

基于增强转移网络(ATN)的室外 移动机器人道路图像理解

李兵 张朋飞 何克忠

(清华大学计算机系智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要 道路图像理解是室外移动机器人视觉导航自动驾驶研究中的一个关键技术, 由于基于视觉导航的室外移动机器人自主驾驶时, 对实时性和鲁棒性要求很高, 因此, 为了满足室外移动机器人自主驾驶的实时性和鲁棒性要求, 将人工智能研究句法分析中的一个形式体系——增强转移网络(ATN)成功地应用于室外移动机器人的道路理解中, 进而提出了基于ATN的室外移动机器人道路图像理解算法, 该算法在统一的ATN构建思想指导下, 针对不同的道路情况, 不仅可以灵活地构建出不同的道理理解ATN网络, 还可达到本质上的统一及应用上的灵活。经实验检验, 该算法在满足系统要求的鲁棒性条件下, 具有非常高的实时性, 即能充分地满足自主移动机器人高速自主导航的需要。

关键词 增强转移网络 移动机器人 道路图像理解 视觉导航

中图分类号: TP242.62 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)03-0380-05

Road Image Recognition Based on ATN for Outdoor Mobile Robot

LI Bing, ZHANG Peng-fei, HE Ke-zhong

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract Road image recognition is a key technique for vision navigation of outdoor mobile robot. Because vision navigation of outdoor mobile robot requires good robustness and rigid time limitation for real time autonomous driving, in order to satisfy the request of good robustness and rigid time limitation, in this paper, we applied successfully Augmented Transition Networks (ATN), which is a kind of method used for sentence parsing in the artificial intelligence field, to the road image recognition of outdoor mobile robot, and proposed a road image interpretation algorithm based on the ATN. The characteristic of the ATN is, aiming at the different road condition, the algorithm can make up of different ATN, but all the ATN are constructed by the uniform construction rules. Therefore, the construction of the ATN is very flexible in application, and the essence of the ATN is coherent yet. The algorithm has good robustness and real time performance, and has been verified by the experiment that it can meet the needs for high speed autonomous vision navigation of outdoor mobile robot.

Keywords augmented transition networks(ATN), mobile robot, road image recognition, vision navigation

1 引言

移动机器人是机器人研究领域的一个重要分支, 其在智能交通系统(ITS)、空间探测、军事、生产自动化等许多领域都有广泛的应用。

因室外移动机器人的特殊应用价值及其广泛的应用前景, 世界各国都投入了大量的人力物力进行研究, 目前比较著名的实验系统有美国 CMU 大学

开发的 Navlab 系统、德国联邦国防大学的 VamoRs-P 系统、意大利帕尔马大学的 ARGONAV 系统等^[1]。

THMR-V 系统是清华大学智能移动机器人课题组于“九·五”期间自主研制和开发的新一代多功能室外智能移动机器人实验平台, 目前其具有的主要功能有结构化道路上的自动驾驶、非结构化道路上基于 GIS 的自动驾驶与避障、临场感遥控驾驶等, 其外形如图 1 所示^[2]。



图1 清华大学的 THMR-V 系统

室外移动机器人自主导航时,选择何种导航方式,一直是智能移动机器人研究中的一个探索热点,人们先后研究过磁导航、光学导航、视觉导航、超声导航、红外导航等。最近几年来,视觉导航因其发展潜力巨大而逐渐成为目前导航研究的主流之一。因为驾车时,驾驶员所接收的信息几乎全部来自于视觉,如道路标线、交通信号、交通图案等均可以看作是环境向驾驶员传递的视觉通讯语言^[3]。

当移动机器人采用视觉导航时,由于道路图像理解是自主机器人导航控制中的第1个环节,如果在此环节,机器人不能及时得到准确、稳定的环境信息,那么将势必导致整个导航控制的失败,甚至造成严重后果,因此近10年来,在面向结构化道路的高速移动机器人的研究中,实时的视觉道路理解技术一直是科研人员的重点研究课题。

2 THMR-V 系统

如图1所示,THMR-V系统的CCD摄像机安装在车辆顶部,光轴约向下 45° 指向地面,CCD焦距为6mm,视场角约为 60° ,CCD距地面高度为2.4m,所摄取的道路图像范围从车头开始至车辆前方约70m处。

3 道路图像前处理

由于路面情况复杂,存在很多干扰因素,如多种多样的光照条件、阴影、杂物、路面不平整、路标受到污染及破损等,CCD最终输出的图像质量或多或少

有所降低,另外,为增强对图像的分析 and 识别能力,还需要突出有用信息和剔除图像中其他景物的干扰,这些都需要对图像进行预处理,其主要包括边缘检测、多窗口双阈值二值化。

3.1 边缘检测

在计算机视觉中,图像的边缘提取是一个非常基本的研究课题。多年来,人们提出了许多边缘检测算法,例如,Canny算法、Roberts算法、Sobel算法、Laplace算法、Prewitt算法等等。近年来,基于计算机智能的图像边缘检测方法虽得到了很大发展,已开发了不少方法,如基于神经网络或模糊逻辑推理的边缘抽取方法等^[4],但室外移动机器人是在运动中实时对图像进行处理,过于复杂的图像处理方法,如Canny算法和一些基于计算机智能的算法,往往由于处理时间较长,难以满足系统实时性的要求,因而多被用于图像的后期处理^[5]。综合考虑边缘抽取效果和耗时,THMR-V系统选用Sobel算法。Sobel算法的优点是方法简单,处理速度快,并且由于得到的边缘连续、光滑,因而有利于下一步的道路连接。

3.2 多窗口双阈值二值化

边缘检测后,再将边缘图像二值化,其中阈值的选择是对图像进行二值化处理的关键。因阈值太小,会将太多的非车道线像素划归到车道线像素集中,从而将增加车道线识别的难度;而阈值太大,则会将本来是车道线边缘的像素归到非车道线像素,也将影响车道线识别的精度。

由于高速公路的车道线一般为白色或其他与路面颜色对比强烈的色彩,在灰度图像中,车道线像素的灰度一般要高于路面像素的灰度,因此,车道线边

缘像素必然具有如下两个特征:①在原始道路图像中具有相对较高的灰度值;②在边缘图像中具有相对更高的灰度值。根据车道线边缘像素的这两个特征,就可在边缘图像二值化时,采用双阈值对图像进行组合二值化,其中一个阈值称之为灰度阈值,另一个阈值称之为边缘阈值。只有在边缘图像中灰度值大于边缘阈值,同时在原始道路图像中灰度值大于灰度阈值的像素,才纳入车道线像素的集合中,并将其灰度置为 255,而其余的像素则纳入非车道像素集中,并将其灰度置为 0。

对于灰度阈值的确定,当存在光线变化或光线照射角度不同时,由于不同距离的道路影像亮度并不是均匀的,因此应采用局部分块阈值方法来确定阈值。在 THMR-V 中是采用多个子窗口动态阈值方法,即先将原始图像(384×288 像素)进行水平方向的 n 等分,然后确定像素宽度为 10 个像素的 n 个子窗口,再取每个窗口中的像素平均值作为该水平区间的灰度阈值,这样就能很好地解决固定阈值容易受光线变化及照射角度不同等干扰的影响。

4 ATN 的特性及其在道路图像理解中的应用

增强转移网络(augmented transition networks, ATN)属于人工智能研究中句法分析的一个形式体系,1970年由 Woods 提出,并曾成功地应用于他的著名的 LUNAR 系统中。ATN 的基本思想是采用上下文无关语法来描写句子的成分结构^[6]。

4.1 ATN 的特性

ATN 具有如下特性:

(1) 由若干状态(即结点)、弧(用来把一种状态连向另一种状态)及寄存器所组成;

(2) 一个状态被指定为起始状态,一个状态被指定为结束状态。如果被分析语言串的头部分从起始状态开始,且经过一系列的状态转移到达结束状态,那么该句子就被转移网络规定的语法接受;

(3) 在每条弧上都标注着终结符或者一个用来指明另一个网络名字的非终结符,这表明必须在被分析的语言串中找到这样的语素,才可以进行这条弧所规定的转移;

(4) 每条弧上除了用句法范畴来标注以外,还可以附加任意的测试,只有当弧上的这种测试成功

后,才能通过这条弧;

(5) 每条弧上还可以附加某些动作,当通过一条弧时,则相应的动作便被依次执行,这些动作主要用来设置或修改寄存器的内容。

4.2 ATN 在道路图像理解中的应用

ATN 最初的研究和应用虽然在自然语言的句法分析中,但当将不同的道路图像像素理解为道路具有的不同状态和意义的“广义语言”时,移动机器人对环境的检测和理解实际上就可被认为是机器人解读环境传来的信息,而机器人感兴趣的环境特征信息就构成了一种特殊的环境语言,如果能构建出合适的、符合特定要求的 ATN 网络,那么就能检测出符合需要的道路边缘像素。有了这些符合要求的像素,再通过选择合理的道路模型,经曲线拟合后,就能得到需要的道路边缘曲线。

综上所述,机器人应用 ATN 检测和理解环境语言的方法如下^[7]:

(1) 分析机器人感兴趣的环境特征,并根据环境特征定义环境语言的基本语素、语句、句法和语义;

(2) 根据环境语言的句法确定分析某一种环境语句时应该采取的 ATN 结构;

(3) 规划分析某一种环境语句的句法时可能出现的所有状态;

(4) 确定每种状态发生转移时的转移条件;

(5) 确定每种状态发生转移时的转移测试;

(6) 确定每一个状态的状态动作和状态转移时的转移动作;

(7) 优化 ATN 结构。

下面将依照 ATN 检测与理解环境语言的方法,并结合具体的车道图像来阐明 ATN 道路图像理解算法:

首先,定义环境语言的基本语素为道路图像经预处理后灰度为 255 的像素,然后理解时,只提取车道线内侧边缘像素,道路两条内侧边缘就构成两种类型的语句;而二值化道路图像中的车道线像素连接成两条车道线所遵循的规则,就是高速公路环境语言的句法;另外,因为选取的车道线模型为直线模型,所以车道线直线方程中的斜率和截距就代表了高速公路环境语言中相应语句的语义。

以检测左侧车道(left lane mark, LLM)为例,本文所构造的 ATN 网络如图 2 所示。

整个 ATN 包括 3 个状态,12 条转移弧,5 个寄

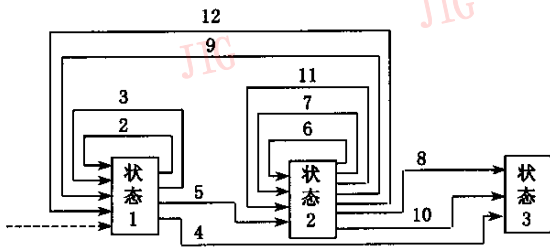


图 2 检测左侧车道 ATN 结构示意图

寄存器。其中,状态 1 为初始状态,其任务是从二值化图像的底线中心点处开始,逐行向左查找 LLM 的第 1 个像素,只有在查找到 LLM 的第 1 个像素后,ATN 才能沿着特定的转移弧转移到状态 2,否则直接转移到状态 3;状态 2 为中间状态,其任务是查找 LLM 的其他像素,状态 3 是结束状态,用于完成一帧图像的 ATN 分析,并将分析结果存于寄存器中,本文所示 ATN 设置的 5 个寄存器分别用来存储符合条件的车道线的像素个数 n 、符合条件的车道线像素的坐标集 (x, y) 以及待检测像素的坐标 (i, j) 。12 条转移弧分别用来确定各自的转移条件、转移测试及转移动作的任务。下面具体介绍几个转移弧的功能,以进一步阐明 ATN 的实际应用方法。

(1) 转移弧 1

转移弧 1 是一条虚线弧,其目的是用来设置 LLM 的第 1 个像素在二值化图像中的起始检测位置和初始化寄存器的内容。在 ATN 状态转移之前,应将寄存器中的像素数目 n 设为零,并将起始检测位置设置为二值化图像底线中心点处(如图 3 所示),状态 1 左边附加的转移弧 1 上方没有标注条件和测试,下方附加了动作“ $n=0$ ”、“ i 等于起始检测行”和“ j 等于起始检测列”。

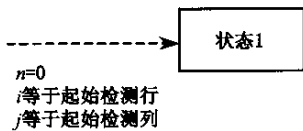


图 3 转移弧 1

(2) 转移弧 2

进入状态 1 后,转移弧 2 的任务是从二值化道路图像的底线中心点处开始,逐行向左扫描 LLM 的第 1 个像素。如图 4 所示,转移弧 2 的转移条件为“ $G(i, j) \neq 255$ ”,其中 G 表示像素的灰度(gray

scale),转移测试为“ i, j 在定义的区域”,转移弧附加的动作为“ $j=j-1$ ”。

$$G(i, j) \neq 255 \& i, j \text{ 在定义的区域}$$

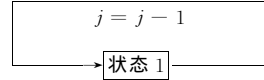


图 4 转移弧 2,没有查找到车道线像素,继续在当前行查找

(3) 转移弧 5

如果在定义的区域检测到满足条件 $G(i, j) = 255$ 的像素,则说明已经查找到了车道线 LLM 的第 1 个像素,然后 ATN 将沿着转移弧 5 转移到状态 2,并从上一行的中心点继续查找 LLM 的其他像素,同时将当前像素的坐标存入寄存器 (x, y) 。如图 5 所示,转移弧 5 上面标注的转移条件为“ $G(i, j) = 255$ ”,转移测试为“ i, j 在定义的区域”,转移弧 5 下面附加了两组转移动作,其中第 1 组动作“ $x[n]=i$ ”、“ $y[n]=j$ ”和“ $n=n+1$ ”的目的是将当前检测到的像素存入寄存器,第 2 组动作“ $i=i-1$ ”和“ j 等于起始检测列”的目的是为了设置下一步车道线像素的检测位置。

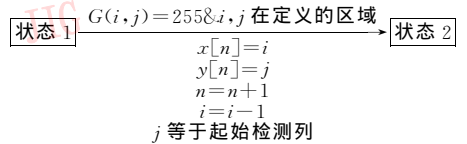


图 5 转移弧 5,已经查找到 LLM 的第 1 个像素,即转移到中间状态

其余各个转移弧的功能就不一一详细介绍,总体来说,由于每个 ATN 都是预先设计好的结构分析图,因此,只要构建合理的状态转移网络就能成功地检测出所需要的像素。

当检测到所需要的车道线像素后,就可以用最小二乘法对车道线模型 $y=kx+b$ 的参数进行拟合计算,而从公式中计算出的斜率 k 和截距 b 就代表着所检测到的道路模型的语义。

$$k = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2}$$

图 6、图 7 为两幅实际道路图像的检测结果,图

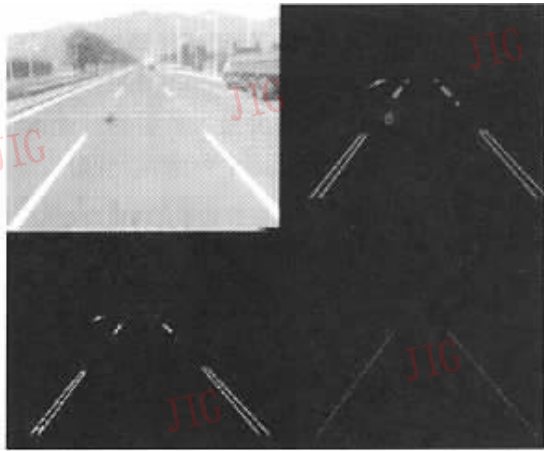


图6 实际道路图像的检测结果

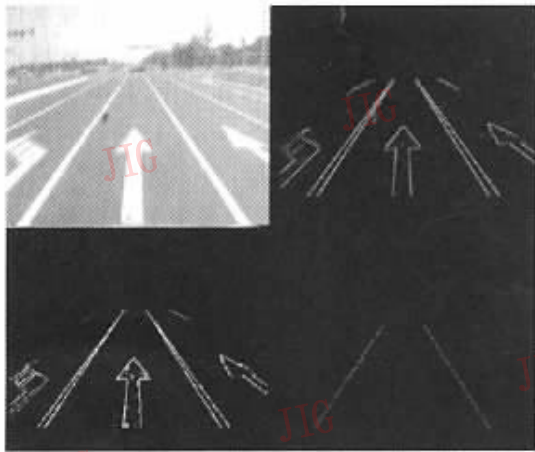


图7 有干扰实际道路图像的检测结果

中从左至右,从上至下分别为原始图像、边缘图像、二值化边缘图像以及所提取的车道线影像。从图6、图7中可以看出,本文提出的ATN道路图像理解算法能很有效地实时提取出道路影像,由于ATN具有构建灵活性,因此当道路中存在干扰时(如图7中道路中间存在着明显的道路方向指示白线),本文算法也能很好地排除干扰,正确地提取出需要的道路影像。

5 结论

本文将人工智能领域中研究句法分析的增强转移网络方法合理地应用于智能移动机器人实时道路图像理解中,并构建出了基于增强转移网络的道路图像理解算法。该算法在PⅢ550的计算机上,单帧图像理解时间不超过40ms,具有非常强的实时性,

而且其具有构建ATN的灵活性,若再结合多窗口动态阈值灰度图像处理、双阈值二值化技术,则能很好地排除道路上的多种干扰,而且在满足实时性要求的情况下,该算法还具有非常强的鲁棒性。目前,该道路图像理解算法已应用在THMR-V系统的实时道路自主导航实验中,在将道路理解的语义作为输入参数的车辆控制算法控制下,THMR-V系统自主车速最高能达到100 km/h,这充分体现了该算法具有实时性的优点。

参考文献

- 1 王宏,何克忠,张钊. 智能车辆的辅助驾驶和自主导航[J]. 机器人,1997,19(2):155~160.
- 2 张鹏飞,何克忠,欧阳正柱,等. 多功能室外智能移动机器人实验平台——THMR-V[J]. 机器人,2002,24(2):97~101.
- 3 Ernst Dieter Dickmanns. Computer vision and highway automation[J]. Vehicle System Dynamics, 1999,31(2):235~251.
- 4 郭木河,杨磊,何克忠,等. 视觉导航中基于模糊神经网络的消阴影算法研究[J]. 软件学报,1999,10(2):155~159.
- 5 Pearson C M, Probert P J. Navigation of autonomous vehicles using linear array cameras [J]. The International Journal of Robotics Research, 1998,17(6):235~248.
- 6 石纯一,黄昌宁,王家钦. 人工智能原理[M]. 北京:清华大学出版社,1993:381~393.
- 7 张鹏飞. 室外高速移动机器人视觉导航技术的研究[博士学位论文][D]. 北京:清华大学计算机系,2002.



李兵 1971年生,2001年获吉林大学博士学位,目前在清华大学计算机系从事博士后研究工作。主要研究方向为移动机器人、计算机控制、计算机图像处理等。



张鹏飞 1971年生,2002年获清华大学博士学位,目前在清华大学汽车工程系从事博士后研究工作。主要研究方向为临场感遥控系统、视觉导航系统、移动机器人、计算机图像处理等。

何克忠 1936年生,教授。主要研究领域为移动机器人、计算机控制技术。