

线结构光视觉测量系统运动轴线的简易标定方法

陈新禹 马 孜 陈天飞 李 鹏

(大连海事大学自动化研究中心, 辽宁 大连 116026)

摘要 为简化测量系统中平移轴和旋转轴的标定, 提出一种基于一维平面标靶的简易标定方法。将一维标靶放置在数控平台上, 控制平台分别做平移和旋转运动, 提取每个位置下图像中圆心坐标, 利用消隐点和三点透视模型(P3P)原理实现系统轴线空间位置的标定。实验结果表明, 该标定方法具有较高的标定精度, 平均绝对测量误差为 0.0411 mm, 均方根(RMS)误差为 0.0625 mm。该标定方法仅需已知的等距共线三点即可完成平移轴线和旋转轴线的高精度标定, 降低了标定成本, 且计算简单、标定过程灵活方便, 适合现场标定。

关键词 测量; 视觉测量; 线结构光; 轴线标定; 数据拼接; 消隐点; 三点透视模型

中图分类号 TP212.14; TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1108014

Novel Calibration Method for Axes in Line Structured Light Vision Measurement System

Chen Xinyu Ma Zi Chen Tianfei Li Peng

(Automation Research Center, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract In order to simplify calibration procedures of translation and rotation axes, a flexible calibration method based on one-dimensional plane target is proposed. Plane target is placed on platform, then the platform is translated and rotated, respectively. The centers of every concentric circle at each location are extracted. The spatial location of system axes are determined using principles of vanishing points and perspective-three-point (P3P). Experimental results indicate that this calibration method has high accuracy; its average absolute measuring accuracy is 0.0411 mm, and its root mean square (RMS) error is 0.0625 mm. This calibration method requires only three collinear points to complete high-precision calibration of translation and rotation axes, which therefore can reduce calibration cost. It concludes that the calculation is flexible and suitable for field calibration.

Key words measurement; vision measurement; line structured light; axis calibration; data fusion; vanishing points; perspective-three-point

OCIS codes 120.4820; 120.5800; 150.1488; 150.3040

1 引言

线结构光视觉传感器由于结构简单、速度快且信息量大、精度较高等优点在逆向工程、质量检测和生物医学等领域具有广阔的应用前景^[1]。但由于线结构光视觉传感器每次只能获取物体表面上的一条数据信息, 因此需要结合平移和旋转等运动才能获得完整的测量数据。

线结构光视觉传感器在测量过程中需要将不在

同方位获得的数据拼接起来, 而数据拼接将直接影响最终的测量精度。目前常用的方法有两类: 一类是在扫描过程中进行拼接, 另一类是在扫描结束后进行拼接。前者主要分为利用附加标记点^[2]和运动机构信息^[3~6]进行处理, 其中附加标记点法需要采用双目视觉传感器对标记点进行定位, 进而实现数据的拼接。后者则利用数据点进行匹配^[7~9], 但因为测量过程中存在误差, 导致各数据片很难实现

收稿日期: 2012-06-20; 收到修改稿日期: 2012-07-13

基金项目: 国家重大科技专项(2009ZX04001-021)资助课题。

作者简介: 陈新禹(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事机器视觉、视觉测量等方面的研究。E-mail: chensavvy@163.com

导师简介: 马 孜(1955—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事精密检测、机器人控制等方面的研究。

E-mail: zima@dlnu.edu.cn

无缝拼接,且整体拼接精度低于单片测量精度。

采用平移和旋转扫描方式即可获得完整的物体表面数据,且扫描过程中即可完成数据的拼接,具有精度高、实时性好等优点,因此基于多轴联动数控平台的线结构光视觉测量系统得到广泛应用。该类系统通常需要对线结构光传感器和系统结构进行标定才能扫描物体。线结构光视觉传感器的标定研究开展较早,方法繁多且较为成熟^[10~13]。系统轴线的标定方法也有很多种,其中两类方法较为成熟。第一,利用平面参照物的坐标变换求出数控平台轴线的位置^[5,14~16],该类方法操作简单、成本低廉,但是需要摄像机具有较大的视野范围。第二,将标准件固定在数控平台上,并控制平台运动,通过拟合标准件的运动轨迹实现数控平台轴线的标定^[3,4,17],该类方法对标准件有较高的要求,增加了标定成本。

本文提出一种基于一维标靶的现场标定方法,可实现对平移轴线和旋转轴线的标定,将数据统一在同一坐标系下,实现对象的全局测量。该标定方法计算简单、成本低廉、精度较高,可解决小空间数控平台的标定问题。

2 系统模型

如图1所示,线结构光视觉传感器安置在测量系统顶部。数控平台具有平移和旋转两个自由度,其中旋转台被固定于平移轴的支撑平台上,并随其做直线运动。为实现多视测量数据的在线拼接,需要首先标定出系统的数学模型。

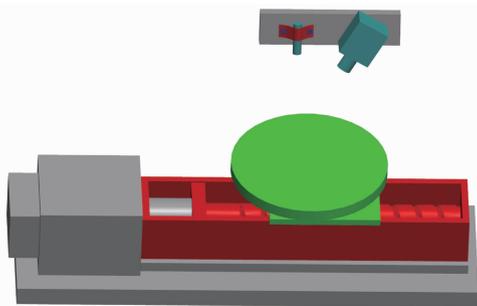


图1 测量系统结构

Fig. 1 Structure of scanning system

如图2所示,建立测量系统的数学模型。 $O_c X_c Y_c Z_c$ 为摄像机坐标系, O_c 为摄像机镜头光心, Z_c 与摄像机的光轴重合。 $O'_t X'_t Y'_t Z'_t$ 为初始状态下的平移轴坐标系, $O_t X_t Y_t Z_t$ 为运动后平移轴坐标系, Z'_t 和 Z_t 与平移轴平行。 $O_r X_r Y_r Z_r$ 为转台坐标系, Z_r 与转台轴线重合,测量数据要统一在该坐标系下才能实现数据拼接。设 $O_c X_c Y_c Z_c$ 到 $O'_t X'_t Y'_t Z'_t$ 的变

换矩阵为 M_{c2t} , $O_t X_t Y_t Z_t$ 与 $O'_t X'_t Y'_t Z'_t$ 只做 Z 向的平移,该平移量可从电机中读出。 $O_t X_t Y_t Z_t$ 到 $O_r X_r Y_r Z_r$ 的变换矩阵为 M_{t2r} ,物体在 $O_r X_r Y_r Z_r$ 下只绕 Z 轴旋转,旋转角度可从与电机连接的编码器读出。因此,只要标定出平移轴线和转台轴线便可得到 M_{c2t} 和 M_{t2r} ,从而实现数据的拼接。

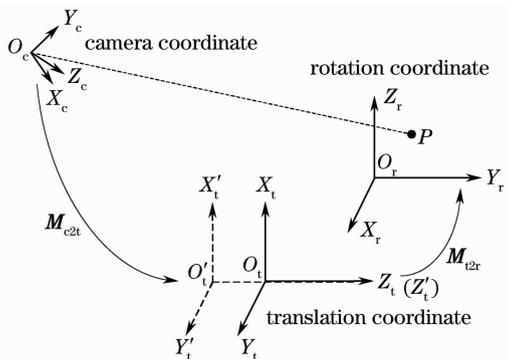


图2 系统数学模型

Fig. 2 Mathematical model of system

3 系统标定

3.1 预备知识

如图3,采用包含三个共线同心圆的一维平面标靶标定系统平移轴线和旋转轴线的空间位置。

空间点 A 、 B 和 C 分别为三个同心圆的圆心且 $\overline{AB} = \overline{BC}$,圆心的提取参考文献^[18]的方法。 L 为三点所在直线, P_∞ 为直线 L 与无穷远平面的交点。根据射影几何理论^[19,20]可得

$$(\overline{AC}, \overline{BP_\infty}) = \frac{\overline{AB}}{\overline{CB}} \left(\frac{\overline{AP_\infty}}{\overline{CP_\infty}} \right)^{-1} = -1, \quad (1)$$

由于透视变换保持共线性和交比不变,则有

$$(\overline{a_m c_m}, \overline{b_m p_\infty}) = -1, \quad (2)$$

式中 a_m 、 b_m 、 c_m 和 p_∞ 分别为 A 、 B 、 C 和 P_∞ 的像点。 p_∞ 称为直线 L 的消隐点,平行直线具有相同的消隐点。由于消隐点可表示该直线的方向,于是有

$$\vec{v} \cong \mathbf{K}^{-1} \vec{p}_\infty, \quad (3)$$

式中 \vec{v} 表示直线的法向, \vec{p}_∞ 是 p_∞ 的齐次坐标, \mathbf{K} 表示摄像机的内部参数矩阵,符号“ \cong ”表示相差一个常数因子意义下相等。



图3 一维标靶

Fig. 3 One-dimensional target

另外, A 、 B 、 C 三点与摄像机光心 O_c 构成三点透视模型(P3P)。若已知 \overline{AB} 和 \overline{BC} 的距离便能确定

三点在摄像机坐标系下的三维坐标^[21]。

3.2 平移轴线标定

由于平移运动的特殊性,只需要标定平移轴线在摄像机坐标系下的方向向量即可(如图4所示)。定义 L_a, L_b, L_c 分别为 A, B 和 C 点的随平移运动产生的空间轨迹直线。首先将一维标靶放置于平台上,此时一维标靶上三点的图像坐标分别为 a_m, b_m, c_m 。控制平台做两次等距离移动,三点的图像坐标分别为 a'_m, b'_m, c'_m 和 a''_m, b''_m, c''_m 。则由(2)式可求得直线 L_a, L_b, L_c 的消隐点 p_∞^a, p_∞^b 和 p_∞^c 。因为 $L_a//L_b//L_c$,所以理论上 $p_\infty^a, p_\infty^b, p_\infty^c$ 三点应重合。但由于图像提取误差的存在导致三点通常不会重合,这里取三点的均值作为直线的消隐点 p_∞ 。当摄像机的内部参数矩阵已知时,根据(3)式可求出平移轴线的方向向量 $\bar{v}_t = [\bar{v}_{tx} \ \bar{v}_{ty} \ \bar{v}_{tz}]^T$ 。则摄像机坐标系到平移轴坐标系的旋转矩阵为 $R_{c2t} = \begin{bmatrix} R(\varphi, \theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,其中 $\varphi = \bar{n} \times \bar{v}_t, \bar{n} = [0 \ 0 \ 1]^T, \theta = \arccos(\bar{n} \cdot \bar{v}_t)$, $R(\varphi, \theta)$ 表示绕向量 φ 旋转 θ 角度的旋转矩阵。摄像机坐标系到平移轴坐标系的平移矩阵

$T_{c2t} = \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,其中 E 为 3×3 的单位矩阵,于是有

$$\tilde{P}_t = R_{c2t} T_{c2t} \tilde{P}_c, \quad (4)$$

式中 \tilde{P}_t 表示平移轴坐标系下点的齐次坐标, \tilde{P}_c 表示摄像机坐标系下点的齐次坐标。

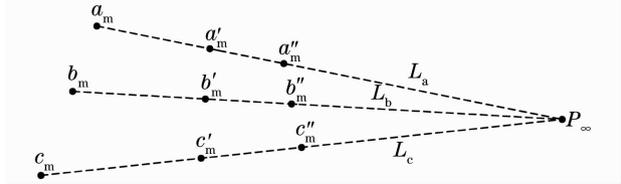


图4 平移轴标定

Fig. 4 Translation axis calibration

3.3 转台轴线标定

传统标定方法^[3,4,16]是通过特征点的运动轨迹拟合空间圆,从而完成轴线标定。本文从空间直线的几何意义入手,首先计算出直线的方向向量,然后再确定直线上一点的空间坐标,最终完成转台轴线的标定。

图5为转台轴线方向向量标定示意图。这里只使用标靶上 A 点计算轴线方向向量。 $P_i (1 \leq i \leq n, n$ 为位置总数)表示绕轴线 v_r 旋转 $i \times \theta$ 角度时 A 点的空间坐标,且有 $\frac{n}{2} \times \theta = \pi$ 。理论上, O 为直线 $\overline{P_i P_{i+s}}$ 的交点, $P_i (1 \leq i \leq n)$ 构成以 O 为圆心的空

间圆,且 $P_i, O, P_{i+s} (1 \leq i \leq s, s = n/2)$ 三点共线。设 p'_i, o', p'_{i+s} 分别为 P_i, O, P_{i+s} 的像点,所以 o' 应为直线 $\overline{p'_i p'_{i+s}}$ 的交点,并将 p'_i, o', p'_{i+s} 代入(2)式和(3)式求得直线 $\overline{P_i P_{i+s}}$ 的方向向量 $n_i = [n_{ix}, n_{iy}, n_{iz}]^T$ 。设 $\bar{v}_r = [\bar{v}_{rx}, \bar{v}_{ry}, \bar{v}_{rz}]^T$ 表示转台轴线的方向向量,由空间几何理论可知 $\bar{v}_r \perp n_i$,进一步得

$$B \cdot \bar{v}_r = 0, \quad (5)$$

式中 $B = \begin{bmatrix} n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ n_{sx} & n_{sy} & n_{sz} \end{bmatrix}$ 。(5)式的解是 $B^T B$ 对应最小特征值的特征向量^[22]。

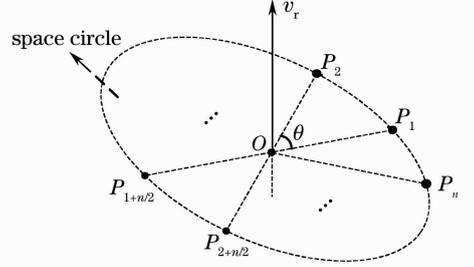


图5 轴线方向向量标定示意图

Fig. 5 Schematic diagram of direction vector calibration

在计算过程中,假设 p'_i, o', p'_{i+s} 是共线的。但由于噪声和计算误差的引入,其通常不满足共线性且直线 $\overline{p'_i p'_{i+s}} (1 \leq i \leq s)$ 不相交于 o' 。因此,定义关于 o' 的目标函数为

$$E = \sum_i d^2(o', \overline{p'_i p'_{i+s}}), \quad (6)$$

式中 $d(o', \overline{p'_i p'_{i+s}})$ 表示点 o' 到直线 $\overline{p'_i p'_{i+s}}$ 的距离。该函数属于非线性最小化问题,可使用Levenberg-Marquardt等算法求解。为确保 p'_i, o', p'_{i+s} 三点共线,使用点 o' 在直线 $\overline{p'_i p'_{i+s}} (1 \leq i \leq s)$ 上的投影代替 o' 。

图6为转台轴线上一点标定示意图,若已知 $\overline{AB}, \overline{BC}$ 的距离则可计算 A, B, C 三点在摄像机坐标系下的三维坐标^[21]。如图 A, B, C 为一维标靶同心圆的圆心,其在归一化平面上的投影分别为 a, b, c 。由向量的点积可得

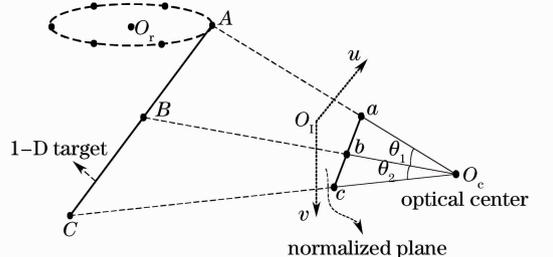


图6 轴线一点标定示意图

Fig. 6 Schematic diagram of one point calibration

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos\left(\frac{\mathbf{O}_c \mathbf{a} \cdot \mathbf{O}_c \mathbf{b}}{\overline{O_c a} \times \overline{O_c b}}\right) \\ \theta_2 = \arccos\left(\frac{\mathbf{O}_c \mathbf{c} \cdot \mathbf{O}_c \mathbf{b}}{\overline{O_c c} \times \overline{O_c b}}\right) \end{cases}, \quad (7)$$

根据正弦和余弦定理得

$$\begin{cases} \overline{O_c A} = \frac{\overline{AB} \overline{AC} \sin \theta_2}{\sqrt{m}} \\ \overline{O_c B} = \frac{\overline{AB} \overline{BC} \sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sqrt{m}} \\ \overline{O_c C} = \frac{\overline{BC} \overline{AC} \sin \theta_1}{\sqrt{m}} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $m = \overline{AC}^2 \sin^2 \theta_2 + \overline{BC}^2 \sin^2(\theta_1 + \theta_2) - 2 \overline{BC} \overline{AC} \sin \theta_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cos \theta_1$ 。

根据图 6 中几何关系得

$$\begin{cases} A = a \times \overline{O_c A} / \overline{O_c a} \\ B = b \times \overline{O_c B} / \overline{O_c b} \\ C = c \times \overline{O_c C} / \overline{O_c c} \end{cases}, \quad (9)$$

联立(7)~(9)式可以计算 A 点在摄像机坐标系下的三维坐标。转动平台获取多个坐标点,拟合空间圆,则圆心 $\mathbf{O}_r = [O_{rx} \ O_{ry} \ O_{rz}]^T$ 即为轴线上一点,从而完成转台轴心线的标定。于是摄像机坐标系

到转台坐标系的旋转矩阵为 $\mathbf{R}_{c2r} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\varphi, \theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,

其中 $\varphi = \bar{\mathbf{n}} \times \bar{\mathbf{v}}_r, \bar{\mathbf{n}} = [0 \ 0 \ 1]^T, \theta = \cos^{-1}(\bar{\mathbf{n}} \cdot \bar{\mathbf{v}}_r)$, $\mathbf{R}(\varphi, \theta)$ 表示绕向量 φ 旋转 θ 角度的旋转矩阵。摄像机

坐标系到转台坐标系的平移矩阵 $\mathbf{T}_{c2r} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & -\mathbf{O}_r \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$,

其中 \mathbf{E} 为 3×3 的单位矩阵,于是有

$$\tilde{\mathbf{P}}_r = \mathbf{R}_{c2r} \mathbf{T}_{c2r} \tilde{\mathbf{P}}_c, \quad (10)$$

式中 $\tilde{\mathbf{P}}_r$ 表示转台坐标系(统一坐标系)下点的齐次坐标, $\tilde{\mathbf{P}}_c$ 表示摄像机坐标系下点的齐次坐标。由上述过程可以看出转台轴线的方向向量和其上一点的标定过程可以统一完成。

3.4 数据拼接

为了测量完整的数据模型,需要将数据点转换到统一的坐标系下进行数据拼接。若平移运动 d , 转动 θ (绕轴线逆时针方向为正),将(4)式与(10)式联立可得

$$\tilde{\mathbf{P}}_r = \mathbf{R}_r \mathbf{M}_{t2r} \mathbf{T}_r^{-1} \mathbf{M}_{c2t} \tilde{\mathbf{P}}_c, \quad (11)$$

$$\text{式中 } \mathbf{T}_r = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_r = \begin{bmatrix} \cos(-\theta) & \sin(-\theta) & 0 & 0 \\ -\sin(-\theta) & \cos(-\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{c2t} = \mathbf{R}_{c2t} \mathbf{T}_{c2t}, \quad \mathbf{M}_{t2r} = \mathbf{R}_{t2r} \mathbf{T}_{t2r} \mathbf{T}_{c2t}^{-1} \mathbf{R}_{c2t}^{-1}. \quad (12)$$

4 标定实验与精度评定

线结构光传感器由型号 WAT-535 EX 摄像机(768 pixel \times 576 pixel)、12 mm 定焦 Computar 镜头以及波长为 650 nm 的线式激光发射器组成。步进电机选用北京埃库码科技有限公司的 35BYGH0.9° 两相步进电机,丝杠的精度为 0.05 mm/300 mm,螺距 0.5 mm;编码器选用海德汉 ROD426 高精度光学编码器,每转 10000 个脉冲。

4.1 标定实验

标定系统轴线之前首先需要对传感器模型进行标定,在实验环境下,利用深圳科创时代公司的 50 mm \times 50 mm 陶瓷棋盘模板(精度 ± 0.0015 mm),分别使用文献[11,13]的方法标定摄像机和光平面方程的参数。标定过程中使用 OpenCV 提供的摄像机标定函数,结果为摄像机内部参数矩阵 $\mathbf{K} =$

$$\begin{bmatrix} 1957.1276 & 2.8732 \times 10^{-4} & 353.5971 \\ 0 & 1957.9793 & 303.5025 \\ 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix},$$

重投影的平均绝对误差为 0.085 pixel,光平面参数方程 $\mathbf{P} = [-1.2258 \ -0.0278 \ 1.000 \ -150.9509]$,激光点到光平面的平均绝对误差为 0.038 mm。实验发现由于采用 Computar 镜头,镜头畸变很小,对测量精度影响可以忽略,但如果镜头有较大畸变时还应考虑畸变的影响^[23]。

将一维标靶至于平台之上,以 15 mm 为步距移动两次。采用 3.2 节介绍的方法确定平移轴线的方向向量。图 7 中圆圈表示由不同图像中对应点计算

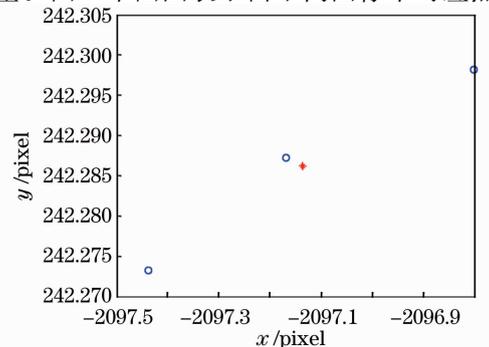


图 7 平移轴线的消失点

Fig. 7 Vanishing points of translation axis

的消隐点, 十字交叉线表示最终的定位点 $(-2097.1357, 242.2862)$, 再由(3)式计算出平移轴方向向量 $\bar{v}_t = [-0.7813 \quad -0.0195 \quad 0.6239]^T$, 转换矩阵分别为

$$\mathbf{R}_{c2t} = \begin{bmatrix} 0.6241 & -0.0094 & 0.7813 & 0 \\ -0.0094 & 0.9998 & 0.0195 & 0 \\ -0.7813 & -0.0195 & 0.6239 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_{c2t} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix}.$$
(13)

标定转台轴心线时, 首先将平移运动复位, 然后以 20° 为间隔转动转台一周, 提取每个位置下一维

标靶的同心圆圆心。图 8 显示了转台轴心线方向向量和轴线上一点的标定过程。采用 3.3 节介绍的方法标定出转台轴心线方向向量及轴线上一点分别为

$$\bar{v}_r = [0.6032 \quad 0.0122 \quad 0.7975]^T,$$

$$\mathbf{O}_r = [3.1508 \quad -0.8908 \quad 161.1850]^T,$$

$$\mathbf{R}_{c2r} = \begin{bmatrix} 0.7976 & -0.0041 & -0.6032 & 0 \\ -0.0041 & 0.9999 & -0.0122 & 0 \\ 0.6032 & 0.0122 & 0.7975 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T}_{c2r} = \begin{bmatrix} 1.000 & 0 & 0 & -3.1508 \\ 0 & 1.000 & 0 & 0.8908 \\ 0 & 0 & 1.000 & -161.1850 \\ 0 & 0 & 0 & 1.000 \end{bmatrix}.$$
(14)

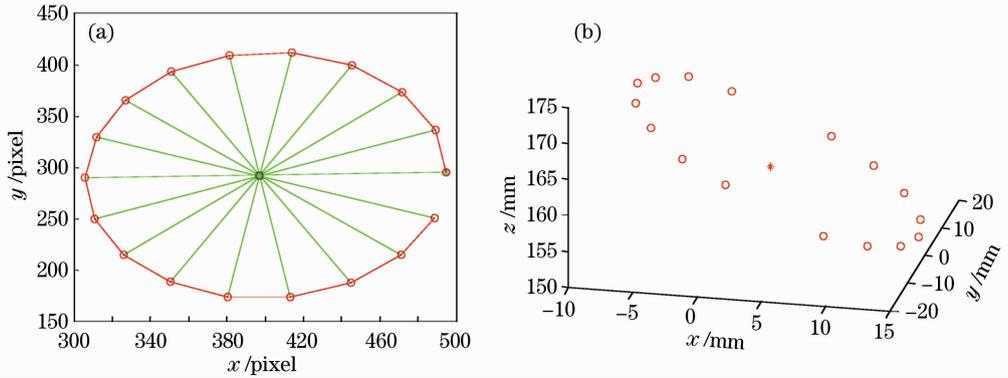


图 8 两步标定转台轴心线。(a) 计算轴心向量过程; (b) 计算轴心一点结果

Fig. 8 Two-steps of turntable axis calibration. (a) Direction vector; (b) one point of axis

4.2 精度评定

通过对标准球扫描 10 次来评定系统的标定精度。扫描过程中线结构光条纹中心线采用 Steger 曲线提取方法, 具体方法参见文献[24]。直接测量的数据使用(11)式进行数据拼接。实验中使用的标准球半径为 10.0024 mm , 使用最小二乘法对扫描数据进行拟合, 10 次扫描结果的均值为(单位均为毫米): 球心坐标为 $(121.4251, -2.6256, 85.8573)$, 球半径为 10.0363 。以每个数据点到拟合球心的距离与标准球半径的差值作为该点的误差指标, 实验最大误差为 0.3819 , 最小误差为 0.0001 , 平均绝对误差为 0.0411 , 均方根(RMS)误差为 0.0625 。可以看出, 本系统测量误差很小, 可以达到实际测量需求。另外, 将牙颌模型固定在平台中心处并分别做旋转和平移运动对其进行全局扫描。图 9 给出了部分牙颌模型的扫描结果, 数据平滑光滑、拼接精确, 充分说明了标定方法的可行性。

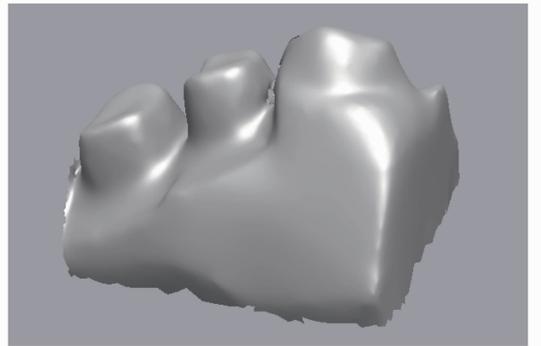


图 9 部分牙颌模型测量结果

Fig. 9 Measurement results of dental casts

5 结 论

提出一种利用一维标靶对线结构光视觉测量系统中的平移轴线和旋转轴心线进行标定的新方法。将一维标靶放置在数控平台上, 控制数控平台分别做平移和旋转操作, 并记录不同位置处的标靶图像, 利

用消隐点和 P3P 等原理实现轴线的标定。实验结果表明,该方法的测量精度达到 0.05 mm 以内,满足一定测量精度。该方法具有计算简单、速度快、精度高等优点,降低了标定成本,且具有较强的通用性。由于本方法是在精确提取同心圆圆心的基础上实现的,圆心的提取精度将直接影响轴线的标定精度,因此,对图像处理具有较高的要求。

参 考 文 献

1 Su Xianyu, Cheng Xiaoxue, Guo Lürong. An automated method for 360° surface measurement of 3-D objects[J]. *Acta Optica Sinica*, 1989, **9**(7): 670~672
苏显渝,程晓雪,郭履容. 三维物体 360°面形自动测量方法[J]. *光学学报*, 1989, **9**(7): 670~672

2 Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profilometry[J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(6): 533~536
张舜德,卢秉恒,丁玉成. 光学三维形面分区域测量数据的拼接研究[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(6): 533~536

3 Xu Yongan, Yang Qing, Huai Jinpeng. Analysis and modification of turntable's axis calibration [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, **32**(5): 659~663
徐永安,杨 钦,怀进鹏. 转台中心轴线标定误差分析与修正[J]. *北京航空航天大学学报*, 2005, **32**(5): 659~663

4 Xu Yongan, Yang Qing, Huai Jinpeng. Calibration of the axis of the turntable in 4-axis laser measuring system and registration of multi-view[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 659~663
徐永安,杨 钦,怀进鹏. 激光旋转扫描测量系统中转轴标定及多视拼合[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 659~663

5 Wu Qingyang, Li Jinzhen, Su Xianyu *et al.*. An approach for calibrating rotor position of three-dimensional measurement system for line-structure light [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1224~1227
吴庆阳,李景镇,苏显渝等. 线结构光三维测量系统中旋转轴的标定方法[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1224~1227

6 Zhang Qican, Su Xianyu, Zou Xiaoping. Calibration of 3-D measurement system using multi-sensor with line structured-illuminated laser[J]. *Laser Technology*, 2005, **29**(3): 225~228
张启灿,苏显渝,邹小平. 多个线结构光传感器三维测量系统的校准[J]. *激光技术*, 2005, **29**(3): 225~228

7 S. Umeyama. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(4): 376~380

8 J. B. Paul, D. M. Neil. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(2): 293~256

9 D. Chitra, W. Gang. Registration and integration of multiple object views for 3D model construction[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(1): 83~89

10 Qiu Maolin, Ma Songde, Li Yi. Overview of camera calibration for computer vision[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2000, **26**(1): 43~55

邱茂林,马松德,李 毅. 计算机视觉中摄像机标定综述[J]. *自动化学报*, 2000, **26**(1): 43~55

11 Z. Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330~1334

12 Wei Zhenzhong, Zhang Guangjun, Xu Yuan. Calibration approach for structured-lighted-stripe vision sensor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, **41**(2): 210~214
魏振忠,张广军,徐 园. 一种线结构光视觉传感器标定方法[J]. *机械工程学报*, 2005, **41**(2): 210~214

13 F. Q. Zhou, G. J. Zhang. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, **23**(1): 59~67

14 S. Y. Park, M. Subbarao. A multiview 3D modeling system based on stereo vision techniques [J]. *Machine Vision and Applications*, 2005, **16**(12): 148~156

15 F. Sadlo, T. Weyrich, R. Peikert. A practical structured light acquisition system for point-based geometry and texture [C]. Zurich: Symposium of Point-Based Graphics; Euro-graphics/IEEE VGTC Symposium Proceedings, 2005. 89~145

16 Zeng Xiangjun, Huo Jincheng, Wu Qingyang. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(1): 0108002
曾祥军,霍金城,吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定[J]. *中国激光*, 2012, **39**(1): 0108002

17 Long Xi, Zhong Yuexian, Li Renju. 3-D surface integration in structured light 3-D scanning [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2002, **42**(4): 477~480
龙 玺,钟约先,李仁举等. 结构光三维扫描测量的三维拼接技术[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2002, **42**(4): 477~480

18 Xing Dekui, Da Feipeng, Zhang Hu. Research and application of locating circular target with high accuracy[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, **30**(12): 2593~2598
邢德奎,达飞鹏,张 虎. 圆形目标精密定位方法的研究与应用[J]. *仪器仪表学报*, 2009, **30**(12): 2593~2598

19 J. G. Semple, G. T. Knebone. Algebraic Projective Geometry [M]. London: Oxford University Press, 1952

20 Xue Junpeng, Su Xianyu, Dou Yunfu. An concentric circles and wedge grating-based camera self-calibration method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(3): 0308002
薛俊鹏,苏显渝,窦蕴甫. 基于同心圆光栅和楔形光栅的摄像机自标定方法[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0308002

21 Huang Fengshan, Qian Huifen. Single camera 3D coordinate vision measuring system using a light pen[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(4): 69~72
黄风山,钱慧芬. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统[J]. *光电工程*, 2007, **34**(4): 69~72

22 G. Golub, C. van Loan. Matrix Computations[M]. Maryland: The John Hopkins University Press, 1996

23 Wang Huifeng, Wang Bingjian. Camera radial distortion calibrating method based on moving characteristic target[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512007
王会峰,王炳建. 移动特征靶标的摄像机径向畸变标定[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0512007

24 C. Steger. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(2): 113~125