

文章编号: 1001-3806(2005)03-0225-03

多个线结构光传感器三维测量系统的校准

张启灿, 苏显渝*, 邹小平
(四川大学 光电科学技术系, 成都 610064)

摘要: 提出了一种 3 个激光线结构光传感器测量系统的校准方法。该方法避免了对测量系统结构参数的繁琐标定, 只需对特殊设计的模块进行一次测量就能得到系统的校准参数, 从而快速有效地实现 CCD 像面坐标向世界空间坐标的转换。实验证明, 在 100mm 测量范围内能获得 0.05mm 的空间定位精度, 并能有效地抑止光源散斑噪声对激光三角法测量精度的影响。这一方法已经在多传感三维测量系统得到很好的应用。

关键词: 三维测量; 线结构光传感器; 系统校准; 散斑
中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A

Calibration of 3-D measurement system using multi-sensor with line structured-illuminated laser

ZHANG Qi-can, SU Xian-yu, ZOU Xiaoping
(Department of Optoelectronics, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract An easy and accurate method of system calibrating the 3-D optical multi-sensor profilometry with line structured illuminated laser was proposed. This method can efficiently and fast carry out the transformation between CCD pixel coordinate and world coordinate while required only one measurement for the special model. Furthermore, it avoids the multifarious survey of the system parameters. As proved by experiments, the present method can effectively restrain the influence of speckle to the laser triangular measurement system and obtain calibration accuracy of about 0.05mm within 100mm depth range.

Key words 3-D measurement; line structured-light sensor; system calibration; speckle

引 言

光学三维传感在机器视觉、实物仿形、工业检测、生物医学等领域具有重要意义和广泛的应用前景^[1-2]。其中采用结构照明的主动光学三维传感具有较高的测量精度, 故大多数实用的三维面形测量仪器都采用该方法。按照所投影照明结构光的不同, 主动三维传感又可分为点结构、线结构和面结构传感方式。

线结构光传感器是将线光源投影到被测物体的表面, 被测物体的表面对线结构光产生空间调制, 从另一个方向观察由物体表面的不同高度对这一结构光产生调制形成的变形光线, 通过分析这一变形的结构光的信息就可以解调出物体的表面形貌^[3-4]。

多线结构光传感器三维测量系统采用多个线结构光传感器, 从不同方向实现对复杂物体三维表面的测量。对它的校准是整个三维测量中的一个重要环节,

将会最终直接影响到测量的精度^[4-6]。

目前, 光学成像系统参数校准的方法中, 比较常见的两种是: (1) 基于特征点的匹配校准^[7]。这类方法采用带有很多特征点的校准板作为校准的依据。在对系统进行准时时, 先将这种校准板放置在一些特定位置, 通过分析这些位置上所获得的图像信息, 应用特征点的像面位置以及它所对应的世界空间坐标的关系, 将相邻的 4 个或更多的特征点作为拟合曲线的控制点, 通过选择不同的拟合算法就可以得到它们之间的映射关系。(2) 基于特征模块的校准。现有的基于特征模块的校准方法中, 大多是基于斜面模型^[6-8], 或者齿形模型^[9]对传感器的结构参数进行校准。这些方法均适用于单传感器系统的校准工作中, 对于具有多传感器的测量系统, 还需要同时考虑各个传感器的相互位置关系和数据融合。

作者提出了一种多传感器系统的同时校准方法, 用到由 3 个激光线结构光传感器组成的测量系统中。特殊设计的校准模块包含了 3 个带有平行切槽的阶梯结构, 可以对被测物体的 3 个侧面进行一次性同步测量和校准, 实验证明该方法快速有效, 有较高的校准精度, 并能较好地抑制散斑噪声的影响^[10]。

基金项目: 国家自然科学基金与中国工程物理研究院联合基金资助项目 (10376018)

作者简介: 张启灿 (1974), 男, 博士研究生, 主要从事光学三维传感、动态过程三维测量和相位展开研究。

* 通讯联系人。E-mail: xys@emil.scu.edu.cn

收稿日期: 2004-05-10 收到修改稿日期: 2004-07-22

1 基本原理

线结构光(又称光刀)测量系统是在传统光学三角测量基础上发展起来的。激光光束沿投影光轴垂直投射到物体表面,在另一个方向上,由物体面形引起光刀像中心的偏移被探测器(一般采用 CCD 摄像机)接受,并按照三角测量原理获得剖面数据,通过附加的一维扫描可以得到物体的三维面形分布^[4~6]。

为了得到被测面形的数据,就要先测出光刀像点的偏移量,即必须精确地确定光带分布中心位置。确定光带分布中心有多种算法,例如极值法、阈值法、重心法、曲线拟合法等等。为了处理好精度与速度的矛盾,所选择的处理方案通常包括:(1)确定采样窗口,多帧平均;(2)确定光带峰值位置,以其为中心确定一个浮动小窗口作二维卷积滤波;(3)采用阈值法与重心法相结合确定光束中心位置。获得准确的像点中心位置后,就可以对应计算出物体的高度值。

为了获取像点中心到物体高度转化过程中所需的系统参数,可以通过对它们进行标定来解决,但整个标定过程繁琐而且要求部分系统参数已知为前提。作者设计了一个特征模块,可以不关心系统参数的变化环境,只需对特征模块进行一次测量,便可建立多个传感器的 CCD 像面坐标 (x, y) 和世界空间坐标 (X, Y, Z) 之间的映射关系。这样,当在获知 CCD 像面中一个数据点的像面坐标后,可以通过已经建立的映射关系快速地查找出该点对应的世界空间坐标。

2 校准方法

特殊设计的校准模块如图 1 所示,该模块整体由 3 个相互旋转 90° 的阶梯靶标组成。每个阶梯靶标上带有 5 级台阶和 7 条平行的切槽,用于标识每个台面上的 35 个特征位置。

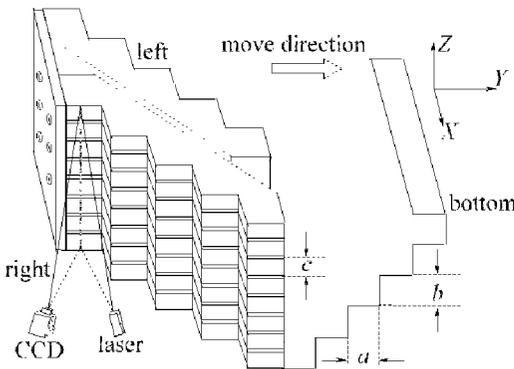


Fig 1 Sketch map for system calibration

图 1 中还描述了校准特征模块在多个线结构光传感器测量系统中实际应用情况。它的 3 个阶梯特征面(如图中所标注的 left right bottom)分别用来对 3 个线结构光传感器系统中成 T 字型排列的左、右、底 3 个

侧面的投影和成像系统进行校准。校准模块每一面上 5 个台阶的阶高均为 b , 阶面宽均为 a , 每个阶面上 7 条开槽两两之间的中心间距均为 c , 这 3 个模块特征参量均是由精密加工保证的已知量,其加工误差为 0.01mm 。在校准过程中,3 路投影和成像系统由平移系统带动沿图 1 中所示的方向移动扫描整个特征模块,投影系统将片光投射在同侧的模块台阶平面上,在每一个台阶面上形成一系列不连续的光刀像(光刀在开槽处因为投射到槽底而形成 7 个断点),该光刀像被同一侧的成像系统 CCD 所接收。CCD 拍摄到的光刀图像如图 2 所示,其中断线部分对应于模块中的切槽位置。

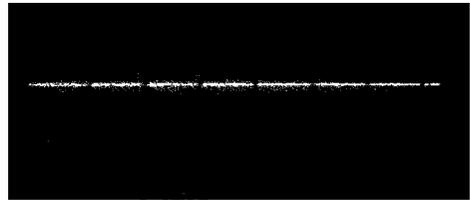


Fig 2 Image of knife light captured by CCD

激光光刀在同一个台阶面上留下的多个痕迹在 CCD 中的成像宏观上是完全一样的,相当于在同一棱线上呈现的图像。采用多帧退相关的散斑图像平均方法对同一台阶面上的多帧光刀像进行处理,从而最大程度地抑制包含在表征每个阶面信息的光刀像中的激光散斑,降低激光散斑对测量精度的影响。

这样,每个面上都将获得表征阶梯结构信息的 35 个断线特征点。用 (X_{mn}, Y_{mn}, Z_{mn}) 表示第 m 个台面第 n 个切槽的世界空间坐标,用 (x_{mn}, y_{mn}) 表示该点在 CCD 上的像面坐标位置。如图 1 中坐标所示,在 3 个侧面上, m 沿 Y 坐标从左到右分别标记为 1 2 3 4 5,而 n 在左右两个侧面上沿 Z 坐标从下到上,在底面上沿 x 坐标从左到右依次标记为 1 2 3 4 5 6 7。

于是,对于 CCD 像面上的一点,其世界空间坐标中的 Y_{mn} 由平移设备的当前位置决定, X_{mn} 和 Z_{mn} 由下式可以得出:

$$\begin{cases} X_{mn} = mb \\ Z_{mn} = nc \end{cases} \quad (1)$$

截取拍摄图像中光刀像的有效区域,求取其列方向的

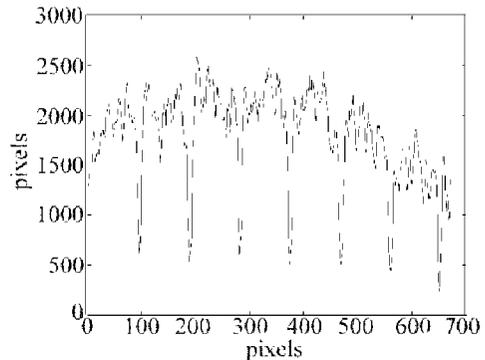


Fig 3 Energy distribution in column of knife light

能量分布,可以得到如图 3 的能量分布图,其能量最低点恰好表征了切槽特征点的位置,利用权重平均可以精确地确定出特征点的位置 x ,再利用最小二乘法拟合出光刀重心曲线的解析式 $y=f(x)$,便可确定出每一个光刀断线位置 $(x, f(x))$ 。

对于每一个侧面,校准模块有 5 个台阶、7 个切槽。校准过程中得到的 35 个特征点可以认为在空间上处于同一平面。根据几何光学,空间上为平面的物体由于像差、畸变等因素的影响,CCD 像面坐标 (x, y) 与世界空间坐标 (X, Y, Z) 的映射关系并不是线性的。因此,必须将这 35 个特征点构成的面再按照曲面来进行拟合。

采用求解线性最小二乘问题的豪斯荷尔德 (Householder) 变换法^[11]拟合曲面可表示为:

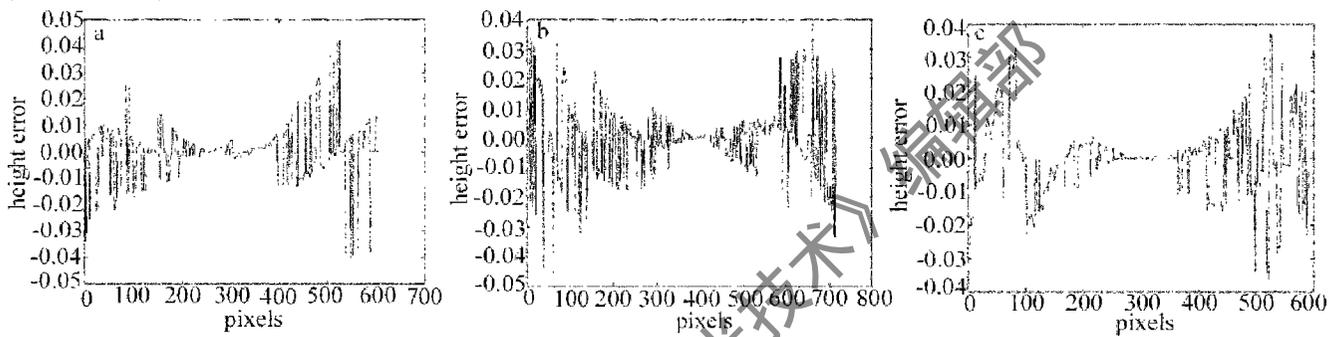


Fig 4 a—error distribution along X-axis in left side b—error distribution along Z-axis in bottom c—error distribution along X-axis in right side

分别描述了相应侧面在深度测量方向上的误差分布。其中沿底面深度测量方向 (Z) 最大残差为 0.0464, 均方差为 0.0117; 沿左侧面深度测量方向 (X) 最大残差为 0.0421, 均方差为 0.0098; 沿右侧面深度测量方向 (X) 最大残差为 0.0373, 均方差为 0.0113。由此可见,这种校准方法具有较高的校准精度。

使用本文中所提及的标准模块对多传感器系统进行一次性校准并获得映射关系后,分别对一个矩形盒和鞋楦体进行了测量,其重建的三维数字化结果如图 5 所示。

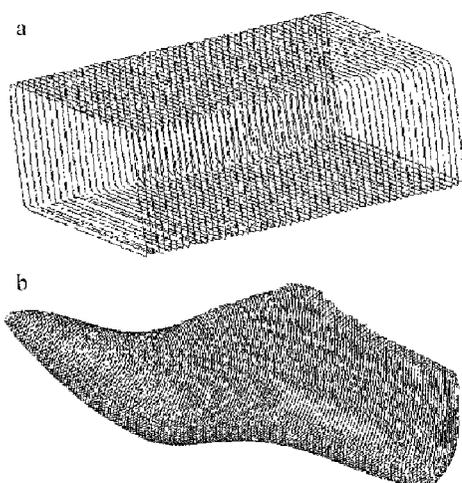


Fig 5 a—restored 3-D shape of rectangle box b—restored 3-D shape of last

$$\begin{cases} X = \sum_{s=0}^r \sum_{i=0}^s a_{i(s-i+1)} x^{s-i} y^i \\ Z = \sum_{s=0}^r \sum_{i=0}^s b_{i(s-i+1)} x^{s-i} y^i \end{cases} \quad (2)$$

式中, r 表曲面拟合阶数, $s=0, 1, \dots, r$ 。对于 r 阶拟合多项式曲面有 $(r+1)(r+2)/2$ 个待定系数,由 $(r+1)(r+2)/2 \leq 35$ 关系式决定了最大拟合阶数为 6 阶。

3 映射曲面及精度评估

有了上述映射关系后,一旦获得像面上一点的 (x, y) 坐标,便可由上述映射关系的解析式很快得到该点对应的空间坐标。采用上述映射关系,对校准模块的 3 个侧面都进行了重建,图 4 中的 3 个子图

4 小结

在采用多个线结构光传感器的三维测量系统中,系统校准是一个重要的步骤,其校准难易程度、校准精度都直接影响下一步的测量。提出了一种采用特殊特征模块对 3 个激光线结构光传感器系统的校准方法,通过对特殊设计的模块进行一次测量,建立 3 个侧面共 6 个映射曲面,便可快速有效地实现像面坐标到空间坐标的转换。经实验验证,所提出的校准方法有较高的校准精度。

本文中所提及的校准方法已经成功运用在所开发的测量系统中,取得了良好的实验和应用结果,该方法具有以下优点:

(1) 校准同步性。在模块校准过程中,由 3 个相互旋转 90 度阶梯靶标组成的模块分别对应被测物体的左、底、右 3 个侧面。一次测量可以同时校准 3 个侧面,并保证了 3 个侧面之间的相对位置关系。

(2) 校准独立性。在校准过程中,3 个侧面各有一套成像系统,每一套子系统都是独立地建立起其 CCD 像面坐标和世界空间坐标之间的映射关系。由于实际测量过程中,光刀截面的位置都是由步进电机当前的位置决定,所以每次校准时只需要校准空间坐

(下转第 232 页)

η 分别为 0.8、0.55、0.4 可见随着振动频率的递增,补偿效果是逐渐下降的。

在振动补偿系统设计和实验中可以得出如下结论,在光学系统参数不变的情况下影响补偿效果的因素有两个,振动探测器 CCD 的采样率和精瞄镜的谐振频率。由于本次采用的 CCD 探测器采样率较低,所以当频率在 30Hz 时虽然补偿效果明显,但是输出并不令人满意。这是由于振动探测器采样频率较低,不能完全探测振动造成的。可见,提高探测器的采样率会提高补偿效果,而增加精瞄镜的谐振频率则能够提高补偿振动频谱带宽,这些措施都会对进一步提高补偿效果提供帮助。

5 结 论

卫星光通信中卫星平台的振动导致光束在接收端抖动,从而增大误码率。为了降低平台振动对通信链路的影响,对卫星平台振动产生的原因进行了总结和分析,找出关于卫星平台振动的规律,并针对低频振动建立了振动补偿系统。实验结果表明,振动补偿系统可以对影响激光通信链路最为严重的低频高幅值振动有很好的补偿效果,补偿了大约 80% 的振动,可见振动补偿系统效果是明显的。但是由于模拟实验中所用器件精度的限制,补偿效果还不十分理想,下一步将继续改进系统,提高补偿效果。

(上接第 227 页)

标中 X, Z 方向和像面坐标 (x, y) 的关系,而这个关系与 Y 无关,避免了 Y 方向步进不准造成的误差传递。

(3) 校准过程简单,对硬件要求低。该方法采用空间上严格平行的切槽结构,大大方便了特征位置的寻找,采用台阶状结构,不必要求步进电机严格等距平移。

(4) 数据处理量小,获取空间坐标速度快。由于像面坐标与空间坐标是通过解析式的形式给出。因此校准结果存储量小,知道像面坐标后通过解析式便可快速地得到世界空间坐标。

参 考 文 献

- [1] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods [J]. *Opt Engng* 2000, 39 (1): 10~22
- [2] SU X Y, CHEN W J. Fourier transform profilometry: a review [J]. *Opt & Lasers in Engng* 2001, 35 (5): 263~284

参 考 文 献

- [1] SCOTT P W, YOUNG P W. Impact of temporal fluctuations of signal to noise ratio on free space laser communication system design [J]. *Proc SPIE*, 1986, 616: 174~181
- [2] SKORM N V A, BUSCH T E, TASCILLOM A. Feedforward compensation of bending modes in high performance optical mirrors [J]. *SPIE*, 1995, 2381: 215~226
- [3] SKORM N V A, TASCILLOM A, BUSCH T E. Demonstration of a jitter rejection technique for free space laser communication [J]. *IEEE Trans Commun*, 1997, 33 (2): 568~576
- [4] ARNON S, KOLEKA N S. Laser satellite communication network vibration effect and possible solutions [J]. *Proc IEEE*, 1997, 85 (10): 1646~1661.
- [5] ARNON S, ROTMAN S, KOLEKA N S. Beamwidth and transmitter power adaptive to tracking system performance for free space optical communication [J]. *SPIE*, 1996, 2810: 176~187
- [6] TOYOSHIMA M, ARAKIKI. In-orbit measurements of short term attitude and vibrational environment on the engineering test satellite V using laser communication equipment [J]. *Opt Engng* 2001, 40 (5): 827~832
- [7] SUDEY J, SCUIMAN J R. In-orbit measurements of landsat-4 thematic mapper dynamic disturbances [A]. 35th Congress of the International Astronautical Federation [C]. Lausanne: IAF, 1984: 117.
- [8] LEE S, ALEXANDER J W, JEGANATHAN M. Pointing and tracking subsystem design for optical communications link between the international space station and ground [J]. *Proc SPIE*, 2000, 3932: 150~157
- [9] WITTE G M, van HOLTZ L, TUNBRIDGE D E L *et al*. In-orbit measurements of microaccelerations of ESA's communication satellite OLYMPUS [J]. *Proc SPIE*, 1990, 1218: 205~214
- [3] 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
- [4] 贾波,苏显渝,郭履容. 采用激光光刀的叶片三维测量方法 [J]. *中国激光*, 1992, 19(4): 271~275
- [5] 苏显渝,李杰林,李继陶. 激光片光三维传感中降低散斑影响的新方法 [J]. *光学学报*, 1997, 17(2): 211~215.
- [6] 李万松,苏显渝. 激光光线三维传感的直接映射方法 [J]. *光学学报*, 1997, 17(4): 447~451.
- [7] JHNHE B, HAUBECKER H, GEBLER P. Handbook of computer vision and applications [M]. Santiago de Cuba: Academic Press, 1999: 450~455
- [8] H USLER G, SCHNFELD H, STOCKINGER E. Kalibrierung von optischen 3D-sensoren [J]. *Optik* 1996, 10(3): 93~100
- [9] 刘凤梅,段发阶,叶声华. 利用齿形靶标定线结构光传感器结构参数的新方法 [J]. *计量技术*, 1999(7): 3~6
- [10] 邹小平,苏显渝,张启灿. 激光片光三维传感中提高深度分辨率的方法 [J]. *激光技术*, 2004, 28(2): 196~198
- [11] 徐士良. C 算法程序集 [M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 1996: 27~29.