

激光与光电子学进展

一种基于射影不变原理的靶标及其解码方法

王竞焯, 汪毅*, 张佳琛, 蔡怀宇, 陈晓冬

天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 针对目前摄影测量领域中编码靶标解码算法复杂和解码正确率易受拍摄角度影响的问题,设计一种基于射影不变原理的编码靶标及其解码方法。该编码靶标的模板包含一个基准圆和若干个编码圆,从模板中任选4个编码圆与基准圆以组成靶标,通过选择不同的编码圆组合来实现编码功能。解码过程中,利用基准圆和编码圆的几何位置关系和面积关系,实现基准圆和编码圆的快速自动定位;通过计算靶标中5个圆的圆心交比这一射影不变量,实现靶标的快速自动解码。实验结果表明,由于将射影不变量作为编码信息,当拍摄角度较大时,所设计的靶标的解码正确率高于传统的编码靶标,在60°的大角度下拍摄可以达到100%的解码正确率。

关键词 测量; 摄影测量; 机器视觉; 靶标; 解码算法; 交比

中图分类号 TP391 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1312001

Target and Decoding Method Based on Projective Invariance Principle

Wang Jingxuan, Wang Yi*, Zhang Jiachen, Cai Huaiyu, Chen Xiaodong

Key Laboratory of Photoelectric Information, Ministry of Education, School of Precision Instruments and Optoelectronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Aiming at the problem that the decoding algorithm of encoding target is complicated and the decoding accuracy is easily affected by the shooting angle in the field of photogrammetry, a encoding target and its decoding method based on the principle of projective invariance are designed. The template of the coded target includes a reference circle and several coded circles, 4 coded circles and reference circles are selected from the template to form the target, and the coding function is realized by selecting different coded circle combinations. In the decoding process, the geometric position and area relationship between the reference circle and the code circle are used to realize the rapid and automatic positioning of the reference circle and the code circle. By calculating the projective invariant of the intersection ratio of the center of five circles in the target, the fast automatic decoding of the target is realized. The experimental results show that the decoding accuracy of the designed target is higher than that of the traditional coding target when the shooting angle is large, because the projective invariant is used as the encoding information, and the decoding accuracy of the designed target can reach 100% when the shooting angle is 60°.

Key words measurement; photogrammetry; machine vision; targets; decoding algorithms; cross ratio

OCIS codes 120.6650; 120.4630; 120.4820; 100.4994

收稿日期: 2020-10-20; 修回日期: 2020-12-05; 录用日期: 2020-12-14

基金项目: 天津交委科技发展计划(2019C-05)

通信作者: *koala_wy@tju.edu.cn

1 引言

基于编码靶标的摄影测量技术具有高效率、低成本和非接触等优点,广泛应用在各行各业。目前,摄影测量任务已经从静态测量发展到动态位姿测量,如汽车的在线组装检测、机械臂的运动监控、机器人的寻迹监控、飞机起落架收折过程的监控、天线阵面的变形测量以及航天器的姿态检测等。在航天器的研制过程中,星箭分离、太阳翼展开、天线展开和冲击等任务都需要采用动态测量。摄影测量技术是使用相机从不同角度来拍摄贴有靶标的被测物体,通过多幅图像中匹配到对应靶标的平面坐标来恢复被测物体的位姿信息^[1-6]。靶标的准确匹配对保证精确的摄影测量具有重要意义。为了实现高匹配准确率,需要对靶标进行准确解码。

相机采集靶标图像的过程是透视投影的过程^[7-9],由于相机光轴难以与靶标平面保持垂直,所以经过透视投影成像可以使靶标产生形变。现有的靶标解码方法首先提取靶标中的点图案或者圆环图案^[10-11],然后使用仿射变换来矫正变形的图案^[12],最后比对矫正后的编码图案与标准编码图案,从而解出编码信息。该仿射变换过程会导致靶标解码繁琐耗时,而且无法准确还原靶标^[11,13]。拍摄过程中,相机越倾斜,仿射变换的误差越大,靶标解码的正确率越低。由于动态测量中机器人和航天器等被测目标的位姿变化范围较大,不能保证相机光轴与靶标平面总是垂直,所以相机会大角度倾

斜拍摄,而且使用现有靶标进行摄影测量易解码错误,解码效率低。目前,多采用人工方法来寻找识别错误的靶标并对其进行纠正,但工作量大,耗时长。

为了提高倾斜拍摄靶标解码的正确率,崔晓斐等^[14]提出了一种立体靶标;Moriyama等^[15]提出了一种彩色靶标。立体靶标和彩色靶标的制作工艺复杂,且靶标颜色的识别易受到照明光的影响,而且立体靶标也不易被固定。

为了解决上述问题,本文提出一种简单易制作且基于射影不变原理的黑白靶标及其解码方法。与现有靶标相比,该靶标具有如下特点。采用射影不变量作为编码信息具有射影不变性,具备抗拍摄角度大范围变化的能力,靶标解码过程中不需要仿射变换矫正,解码算法更简洁。

2 基本原理

2.1 编码靶标的射影不变原理

与传统靶标不同,设计的靶标不采用编码图案的绝对位置作为编码信息,而是利用靶标图案所计算出的交比作为编码信息。交比是一种射影不变量,即在透视投影后不发生变化的量^[16]。点 β 、 γ 、 δ 和 η 与点 α 的连线可以看作从 α 发出的线束,如图1所示。令

$$M(i, j, k) = \begin{vmatrix} x_i & x_j & x_k \\ y_i & y_j & y_k \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, (i, j, k \in \{\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta\}), (1)$$

式中: x_i 和 y_i 分别为点 i 的横坐标和纵坐标,则交比可以表示为^[17]

$$R(\beta, \gamma, \delta, \eta) = \frac{\sin \angle \beta \alpha \delta \cdot \sin \angle \gamma \alpha \eta}{\sin \angle \gamma \alpha \delta \cdot \sin \angle \beta \alpha \eta} = \frac{M(\alpha, \beta, \delta) \cdot M(\alpha, \gamma, \eta)}{M(\alpha, \gamma, \delta) \cdot M(\alpha, \beta, \eta)}. (2)$$

透视投影过程可以使用透视变换矩阵来表示,令透视变换矩阵为 T ,透视变换后 $M(i, j, k)$ 可表示为

$$M'(i, j, k) = |T| M(i, j, k). (3)$$

透视变换后的交比可以表示为

$$R'(\beta, \gamma, \delta, \eta) = \frac{M'(\alpha, \beta, \delta) \cdot M'(\alpha, \gamma, \eta)}{M'(\alpha, \gamma, \delta) \cdot M'(\alpha, \beta, \eta)} = R(\beta, \gamma, \delta, \eta). (4)$$

由(4)式可知,交比值与相机视点位置以及相机内、外参都无关,所以利用交比作为编码信息的靶标具有抗大范围拍摄角度变化的能力,靶标解码不需要进行仿射变换。

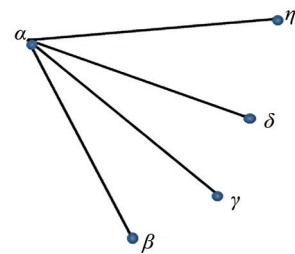


图1 线束示意图

Fig. 1 Wiring harness diagram

2.2 基于射影不变原理的编码靶标的设计

基于2.1节的射影不变原理,设计一种靶标,靶标模板如图2(a)所示。模板包含一个基准圆和

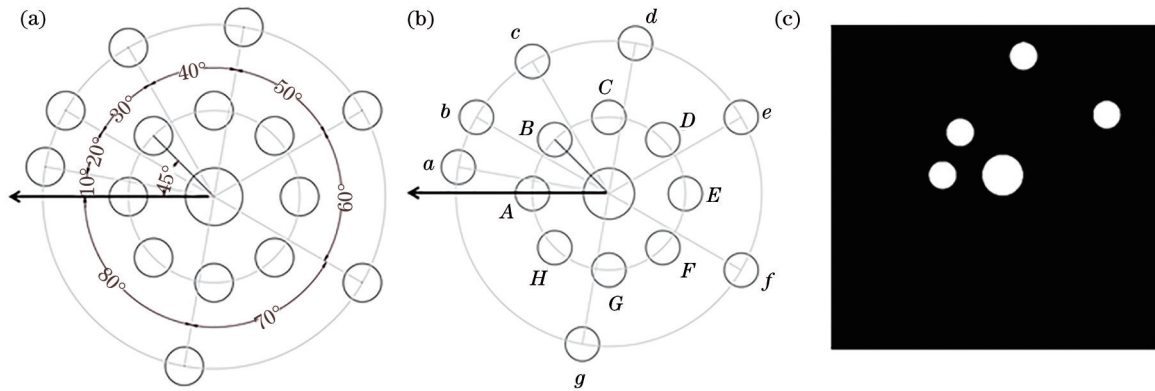


图2 编码靶标构成。(a)靶标模板;(b)编码圆对应名称;(c)编码靶标举例

Fig. 2 Coding target composition. (a) Target templates; (b) corresponding name of coding circle; (c) example of coding targets

15个编码圆,其中基准圆的面积比编码圆大,所有编码圆的面积均相等。设基准圆的半径为 L ,则编码圆的半径为 $2L/3$ 。设置两个同心圆环,两个同心圆环中内环的半径为 $3L$,外环的半径为 $6L$ 。基准圆的圆心在同心圆环的圆心处,8个编码圆的圆心均匀地分布在内环上,相邻圆心对应的圆心角如图2(a)所示。7个编码圆的圆心在外环上,采用非均匀分布的方式以防靶标重复。靶标圆由不同的字母来标记,如图2(b)所示。从外环上任意选两个编码圆,从内环上任意选两个编码圆,被选出的4个编码圆与基准圆组成靶标,即选择 A 、 B 、 d 和 e 4个编码圆和基准圆 O 来构成靶标,如图2(c)所示。

以图2(c)的靶标为例,对于内环上的两个圆,规定点 A 为交比公式中的第一个点,点 B 为第二个

点, OA 绕点 O 顺时针旋转(旋转角小于 180°)与 OB 重合。同理,对于外环上的两个圆, d 为第三个点, e 为第四个点,则由(2)式可推得交比 $R(A, B; d, e)$ 为

$$R(A, B; d, e) = \frac{M(O, A, d) \cdot M(O, B, e)}{M(O, B, d) \cdot M(O, A, e)} \quad (5)$$

为了提高靶标解码的稳定性,选择基准圆和内环上两个编码圆的圆心作为线束交点并分别计算三个交比值,将其作为一个靶标的编码信息。该靶标的三个交比分别为 $R(A, B; d, e)$ 、 $R(O, B; d, e)$ 和 $R(O, A; d, e)$,如图3所示。不选择外环上两个编码圆的圆心作为线束交点的原因是当外环上编码圆的圆心为线束交点时,交比值可能为0或者无穷大,则靶标无法携带编码信息。

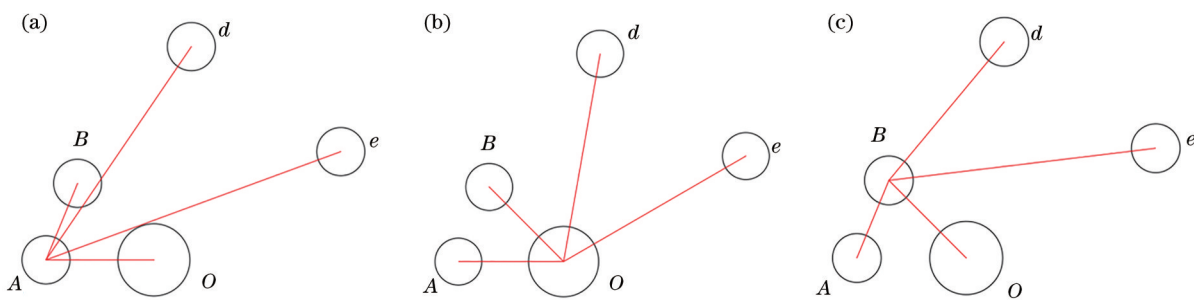


图3 一个靶标对应的三个线束。(a)情况1;(b)情况2;(c)情况3

Fig. 3 Three wire harnesses for one target. (a) Situation 1; (b) situation 2; (c) situation 3

为了保证编码信息的唯一性,删除了交比值相同或者过于相似的靶标。利用欧氏距离 ρ 来衡量两个靶标交比值的相似性,当两个靶标的 ρ 值小于阈值时,删除其中一个靶标。设某个靶标的三个交比值分别为 a_1 、 b_1 和 c_1 ,另一个靶标的三个交比值分别为 a_2 、 b_2 和 c_2 ,则 ρ 的计算公式为

$$\rho = (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2 + (c_1 - c_2)^2 \quad (6)$$

由(2)式可知,交比值的范围为 $(-\infty, \infty)$ 且分布不均匀,这不利于确定阈值,所以利用

$$C = \left[\frac{|K|}{4} - 1 \right] / \left[\frac{|K|}{4} + 1 \right] \quad (7)$$

对每个靶标的三个交比值都进行归一化处理,使得交比值均匀地分布在 $[0, 1]$ 之间。式中: K 为原始交比值; C 为归一化后的交比值,归一化后的交比值范围

为(0, 1)。(6)式中的交比值为归一化后的交比值。取经验阈值0.001,可以得到192个靶标。使用192个靶标及每个靶标所对应的三个归一化后的交比值组

成一套靶标,该套靶标的数量满足摄影测量的需求。
2.3 基于射影不变原理的编码靶标的解码方法
 靶标的解码流程如图4所示,解码步骤如下。

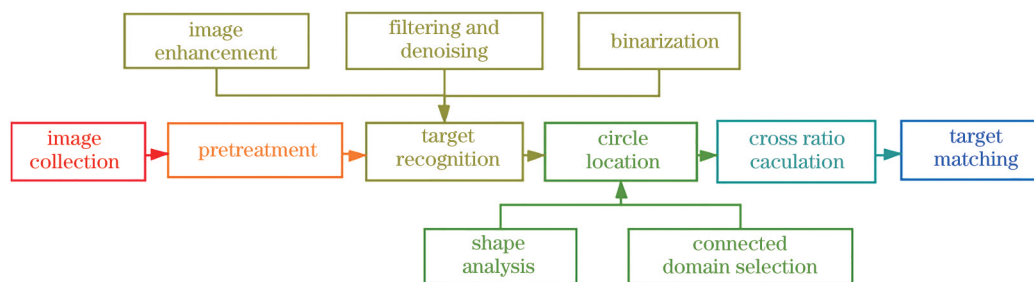


图4 靶标的解码流程

Fig. 4 Decoding process of target

1) 采集图像与预处理图像

对采集到包含多个靶标的灰度图像进行预处理,包括图像增强和中值滤波去噪,并利用目前在摄影测量领域应用较为广泛的极大类间方差法对其进行二值化处理^[18]。

2) 识别靶标

利用文献[19]的算法来提取靶标的轮廓,但提取的图像中可能包含不完整的靶标和一些干扰因素。实际拍摄的过程中,编码靶标的尺寸固定,拍摄距离通常也限制在一定范围内,因此过大或过小的识别结果均为干扰因素,利用靶标轮廓的面积和长度信息来去除干扰因素以识别靶标。所设计的靶标的前景和背景的对比度较高,所以可以进一步去除干扰因素,然后结合靶标的矩形度和圆度信息来识别靶标^[20],再通过限定靶标背景中圆的总数为5来识别完整的编码靶标。

3) 定位圆心

在识别整幅图像中的靶标和每个靶标中的5个圆以后,采用区域灰度重心法并利用目标区域的像素灰度值作为权重,对各个位置进行加权处理以求取每个圆的圆心。

4) 计算交比

对圆心进行排序。首先识别面积最大的基准圆,将其圆心设为第一个元素 α 。通过计算剩余4个圆的圆心与基准圆的圆心的距离,可以区分内环上和外环上的编码圆。如果内环上的编码圆能够通过顺时针旋转(旋转角小于 180°)与另一个内环上的编码圆重合,则前者为第二个元素 β ,后者为第三个元素 γ 。同理对外环上的两个编码圆排序,分别为 δ 和 η 。计算该靶标的三个交比值,分别为 $R(\beta, \gamma, \delta, \eta)$, $R(\alpha, \gamma, \delta, \eta)$ 和 $R(\alpha, \beta, \delta, \eta)$ 。

5) 匹配靶标

将所有靶标及每个靶标所对应的三个归一化

后的标准交比值组成一套靶标,标准交比值是在相机光轴与靶标平面垂直的情况下计算出的交比值。利用(6)式计算待解码靶标的三个归一化交比值与标准靶标的归一化交比值的相似度,从而找到最近的标准交比值所对应的靶标。

3 实验结果与分析

3.1 实验器材与实验场景

实验选用的相机为佳能EOS5D Mark III,分辨率为 $5760 \text{ pixel} \times 3840 \text{ pixel}$,像元尺寸为 $3.5 \mu\text{m} \times 3.5 \mu\text{m}$;镜头型号为佳能EF24-105 mm f/4L IS II USM,该相机的焦距为37 mm。在摄影测量工业产品的过程中,拍摄距离一般在5 m以内。设计靶标参数 L 为0.7 cm,整个靶标的尺寸为10 cm。实验测试场景如图5(a)所示,相机被固定在三角架上,贴有靶标的白板直立在测试平台上,白板底部固定

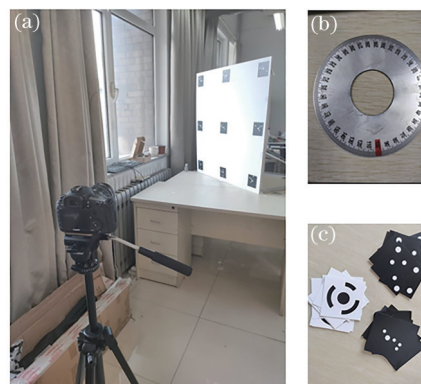


图5 实验场景与部分器材。(a)实验测试场景;(b)量角仪;(c)测试的三种靶标

Fig. 5 Experiment scenes and some equipment. (a) Experimental test scenarios; (b) goniometer; (c) three targets for test

量角仪,如图5(b)所示。将待识别的靶标均匀地布设在尺寸为1 m×1 m白板的边缘和中心位置,始终保持相机对焦在白板中心的靶标上。实验中使用的靶标包括Schnerider靶标、Hattori靶标和设计的靶标,如图5(c)所示。

3.2 实验

在3.1节介绍的实验测试场景中,任选9个待识别的所设计的靶标,固定白板与相机的距离为2 m,使倾斜角(相机光轴与白板的法向量之间的夹角)从0°变化到70°以拍摄靶标。采用解码算法对拍摄到包含靶标的图像进行自动解码。图6为倾斜角

分别为0°、30°和60°所拍摄到的贴有靶标的白板。不同倾斜角下的解码结果如表1所示。

从表1可以看到,当倾斜角小于等于60°时,所设计的靶标的解码正确率可达100%,当倾斜角进一步增大时,解码正确率有所下降。在不同的倾斜角下,对解码得到的靶标的交比值进行数据分析,利用(6)式计算9个靶标解码得到的交比值与其对应的标准交比值之间的误差。表2为9个靶标在不同倾斜角下的误差均值及方差。图7为利用表2制作的误差棒图,其中*表示平均值,*上下分布的两条横杠为方差值。

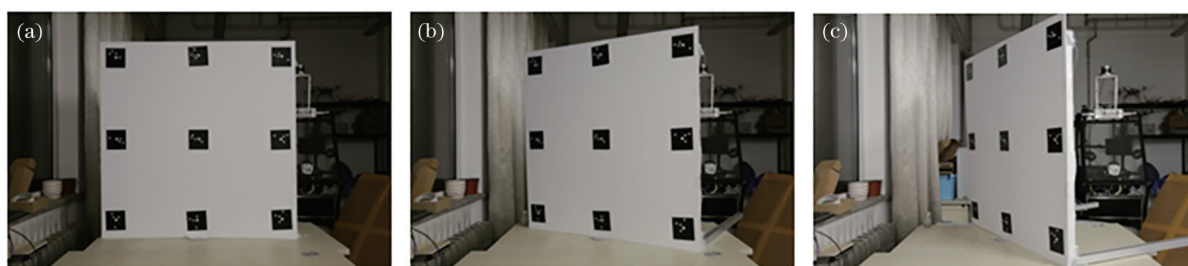


图6 不同倾斜角度拍摄的白板。(a)0°;(b)30°;(c)60°

Fig. 6 White boards shot at different oblique angles. (a) 0°; (b) 30°; (c) 60°

表1 不同倾斜角下的解码正确率

Table 1 Decoding accuracy at different tilt angles

Tilt angle / (°)	0	10	20	30	40	50	60	65	70
Decoding accuracy rate / %	100	100	100	100	100	100	100	78	56

表2 9个靶标在不同倾斜角下的误差均值及方差

Table 2 Error mean and variance of 9 targets at different tilt angles

Tilt angle / (°)	Mean value	Variance
0	0.000646	7.84×10^{-7}
10	0.000383	2.40×10^{-7}
20	0.000732	5.33×10^{-7}
30	0.000835	9.26×10^{-7}
40	0.000990	1.13×10^{-6}
50	0.001084	2.00×10^{-6}
60	0.001369	2.07×10^{-6}
65	0.082350	0.033334
70	0.390327	0.152914

从表2可以看到,9个靶标的交比值的误差均值及方差随着倾斜角的增加而增大,这是因为靶标中的圆经过透视投影后变换成椭圆,圆心经过透视投影后的位置与椭圆的中心会产生一定的偏离^[21],且当倾斜角越大时,偏差也会越大。同时,交比值误差还源于如下两个方面。1)靶标的不平整性,交比的

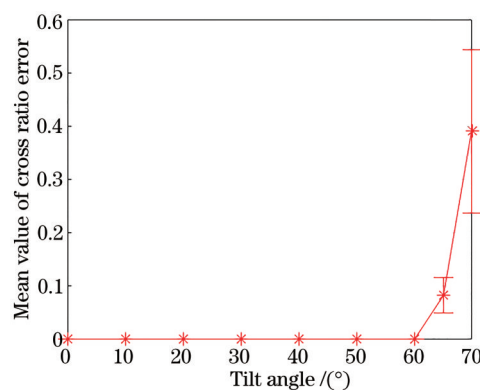


图7 9个靶标在不同倾斜角下的误差棒图

Fig. 7 Error bar graphs of 9 targets at different inclination angles

射影不变性只有靶标的5点处在一个平面上有效,当靶标不平整时,交比值的计算结果会产生误差。2)实验采用的二值化分割算法及区域灰度重心算法的结果存在误差,影响最终的交比值。

为了观察交比值受靶标不平整性的影响,仿真模拟靶标贴在柱面上的情形,接着通过圆心坐标来

计算贴在平面和柱面上靶标的交比值差异。对于平面上的标准靶标,以基准圆的圆心为坐标原点 $O(0,0)$,建立的坐标系如图 8 所示。利用已知靶标模板中内环和外环的半径和每个编码圆所对应的圆心角,计算其余 4 个圆的圆心坐标,然后计算 5 个圆心的交比值。

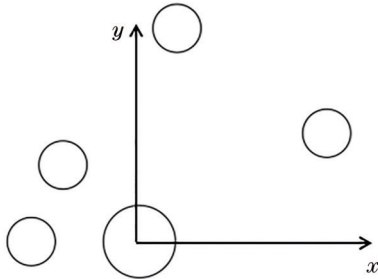


图 8 平面靶标坐标系

Fig. 8 Plane target coordinate system

圆柱坐标系如图 9 所示。将靶标贴在圆柱表面上,仍以基准圆的圆心为原点 O 来建立坐标系,不考虑垂直纸面的方向。从图 9 可以看到,靶标中每个圆心的 y 坐标值并不发生变化,只有 x 坐标值发生变化。设靶标中某一个圆的圆心 p 在圆柱表面上对应的弧长为 S ,圆柱半径为 r ,则 p 的 x 坐标的计算公式为

$$x = r \cdot \sin(S/r) \quad (8)$$

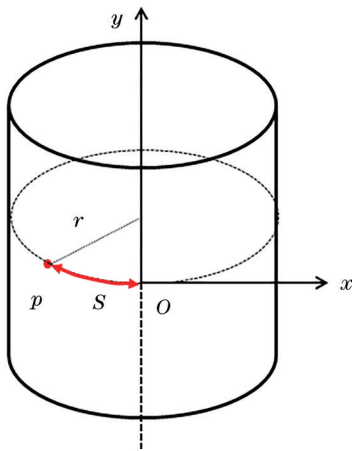


图 9 圆柱坐标系

Fig. 9 Cylindrical coordinate system

同理,计算贴在圆柱表面上靶标的每个圆心坐标,然后计算 5 个圆心的交比值,最后利用(6)式计算贴在平面上和柱面上的靶标交比值的差。改变圆柱半径 r 和 L 的比值(靶标模板中内环半径为 $3L$,外环半径为 $6L$),观察柱面的曲率半径对交比值的影响。对于每一个比值,计算 9 个靶标在平面

和柱面上的平均交比值差,结果如图 10 所示。

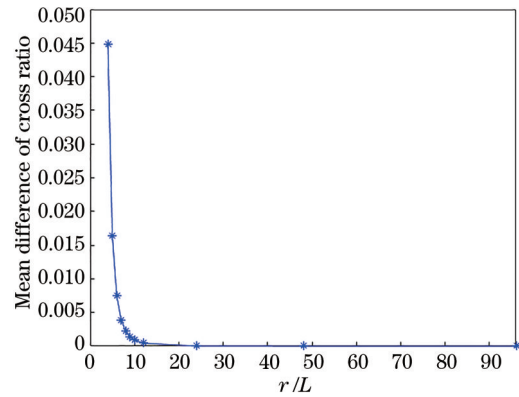


图 10 靶标在平面和柱面上的平均交比值差

Fig. 10 Mean difference of cross ratio between plane and cylinder of target

当 $r/L = 4$ 时,靶标的外环直径约等于圆柱周长的一半,这是 r/L 所能取的最小值。当 $r/L > 10$ 时,平均交比值差在 10^{-4} 数量级,这是一套靶标中任意两个靶标最小交比值差的 10%,所以此时靶标的不平整性不影响靶标正确解码。所设计的靶标和传统靶标的解码准确率会因为靶标不平整而降低,所以实际工业测量过程中一般将靶标贴在被测物的平面上。

靶标解码算法是基于 OpenCV3.2.0 来实现的,所用的软件平台为 Microsoft Visual Studio 2015。曲面模拟仿真是基于 MATLAB 2018 来实现的。计算机的处理器为 i5-9400F(主频率为 2.9 GHz),RAM 为 16 G。在整个解码实验中,靶标的解码总运行时间为 3.42 s,不包括布设粘帖靶标的时间和软件操作时间。实验结果表明,提出的解码算法可以进行快速和有效的摄影测量,满足时效性。

3.3 对比实验

为了验证设计的靶标具有抗大角度倾斜拍摄的能力,将目前比较常用的 Schnerider 靶标和 Hattori 靶标与所设计的靶标进行对比^[22]。Schnerider 靶标(目前德国 GOM 公司的 TIPTOP 系统采用)和 Hattori 靶标(美国 GSI 公司的 V-STARS 摄影三坐标测量系统采用)分别属于环形分布型靶标和点状分布型靶标。

常用的传统靶标如图 11 所示。从中间的 21 个小圆中任取三个与 A' 、 B' 和 C' 这三个圆可以组成一个实际的 Hattori 靶标。利用 A' 、 B' 和 C' 来确定坐标系 XOY ,计算三个小圆在 XOY 坐标系下的绝对坐标。利用待解码靶标中 A' 、 B' 和 C' 这三个圆之间的

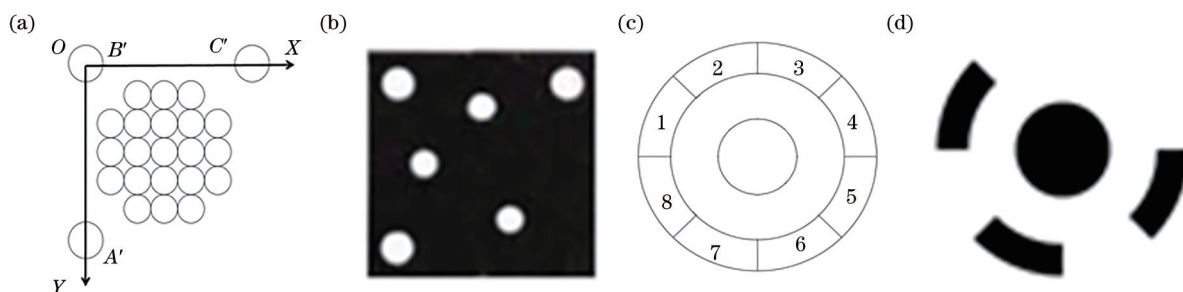


图 11 常用的传统靶标。(a)Hattori靶标模板;(b)Hattori靶标;(c)Schnerider靶标模板;(d)Schnerider靶标

Fig. 11 Schematic of commonly used traditional targets. (a) Hattori target template; (b) Hattori target; (c) Schnerider target template; (d) Schnerider target

实际距离,结合靶标设计过程中的标准距离,按照实际距离和标准距离的比例缩放三个小圆的绝对坐标,从而确定三个小圆在21个小圆中的位置,进而完成解码。中心圆和环带(环带被均分)组成一个实际的Schnerider靶标,其编码信息就是环带上的颜色组合情况。利用待解码靶标中中心圆的实际半径,结合靶标设计的标准半径,按照实际长度和标准长度的比例来识别环带的位置,从而判断每份的灰度值,进而确定颜色组合情况,最终完成解码。综上可知,两种靶标在解码过程中都使用了绝对位置信息^[23-25]。

在相同的实验环境中(固定贴有靶标的白板与相机的距离为2 m,固定相机,相同的光照)进行三组实验。第一组实验:将9个所设计的靶标均匀地布设在尺寸为1 m×1 m的白板上;第二组实验:将9个Schnerider靶标按照相同的方式进行布设;第三组实验:布设任选的9个Hattori靶标。每组实验都使倾斜角从0°逐渐变大,当倾斜相同角时,对比三种靶标的解码正确率,解码结果如图12所示。

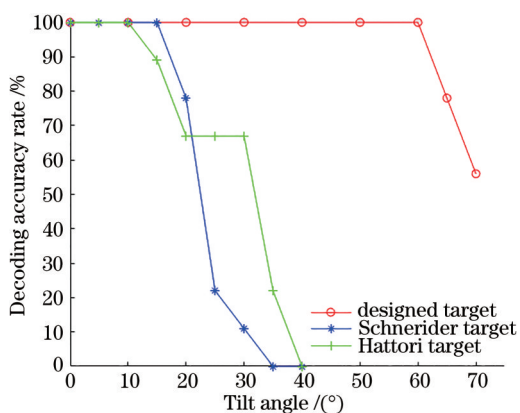


图 12 三种靶标在不同倾斜角度下的解码正确率

Fig. 12 Decoding accuracy rate of three targets at different tilt angles

从图12可以看到,当倾斜角在0°~10°之间时,三种靶标的解码正确率都为100%,都可以正确解码;当拍摄角度变大时,Schnerider靶标和Hattori靶标的解码正确率迅速下降,但是设计的靶标依然可以全部正确解码,设计的靶标在倾斜角为60°仍然可以全部正确解码。实验结果表明,由于采用射影不变量作为编码信息,当拍摄角度较大时,设计的靶标的解码正确率高于传统的编码靶标,在60°的大角度下拍摄可以达到100%的解码正确率。

4 结 论

针对目前编码靶标解码算法复杂和拍摄角度过大而导致解码不准确等问题,设计一种基于射影不变量原理的编码靶标,并利用基于该靶标的解码方法可以准确识别图像中的编码。所设计的靶标由5个圆组成,编码圆分布在以基准圆为圆心的圆环上,结构简单,制作容易。当存在拍摄角度时,使用所设计的靶标及其解码方法可直接识别二值化处理后的图像中的靶标,不需要修正因透视投影所产生的畸变,简化解码流程,同时因为解码所计算的交比值是一种射影不变量,所以设计的靶标具有很好的抗大角度倾斜拍摄的能力。通过实验可以验证解码方法在大角度拍摄方面具有较高的准确性。

本靶标的问题在于,与其他靶标相比,由于其采用了两层圆环结构,所以靶标的整体面积比较大,难以在小目标表面密集分布,因此不适用于对小目标的高精度测量。

参 考 文 献

- [1] Xing L, Zhang H Z, Chen X, et al. Deformation measurement of thin-walled part based on binocular vision[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(7): 0712002.

- 邢丽, 张弘治, 陈曦, 等. 基于双目视觉的薄壁零件变形量测量[J]. 光子学报, 2020, 49(7): 0712002.
- [2] Xu J, Jiang S P, Yang L H, et al. Digital photogrammetry for thermal deformation of satellite structures in normal environment [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(12): 2667-2673.
- 许杰, 蒋山平, 杨林华, 等. 卫星结构件常压热变形的数字摄影测量[J]. 光学精密工程, 2012, 20(12): 2667-2673.
- [3] Zhao M, Zhang Y F, Zhang Q. Holographic coding target and image backprojection correction matching [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0612001.
- 赵敏, 张宇帆, 张琪. 全息编码靶标及图像逆投影校正匹配[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0612001.
- [4] Li P, Zhang Y Y. Global localization for indoor mobile robot based on binocular vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(4): 041503.
- 李鹏, 张洋洋. 室内移动机器人双目视觉全局定位[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(4): 041503.
- [5] Yang X L, Yin C Y, Fang S P, et al. Three-dimensional measurement of large-scale objects using photogrammetry based on total station[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(10): 101505.
- 杨谢柳, 尹晨宇, 方素平, 等. 基于全站仪的大型三维形貌摄影测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(10): 101505.
- [6] Cheng Z Y, Lu R S, Mao C L. Measurement method of three-dimensional shape of bright surface with binocular stereo vision[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071202.
- 程子怡, 卢荣胜, 毛翠丽. 光亮表面双目立体视觉三维形貌测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071202.
- [7] Han L J, Li S W. The principle and application elementary analysis of projection transformation[J]. Science & Technology Vision, 2015(26): 171-174.
- 韩鲁佳, 李松维. 投影变换的原理及其应用浅析[J]. 科技视界, 2015(26): 171-174.
- [8] Mohr R, Triggs B. Projective geometry for image analysis: a tutorial given at ISPRS[EB/OL]. [2020-10-19]. <https://www.seas.upenn.edu/~meam520/notes02/projective-tutorial.pdf>.
- [9] Zhang J W, Lei L. Top-view projection algorithm research based on perspective projection[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2017, 36(1): 47-50.
- 张建伟, 雷霖. 基于透视投影的垂直视角投影算法研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2017, 36(1): 47-50.
- [10] Shang X F, Xue X Y, Xia R B. Design and fast detection algorithm of dot coded target[J]. Application Research of Computers, 2020, 37(S1): 364-365.
- 尚晓峰, 薛晓雨, 夏仁波. 一种新的点状编码标志设计与快速检测算法[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(S1): 364-365.
- [11] Shortis M R, Seager J W. A practical target recognition system for close range photogrammetry [J]. The Photogrammetric Record, 2014, 29(147): 337-355.
- [12] Hu L Q. Algorithm and stability analysis of marking point detection[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2009: 54-55.
- 胡丽琴. 标记点检测的算法及稳定性分析[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2009: 54-55.
- [13] Wang D, Xing S, Hou Y F, et al. Design methodology of coded target based on color and geometry information[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(5): 484-488.
- 王栋, 邢帅, 侯一凡, 等. 一种基于色彩与几何信息的编码标志设计方法[J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(5): 484-488.
- [14] Cui X F, Wang X M, Wang X. A method of automatically recognizing and matching artificial signs[J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(21): 79-81, 113.
- 崔晓斐, 王秀美, 王玺. 一种人工标志点自动匹配的方法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(21): 79-81, 113.
- [15] Moritama T, Kochi N, Yamada M, et al. Automatic target identification with the color-coded-targets [EB/OL]. [2020-10-19]. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.151.704>.
- [16] Lenz R. Group invariant pattern recognition [J]. Pattern Recognition, 1990, 23(1/2): 199-217.
- [17] Liu J L, Cui M H. The application of cross ratio in elementary geometry [J]. Mathematics learning and research, 2011(23): 78.
- 刘金玲, 崔美华. 交比在初等几何中的应用[J]. 数学学习与研究, 2011(23): 78.
- [18] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [19] Suzuki S, Be K. Topological structural analysis of digitized binary images by border following [J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1985, 30(1): 32-46.

- [20] Xu X G, Sun Z X. A survey on shape analysis methods[C]//CIG'2001, May 23-25, 2001, Ningbo, China. Beijing: China Graphics Society, 2001: 139-143.
徐晓刚, 孙正兴. 形状分析方法综述[C]//中国图像图形学会第十届全国图像图形学术会议, 2001年5月23日-25日, 宁波. 北京: 中国工程图学学会, 2001: 139-143.
- [21] Tan Y, Zou Z R. Estimation of deviation between circular target center and ellipse imaging center in close-range photogrammetry[J]. Science of Surveying and Mapping, 2009, 34(6): 250-251.
谭燕, 邹峥嵘. 近景摄影测量圆形标志与其椭圆构像的中心偏差估计[J]. 测绘科学, 2009, 34(6): 250-251.
- [22] Huang G P. Study on the key technologies of digital close range industrial photogrammetry and applications [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005: 78-79.
黄桂平. 数字近景工业摄影测量关键技术研究与应用[D]. 天津: 天津大学, 2005: 78-79.
- [23] Huang G P, Qin G Q, Lu C J. Testing and application of the digital close-range photogrammetry for the large scale 3-D measurement V-STARS[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2009, 29(2): 5-9, 22.
黄桂平, 钦桂勤, 卢成静. 数字近景摄影大尺寸三坐标测量系统 V-STARS 的测试与应用[J]. 宇航计测技术, 2009, 29(2): 5-9, 22.
- [24] Lu C J, Huang G P, Li G Y. Accuracy testing and application of V-STARS [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(S1): 245-249.
卢成静, 黄桂平, 李广云. V-STARS 工业摄影三坐标测量系统精度测试及应用[J]. 红外与激光工程, 2007, 36(S1): 245-249.
- [25] Hattori S, Akimoto K, Imoto H. Automated procedures with coded targets in industrial vision metrology[J]. Transactions of the Institute of Electronics Information & Communication Engineers, 2001, 84(5): 441-446.