

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108136

# 基于主动编码光源的单摄像机立体测量方法\*

李响 何东钢

(大连海洋大学信息工程学院 大连 116023)

**摘要:** 基于一台摄像机、一台投影仪构成光学测量系统,提出一种非特定姿态下的主动编码光源非接触立体测量方法。利用一张混合标定板分别标定测量系统中的摄像机与投影仪,建立二维图像坐标与三维空间坐标之间的映射关系,再主动投影横、纵两组格雷码及其多频测量条纹形成投影特征点,进而通过反演映射出目标特征的三维空间坐标。本方法避免了单目立体视觉测量中对于测量系统位姿的制约,去除了外部传感测量设备的使用;同时,主动光投影技术也解决了双目立体视觉测量中特征点匹配困难的问题。实验表明,在测量距离 1.2~1.6 m 范围,测量精度可以达到 1.5 mm,能够实现单目摄像机主动编码光的立体测量。

**关键词:** 单摄像机;结构光投影;系统标定;立体测量

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Stereo-measurement method based on active encoding source with monocular camera

Li Xiang He Donggang

(School of Information Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Active encoding source non-contact stereo measurement method is proposed with one camera and one projector in non-specific posture. A hybrid calibration board is used to calibrate the camera and projector in the measurement system respectively and the mapping relationship between two-dimensional image coordinates and three-dimensional spatial coordinates is established. Feature points is projected from the horizontal and vertical Gray codes and their multi frequency division measurement fringes, and the three-dimensional spatial coordinates of target is obtained through inversion. This method avoids position and orientation constraints in the monocular stereo measurement and the use of external precision measuring equipment. At the same time, feature point matching in binocular stereo vision measurement is solved by this method. Experiments show that in the range of 1.2~1.6 m measurement distance, the measurement accuracy can reach 1.5 mm, which can realize the active encoding source stereo-measurement with monocular camera.

**Keywords:** monocular camera; structured light projection; system calibration; stereo-measurement

## 0 引言

非接触立体视觉测量技术是当今测量技术中的研究热点,该技术广泛应用于工业精密测量领域。根据成像方法中使用摄像机的数量,分为单目<sup>[1]</sup>、双目<sup>[2]</sup>或多目视觉测量<sup>[3]</sup>。单目视觉测量技术是由一台摄像机采集图像,利用被测物体上的特定信息或空间中若干已知标志点信息建立数学模型,获得被测点距离摄像机的几何深度信息。

在立体视觉测量法中,双目或多目立体视觉<sup>[4-6]</sup>是用两个或多个已标定摄像机同时观察同一物体获得不同角度的

图像,通过计算分析不同图像中同一像点的视差来获取物体表面的三维信息。近年来,部分学者<sup>[7-9]</sup>通过研究向物体投射结构光,使之在物体表面形成带有特殊编码的外轮廓几何信息,而后仅由一台摄像机采集图像并根据三角测量法计算出空间位置信息,避免了双目视觉特征点识别与匹配或外部传感器的使用。

目前主动光测量方法主要包括时间测量方法和空间测量方法:时间测量方法是基于电磁波行程原理的一种间接测量技术,通过比较接收信号和光源发出信号的相位差并换算为等效空间距离,计算出被测物体表面的深度信息,如

收稿日期:2021-10-20

\* 基金项目:辽宁省教育厅科学研究基金(QL201716)项目资助

时间飞行法(TOF)<sup>[10-11]</sup>,然而该方法存在距离歧义性和像素阵列尺寸过小等弱点;而在空间测量方法中,相移法<sup>[12-13]</sup>采用投射正弦光栅图案到被测物体,条纹图案的振幅和相位受到物体表面深度信息的调制,通过算法解调出经过深度信息调制的条纹相位,进而得到物体的三维空间信息。该方法能够基于相位的连续变化重构出物体表面高度,而缺点是解调结果有周期性相位包裹,解相位包裹时需要相邻相位做参考。近年来,研究发现通过向被测物体表面投射编码图案,并由一个或多个摄像机获取经过物体表面调制后的图像,通过解码可获得不同视角之间的匹配点,进而通过三角测量法计算确定物体表面的三维坐标。基于上述原理,按照光源的不同形式主要分为点结构光<sup>[7]</sup>、线结构光<sup>[14]</sup>、面结构光<sup>[15]</sup>等。其中,利用随机散斑进行空间体编码技术的 Kinect<sup>[16]</sup>是一种面结构光,其将红外光穿透表面粗糙玻璃后形成随机的衍射斑点,这些斑点会在空间中的不同位置形成不同的随机编码图案,然后将这些散斑与参考平面的激光散斑进行互相关运算,即可得知激光散斑距离摄像机的距离,进而获得场景的三维深度信息。这些方法有些需要系统位姿制约,有些需要外部传感器确定目标距离以保证系统测量准确。

本文利用一台摄像机、一台投影仪以及计算机组成非特定位姿下的主动编码结构光源的单摄像机非接触测量系统。该系统根据已标定的摄像机和投影仪获得两个成像系统的内、外参数及相对空间位置信息。通过向被测物分别投影横、纵两组格雷码并获得两组投影交点的编码码字信息,进而建立同一点在摄像机的采集图像平面和投影仪中的待投影平面间的匹配信息,最终实现主动光编码光源的单摄像机立体视觉测量系统。与传统方法相比,本方法回避了单目立体视觉测量中对于测量系统位姿的制约<sup>[1]</sup>,去除了外部传感测量设备的使用;同时,本方法也解决了双目立体视觉测量中特征匹配<sup>[2]</sup>的难题。通过具体实验证明了在测试距离范围内,单目摄像机主动编码光的立体测量系统的可行性。

### 1 主动编码光源立体视觉测量原理

主动编码光投影测量系统由一台摄像机和一台投影仪组成,如图 1 所示。

通过主动投影在目标表面形成编码特征点,并通过摄像机采集过程,对应出两光学设备中的目标特征点,在两幅图像中寻找空间中同一特征点的匹配信息,根据同一点在不同图像中的视差,利用三角测量法计算该点在空间中的立体深度信息。为了方便表述主动编码光投影的立体视觉成像模型,现对各坐标系做如下定义,并如图 2 所示。世界坐标系:  $O^w - X^w Y^w Z^w$ , 以空间任意点为坐标原点的一个基准坐标系;摄像机坐标系:  $O^c - X^c Y^c Z^c$ , 以摄像机透镜光学中心  $O^c$  为坐标原点,主光轴为  $Z^c$  轴,由摄像机指向的被测物体为正方向,依据右手螺旋法则建立摄像机坐标系

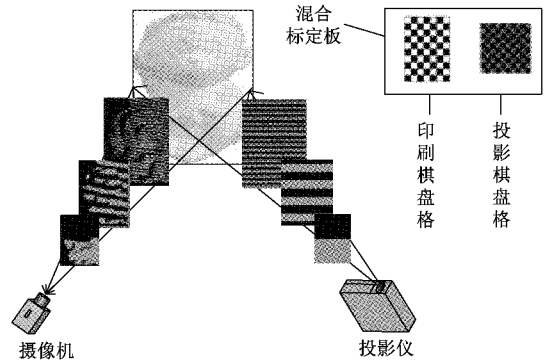


图 1 主动编码光投影立体视觉测量系统

的  $X^c$  轴和  $Y^c$  轴;投影仪坐标系:  $O^p - X^p Y^p Z^p$ , 以投影仪透镜光学中心  $O^p$  为坐标原点,其坐标方向与摄像机坐标系定义相同;图像坐标系:  $o^c - u^c v^c$ , 以摄像机 CCD 采集的图像建立的图像坐标系,以该图像左上角为坐标原点,并建立摄像机图像坐标系的  $u^c$  轴和  $v^c$  轴。待投影图像坐标系:  $o^p - u^p v^p$ , 以投影仪向外投出图像建立的图像坐标系,其坐标方向与摄像机图像坐标系定义相同。

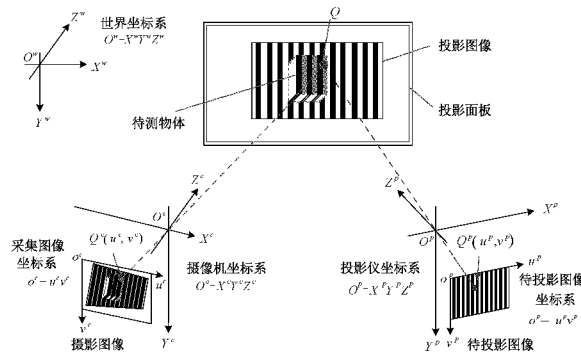


图 2 单摄像机-单投影立体视觉测量原理

如图 2 所示,在投影面板上有世界坐标系下的待测物体表面点  $Q$ 。该点在投影仪坐标系  $O^p - X^p Y^p Z^p$  中坐标为  $(x^p, y^p, z^p)$ , 映射至待投影图像坐标系中为  $Q^p(u^p, v^p)$ , 其在摄像机坐标系  $O^c - X^c Y^c Z^c$  中为点  $Q(x^c, y^c, z^c)$ , 在采集图像坐标系中映射于点  $Q^c(u^c, v^c)$ 。空间点  $Q$  在世界坐标系、摄像机坐标系和投影仪坐标系均可以利用旋转矩阵和平移矩阵互相转换,式(1)所示为摄像机坐标系与世界坐标系之间的转换关系和投影仪坐标系与摄像机坐标系之间的转换关系。

$$\begin{bmatrix} x^c \\ y^c \\ z^c \end{bmatrix} = \mathbf{R}^c \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ z^w \end{bmatrix} + \mathbf{T}^c = \begin{bmatrix} r_{11}^c & r_{12}^c & r_{13}^c \\ r_{21}^c & r_{22}^c & r_{23}^c \\ r_{31}^c & r_{32}^c & r_{33}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ z^w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1^c \\ t_2^c \\ t_3^c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x^p \\ y^p \\ z^p \end{bmatrix} = \mathbf{R}^p \begin{bmatrix} x^c \\ y^c \\ z^c \end{bmatrix} + \mathbf{T}^p = \begin{bmatrix} r_{11}^p & r_{12}^p & r_{13}^p \\ r_{21}^p & r_{22}^p & r_{23}^p \\ r_{31}^p & r_{32}^p & r_{33}^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^c \\ y^c \\ z^c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1^p \\ t_2^p \\ t_3^p \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{R}^c$ 、 $\mathbf{T}^c$  分别代表世界坐标系与摄像机坐标系的

旋转矩阵和平移矩阵;  $\mathbf{R}^p$ 、 $\mathbf{T}^p$  分别为摄像机坐标系与投影仪坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。

图2可得到空间坐标系之间的转换关系,而二维图像坐标系则由光学镜头是小孔成像模型得到映射关系,如图3所示。以摄像机为例,若摄像机坐标系  $O^c - x^c y^c z^c$  有空间任一点  $P$  经过摄像机光心  $O^c$  在 CCD 成像面  $u^c v^c$  上的投影位置  $p^c$ 。其中,图像坐标系是以坐标系  $u^c v^c$  中  $o(0,0)$  作为原点,而成像坐标系以成像面中心作为原点,即  $C'(u_0^c, v_0^c)$  为坐标原点,其中两个图像坐标系仅具有平移关系。利用光学几何原理,从空间特征点  $P(x^c, y^c, z^c)$  到摄像机成像坐标系特征点  $p^c(u_0^c, v_0^c)$  的变换。

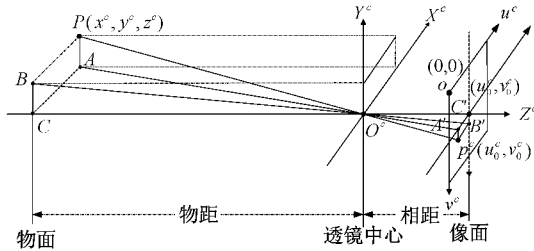


图3 摄像机小孔光学成像映射

其中,  $X^c = AC$ ,  $Y^c = BC$ ,  $Z^c = O^c C$ ,  $u^c - u_0^c = A'C'$ ,  $v^c - v_0^c = B'C'$ 。根据透镜成像关系:物距远远大于相距,因此相距与相机焦距近似相等,  $O^c C' \approx f^c$ 。由图3中,三角几何关系可表示为式(2):

$$\begin{cases} \frac{AC}{O^c C} = \frac{A'C'}{O^c C'} \Rightarrow \frac{x^c}{z^c} = \frac{u^c - u_0^c}{f^c} \\ \frac{BC}{O^c C} = \frac{B'C'}{O^c C'} \Rightarrow \frac{y^c}{z^c} = \frac{v^c - v_0^c}{f^c} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x^c = z^c \frac{(u^c - u_0^c)}{f^c} \\ y^c = z^c \frac{(v^c - v_0^c)}{f^c} \\ z^c = \frac{f^c [l_1^p f'_p - l_3^p (u^p - u_0^p)]}{[r_{31}^p (u^c - u_0^c) + r_{32}^p (v^c - v_0^c) + r_{33}^p f^c] (u^p - u_0^p) - f'_p [r_{11}^p (u^c - u_0^c) + r_{12}^p (v^c - v_0^c) + r_{13}^p f^c]} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)表明,若已知空间点  $Q$  在投影到图像平面上的坐标  $(u^c, v^c)$  和该点在投影仪所投影图像中的坐标  $(u^p, v^p)$ , 以及摄像机光心坐标  $(u_0^c, v_0^c)$ 、焦距  $f^c$  和投影仪光心坐标  $(u_0^p, v_0^p)$ 、焦距  $f^p$  以及投影仪在摄像机坐标系下的旋转矩阵  $\mathbf{R}^p$  和平移矩阵  $\mathbf{T}^p$ , 即可求得点  $Q$  的在摄像机坐标系下的三维空间坐标。

因此,若想获得空间点的深度信息,首先要求解出摄像机和投影仪的内参数及两者的相对位姿;其次要正确匹配空间中同一点在摄像机的采集图像平面和投影仪的投影平面中的对应坐标。

## 2 主动投影光源立体视觉测量方法

本文通过印刷棋盘格和投影棋盘格共面的混合标定

得到摄像机小孔成像原理中图像坐标与空间三维立体坐标之间的转换关系如式(3)所示。

$$\begin{cases} u^c - u_0^c = f^c \frac{x^c}{z^c} \\ v^c - v_0^c = f^c \frac{y^c}{z^c} \end{cases} \quad (3)$$

当以像素单位表示时,若每个像素点在 CCD 上的物理尺寸为  $d_x^c$  和  $d_y^c$  一般像元为方形,令  $d_x^c = d_y^c = d^c$ 。在 CCD 平面的坐标  $(u^c, v^c)$  与其在摄像机坐标系下的三维坐标  $Q(x^c, y^c, z^c)$  的转换关系如式(4)所示。

$$\begin{cases} u^c - u_0^c = \frac{f^c x^c}{d^c z^c} \\ v^c - v_0^c = \frac{f^c y^c}{d^c z^c} \end{cases} \quad (4)$$

与摄像机类似,投影仪光学镜头亦是小孔成像系统,如式(5)所示。

$$\begin{cases} u^p - u_0^p = \frac{f^p x^p}{d^p z^p} \\ v^p - v_0^p = \frac{f^p y^p}{d^p z^p} \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $(u^p, v^p)$  是被投影平面上的特征点坐标,被投影平面原点坐标  $(u_0^p, v_0^p)$ 、投影仪焦距  $f^p$ ,  $d^p$  为投影仪投影面像元尺寸。若令

$$f'_c = \frac{f^c}{d^c}, f'_p = \frac{f^p}{d^p} \quad (6)$$

从而得到空间  $Q$  点三维坐标  $(x^c, y^c, z^c)$  与投影图像面坐标  $(u^p, v^p)$  和采集图像面坐标  $(u^c, v^c)$  之间的转换关系如式(7)所示。

板标定摄像机与投影仪,获得其内、外参数。然后,采用格雷码编码将空间中某一点在摄像机中的采集图像和投影仪中的待投影图像中的位置进行匹配。为了使该特征点具备采集图像和待投影图像中的匹配信息,投影了横、纵两组测量条纹,取横、纵测量条纹的交叉点作为主动光投影测量的特征点。因其包含了横、纵两方向的格雷码编码信息,利用已知编码信息确定空间中同一点在两图像中的精确映射,从而实现待测物体的表面立体测量。主动编码光源的单摄像机立体测量方法示意图如图4所示。

主动投影光源视觉测量方法基于投影仪投影编码结构光的编码特性,匹配出在摄像机内的采集图像平面和投影仪内的投影平面的映射关系,进而通过摄像机和投影仪的空间关系计算得出其深度信息。

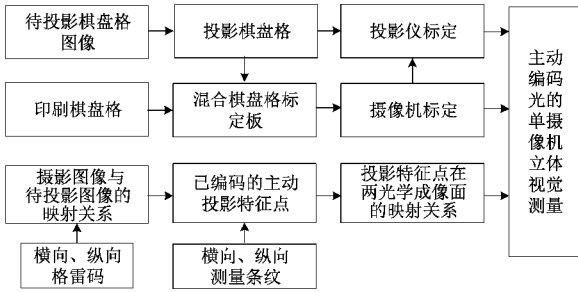


图 4 主动编码光源的单摄像机立体测量方法示意图

2.1 单摄像机单投影仪标定技术

为了获得主动编码光源立体测量方法中所需参数,应对系统进行标定。在混合标定板投射投影棋盘格时,取不同位姿采集图像,如图 5 所示。

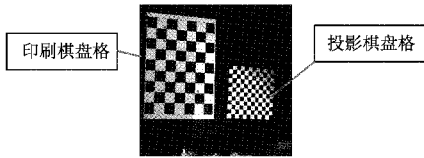


图 5 摄像机采集到的混合标定板图像

在图 5 中,左侧为印刷棋盘格,右侧为投影棋盘格。摄像机标定使用左侧印刷棋盘格,利用标定技术获得摄像机内、外参数<sup>[7]</sup>,建立空间三维点与二维图像点的映射关系。投影仪标定采用投影棋盘格,其空间三维信息点坐标的获取基于共面的印刷棋盘格和投影棋盘格的混合标定板。当标定摄像机后,空间中混合标定板所在平面上所有点的坐标均可表示,即通过与印刷标定板的共面信息获得投影棋盘格三维点的空间坐标。因此,将式(1)中摄像机坐标系转换关系和式(4)写成矩阵形式可表示为式(8):

$$z^c \begin{bmatrix} u^c \\ v^c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{d_x^c} & 0 & u_0^c \\ 0 & \frac{1}{d_y^c} & v_0^c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f^c & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^c & T^c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ z^w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u^c & 0 & u_0^c \\ 0 & f_v^c & v_0^c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^c & T^c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^w \\ y^w \\ z^w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

若将摄像机坐标系定义为世界坐标系,则式(8)表示为式(9):

$$\lambda^c \begin{bmatrix} u^c \\ v^c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u^c & 0 & u_0^c \\ 0 & f_v^c & v_0^c \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R^c & T^c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^c \\ y^c \\ z^c \\ 1 \end{bmatrix} = M_1^c \cdot M_2^c \begin{bmatrix} x^c \\ y^c \\ z^c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $M_1^c$  为摄像机内参数,含  $f_u^c, f_v^c$  为横、纵两方向的焦距;  $(u_0^c, v_0^c)$  是摄像机图像坐标原点;  $\lambda^c$  为尺度因子;  $M_2^c$  即为所在标定板平面的外参数,含旋转矩阵  $R^c$ 、平移矩阵  $T^c$ 。当已知  $M_1^c, M_2^c$  和点  $Q$  在采集图像坐标系的坐标  $Q^c(u^c, v^c)$ , 即可计算得到摄像机坐标系下点  $Q(x^c, y^c, z^c)$  的坐标。

投影仪亦需要获得与摄像机对应参数来进行标定,但投影仪是图像输出设备,只能投影不能进行图像采集,即无法利用空间中印刷标定板上棋盘格中角点的三维信息确定投影仪的内、外参数。然而投影仪和摄像机的成像过程也有相似之处,从光线的传播方向上来看,投影仪的光线投射成像过程与摄像机的图像采集过程相反,可通过逆光路方法将投影仪比拟成逆光线方向的摄像,机如图 6 所示。

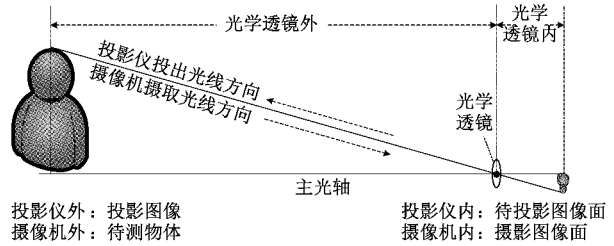


图 6 投影仪投影成像系统与摄像机成像系统比拟图

投影仪内的待投影图像等效于摄像机成像系统中采集图像面,而投影仪外的投影图像等效于空间中的待测物体,投影仪的光线方向可以看成是摄像机光线的逆方向。通过逆光路法将投影仪比拟成摄像机进行标定的区别在于:摄像机标定为图像采集过程,其标定板使用印刷标定板,其方格角点为空间三维特征标志点。而投影仪标定为图像投影过程,其标定板使用待投影棋盘格,其图像上方格角点为二维图像特征标志点。因此,标定投影仪时无法确定投影出的图像所在的空间三维坐标。

利用图 5 中的投影仪标定部分,为了确定投影棋盘格图像的空间坐标,将投影棋盘格投影于印刷棋盘格右侧。将投影棋盘格投影在混合标定板中黑色区域,即投影棋盘格和印刷棋盘格共面,则在摄像机坐标系下,两棋盘格具有相同的外参数。因此,在同一个位姿下用混合标定板中印刷棋盘格部分标定摄像机,获得摄像机内、外参数后,利用其计算得到投影棋盘格上角点的三维空间坐标,结合待投影图像面的二维图像坐标,即可求解出投影仪的内外参数及在摄像机坐标系下的投影仪位姿。因此,当已知空间点  $Q$  的坐标  $(x^p, y^p, z^p)$  和其映射在待投影图像坐标系下  $Q^p(u^p, v^p)$  时,可建立投影仪坐标系与待投影图像坐标系的映射关系,写成似于摄像机标定的方程,如式(10)所示。



$$\lambda^p \begin{bmatrix} u^p \\ v^p \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u^p & 0 & u_0^p \\ 0 & f_v^p & v_0^p \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R}^p & \mathbf{T}^p \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^p \\ y^p \\ z^p \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1^p \cdot \mathbf{M}_2^p \begin{bmatrix} x^p \\ y^p \\ z^p \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其参数含义与摄像机参数相似。至此,完成了摄像机与投影仪的标定。通过标定可以得到式(7)中测距所需的摄像机和投影仪的焦距、图像坐标原点及在摄像机坐标系下的投影仪位姿以及空间点在摄像机图像面和待投影面的坐标等参数。

### 2.2 基于编码结构光的主动投影特征点

为了获得物体表面形变信息,需要采集并匹配采集图像和待投影图像中相同点的坐标,而一般物体表面固有特征点数量有限,不足以识别及重建物体表面实现测量。因此为了增加被测物体表面特征点,在被测物体上通过主动投影特征点的方式实现。这种特征点是由投射横、纵两方向测量条纹并形成对应交叉点构成的。但测量条纹的疏密程度决定了投影特征点的疏密程度,决定了该系统的测量精度。但过密的投影光线将在被测物体表面散射而发生条纹混叠,再如摄像机分辨力大小等现有设备的制约,无法采集清晰可辨的测量条纹。若在现有条件下得到同样的精度,按照四等分的条纹间隔顺序将原有图像等间距分为四份分时投影,再叠加处理后获得精确的测量条纹,如图7所示。

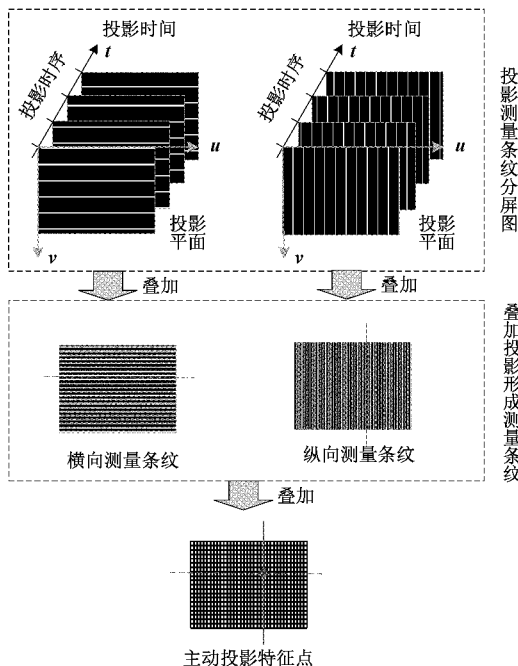
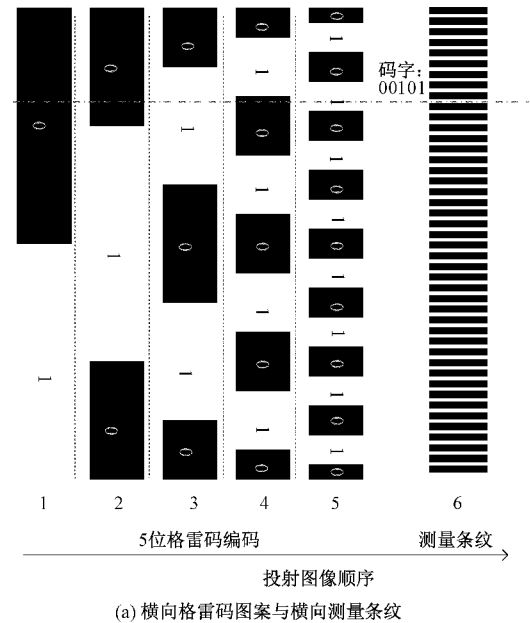
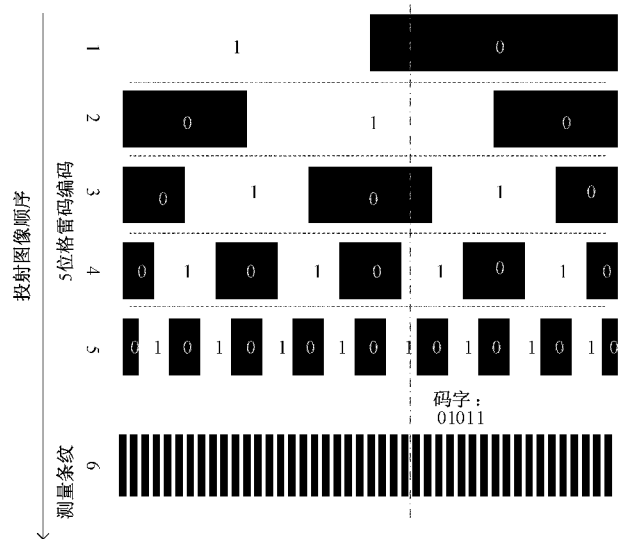


图7 投影测量条纹特征点及测量条纹分时投影

同时为了在采集图像坐标系和待投影图像坐标系中匹配两方向的测量条纹,投影相同像素平面大小的横、纵两方向格雷码编码保证其对应性,其投射的格雷码及测量条纹顺序如图8所示。格雷码编码是包含二值黑、白编码的条纹<sup>[15]</sup>,分别代表0、1。 $n$ 位格雷码编码能获得最多编码为 $2^n$ 个,任意相邻的码字之间仅有一位跳变,有效的降低误码率。如图8(a)所示为横向条纹格雷码及测量条纹的对应关系,从左到右表示投射5位从高至低位的格雷码图像,第6幅为横向测量条纹。若一条投射光线存在于各位格雷码图片上,根据其编码对应读出码字为00101。同理,如图8(b)获得纵向格雷码编码图案对应的码字为01011。



(a) 横向格雷码图案与横向测量条纹



(b) 纵向格雷码图案与纵向测量条纹

图8 格雷码编码图案与测量条纹

利用横、纵测量条纹投影得到主动投影特征点及格雷码匹配信息,建立采集图像与待投影平面点的匹配信息,

再结合已标定的成像系统参数实现物体表面的三维测量。

### 3 立体视觉测量系统建立与实验分析

为了验证本方法的有效性,建立主动光编码光源的单摄像机立体测量系统,如图 9 所示。该系统由摄像机、投影仪及计算机组成,其中,摄像机选取型号为 UNIQ UP-930,其 CCD 感光像元尺寸为  $4.65 \mu\text{m}$ ,有效像素平面为  $1024 \times 1024$  像素;投影仪采用 VIVITEK D935EX 投影仪,像素平面分辨率为  $1366 \times 768$ ;计算机采用 win10 操作系统上搭载双核 2.5 GHz 英特尔 Core i7 处理器,内存 8 GB;实验均采用 MATLAB 2018a 平台执行。



图 9 主动光编码光源测量系统实物图

为了获得投影仪和摄像机内、外参数,需对摄像机和投影仪分别进行标定。通过标定可以获得投影仪和摄像机的相对位置以及摄像机、投影仪内部的结构特性。这里对摄像机和投影仪分别进行标定。利用图 5 所示的混合标定板进行标定,其右侧投影棋盘格投射方格数为  $12 \times 12$ ,每个投影方格为  $50 \times 50$  像素。左侧印刷棋盘格方格数为  $7 \times 9$ ,方格大小为  $30.00 \text{ mm} \times 30.00 \text{ mm}$ 。实验中先需固定摄像机与投影仪相对位置,采用投影仪投影棋盘格和摄像机采集混合标定板方式图像,任意旋转该混合标定板,并根据采集到不同角度的图像进行摄像机和投影仪的标定。

#### 3.1 四棱锥石膏体立体测量实验

取摄像机光心与投影仪光心距离为  $730.00 \text{ mm}$ ,混合标定板放置在距离摄像机约  $1.6 \text{ m}$  处,采集混合标定板图像进行标定。获得如表 1 中所示为摄像机和投影仪的内参数。

表 1 四棱锥石膏体实验的摄像机和投影仪内参数

所属设备	焦距/mm	主光心/pixel	
	$f$	$u_0$	$v_0$
摄像机	12.337	444.901 9	643.573 1
投影仪	13.707	536.330 3	852.192 8

通过标定,投影仪相对于摄像机的位姿可以表示为绕 X 轴、Y 轴、Z 轴分别旋转  $-27.9718^\circ$ 、 $-10.3362^\circ$ 、

$-8.0730^\circ$ ,同时沿以上三轴分别平移  $662.4$ 、 $186.8$ 、 $240.0 \text{ mm}$ 。如图 10 所示,向被测四棱锥石膏体投影横、纵两组七位格雷码图像,采集图像后得到各自的采集图像平面和待投影平面编码的对应关系如图 11 所示。

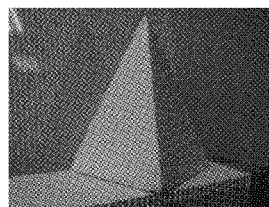


图 10 被测四棱锥石膏模型

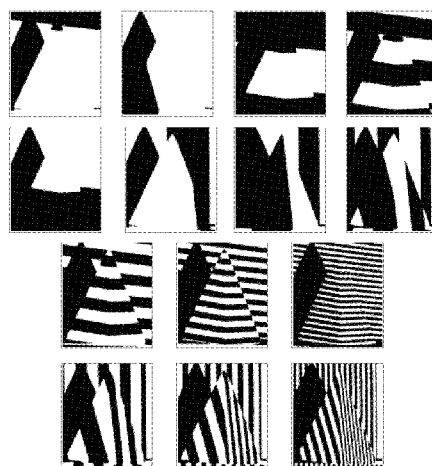
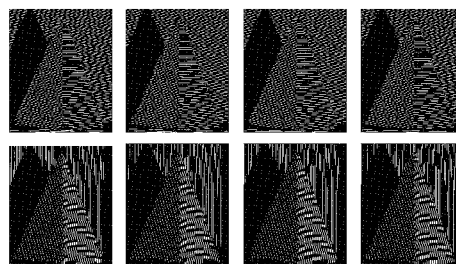
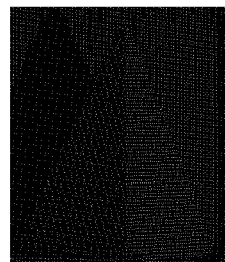


图 11 7 位格雷码编码投影至被测四棱锥图像

测量条纹在被测目标表面成像如图 12(a) 所示,投影的每幅图像均投射 768 像素横条纹或纵条纹,共 128 条,每条宽度 6 像素,其中明条纹宽 2 像素,暗条纹宽 4 像素。采用四分法将测量条纹分在四张投影图片中投影。



(a) 四棱锥石膏体表面获得的投影测量条纹图像



(b) 叠加后的测量条纹的交叉点图像

图 12 四棱锥石膏体表面获得的测量条纹及特征点图

采集图像后经过处理后叠加得到四棱锥表面形成的横、纵测量交叉点,待测物体表面共获得 3 667 个主动投影特征点,如图 12(b)所示。

利用格雷码匹配了采集图像坐标系和待投影图像坐标系中条纹映射关系,并利用摄像机投影仪标定出来的内外参数,将图 12(b)的重叠交叉点图像坐标代入式(7),可以得到在摄像机坐标系下的投影仪、被测四棱锥石膏体与摄像机的相对位置关系,如图 13 所示。

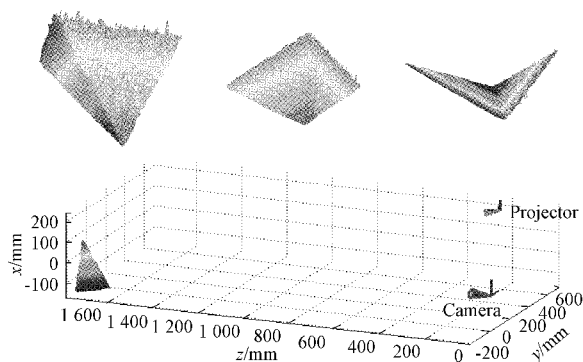


图 13 被测四棱锥复原结果及其在摄像机坐标系下的位姿

如图 14 所示,四棱锥体下表面为正方形,其边长 142.50 mm、侧棱长 234.50 mm。以本方法得到的为实测距离,分别计算各棱长及相应误差,如表 2 所示。

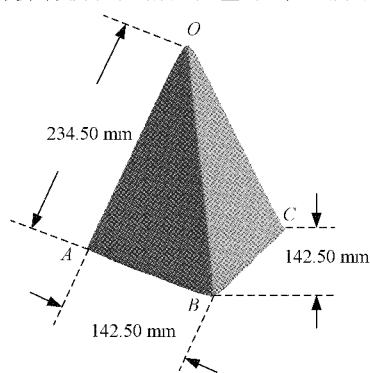


图 14 四棱锥石膏体模型

表 2 距摄像机光心 1.6 m 处测量四棱锥石膏体表面特征距离

名称	实测 距离/mm	标准 距离/mm	绝对 误差/mm	相对 误差/%
侧棱 OA 长	235.473	234.50	0.973	0.41
侧棱 OB 长	234.749	234.50	0.249	0.11
侧棱 OC 长	235.978	234.50	1.478	0.63
底棱 AB 长	143.436	142.50	0.936	0.66
底棱 BC 长	141.432	142.50	1.068	0.75

由图 13 可知,侧棱 OC 及底棱 BC 背向摄像机反射光不足、侧棱 OA 及底棱 AB 背向投影仪投影编码误差较大,因而,其测量值精度受到一定影响。

### 3.2 猴型石膏体立体测量实验

四棱锥体表面平坦,棱线突出,测量方便。对于表面情况复杂、棱线不明显物体,如选取猴型石膏体进行主动投影光源立体测量实验。取摄像机光心与投影仪光心距离为 750.00 mm,混合标定板放置在距离摄像机约 1.1 m 处进行标定,获得摄像机和投影仪的内参数如表 3 所示。

表 3 猴型石膏体实验的摄像机和投影仪内参数

所属设备	焦距/mm	主光心/pixel	
	$f$	$u_0$	$v_0$
摄像机	12.410	463.477 6	652.821 3
投影仪	14.559	592.515 8	768.824 6

通过标定,投影仪相对于摄像机的位姿表示为绕 X 轴、Y 轴、Z 轴分别旋转  $-30.080 3^\circ$ 、 $-8.640 2^\circ$ 、 $-6.259 5^\circ$ ,同时沿以上三轴分别平移 509.0、179.0、519.0 mm。如图 15 所示为被测猴型石膏体,向其先后投射七位横、纵格雷码编码并由摄像机采集到该编码图像如图 16 所示。



图 15 被测猴型石膏体

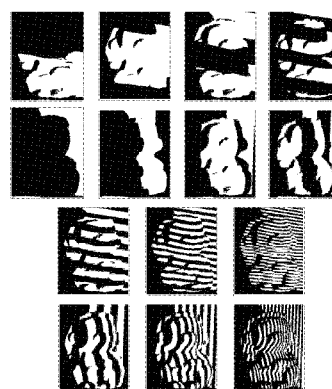


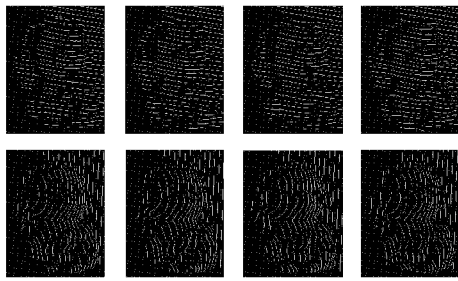
图 16 七位格雷码编码投影至被测猴体图像

如图 17(a)所示,按照四等分间隔抽取各形成四幅分屏图像。其中图 17(b)为横、纵条纹叠加之后重叠交叉点的图像点,在待测物体表面共获得 5 690 个主动投影特征点。

利用格雷码匹配采集图像坐标系和待投影坐标系中映射关系,并利用摄像机投影仪标定出来的内外参数,将图 17(b)的重叠交叉点图像坐标代入式(7),可以得到在摄像机坐标系下的投影仪、被测猴型石膏体特征点与摄像机的相对位置关系,如图 18 所示。

猴型石膏体实际表面测量结果如图 19 所示,在距摄像机镜头位置约 1.1 m 处放置猴型石膏体,其表面特征点测量距离与实际距离之间的误差如表 4 所示。





(a) 猴型石膏体表面获得的投影测量条纹图像



(b) 叠加后的测量条纹的交叉点图像

图 17 猴型石膏体表面获得的测量条纹及特征点图

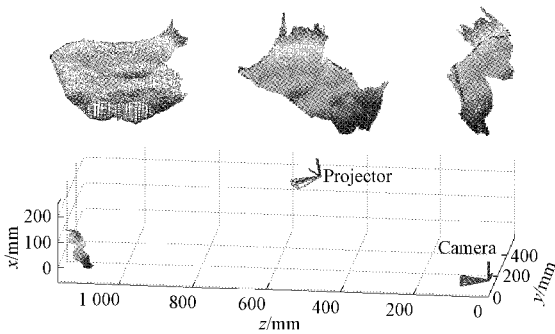


图 18 被测猴体复原结果及其在摄像机坐标系下的位姿

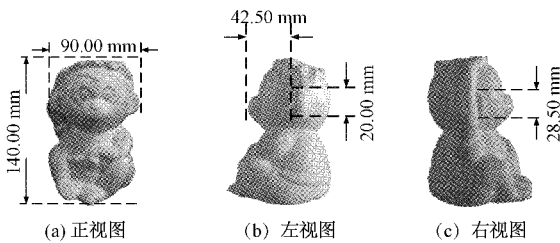


图 19 石膏猴体表面实测距离示意图及各特征部位长度

表 4 距摄像机光心 1.1 m 处测量猴型石膏体表面特征距离

名称	实测 距离/mm	标准 距离/mm	绝对 误差/mm	相对 误差/%
左耳高	20.71	20.00	0.71	3.55
右耳高	29.01	28.50	0.51	1.79
两耳宽	90.35	90.00	0.35	0.39
耳鼻高差	42.00	42.50	0.50	1.17

### 3.3 实验结果分析

针对两组不同待测物体进行主动编码光测量, 汇总测量参数如表 5 所示。

表 5 主动光编码光源测量系统参数表

测量项目	待测目标	
	四棱锥石膏体	猴型石膏体
待测物与摄像机光心距/m	1.6	1.1
待测物与投影仪光心距/m	1.6	0.73
待测物表面获得测量点数	3 667	5 690
特征点间平均距离/mm	0.47	0.67
摄像机坐标系下 投影仪的光心坐标	$\begin{bmatrix} 662.4 \\ 186.8 \\ 240.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 509.0 \\ 179.0 \\ 519.0 \end{bmatrix}$

两组待测物体与摄像机光心分别相距 1.6 和 1.1 m, 根据投影仪投影图像“近小远大”, 当投影同一图像时, 投影距离越远测量特征点间隔越大, 即量化误差越大, 而投影距离太近又会导致测量特征点图像混叠, 特征点互相覆盖。采集图像是“近大远小”, 距离越远, 图像越小, 其分辨率越低。因此, 调整实验参数主要依据: 1) 被测物体表面可获得投影仪的清晰投影, 并可以被摄像机采集到清晰的特征点图像; 2) 投影至被测物体表面的特征点具有一定的疏密程度, 即保证特征点的测量精度, 同时也不至于混叠。

从测量准确度上看, 被摄像机直接采集到投影编码密集交叉特征点测量值要高于背对摄像机或投影编码条纹覆盖空白区域, 这与目标位姿和目标距离有关。

本方法利用了摄像机与投影仪标定后的内外参数, 完成非特定位姿下的立体测量方法, 利用投影编码和测量条纹完成特征点的映射与匹配。与单目测量方法相比, 本方法减少了参数预知和限制条件: 1) 须已知摄像机与投影编码光源的光心距和光源中心至投影面距离; 2) 编码光源光轴与其投影所张成的投影平面垂直的限制条件; 这些条件和位姿的测量均需外部精确测量设备辅助进行。与双目测量方法相比, 本方法仅需进行主动投影和采集图像的编码一致性, 而无须两幅目标图像间的特征匹配与识别等复杂工作。

## 4 结 论

针对单摄像机立体测量系统特点, 提出了利用一台摄像机、一台投影仪在非特定位姿下的主动光编码立体测量方法。该方法以摄像机和投影仪标定确定的内、外参数为基础, 通过投射七位格雷码条纹, 确定两光学成像面中二维图像主动投影特征点坐标的映射关系。综合摄像机-投影仪标定结果以及测量条纹在各自成像面主动投影特征点的映射关系, 获得被测物体表面立体深度信息实现主动编码光的单摄像机立体测量。



本方案还存在以下问题需要进一步深入研究:1)投影仪投出测量特征点是横、纵测量条纹的平均分布叠加点,条纹间距疏密程度影响下的测量物体投影点覆盖表面不连续,且目标距离越远,条纹密度越稀疏;2)被测目标物体表面如陡峭、边界锐利、表面内凹阴影等情况也会导致投影条纹及特征点匹配困难;3)外部光照影响及系统标定误差的存在也会影响测量精度。今后将根据被测目标与测量系统距离优化设计投影编码,改善由于目标距离导致投影表面特征点疏密问题;同时,设计对比实验评价不同投影编码效能,研究其对被测目标表面立体复原的影响。

### 参考文献

- [1] 韩砾菁. 基于图像的智能测量技术研究[D]. 北京:北方工业大学, 2021.
- [2] 于婕, 许立成, 李文书. 基于相似三角的药品盒尺寸测量[J]. 电子测量技术, 2019, 42(23):137-142.
- [3] 束安, 裴浩东, 段慧仙. 空间非合作目标的三口立体视觉测量方法[J]. 光学学报, 2021, 41(6):163-171.
- [4] LI X, LI W, MA X, et al. Spatial light path analysis and calibration of four-mirror-based monocular stereo vision [J]. Optics Express, 2021, 29(20): 31249-31269.
- [5] CHANG L, LIU J, CHEN Z, et al. Stereo vision-based relative position and attitude estimation of non-cooperative spacecraft[J]. Aerospace, 2021, 8(8):230.
- [6] HU Z, HOU Y, TAO P, et al. IMGTR: Image-triangle based multi-view 3D reconstruction for urban scenes[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 181: 191-204.
- [7] 耿楷真, 高治华. 单摄像机单投影仪结构光三维测量系统标定方法[J]. 应用光学, 2018, 39(2):225-229.
- [8] CAI Z, LIU X, PENG X, et al. Ray calibration and phase mapping for structured-light-field 3D reconstruction [J]. Optics Express, 2018, 26(6): 7598-7613.
- [9] CAI Z, LIU X, PEDRINI G, et al. Accurate depth estimation in structured light fields [J]. Optics Express, 2019, 27(9): 13532-13546.
- [10] SU S, HEIDE F, WETZSTEIN G, et al. Deep end-to-end time-of-flight imaging[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2018: 6383-6392.
- [11] 马治强, 徐跃, 朱思慧, 等. 用于单光子 TOF 测量的时间-幅度变换器[J]. 微电子学, 2021, 51(4):546-551.
- [12] ZHANG Y, XIONG Z, WU F. Hybrid structured light for scalable depth sensing[C]. 2012 19th IEEE International Conference on Image Processing, IEEE, 2012: 17-20.
- [13] YANG X, LIN H, LUO J, et al. Improved ternary gray-code phase unwrapping algorithm for 3D measurement using a binary defocusing technique[J]. Electronics, 2021, 10(15): 1824.
- [14] 李文涛, 王培俊, 陈亚东, 等. 钢轨全轮廓线结构光双目视觉测量系统标定[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 203-211.
- [15] MARRUGO A G, GAO F, ZHANG S. State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: A review[J]. JOSA A, 2020, 37(9): B60- B77.
- [16] 孟明, 杨方波, 余青山, 等. 基于 Kinect 深度图像信息的人体运动检测[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(2): 386-393.

### 作者简介

李响, 博士, 讲师, 主要研究方向为光学编码与信号处理等。

E-mail: lixiang@dlou.edu.cn

何东钢(通信作者), 硕士, 教授, 主要研究方向为计算机控制系统等。

E-mail: hdg@dlou.edu.cn