

# 农用轮式移动机器人相对位姿的求解方法

周俊<sup>1)</sup> 刘成良<sup>1)</sup> 姬长英<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(上海交通大学机电控制研究所, 上海 200030) <sup>2)</sup>(南京农业大学工学院, 南京 210031)

**摘要** 在基于单目视觉的自主导航中, 由于农用轮式移动机器人相对于跟踪路径位姿的传统求解算法, 往往存在忽视图像中各像素点权重不同和计算效率不理想等缺陷, 因此, 针对农田环境特点, 在分析地面上直线路径透视成像特性的基础上, 提出了一种农用轮式移动机器人相对位姿的求解方法。该方法首先建立起被跟踪路径在图像平面上的像素坐标与机器人相对位姿间的关系方程, 然后结合 Hough 变换的思想直接求出位姿值。实验结果表明, 该方法不仅可以有效地弥补传统算法的不足, 而且测量精度也与当前其他类似研究的水平大致相当。

**关键词** 农业机器人 位姿 机器视觉 导航

**中图分类号**: TP242.62 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2005)03-0310-05

## Pose Sensing of Agricultural Wheeled Mobile Robot

ZHOU Jun<sup>1)</sup>, LIU Cheng-liang<sup>1)</sup>, JI Chang-ying<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>(Mechatronics Institute, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

<sup>2)</sup>(Engineering College, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031)

**Abstract** Generally, one camera is used in the autonomous navigation of agricultural wheeled mobile robot. Conventional algorithm of pose sensing, however, ignores the fact that pixels in digit image possess the different weight, and its compute time can not be optimized easily. In order to overcome these shortcomings, the perspective characteristic of the linear guiding road on the ground was analyzed carefully, then the relationship between the road coordinate in the digit image and the robot pose was established, so the relative pose could be obtained directly with the Hough transformation. Based on the prototype of agricultural wheeled mobile robot, the experimental results showed that the precision derived from this method is similar to those demonstrated by the other same type of researches.

**Keywords** agricultural robot, pose, machine vision, navigation

## 1 引言

跟踪单目视觉系统识别出的目标路径是一种重要的室外轮式移动机器人的导航方式。路径目标可以是一些诸如车道线的人工标志线, 也可以是道路的自然边缘线。在农业上为了避免有毒、高温高湿的作业环境, 以及提高作业精度和效率等, 农业轮式机器人(车辆)视觉导航在国内外被广泛研究, 它经常使用农作物或果树等目标自然形成的行线作为跟

踪路径<sup>[1-3]</sup>。由于这些路径目标基本都为直线, 或相对于机器人的前进速度在局部范围内近似成立, 因此目前农田中轮式机器人视觉导航研究一般都采用线性道路模型。文献[4]在研究公路智能车辆视觉导航时, 曾特别阐明了使用线性道路模型的优势。

获取相对于跟踪路径的机器人位姿是机器人正确导航的前提。现在通常的做法是在图像空间中先检测出路径, 再利用透视投影关系求出该相对位姿值<sup>[2,3]</sup>。这种方法的不足之处主要有以下两点: 首先, 在计算机图像空间里检测路径直线时, 没有考虑

基金项目: 教育部科学技术重点研究项目(03091)

收稿日期: 2003-09-18; 改回日期: 2004-07-26

第一作者简介: 周俊(1974~), 男, 2003年7月获南京农业大学农业机械化工程专业工学博士学位, 现为上海交通大学机械工程博士后。主要研究领域包括机电一体化、农业机器人、机器视觉、智能车辆导航。E-mail: zhoujun0001@sohu.com

成像过程中的透视效应所造成的各像素点权重不同,因而使得无论是直线拟合<sup>[3]</sup>还是 Hough 变换检测<sup>[2]</sup>的精度都会受到影响;其次,在利用 Hough 变换检测的场合,由于不能直接确定出变换参数空间的实际物理意义,这势必会将精力平均用在整个参数空间上,从而导致在保证算法实时性的条件下,不可避免地要牺牲精度指标。

针对前述的传统位姿求解方法中的缺陷,并考虑到农田环境中被跟踪路径的特点,本文提出了一种新的相对位姿求解算法。

## 2 地面上直线的投影特点

通常,由于室外轮式移动机器人都在局部近似平坦的地面上活动,因此可以假设地面为一平面。图 1 为平坦地面上的视觉导航轮式移动机器人示意图以及各坐标系的定义。机器人(robot, 简称为  $r$ , 即  $O_r$  的下角  $r$ )坐标系与车体固联,坐标原点  $O_r$  在车体重心下方的地面上。 $x_r$  轴指向车体左侧, $y_r$  轴垂直地面向上, $z_r$  轴符合右手系规定沿车体纵轴指向前方。 $O_c$  为摄像机(camera, 即为  $O_c$  的下角  $c$ )坐标系的原点,其在  $O_r$  点正上方,与地面距离  $O_r O_c = h$ ;  $z_c$  和摄像机的主光轴保持一致,向地面倾斜,倾斜角  $\varphi > 0$ ;  $y_c$  如图 1 所示, $x_c$  指向纸面,与机器人坐标系  $x_r$  轴的方向一致。现采用小孔成像模型来分析摄像机透视成像过程,图 1 中的  $S$  平面为成像平面,且与  $z_c$  垂直,其到  $O_c$  的距离为  $f$  (摄像机的焦距)。

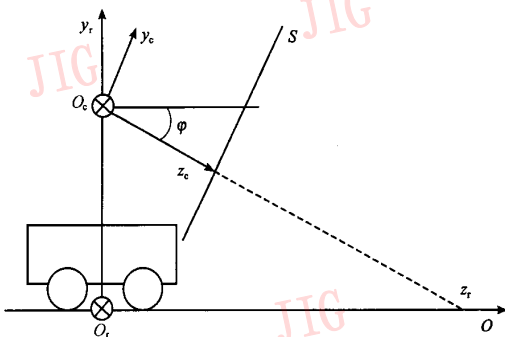


图 1 视觉导航轮式移动机器人结构及坐标定义  
Fig. 1 Frame and coordinate definition of wheeled mobile robot navigated by vision

根据以上坐标系的定义,则容易得出机器人坐标系相对于摄像机坐标系的齐次变换矩阵为

$$T_r^c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & -h\cos\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi & h\sin\varphi \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

图 2 是计算机帧存中的一幅路径图像示意图,其中假设任一直线  $L$  为被跟踪路径的像,也就是地面上局部近似为直线的实际路径经过摄像机后在计算机帧存中的图像,可用点  $(X_0, 0)$  和方向向量  $(-\tan\theta, 1)$  来表示直线  $L$  上的点:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ 0 \end{bmatrix} + k \begin{bmatrix} -\tan\theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

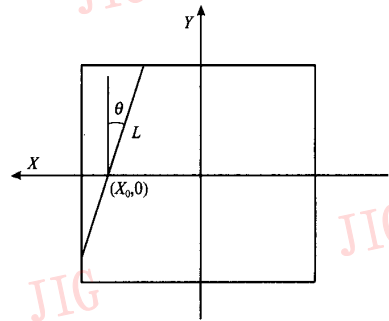


图 2 计算机帧存中的一幅路径图像示意图

Fig. 2 A sketch of road in digital image

设  $X$  和  $Y$  方向相邻像素的实际间距分别为  $d_x$  和  $d_y$ ,则在成像平面  $S$  上与计算机帧存图像中的直线  $L$  相对应的直线  $L_s$  上的点可以表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 d_x \\ 0 \end{bmatrix} + k_s \begin{bmatrix} -\frac{d_x}{d_y} \tan\theta \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由前面机器人坐标系和摄像机坐标系之间的相互关系以及小孔成像模型可知,由于摄像机坐标系中  $x_c O_c z_c$  平面与地面交线的投影就是计算机帧存图像中的  $X$  轴,因此,和像点  $(X_0, 0)$  对应的地面上的点  $W_0$  的坐标为

$$\begin{cases} x_{w_0} = X_0 d_x h / f \sin\varphi \\ y_{w_0} = 0 \\ z_{w_0} = h / \tan\varphi \end{cases} \quad (4)$$

文献[5]指出,2 维像平面上的直线必然由 3 维空间中的一条直线投影所产生(在特殊情况下也可由一个平面所产生)。从规定的各坐标间相互关系以及所讨论的问题可以明显看出,这里不会出现括号中的情况。假定成像平面  $S$  上的直线  $L_s$  是地面上经过点  $(x_{w_0}, y_{w_0}, z_{w_0})$  的直线路径  $L_r$  的投影,则  $L_r$

上点的坐标同样可以表示为

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{w_0} \\ y_{w_0} \\ z_{w_0} \end{bmatrix} + k_r \begin{bmatrix} -\tan\theta_r \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

这些点在摄像机坐标系中对应点的坐标可以由下面的齐次变换容易求出

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = T_r^c \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据小孔成像模型,这些点在成像平面  $S$  上的投影坐标将为

$$x = f \frac{x_c}{z_c} = f \frac{X_0 d_x h / f \sin\varphi - k_r \tan\theta_r}{\cos\varphi(h/\tan\varphi + k_r) + h \sin\varphi} \quad (7)$$

$$y = f \frac{y_c}{z_c} = f \frac{\sin\varphi(h/\tan\varphi + k_r) - h \cos\varphi}{\cos\varphi(h/\tan\varphi + k_r) + h \sin\varphi} \quad (8)$$

由式(7)、式(8)计算出的成像平面里的点应该共线,并且和式(3)所表示的直线是同一条直线。把式(7)、式(8)代入式(3)可得

$$\frac{d_x \tan\theta}{d_y} = \frac{f \tan\theta_r + X_0 d_x \cos\varphi}{f \sin\varphi} \quad (9)$$

上式即建立了路径图像中任一直线路径投影的方向角和地面上对应的实际直线路径的方向角之间的关系。当地面上的直线路径与机器人坐标系  $z_r$  轴平行时(即  $\theta_r = 0$ ),而对应计算机帧存路径图像里的直线方向角  $\theta$  却不等于零。

由式(8)还可知,当  $k_r \rightarrow \infty$  时,即为无穷远处点,其在成像平面中的坐标为

$$y = f \tan\varphi \quad (10)$$

这也可以从图 1 中各坐标系的几何关系来直接验证。

### 3 机器人相对位姿测量方法

如果用图 3 中  $L_r$  来表示示意地面上实际直线路径,则机器人坐标系原点  $O_r$  到直线路径的距离  $\lambda$  以及直线路径和机器人坐标系  $z_r$  轴的夹角  $\theta_r$  等两个参数就对应着轮式机器人路径跟踪时的相对位姿。在农业轮式移动机器人自主导航过程中,可通过实时调节它的大小来实现跟踪目标路径。

由图 3 可以容易给出该直线路径的方程,即

$$\lambda = x \cos\theta_r + z \sin\theta_r \quad (11)$$

从前面的讨论可知,地面上的这条直线路径经

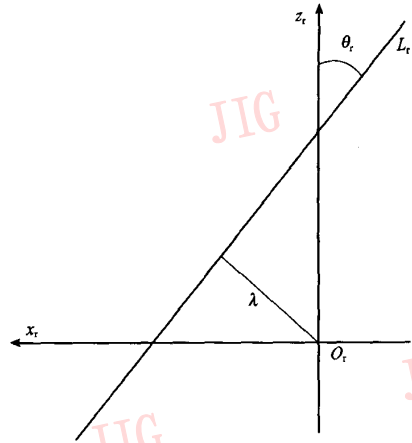


图 3 路径直线在机器人坐标系中的位置

Fig. 3 Position of road line in robot coordinate

过透视投影后,将会成为计算机帧存图像平面上的—条由许多像素点组成的直线。

下面将分析如何从这些共线的像素点坐标求解式(11)中的两个参数(相对位姿):

由式(11)知,当

$$z_r = \frac{h}{\tan\varphi} \text{ 时, 得 } x_r = \frac{\lambda - \frac{h}{\tan\varphi} \sin\theta_r}{\cos\theta_r}$$

此点将被投影成计算机帧存图像中路径直线  $L$  上的  $X_0$  点,又因为由式(4)可得

$$\frac{x_{w_0}}{x_0} = \frac{h/\sin\varphi}{f}, x_0 = X_0 d_x$$

所以

$$X_0 d_x = \frac{f}{h/\sin\varphi} \left( \frac{\lambda - \frac{h}{\tan\varphi} \sin\theta_r}{\cos\theta_r} \right) \quad (12)$$

将上式代入式(9),得

$$\tan\theta = \frac{d_y}{d_x} \left( \tan\theta_r \sin\varphi + \frac{\lambda \cos\varphi}{h \cos\theta_r} \right) \quad (13)$$

由图 2 可知,计算机帧存图像中路径直线  $L$  的方程可写成

$$X = X_0 - Y \tan\theta \quad (14)$$

把式(12)、式(13)代入上式,得

$$\lambda = \frac{X h k_2}{k_1 k_2 \sin\varphi - Y k_1 \cos\varphi} \cos\theta_r + \frac{k_2 h \cos\varphi + Y h \sin\varphi}{k_2 \sin\varphi - Y \cos\varphi} \sin\theta_r \quad (15)$$

其中,  $k_1 = \frac{f}{d_x}$ ,  $k_2 = \frac{f}{d_y}$ , 将在摄像机标定过程中给出。

式(15)即给出了地面上实际直线路径投影的像素坐标与机器人相对位姿间的关系方程。如果再结合 Hough 变换检测直线的基本原理,则可直接求解出相对位姿(Hough 变换的基本原理可参见文献[5],不再赘述)。这样,图像空间中的路径识别过程和相对位姿求取就被自然地融合在一起。

由式(15)可知,此方法中,首先各像素坐标是通过与一个因子系数相乘,进而考虑了透视投影引起的各像素点在图像空间中权重不一致的事实;其次,由于直接在物理位姿空间中累加,对累加参数空间的物理意义和实际范围都比较清楚,因而能够根据需要设计不同的空间分辨率,如,在位姿出现概率大的区间,提高分辨率,在其他区间则降低分辨率,以便在不影响精度的条件下,通过缩小累加空间的规模来提高计算效率。总之,该方法能够克服前文中指出的常规求取机器人相对位姿算法中的不足。

此外,农田环境中的路径景物目标一般由许多分散的个体农作物植株构成,该方法由于结合了 Hough 变换的思想,因而能够较好地适应农田环境中的上述特点,其对植株缺失、杂草干扰等都将具有很强的鲁棒性。

### 4 实验研究

图4是基于通用的小四轮拖拉机设计的一种农用轮式移动机器人试验原型,它可用于在农田中自主跟踪农作物的行,执行诸如精确喷药等作业。为了检验上述方法的有效性,可用地面上人工设置的标志线来模拟被跟踪的直线路径,同时比较实际测量的机器人位姿和对应的计算值之间的差异,其30组实验结果见表1。之所以用人工标志线而不用草坪等自然物的边缘来进行模拟,主要是考虑实验过程中调整的需要。因为用草坪等自然物时,每次改



图4 农用轮式移动机器人原型

Fig.4 Prototype of agricultural mobile robot

表1 实验结果

Tab. 1 Results of experiment

测量得到的位姿		计算得到的位姿	
$\lambda$ (m)	$\theta_r$ ( $^\circ$ )	$\lambda$ (m)	$\theta_r$ ( $^\circ$ )
0.50	0	0.50	0
0.25	0	0.28	1
0	0	0	0
-0.2	0	-0.21	0
-0.4	0	-0.41	0
-0.55	0	-0.55	0
1.50	59	1.51	62
1.40	126.9	1.39	126
1.68	51.3	1.69	53
1.46	143.1	1.46	144
1.11	146.3	1.13	146
1.46	110.6	1.47	110
-0.09	11.3	-0.13	11
1.33	59	1.34	60
1.10	39.8	1.12	40
0.67	18.4	0.70	19
0.89	18.4	0.94	19
0.72	165.1	0.76	165
0.78	168.7	0.82	169
0.18	14.9	0.16	15
0.83	36.3	0.83	36
0.79	146.4	0.73	148
1.20	121	1.18	123
0.44	161.6	0.43	162
1.41	54.5	1.46	55
1.45	125.5	1.48	126
1.30	43	1.36	44
1.38	133.2	1.43	133
0.70	140.2	0.64	143
0.54	165.1	0.57	165

变机器人的相对位姿都要重新确定机器人坐标系的实际物理位置,并且要移动拖拉机到适当位姿,故比较困难;而使用人工标志线时,只需简单调整一下标志线位置即可。

$$\text{系统经过标定后,有} \begin{cases} k_1 = 678.5 \\ k_2 = 649.4 \\ h = 1.489 \\ \varphi = 30.4^\circ \end{cases}$$

由统计表1中的数据可知,测量得到的 $\lambda$ 和计算的 $\lambda$ 之间差的均值为 $-0.83\text{cm}$ ,标准差为 $3\text{cm}$ ;测量得到的 $\theta_r$ 和计算的 $\theta_r$ 之间差的均值为 $-0.38^\circ$ ,标准差为 $0.62^\circ$ 。通过取 $0.05$ 置信度水平进行双侧 $t$ 检验可以知道,两个差的均值与零之间无显著差异。

上述均值为零的参数检验结果和较小的标准差

都有力地证明了以上理论分析的正确性以及算法数值计算的稳定性。

在农用轮式移动机器人视觉导航研究中,据 2000 年日本的 Torii 等报道,在测量人工草坪时,视觉系统取得的横向距离最大误差为 2.4cm,航向角度最大误差值为  $1.5^\circ$ ,并且存在着  $0.7^\circ$  的固定偏差<sup>[3]</sup>。英国的 Pinto 等在 2000 年底报道,在运用 PGA (pose-guidance algorithm) 方法时,视觉系统测量的航向角绝对误差为  $0.5^\circ$ ,横向距离绝对误差为 4.1cm<sup>[6]</sup>。可见,本方法获得的精度和目前类似的研究水平大致相当。

## 5 结 论

在农业上,为了避免有毒、高温高湿的作业环境以及提高作业精度和效率等,研究农业轮式机器人自主导航非常必要。在导航时,它经常使用农作物等景物目标自然形成的行线作为引导路径。

本文通过研究地面上直线路径透视投影的本质特性,建立了路径在图像空间中的像素坐标和机器人相对位姿之间的关系式,从而把 Hough 变换和位姿参数的求取直接糅合在一起。理论分析表明,该方法既可弥补传统位姿求取方法在精度和计算效率等方面存在的缺陷,又能很好地适应农田景物环境的特点。基于农用轮式移动机器人原型样机的实验

结果,不仅肯定了该方法的可靠性,而且测量精度和目前的其他类似研究的水平大致相当。

## 参考文献 (References)

- 1 Khadraoui D, Debain C, Rouveure R, *et al.* Vision-based control in driving assistance of agriculture vehicles [J]. *The International Journal of Robotics Research*, 1998, 17(10):1040 ~ 1054.
- 2 Tillet N D, Hague T, Marchant J A. A robotic system for plant-scale husbandry[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 69(2): 169 ~ 178.
- 3 Torii Torii, Akira Takamizawa, Tsuguo Okamoto, *et al.* Crop row tracking by autonomous vehicle using machine vision (part 2)[J]. *Journal of The Japanese Society of Agricultural Machinery*, 2000, 62(5):37 ~ 42.
- 4 Wang Rongben, Xu Youchun, Li Bing, *et al.* Study on linear model based image recognition algorithm of navigation route[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2001, 18(2):47 ~ 51. [王荣本,徐友春,李兵等. 基于线性模型的导航路径图像检测算法研究[J]. *公路交通科技*, 2001, 18(2): 47 ~ 51.]
- 5 Zhang Yujin. *Image Engineering—Image Understanding and Computer Vision* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. [章毓晋编著. *图像工程——图像理解与计算机视觉* [M]. 北京:清华大学出版社,2000.]
- 6 Pinto F A C, Reid J F, Zhang Q, *et al.* Vision sensor position for guidance by using pose-guidance algorithm (PGA) [A]. In: *The 2nd IFAC/CIGR International Workshop on Bio-Robotics, Information Technology and Intelligent Control for Bioproduction Systems 2000* [C], Sakai, Osaka, Japan, November 25 ~ 26, 2000.