

全息编码靶标及图像逆投影校正匹配

赵敏*, 张宇帆, 张琪

西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 设计一种具有全息特性的平面编码靶标, 该编码靶标利用局部编码获得该部分在靶标上的位置及靶标整体状态, 可应用于位姿测量, 提高了测量范围和测量精度。针对编码靶标的解码和匹配问题, 提出基于靶标图像逆投影校正和相关匹配的解码算法, 采用透视变换, 将靶标图像重建到三维空间中, 对其进行旋转校正后再投影到原像面中。改进了相关匹配算法, 改进后只需搜寻编码靶标上的标志点, 匹配效率得到提高。实验结果表明, 所提解码匹配方法具有很好的匹配效果和匹配效率。图像逆投影校正方法可应用于摄影测量中的编码靶标解码匹配, 不受编码规则限制, 可有效提高解码正确率。

关键词 测量; 全息性; 编码靶标; 逆投影校正; 相关匹配; 位姿测量

中图分类号 TH741; TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0612001

Holographic Coding Target and Image Backprojection Correction Matching

Zhao Min*, Zhang Yufan, Zhang Qi

School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract This paper reports the design of a planar coding target with holographic property. The local code of the coding target can be used to determine the position of the imaging portion on the target and the overall state of the target. The target can be used for pose measurement and can improve the measurement range and measurement accuracy. To solve the decoding and matching problem of the coding target, a decoding algorithm based on target image backprojection correction and correlation matching is proposed. In this algorithm, the target image is reconstructed in three-dimensional space by perspective transformation. Subsequently, it is rotated and corrected in the three-dimensional space, and then projected back onto the original image surface. Improving the correlation matching algorithm, only the marker points on the coding target are considered, greatly improving the matching efficiency. The proposed decoding and matching method demonstrate good matching effect and high matching efficiency in experiments. The image backprojection correction method can also be applied in photogrammetry for coding target decoding and matching. This method is not limited by encoding rules and can effectively improve the decoding accuracy rate.

Key words measurement; holographic property; coding target; backprojection correction; correlation matching; pose measurement

OCIS codes 120.0280; 150.1488; 100.2000; 150.1135

1 引 言

编码靶标被广泛应用于视觉测量中, 如视觉摄影测量中应用编码靶标可实现多角度拍摄图像的精确匹配^[1-2], 靶标成像式坐标测量系统若采用编码靶标可减小成像视场, 实现高精度测量^[3]。编码靶标的设计和快速精确匹配对视觉测量技术的发展具有现实意义, 在多个领域有广泛应用, 如机器人运动控

制系统、大范围高精度检测系统及大尺寸物体三维表面检测等^[4]。现有的编码靶标主要有圆环型、点分布型、彩色型等^[5-7]。圆环型靶标由中心的标志点和与之同心的环型编码带组成, 采用二进制的编码原理, 环型编码带一般分为 8 个编码单元^[8]。点分布型靶标主要由标志点和编码点组成, 标志点用来确定靶标二维平面坐标系, 编码点在此平面坐标系内按照一定规则排布, 产生不同的编码值^[9]。现有

收稿日期: 2019-08-15; 修回日期: 2019-10-24; 录用日期: 2019-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(51405382)

* E-mail: zhaomin1973@xaut.edu.cn

的编码靶标中每个标志点进行单独编码,因此需要大量的编码单元,并且不具有全息特性,必须要拍摄整个靶标才能正确解码和匹配。

现在大多数编码靶标的解码方法是以检测编码靶标的编码规则为主,先对图像进行预处理来获取标志点和编码点(带),然后通过仿射变换对产生投影变形的标志点和编码点(带)进行校正,最后比对编码点与设计的位置来确定编码单元的编码值^[8,10]。这种解码方法效率低、解码时间较长,而且在实际测量中,靶标相对于相机的姿态、光照强度等会影响电荷耦合器件(CCD)的成像质量,对后续的解算形成干扰。随着靶标与成像平面的倾角增大,仿射变换误差增大,靶标产生误匹配或不能正确解码。文献[11]中对于倾角过大出现误解码的编码单元选择直接剔除。

本文设计了一种可用于位姿测量的平面点分布型编码靶标,只需3个基元,通过编码组合实现全息特性;只要获取多于4个编码单元的图像即可实现解码和测量。提出一种基于图像逆投影和相关匹配的解码匹配算法,该算法不直接对靶标中的编码规则进行检测,而是充分利用靶标中所包含的特征信息和编码靶标的整体信息,利用透视变换校正图像,再使用相关匹配算法自动搜索匹配。所提算法具有抗干扰能力强、不依赖编码规则、解码速度快、正确率高的优点。

2 具有全息性的平面编码靶标

2.1 结合平面编码靶标的位姿测量原理

文献[3]将具有全息性的直线编码靶标用于视觉坐标测量,可提高测量精度,但不能用于位姿测量。本文设计了一种具有全息性的平面编码靶标,可用于位姿测量,测量原理如图1所示。

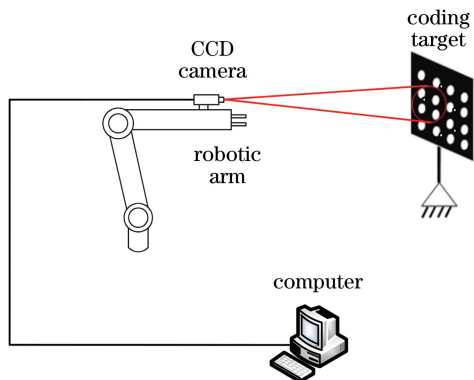


图1 位姿测量系统

Fig. 1 Pose measurement system

位姿测量系统主要由平面编码靶标、装有位姿解算软件的计算机、CCD相机组成。CCD相机通过传感器数据线与计算机相连接,CCD相机的最小视场大于2倍的靶点间距,编码靶标上标志点(大圆点)的中心位置已知。在测量过程中,编码靶标固定不动,CCD相机固定在机械臂上,随着机械臂运动,计算机通过控制CCD相机采集编码靶标的局部图像,然后通过解码获得成像部分在编码靶标中的位置,再由图像处理技术求取相机采集到的图像中的标志点的中心坐标,结合对应的靶标坐标,即可解算出机械臂的位姿^[12-14]。

基于非编码靶标的位姿测量系统通常采用较大的视场和较小的靶标,在进行位姿测量时,要求整个靶标必须位于相机的成像视场内才可以进行测量^[15]。若增大相机的成像视场和测量范围,则位姿测量精度随之降低。针对这个问题,本系统采用较大的编码靶标,只需要编码靶标的局部进入相机视场就可实现位姿测量,兼顾了测量的高分辨率、高精度及大范围要求。

2.2 平面编码靶标设计

平面编码靶标要求具有全息性,这里的全息特性是指由局部即可知整体,由靶标局部编码信息即可获得靶标整体的状态。由局部编码获得该部分在编码靶标上的位置是实现靶标全息特性的前提条件,由局部编码信息获得编码靶标的空间位姿即具有了全息特性。设计平面编码靶标不仅要考虑编码组合还要考虑方位特性。即要求通过获取编码靶标的局部信息得到这段靶标在整个靶标中的位置,而且靶标应用于位姿测量时要求具有旋转唯一性,靶标在平面内发生任意旋转时,均可以判别出当前靶标方位。

编码靶标采用点分布型,布局为 $e \times e$ 个标志点的正方形靶标,位姿测量所需的标志点数最少为4,设基元个数为 H ,则共有 H^4 种编码。基元个数需满足

$$H^4 \geq (e-1)^2, \quad (1)$$

式中: e 为标志点的行(列)数。

假定采用 $7 \times 7 = 49$ 个标志点的编码靶标,那么就需要 $6 \times 6 = 36$ 种编码组合,因此至少需要3个基元,即可实现81种编码组合,这就有多余的编码组合,便于后续扩展靶标。

在基元设计中加入方位特性,可降低编码难度。基元由标志点和编码点组成,标志点和编码点大小不同,便于区分。标志点中心参与位姿解算,因此标志点的尺寸较大,定位精度要求高。编码点仅参与解码,尺寸较小,定位精度要求低。

若编码点置于标志点的正右方,则编码为‘1’;若编码点置于标志点的右下方,则编码为‘2’;若标志点附近不设置编码点,则编码为‘0’。情况如图 2(a)所示。根据标志点和编码点的位置关系,靶标在平面内进行 360°旋转,再根据标志点和编码点的关系,可有效判断旋转方位,满足旋转唯一性。

靶标编码如图 2(b)所示,尽可能采用少的圆点,降低加工难度。任意相邻四个点的编码不重合,编码具有唯一性。该编码靶标的最小编码单元为 4 个,任意 4 个相邻标志点的编码不同,只要采集大

于最小编码单元的任意一部分靶标,就可解码获得该部分在原靶标的位置,满足全息性。

图 2(c)为设计的平面编码靶标,其工作面上设置有编码单元,编码单元包括 7×7 阵列的标志点(大圆点)和 26 个大小相同的编码点(小圆点)。标志点的直径为 7 mm,编码点的直径为 4 mm, 7×7 个标志点在工作面上等间距(50 mm)排列,编码点按编码规则分布于标志点的正右方或右下方。此编码靶标任意方位编码具有唯一性,基元设计具有方向性,降低了解码难度。

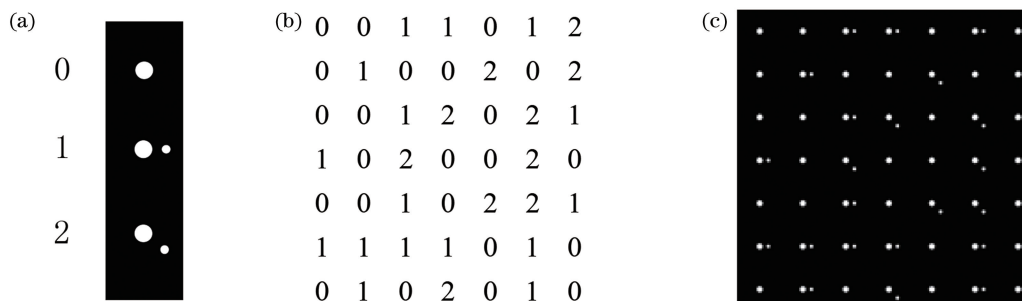


图 2 编码靶标设计及实物。(a)编码基元;(b)编码组合;(c)靶标实物

Fig. 2 Coding target design and object. (a) Coding primitive; (b) coding combination; (c) target object

3 基于图像逆投影校正的解码算法

图像特征匹配一直是计算机视觉中的经典难题,所提解码算法充分利用编码图像所包含的信息,不直接对图像中的编码信息进行检测,不受编码规则限制,适应性强。所提算法在解码时采用旋转参数和平移参数分离的匹配方法,利用旋转参数校正图像,利用平移参数匹配图像。首先忽略平移关系,寻找靶标模板和靶标图像中的特征点,构建靶点矩阵和对应像点矩阵,计算出靶标图像相对于靶标模板的旋转参数,再经过图像逆投影校正图像。利用平面旋转判定靶标是否为正方向,后用改进的归一化互相关(NCC)算法进行位置匹配,在匹配时不用遍历整幅图像,只需遍历标志点的中心坐标,即可实现匹配,加快了匹配速度。匹配后再计算标志点的中心坐标,保证了定位精度。具体流程如图 3 所示。

3.1 寻找特征点

寻找特征信息是为了充分利用编码靶标的信息,为后续的图像校正和图像匹配提供依据。在计算图像透视参数时,需要靶标图像和靶标模板中的特征点坐标。这里设计的平面编码靶标标志点的间距相等,标志点即可作为特征点。由图 2(c)可知,编码靶标的标志点等间距分布,已知编码靶标上任意一组(4 个)标志点构成矩形,这可作为先验知识。

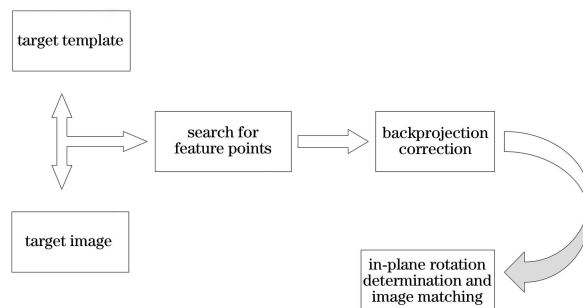


图 3 解码算法流程图

Fig. 3 Flow chart of decoding algorithm

因此寻找靶标图像的一组标志点,即寻找能构成最小矩形的四个标志点。

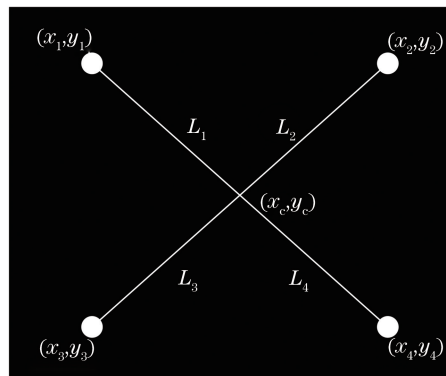


图 4 寻找最小矩形

Fig. 4 Finding smallest rectangle

图像处理,根据白圆的大小即可分离标志点

和编码点。任意选取 4 个标志点,其中心坐标分别为 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 、 (x_3, y_3) 、 (x_4, y_4) ,则这 4 个点构成矩形的中心坐标为 (x_c, y_c) :

$$\begin{cases} x_c = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4} \\ y_c = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \end{cases} \quad (2)$$

L_1, L_2, L_3, L_4 为每个标志点中心到点 (x_c, y_c) 的距离,即

$$\begin{cases} L_1 = \sqrt{(x_c - x_1)^2 + (y_c - y_1)^2} \\ \vdots \\ L_4 = \sqrt{(x_c - x_4)^2 + (y_c - y_4)^2} \end{cases} \quad (3)$$

判断 L_1, L_2, L_3, L_4 的大小,如果每个距离和这 4 个距离的均值之差的绝对值都不大于均值的 1/4,则认为四点构成矩形,在多组矩形中,寻找 $L_1 \sim L_4$ 最小的一组,则构成的矩形被认定为最小矩形。找到最小矩形后,用这 4 个标志点的中心坐标构建像点矩阵,在靶标模板中选初始 4 点构建靶点矩阵。

3.2 图像逆投影校正

图像逆投影校正的模型如图 5 所示,把靶标图像逆投影到三维空间中去,任意截取一个轴向位置,如 $Z=1$,在三维空间中利用计算得到的旋转矩阵对图像进行旋转,再将旋转后的空间图像投影到像面上,即可得到校正后的图像。具体可分为 3 步。

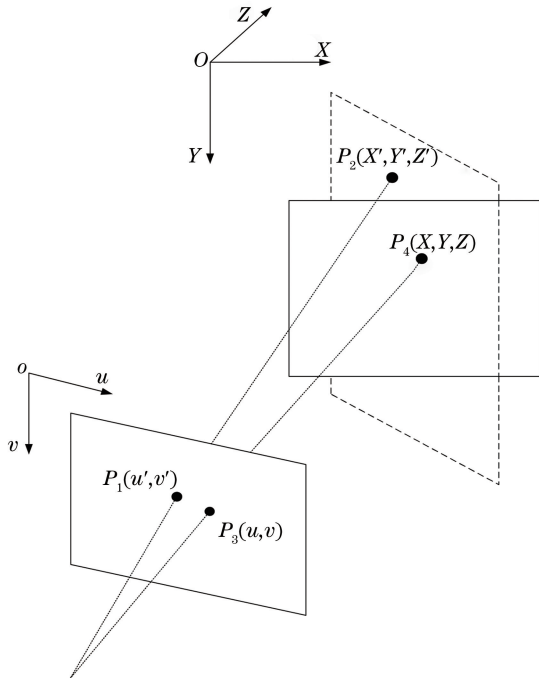


图 5 图像逆投影校正模型

Fig. 5 Image backprojection correction model

1) 二维图像重建三维空间

图 5 中, ouv 是 CCD 相机成像平面图像坐标系, $OXYZ$ 是世界坐标系; $P_3(u, v)$ 是图像坐标系下某点, $P_4(X, Y, Z)$ 是 $P_3(u, v)$ 点逆投影到世界坐标系下的点。截取 $Z=1$ 的轴向位置,逆投影成像关系描述为

$$\begin{cases} X = u/f \\ Y = v/f \\ Z = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: f 为 CCD 相机的焦距。

2) 三维旋转

点 $P_2(X', Y', Z')$ 为点 $P_4(X, Y, Z)$ 旋转后在世界坐标下的点

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: \mathbf{R} 为旋转矩阵。

3) 三维空间重投影二维图像

点 $P_1(u', v')$ 为世界坐标系中点 $P_2(X', Y', Z')$ 重投影到 CCD 相机成像平面内的点。

$$\begin{cases} u' = (f \cdot X')/Z' \\ v' = (f \cdot Y')/Z' \end{cases} \quad (6)$$

为了实现图像逆投影校正,需要获得旋转矩阵 \mathbf{R} ,可采用透视投影的物像关系求解。透视投影的物像关系为

$$\rho \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot [\mathbf{R} \quad \mathbf{T}] \cdot \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: (X'_i, Y'_i, Z'_i) 为物点坐标, (u_i, v_i) 为对应的像点坐标; ρ 为系数; \mathbf{R} 、 \mathbf{T} 分别为物与像之间的旋转矩阵和平移矩阵。

在对编码靶标解码前,难以建立物点与像点的对应关系。由于标志点的间距固定,若对编码靶标图像的一组标志点和靶标模板中的不同组标志点建立透视投影关系,则旋转参数相同,平移参数不同。因此选取靶标模板中的初始标志点。

将(7)式转换为线性方程组,即

$$\rho \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fr_1 & fr_2 & fr_3 & fT_X \\ fr_4 & fr_5 & fr_6 & fT_Y \\ r_7 & r_8 & r_9 & T_Z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ Z'_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中: $r_1 \sim r_9$ 为旋转矩阵 \mathbf{R} 的矩阵元; $(T_X, T_Y, T_Z)^T$ 为平移矩阵 \mathbf{T} 的展开形式。

对平面靶标成像,设空间点 Z' 坐标为 0,则(8)

式转换为

$$\rho \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fr_1 & fr_2 & fT_X \\ fr_4 & fr_5 & fT_Y \\ r_7 & r_8 & T_Z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

利用(9)式,通过变量代换得到未知量 a_i 的线性方程为

$$\frac{\rho}{T_Z} \cdot \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X'_i \\ Y'_i \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

利用一组标志点即可获得参数 a_i ,经过变量代换可获得旋转矩阵 \mathbf{R} 的矩阵元,即

$$\begin{cases} T_Z = f / \sqrt{a_1^2 + a_4^2 + fa_7^2} \\ r_1 = a_1 T_Z / f \\ r_2 = a_2 T_Z / f \\ r_3 = \sqrt{1 - r_1^2 - r_2^2} \\ r_4 = a_4 T_Z / f \\ r_5 = a_5 T_Z / f \\ r_6 = \sqrt{1 - r_4^2 - r_5^2} \\ r_7 = a_7 T_Z \\ r_8 = a_8 T_Z \\ r_9 = \sqrt{1 - r_7^2 - r_8^2} \end{cases}. \quad (11)$$

为了提高所提算法的适用性,需假定 CCD 相机焦距 f 是未知的,仅根据物像关系进行匹配。焦距 f 可利用旋转矩阵 \mathbf{R} 的正交性求解。

$$r_1 r_2 + r_4 r_5 + r_7 r_8 = 0, \quad (12)$$

代入(11)式中参数,解得焦距为

$$f = \sqrt{\frac{a_1 a_2 + a_4 a_5}{-a_7 a_8}}. \quad (13)$$

为了明确靶标图像相对靶标的旋转缩放关系,

根据(11)式计算转角和缩放系数,即

$$\begin{cases} \alpha = -\arctan(r_6/r_9) \\ \beta = \arcsin r_3 \\ \gamma = -\arctan(r_2/r_1) \\ \delta = T_Z/f \end{cases}, \quad (14)$$

式中: α 为绕 X 轴的转角; β 为绕 Y 轴的旋角; γ 为绕 Z 轴的旋角; δ 为缩放系数。

3.3 平面内旋转判定及 NCC 算法

由于构建的特征点矩阵为矩形,该矩形在图像逆投影校正后会出现 4 种不同方向,这就需要平面内旋转判定来选择正确方向。在编码靶标设计中,编码点仅位于标志点的正右方或右下方,根据靶标具有的方向特性,利用标志点和编码点的相对位置关系来判断正确方向,若靶标图像不满足要求,则将靶标图像旋转 90° 、 180° 、 270° ,直到满足要求。

传统的基于灰度值的图像匹配需要在图像上遍历搜寻(如模板图像 I 的像素大小为 2000×2000 ,靶标图像 W 的像素大小为 500×500 ,需要搜寻 $1500 \times 1500 = 2250000$ 次),很耗费时间。本文根据编码靶标的特点,改进了这种遍历的搜寻方法,不需要搜寻整幅图片,只要搜寻靶标模板里的标志点。所提编码靶标中有 49 个标志点,则需搜寻 49 次,大大减少了程序运算量,提高了匹配效率,保证了匹配精度。

设模板图像 I 的像素大小为 $M \times N$,靶标图像 W 的像素大小为 $m \times n$ 。模板图像 I 中按照标志点的位置选取一块像素大小为 $m \times n$ 的子图 I_k , k 为模板图像中标志点个数($k = 1, 2, 3, \dots, 49$)。子图 I_k 和靶标图像 W 的归一化互相关值 G_k 定义为

$$G_k = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(x+i, y+j) - \bar{I}_k][W(i, j) - \bar{W}]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(x+i, y+j) - \bar{I}_k]^2 \times \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [W(i, j) - \bar{W}]^2}}, \quad (15)$$

式中: (i, j) 为像素在靶标图像中的坐标; (x, y) 为像素在模板图像 I 中的坐标; \bar{I}_k 为子图 I_k 的像素平均值; \bar{W} 为靶标图像 W 的像素平均值。 \bar{I}_k 和 \bar{W} 计算公式分别为

$$\bar{I}_k = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} I(x+i, y+j), \quad (16)$$

$$\bar{W} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} W(i, j). \quad (17)$$

4 实 验

4.1 全息编码方案与普通编码方案对比

所提全息编码方案可确定任意一段靶标在整体靶标中的位置,在视场中用部分靶标即可进行解码和测量。而现有的普通编码方案需要检测和确定部分靶标中的编码值,需要整个编码都在视场中才能

进行解码和测量。针对所提全息编码靶标和普通圆环型编码靶标,用三坐标测量机进行对比验证。将编码靶标固定在三坐标测量机的测量臂上同步移动,CCD相机置于编码靶标前方,通过获取靶标图

像,计算靶标位姿,得到移动距离。每个方向各移动 50 mm,实验结果如图 6 所示,横坐标表示靶标的各个位置,纵坐标表示各方向的测量误差,可见所提全息编码方案的测量精度比普通编码方案高。

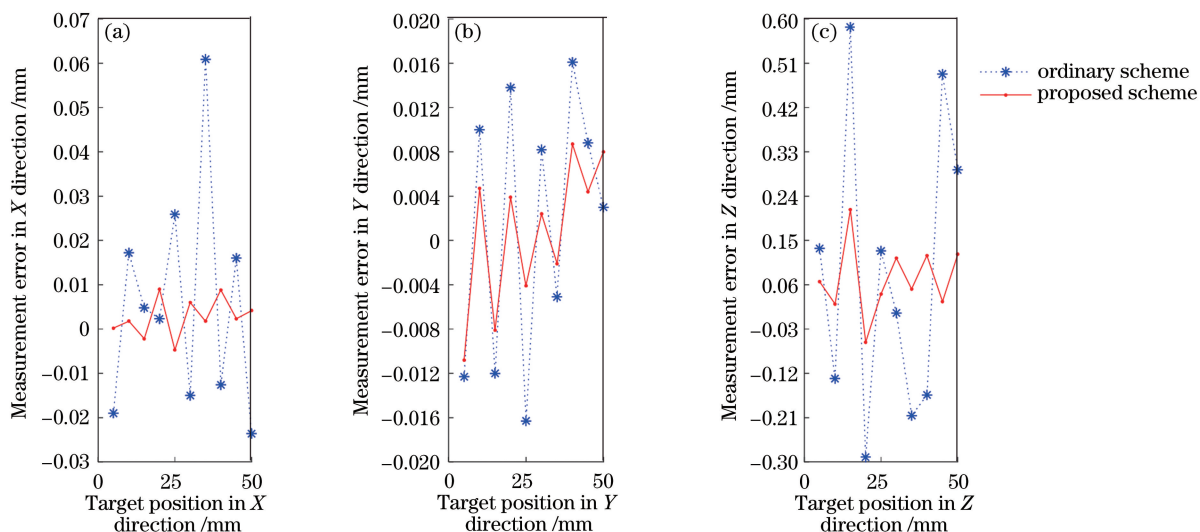


图 6 所提全息编码方案和普通编码方案测量精度对比。(a) x 方向;(b) y 方向;(c) z 方向

Fig. 6 Measurement accuracy comparison between proposed holographic coding scheme and common coding scheme.

(a) x direction; (b) y direction; (c) z direction

4.2 解码验证实验

实验主要验证解码正确率和解码速度。实验设计主要分为两部分:第一部分,仿射变换校正和图像逆投影校正对匹配结果的影响;第二部分,改进的 NCC 算法和原本 NCC 算法匹配所需时间的对比。

相机相对靶标绕 X 轴斜向成像,从 0° 开始,每隔 3° ,CCD 相机采一幅图,一直采集到绕 X 轴斜向成像 72° ,共 25 幅图。相机相对靶标绕 Z 轴正向成像,CCD 相机采集各种角度共 9 幅图。这里

给出部分效果图,矩形框为靶标图像在模板中匹配的位置,如图 7~10 所示。图 7、8 是相机相对靶标绕 X 轴斜向 15° 成像,可见仿射变换不能对原图进行有效校正,出现了错误匹配,而图像逆投影校正效果很好,图像匹配正确。在图 9 中,即使相机相对靶标绕 X 轴斜向高达 60° ,也实现了有效的校正和正确的匹配。在图 10 中,相机相对靶标绕 Z 轴正向 83° 成像,能够正确匹配,并可有效判断旋转方位。

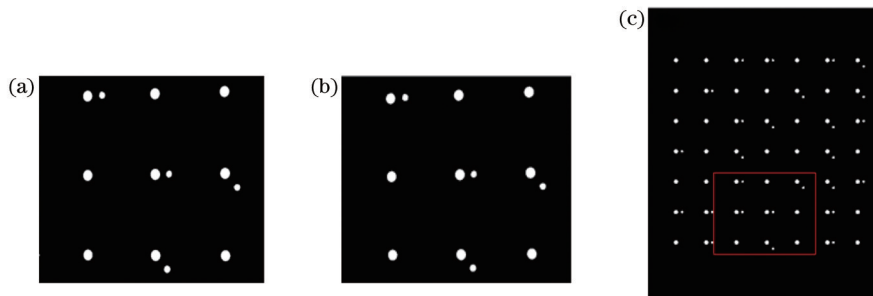


图 7 斜向 15° 成像仿射变换校正及匹配结果。(a) 斜向 15° 成像;(b) 仿射变换校正;(c) 匹配结果

Fig. 7 Affine transformation correction and matching result with oblique 15° imaging. (a) Oblique 15° imaging;

(b) affine transformation correction; (c) matching result

表 1 和表 2 为对本次实验采集到的图片分别进行仿射变换校正和图像逆投影校正处理的部分数据, t_2 为改进的 NCC 算法匹配的时间, t_1 为原 NCC 算法匹配的时间。

从表 1 和表 2 可知,当相机相对靶标绕 Z 轴正向成像,仅在成像面内旋转时,采用仿射变换校正和图像逆投影校正的图像都能够正确匹配,可有效判断旋转方位。当相机相对靶标绕 X 轴斜向成像,当

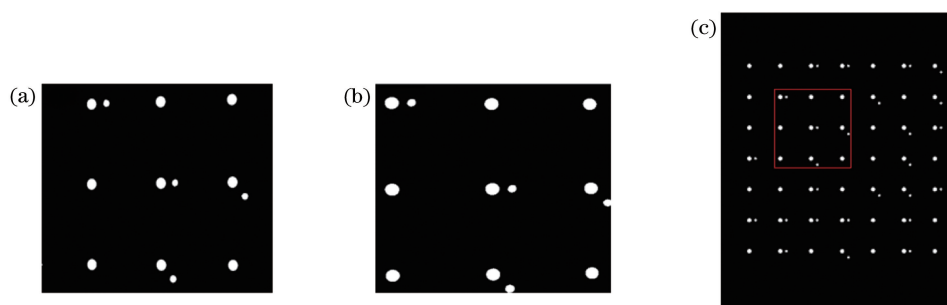


图 8 斜向 15°成像图像逆投影校正及匹配结果。(a)斜向 15°成像;(b)图像逆投影校正;(c)匹配结果
Fig. 8 Image backprojection correction and matching result with oblique 15° imaging. (a) Oblique 15° imaging;
(b) image backprojection correction; (c) matching result

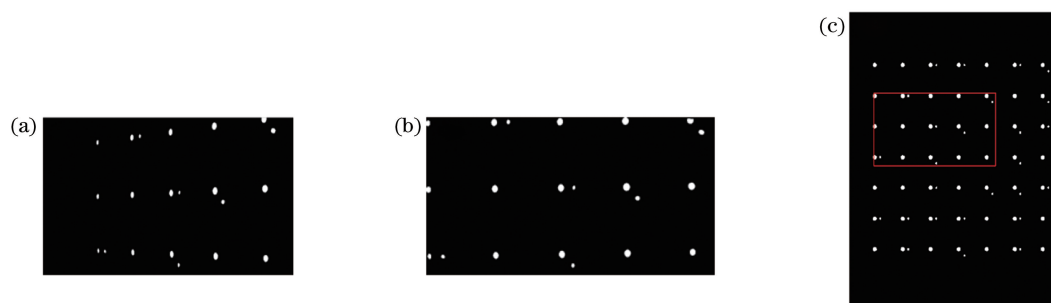


图 9 斜向 60°成像图像逆投影校正及匹配结果。(a)斜向 60°成像;(b)图像逆投影校正;(c)匹配结果
Fig. 9 Image backprojection correction and matching result with oblique 60° imaging. (a) Oblique 60° imaging;
(b) image backprojection correction; (c) matching result

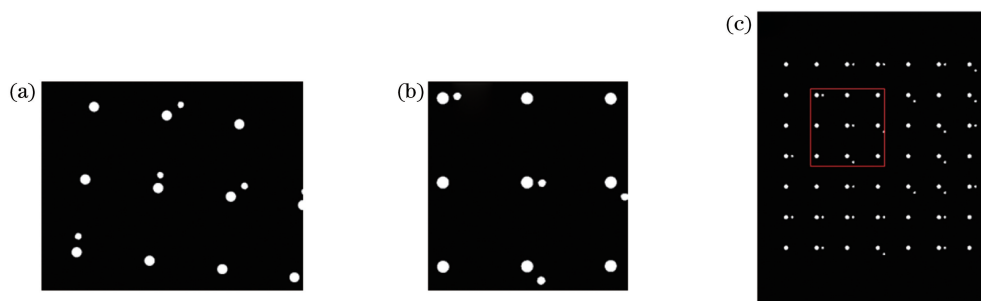


图 10 正向 83°成像图像逆投影校正、平面旋转判定及匹配结果。(a)正向 83°成像;
(b)图像逆投影校正和平面旋转判定;(c)匹配结果
Fig. 10 Image backprojection correction, plane rotation determination and matching result with positive 83° imaging.
(a) Positive 83° imaging; (b) image backprojection correction and plane rotation determination; (c) matching result

表 1 仿射变换校正处理数据(部分)

Table 1 Affine transformation correction processing data (partial)

Imaging angle	$\gamma /(^{\circ})$	δ	Matching result
Oblique 3°	0.25	0.21	Success
Oblique 15°	0.71	0.21	Failure
Oblique 30°	1.28	0.23	Failure
Oblique 60°	2.54	0.29	Failure
Positive 83°	83.21	0.23	Success
Positive 191°	191.28	0.23	Success

表 2 图像逆投影校正处理数据(部分)

Table 2 Image backprojection correction processing data (partial)

Imaging angle	$\alpha /(^{\circ})$	$\beta /(^{\circ})$	$\gamma /(^{\circ})$	δ	Matching result	t_1	t_2
Oblique 3°	2.21	1.77	0.22	0.21	Success	2.04	0.43
Oblique 15°	14.29	0.48	0.29	0.21	Success	2.03	0.47
Oblique 30°	29.54	0.17	0.34	0.19	Success	2.33	0.43
Oblique 60°	59.52	0.21	0.38	0.11	Success	2.16	0.47
Oblique 63°	63.65	4.82	3.21	0.10	Failure	2.21	0.45
Positive 83°	0.29	1.13	83.23	0.24	Success	2.10	0.43
Positive 191°	0.16	1.29	191.29	0.24	Success	2.06	0.47

倾斜角度到 15°时,仿射变换校正的图像已经不能进行正确匹配,而图像逆投影校正后的图像一直能正确匹配到倾斜角 60°,倾斜角达到 63°后,由于标志点畸变太严重,图像逆投影校正也无法进行正确匹配。实验结果表明,仿射变换校正靶标相对成像面旋转小角度时可以进行成功匹配,旋转大角度时无法进行正确匹配,而所提基于透视变换的图像逆投影校正方法的成功匹配范围很大,可以满足一般位姿的测量要求。由匹配时间 t_1 和 t_2 可以明显看出,所提改进的 NCC 算法的速度比原 NCC 算法快,匹配时间短。

5 结 论

基于编码靶标的全息性设计了一种可用于位姿测量的平面型编码靶标,相应地提出了基于靶标图像逆投影校正和相关匹配的解码算法。采用透视变换,将靶标图像重建到三维空间中,对其进行旋转校正后再投影到原像面中,解决了仿射变换校正对相机相对靶标斜向成像不能进行正确解码的问题。利用编码靶标的特性进行相关匹配时,不需要搜寻整幅图片,只需搜寻编码靶标上的标志点,大大提高了匹配效率。所提基于图像逆投影校正解码的方法不仅可应用于位姿测量系统中的编码靶标局部成像解码,还可应用于摄影测量中的靶标解码,只要靶标标志点间距固定即可适用,如点分布型和圆环型靶标。实验结果表明,所提解码方法具有很好的匹配效果和匹配效率。

参 考 文 献

- [1] Long C Y, Zhu J G, Yi W M. Portable visual metrology without traditional self-calibration measurement model [J]. *Measurement*, 2016, 90: 424-437.
- [2] Zhou K, Wang X J, Wang Z, et al. Design and modeling of visual pose measuring system with large vision range [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 111504.
周凯, 王向军, 王仲, 等. 大视距视觉位姿测量系统的设计与建模 [J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 111504.
- [3] Zhao M, Liu Y C, Huang Q H, et al. Wide range coordinate measurement method under small field of view [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(10): 29-35.
赵敏, 刘月婵, 黄秋红, 等. 小视场大范围坐标测量方法 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(10): 29-35.
- [4] Wei X Q, Li J Z, Li D D. Beacon recognition technique based on invariant features [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(1): 13-18.
魏祥泉, 李金宗, 李冬冬. 基于不变特征的标志识别技术研究 [J]. *光电工程*, 2007, 34(1): 13-18.
- [5] Hattori S, Akimoto K, Fraser C, et al. Automated procedures with coded targets in industrial vision metrology [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2002, 68(5): 441-446.
- [6] Cronk S, Fraser C, Hanley H. Automated metric calibration of colour digital cameras [J]. *The Photogrammetric Record*, 2006, 21(116): 355-372.
- [7] Zhang H Y, Yu Z J. Initial displacement estimation method for speckle image based on marker matching [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0303001.
张红颖, 于之靖. 基于标志点匹配的散斑图像变形初值估计法 [J]. *光学学报*, 2017, 37(3): 0303001.
- [8] Wei P, Zhang X. Automated reference point detection in close range photogrammetry [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2017, 44(8): 9-12.
魏鹏, 张旭. 近景摄影测量中标识点自动检测 [J]. *计量与测试技术*, 2017, 44(8): 9-12.
- [9] Zhu Z K, Guan B L, Zhang X H, et al. Automatic three-dimensional measurement of large-scale

- structure based on vision metrology [J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 185269.
- [10] Feng Q Q. Research and practice of digital industrial photogrammetry [D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2010.
冯其强. 数字工业摄影测量技术研究与实践[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2010.
- [11] Wang W W. Study of high-precision attitude measurement based on close-range photogrammetry [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
王卫文. 基于近景摄影测量的高精度姿态测量研究[D]. 成都: 中国科学院大学, 2015.
- [12] Hong Y, Sun X X, Wang D, et al. Fast pose estimation method for unmanned aerial vehicle based on rectangular geometry feature[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0508006.
洪洋, 孙秀霞, 王栋, 等. 基于矩形几何特性的小型无人机快速位姿估计方法[J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0508006.
- [13] Lü Y Y, Gu Y Y, Gao Z Y, et al. Design and experiment of the monocular vision measurement system based on spatial cooperation pose [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 121505.
吕耀宇, 顾营迎, 高瞻宇, 等. 空间协同位姿单目视觉测量系统设计与实验[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 121505.
- [14] Chen P, Wang C X. IEPnP: an iterative camera pose estimation algorithm based on EPnP[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0411001.
陈鹏, 王晨骁. IEPnP: 一种基于 EPnP 的相机位姿迭代估计算法 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0411001.
- [15] Zhao L J, Liu E H, Zhang W M, et al. Feature extraction of target based on global information[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(4): 0415001.
赵连军, 刘恩海, 张文明, 等. 利用全局信息提取靶标特征的方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(4): 0415001.