

文章编号:1671-5497(2006)03-0387-06

自主式移动机器人分布视觉组合导航 多摄像机标定方法

卢韶芳¹, 刘大维², 陈秉聪³

(1. 吉林大学 通信工程学院, 长春 130022; 2. 青岛大学 车辆与交通工程研究中心, 山东 青岛 266071; 3. 吉林大学 生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘要:根据分布视觉组合导航系统利用全局视觉对移动机器人进行绝对定位的要求,针对机器人远离摄像机时定位精度明显下降的问题,提出了适用于较大场景的多摄像机参数分区标定方法。在集合的概念下描述了移动机器人的整个工作区域与各个摄像机的有效区域的关系,建立了基于小孔模型的空间平面到摄像机像平面的透视变换矩阵的摄像机参数标定模型。通过4部摄像机在长9.6 m,宽6.4 m的区域内进行的标定实验和误差分析表明,该方法的整体平均误差仅为7.96 mm。

关键词:自动控制技术;移动机器人;导航;摄像机标定

中图分类号:TP242 文献标识码:A

Multi-camera calibration used in distributed vision composite navigation of autonomous mobile robot

Lu Shao-fang¹, Liu Da-wei², Chen Bing-cong³

(1. College of Communication, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Research Center for Vehicle and Communications Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 3. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Due to the fact that the distributed vision composite navigation system of the autonomous mobile robot requires making use of the overall vision to perform the absolute locating of the robot, aiming at the problem of that when the robot locates far from the camera, the locating precision will deteriorate seriously, a multi-camera parametrically partitioned calibration method suitable for large scenes was proposed. The relation between the total working region of the mobile robot and the effective region of every camera was described using the concept of set. A camera parametric calibration model was built based on the perspective transformation matrix from the space plane of the hole model to the image plane of the camera. The calibration experiment with 4 cameras in a 9.6 m × 6.4 m region and the error analysis shows that the total mean error is only 7.96 mm.

Key words: automatic control technology; mobile robot; navigation; camera calibration

收稿日期:2004-09-06.

基金项目:山东省教委资助项目(J00g54);吉林大学引进优秀人才科研启动经费资助项目.

作者简介:卢韶芳(1970-),女,副教授,博士.研究方向:移动机器人导航、摄像机标定及数字图像处理与分析.

E-mail:lusf@jlu.edu.cn

0 引言

视觉导航方式是移动机器人导航的一个主要发展方向。目前国内应用最多的还是采用在机器人上安装车载摄像机的基于路标或地图模型匹配的局部视觉导航方式^[1-3],其不足在于需要在机器人工作区域内铺设行走路径等各种路标,机器人只能按固定路径行走,不能灵活改变路径自由行走,改造和维护困难。而且由于所有的计算设备和传感器都装载在机器人车体上,图像识别、路径规划等高层决策都由车载计算机完成,所以车载计算机的工作量较大,延迟问题较为明显。全局视觉在移动机器人导航领域中的应用还很少,在国外有些移动机器人导航系统中设计了利用全局视觉作为反馈环节的机器人控制器,但多数只是作为移动机器人工作时的监控手段。因此,对于合理利用全局视觉导航方式需要进行深入研究。同时,在移动机器人视觉导航系统中,只有获得机器人及其所在工作空间中障碍物的位置,以及障碍物的运动情况才能有效、安全地进行导航,这就使得提高物体相对于某一参考坐标系的绝对定位精度显得尤其重要。由于作为局部视觉的摄像机的主要任务集中于路标识别^[4-7],同时用于局部视觉的摄像机安装位置较低,获取场景范围较小,一般的标定方法即可满足精度要求。与局部视觉不同的是,全局摄像机安装位置较高,获取的场景较大,并根据移动机器人工作范围及工作环境的复杂程度的不同,需要在环境中布置多部摄像机,这就使得摄像机的标定精度、定位坐标的计算方法成为影响移动机器人导航和定位精度的首要因素。因此,研究适用于较大场景下摄像机参数标定方法具有重要的研究意义和实用价值。

1 多摄像机分区标定

在分布视觉组合导航方式中,分布式视觉一是指作为导航的视觉部分由全局视觉和局部视觉两部分组成,即全局和局部的分布性;二是指全局视觉本身的分布性,即全局视觉是由多部摄像机组成。视觉组合指的是全局视觉与局部视觉的组合。图1为分布视觉组合导航示意图。

全局视觉是将摄像机与移动机器人分离、被

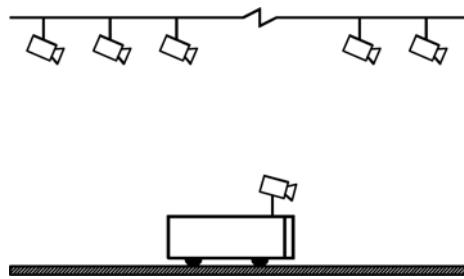


图1 分布视觉组合导航示意图

Fig. 1 Distributed vision composite navigation

置于移动机器人的活动环境中产生的视觉,其作用是对移动机器人的导航与定位。全局视觉本身是分布式的,可根据移动机器人工作范围的大小、工作环境的复杂程度、环境中障碍物的大小和分布、以及对移动机器人导航与定位精度要求的不同来选择摄像机的数量和安装位置,这同时体现了环境与移动机器人的集成思想。

在分布视觉导航系统中,利用全局视觉对移动机器人进行绝对定位时,需要对作为全局视觉的摄像机的参数进行标定。摄像机的标定包括摄像机内部参数的标定和外部参数的标定两部分。内部参数的标定是确定摄像机的内部几何和光学特性。外部参数的标定是确定摄像机在一个世界坐标系中的三维位置和方向。区分内部参数和外部参数的主要意义是当用一个摄像机在不同的位置和方向获取多幅图像进行校正时,摄像机的外部参数对于每幅图像是不同的,但内部参数不变。所以,移动摄像机后只需校正外部参数^[8-10]。

在对各个摄像机标定之前首先要对移动机器人的整个工作区域进行划分,确定各个摄像机视场范围,在各个摄像机的视场范围内对摄像机进行标定。同时还要确定各个摄像机标定参数的有效范围。考虑到当移动机器人在工作区域内运动时,定位计算需要在摄像机之间进行切换,因此相邻的摄像机的视场范围是相互重叠的,而各个摄像机的标定参数的有效作用区域(简称为有效区域)不是相互重叠的。所有作为全局视觉的摄像机标定参数的有效区域构成了移动机器人的工作区域。移动机器人的整个工作区域与各个摄像机的有效区域的关系可以借用集合的概念描述如下。

令集合 R 代表移动机器人的整个工作区域,对 R 的划分可以看作将 R 分成若干个满足以下3个条件的非空子集(即各个摄像机标定参数的有

效作用区域) R_1, R_2, \dots, R_n : ① $\bigcup_{i=1}^n R_i = R$; ② 对所有的 i 和 $j, i \neq j$, 有 $R_i \cap R_j = \emptyset$ (其中 \emptyset 是空集); ③ 对 $i = 1, 2, \dots, n$, R_i 是连通的区域。

在上述条件中, 条件①指出所有摄像机的有效区域构成移动机器人的工作区域。条件②指出各个有效区域是互不重叠的。条件③说明各有效区域内部应当是连通的。

全局视觉摄像机参数的标定是在各自的有效区域内进行的。移动机器人在某部摄像机视场范围内移动时, 即采用该部摄像机的内部和外部参数进行定位计算, 当移动机器人从一个摄像机的有效区域进入到另一个摄像机的有效区域时, 定位坐标是采用各自区域的标定参数分别计算的, 因此会产生定位坐标不连续的问题。为解决此问题可在相邻摄像机的有效区域间设置一个重叠区域, 在定位坐标计算时引入一个权值系数, 这个权值系数与移动机器人在重叠区域内所处的位置有关, 移动机器人的定位坐标是利用相邻各区域的标定参数计算出的坐标经加权平均得到的。由于权值系数的引入, 使得重叠区域内定位坐标的计算与其相邻区域的标定参数有关, 这样定位坐标的计算是渐变的而不是跳跃的, 从而保证了定位坐标的连续性。在对多摄像机进行区域划分时, 各区域可以是边长不等的矩形, 并具有相同宽度重叠的区域。假设摄像机参数的有效区域为 $d_{i1} \times d_{i2}$ 的矩形, 与相邻区域的重叠区域的宽度为 a , 则有效区域 R_i 将延伸为 $(d_{i1} + 2a) \times (d_{i2} + 2a)$ 的矩形。

在对全局视觉摄像机的透视变换矩阵标定时, 在每个摄像机的有效区域内仅标定一组参数用于绝对定位, 在移动机器人的工作范围较小、定位精度要求不高的情况下可以使算法相对简单, 而随着移动机器人工作平面的扩大, 当机器人远离摄像机时, 定位精度明显下降(相关实验数据参阅文献[11])。为解决这一问题, 现提出一种适用于较大场景的摄像机参数标定方法——摄像机参数分区标定。该标定方法是将一部摄像机的视场范围划分为若干个小区域, 在标定时各小区域利用其内部和边界上的标定点分别标定摄像机参数, 当机器人进入某一小区域, 就选取该小区域的参数进行定位计算。当移动机器人从一个小区域移动到另一个小区域时, 定位坐标是分别采用各自区域的标定参数计算的, 因此会产生定位坐

标不连续的问题。解决方法参阅文献[11]的单摄像机参数分区标定及定位坐标的平滑计算方法。

在对每部摄像机进行分区标定时, 由于移动机器人导航系统对实时性要求较高, 为简化计算要求每个摄像机内部划分的小区域均为正方形, 每个摄像机的有效区域是以小区域为单位、由不同数量的小区域组成的矩形区域, 每个小区域又分成4个大小相同的子区域。相邻的有效区域间不设重叠区, 如图2所示。图中阴影部分为不同

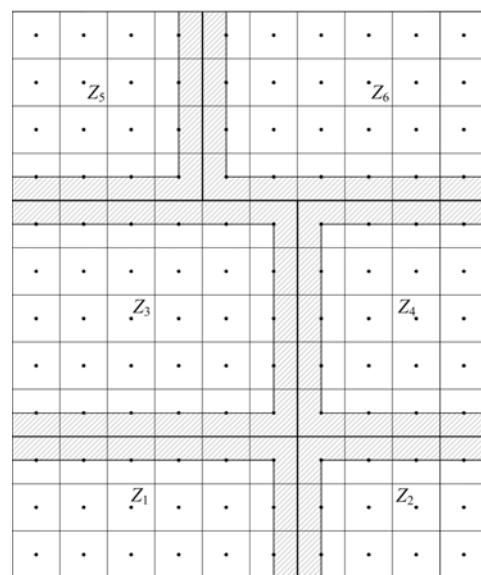


图2 多部摄像机分区标定示意图

Fig. 2 Multi-camera zoned calibration

摄像机的相邻子区域。当对定位坐标进行平滑处理且机器人在某一摄像机的有效区域内部时, 4个邻域属同一摄像机有效区域内的4个小区域, 定位计算在同一幅图像中进行, 摄像机的内部参数图像中心(c_x, c_y)和尺度因子(s_x, s_y)是相同的。当机器人在几个摄像机的有效区域的相邻子区域时, 4个邻域为某几个摄像机有效区域内中的小区域, 定位计算不是在同一幅图像中进行, 各个摄像机的内部参数和外部参数都不相同。

2 参数透视变换矩阵标定方法

由于移动机器人是在一个空间平面内运动, 这就将移动机器人的空间坐标约束在一个平面内, 为简化计算、提高系统的实时性, 在标定时只考虑空间平面与像平面之间的变换。设空间平面

W 内任一点 P 的坐标为 $P_w(x, y)$, 在摄像机的像平面 C 的投影点的坐标为 $P_c(u, v)$, 在计算机图像平面 I 的坐标为 $P_i(m, n)$ 。由空间平面坐标 (x, y) 到摄像机像平面坐标 (u, v) 之间的变换可用齐次坐标表示为:

$$\begin{bmatrix} ku \\ kv \\ k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于矩阵 A 描述的是齐次坐标间的变换关系, 可令 $a_9 = 1$, 因此变换矩阵 A 实际上共有 8 个未知量, 对于每一组对应点 (x, y) 和 (u, v) , 可得到含有 8 个未知量的 2 个方程:

$$a_1x + a_2y + a_3 - a_7ux - a_8uy = u \quad (2)$$

$$a_4x + a_5y + a_6 - a_7vx - a_8vy = v \quad (3)$$

当取 4 个标定点时, 可得到 8 个线性方程, 通过求解线性方程组可解出全部 8 个未知量。考虑到在标定过程中空间平面坐标和图像坐标取值存在随机误差, 标定点应多于 4 个, 并按照最小二乘法原理求得对各标定点的总误差为最小的最优解。

3 图像中心和尺度因子的标定

由摄像机像平面坐标 (u, v) 到计算机图像坐标 (m, n) 间的坐标变换为:

$$m = c_x + s_x u \quad n = c_y + s_y v \quad (4)$$

式中: (c_x, c_y) 为图像中心坐标; (s_x, s_y) 为尺度因子, 是摄像机图像平面上 u 方向上和 v 方向上单位距离的像素数(pixel/mm)。这 4 个参数是摄像机的内部参数, 可通过预标定得到。

3.1 摄像机图像中心 (c_x, c_y) 的标定

图像中心是光轴穿过图像平面的点。理论上, 图像中心就是计算机图像帖存中心点, 但在实际应用中, 图像的实际中心与计算机帖存中心并不重合。根据摄像机的成像原理, 当摄像机的有效焦距发生变化时, 图像会有一个缩放过程, 在这个缩放过程中只有缩放中心是保持静止的。现采用的摄像机模型为小孔模型, 假设焦距变化时, 小孔沿光轴直线运动, 则缩放中心就是光轴与图像平面的交点, 即图像中心点。在实际的变焦过程中, 当调节镜头时, 透镜是以螺旋线的形式运动的, 这就给变焦距法测出的光心添加了偶然误差。而采用 3 个不同焦距的镜头两两组合, 再采用变焦距法得到的结果较为准确。考虑到标定过程中图像坐标的取值存在随机误差, 样本点应取 $N(N \geq 2)$ 个, 利用最小二乘法求得最优解, 并求取解的平均值, 即为最终求得的图像中心坐标 c_x 和 c_y ^[12]。

3.2 摄像机尺度因子 (s_x, s_y) 的标定

计算机图像在显示器上的坐标 (m, n) 的单位是 pixel, 而摄像机像平面的坐标 (u, v) 的单位为 mm, 这就需要附加参数, 这样的参数称为尺度因子 (s_x, s_y) 。面阵 CCD 的 y 向相邻两列间的感光元件的距离是由制造商给出的, 因此, 其 y 向的尺度因子为一定值, 即:

$$s_y = \frac{\text{CCD 的 } y \text{ 向每列像素数 (pixel)}}{\text{CCD 的 } y \text{ 向尺寸 (mm)}} \quad (5)$$

面阵 CCD 的 x 向的尺度因子可以表示为: $s_x = \mu \frac{M_x}{H_x - L_x}$, 其中: H_x 为沿 x 方向(扫描线方向)两相邻传感器中心间的距离; L_x 为 x 方向传感器元素的个数; M_x 为计算机在一行列里的采样个数(像素个数); μ 是一个取决于 CCD 摄像机的不确定图像尺度因子。当使用 CCD 时, 图像是逐行扫描的, 沿像平面 v 方向相邻像素间的距离也就是相邻 CCD 感光点的距离, 但沿 u 方向存在诸如图像获取硬件和摄像机扫描硬件间的时间差, 或摄像机扫描本身时间的精确性而引入的某些不确定性因素。这些不确定性因素可通过引入不确定性因子 μ 来描述^[8]。作者采用拍摄一系列同心圆的方法来计算尺度因子 s_x 。设 d_m 和 d_n 分别是显示器上显示的圆在 m 轴和 n 轴上的直径。则: $s_x = \frac{d_m}{d_n} s_y$ 。对于每个 CCD 来说 s_y 是唯一确定的, 因此只要垂直拍摄一个圆就可以计算出其在 m 和 n 方向上的直径比, 即可求出 s_x 。在实际应用中, 为消除图像坐标取值引入的随机误差, 可拍摄一系列的同心圆, 求出 s_x 的均值^[12]。

4 多摄像机参数标定实验

实验中采用的是 SR-100AP 型彩色 CCD 摄像机, 镜头焦距为 4.0 ~ 64 mm, 分辨率为 752(H) × 582(V)。实验中分别对图像中心、尺度因子及透视变换矩阵中的各元素进行了标定。利用三镜头变焦法标定摄像机的 (c_x, c_y) , 考虑到标定过程中图像坐标的取值存在随机误差, 在试验中采用带有 12 个节点的标靶, 取 12 个样本点利用最小二乘法求得 (c_x, c_y) 的平均值。对于摄像机的尺度

因子(s_x, s_y)的标定,实验中采用的标靶由半径分别为 $r_i = 50 \times i$ (mm), $i = 1, 2, \dots, 5$ 组成的一组同心圆,经图像处理得到 d_m/d_n 的平均值。

多摄像机标定实验的区域长为9.6 m,宽为6.4 m,共设置了200多个标定点,其中一半作为控制点用于参数标定,一半作为校准点用于坐标验证,各标定点间隔为0.4 m。试验中采用4部摄像机,在世界坐标系下将实验标定区域划分为

2×2 个区域,每个区域范围为 $4.8 \text{ m} \times 3.2 \text{ m}$ 的长方形。考虑到各摄像机边界范围内的定位坐标的连续性,设置0.8 m的重叠区,因此各摄像机参数的有效范围将延伸为 $5.6 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$,试验中各摄像机的参数标定及误差统计均在此范围内进行。表1为各摄像机外部参数标定结果。图3为标定误差统计。

表1 4摄像机透视变换矩阵标定参数

Table 1 Calibration parameters of perspective transformation matrix

透视变换矩阵参数	1号摄像机	2号摄像机	3号摄像机	4号摄像机
a_1	1.429 601 879 137 20	0.803 792 933 232 78	-0.323 723 439 397 26	-0.255 809 074 789 58
a_2	-0.540 486 016 569 54	0.252 439 924 202 38	-0.101 760 624 501 43	0.112 324 376 781 09
a_3	-1.046 573 190 437 82	-4.488 963 092 321 89	1.173 210 266 744 95	0.340 375 595 840 99
a_4	-0.122 433 303 457 39	0.074 543 780 846 61	-0.022 331 760 114 52	0.014 011 250 804 61
a_5	-0.597 181 672 528 95	-0.334 593 766 614 25	0.134 134 795 638 32	0.109 508 137 999 12
a_6	1.397 924 174 782 96	0.255 071 486 260 80	-0.946 865 074 686 49	-0.857 698 814 499 74
a_7	0.147 152 608 454 51	-0.068 001 195 912 73	0.028 768 892 102 22	-0.030 929 233 999 79
a_8	0.373 143 363 228 49	0.210 024 246 379 96	-0.082 661 994 298 50	-0.066 069 298 675 95
a_9	1.000 000 000 000 00	1.000 000 000 000 00	1.000 000 000 000 00	1.000 000 000 000 00

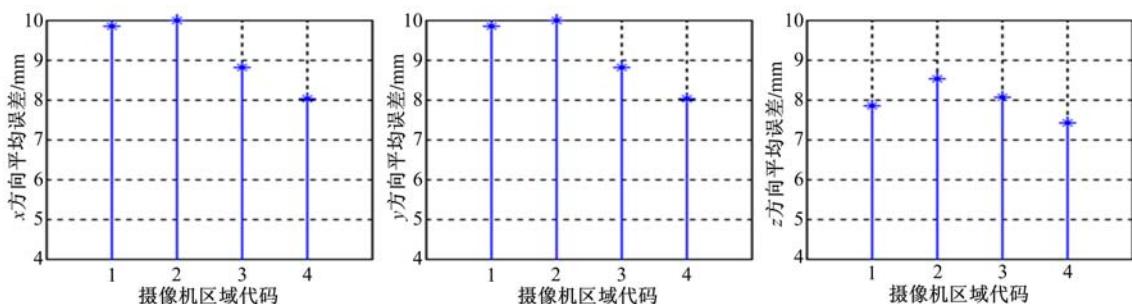


图3 多摄像机标定平均误差统计

Fig. 3 Average errors of multi-camera calibration

以上多摄像机标定实验和误差统计表明:

(1) 在利用校准点进行误差分析时发现,当透视变换参数取到小数点后第4位时即引起较大误差。因此建议在满足移动机器人导航和定位实时性要求的情况下,对透视变换参数应尽量取较多位数,以保证定位精度。

(2) 由于在试验中采用同一型号的摄像机,并且标定范围大小相同,由图3可以看出4部摄像机在x方向、y方向的平均误差和整体的平均误差较接近,4部摄像机的平均误差x方向为6.75 mm,y方向为9.16 mm,整体平均误差7.96 mm。

(3) 4部摄像机误差统计结果同时显示x方向上的平均误差小于y方向的,这一结论与文献[11]中的相同,由于实验中x方向与y方向的范围相差较小,因此两个方向平均误差的差别没有文献[11]中的明显。

5 结束语

鉴于目前国内外广泛采用的局部视觉导航方式在行走的灵活性、系统的实时性、导航的精确性以及改造和维护方面的不足,结合移动机器人与环境集成的思想,提出了移动机器人分布视觉组

合导航方式,根据分布视觉组合导航系统利用全局视觉对移动机器人进行绝对定位的要求,在集合的概念下描述了移动机器人的整个工作区域与各个摄像机有效区域的关系,针对机器人远离摄像机时定位精度明显下降的问题,提出了适用于较大场景的多摄像机参数分区标定方法。由于移动机器人的空间坐标被约束在一个平面内,为简化计算和提高系统的实时性,建立了基于小孔模型的空间平面到摄像机像平面透视变换矩阵的摄像机参数标定模型,利用求解一组线性方程的方法求得透视变换矩阵中的各个元素,利用三镜头变焦法对摄像机的图像中心进行了标定,利用垂直拍摄一组同心圆的方法对摄像机的尺度因子进行了标定。利用4部摄像机在长9.6 m、宽6.4 m区域内进行摄像机参数标定实验和误差分析。实验得到该标定方法的误差: x 方向仅为6.75 mm、 y 方向为9.16 mm、整体平均误差为7.96 mm。

参考文献:

- [1] 卢韶芳. 自主式移动机器人分布视觉组合导航基础研究[D]. 长春: 吉林大学汽车工程学院, 2002.
Lu Shao-fang. Basic study on distributed vision composite navigation of autonomous mobile robot [D]. Changchun: College of Automotive Engineering, Jilin University, 2002.
- [2] Desouza G N, Kak A C. Vision for mobile robot navigation: a survey[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(2): 237-267.
- [3] Shimizu S, Kato T, Ocmula Y, Suematsu R. Wide angle vision sensor with fovea-navigation of mobile robot based on cooperation between central vision and peripheral vision[C]//Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Maui(Hawaii, USA), 2001: 764-771.
- [4] Kim M Y, Cho H, Lee H. An active trinocular vision system for sensing mobile robot navigation environments [C]//Proceedings of 2004 IEEE IRSI International Conference on Intelligent Robots and Systems, Japan, 2004: 1698-1703.
- [5] Wijesoma W S, Kodagoda K R S, Balasuriya A P. Road-boundary detection and tracking using ladar sensing[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(3): 456-464.
- [6] Adam A, Rivlin E, Shimshoni I. Computing the sensory uncertainty field of a vision-based localization sensor [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(3): 258-267.
- [7] Gaspar J, Santos-Victor J. Vision-based navigation and environmental representations with an omnidirectional camera[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2000, 16(6): 890-898.
- [8] 章毓晋. 图像工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [9] 张艳珍, 欧宗英. 一种新的摄像机线性定标方法[J]. 中国图像图形学报, 2001, 6(A版)(8): 727-731.
Zhang Yan-zhen, Ou Zong-ying. A new linear approach for camera calibration[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(A)(8): 727-731.
- [10] 邱茂林, 马颂德, 李毅. 计算机视觉中摄像机定标综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 43-55.
Qiu Mao-lin, Ma Song-de, Li Yi. Over view of camera calibration for computer vision [J]. Acta Automatica Sinica, 2000, 26(1): 43-55.
- [11] 卢韶芳, 刘大维, 李娟, 陈秉聪. 自主式移动机器人定位坐标平滑算法研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(1): 96-99.
Lu Shao-fang, Liu Da-wei, Li Juan, Chen Bing-cong. Smooth method for orientation coordinate of autonomous mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 35(1): 96-99.
- [12] 方勇, 高立志, 林志航. 智能检测系统中摄像机的内参数标定方法研究[J]. 机器人, 1998, 20(2): 148-152.
Fang Yong, Gao Li-zhi, Lin Zhi-hang. The research on calibration method of camera intrinsic factors in the intelligent CMM inspection system[J]. Robot, 1998, 20(2): 148-152.

(责任编辑 程仲基)