

文章编号:1000-582X(2011)08-066-05

基于平面标靶的物体空间姿态精确测量

周传德¹, 王 见², 尹爱军²

(1. 重庆科技学院 机械与动力工程学院, 重庆 401331; 2. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

摘 要:论文在研究平面标靶合作标识的精确识别算法和图形空间向量变换模型基础上,建立了空间姿态测量算法模型与软件流程,并提出了一种新的拓扑定位方法,并以模拟汽车四轮定位视觉测量为例进行验证,结果表明该方法具有较好的抗遮挡能力,较宽的测量范围和较高的测量精度,为采用平面靶标组建的机器视觉测量系统提供了一种可行的方法。

关键词:机器视觉;平面标靶;姿态测量;精密仪器

中图分类号:TH11, TH7

文献标志码:A

Accurate measurement for objects space attitude based on planar target

ZHOU Chuan-de¹, WANG Jian², YIN Ai-jun²

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, P. R. China; 2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: On the basis of studying the accurately identification algorithm of planar target and transformation model of the space vector, the imaging target models and spatial attitude measurement models are established. Then, a new topological positioning method is put forward. Finally, the four-wheel location measurement is given as an example. The results demonstrate that the method has better anti-interference and higher measurement precision, which provides a feasible method for a machine vision measurement system by using the plane target.

Key words: machine vision; plane target; attitude measuring; precision instruments

采用平面靶标组建的虚拟空间靶标对计算机视觉系统标定,可以赋予其精确的测量能力,国内外广泛开展了利用类似平面棋盘实现单目相机或多目相机的参数校正研究^[1-3],目前最为流行的离线相机标定算法一是 Tsai 提出的使用一个带有非共面专用标定标识的三维标定物来提供图像点和其对应的三维空间点的对应并计算标定参数,称为 Tsai 法;一是微软亚洲研究院 Zhang 提出的另一个实用方法,该方法需要对一个平面标定图案的至少两幅不同视图来进行标定,称为 Zhang 法。它们广泛应用

于机器视觉测量工程中,取得了很好应用效果。在工程实践应用中也可直接借助平面靶标实现对特定对象的空间姿态测量,如美国杰奔公司采用基于特定标靶和透视学原理巧妙结合的专利技术实现 V3D 汽车四轮定位的快速高精度影像测量,但其核心技术受专利保护且比较保密;近几年来国内在国家自然科学基金等支持下,很多高校或研究重点院所开展了相关理论和具有自主知识产权视觉测量系统的研究,如天津大学精密测试技术及仪器国家实验室的叶声华院士研究团队等开展了新型方向性平面靶

收稿日期:2011-03-23

基金项目:国家 863 计划资助项目(2008AA042408);重庆市教育委员会科学技术研究资助项目(KJ091403)

作者简介:周传德(1978-),重庆科技学院副教授,主要从事信号分析与处理、机电测试及新型传感器等方向的研究工作,
(E-mail)zcd0013@163.com。

标及拓扑定位算法的研究,四川大学刘元坤、苏显渝等开展了平面相位标靶和基于平面标靶的相机标定研究,提出多种平面标靶及其识别、校正算法,其结果主要用于相机的标定。

论文针对机械晃动检测、环境的变形监测等工程应用,在平面棋盘实现相机参数校正的识别和算法基础上,提出利用通用平面标靶和空间向量基本变换,研究一种通用性更强、对环境条件限制更少的物体空间姿态测量方法及其软件实现。该方法不仅可以减少人工操作的复杂性,还可以满足不便直接测量的环境需求,扩大测量范围和提高测量精度。

平面靶标处理的难点在于如何精确获得靶标图像中特征点的实际位置关系,即拓扑定位。论文设计了一种方向型标靶,通过机械加工保证平面标靶特征点的空间精度,通过模式识别和拟合高精度提取标识成像点的坐标,按照空间向量变换模型建立算法测量标靶相对于相机坐标系的姿态,进而可转换为其它需要的工程参数。

1 平面标靶空间姿态测量模型

论文设计了一种方向性平面靶标,如图1所示,它以简单的圆形和圆环作为靶标设计图案,根据三个特殊圆环标识的特定位置关系靶确定标靶大致空间位置,基于圆心的共线性规则提出精确的拓扑定位算法,适应不同场合的需求,且标靶易于设计、加工和自动化处理,在实际项目中得到成功应用。

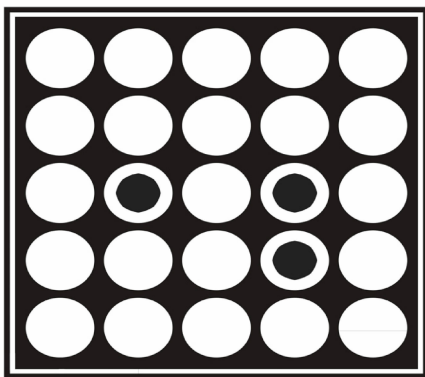


图1 新型方向平面标靶

基于平面靶标的摄像机模型实质是物体在标靶坐标系、世界坐标系、相机坐标系、成像坐标系和计算机图像之间的转换。标靶坐标系以标靶中心为原点,XY轴在标靶平面内,Z轴垂直标靶,则标靶标识P在标靶坐标系下的坐标 (x, y_1, z_1) 是已知,且 $z_1 = 0$;世界坐标系根据具体环境来定, (x_w, y_w, z_w) 表示

物点P在世界坐标系下的三维坐标;相机坐标系原点 O_c 定义在摄像机的光心, Z_c 轴与光轴重合,三轴由相机安装位置决定,对于安装好的相机,它与世界坐标系的关系固定。相机成像坐标系XY轴与相机坐标系XY轴平行,Z轴与相机坐标系Z轴重合,物点P成像点在成像坐标系下的坐标 (x_u, y_u) 与相机坐标系下点坐标 (x_c, y_c, z_c) 的按小孔成像原理从数学推导上如式(4),可以从相机坐标系下点坐标 (x_c, y_c, z_c) 计算成像图像坐标(像素),但不能由成像坐标系 (x_u, y_u) 反求相机坐标系下点坐标 (x_c, y_c, z_c) ,但数学关系是存在且正确的。计算机图像坐标系 (u, v) 分别表示像素点位于数组的列数和行数,代表物理位置 $u \times dx$ 微米, $v \times dy$ 微米(dx, dy 为相机 x, y 分辨率)。

从标靶坐标系到相机坐标系的变化如式(1)所示,式中 \mathbf{R}_0 为确定值, \mathbf{R}_1 为待求值,它与物体空间姿态相关, \mathbf{R} 包含 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_0$ 信息,在已知其中一组可求解另一组,且 $\mathbf{R}_0, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}$ 均为单位正交矩阵。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} &= [\mathbf{R}_0 \mathbf{T}_0] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{R}_0 \mathbf{T}_0] [\mathbf{R}_1 \mathbf{T}_1] \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= [\mathbf{R}_0 \mathbf{T}_0] [\mathbf{R}_1 \mathbf{T}_1] \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = [\mathbf{R} \mathbf{T}] \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t_1 \\ r_4 & r_5 & r_6 & t_2 \\ r_7 & r_8 & r_9 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

根据相机成像原理,相机坐标系到成像坐标系的变换如式(2)所示,如只考虑一阶畸变系数,计算机图像坐标与相机成像坐标关系可简化描述式(3)。

$$\begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c/z_c \\ y_c/z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} u &= (1 + k_1(x_u^2 + y_u^2)) \cdot x_u/d_x + u_0, \\ v &= (1 + k_1(x_u^2 + y_u^2)) \cdot y_u/d_y + v_0. \end{aligned} \right\} (3)$$

由式(1)-(3)可得

$$\begin{aligned} \frac{(u - u_0) \cdot d_x}{(v - v_0) \cdot d_y} &= \frac{x_u}{y_u} = \frac{x_c}{y_c} = \frac{r_1 x_1 + r_2 y_1 + t_1}{r_4 x_1 + r_5 y_1 + t_2} = \\ &= \frac{x_1 + (r_2/r_1)y_1 + (t_1/r_1)}{(r_4/r_1)x_1 + (r_5/r_1)y_1 + (t_2/r_1)} = \\ &= \frac{x_1 + Ay_1 + B}{Cx_1 + Dy_1 + E} \end{aligned} \quad (4)$$

dx/dy 可近影标定获得。通过标靶中任意 5 点标识圆心坐标及其对应图像中坐标可求得 A 、 B 、 C 、 D 和 E 。根据 R 为单位正交阵性质,可解算出矩阵 R ,如式(5)所示。

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \sqrt{\frac{1}{1+A^2+C^2+D^2}}, \\ r_2 &= Ar_1, \\ r_3 &= \pm\sqrt{1-r_1^2-r_2^2}, \\ r_4 &= Cr_1, \\ r_5 &= Dr_1, \\ r_6 &= \pm\sqrt{1-r_4^2-r_5^2}, \\ r_7 &= r_2r_6-r_3r_5, \\ r_8 &= r_3r_4-r_1r_6, \\ r_9 &= r_1r_5-r_2r_4. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在空间姿态测量中可假定某一状态为参考基准,即将此时的标靶坐标系定义为世界坐标系,可得到 R_0 ,即可从 R 求得任意空间姿态的旋转矩阵 R_1 ;或者通过物体的特定运动提取世界坐标系。此方法求取空间姿态,不受畸变影响,算法简单,但需要达到更高精度需要相机具有很高的分辨率或者能够得到很高精度的细化亚像素,然而相机的分辨率、传输速度是一对矛盾,且高分辨率工业相机价格昂贵,论文讨论通过研究合作标识的高精度亚像素识别解决这一矛盾。

2 标靶识别及圆心亚像素细化

标靶快速识别处理算法^[4-10]流程如图 2 所示,首先通过自适应阈值将图像二值化,鉴于合作标识在成像中旋转、缩放甚至扭曲现象,整体标靶识别困难或耗时,以搜索二值化图像的圆形轮廓为基础,以设定圆点面积范围、长短轴比例关系剔除非标识点,以标识间距离关系为约束如式(6)对圆点进行聚类,如果集合 B 内元素超过 20 个认定有效标识区域, B 内元素从标识点集合 A 中剔除,后继续以新的元素开始搜索;如果 B 内元素少于 20 个,剔除 B 的初始元素,并以新的元素开始搜索,直至 A 内元素小于 20 个止。

$$\left. \begin{aligned} p(x,y) &\subseteq A, \\ B &= \{p(x,y) \mid 0.9F_0 < F(p(x,y),B) < 1.1F_0\}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 B 以包含 1 个 $p(x,y)$ 为初始条件, $F(p(x,y),B)$ 含义为点 $p(x,y)$ 到 B 集合内所有点距离的最小值, F_0 为动态变化值,取第一次 $F(p(x,y),B)$ 计算值。

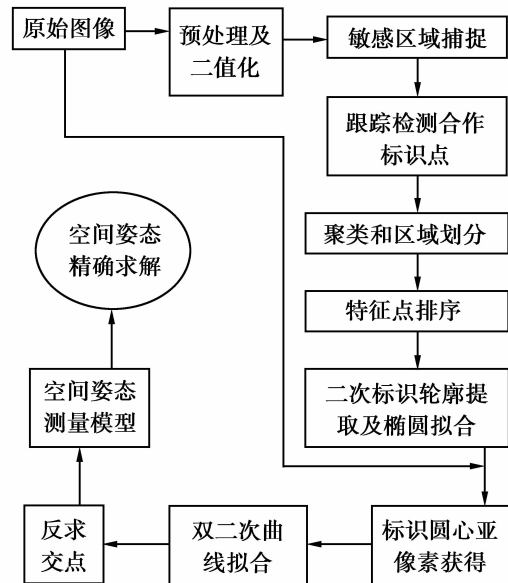


图 2 标识快速识别及亚像素细化流程图

聚类结束后对有效标识区内各圆点进行区域划分,剔除干扰点或补充缺失点,以及对识别点排序,如图 3 所示,建立图像中标识点与实物标靶标识点的拓扑定位关系。

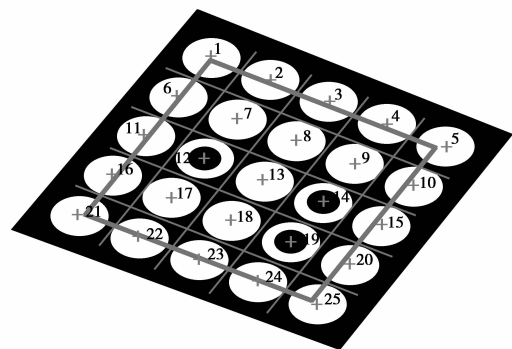


图 3 合作标识点拓扑定位及排序

对识别圆进行二次较精确轮廓提取^[11-15],椭圆拟合并扩展 2 像素,采用式(7)得到亚像素圆心坐标 (x_0, y_0) ,对获取的亚像素坐标进行最小二乘法曲线拟合求交补齐,得到更精确的亚像素坐标。

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \frac{\sum_x \sum_y xI(x,y)}{\sum_x \sum_y I(x,y)}, \\ y_0 &= \frac{\sum_x \sum_y yI(x,y)}{\sum_x \sum_y I(x,y)}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

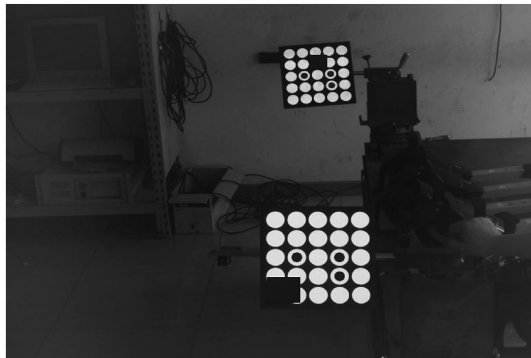
该方法能对一幅图像内多个标靶进行快速识别,且对 5 个且不连续的标识圆点有遮挡或缺失的情况也可进行较精确测量和像点恢复。

3 汽车四轮定位中的应用

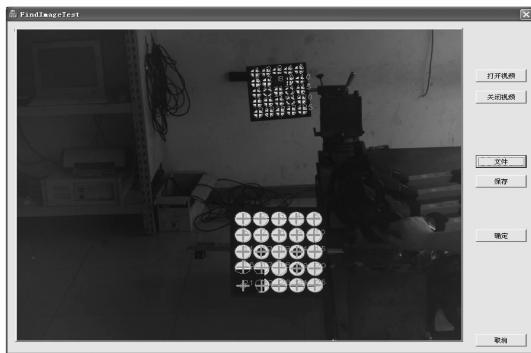
项目以精密实验转动试验台模拟汽车四轮定位测试^[16],应用本文介绍的基于平面标靶和空间向量的测量方法,借助 OpenCV 丰富的函数库编制测试程序,进行了车轮定位参数检测。使用笔者设计的

$$\mathbf{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta + n_1^2(1 - \cos\theta) & n_1 n_2(1 - \cos\theta) - n_3 \sin\theta & n_1 n_3(1 - \cos\theta) + n_2 \sin\theta \\ n_1 n_2(1 - \cos\theta) + n_3 \sin\theta & \cos\theta + n_2^2(1 - \cos\theta) & n_2 n_3(1 - \cos\theta) - n_1 \sin\theta \\ n_1 n_3(1 - \cos\theta) - n_2 \sin\theta & n_2 n_3(1 - \cos\theta) + n_1 \sin\theta & \cos\theta + n_3^2(1 - \cos\theta) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 (n_1, n_2, n_3) 为旋转轴向量, θ 为旋转角度。



(a) 实验现场照片



(b) 分析处理结果

图 4 空间姿态测量实验图像

表 1 实验数据及计算结果

序号	实际偏转角(°)		测算偏转角(°)		相对误差(°)	
	前转盘	后转盘	前标识	后标识	前标识	后标识
1	1	0	0.816	0.003	-0.184	0.003
2	15	0	14.854	0.014	-0.146	0.014
3	15	10	14.856	9.925	-0.144	-0.075
4	20	10	20.028	9.918	0.028	-0.082
5	30	20	29.885	19.988	-0.115	-0.012
6	40	30	39.773	29.864	-0.227	-0.136

5×5 自制目标标靶,将目标靶固定在前后转轮上,如图 4 所示,对设备进行绕水平、前后、垂直三方向轴复合运动,使用 130 万红外相机拍摄系列照片,以假定空间原始状态为世界坐标系进行标定求解 R_1 ,并按式(8)分析计算旋转向量及旋转角,取绕水平轴旋转的 6 张照片进行计算,结果如表 1 所示。

误差主要为世界坐标系—物体坐标系标定、照相分辨率等误差的累积,实验表明该测量方法具有对手挡或部分标识缺少自动插补的抗干扰和抗遮挡能力,有较宽的测量范围。

4 结 论

1) 基于圆斑识别、区域划分和特殊标识位置,实现拓扑定位方法,具有速度快,在不多于 4 个标识点收到严重干扰或遮挡时仍能较好测量和复原。

2) 基于平面标靶和成像标识的平面约束关系,在各标识点细化后可进一步拟合校正或校验,以降低测量的不确定和提高测量的精度。

3) 在求解空间变换矩阵时如何利用 25 组标识点数据得到最优解有待完善,使测量精度进一步提高。

参考文献:

- [1] 邹凤娇,苏显渝,李美菊,等. 基于共面点的摄像机线性标定法[J]. 光电工程,2005,32(4):70-74.
ZOU FENG-JIAO,SU XIAN-YU,LI MEI-JU. Camera linear calibration method with a coplanar target[J]. Opto-Electronic Engineering,2005,32(4):70-74.
- [2] 余俊,林家明,杨建宇,等. 基于新型靶的 CCD 摄像系统畸变测量与校正[J]. 光学学报,2007,27(8):1440-1442.
YU JUN,LIN JIA-MING,YANG JIAN-YU,et al. Distortion measurement and calibration technology for CCD camera system based on new target board[J]. Acta Optica Sinica,2007,27(8):1440-1442.
- [3] PETKO J S,WERNER D H. Pareto optimization of thinned planar arrays with elliptical mainbeams and low sidelobe levels[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2011,59(5):1748-1751.
- [4] PAN L Z,XIAO X H. Image recognition for on-line vibration monitoring system of transmission line[C]//

- 9th International Conference on Electronic Measurement and Instruments, August 16-19, 2009, Beijing, China, USA: IEEE, [2009-10-02]: 1078-1081.
- [5] 郭永彩, 高潮, 杨阳, 等. 视频显示的小尺寸工件精密测量方法[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(2): 82-85.
GUO YONG-CAI, Gao Chao, YANG YANG, et al. Precise measurement system of small workpiece base on video[J]. Journal of Chongqing University, 2011, 34(2): 82-85.
- [6] AN M, JIANG Z G, ZHAO D P, et al. The class-specific down-looking target localization combining recognition and segmentation[C] // 2010 International Conference on Optoelectronics and Image Processing, November 11-12, 2010, Hainan, China. USA: IEEE, [2011-02-13]: 522-528.
- [7] 孙中森, 孙俊喜, 宋建中. 一种抗遮挡的运动目标跟踪算法[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 267-271.
SUN ZHONG-SEN, SUN JUN-XI, SONG JIAN-ZHONG, et al. Anti-occlusion arithmetic for moving object tracking[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 267-271.
- [8] 魏振忠, 张广军. 视觉检测中椭圆中心成像畸变误差模型研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 140-143.
WEI ZHEN-ZHONG, ZHANG GUANG-JUN. Distortion error model of image of ellipse center in 3D visual inspection[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(2): 140-143.
- [9] 杨永跃, 邓善熙, 王训四. 视觉成像畸变的直线透视校正[J]. 应用科学学报, 2006, 24(6): 627-632.
YANG YONG-YUE, DENG SHAN-XI, WANG XUN-SI. Correction of anamorphic vision image with perspective lines[J]. Journal of Applied Sciences, 2006, 24(6): 627-632.
- [10] BABU G D, BABU K S, GOWD B U M, et al. Evaluation of surface roughness using machine vision [C] // 2010 International Conference on Emerging Trends in Robotics and Communication Technologies, December 3-5, 2010, Chennai. USA: IEEE, [2011-01-31]: 220-223.
- [11] 韩斌, 周增雨, 王士同. 改进的亚像素级快速角点检测算法[J]. 江苏科技大学学报: 自然科学版, 2009, 23(2): 146-149.
HAN BIN, ZHOU ZENG-YU, WANG SHI-TONG. Improved sub-pixel rapid corner detecting algorithm [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 23(2): 146-149.
- [12] 罗钧, 侯艳, 付丽. 一种改进的灰度矩亚像素边缘检测算法[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(5): 549-543.
LUO JUN, HOU YAN, FU LI. An improved algorithm for subpixel edge detection using gray moment [J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(5): 549-543.
- [13] 丁兴号. 基于小波变换的亚像素边缘检测[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8): 801-804.
DING XING-HAO. Sub-pixel edge detection based on wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(8): 801-804.
- [14] 王成亮, 邹峥嵘, 闰海庆, 等. 亚像素定位的关键问题研究[J]. 海洋测绘, 2007, 27(1): 70-73.
WANG CHENG-LIANG, ZOU ZHENG-RONG, LV HAI-QING, et al. Research on the key problems of subpixel location of control point image in quasi-2D control field [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2007, 27(1): 70-73.
- [15] CHO J, JEON G, SUH J W, et al. Sub-pixel motion estimation scheme using selective interpolation [J]. IEICE Transactions on Communications, 2008, 91(12): 4078-4080.
- [16] 张铁楠, 涂亚庆, 王德超. 基于计算机视觉的汽车四轮定位技术研究[J]. 电子测量技术, 2008, 31(4): 52-56.
ZHANG TIE-NAN, TU YA-QING, WANG DE-CHAO. Study of wheel alignment based on computer vision [J]. Electronic Measurement Technology, 2008, 31(4): 52-56.

(编辑 张小强)