

线激光三维场景重建系统及误差分析

詹坤烽, 陈文建*, 李武森, 张璐

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 传统的线激光扫描技术以机器视觉为基础, 算法复杂、计算量大, 且匹配效率不高; 而点激光扫描技术是以激光三角法为基础, 算法简洁, 但测量慢、点云稀疏。为解决上述问题, 提出以激光三角法为基础的线激光扫描技术, 根据相机针孔模型以及相机和线激光器的相对位置关系建立物像关系方程, 求解场景三维坐标, 简化了重建算法。采用以最小二乘法为基础的标定算法, 实现了相机与线激光相对位置参数和系统旋转中心偏移参数的标定。同时分析了系统的理论精度, 并结合场景重建实验和精度评估实验, 对系统的可靠性和精度进行了验证。实验结果表明该系统效率高、精度好; 在 1000~1700 mm 测量范围内该系统的绝对误差小于 2.6 mm, 精度高于 0.25%, 满足一般场景重建的要求。

关键词 测量; 机器视觉; 场景重建; 针孔模型; 标定

中图分类号 TP751

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1204004

Line Laser 3D Scene Reconstruction System and Error Analysis

Zhan Kunfeng, Chen Wenjian*, Li Wuseng, Zhang Lu

School of Electronic Engineering and Optoelectronics, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract The traditional line laser scanning technology is based on machine vision, the corresponding algorithm is complex, the amount of calculation is large, and the matching efficiency is not high. In contrast, the point laser scanning technology is based on laser triangulation, the corresponding algorithm is concise, but the measurement speed is low and the reconstructed point cloud is sparse. To solve these problems, the laser-triangulation-based line laser scanning technology is proposed. The camera pinhole model and the relative position between camera and line laser are used for the establishment of an object-image relationship equation. The 3D coordinates of the scene are solved and the whole reconstruction algorithm is simplified. The calibration algorithm based on the least square method is adopted for the calibration of parameters such as the relative position between camera and line laser and the rotation center deviation of the system. Simultaneously, the theoretical precision of the system is analyzed, and the reliability and accuracy are tested by the experiments of scene reconstruction and accuracy evaluation. The experimental results show that the system possesses a high efficiency and a good precision. The error of the system is less than 2.6 mm and the precision is higher than 0.25% in the measurement range of 1000-1700 mm, which satisfies the requirements for a general scene reconstruction.

Key words measurement; machine vision; scene reconstruction; pinhole model; calibration

OCIS codes 150.0155; 150.6910; 150.1488

1 引言

三维(3D)激光扫描技术是一项非接触测量技术, 具有测量速度快、精度高等特点^[1]。随着数字化技术的发展, 其应用范围从最初的逆向工程、地形地貌测绘等方面^[2-5], 逐步扩展到 3D 打印、自动导航、工程验收、数字化城市等众多领域^[6-11], 具有很好的

应用前景。如: 利用三维激光扫描技术对室内场景进行重建, 构建室内三维立体地图, 能够为扫地机器人、机器人管家等提供室内导航服务。三维激光扫描技术的改进与完善, 对工业制造技术的发展升级、生活服务的改善等具有重要意义。

目前, 常用的三维激光扫描技术主要包括以下三种方式: 1) 线激光和双相机组合系统采用视差法

收稿日期: 2018-07-04; 修回日期: 2018-07-30; 录用日期: 2018-08-21

* E-mail: chenwj@njjust.edu.cn

实现;2)激光测距仪和单相机组合采用飞行时间法实现;3)点激光和单目相机组合系统采用激光三角法实现。其中,线激光和双目视觉组合系统是以视差法为基础的三维测量技术,线激光作为附加特征点投影在物体表面,该方法的匹配算法计算量大,匹配效率不高^[12-13]。激光测距仪和单目相机组合系统是以飞行时间法为基础的三维测量技术,其原理简单,但测量效率低,适用范围较窄^[14]。测量精度较高的是点激光和单目相机组合系统,是以激光三角法为基础的三维测量技术,特征在于结构简单、测量精度高,但存在测量速度慢、点云稀疏等缺点。本文针对点激光扫描重建系统测量效率低、点云稀疏等问题,提出了基于单相机和线激光系统的扫描测量方法,在同等精度下,显著提高了系统的测量效率和点云密集度。系统以激光三角法为基础,利用相机与线激光器的相对位置关系建立物像坐标变换方程;同时,提出位置参数标定算法和偏移参数标定算法,采用最小二乘法拟合实现了对系统参数的高精度标定;最后,对系统的精度进行了理论分析和实验验证。

2 原 理

2.1 系统结构

在世界坐标系原点和相机坐标系原点重合的理想情形下,如图 1 所示,线激光三维场景重建系统主要由线激光器、工业相机、精密转台、控制模块和数据处理系统组成。其中,工业相机和线激光器之间的相对位置固定,且都安置在精密旋转平台上;控制模块控制转台转动,工业相机和线激光器随精密转台转动。根据系统结构进行建模,系统模型主要包括相机坐标系、世界坐标系和图像坐标系。其中,相机坐标系是以相机镜头光心为原点、光轴为 Z_c 轴、竖直方向为 Y_c 轴建立的左手坐标系,坐标用 (x_c, y_c, z_c) 表示;世界坐标系是以精密转台的旋转轴为 Z_w 轴、 $X_c Z_c$ 平面与 Z_w 轴交点为原点、镜头光轴初始方向为 Y_w 轴建立的右手坐标系,坐标用 (x_w, y_w, z_w) 表示;图像坐标系是以像面中心为原点、沿像面向右为 X 轴、向上为 Y 轴建立的二维坐标系,坐标用 (x, y) 表示。

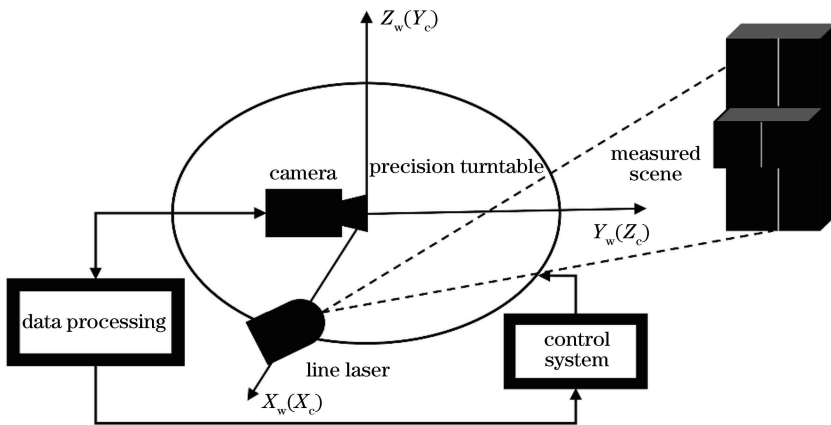


图 1 系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of the system

2.2 系统原理

线激光扫描系统是通过建立二维图像坐标与物点三维坐标之间的变换方程来实现场景三维形貌的重建。重建过程主要包括图像坐标系、相机坐标系和世界坐标系之间的变换。

2.2.1 图像坐标变换

图像坐标变换部分主要阐述图像坐标系与相机坐标系之间的变换关系。根据相机的针孔模型^[15]进行建模,可以得到二维图像坐标和三维空间坐标之间的变换关系式:

$$\begin{cases} x = f_x x_c / z_c \\ y = f_y y_c / z_c \end{cases} \quad (1)$$

式中: (x, y) 为二维图像坐标; f_x 和 f_y 分别为相机镜头在 X 轴和 Y 轴方向的焦距; (x_c, y_c, z_c) 为相机坐标系的物点坐标。

由(1)式可知,根据二维图像坐标与三维相机坐标之间的关系只能得到两个方程,而根据克拉默法则可知,求解三维相机坐标需要建立三个线性无关方程。文献[16]通过建立光面方程求解三维坐标,其缺点在于无法直接分析系统参数 L, α, f 对误差的影响,其中, L 为光轴中心到激光轴线的直线距离, α 为相机镜头平面与激光轴线的夹角, f 为相机镜头的焦距。本研究根据线激光器与相机之间的相对位置关系,建立第三个方程,为误差分析奠定了基

础。如图 2 所示,相机、激光器与相机坐标之间的关系可表示为

$$L = x_c + z_c / \tan \alpha, \quad (2)$$

式中: x_c 、 z_c 为物点在相机坐标系中的坐标值。

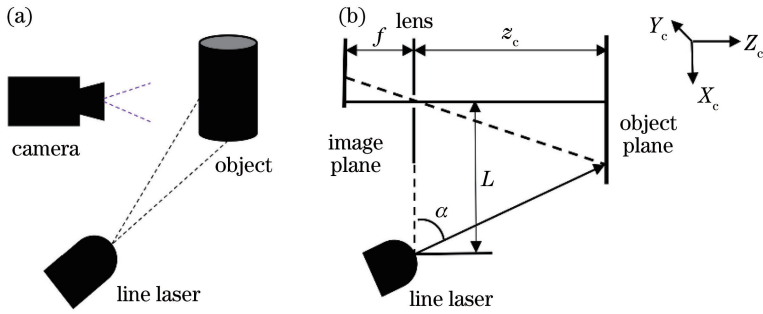


图 2 相机与激光器位置关系图。(a)实物模型;(b)透射模型

Fig. 2 Positional relationship between camera and laser. (a) Physical model; (b) perspective model

联立(1)式和(2)式即可得到在相机坐标系中,图像二维坐标与三维相机坐标之间的变换方程为

$$\begin{cases} x_c = x \cdot L \cdot \tan \alpha / (f_x + x \cdot \tan \alpha) \\ y_c = y \cdot L \cdot f_x \cdot \tan \alpha / [f_y (f_x + x \cdot \tan \alpha)] \\ z_c = f_x \cdot L \cdot \tan \alpha / (f_x + x \cdot \tan \alpha) \end{cases} \quad (3)$$

2.2.2 世界坐标变换

世界坐标变换主要阐述相机坐标系与世界坐标系之间的变换关系。测量时,相机坐标系随精密旋转平台旋转,需要将相机坐标系的坐标变换到世界坐标系中。如图 3 所示,若假设相机坐标系原点 O_c

在世界坐标系的初始坐标为 (x_0, y_0) , 则可得世界坐标系中向量 $\overrightarrow{O_w O_{c(w)}} = (x_0, y_0)$, 在下角标用 (c) 和 (w) 标注是相机坐标系还是世界系坐标系, 下同。设在相机坐标中, P 点和 P' 点坐标为 (x_{c0}, z_{c0}) (即在相机坐标系中 P 点和 P' 点为同一点); 在世界坐标系中, P 点初始坐标为 (x_{w0}, y_{w0}) , 旋转 β 角后 P' 点的坐标为 (x_{w1}, y_{w1}) 。因此, 在相机坐标系中, 向量 $\overrightarrow{O_c P_{c(c)}} = \overrightarrow{O_c P'_{c(c)}} = (x_{c0}, z_{c0})$; 在世界坐标系中, P 点初始位置的向量 $\overrightarrow{O_w P_{w(w)}} = (x_{w0}, y_{w0})$, 旋转 β 角后的向量 $\overrightarrow{O_w P'_{w(w)}} = (x_{w1}, y_{w1})$ 。

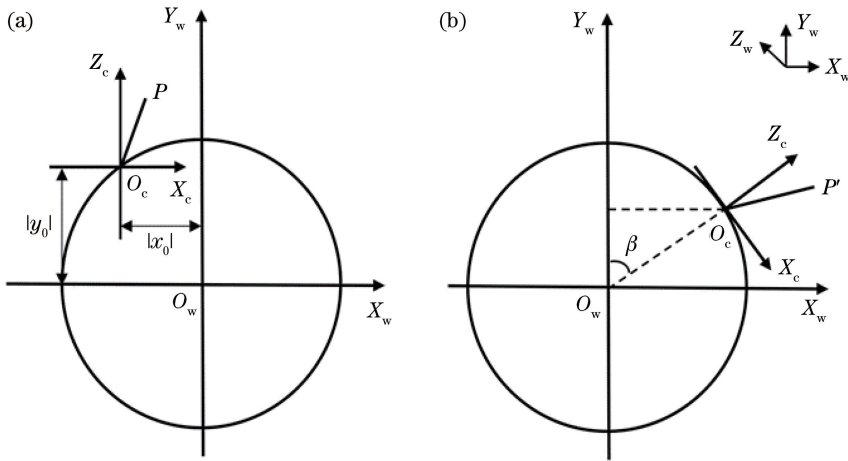


图 3 旋转变换图。(a)相机坐标系和世界坐标系(原点不重合);(b)相机坐标系旋转 β 角

Fig. 3 Graphs of rotation transformation. (a) Cameral coordinate system and world coordinate system with different origins; (b) camera coordinate system rotated β

在 P 点初始位置, 将相机坐标系的向量 $\overrightarrow{O_c P_c}$ 变换为世界坐标系中的向量 $\overrightarrow{O_c P_{(w)}}$, 可得向量 $\overrightarrow{O_c P_{(w)}} = (x_{w0} - x_0, y_{w0} - y_0) = (x_{c0}, z_{c0})$ 。同时得到 P 点的坐标变换矩阵:

$$\begin{pmatrix} x_{w0} \\ y_{w0} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x_0 \\ 0 & 1 & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{c0} \\ y_{c0} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

已知相机坐标系原点 O_c 的初始坐标为 (x_0, y_0) , 并且原点 O_c 只进行了旋转变换, 因此旋转 β 角后的坐标为 $(x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta, -x_0 \sin \beta + y_0 \cos \beta)$ 。同理,

旋转 β 角后,若将相机坐标系中的向量 $\overrightarrow{O_c P'_{(c)}}$ 变换为世界坐标系中的向量 $\overrightarrow{O_c P_{(w)}}$,根据向量的平移不变性,只需将向量 $\overrightarrow{O_c P_{(w)}}$ 进行 β 角的旋转变换,即

$$\begin{pmatrix} x_{w1} - x_0 \cos \beta - y_0 \sin \beta \\ y_{w1} + x_0 \sin \beta - y_0 \cos \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{c0} \\ z_{c0} \end{pmatrix} \quad (5)$$

由(5)式可得到旋转 β 角后, P 点相机坐标系到世界坐标系的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} x_{w1} \\ y_{w1} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta & -x_0 \sin \beta + y_0 \cos \beta \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{c0} \\ y_{c0} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

(6)式具有普遍适用性,即满足任意情形下点 P 从相机坐标系到世界坐标系的变换。

综上,联立(3)式和(6)式即可得到二维图像坐标到三维世界坐标的变换方程,即

$$\begin{cases} x_w = x_c \cos \beta + z_c \sin \beta + x_0 \cos \beta + y_0 \sin \beta \\ y_w = -x_c \sin \beta + z_c \cos \beta - x_0 \sin \beta + y_0 \cos \beta \\ z_w = -y_c \end{cases} \quad (7)$$

2.3 系统标定

系统标定不仅是系统实现的关键步骤,而且决定了系统的测量精度。线激光扫描重建系统的标

定,包括相机参数标定、相机与线激光器相对位置关系标定和旋转中心的偏移距离标定三部分。其中,相机标定采用的是张正友标定法^[17-18]。

2.3.1 位置关系标定

如图 2(b)所示,相机与激光器之间的位置关系参数主要包括激光器到镜头光学中心的距离 L 和激光轴线与镜头所在平面的夹角 α 。由(2)式可知,距离 L 与夹角 α 和相机坐标系物点的 x_c, z_c 坐标有关,因此可以将坐标 x_c, z_c 作为变量进行最小二乘法拟合得到。将(2)式进行变换:

$$x_c = L - z_c / \tan \alpha \quad (8)$$

由 n 组 (x_c, z_c) 坐标能够得到下列矩阵方程:

$$\begin{pmatrix} x_{c1} \\ \vdots \\ x_{cn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & z_{c1} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & z_{cn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} L \\ -1/\tan \alpha \end{pmatrix} \quad (9)$$

由(9)式进行最小二乘法拟合,即可求解位置关系参数:距离值 L 和夹角 α 的正切值。

2.3.2 旋转中心标定

相机坐标系原点和世界坐标系原点之间偏移距离 (x_0, y_0) 的标定思想是固定棋盘格标定板位置,即被测的物点在世界坐标系中的坐标不变;同时,精密旋转平台进行旋转测量,即改变相机坐标系物点坐标。获取相机坐标系坐标,旋转 n 次得到 n 个方程,采用最小二乘拟合法求取偏移距离 (x_0, y_0) 。根据相机坐标系和世界坐标系的变换矩阵[(6)式]可知,第 n 次测量的变换矩阵为

$$\begin{pmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(n\gamma) & 0 & \sin(n\gamma) & x_0 \cos(n\gamma) + y_0 \sin(n\gamma) \\ -\sin(n\gamma) & 0 & \cos(n\gamma) & -x_0 \sin(n\gamma) + y_0 \cos(n\gamma) \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{cn} \\ y_{cn} \\ z_{cn} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中: (x_w, y_w, z_w) 为世界坐标系坐标, (x_{cn}, y_{cn}, z_{cn}) 为相机坐标系坐标, $n(n \geq 0)$ 为旋转测量次数; γ 为转台每次旋转的角度。

由上述 $n+1$ 组变换方程,计算偏移距离 $D = (x_0, y_0)^T$ 的估计值,即

$$\mathbf{A}^T \mathbf{A} \mathbf{D} = \mathbf{A}^T \mathbf{X}', \quad (11)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 - \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \gamma & 1 - \cos \gamma \\ \vdots & \vdots \\ 1 - \cos(n\gamma) & -\sin(n\gamma) \\ \sin(n\gamma) & 1 - \cos(n\gamma) \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{X}' = \begin{pmatrix} x_{c1} \cos \gamma + z_{c1} \sin \gamma - x_{c0} \\ -x_{c1} \sin \gamma + z_{c1} \cos \gamma - z_{c0} \\ \vdots \\ x_{cn} \cos(n\gamma) + z_{cn} \sin(n\gamma) - x_{c0} \\ -x_{cn} \sin(n\gamma) + z_{cn} \cos(n\gamma) - z_{c0} \end{pmatrix}.$$

3 误差分析

3.1 L 和 α 对误差的影响

相机坐标系的测量值是系统测量结果的初始数据,其精度高低决定了系统测量结果的精度;而相机

坐标系变换到世界坐标系的精度,主要取决于转台的旋转精度。根据(3)式可知,若 x 、 y 的坐标误差分别为 σ_1 、 σ_2 ,则 x_c 、 y_c 和 z_c 的误差可表示为^[19]

$$dx_c = Lf_x \tan \alpha \cdot \sigma_1 / (f_x + x \tan \alpha)^2, \quad (12)$$

$$dy_c =$$

$$Lf_x \tan \alpha \sqrt{y^2 \sigma_1^2 \tan^2 \alpha / (f_x f_y + x f_y \tan \alpha)^2 + \sigma_2^2} / (f_x f_y + x f_y \tan \alpha), \quad (13)$$

$$dz_c = Lf_x \tan^2 \alpha \cdot \sigma_1 / (f_x + x \tan \alpha)^2, \quad (14)$$

(12)~(14)式的分母中都包含 $f_x + x \tan \alpha$ 项,即 $x = -f_x / \tan \alpha$ 为上述误差公式的无穷间断点,也是误差值的峰值点。

相机坐标系的 Z_c 轴和相机镜头的光轴重合,线激光轴线与 Z_c 轴的交点在图像坐标 $x=0$ 处,该交点到相机镜头的距离为 $z_c = L \cdot \tan \alpha$ 。系统测量时,随着被测物点与该交点的距离不同,对应的图像

坐标在 $x=0$ 附近变化。因此,根据 $z = L \cdot \tan \alpha$ 的值,能够确定系统的测量范围。由于 z_c 值由夹角 α 和间距 L 共同确定,即使在同一交点也有无数种不同的 α 和 L 取值,因此,需要分析不同的 α 和 L 取值对系统测量误差的影响。根据测量误差(12)~(14)式可知, L 与误差值呈线性关系, α 与误差值呈非线性关系,且 α 影响误差峰值点的位置。

以下结合具体示例分析 α 和 L 对测量误差的影响:相机镜头焦距 $f=8$ mm,感光元件尺寸为 4.8 mm \times 3.6 mm,图像分辨率为 800×600 , $z_c = 1000$ mm。当 L 分别取 200 mm和 400 mm,对应的 α 正切值取 5 和 2.5 ,系统测量范围分别为 400 mm $\sim\infty$ 和 $571 \sim 4000$ mm。用Matlab作图对比 α 和 L 取值不同时系统测量范围内的误差,如图4和图5所示。

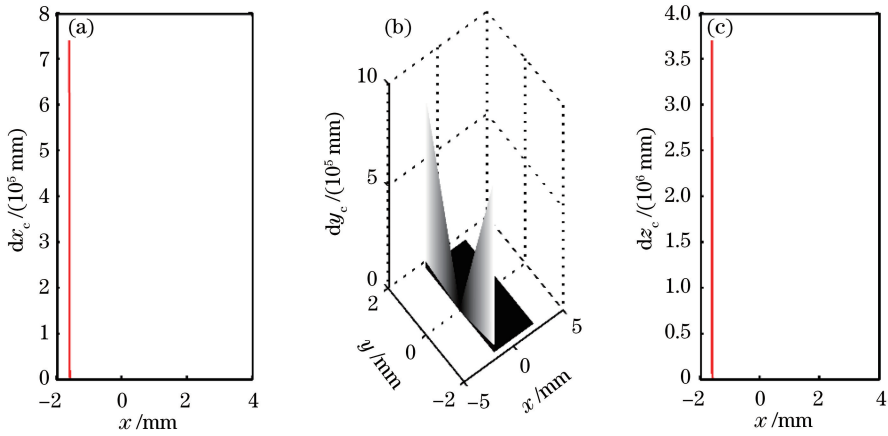


图4 $L=200$ mm, $\tan \alpha=5$ 时的误差图。(a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c

Fig. 4 Error graphs at $L=200$ mm and $\tan \alpha=5$. (a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c

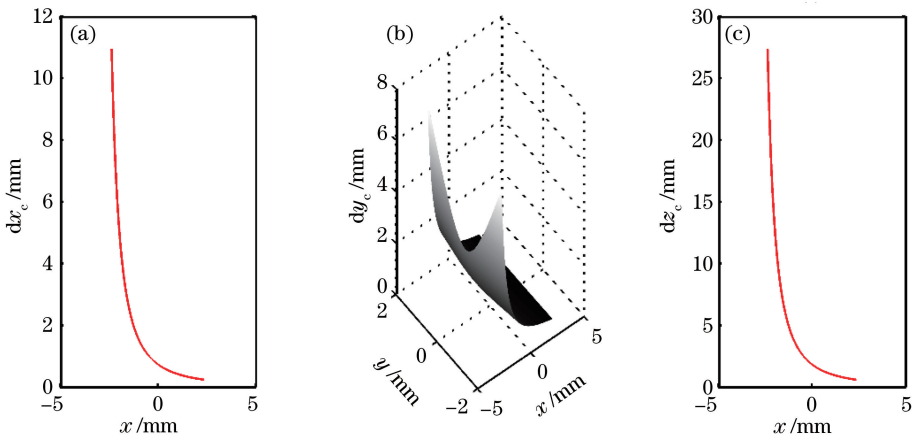


图5 $L=400$ mm, $\tan \alpha=2.5$ 时的误差图。(a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c

Fig. 5 Error graphs at $L=400$ mm and $\tan \alpha=2.5$. (a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c

通过对比可知,不同 α 和 L 取值时的最大误差相差 $4 \sim 5$ 个数量级。图4的误差峰值范围很小,且

随 x 的增大而极速下降,而图5的误差也随 x 的增大不断减小。由于 L 与误差是线性关系,误差峰值

的主因在于 α 的取值使分母的极值点在 x 的取值范围内,因此,为减小系统误差, x 的取值范围应尽可能远离误差极值点。当 $L=200\text{ mm}$, $\tan \alpha=5$,

$x>0$ (远离误差峰值点)时,得到的误差如图 6 所示,此时测量范围为 $400\sim 1000\text{ mm}$ 。

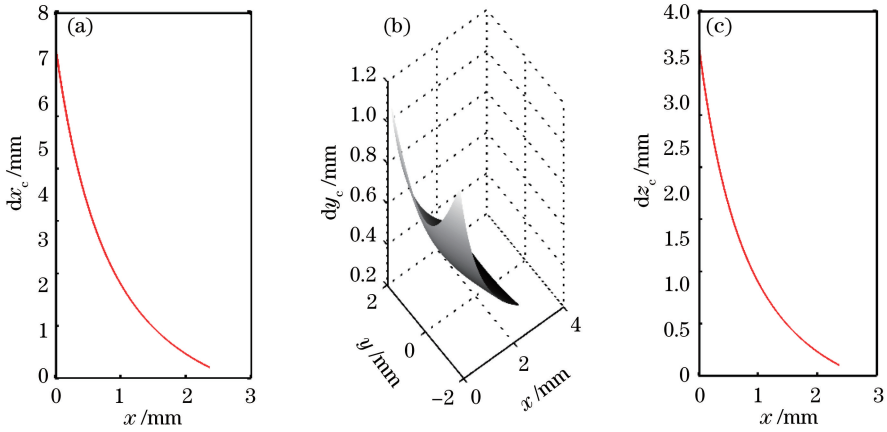


图 6 $L=200\text{ mm}$, $\tan \alpha=5$, $x>0$ 时的误差图。(a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c

Fig. 6 Error graphs at $L=200\text{ mm}$, $\tan \alpha=5$ and $x>0$. (a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c

对比图 4 和图 6 可知,虽然图 4 的部分范围测量误差极大,但是远离误差极值点的测量误差会大幅减小。同时,对比 $\tan \alpha$ 的取值可知,当 $L \cdot \tan \alpha$ 取定值时,夹角 α 取值越大系统测量范围越大,测量误差也随之增大。因此,为提高系统测量精度,当 $L \cdot \tan \alpha$ 不变时,夹角 α 取值不宜过大,要保证像面上 x 的取值范围远离误差极值点。

3.2 测量范围误差

3.1 节主要分析 L 和 α 的取值对测量误差的影响,下面具体分析在一定测量范围内的误差变化。相机镜头焦距采用 $f=8\text{ mm}$ 和 $f=12\text{ mm}$ 两种规格,相机感光元件尺寸为 $4.8\text{ mm} \times 3.6\text{ mm}$,图像分辨率为 800×600 。当 $L=500\text{ mm}$, $\tan \alpha=3$,系统

的测量范围为 $1500\text{ mm} \pm 500\text{ mm}$ 时,像面 x 的变化范围为 $-0.6667 \sim 1.3334$, y 的变化范围为 $-1.776 \sim 1.776$ 。

图 7 为测量范围为 $1000\sim 2000\text{ mm}$ 时的误差图,可知焦距 $f=8\text{ mm}$ 时, x_c 和 y_c 误差小于 2 mm , z_c 误差小于 6 mm ; $f=12\text{ mm}$ 时, x_c 和 y_c 误差小于 1.2 mm , z_c 误差小于 3.5 mm 。当其他条件一致时,增大镜头焦距能够减小测量误差。若只保持测量范围不变,可以通过改变 L 和 α 的取值来提高系统精度。当 $L=1000\text{ mm}$, $\tan \alpha=1.5$ 时,系统测量范围不变,像面 x 的变化范围为 $-1.3334 \sim 2.6667$, y 的变化范围为 $-1.776 \sim 1.776$, 测量误差如图 8 所示。

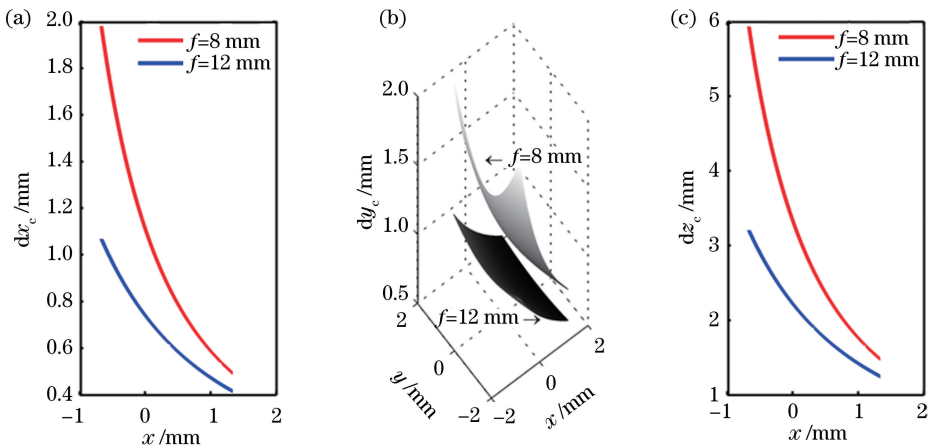


图 7 $L=500\text{ mm}$, $\tan \alpha=3$ 时的误差图。(a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c

Fig. 7 Error graphs at $L=500\text{ mm}$ and $\tan \alpha=3$. (a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c

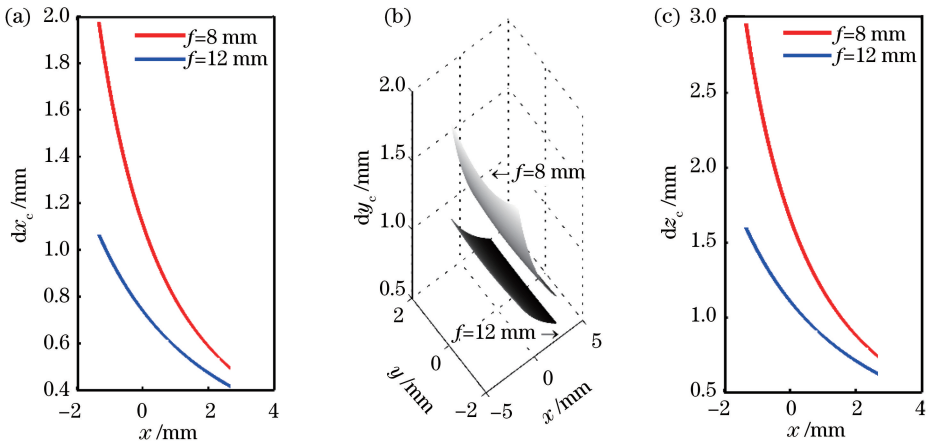


图 8 $L=1000$ mm, $\tan \alpha=1.5$ 时的误差图。(a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c 。

Fig. 8 Error graphs at $L=1000$ mm and $\tan \alpha=1.5$. (a) dx_c ; (b) dy_c ; (c) dz_c 。

由于像面尺寸限制,此时系统测量范围变为 $1039 \sim 2000$ mm, $f=8$ mm 时, x_c 误差小于 2 mm, y_c 误差小于 1.4 mm, z_c 误差小于 3 mm; $f=12$ mm 时, x_c 误差小于 1.2 mm, y_c 误差小于 1 mm, z_c 误差小于 1.6 mm。对比图 7 和图 8 可知,焦距 f 和 $L \cdot \tan \alpha$ 不变时,间距 L 增加 1 倍, $\tan \alpha$ 对应减小 1 倍, x_c, y_c 误差变化较小,而 z_c 误差减小 1 倍,同时像面利用率提高 2 倍。但是,由于感光元件的尺寸限制, x 的取值范围超出了像面范围,导致测量范围减小。

综上可知,在一定测量范围内, α 取值越小,像面的利用率越高,测量精度越高;同时,增大相机镜头焦距能够减小测量误差。

4 实 验

为验证系统的可行性并评估其精度,首先进行了场景重建实验,见 4.1 节;精度方面,本研究主要评估了水平方向的距离精度和物体的尺寸精度,见 4.2 节。实验采用的是 200 万像素的 CMOS 工业相机,其镜头焦距 $f=12$ mm;激光器采用的是功率为 20 mW、波长 $\lambda=635$ nm 的线激光器;精密旋转平台的分辨率为 0.01° ,实验中的步进角为 0.1° 。

4.1 场景重建

图 9 为场景重建示意图。其中,图 9(a)为被测场景图,图 9(b)为重建场景点云主视图,图 9(c)为重建场景点云左视图,图 9(d)为重建场景点云俯视图。

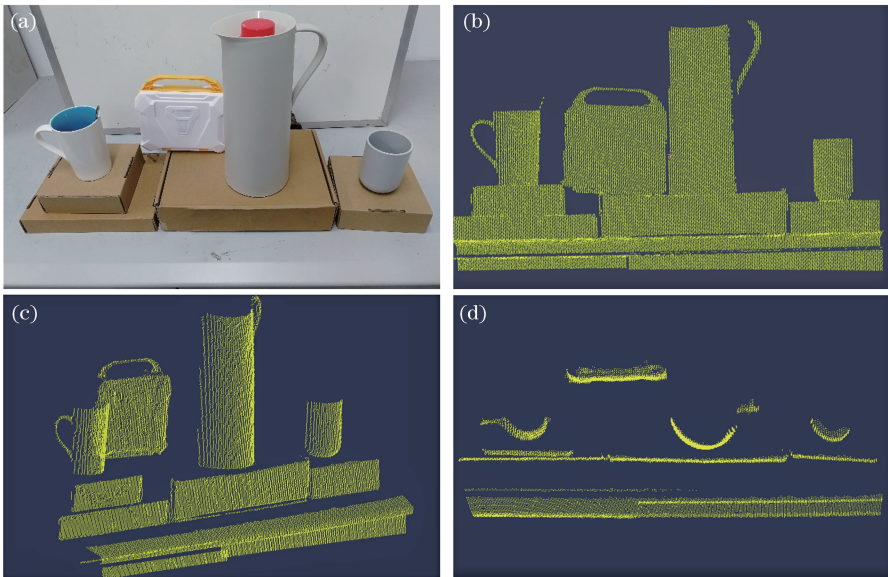


图 9 场景重建示意图。(a) 场景原图; (b) 重建场景主视图; (c) 重建场景左视图; (d) 重建场景俯视图

Fig. 9 Schematic of scene reconstruction. (a) Original scene graph; (b) front view of reconstructed scene; (c) left view of reconstructed scene; (d) top view of reconstructed scene

4.2 精度评估

为更好地评估系统的测量精度,从被测场景在世界坐标系的距离精度和被测场景中物体的尺寸精度两个方面进行精度评估。

4.2.1 距离精度

将被测纸盒固定在带刻度导轨的支架上,纸盒随

支架在导轨上移动,测量范围为 1000~1700 mm。用米尺测量纸盒到系统旋转心的距离作为真值,纸盒初始位置为 1006.4 mm。系统的标定参数如表 1 所示,实际测量结果与误差值如表 2 所示,根据最终的测量结果可知,测量绝对误差小于 2.6 mm,精度高于 0.25%,能够满足一般的场景测量要求。

表 1 系统标定参数

Table 1 Calibration parameters of the system

L /mm	$\tan \alpha$	f_x /mm	f_y /mm	dx / μm	dy / μm
347.89	3.985	14.95	14.90	5.92	5.92

表 2 测量结果

Table 2 Measurement of distance

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distance /mm	1026.4	1076.4	1126.4	1156.4	1176.4	1226.4	1256.4	1276.4	1326.4	1356.4
Measurement /mm	1028.92	1073.9	1125.94	1156.2	1175.79	1227.05	1254.46	1274.05	1324.91	1355.02
Deviation /mm	2.52	-2.50	-0.46	-0.20	-0.61	0.65	-1.94	-2.35	-1.49	-1.38
Ratio /%	0.25	0.23	0.04	0.02	0.05	0.05	0.15	0.18	0.11	0.10
No.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Distance /mm	1376.4	1426.4	1456.4	1476.4	1526.4	1556.4	1576.4	1626.4	1656.4	1676.4
Measurement /mm	1375.88	1424.2	1456.81	1476.14	1526.85	1556.30	1575.65	1624.77	1658.27	1677.13
Deviation /mm	-0.52	-2.2	0.41	-0.26	0.45	-0.10	-0.75	-1.63	1.87	0.73
Ratio /%	0.04	0.15	0.03	0.02	0.03	0.01	0.05	0.10	0.11	0.04

4.2.2 尺寸精度

如图 10 所示,将被测场景点云沿主视图方向进行垂直投影,然后对图中标号 1~6 的物体点云进行分割,并进行边界拟合得到它们的宽度和高度信息,同时使用游标卡尺测得物体的实际尺寸。物体宽度信息由于遮挡而不准确,故不宜作为精度评估参考;而物体高度测量较为准确,可作为评估参考,表 3 为物体高度的测量结果。根据表 3 可知,物体尺寸精度与距离精度一致,并且符合理论误差分析。

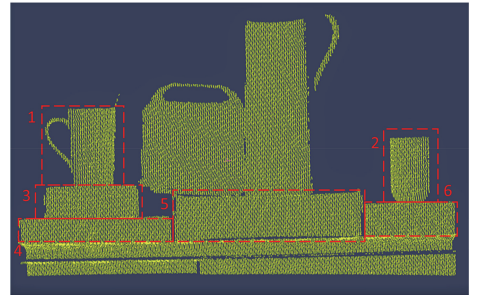


图 10 点云投影图

Fig. 10 Graph of point cloud projection

表 3 高度测量

Table 3 Measurement of height

Cloud No.	1	2	3	4	5	6
Fitted height	121.50	103.82	52.10	38.70	69.82	52.20
Measured height	121.65	103.50	51.91	38.65	70.06	52.34
Deviation	0.15	-0.32	-0.19	-0.05	0.24	0.14

5 结 论

线激光三维扫描重建系统利用激光光轴与投影激光线之间的几何关系解决了物像匹配难题,极大降低了传统视觉匹配算法的复杂度。同时,利用相机光轴与线激光轴线固定的相对位置关系,结合相机针孔模型构建了三维重建算法,解决了以往激光扫描技术算法复杂、匹配效率低、测量速度慢等问题。

通过理论分析和实验验证对系统精度进行了详细评估,实验结果表明,测量距离在 1000~1700 mm 范围内的系统绝对误差小于 2.6 mm,精度高于 0.25%。

同时,根据误差分析可知,增大相机与线激光器间距 L ,或者减小激光轴线与相机镜头所在平面的夹角 α ,以及增大镜头焦距 f ,都能提高系统测量精度。因此,系统可以通过改变以上参数提高 1000~1700 mm 范围内的测量精度;或保持现有精度,实

现更远距离场景的测量。线激光条纹的提取精度也是影响系统精度的重要因素。现阶段主要以阈值法为基础进行条纹提取,环境光较弱时,条纹的提取精度很高,一旦环境光强接近激光光强时,条纹就无法有效提取,限制了系统的有效适用范围。未来考虑采用红外线激光进行测量,既能排除环境光干扰问题,也可避免线激光对人眼的意外伤害。

参 考 文 献

- [1] Ding S W, Zhang X H, Yu Q F, *et al.* Overview of non-contact 3D reconstruction measurement methods [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 070003.
丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 070003.
- [2] Zhou S, Guo Y C, Gao C, *et al.* Rapid length measuring system for mobile and large scale cylinder workpieces based on 3D laser scanning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1524-1530.
周森, 郭永彩, 高潮, 等. 基于三维激光扫描的移动大尺寸圆柱体工件长度快速检测系统[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1524-1530.
- [3] Li H B, Yang X G, Zhao W, *et al.* Measurement technology and its application for tunnel excavation and lining quality based on 3D laser scanning [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(S1): 3456-3463.
李海波, 杨兴国, 赵伟, 等. 基于三维激光扫描的隧洞开挖衬砌质量检测技术及其工程应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(S1): 3456-3463.
- [4] Qiu J L, Xia Q L, Yao L Q, *et al.* Mine geological modeling and application based on the three-dimensional laser scanner technology [J]. *Earth Science*, 2012, 37(6): 1209-1216.
邱俊玲, 夏庆霖, 姚凌青, 等. 基于三维激光扫描技术的矿山地质建模与应用[J]. *地球科学*, 2012, 37(6): 1209-1216.
- [5] Fan Q, Chen D W, Xi J T. A high precision 3D laser scanner system and its application [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2006, 40(2): 227-230.
樊强, 陈大为, 习俊通. 高精度激光点扫描三维测量系统及应用[J]. *上海交通大学学报*, 2006, 40(2): 227-230.
- [6] Bajaj C L, Bernardini F, Xu G. Automatic reconstruction of surfaces and scalar fields from 3D scans [C] // *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. New York: ACM, 1995: 109-118.
- [7] Tang K, Hua X H, Wei C, *et al.* The experimental study of buildings deformation monitoring method based on 3D laser scanning [J]. *Journal of Geomatics*, 2013, 38(2): 54-55, 65.
唐琨, 花向红, 魏成, 等. 基于三维激光扫描的建筑物变形监测方法研究[J]. *测绘地理信息*, 2013, 38(2): 54-55, 65.
- [8] Walther M, Steinhaus P, Dillmann R. A robot navigation approach based on 3D data fusion and real time path planning [C] // *Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems*, MFI2003, August 1, 2003, Tokyo, Japan. New York: IEEE, 2003: 45-50.
- [9] Chen K, Zhang D, Zhang Y S. Point cloud data processing method of cavity 3D laser scanner [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0812003.
陈凯, 张达, 张元生. 采空区三维激光扫描点云数据处理方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0812003.
- [10] Wang F J, Xi X H, Wan Y P, *et al.* Analysis on digitization and 3D-reconstruction of large building based on terrestrial laser scanning data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2014, 29(1): 144-150.
王方建, 习晓环, 万怡平, 等. 大型建筑物数字化及三维建模关键技术分析[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(1): 144-150.
- [11] Solea R, Veliche G, Cernega D C, *et al.* Indoor 3D object model obtained using data fusion from laser sensor and digital camera on a mobile robot [C] // *2013 17th International Conference on System Theory, Control and Computing*, October 11-13, 2013, Sinaia, Romania. New York: IEEE, 2013: 479-484.
- [12] Hu Y, Wang C J, Han M, *et al.* 3D laser scanning measure system based on computer vision [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science)*, 2004, 32(1): 16-18.
胡勇, 王从军, 韩明, 等. 基于计算机视觉的三维激光扫描测量系统[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2004, 32(1): 16-18.
- [13] Xiong H W, Zhang H, Zhang X W. Hand-held line laser 3D scanning method based on stereo vision [J]. *Applied Laser*, 2009, 29(3): 233-236.
熊汉伟, 张洪, 张湘伟. 基于双目立体视觉的手持式线激光 3D 扫描方法[J]. *应用激光*, 2009, 29(3): 233-236.
- [14] Zhang Q, Jia Q X. 3D indoor reconstruction based on laser scanner and monocular camera [J]. *Journal of System Simulation*, 2014, 26(2): 357-362.
张勤, 贾庆轩. 基于激光与单目视觉的室内场景三维

- 重建[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(2): 357-362.
- [15] Ma S D, Zhang Z Y. Computer vision—computer theory and algorithm foundation [M]. Beijing: Science Press, 1998: 52-59.
马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 52-59.
- [16] Xie Z X, Zhu R X, Zhang A Q. Extrinsic parameters calibration of three-dimensional measurement system for ultra-large scale line-structured light sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1004003.
解则晓, 朱瑞新, 张安祺. 超大尺度线结构光传感器三维测量系统外参数标定[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1004003.
- [17] Semeniuta O. Analysis of camera calibration with respect to measurement accuracy[J]. Procedia CIRP, 2016, 41: 765-770.
- [18] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [19] Yu H, Xing T, Jia X. The analysis of measurement accuracy of the parallel binocular stereo vision system [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9684: 96841I.