

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.01.005

# 基于视觉的地下矿用车辆自定位方法\*

孟宇 刘立 马飞 甘男 付贤杰

(北京科技大学机械工程学院, 北京 100083)

**【摘要】** 提出一种用于地下矿用车辆自定位的视觉路标定位法,在模拟巷道中摆放多个人工路标,通过车载视觉传感器寻找并识别路标,采用视觉测距方法计算车辆与路标之间的距离,最后依据三角定位原理推算出车辆所在位置。人工路标采用一维条码中密度较高的交叉 25 码编码,每个路标的视觉特征明显并且其编码在数据库中均有唯一的位置数据与之对应。视觉测距采用针孔成像模型,根据路标编码区实际高度与图像中编码高度的比例关系计算车辆到路标的距离。实验结果证明,提出的定位方法定位频率大于 5 Hz,横、纵向定位误差分别小于 110 mm 和 150 mm,基本能够达到车辆自主行驶的定位要求。

**关键词:** 矿用车辆 自主定位 路标识别 条形码

**中图分类号:** TP29; TP242.6<sup>+</sup>2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)01-0022-06

## Vision-based Self-localization Method for Underground Mining Vehicle

Meng Yu Liu Li Ma Fei Gan Nan Fu Xianjie

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

### Abstract

A vision-based self-localization method was proposed for underground mining vehicle by using landmarks. Firstly, several artificial landmarks were located in a simulating tunnel, and then a vision sensor in vehicle was used to find and recognize them. After the distances between the vehicle and the recognized landmarks were calculated by a visual distance measurement method, the location of the vehicle was computed according to triangulation finally. In this self-localization method, landmarks were encoded by interleaved 2 of 5, a type of 1-D barcode with high density. Each landmark has obvious visual feature and there is a unique corresponding location data to it in the landmark database. Distance between a landmark and the vehicle was calculated on the basis of the ratio of the coding area's actual height to its height in the image according to the pinhole imaging principle. Experimental results showed that the self-localization method suggested almost meets the requirement for autonomous driving vehicle because of its high efficiency and precision.

**Key words** Mining vehicle, Self-localization, Landmark recognition, Barcode

### 引言

地下矿用车辆的无人自主行驶是实现地下无人矿山开采的一项必要条件。无人车辆导航是一项多学科交叉技术,其应用范围日益广泛。在无人车辆导航技术中,车辆的定位问题尤为关键<sup>[1]</sup>。地下矿

用车辆工作在限定非自由空间内,无法接收到 GPS 信号,因而无法采用 GPS 技术对其定位。基于视觉的定位方法是实现限定非自由空间内移动车辆自定位的有效手段<sup>[2]</sup>,在自动导引车(automatic guided vehicle,简称 AGV)<sup>[3-7]</sup>等领域已经得到应用,针对地下矿用车辆的视觉定位方法研究尚不多见。

收稿日期:2011-08-24 修回日期:2011-10-16

\* 国家自然科学基金资助项目(50904007)和国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA060408)

作者简介:孟宇,讲师,主要从事汽车电子及自动化研究,E-mail:myu\_jlu@126.com

基于视觉的定位方法大体可以分为地图法和路标法两类。采用地图法的视觉导航系统需要具备一幅完整的车辆运行环境地图,或者通过感知车辆驶过的局部空间同时进行车辆定位和地图生成<sup>[8]</sup>。这类方法从传感器数据中提取环境特征,将此特征与地图中的特征加以匹配,进而估计出车辆的位置。其难点在于建立传感器数据与地图特征之间的对应关系。而采用路标法的视觉导航系统则仅需要具备路标检测功能,根据检测到的路标位置信息,即可计算出车辆的位置。本文研究一种采用路标法的地下矿用车辆自定位方法:在巷道中的若干已知位置摆放带有位置编码信息的人工路标,通过车载视觉传感器捕捉带有人工路标的图像,然后采用视频分析方法对路标加以识别,获得路标的位置信息;其次采用视觉测距方法计算车辆与路标之间的距离;最后根据路标位置及车辆与路标之间的距离即可计算出车辆的定位数据。

目前在定位技术领域,很多研究工作选取全方位视觉传感器,在作业环境中捕捉人工设置路标或自然标识,通过图像匹配来实现定位。如 Nakamura 等<sup>[9]</sup>利用全方位视觉传感器实现足球机器人的自定位,Spacek 等<sup>[10]</sup>通过全方位视觉传感器检测场景中不同颜色路标的位置实现机器人自定位,李明等<sup>[11]</sup>利用全方位视觉传感器实现了农业机械自动导航的定位系统等。由于井下巷道空间狭长,采用全方位视觉传感器采集到的 360°全角度图像中,超过 180°的图像内容无任何使用价值;另一方面,全方位视觉传感器生成的原始图像存在严重畸变,对编码路标的识别造成一定困难。因此,本文采用单目视觉传感器。

## 1 定位基本原理

采用三角定位方法对移动车辆定位。如图 1 所示,在巷道俯视平面上, $L_1$ 和 $L_2$ 分别表示两个路标的关键点(路标的质心), $d_1$ 和 $d_2$ 分别为视觉传感器到两关键点的直线距离。依据三角定位原理,可计算出视觉传感器的位置为 $S_1$ 或 $S_2$ ;若两个路标均带有唯一标识信息,则可根据路标在图像中的位置关系,唯一确定出视觉传感器的位置。

## 2 路标的设计与识别

为便于视觉识别,人工路标须具有明显视觉特征,同时还应带有与其位置相关的编码信息。为此,以条形码来制作路标。

### 2.1 条形码

条形码(barcode)是将宽度不等的多个黑条和

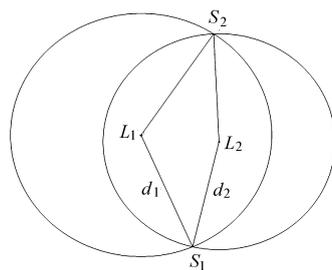


图 1 三角定位原理图

Fig. 1 Principle of triangulation

空白,按照一定的编码规则排列,用以表达一组信息的图形标识符。常见的条形码是由反射率相差很大的黑条(简称条)和白条(简称空)排成的平行线图案。条形码可以表示数字和字母等信息,在商品流通、图书管理、邮政管理、银行系统等许多领域都得到了广泛的应用。交叉分布的条和空具有非常明显的视觉特征,同时又能够表示数据。因此,条形码适合于人工路标的编码。

### 2.2 路标的编码设计

基于视觉的车辆自定位方法,要求车载视觉传感器能够采集到路标的完整图像才能对其加以识别,而采用条形码编码的路标,应能表示大量具有唯一标识的编码信息,同时其条与空的宽度又不宜过小以致无法分辨。因此,需采用一种密度较高的条形码编码方法。

交叉 25 码是一种只能表示数字的编码方法,其编码长度可随编码数据的位数而变化。称这种编码方法为交叉 25 码,是因为它分别以连续的 5 个条和连续的 5 个空来表示奇位和偶位的数字,而组成奇位数字和偶位数字的条与空相互交叉。在连续的 5 个条或空之中,有且仅有 2 个宽的条或空。整个数据的编码由头部静区、头部信息(窄条-窄空-窄条-窄空)、数字编码、尾部信息(宽条-窄空-窄条)及尾部静区组成,交叉 25 码的数字编码规则如表 1 所示,编码中的 0 表示窄条/空,1 表示宽条/空。

表 1 交叉 25 码编码规则

Tab. 1 Coding rules of interleaved 2 of 5 code

数字	编码	数字	编码
0	00110	5	10100
1	10001	6	01100
2	01001	7	00011
3	11000	8	10010
4	00101	9	01010

交叉 25 码因其所有的条与空都表示代码,是一维条形码中密度较高的一种编码方法。因此选择此方法为路标编码。同时,为保证在巷道俯视平面的

各角度上均能检测到编码信息,将路标设计为圆柱体。依此方法制作的条形码路标如图2所示。

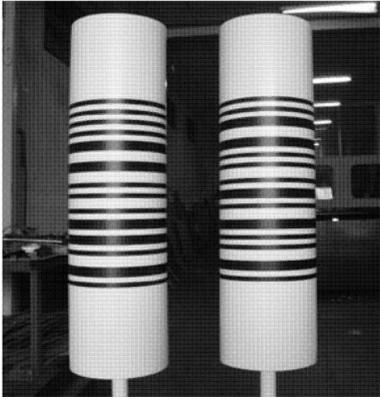


图2 以交叉25码编码的路标

Fig.2 Landmark coded by interleaved 2 of 5 code

### 2.3 路标的识别

识别图像中的条形码时,找到正确的扫描方向是实现识别的关键。对图像沿 $360^\circ$ 全方向扫描是找到正确扫描方向最可靠的方法,同时也是计算量最大的方法。范永法等<sup>[12]</sup>提出根据矩不变原理可将条形码图像转正,但在实验中使用这种方法仅能将背景简单的条码图像转正,而且这种方法的计算量也相对较大。

本文根据路标的摆放方式,设计了一种近似全方向扫描方法的条形码图像识别算法。定义 $I$ 为原始图像, $L = \{l_i\} (i = 1, 2, \dots, n)$ 为图像 $I$ 垂直方向上的一组平行直线束,其中 $l_1$ 经过 $I$ 左边界线, $l_i$ 与 $l_{i+1}$ 距离为10像素, $l_n$ 到 $I$ 右边界线的距离小于10像素; $\theta$ 为 $L$ 的旋转角,初始值设为 $0^\circ$ ;  $C$ 为已识别路标数量, $V_1 < \theta_1, \text{code}(1), (x_{s1}, y_{s1}), (x_{e1}, y_{e1}) >$ 和 $V_2 < \theta_2, \text{code}(2), (x_{s2}, y_{s2}), (x_{e2}, y_{e2}) >$ 为两个路标识别结果向量。

算法流程如图3所示,具体过程如下:

(1)采用膨胀、腐蚀和平滑等方法对原始图像 $I$ 进行图像预处理以去除图像中的噪点,得到图像 $I'$ ,然后将 $I'$ 二值化得到图像 $I''$ ,令 $L$ 旋转角度 $\theta = 0^\circ$ ,旋转角度增量 $\Delta\theta = 5^\circ$ 。

(2)将直线束 $L$ 分别沿 $\theta$ 和 $-\theta$ 方向旋转,被图像 $I''$ 截断后分别得到顺时针扫描线段束 $L_s = \{l_{s_i}\}$ 和逆时针扫描线段束 $L_N = \{l_{N_i}\} (i = 1, 2, \dots, n)$ ,令 $j = 1$ 。

(3)从上至下判断图像 $I''$ 在扫描线段 $l_{s_j}$ 上是否含有头部信息(窄条-窄空-窄条-窄空)或反向尾部信息(窄条-窄空-宽条),如 $l_{s_j}$ 上既不含头部信息也不含反向尾部信息则转至步骤(4)。如含有头部信息,则按表1识读数字编码;如含有反向尾部信息,则按表1反向编码规则识读(如"00110"表示数字

6)。识读完毕后再校验其后的尾部(宽条-窄空-窄条)或反向头部信息(窄空-窄条-窄空-窄条),校验成功且编码未被记录则 $C$ 增1、数字编码保存入 $\text{Code}(C)$ 、将头部或反向尾部的起点坐标保存入 $(x_{sc}, y_{sc})$ 、将尾部或反向头部的终点坐标保存入 $(x_{ec}, y_{ec})$ 、 $\theta$ 保存入 $\theta_C$ ,如 $C \geq 2$ ,则返回识别结果,算法结束。若识读数字失败或校验尾部失败或校验反向头部失败,则继续寻找扫描线段上的下一个头部或反向尾部信息,直到扫描至线段末端为止。

(4)从上至下判断图像 $I''$ 在扫描线段 $l_{N_j}$ 上是否含有头部信息或反向尾部信息,如 $l_{N_j}$ 上既不含头部信息也不含反向尾部信息则转至步骤(5)。如含有头部信息,则按表1识读数字编码;如含有反向尾部信息,则按表1反向编码规则识读。识读完毕后再校验其后的尾部或反向头部信息,校验成功且编码未被记录则 $C$ 增1、数字编码保存入 $\text{Code}(C)$ 、将头部或反向尾部的起点坐标保存入 $(x_{sc}, y_{sc})$ 、将尾部或反向头部的终点坐标保存入 $(x_{ec}, y_{ec})$ 、 $-\theta$ 保存入 $\theta_C$ ,如 $C \geq 2$ ,则返回识别结果,算法结束。若识读数字失败或校验尾部失败或校验反向头部失败,则继续寻找扫描线段上的下一个头部或反向尾部信息,直到扫描至线段末端为止。

(5) $j = j + 1$ ,若 $j \leq n$ ,转至步骤(3)。

(6) $\theta = \theta + \Delta\theta$ ,若 $\theta \leq 90^\circ$ 转至步骤(2),否则判定图像 $I''$ 中不存在两个路标,退出算法。

上述算法中,图像预处理过程中的膨胀和腐蚀操作均使用 $3 \times 3$ 结构元素,平滑操作采用 $3 \times 3$ 模版的高斯滤波。

识别过程中,以假定扫描到的头部第一个窄条(或反向尾部的第一个窄条)高度 $h_s$ 为步长。根据条与空的反射率差异,对其后的窄条、窄空、宽条和宽空均定义不同的容忍高度范围 $R_{NBar}$ 、 $R_{NSpace}$ 、 $R_{WBar}$ 和 $R_{WSpace}$ ,然后分别按头部(或反向尾部)、数字编码(或反向数字编码)和尾部(或反向头部)进行校验和识读。若校验或识读失败,需重新寻找新的假定头部(或反向尾部)的第一个窄条以更新 $h_s$ 、 $R_{NBar}$ 、 $R_{NSpace}$ 、 $R_{WSpace}$ 和 $R_{WSpace}$ 。

考虑到条形码路标垂直于地面放置,在图像中对条形码的正确识读方向多数情况下与垂直方向相近,因此算法设定扫描线角度从垂直方向开始,并分别沿顺、逆时针方向逐渐旋转。旋转角度增量 $\Delta\theta$ 是个经验值,直接影响识别算法的效率和可靠性。算法从 $0^\circ$ 到 $\pm 90^\circ$ 旋转扫描线对编码图像分别进行正向和反向识别,若将 $\Delta\theta$ 值设为 $1^\circ$ ,则算法可靠性与全方向扫描方法相当,但此时计算量过大致使识别和定位耗时过长;若 $\Delta\theta$ 值过大,则会令识别算法

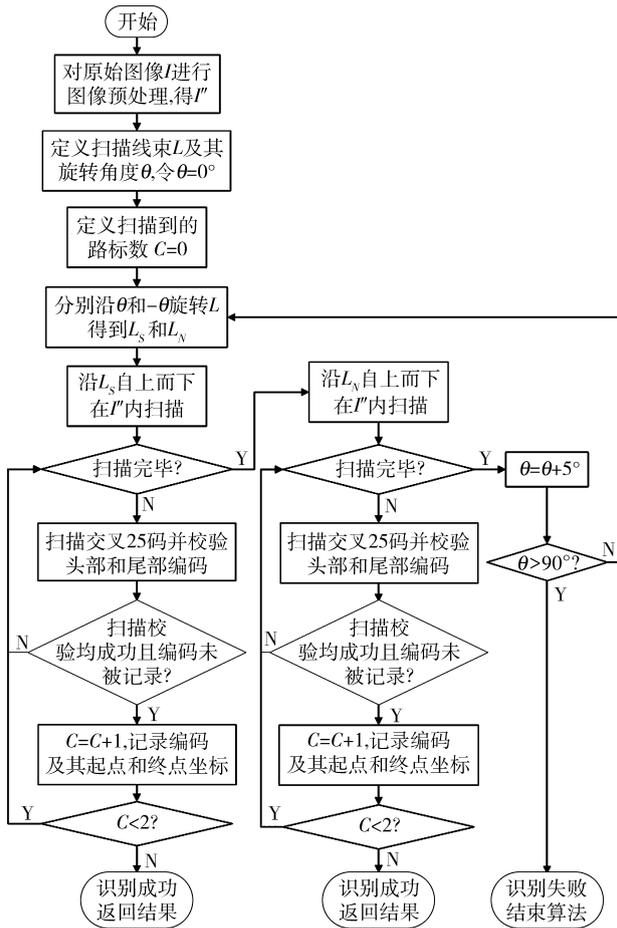


图 3 路标识别算法流程图

Fig. 3 Landmark recognition algorithm flow chart

出现漏检现象。经实验,将  $\Delta\theta$  设为  $5^\circ$  时能够取得较为满意结果。

将路标置于实验室走廊中,采用德国 AVT Guppy F-080B 型高速黑白摄像机和 Arbor Em104P-1394 模块捕捉视频,图像分辨率  $1024 \times 768$ ,采集频率为 30 帧/s。捕捉到的图像和图像预处理结果如图 4 所示。

在路标识别实验过程中,将两路标与摄像机保持 1.5 ~ 10 m 距离,外部光照条件满足肉眼可分辨路标图像的情况下,对摄像机进行平移和旋转等各种操作,识别算法对路标的识别正确率可达 98.6%,具有较好的可靠性。在实验过程中,对于存在两个路标的图像,该算法运行于 ARBOR Em104P-i8523 型(Intel Pentium M 1.4 GHz CPU, 1 GB 内存)嵌入式单板计算机上平均可在 0.1 s 左右识别出条码信息;对于不存在两个路标的图像则需 0.2 s 左右给出无路标的结果。

### 3 单目视觉测距

识别出路标以后,即可根据路标的实际空间几何形状及其在图像中的平面几何成像结果推算出视

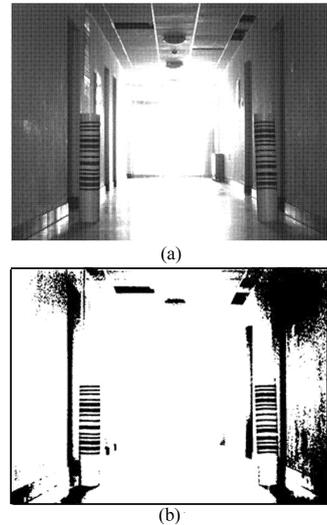


图 4 实验室走廊中的路标图像

Fig. 4 Images of landmarks in the laboratory's corridor

(a) 摄像机捕捉的原始图像 (b) 预处理后的图像

觉传感器与路标之间的距离。完成视觉测距工作,需选择适当的光学投影模型。

#### 3.1 投影模型

最简单的空间投影模型是针孔成像模型,也称为线性摄像机模型。依据此模型,空间中任一点  $P$  在图像中的成像位置可以用针孔成像模型近似表示,即任一点  $P$  在图像中的投影位置  $P'$ ,为通过  $P$  点和光心  $O$  的直线  $OP$  与图像平面的交点<sup>[13]</sup>。空间点  $P$  与图像点  $P'$  的坐标存在比例关系

$$\begin{cases} X = \frac{fx}{z} \\ Y = \frac{fy}{z} \end{cases} \quad (1)$$

其中  $(X, Y)$  为  $P'$  点的图像坐标,  $(x, y, z)$  为空间点  $P$  在摄像机坐标系中的坐标,光心到图像平面的距离  $f$  为焦距。

#### 3.2 测距计算

若视觉传感器光心方向与水平面保持平行,路标垂直于地面摆放,这样图像平面与路标平行,此时可以根据小孔成像模型计算路标到光心的距离。如图 5 所示,路标编码区高度为  $H$ ,在图像中的高度为  $h$ ,路标到透镜光心的距离为  $d$ ,透镜焦距为  $f$ 。根据路标编码区实际高度和图像中编码高度比例关系可得

$$d = \frac{Hf}{h} \quad (2)$$

式(2)中,路标编码区高度  $H$  和透镜焦距  $f$  均为已知,路标的编码图像高度可根据识别结果向量求得。具体公式为

$$\begin{cases} h_1 = \sqrt{(x_{E1} - x_{S1})^2 + (y_{E1} - y_{S1})^2} \\ h_2 = \sqrt{(x_{E2} - x_{S2})^2 + (y_{E2} - y_{S2})^2} \end{cases} \quad (3)$$

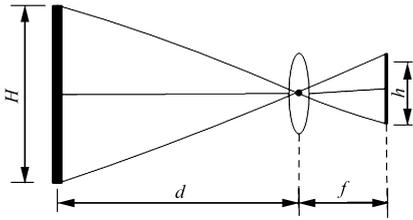


图5 针孔成像原理图

Fig.5 Principle of pinhole camera model

由此式易求得视觉传感器到两路标的距离  $d_1$  和  $d_2$ 。

## 4 定位

得出视觉传感器到路标的直线距离后,还需根据路标的图像编码解析出路标的具体位置信息。本文采用数据库存储数据方式,建立路标图像编码与其位置数据的映射关系。在数据库中,任一图像编码均有且仅有一条与之对应的位置数据记录。当路标位置需做出调整时,不必更改路标编码,只要修改相应的位置数据记录,即可完成路标与其位置数据映射关系的更新。映射关系如表2所示。

表2 路标编码与其位置信息的映射关系

Tab.2 Mapping between codes and location information of landmarks

编码	位置/mm
00,01	7 444,983
02,13	12 748,940
11,45	16 550,974
26,59	16 570,2 895
30,75	12 742,2 915
35,82	7 451,2 613
⋮	⋮

在表2中,可根据路标识别结果向量中的 Code(1)和 Code(2)检索出两路标位置  $L_1(x_1, y_1)$  和  $L_2(x_2, y_2)$ ,

它们与视觉传感器位置  $(X, Y)$  的关系为

$$\begin{cases} (X - x_1)^2 + (Y - y_1)^2 = d_1^2 \\ (X - x_2)^2 + (Y - y_2)^2 = d_2^2 \end{cases} \quad (4)$$

求解式(4),可得到  $(X, Y)$  的两个解,根据  $L_1$  和  $L_2$  的相对位置关系,可剔除一个无关解,得出唯一正解。

## 5 实验

将路标置于室内走廊两侧,走廊宽度 2 230 mm。路标直径 200 mm,高 1 000 mm(编码区域高 648 mm)。摄像机配用 Computar M1214-MP 型百万像素定焦镜头,镜头焦距 12 mm。以模拟样车为移动设备,将高速摄像机、1 394 模块和嵌入式单板计算机安装在样车上进行实验,样车长 1 270 mm、宽 580 mm、高 560 mm,如图6所示。

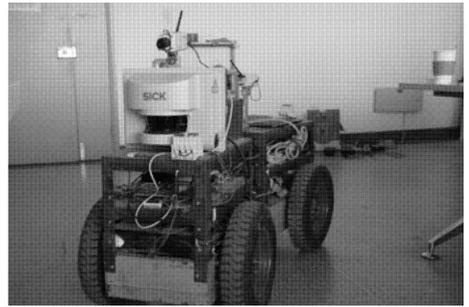


图6 视觉定位实验样车

Fig.6 Samplevehicle for experiments of vision-based localization

以本文提出的算法进行路标识别、测距及视觉传感器定位,样车行驶速度在 5 km/h 左右,定位结果及其相对于人工测量结果的误差见表3,实验室走廊地图及定位结果如图7所示。

## 6 结论

(1) 提出的视觉定位算法,其误差大小与视觉传感器到路标的距离存在较大关系:当视觉传感器距路标较远时,定位误差相对较大,随着传感器与路标距离的拉近,定位误差也随之变小。

表3 视觉定位算法计算结果及误差

Tab.3 Result and error of the vision-based localization algorithm

路标1位置	路标2位置	与路标1距离	与路标2距离	定位结果	误差
(7 444, 984)	(7 451, 2 613)	3 575.68	3 437.12	(10 847.04, 2 082.65)	37, -49
(12 748, 940)	(12 742, 2 915)	4 098.83	4 204.00	(16 771.94, 1 722.46)	-45, -42
(16 550, 974)	(16 570, 2 895)	3 937.70	4 013.54	(20 412.29, 1 739.03)	51, -26
(26 224, 944)	(23 939, 2 912)	3 575.42	1 927.26	(25 197.51, 4 368.37)	27, 23
(26 007, 10 930)	(24 120, 10 870)	4 873.49	4 805.66	(24 737.85, 15 635.35)	-41, 54
(25 991, 23 626)	(23 986, 23 605)	7 119.93	7 111.55	(24 889.47, 30 660.21)	-80, -104
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

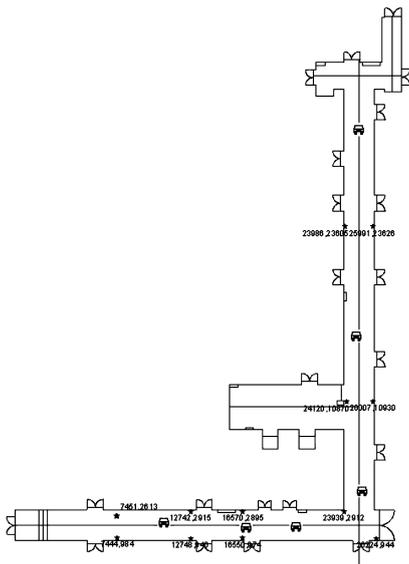


图 7 模拟巷道地图

Fig. 7 Map of the simulating tunnel

(2) 当路标与视觉传感器之间距离超过 12 m, 算法对路标基本无法识别, 较为理想的路标间距在 8 ~ 10 m。

(3) 若在可识别的范围内存在两个以上路标, 则算法能够在 0.2 s 内给出定位结果, 定位频率大于 5 Hz。

(4) 通过对本文算法定位结果与人工测量结果比较可知, 算法的横向定位误差小于 110 mm, 纵向定位误差小于 150 mm。

综上所述, 本文提出的基于视觉的车辆自定位算法, 实现了对运动车辆的快速高精度定位。对于工作在井下、时速约为 20 km/h 的矿用车辆而言, 算法的定位效率与精度基本能够满足车辆自主行驶的定位要求。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Zhifang, Tsai Wenhsiang. Viewing corridors as right parallelepipeds for vision-based vehicle localization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(3): 653 ~ 661.
- 2 Ettore Stella, Arcangelo Distanto. Self-location of a mobile robot by estimation of camera parameters [J]. Robotics and Autonomous Systems, 1995, 15(3): 179 ~ 187.
- 3 Chen Kuanchieh, Tsai Wenhsiang. Vision-based autonomous vehicle guidance for indoor security patrolling by a SIFT-based vehicle-localization technique [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2010, 59(7): 3 261 ~ 3 271.
- 4 Fu Huazhu, Cao Zuoliang, Cao Xiaochun. Embedded omni-vision navigator based on multi-object tracking [J]. Machine Vision and Applications, 2011, 22(2): 349 ~ 358.
- 5 尹晓红, 赵韩, 吴焱明, 等. 基于卡尔曼滤波的自动引导车串级轨迹跟踪控制 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(2): 180 ~ 184.  
Yin Xiaohong, Zhao Han, Wu Yanming, et al. Cascade tracking control for AGV based on Kalman filter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(2): 180 ~ 184. (in Chinese)
- 6 陈无畏, 王檀彬, 焦俊, 等. 基于信息融合的多智能体混合体系智能车辆导航 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 1 ~ 5.  
Chen Wuwei, Wang Tanbin, Jiao Jun, et al. Design and application for navigation multi-agent of intelligent vehicle based on information fusion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 1 ~ 5. (in Chinese)
- 7 蔡晋辉, 才辉, 张光新, 等. 复杂环境下自动导引车路径识别算法 [J]. 农业机械学报, 2011, 42(10): 20 ~ 24, 89.  
Cai Jinhui, Cai Hui, Zhang Guangxin, et al. Guidance line identification algorithm for AGV in complex environment [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 20 ~ 24, 89. (in Chinese)
- 8 Francisco Bonin-Font, Alberto Ortiz, Gabriel Oliver. Visual navigation for mobile robots: a survey [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2008, 53(3): 263 ~ 296.
- 9 Nakamura T, Oohara M, Ogasawara T, et al. Fast self-localization method for mobile robots using multiple omnidirectional vision sensors [J]. Machine Vision and Applications, 2003, 14(2): 129 ~ 138.
- 10 Libor Spacek, Christopher Burbridge. Instantaneous robot self-localization and motion estimation with omnidirectional vision [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(9): 667 ~ 674.
- 11 李明, 李旭, 孙松林, 等. 基于全方位视觉传感器的农业机械定位系统 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 170 ~ 174.  
Li Ming, Li Xu, Sun Songlin, et al. Localization system of agricultural machinery based on omni-directional vision sensor [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 170 ~ 174. (in Chinese)
- 12 范永法, 何红庄. 一维及二维条码图像识别系统研究 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(增刊 2): 488 ~ 489.  
Fan Yongfa, He Hongzhuang. Study of recognition system for 1-D and 2-D bar code images [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003, 24(Supp. 2): 488 ~ 489. (in Chinese)
- 13 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.