

多视点三维测量系统的全局标定方法研究

孙国强, 许增朴, 王永强, 于德敏
(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 针对线结构光三维测量速度较慢和易发生遮挡问题, 开发了一种多视点线结构光三维测量系统. 并针对本系统提出了一种简易的基于线结构光的多目视觉三维测量系统全局标定方法, 标定过程只需要一块可自由移动的共面靶标, 即可将所有摄像机局部坐标系统一到光平面测量坐标系, 实现多视点测量数据的自动拼接. 实验表明, 该方法方便易行, 适合现场标定, 同时满足系统精度要求.

关键词: 线结构光; 共面靶标; 全局标定; 数据拼接

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1672-6510(2007)03-0058-04

A Global Calibration Method for Multi-camera 3D Measure System

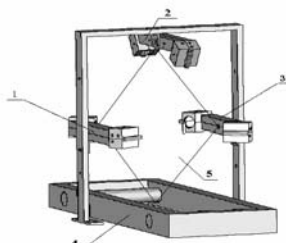
SUN Guo-qiang, XU Zeng-pu, WANG Yong-qiang, YU De-min

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: A multi-camera 3D measure system based on line structured-light was presented to overcome the problem of slow measuring velocity and occlusion. A facilitated global calibration method for the system was proposed. With only a coplanar reference target that is free to move, multiple camera reference frames can be transformed to the optical plane measurement reference frame to realize 3D data registration from different views. The experimental results show that the method is practical in multi-camera 3D measure system.

Keywords: line structured-light; coplanar reference target; global calibration; data registration

三维测量是现代制造业的核心技术之一, 线结构光三维视觉测量技术具有精度高、抗干扰性好、系统结构简单等优点, 成为目前三维测量的主要方法. 线结构光三维测量技术虽然已较为成熟, 但仍存在某些缺陷. 例如, 测量速度较慢, 易发生遮挡, 这些缺陷限制了其应用^[1-6]. 针对上述缺陷, 作者研发了一种基于线结构光的多视点三维测量系统, 其结构如图1所示.



1. 线结构光视觉测头; 2. 线结构光视觉测头;
3. 线结构光视觉测头; 4. 直线位移载物平台; 5. 结构光平面

图 1 系统结构

Fig. 1 System structure

线结构光视觉测头由双CCD和一个线激光器组成, 三个测头的激光器发出的激光面通过机械结构调节在空间准确重合, 待测物体被装夹在可做直线位移的载物平台上, 当步进电机驱动时, 只需一次扫描, 即可获得被测物体的整体三维信息, 这种多摄像机平移式扫描系统相对于单摄像机旋转分步扫描式系统, 大大提高了测量效率, 并有效地解决了光条遮挡问题. 系统研制的难点是对全局标定方法的研究.

由于本系统集成多目视觉测量与线结构光测量两种测量方式, 首先必须对系统做全局标定, 使所有摄像机的局部坐标系统一到系统的测量坐标系, 实现多视点测量数据的拼接, 同时要做结构光标定, 因此本系统的全局标定需将两种方式的标定结合起来, 综合考虑. 传统的多目视觉三维测量系统的全局标定方法有金规校准法和银规校准法, 这两种方法均采用标准件作为坐标统一工具, 标准件制造和维护成本较

收稿日期: 2007-01-16; 修回日期: 2007-03-15

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金资助项目(20051506)

作者简介: 孙国强(1980—), 男, 天津人, 硕士研究生.

高,在定期标定过程中防止标准件不受损害是十分困难的.20世纪80年代末,电子经纬仪坐标测量系统的出现为实现多传感器三维测量系统的全局标定提供了有力的工具,但经纬仪坐标测量系统设备复杂,需要较高的专业操作技能^[7].针对上述方法的局限性,本文提出了一种低成本、操作简单、快速实现的现场全局标定方法.

1 系统标定方法的研究

1.1 系统标定策略

标定设备仅为一块可自由移动的共面靶标.黑白正方形相间的标定靶标,正方形边长为30 mm,方块顶点为标定特征点.

设定结构光平面位于系统测量坐标系 $z=0$ 位置,则所求的 z 坐标可以通过直线位移平台单步位移量来确定,其精度由步进电机位移精度来保证.所求的 x, y 坐标位于结构光平面上,系统标定后,通过光条图像坐标反求 x, y 坐标值.

系统标定的过程如下:

- (1) 标定各个摄像机的内部参数;
- (2) 根据各个摄像机的朝向和相互之间的位置

关系,选定一个摄像机作为参考摄像机,标定光平面测量坐标系与参考摄像机的位置关系;

(3) 分别标定出5个非参考摄像机与参考摄像机的位置关系;

(4) 求出非参考摄像机与光平面测量坐标系的位置关系,将各个摄像机得到的局部数据统一到测量坐标系下,实现多视点数据的拼接.

1.2 摄像机内部参数的标定

多目视觉三维测量系统的全局标定必须首先标定摄像机的内部参数.摄像机内部参数的标定采用基于共面靶标的方法^[3],在摄像机视野范围内,拍摄若干幅(≥ 3)共面靶标图像,把标定平面与摄像机像平面之间的单应性矩阵分解为内外参数矩阵,利用旋转矩阵的单位正交性,求出摄像机内外参数的初值,并考虑摄像机镜头畸变误差,对初值进行最大似然估计,通过 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法,即可得到摄像机内部参数的最优解.

系统视觉测头采用 23X11HC CCD 摄像机,8mm 镜头, LH650-8-3 型激光投射器.

表 1 列出系统摄像机内部参数值,其中, f_x, f_y 为摄像机在像平面 x, y 方向的有效焦距, u_0, v_0 为理论原点,单位为 pixel, k_1, k_2 为径向畸变系数.

表 1 CCD 内部参数标定结果

Tab. 1 Calibration result of CCD internal parameters

CCD 编号	f_x /pixel	f_y /pixel	u_0 /pixel	v_0 /pixel	k_1	k_2
1	1 302.584	1 312.872	467.565	248.045	-0.218	0.148
2	1 330.484	1 338.656	475.411	209.036	-0.231	0.367
3	1 320.106	1 324.578	486.773	222.521	-0.232	0.272
4	1 304.337	1 315.972	382.567	309.251	-0.161	-0.325
5	1 308.288	1 321.557	305.075	347.402	-0.174	0.253
6	1 306.032	1 300.620	453.221	221.571	-0.164	0.249

1.3 标定结构光平面与参考摄像机的位置关系

获取结构光平面上大量高质量的标定特征点是结构光标定的关键环节.本文根据透视投影中交比不变性,用共面靶标来获取光平面上非共线标定特征点的三维世界坐标^[4].

如图2所示, O_c 为摄像机的光心, π_c 为摄像机像平面, π_L 为结构光平面, π_p 为靶标板平面, L 为 π_L 与 π_p 相交的光条直线,将局部世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 建立在共面靶标上,共面靶标位于局部世界坐标系 $z=0$ 的位置, A, B, C, D 代表共线点的局部世界坐标, a, b, c, d 代表共线点的图像坐标.根据交比不变性可得出下式:

$$\frac{ac}{bc} : \frac{ad}{bd} = \frac{Ac}{Bc} : \frac{AD}{BD}$$

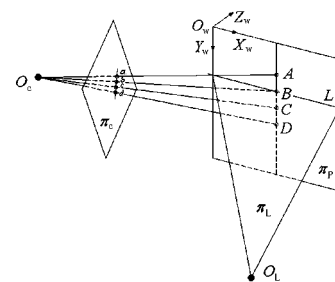


图 2 交比不变性原理

Fig. 2 Principle of cross-ratio

在光平面测量区域获取若干不同位置的共面靶标与光平面相交图像,图3为本系统结构光标定实验所取的其中一幅图像.

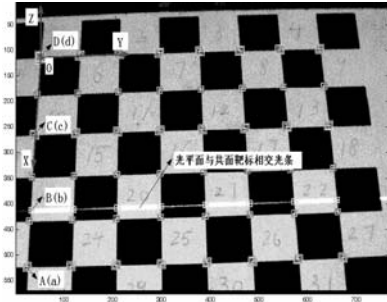


图 3 相交的光平面与共面靶标

Fig. 3 Intersection of optical plane and coplanar reference target

A、C、D 代表角点的局部世界坐标，a、c、d 代表角点的图像坐标，B、b 分别代表光平面与共面靶标黑方块边缘交点的局部世界坐标和图像坐标，角点的局部世界坐标 A、C、D 已事先测量得到，角点的图像坐标 a、b、c、d 可通过图像处理获得，利用上式即可求出光平面上 B 点的局部世界坐标，在图 3 上可获取 8 个标定特征点。

从上述所建立的若干共面靶标局部世界坐标系选出一个作为全局世界坐标系，以参考摄像机的摄像机坐标系为中介，将其他局部世界坐标系的光平面标定特征点的坐标转换为全局世界坐标系下坐标。在全局世界坐标系下，拟合光平面标定特征点，求出光平面方程，最终确定光平面与参考摄像机的位置关系。图 4 为本系统光平面拟合图，共取 18 幅不同位置的共面靶标与光平面相交图像，共 139 个标定特征点，取第 18 幅图像中的共面靶标的局部世界坐标系为全局世界坐标系，光平面的拟合误差小于 0.1 mm。

取共面靶标与光平面相交图像时，标定特征点应在光平面测量区域获取，以提高系统测量精度。

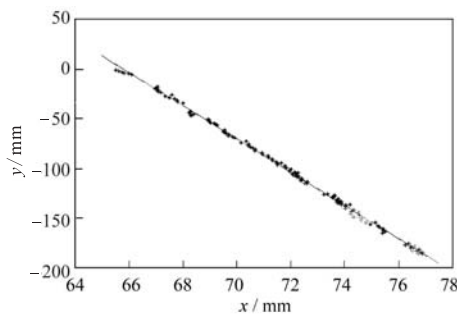


图 4 拟合光平面

Fig. 4 Fitting optical plane

1.4 参考摄像机的像平面坐标系到光平面测量坐标系的转换

设参考摄像机以像素为单位的像平面坐标为 $m = [u, v, 1]^T$ ，规一化图像坐标为 $\tilde{m}_d = [x_d, y_d, 1]^T$ ，经畸

变校正后的规一化图像坐标为 $\tilde{m}_n = [x_n, y_n, 1]^T$ ，摄像机坐标为 $M_c = [X_c, Y_c, Z_c]^T$ ，全局世界坐标为 $M_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$ ，光平面测量坐标为 $M_s = [X_s, Y_s, Z_s]^T$ ， R_c 和 T_c 分别为全局世界坐标系向摄像机坐标系转换的旋转矩阵和平移向量， R_s 和 T_s 分别为全局世界坐标系向光平面测量坐标系转换的旋转矩阵和平移向量，则可建立下列表达式：

$$\tilde{m}_d = A^{-1}m \tag{1}$$

式中 A 为摄像机内部参数矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

本系统使用 8mm 镜头，在只考虑径向畸变情况下，畸变校正公式为

$$\begin{bmatrix} x_d \\ y_d \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中 $r^2 = x_n^2 + y_n^2$ 。

摄像机坐标为

$$M_c = Z_c \tilde{m}_n \tag{3}$$

$$M_c = R_c M_w + T_c \tag{4}$$

光平面在全局世界坐标系下平面方程为

$$c + n_1 X_w + n_2 Y_w + n_3 Z_w = 0 \tag{5}$$

联立式(1)–(5)，即可求出参考摄像机像平面坐标系到全局世界坐标系的转换关系。再根据式(6)将全局世界坐标系转换到光平面测量坐标系，完成参考摄像机的以像素为单位的图像坐标系到光平面测量坐标系的转换过程。

$$M_s = R_s M_w + T_s \tag{6}$$

1.5 标定非参考摄像机与参考摄像机的位置关系

两个摄像机之间的几何关系可用旋转矩阵 R 和平移向量 t 表示。

$$\begin{cases} R = R_1 R_2^{-1} \\ t = t_1 - R_1 R_2^{-1} t_2 \end{cases} \tag{7}$$

R_1, t_1 表示参考摄像机与世界坐标系之间的旋转矩阵和平移向量， R_2, t_2 表示非参考摄像机与世界坐标系之间的旋转矩阵和平移向量，将世界坐标系设在共面靶标上，对两个摄像机分别标定，得到 R_1, t_1 与 R_2, t_2 ，则 R 和 t 就可由式(7)求得，对所求解进行优化便可得到高精度的结果。

按上述原理分别计算 5 个非参考摄像机的摄像机坐标系与参考摄像机的摄像机坐标系的相对位置。在标定过程中，经常会遇到参考摄像机与非参考摄像机没有公共视野范围，或在公共视野范围取图效

果不理想的情况,这时可挑选中介摄像机应用本节方法间接标定非参考摄像机与参考摄像机的位置关系.

1.6 非参考摄像机的像平面坐标系到光平面测量坐标系的转换

设全局世界坐标为 $M_w = [X_w, Y_w, Z_w]^T$, 光平面测量坐标为 $M_s = [X_s, Y_s, Z_s]^T$, 参考摄像机坐标为 $M_{CM} = [X_{CM}, Y_{CM}, Z_{CM}]^T$, 第 i 个非参考摄像机的以像素为单位的图像坐标为 $m_i = [u_i, v_i, 1]^T$, 规一化图像坐标为 $\tilde{m}_{di} = [x_{di}, y_{di}, 1]^T$, 经畸变校正后的规一化图像坐标为 $\tilde{m}_{ni} = [x_{ni}, y_{ni}, 1]^T$, 摄像机坐标为 $M_{Ci} = [X_{Ci}, Y_{Ci}, Z_{Ci}]^T$, ($i=1, \dots, 5$), R_{CW} 和 T_{CW} 为全局世界坐标系向参考摄像机的摄像机坐标系转换的旋转矩阵和平移向量, R_{Ci} 和 T_{Ci} 为第 i 个非参考摄像机的摄像机坐标系向参考摄像机的摄像机坐标系转换的旋转矩阵和平移向量, 则可建立下列表达式:

$$\tilde{m}_{di} = A_i^{-1} m_i \quad (8)$$

式中 A_i^{-1} 为第 i 个非参考摄像机内部参数矩阵.

畸变校正如下:

$$\begin{bmatrix} x_{di} \\ y_{di} \end{bmatrix} = (1 + k_{i1} r_i^2 + k_{i2} r_i^4) \begin{bmatrix} x_{ni} \\ y_{ni} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $r_i^2 = x_{ni}^2 + y_{ni}^2$.

$$M_{Ci} = Z_{Ci} \tilde{m}_{ni} \quad (10)$$

$$M_{CM} = R_{Ci} M_{Ci} + T_{Ci} \quad (11)$$

$$M_{CM} = R_{CW} M_w + T_{CW} \quad (12)$$

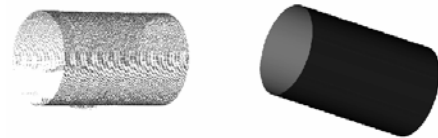
联立(5)、(8)、(9)、(10)、(11)、(12)式,即可求出非参考摄像机图像坐标系到全局世界坐标系的转换关系,再根据式(6)将全局世界坐标系转换到光平面测量坐标系,完成非参考摄像机的以像素为单位的图像坐标到光平面测量坐标系的转换过程.

2 实验及误差分析

为验证标定方法的正确性和有效性,从被测对象点云的拼接精度和形位精度两方面实验.

图5(a)是本系统测的直径为121 mm的标准圆柱体的点云,利用Imageware12的点云差异分析工具测得各像机的点云拼接偏差小于0.5 mm,利用Imageware12的FitCylinder构面工具将点云拟合成圆柱面,如图5(b),拟合后的圆柱面半径为60.418 5 mm.

图6是系统测的大卫头像点云,可以看到,原始点云数据重合性很好,并较好地解决了光条遮挡问题.



(a) 原始点云数据 (b) 拟合结果

图5 标准圆柱实验

Fig.5 Experiment of standard cylinder



图6 大卫头像点云

Fig.6 Point cloud of David's head

上述实验验证了本文提出的全局标定方法的有效性,所达到的精度能够满足本系统测量需要.实验中标定靶标的标定点世界坐标测量方法有待改善,目前标定点测量精度只有 0.5 mm 左右,提高靶标的制作精度和改进靶标特征点测量方法,会大大提高系统测量精度.

3 结论

本文提出了一种基于线结构光的多目视觉三维测量系统,并针对此系统提出了一种快速的现场标定方法,只需要一块共面靶标,不需要其他辅助设备,即可完成摄像机内部参数的标定,光平面特征标定点的自动获取,最终实现系统的全局标定,克服了传统全局标定方法硬件设备成本高,不适合快速现场标定的缺陷,为多目视觉测量系统提供了一种快速、低成本、而精度能够满足测量系统要求的标定手段,提高了基于线结构光的多目视觉三维测量系统的工程应用性.

参 考 文 献:

- [1] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 王岩松, 金 刚. 结构光深度测量系统中测量盲区的判定[C]/第三届机器视觉技术及工业应用国际研讨会论文集. 北京: 科学出版社, 2006: 43—48.
- [3] Z Zhang. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22 (11): 1330—1334.

(下转第68页)