情况下得到的二值化图像,往往在目标内部有一些噪声孔,并且在目标周围有一些噪声块,而将二值形态学中的开启和闭合算法结合起来则可以构成有效的噪声滤除器^[9]。

开启和闭合是膨胀和腐蚀按不同次序的组合运算。膨胀可以定义为

$$A \oplus S = \{x | [(\hat{S})_x \cap A] \neq \emptyset\} \quad (1)$$

其中, A 为待膨胀的图像, S 为用来膨胀 A 的结构元素。膨胀操作的基本作用是扩张原图像区域,这样如果图像中有空洞,则将被缩小。腐蚀可以定义为

$$A \ominus S = \{x | [(S)_x \subseteq A]\} \quad (2)$$

腐蚀操作的基本作用是收缩原图像区域,并且扩大图像中的空洞。

闭合的定义为

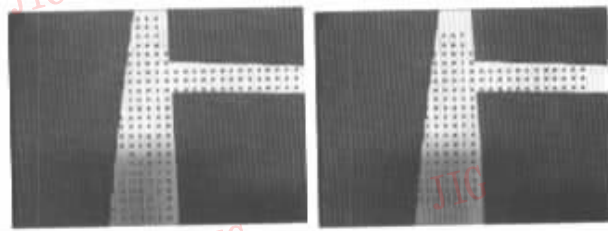
$$A \bullet S = (A \oplus S) \ominus S \quad (3)$$

开启的定义为

$$B \circ S = (B \ominus S) \oplus S \quad (4)$$

而整个去噪过程可由一次闭合和开启串行结合运算来完成。

图 2(a)是一幅采样二值化后的图像,由于阴影和反光的影响,在目标区域的内外均存在噪声,从图 2(b)可以看出,用闭合、开启相结合的形态学方法处理后,噪声已很好地被滤除掉了,可以满足下一步识别的要求。



(a)噪声滤除前图像

(b)噪声滤除后图像

图 2 噪声滤除示例

3.2 引导线检测

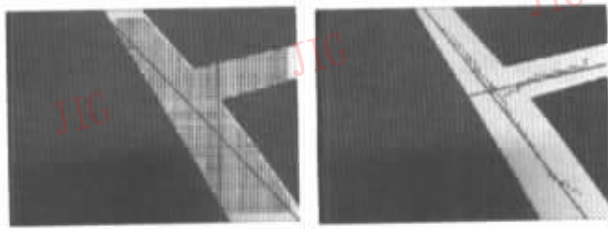
众所周知,哈夫变换是常用的直线目标提取方法,其检测直线的基本原理是利用点-线的对偶性来对目标点进行共线统计^[10]。设直线的极坐标方程为

$$\lambda = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (5)$$

然后在参数空间中建立累加数组 $C(\theta, \lambda)$,让 θ 取遍所有可能的值,并根据式(5)算出所对应的 λ ,再根据 θ 和 λ 的值(取整后)对累加数组 C 累加,最后 C 的数值即为共线点的个数。

为了正确快速地检测引导线,本系统在应用哈夫变换时,从以下两个方面进行了改进:

(1)细化预处理。由于机器人的视野中经常会出现不止一条引导线的情景,因此直接应用上述哈夫变换方法往往会出现错误的结果,如图 3(a)所示。由于出现这种误检的原因在于引导线的宽度,所以在做哈夫变换之前应先对目标进行快速细化处理。结果表明,细化处理可以消除这种误检(如图 3(b)所示)。



(a)直接哈夫变换检测结果

(b)细化预处理后检测结果

图 3 引导线检测示例

(2)参数区间选择。在稳定跟踪阶段,还需根据目标直线在上一帧图像中的参数和容许偏差值来选择 θ 和 λ 的取值区间。这种做法一方面可以大大节省运算量,提高计算效率,另一方面只在目标可能出现的局部范围内进行检测,还可以完全不受场景中其他地方干扰的影响。

3.3 路径跟踪

路径跟踪分为直行和转弯两个模块,其算法的基本思想是:当机器人视野中只有一条主引导线时,

运行直行模块,以便使机器人沿该引导线前行。当视野中出现转弯路口时,则根据识别的路径信息启动转弯模块,直到视野中又出现新的主引导线时,才重新转入直行模块。

直行模块的功能是用于主引导线跟踪。在每一个步长的开始时刻,机器人的偏差包括侧向偏差 $\epsilon_0(\text{mm})$ 和方向偏差 $\beta_0(^{\circ})$,这样可以采用以下一个三次曲线模型作为侧向偏差的变化模型:

$$\epsilon(s)=\frac{2\epsilon_0+\beta_0L}{L^3}s^3-\frac{3\epsilon_0+2\beta_0L}{L^2}s^2+\beta_0s+\epsilon_0 \quad (6)$$

其中, s 为机器人质心前行距离, L 为机器人质心到摄像头视野中心的水平距离, $s\in[0,L]$ 。

图 4 给出在 4 组不同的初始侧向偏差和方向偏差下,期望的侧向偏差变化曲线。

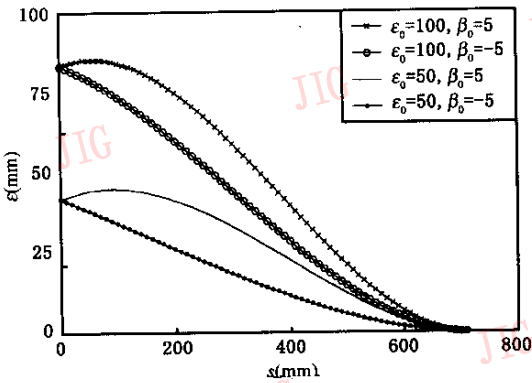


图 4 侧向偏差期望曲线

转弯模块采用场景模式监测的方法来避免复杂的计算^[11]。当机器人转弯时,视野中的场景不仅可以发生连续的变化,而且,对于同一类型的转弯路口和转弯动作,场景的变化方式是固定不变的。由于转弯模块建立了对应各个场景变化序列的模型,因此可以根据这些模型来控制机器人的转弯。图 5 是机器人

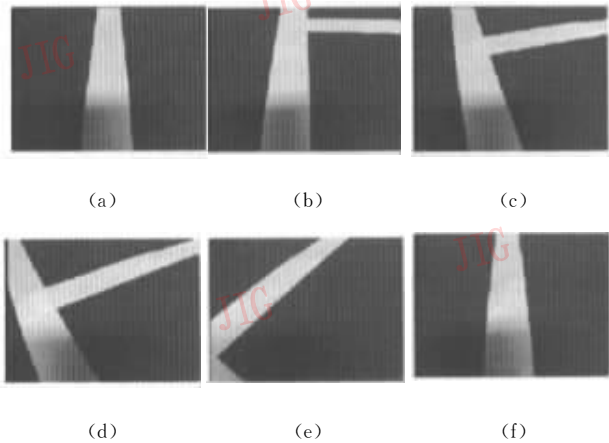


图 5 转弯时场景模式变化序列图像(从图 5(a)到图 5(f))

在丁字路口右转弯时视野中的场景变化序列图像,路径跟踪时,转弯模块能通过监测这些场景变化来修改控制参数,并能在转弯结束时,通过给出新的指令来转入直行模块。

4 实验结果及分析

视觉导航系统在移动机器人平台 AIMR 上进行了实验,该平台最大运动速度为 2m/s,实验中,视觉云台应保持静止,摄像头视野中心到机器人质心的水平距离为 713mm。图像处理系统为 667M 处理器,算法在 Visual C++6.0 编译环境中实现。

机器人导航实验场地如图 6 所示。场地中铺设了宽 1m 的绿色道路,道路中央有 10cm 宽的白色引导线。为检验系统的路径识别能力,在场地中设置了直线、拐角、丁字路口和三岔路口。此外,在需要转弯的路口放置黄色三角柱作为转弯标志,在各个目标站点设置了蓝色标牌作为调头标志。实验过程中机器人上不装载环境地图,完全根据引导线和各类标志来行走。

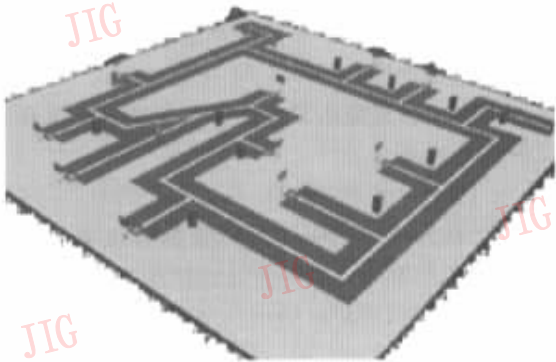


图 6 视觉导航实验场地示意图

实验开始时,首先将机器人放置在出发点道路中央处,并基本对准引导线,然后用本文算法进行机器人导航,算法在初始化阶段处理时间较长,需要大约不超过 1s 的时间。初始化成功之后进入稳定跟踪阶段,识别一幅场景仅需时约 20ms,加上上层决策系统所耗时间仍不超过 40ms,因此可以达到 25Hz 的识别频率。场地上的反光和阴影是机器人行走过程中最主要的干扰,由于系统利用了路径的历史位置和颜色信息,因此不管是在白天自然光照条件,还是晚上灯光条件下,这些干扰都能很好地被滤除。笔者通过调整转弯标志的位置进行了多次实验,机器人均能以接近最大速度运行到正确的目的地,这表

明算法的实时性和精确度能满足导航要求。另外,当道路上出现了障碍或者非常严重的干扰时(如较大面积的强烈反光、极暗的阴影等),错误检测机制还可以使机器人重新进入初始化阶段,而不会出现失去控制的局面。

5 结 论

据统计,人类六成以上的信息都是由视觉获得的,从这一意义上来说,视觉导航最接近人的导航机理,也许最终其可以使得机器人能像人类那样不依赖任何外界帮助地自由行走。

本文介绍的视觉导航系统具有很大的推广意义,在工厂、医院、办公楼等环境中,只要设立路径引导线和转弯标志,机器人便可以自主地到达目的地,并且不受障碍的影响。事实上,在很多室内环境中,大量存在可用于视觉导航的陆标,如规则的地板瓷砖、天花板网格线、踢脚板、门牌标志等。由于所用算法并不失一般性,因此该视觉系统可以通过功能扩展之后,仅靠识别这些陆标来进行导航,而不再依赖专用的路径引导线。当然,由于环境的规整化程度降低和噪声的增多,视觉导航面临的困难也会更大,因此其在复杂的动态环境和高噪声条件下是否有效、可靠,这将是下一步工作的重点。

参 考 文 献

- 1 陆新华,张桂林. 室内服务机器人导航方法研究[J]. 机器人, 2003,25(1):80~87.
- 2 中国电子学会敏感技术分会. 2001/2002 传感器与执行器大全(年卷)[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- 3 Control Engineering Company. Automated guided vehicles [EB/OL]. <http://www.controlengineeringco.com>, 2003-09-27.
- 4 Egemin Automation Inc./Bell & Howell. Robotic transport systems that fit your environment [EB/OL]. <http://www.mailmobile.com>, 2003-10-13.
- 5 Macome corporation. Magnetic tape guidance AGV sensor[EB/OL]. <http://www.macome.co.jp>, 2003-10-13.
- 6 Ishikawa Shigeki, Kuwamoto Hideki, Ozawa Shinji. Visual navigation of an autonomous vehicle using white line recognition [J]. IEEE Transactions on PAMI, 1988,10(5):743~749.

- 7 Beccari G, Caselli S, Zanichelli F, et al. Vision-based line tracking and navigation in structured environments [A]. In: Proceedings of the 1997 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation [C], Monterey, California, USA, 1997.
- 8 中国大恒(集团)有限公司. 大恒图像系列板卡用户手册[EB/OL]. <http://www.daheng-image.com>, 2002-03-27.
- 9 ZHANG Hai-bo, YUAN Kui, LIU Jin-dong. A fast and robust vision system for autonomous mobile robots [A]. In: IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing [C], Changsha, China, 2003.
- 10 章毓晋. 图像处理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,1999:187~190
- 11 Vassallo Raquel Frizera, Schneebeli Hans Jorg, Victor Jose Santos. Visual navigation: combining visual servoing and appearance based methods [A]. In: 6th International Symposium on Intelligent Robotic Systems [C], Edinburgh, Scotland, 1998.



张海波 1974 年生,1997 年获得国防科学技术大学硕士学位,现为中国科学院自动化研究所博士研究生。主要研究方向为机器视觉、图像处理以及智能机器人。

E-mail:haibo.zhang@sina.com



原 魁 1957 年生,1982 至 1988 年在日本九州大学先后获工学硕士和工学博士学位。现为中科院自动化所研究员,博士生导师,国家“863”计划智能机器人主题专家组成员,国家科技进步奖评审组成员,人工智能学会智能机器人学会理事。主要研究方向为智能机器人、智能传感与智能信息处理技术、人机接口技术、虚拟现实技术。



周庆瑞 1971 年生,现为中国科学院自动化研究所博士研究生。主要研究方向为嵌入式视觉系统、图像处理和机器视觉。