

文章编号 1004-924X(2011)04-0717-11

编码结构光系统模型及误差分析

贾小军^{1,2}, 张之江¹, 曹芳¹, 曾丹¹

(1. 上海大学 特种光纤与光接入网重点实验室, 上海 200072;

2. 嘉兴学院 数学与信息工程学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘要:根据编码结构光检测原理,建立了结构光测量系统的数学模型,研究了该模型各参量之间的相互关系及误差,得到了优化的系统结构参数。按照系统的几何结构,建立了深度信息的计算模型。分析了系统参数对模式成像的影响,实现了测量系统的模式像在不同参数值下的动态变形,并确定了图像坐标随深度值变化的几何关系。通过分析系统参数与深度信息的误差关系,确定了系统集成应遵守的约束条件,集成了最优系统结构。实验结果表明,按照优化参数建立的系统,其测量相对误差约为0.3%,基本满足编码结构光测量系统三维重建的高精度要求。

关键词:编码结构光;系统模型;误差分析;三维重建

中图分类号:TP242.62;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111904.0717

System model and error analysis for coded structure light

JIA Xiao-jun^{1,2}, ZHANG Zhi-jiang¹, CAO Fang¹, ZENG Dan¹

(1. *Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China*; 2. *School of Mathematics and Information Engineering, Jiaxing University, Jiaxing 314001, China*)

Abstract: A mathematical model for structure light measurement was established based on the inspecting principle of coded structure light, and the optimal system configuration parameters were obtained. The interrelationship between model parameters and their errors was investigated. Based on the system geometry structure, the computing model of depth information was established. By analyzing the influence of system parameters on the pattern imaging, the dynamic deformation of pattern images were captured under different measurement conditions, and the geometry relationship of image coordinate changing with the depth was determined. By analyzing the system parameters and depth information errors, system integration constraint condition was observed, and the optimal system configuration was established. Experimental results show that the system relative error established with optimal parameters is about 0.3%, which can meet the high-precision measurement requirement of 3D reconstruction of coded structure light.

Key words: coded structure light; system model; error analysis; 3D reconstruction

收稿日期:2010-05-12;修订日期:2010-08-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60772124, No. 60832003);上海市重点学科和科委重点实验室资助项目(No. S30108, 08DZ2231100)

1 引言

基于机器视觉的三维目标检测技术近年来得到了飞速发展,已广泛地应用于机器人导航、逆向工程、物体识别、工业自动化、运动跟踪等领域。通常,三维场景几何信息的重构可以经过两种途径实现:被动法和主动法。被动法中最典型的就是立体视觉法,该三维视觉系统通常由两台摄像机组成,利用拍摄的两幅图像进行像素匹配,通过三角关系计算深度信息实现场景的三维重建。然而识别和确定两幅图像中的匹配点,尤其是在自然场景和自由曲面物体图像中的匹配点需要借助约束条件,如极线约束来定位。为了避免这个难题,有学者提出了结构光主动视觉技术,用光源代替立体视觉中的一台摄像机^[1-2],投射一幅或几幅由点、线或复杂结构基元构成的模式,由摄像机获取变形的模式图像,利用解码方法得到目标的三维信息。由于投射到场景的光线已被编码,又称为编码结构光^[3-5]。该技术具有快速、高精度、高分辨率、低成本、大视场及容易实现等特点,近年来得到了广泛应用^[6-8]。

在编码结构光检测系统中,检测精度及视场范围由系统几个关键参数决定:CCD 和光源的基线距离、CCD 成像角、光源投射角、CCD 焦距、光源与模式的距离。文献^[9-11]给出了结构光测量系统的数学模型及深度信息的计算方法,然而,它们仅用于线结构光^[9-10]或圆结构光模式^[11],对于点阵形式不适用。许丽^[12-13]等人通过分析条纹光场和系统结构参数之间的关系,建立了系统误差传递公式,并得到优化的系统参数,其分析方法适合于条纹光场。吴海滨^[14]等人建立了系统模型并对其进行标定,提高了系统检测精度。邹媛媛^[15]等人分析了在激光器垂直入射,摄像机倾斜和激光器倾斜,摄像机垂直安装两种情况下的误差计算,建立了系统参数之间的关系,但其误差精度范围无法确认。文献^[16]建立了编码结构光系统模型,但未进行误差分析,无法约束系统结构参数。

本文提出了一种由点阵构成的结构光模式,用于在系统标定之前研究模型参数对其成像的影响。建立了系统测量模型,分析了系统参数之间的相互关系及对深度信息误差的影响,提出了结构光视觉检测系统优化设计方法。根据优化得到

的参数,得到测量系统相对误差约为 0.3%。实际测量结果验证了该测量系统三维检测的可行性。

2 编码结构光系统模型

本文基于针孔模型(Pin-hole Model)建立了编码结构光检测系统模型。在针孔模型中,不考虑发射侧和接收侧可能存在的光线路径变化,即认为光束自点光源射出后,沿直线投射在目标上,经目标反射的光束,也沿直线进入 CCD 像平面,且进入 CCD 像平面的所有光束聚焦于一点。实际测量中,在投射侧和接收侧均存在误差。虽然如此,考虑到光学系统模型,特别是镜头边缘的畸变极为复杂,通过针孔模型在理论上做系统的前期简化分析仍对结构光系统的参数分析有较大的指导意义和实用价值,还可以通过标定与校准^[17-18],尽可能消除误差的影响。

理想的编码结构光检测系统原理如图 1。投射侧点光源 S_0 和接收侧 CCD D_0 在一个水平面上,距离为 S ;以其中心 G 为坐标原点建立三维全局坐标系, Z 轴垂直纸面向里,符合右手规则,故 S_0 坐标为 $(S/2, 0, 0)$, D_0 坐标为 $(-S/2, 0, 0)$ 。光源侧的模式平面(源平面 S)的几何中心与光源 S_0 的连线和平面 S 垂直,与 X 轴的夹角为 θ_s ,距离为 f_s 。CCD 侧的像平面 D 的几何中心与 D_0 的连线和平面 D 垂直,距离为 f_c ,与 X 轴的夹角为 θ_D 。 T 为三维场景目标上的任意一点。假设此时与光源 S_0 的连线交 S 平面于 E 点,与 CCD D_0 的连线交平面 D 于 R 点, T' 为 T 在 XGZ 面上的投影。根据此模型,可以求解出目标 T 点

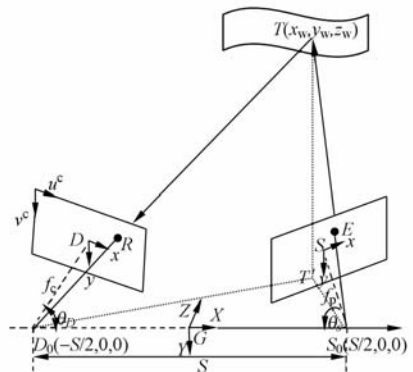


图 1 编码结构光检测系统的针孔模型

Fig. 1 Pin-hole model of coded structured light measurement system

的深度信息。

图 2 是图 1 在 XGZ 面上的投影,利用该图可以得到场景空间点和光源与 CCD 的平面直线方程。为了能够清楚表达光源侧和 CCD 侧各坐标之间的相互关系,将其进行分解,分别如图 3(a)和(b)所示。在光源侧,如图 3(a), SH_S 垂直 X 轴且交 X 于 H_S 点, X' 轴平行 X 轴且交源平面于 S 点, EH_E 垂直 X' 轴且交 X' 于 H_E 点, ES_0 与 X 轴的夹角为 α_S 。在 CCD 侧,如图 3(b), DH_D 垂直于 X 轴且交 X 于 H_D 点, X' 平行 X 轴交像平面于 D 点, RH_R 垂直 X' 轴且交于 H_R 点, RD_0 与 X 轴的夹角为 α_D 。利用三角几何关系,可以建立一系列的方程。

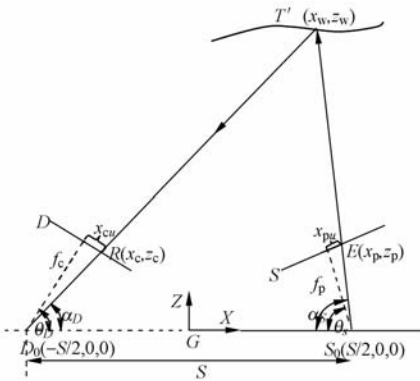


图 2 模型在 XOZ 面的投影

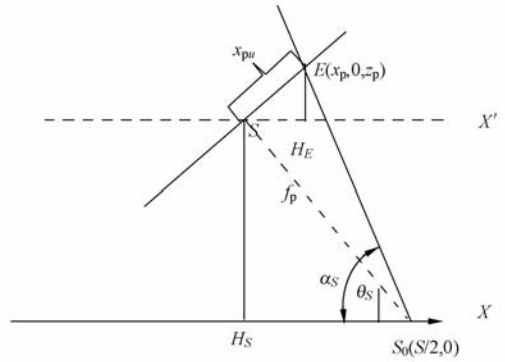
Fig. 2 Projection of model in XOZ plane

参考图 1 的光源侧,设点 E 在源平面 S 坐标系中的物理坐标为 (x_{pu}, y_{pu}) ,在空间全局坐标系(三维坐标系) G 中的坐标为 (x_p, y_p, z_p) ,单位均为 mm 。根据三角关系,有:

$$\begin{cases} x_p = S/2 - f_p \times \cos \theta_S + x_{pu} \times \sin \theta_S \\ y_p = y_{pu} \\ z_p = f_p \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S \end{cases} \quad (1)$$

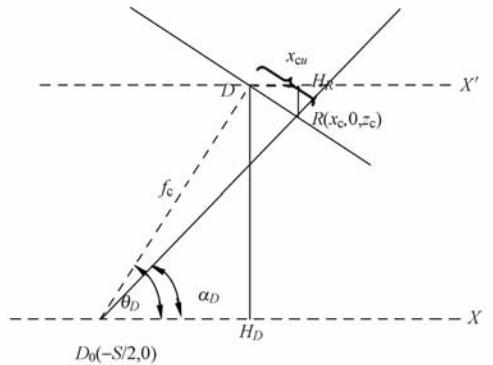
同理,在 CCD 侧,可以得到空间点 T 在像平面中的像点 R ,其在 D 坐标系中的物理坐标为 (x_{cu}, y_{cu}) , $x_{cu} = (u^c - u_0^c) \times dx$, $y_{cu} = (v^c - v_0^c) \times dy$,其中, (u^c, v^c) 表示以像素为单位的图像坐标系的坐标, (u_0^c, v_0^c) 表示图像中心坐标, dx, dy 分别表示每个像素在 x, y 方向上的物理尺寸,单位为 mm 。像点 R 在 G 坐标系中的坐标为 (x_c, y_c, z_c) 。可以建立如下的三角变换关系:

$$\begin{cases} x_c = -S/2 + f_c \times \cos \theta_D + x_{cu} \times \sin \theta_D \\ y_c = y_{cu} \\ z_c = f_c \times \sin \theta_D - x_{cu} \times \cos \theta_D \end{cases} \quad (2)$$



(a) 光源侧

(a) Light source side



(b) CCD 侧

(b) CCD side

图 3 光源侧和 CCD 侧的分解

Fig. 3 Disassembled figures at light source side and CCD side

假设在像平面中观察到一点 R ,测出其其在 D 坐标系中的坐标 (x_{cu}, y_{cu}) ,并经解码推出对应的模式点为 E ,查出 E 在源平面 S 中的坐标 (x_{pu}, y_{pu}) 。据此,可计算对应的目标点 T 的三维全局坐标 (x_w, y_w, z_w) 。图 2 中存在如下关系:

$$\begin{cases} \alpha_S = \theta_S + \arctan(x_{pu}/f_p) \\ \alpha_D = \theta_D - \arctan(x_{cu}/f_c) \end{cases} \quad (3)$$

同时,有:

$$S = z_w \times \cot \alpha_S + z_w \times \cot \alpha_D, \quad (4)$$

得:

$$z_w = S \times \frac{\sin \alpha_S \times \sin \alpha_D}{\sin(\alpha_S + \alpha_D)}. \quad (5)$$

有:

$$x_w = S/2 - z_w \times \cot \alpha_S = S/2 \times \frac{\sin(\alpha_S - \alpha_D)}{\sin(\alpha_S + \alpha_D)}, \quad (6)$$

同时,有:

$$\frac{y_{pu}}{y_w} = \frac{z_p}{z_w} = \frac{f_p \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S}{S \times \frac{\sin \alpha_S \times \sin \alpha_D}{\sin(\alpha_S + \alpha_D)}}, \quad (7)$$

即:

$$y_w = \frac{S \times (\sin \alpha_S \times \sin \alpha_D) \times y_{pu}}{\sin(\alpha_D + \alpha_S) \times (f_p \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S)}. \quad (8)$$

通过式(5),(6),(8),目标点的空间三维坐标可用式(9)表示:

$$\begin{cases} x_w = S/2 \times \frac{\sin(\alpha_S - \alpha_D)}{\sin(\alpha_S + \alpha_D)} \\ y_w = \frac{S \times (\sin \alpha_S \times \sin \alpha_D) \times y_{pu}}{\sin(\alpha_D + \alpha_S) \times (f_p \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S)} \\ z_w = S \times \frac{\sin \alpha_S \times \sin \alpha_D}{\sin(\alpha_S + \alpha_D)} \end{cases}. \quad (9)$$

3 模式像轨迹分析

分析像轨迹的目的在于确定模式将随着深度值改变做何种变化,这可对测量系统后期的模式解码与破碎模式拼接提供帮助。对经过同一点 E 发射的光束,其在像平面中的像点 R 将随着目标点 T 的深度值 z_w 的不同而改变。在图 2 可以得出:

$$\frac{z_p}{z_w} = \frac{S/2 - x_p}{S/2 - x_w}, \quad (10)$$

即:

$$\frac{f_p \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S}{z_w} = \frac{f_p \times \cos \theta_S + x_{pu} \times \sin \theta_S}{S/2 - x_w}. \quad (11)$$

有:

$$x_w = S/2 - \cot \alpha_S \times z_w. \quad (12)$$

另有:

$$x_{cu} = f_c \times \tan(\theta_D - \alpha_D). \quad (13)$$

再由式(7)和(10),有:

$$\frac{y_{pu}}{z_p} = \frac{y_{cu}}{z_c}, \quad (14)$$

可得到:

$$\begin{aligned} y_{cu} &= \frac{z_c \times y_{pu}}{z_p} = \frac{f_c \times \sin \theta_D - x_{cu} \times \cos \theta_D}{f_p \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S} \times y_{pu} = \\ &= \frac{\sin \theta_D - \tan(\theta_D - \alpha_D) \times \cos \theta_D}{f_p \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S} \times f_c \times y_{pu}. \end{aligned} \quad (15)$$

图像坐标点随深度值的变化轨迹的计算方法可用式(16)表示。

$$\begin{cases} x_{cu} = f_c \times \tan(\theta_D - \alpha_D) \\ y_{cu} = \frac{\sin \theta_D - \tan(\theta_D - \alpha_D) \times \cos \theta_D}{f_p \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S} \times f_c \times y_{pu} \end{cases}. \quad (16)$$

其中, $\alpha_D = \text{arccot}(S/z_w - \cot \alpha_S)$ 。

4 系统模型参数分析

根据建立的系统数学模型,进行了系统参数分析。这些参数包括:投射侧 S_0 和接收侧 D_0 之间的基线距离 S ; S_0 与源平面的垂直距离 f_p , 与 X 轴的夹角 θ_S ; D_0 与像平面的垂直距离 f_c , 与 X 轴的夹角 θ_D 及深度 z 。实验工具借助 Borland C++ Builder 6.0, 结合 Intel 的 OpenCV 计算机视觉库函数,共进行了 4 组实验。实验中使用了如图 4 所示的模式,大小为 $128 \text{ pixel} \times 128 \text{ pixel}$, 置于 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ 的像平面内。为了反映上述投射模式的像在整个 CCD 像平面的位置和大小,图中以边框表示整个 CCD 像平面的大小。

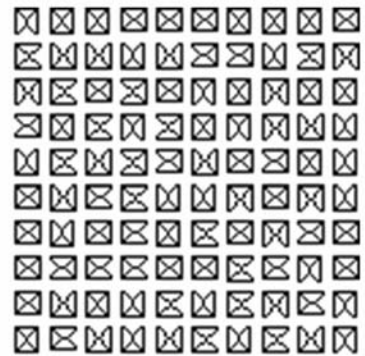
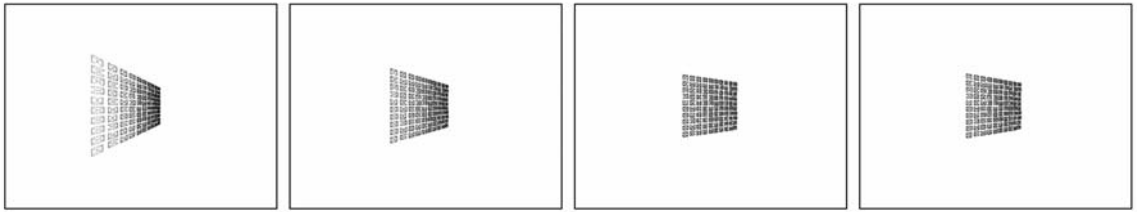


图 4 投射的模式

Fig. 4 Projected pattern

4.1 f_p 和 f_c 参数分析

S, θ_S, θ_D, z 不变,模式像随 f_p 和 f_c 值的变化而变化。 f_p 和 f_c 变化的物理意义是投射侧和 CCD 接收侧的光学镜头组的焦距变化。为了简化实验参数, f_p 和 f_c 取相同值(实际可取不同值),图 5 显示了不同 f_p 和 f_c 参数值下的投射模式像。



(a) $f_p = f_c = 30$ mm (b) $f_p = f_c = 50$ mm (c) $f_p = f_c = 85$ mm (d) $f_p = f_c = 100$ mm

图 5 f_p 和 f_c 变化得到的模式像

Fig. 5 Pattern images obtained with different f_p and f_c

f_p 和 f_c 的变化对投射模式像有较大的影响,其值越小(变焦倍数越大)得到的投射模式像就越大,变形也越严重。从上图的变化可以看出,随 f_p 和 f_c 的减小,投射模式像的变化是加速的。

4.2 θ_s 和 θ_D 参数分析

S, f_p, f_c, z 不变,模式像随 θ_s 和 θ_D 的变化而变化。为了简化实验参数, θ_s 和 θ_D 取相同值。图 6 给出了模型中 4 种不同 θ_s, θ_D 参数值设置下的投射模式像。

参考图 6, θ_s 和 θ_D 的变化对投射模式像的影响明显。当 θ_s 和 θ_D 值较大时,投射模式像的完整性较好,变形较小。当 θ_s 和 θ_D 角度值较小时,投射模式像的变形增大,目标在像平面中的可视区域减小,只能看到部分像,也就是说检测系统的工作景深变小,“盲区”增大。在实际应用中,需综合考虑工作景深和系统误差的问题,根据检测对象的实际大小选择适当的角度。



(a) $\theta_s = \theta_D = 45^\circ$ (b) $\theta_s = \theta_D = 65^\circ$ (c) $\theta_s = \theta_D = 85^\circ$ (d) $\theta_s = \theta_D = 89.9^\circ$

图 6 θ_s 和 θ_D 变化得到的模式像

Fig. 6 Pattern images obtained with different θ_s and θ_D

4.3 S 参数分析

研究了 $f_p, f_c, \theta_s, \theta_D, z$ 不变,模式像随 S 的变化情况。图 7 显示了模型中 4 种不同 S 值下的投射模式像。 S 值的变化对图像的完整性和系统的工作景深的影响不大,但从结构光检测的工作原理分析, S 值较小时系统的检测误差值必将变

大。 S 值变大时系统的检测误差值虽然减小,但装置将变得庞大。因此,在实际应用中,需综合考虑系统误差和装置的轻便性,根据检测对象的实际大小选择 S 值,并且与 θ_s, θ_D 的影响作用联合考虑。



(a) $S = 100$ mm (b) $S = 400$ mm (c) $S = 1\ 000$ mm (d) $S = 1\ 400$ mm

图 7 S 变化得到的模式像

Fig. 7 Pattern images obtained with different S

4.4 z 参数分析

装置的系统参数 $S, f_p, f_c, \theta_s, \theta_D$ 不变, 模式像随深度 z 值变化。图 8 显示了模型中 4 种不同目标景深 z 值下的投射模式像。当目标逐渐远离, z 值由小变大时, 模式像在像平面内向左移动, 且逐渐变大, 但在平面目标上, 像的变形并不随值的增大而增大。图中给出了 z 值在 400 mm 至 6 000 mm 的变化情况, 但在实际中, 投影仪的清晰成像景深和系统的工作景深远达不到这个值。

具体考虑源平面上某一点 E 的像随深度 z 的变化轨迹。给定 $S=600$ mm, $f_p=f_c=60$ mm, $\theta_s=\theta_D=70^\circ$, E 的坐标为 $(12.0, 12.0)$ (mm), 深

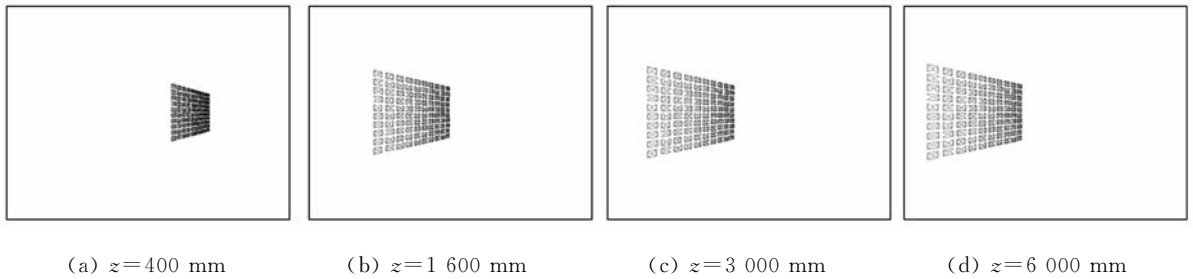


图 8 z 变化得到的模式像

Fig. 8 Pattern images obtained with different z

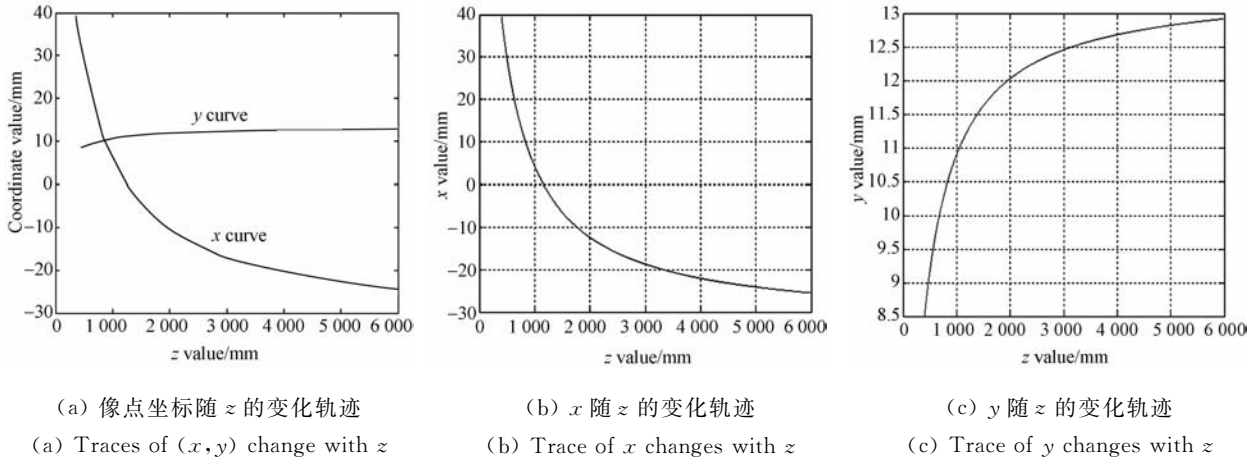


图 9 像点 (x, y) 随 z 的变化轨迹

Fig. 9 Traces of (x, y) change with z

度值变化取 400~6 000 mm 时, 图 9 显示了观察点 E 在像平面上的像点坐标随 z 值的变化情况, 实验结果验证了公式 (10)-(16) 理论推导的有效性。

从图 8 投射模式像变化情况和图 9(a) 像点坐标变化轨迹都可以看出: 在深度值发生改变时, 像在水平 x 方向有较大的变化, 而在垂直 y 方向, 像的移动量相对显得非常小, 近似可认为在 y 方向保持不变。在 z 值较小时, 像有较快的移动速度, 随着深度 z 值的增大, 这种移动速度是减速的, 在分解图 9(b) 及 (c) 中可以看出在水平 x 方向和垂直 y 方向存在这种现象。这种轨迹趋势将有助于模式解码破碎情况下的拼接处理。

5 系统误差分析

公式 (9) 是基于理想的针孔模型计算出的深

度信息, 实际测量系统会存在误差, 本节对其进行误差分析, 并结合像变形情况, 寻找最优的测量结构参数。在编码光测量系统中, 对投射侧采用点光源的投射形式, 理论上不存在误差, 对整个系统

的测量精度不会带来较大的影响,因此,在分析误差来源时,忽略投射侧点光源的误差分析,重点考察系统的几个关键参数,其中用 ϵ_x 和 ϵ_y 来表示二维像点 (x_{cu}, y_{cu}) 的定位误差。基于公式(9),通过微分运算,二维像点 (x_{cu}, y_{cu}) 的定位误差引起的三维测量误差为:

$$\epsilon_{x_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial x_w}{\partial x_{cu}} \epsilon_x\right)^2 + \left(\frac{\partial x_w}{\partial y_{cu}} \epsilon_y\right)^2} = \frac{S}{2} \times \frac{\sin^2 \alpha_S}{\sin^2(\alpha_S + \alpha_D)} \times \frac{f_c}{f_c^2 + x_{cu}^2} \epsilon_x, \quad (17)$$

$$\epsilon_{y_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial y_w}{\partial x_{cu}} \epsilon_x\right)^2 + \left(\frac{\partial y_w}{\partial y_{cu}} \epsilon_y\right)^2} = \epsilon_{z_w} \times \frac{y_{pu}}{f_p \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S}, \quad (18)$$

$$\epsilon_{z_w} = \sqrt{\left(\frac{\partial z_w}{\partial x_{cu}} \epsilon_x\right)^2 + \left(\frac{\partial z_w}{\partial y_{cu}} \epsilon_y\right)^2} = S \times \frac{\sin^2 \alpha_S}{\sin^2(\alpha_S + \alpha_D)} \times \frac{f_c}{f_c^2 + x_{cu}^2} \epsilon_x. \quad (19)$$

并设 $M = z_w / f_c$, 称为测量系统的放大倍数, 上面的式子可以变化为:

$$\begin{cases} \epsilon_{x_w} = \frac{M^2}{S} \times f_c^3 \times \frac{\cos \alpha_S}{\sin \alpha_S \times \sin^2 \alpha_D \times (f_c^2 + x_{cu}^2)} \epsilon_x \\ \epsilon_{y_w} = \frac{M^2}{S} \times f_c^3 \times \frac{1}{\sin \alpha_D \times (f_c^2 + x_{cu}^2)} \times \frac{y_{pu}}{D_S \times \sin \theta_S + x_{pu} \times \cos \theta_S} \epsilon_x \\ \epsilon_{z_w} = \frac{M^2}{S} \times f_c^3 \times \frac{1}{\sin^2 \alpha_D \times (f_c^2 + x_{cu}^2)} \epsilon_x \end{cases} \quad (20)$$

视觉测量中最关心的往往是深度信息方向即 z_w 的精度, 结合公式(3), 可以得到:

$$\epsilon_{z_w} = \frac{M^2}{S} \times f_c^3 \times \frac{1 + \tan^2 \theta_D}{(f_c \times \tan \theta_D - x_{cu})^2} \epsilon_x. \quad (21)$$

从公式(21)可知, 获取深度数据时, 影响误差的系统参数主要有: 放大倍数 M , 点光源和 CCD 的基线距离 S 、摄像机焦距 f_c 、摄像机的成像角 θ_D 。其中放大倍数 M 为结构光系统的测量结果, 其余 3 个参数为系统的结构参数。针对深度 z 方向的获取误差 $|\epsilon_{z_w}|$ 对 3 个结构参数进行误差分析。

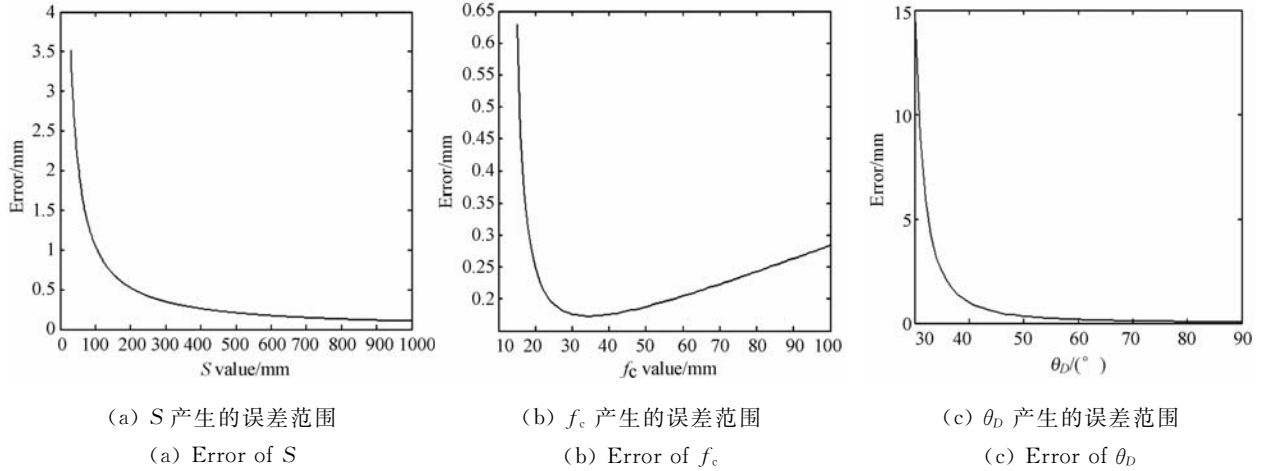


图 10 3 个参数的误差分析

Fig. 10 Error analysis for three parameters

实验结果如图 10 所示, 3 个结构参数对深度 z 方向的深度误差 $|\epsilon_{z_w}|$ 影响程度是不同的。 S 对误差的影响范围在 4 mm 内, f_c 在 0.6 mm 内, θ_D 在 15 mm 内。因此在系统结构优化过程中, 应着重考虑基线距离 S 、摄像机焦距 f_c 和投影仪的投影角 θ_D 。

如图 10(a) 所示, 深度 z 方向误差 $|\epsilon_{z_w}|$ 随着基线距离 S 的增大而减小, $S < 500$ mm 时误差变

化剧烈, $S > 500$ mm 时影响程度减缓, 其误差值 < 0.5 mm。因此, 在基线距离的选择上, 应避免在影响误差剧烈的区域选取 ($S < 500$ mm), 考虑到装置的简便性, S 可以选择为 800 mm 左右。如图 10(b) 所示, 深度 z 方向误差 $|\epsilon_{z_w}|$ 随着摄像机焦距 f_c 的增大而减小。在 $f_c < 30$ mm 位置处误差变化剧烈, 在 $f_c > 30$ mm 时影响程度平缓。

因此,在摄像机焦距 f_c 的选取过程中,应在保证图像质量的条件下,避免选取摄像机焦距 $f_c < 30$ mm 的值,但焦距值过大,其误差逐渐增大,且焦距受硬件装置的限制,因此, f_c 可以选择为 35 mm 左右。在结构光系统中,CCD 成像角 θ_D 和光源投影角 θ_S 满足 $\theta_S, \theta_D \in [0^\circ, 90^\circ]$ 。投影角 θ_S 决定目标是否成像在像平面内,对 $|\epsilon_{z_w}|$ 值的误差影响不大,故在此不作分析,假设 $\theta_S = \theta_D$ 。影响成像角对 $|\epsilon_{z_w}|$ 误差的影响程度如图 10(c) 所示,深度 z 方向误差 $|\epsilon_{z_w}|$ 随着 θ_D 的增大而减小,在 $\theta_D > 50^\circ$ 的位置误差变化平缓,且在 $\theta_D = 90^\circ$ 的位置误差影响最小。但是随着 θ_S, θ_D 的增大,工作景深变大,受硬件环境限制, θ_S, θ_D 比 90° 小得多,因此可以考虑选择 65° 左右。

根据以上误差分析并考虑整体装置的便捷性,最优结构光建模参数分别为 $S = (800 \pm 50)$ mm, $f_c = (35 \pm 5)$ mm, $\theta_S = \theta_D = (65 \pm 5)^\circ$ 。

6 测量结果

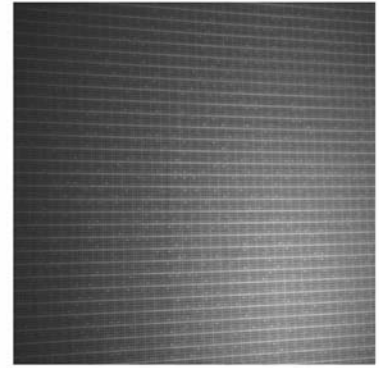
为了验证提出的结构光系统参数优化设计的可行性,以 EPSON EMP-821 LED 投影仪和 CoolSNAP cf CCD 摄像机组成结构光测量系统,其中摄像机和投影仪的分辨率分别为 $1\ 040$ pixel \times $1\ 392$ pixel (像素尺寸为 $4.65\ \mu\text{m} \times 4.65\ \mu\text{m}$) 和 $1\ 024$ pixel \times 768 pixel。测量距离在 $2\ 000$ mm 内,测量范围为 $50\ \text{cm} \times 40\ \text{cm} \times 30\ \text{cm}$ 。利用搭建的系统对不同深度值的平面进行测量,实验中使用单个平面测量数据随机采集约 $10\ 000$ 个点,计算其均值。测量距离改变 3 次,其结果如表 1 所示。

表 1 平面测量结果

Tab.1 Result of plane measurement

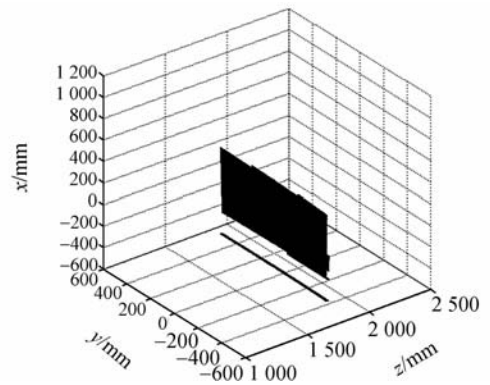
Standard depth z_w/mm	Measurement mean value/mm	Error $ \epsilon_{z_w} $ /mm	Relative error ($ \epsilon_{z_w} /z_w$)/%
1 000	998.567 0	1.433 0	0.143
1 500	1 503.512 8	4.512 8	0.300
2 000	2 005.914 6	5.914 6	0.296

从表 1 数据可知,提出的优化结构光系统设计系数可以得到相对误差约为 0.3% 的测量精度,优于未经优化的结构光系统的误差^[12-13]。图 11 是集成系统对平面及圆表面的三维重建结果。



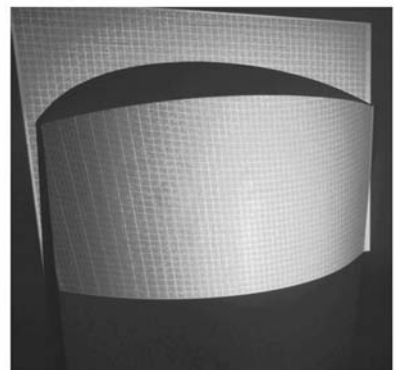
(a) 平面物

(a) A plane



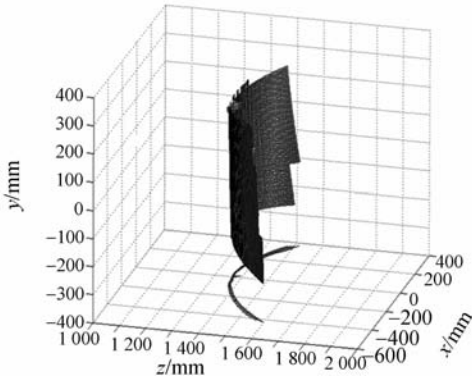
(b) 重建结果

(b) Reconstructed result



(c) 圆弧物

(c) Circle arc



(d) 重建结果

(d) Reconstruction result

图 11 目标三维重建

Fig. 11 3D reconstruction of objects

7 结 论

本文建立了一种结构光数学模型,分析了模型参数对像变形及误差的影响,确定了系统参数

的相互约束关系,得到了优化的系统结构参数。通过实验分析,得到如下一些定性结论。首先, θ_s, θ_D 角是非常关键的参数,它们对投射模式像的变形量和完整性有影响,系统的检测误差、以及系统的工作景深(盲区)与之密切相关。其次, S 值对像的完整性和系统工作景深的关系不是十分密切, S 值同样会影响系统的检测误差,同时直接关系到装置的体积尺寸。因此在实际应用中,需综合考虑检测对象的大小和工作景深,以及系统的容许误差和装置的尺寸,对 S 值与 θ_s, θ_D 值进行联合选择。再次, f_p 和 f_c 变小时,投射模式的像将迅速变大,且变形增加。 f_p 与系统误差关系不大,但 f_c 值是产生系统误差的关键因素之一。最后,目标距离值变化时,投射模式像在像平面内近似水平移动,这种移动在 z 值较小时有较快的移动速度,对模式变形分析起指导作用。利用优化的结构参数进行目标检测,得到的相对误差约为0.3%,能满足结构光三维重建精度测量要求。

参考文献:

- [1] DUKE G, GUI Y T, DAVE T, *et al.*. 3D reconstruction of a region of interest using structured light and stereopanoramic images [C]. *Eighth International Conference on Information Visualisation (IV' 04), London, England, 2004*: 1007-1012.
- [2] SALVATORE B, ENRICO F. Non-invasive measurements to analyze sandy bed evolution under sea waves action [J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 2003, 52(3): 762-770.
- [3] DALIT C, NAHUM K, JOSEPH S. Range imaging with adaptive color structured light [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, 20(5): 470-480.
- [4] JORDI P, JOAQUIM S, CARLES M. Implementation of a robust coded structured light technique for dynamic 3d measurements [C]. *IEEE International Conference on Image Processing, ICIP 2003, Barcelona, Spain, 2003*: 1073-1076.
- [5] JORDI P. *Assisted visual serving by means of structured light* [D]. European PhD and Joint Thesis between the Universitat de Girona and the Université de Rennes I, 2005.
- [6] SANSONI G, CAROCCI M, RODELLA R. Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors [J]. *Appl Opt*, 1999, 38(31): 6565-6573.
- [7] WIORA G. High resolution measurement of phase-shift amplitude and numeric object phase calculation [J]. *SPIE*, 2000, 4117: 289-299.
- [8] SADLO F, WEYRICH T, PEIKERT R, *et al.*. A practical structured light acquisition system for point-based geometry and texture [C]. *Proceedings of the Eurographics Symposium on Point-Based Graphics, Stony Brook, USA, 2005*: 89-98.
- [9] 贺忠海, 王宝光. 线结构光传感器的模型及成像公式 [J]. *光学精密工程*, 2001, 9(3): 269-272.
- HE Z H, WANG B G. Model and imaging formula of the line structured light sensor [J]. *Opt. Preci-*

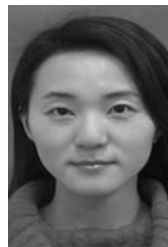
sion Eng., 2001,9(3):269-272. (in Chinese)

- [10] 陶国智, 刘雯, 叶声华. 线结构光传感器的数学模型及其测试方法[J]. 宇航计测技术, 1999, 19(6): 51-54.
TAO G ZH, LIU W, YE SH H. The mathematical model and measurement method of single line structured light transducer [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 1999, 19(6): 51-54. (in Chinese)
- [11] 张广军, 贺俊吉. 基于圆结构光的内表面三维视觉检测模型[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 481-484.
ZHANG G J, HE J J. Mathematic model of inner surface 3d vision inspection based on circle structured light [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2004, 25(4): 481-484. (in Chinese)
- [12] 许丽, 张之江. 结构光测量系统的误差传递分析[J]. 光学精密工程, 2009, 17(2): 306-313.
XU L, ZHANG Z J. Error propagation analysis of structured light system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 306-313. (in Chinese)
- [13] 许丽, 曾丹, 张之江. 结构光测量系统误差分析[J]. 光电工程, 2008, 35(10): 26-31.
XU L, ZENG D, ZHANG Z J. Error analysis in structured light system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 35(10): 26-31. (in Chinese)
- [14] 吴海滨, 于晓洋. 应用市售设备的结构光系统模型及标定[J]. 光学精密工程, 2008, 16(4): 617-623.
WU H B, YU X Y. Structured light system model using off-the-shelf components and its calibration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(4): 617-623. (in Chinese)
- [15] 邹媛媛, 赵明扬, 张雷, 等. 结构光视觉传感器误差分析与结构分析[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(12): 2605-2610.
ZOU Y Y, ZHAO M Y, ZHANG L, *et al.*. Error analysis and structural analysis of structured light vsual sensor for seam tracking [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(12): 2605-2610. (in Chinese)
- [16] 贾 X J, YUE G X, FANG M. The mathematical model and applications of coded structured light system for object detecting [J]. *Journal of Computer*, 2009, 4(1): 53-60.
- [17] JORDI P, JOAQUIM S, CHRISTOPHE C, *et al.*. Optimised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition [J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23: 707-720.
- [18] CHEN X B, XI J T, JIN Y, *et al.*. Accurate calibration for a camera-projector measurement system based on structured light projection [J]. *Optics and Lasers in Engineering* 47 2009, 47: 310-319.

作者简介:



贾小军(1974—),男,四川邻水人,博士研究生,副教授,1999年于电子科技大学获得工学学士学位,2007年于浙江理工大学获得工学硕士学位,主要从事图像处理、视觉检测等方面的研究。E-mail: xjjad@sina.com



曹芳(1980—),女,福建福安人,博士研究生,2002年于上海师范大学获得工学学士学位,2004年于上海海事大学获得工学硕士学位,主要从事图像处理、视觉检测、图像拼接方面的研究。E-mail: fangcao@shmtu.edu.cn



曾 丹(1982—),女,湖南邵东人,博士,讲师,2003年、2005年、2008年于中国科学技术大学分别获得工学学士、工学硕士和工学博士学位,主要从事数字图像处理、视觉检测方面的研究。E-mail: dzeng@shu.edu.cn

导师简介:



张之江(1968—),男,上海人,博士,教授,博士生导师,1991年于哈尔滨科技大学获得工学学士学位,1996年、1999年于哈尔滨工业大学分别获工学硕士和工学博士学位,主要从事图像处理、视觉检测、数字全息和三维显示等方面的研究。E-mail: zjzhang@shu.edu.cn

●下期预告

大屏背投激光显示广角镜头设计

陈 旭^{1,2},冯玉涛³,刘伟奇¹,魏忠伦¹,康玉思¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100049;

3. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 光谱成像技术重点实验室,陕西 西安 710119)

研究了背投激光显示广角投影镜头的设计,并给出了一个162.56 cm背投激光显示广角镜头的设计实例。投影镜头前的光学引擎采用DLP显示方式,并应用数字微镜晶片(DMD)进行数字光学处理过程。系统焦距为7.38 mm、 F 数为2.46、全视场达到 100° ;在空间调制器DMD的Nyquist频率处90%以上视场的 $MTF > 0.6$;系统渐晕系数为负,提高了投影显示像面边缘的光照度;全视场畸变 $< 1.4\%$;一个像元尺寸内集中了点目标能量的90%以上。系统中使用了一个直角棱镜对光路进行折叠,减小了镜头长度;棱镜展开后系统全长259 mm。系统所设计的结果在可加工的光学公差容限内。此外,该镜头只使用了一个二次项为0的非球面(高次项至8次),保证了镜头加工的可行性。设计结果有利于降低投影系统成本,实现产业化生产。