

一种多线结构光测头的误差补偿方法

刘保华, 李兵, 崔希君, 蒋庄德

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对在多线结构光测量系统中光平面不等距和不平行引起测量误差的问题, 提出了一种基于标准三角块的误差补偿方法. 通过分析测量误差产生的原因, 建立了光平面平行度、光平面间距与测量误差之间关系的数学模型, 将测头产生的结构光条投射到一个标准三角块斜面上, 利用三角块斜面的几何变换能力将光平面平行度、光平面间距的信息转换到系统可以进行精确测量的光平面当中. 通过 CCD 采集和数学计算, 可以得到准确的各光平面平行度和光平面间距的误差数据, 并根据得到的误差数据对测得的原始数据进行补偿修正, 由实验证明了该方法在对阵列式多线结构光测头结构误差补偿后, 测量得到的数据精度可以提高约 40%.

关键词: 多线结构光; 误差补偿; 测头

中图分类号: TH241 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)01-0050-05

Errors Compensation Method for Multi-Linear Structured Light Sensor

Liu Baohua, Li Bing, Cui Xijun, Jiang Zhuangde

(State Key Laboratory of Mechanism Manufacture System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the errors due to un-equivalence and un-parallelism of light planes in the measuring system, an errors compensation method based on triangular standard piece is presented. Analyzing the error origin, the mathematical models of relationships of measuring errors with un-equivalence and un-parallelism of light planes are established, and the structured light stripes are projected on the slope of a triangular standard piece, the informations of un-equivalence and un-parallelism of light planes are converted into the light plane where the measuring system can measure accurately utilizing the ability of geometric conversion of slope of the triangular standard piece, the error data of un-equivalence and un-parallelism of light planes are obtained by CCD capture and mathematical calculation, and the measuring data are compensated according to the measured error data. An experiment verifies that the measuring accuracy can be improved by 40% as the structural errors of multi-linear structured light probe are compensated with the presented method.

Keywords: multi-linear structured light; error compensation; sensor

多线结构光(多光刀)测量方法是从单线结构光测量方法上发展起来的一种新的测量方法. 它利用多条光刀对物体表面进行扫描, 而扫描行程只有单线结构光测量系统扫描行程的 $1/N$ (N 为光刀的数量), 因此它的测量速度要快于单线结构光的测量速度, 但同时也大大增加了实现的复杂性和难度, 其中

之一就是多光刀测头传感器的实现, 以及测头对系统引入的测量误差.

1 多线结构光的测头结构

在通常情况下, 要严格满足测头传感器形成的多光刀的条件为: ①所有光平面彼此之间相互平

行;②任意相邻2个光平面之间的距离相等。

这2个条件是保证系统精确测量的前提,尤其是条件①。目前,形成多光刀的方案大约有3种^[1]:基于激光器阵列、高速振镜和半透镜阵列的方案,其中基于激光器阵列的方案是最可靠并最容易实现的。图1是实现这种方案的结构示意图,图中激光器与固定支架上的固定槽内壁之间留有一些少量的间隙,激光器的固定和位置调整是由固定槽壁上的2个微调螺钉来完成的,柱面镜负责将点光源展成线光源,所有的安装和调整工作均由手工来完成。这样人为地在 x 、 y 方向上引入的装调误差可接近0.3~0.5 mm,使得测头产生的多光刀不能严格满足前面的2个条件,因此有必要针对这种误差进行分析并加以补偿^[2-6]。

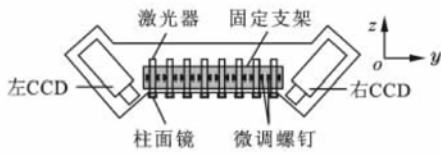


图1 基于激光器阵列的测头传感器

2 误差成因分析

2.1 理想条件下的数据采集

假定系统建立在右手坐标系中,扫描方向为 y 方向,测头的 N 条光刀按顺序从左沿 y 方向到右依次为 $0 \sim N-1$,因此由第 j ($j=0 \sim N-1$)条光刀扫描采集出来的数据点集为

$$A_j = \{u, y, v\}_j \quad (1)$$

式中: u 是采集的图像中的列坐标; v 是采集的图像中的行坐标; j 的范围是 $0 \sim N-1$ 。

在理想情况下(没有光刀位置误差和标定误差等系统误差),将 A_j 进行重构得到数据点集

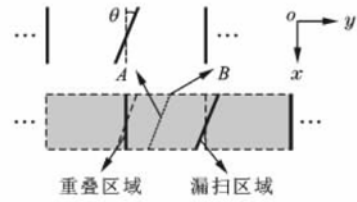
$$B_j = \{x, y, z\}_j \quad (2)$$

假设各个相邻光刀的间距 δ_j 相同,均为 δ ,按照各光刀的排列,可将各 B_j 合并形成整个数据集

$$T = \bigcup_{j=0}^{N-1} B_j = \bigcup_{j=0}^{N-1} \{x, y + j\delta, z\}_j \quad (3)$$

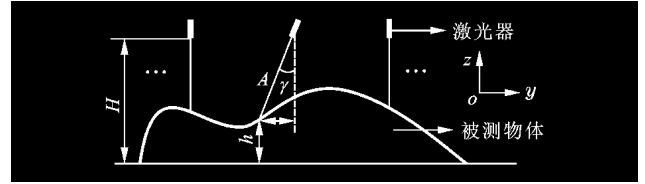
2.2 光平面相互不平行的情况

光平面相互不平行有2种情况:①与 x 轴不平行,如图2所示;②与 z 轴不平行,如图3所示。在这2种情况下扫描被测物体会出现部分区域遗漏扫描和坐标偏移的情况,对于区域漏扫的问题,可以通过选择较大的扫描行程进行冗余扫描,对于坐标偏移的情况,则要根据不同的情况进行修正。图2为了说



θ :光刀相对于 x 轴的倾斜角; A 、 B :同一扫描位置上的不同2点

图2 光平面与 x 轴不平行形成的误差



γ :光刀相对于 z 轴的倾斜角; H :激光器相对于基准台面的高度; A :某扫描点; h :A点的高度

图3 光平面与 z 轴不平行形成的误差

明坐标偏移的情况,特意画出了在同一扫描线位置上的 A 和 B 点,它们的扫描坐标 y 是相同的,但是由于光刀的倾斜,使得它们实际的 y 坐标并不相同且之间有 $x \tan \theta$ 的位移误差。由图2可以得到在光平面与 x 轴成 θ 角情况下的表达式

$$C_j = \{x, y + x \tan \theta_j, z\}_j \quad (4)$$

同样,也可以由图3得到光平面与 z 轴成 γ 角度时的表达式

$$D_j = \{x, y - (d - z) \tan \gamma_j, z\}_j \quad (5)$$

式中: d 为激光器出光口位置与测量基准面的垂直距离。

2.3 光平面间不等距的情况

如果存在某2个相邻光平面的间距不相等的情况,就有可能出现漏扫的情况,因此需要选择一个合适的 δ 进行冗余扫描。为了兼顾精度与效率,应选择略大于最大间距的一个值作为扫描间距

$$\delta_{\max} = \max\{\delta_j \mid j=1 \sim N-1\} + (1 \sim 2) \quad (6)$$

由于这些误差是相互独立的,因此综合式(3)~式(6)可以得到误差修正表达式

$$T' = \bigcup_{j=0}^{N-1} \{x, (y + j\delta_{\max} + x \tan \theta_j - (d - z) \tan \gamma_j), z\}_j \quad (7)$$

2.4 平行度误差影响分析

将式(7)中的 y 坐标分别对 θ 和 γ 进行偏微分,得到

$$\partial y = x \sec \theta_j \partial \theta_j + (z - d) \sec \gamma_j \partial \gamma_j \quad (8)$$

由式(8)可知,被测物体在 y 方向的坐标会受到光平面不平行误差的影响,尤其是在 x 值较大和 z 值较小的地方,也就是在测量范围的边界处和距传感器较远的地方测量误差会比较大。

3 误差测定

为了能利用式(7)实现误差补偿,必须知道各个光平面的 δ 、 θ 和 γ ,但这 3 个量一般很难用直接的方法进行测量,因此本文提出了一个基于标准三角块的方法来实现对这 3 个量的测量。利用三角块斜面在空间上的几何变换能力,当光刀投射到标准三角块的斜面上时,光刀在水平方向上的位置误差就能被转换到垂直的光平面中;转换后的误差信息被 CCD 捕捉到后利用图像处理算法计算处理,并根据系统的标定系数及方程反算得到。下面,分别详细说明利用本文方法对这 3 个量的测量原理。

(1)测量光平面与 x 轴的夹角 θ_j (见图 4)。为了方便讨论,图 4 中仅画出了 2 条光刀,分别是第 $(j-1)$ 和第 j 条光刀,它们投射到标准三角块斜面上并与斜面两边分别交于 A 、 B 点和 C 、 D 点;放置标准三角块时,使它的垂直矩形面与坐标 xoz 面平行,过 C 点在斜面上作与垂直矩形面平行的直线 CE ,这 5 点在水平面上的投影分别为 A' 、 B' 、 C' 、 D' 和 E' 点。 θ_j 即是 $\angle D'C'E'$,可以通过下式计算得到

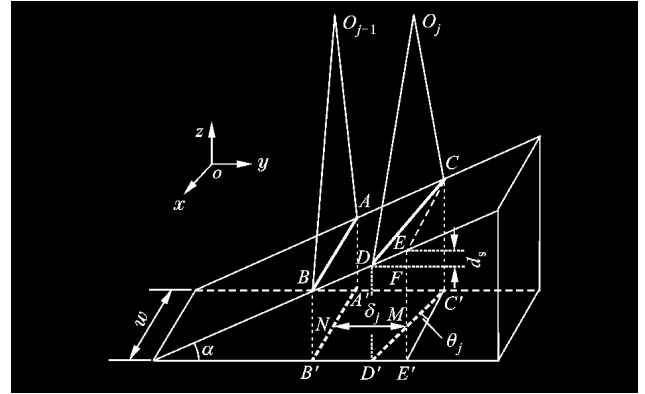
$$\operatorname{tg}(\theta_j) = \frac{D'E'}{C'E'} = \frac{DF}{w} = \frac{EF \cot \alpha}{w} = \frac{d_s \cot \alpha}{w} \quad (9)$$

式中: w 是标准三角块斜面的宽度; α 是标准三角块的斜面与水平面的夹角; d_s 则是 C 、 D 点在垂直方向上即 EF 间的距离。

(2)测量光平面与 x 轴的夹角 γ_j ,为了方便说明原理,假定第 j 个光平面只存在 γ_j 的误差,如图 5 所示。首先,将测头沿 z 方向分别移动到 2 个不同的位置上进行采集测量,这 2 个测量位置上的垂直差为 d_u ,光平面与三角标准块斜面交线的中心点分别为 G 和 K ,它们相对于测量平台的垂直高度分别为 z_G 和 z_K ,二者的垂直高度差为 d_v ,水平位置差为 m ,此时光平面与 z 轴的夹角 γ_j 即为

$$\operatorname{tg} \gamma_j = \frac{d_u + z_G - z_K}{m} = \frac{d_u + z_G - z_K}{(z_K - z_G) \operatorname{tg} \alpha} = \frac{d_u - d_v}{d_v \operatorname{tg} \alpha} \quad (10)$$

(3)测量光刀的间距。由于光平面的倾斜,在不同的高度及位置上,相邻光刀或光平面的间距是不同的,而测量 δ_j 是为了给扫描间距提供参考(见式



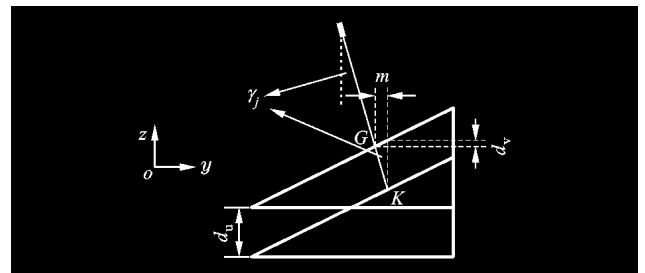
O_j :第 j 条激光光源的出瞳点; $A \sim D$:光平面与标准三角块斜面的交点; $A' \sim D'$: $A \sim D$ 点在基准面的投影; E, E' :过 C 点作与 AB 平行的线交于标准三角块斜面的点及其在基准面上的投影; θ_j :第 j 个光平面相对于 x 轴的倾斜角

图 4 用标准三角块测量 θ_j 的原理图

(6)). 考虑到一般 θ_j 和 γ_j 都很小,因此可以在任一高度上利用标准三角块来测量。如图 4 所示,第 $(j-1)$ 和第 j 条光刀或光平面与标准三角块斜面交线的投影线段 $A'B'$ 和 $C'D'$ 的中心点 M 、 N 之间的光刀间距,即

$$\delta_j = MN = \frac{A'C' + B'D'}{2} = \frac{(d_p + d_q) \cot \alpha}{2} \quad (11)$$

式中: d_p 为 A 、 C 点在垂直方向的距离; d_q 为 B 、 D 两点在垂直方向的距离。



γ_j :第 j 个光平面相对于 x 轴的倾斜角; d_u :2 个不同测量位置的垂直高度差; G, K :光平面在 2 个测量位置上与标准三角块斜面交线的中心点; d_v :斜面上 2 个交线的中心点的垂直高度差

图 5 用标准三角块测量 γ_j 的原理图

4 测量误差的影响分析

对式(9)和式(10)进行误差特性分析后,分别得到

$$\partial \theta = \frac{w \cot \alpha \partial d_s - d_s \cot \alpha \partial w - d_s w \csc^2 \alpha \partial \alpha}{w^2 + d_s^2 \cot^2 \alpha} \quad (12)$$

$$\partial\gamma = \frac{d_v \operatorname{tg}\alpha \partial d_u - d_u \operatorname{tg}\alpha \partial d_v - d_v(d_u - d_v) \sec^2\alpha \partial\alpha}{(d_u - d_v)^2 + d_v^2 \operatorname{tg}^2\alpha} \quad (13)$$

以实验采用的标准三角块为例, $\alpha = 30^\circ \pm 0.1^\circ$, $w = (35 \pm 0.02)$ mm, 其表面形状误差小于 0.02 mm. 假设 $d_s = 0.1$ mm, $d_u = 30$ mm, $d_v = 0.1$ mm, 可近似得到各个因素对测量结果的影响系数

$$\partial\theta \approx 0.049\partial d_s - 1.413e^{-4}\partial w - 0.011\partial\alpha \quad (14)$$

$$\partial\gamma \approx 1.92e^{-4}\partial d_u - 0.029\partial d_v - 4.45e^{-3}\partial\alpha \quad (15)$$

由式(5)可知, d_s 和 d_v 对误差的测量精度影响较大, 它们的精度是由系统在光平面的测量精度决定的, 一般情况下都在 0.01 mm 以内, 由此可见各个因素对误差角度 θ 和 γ 测量的精度影响是很小的.

5 测量实例

利用基于标准三角块的方法和标准三角块对一台多线结构光测量系统 ($N=8$) 的阵列式结构测头

进行了 10 次测量, 将采集处理后得到的部分测量结果列入表 1^[7], 用这些得到的误差数据按照式(6)和式(7)对一辆玩具车进行三维扫描测量与补偿, 最终得到了如图 6 所示的三维点云数据图. 其中, 激光源投射沿 z 逆方向, 扫描方向为 y 正方向. 将测量的结果与使用三坐标测量机 (CMM) 测量的结果进行对比, 在没有使用补偿方法时, 测量精度为 0.26 mm, 而使用了补偿方法后, 测量精度可达到 0.15 mm, 精度提高了约 40%.

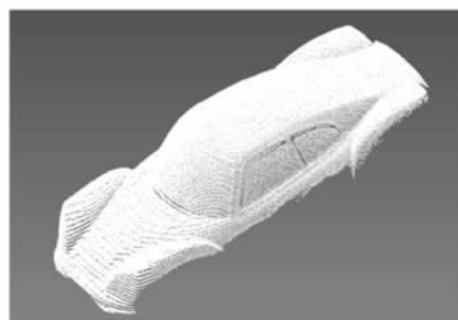


图6 玩具车模型的测量结果点云图

表1 多线结构光($N=8$)测头结构位置的误差实验数据

实验次数	第1光平面			第3光平面			第5光平面			第7光平面		
	δ_1/mm	$\theta_1/(\circ)$	$\gamma_1/(\circ)$	δ_3/mm	$\theta_3/(\circ)$	$\gamma_3/(\circ)$	δ_5/mm	$\theta_5/(\circ)$	$\gamma_5/(\circ)$	δ_7/mm	$\theta_7/(\circ)$	$\gamma_7/(\circ)$
1	20.51	0.36	0.32	20.37	0.21	0.14	20.58	-0.43	-0.45	19.66	0.22	-0.03
2	20.44	0.36	0.30	20.36	0.22	0.16	20.64	-0.40	-0.45	19.70	0.19	-0.05
3	20.43	0.34	0.32	20.41	0.21	0.15	20.64	-0.39	-0.40	19.68	0.20	0.01
4	20.53	0.37	0.31	20.30	0.25	0.15	20.57	-0.40	-0.46	19.71	0.20	-0.03
5	20.48	0.36	0.31	20.33	0.20	0.13	20.60	-0.41	-0.46	19.65	0.19	0.00
6	20.50	0.35	0.27	20.37	0.23	0.14	20.61	-0.38	-0.47	19.70	0.21	0.02
7	20.00	0.35	0.30	20.29	0.21	0.14	20.56	-0.40	-0.42	19.67	0.19	-0.01
8	20.46	0.33	0.31	20.35	0.24	0.17	20.60	-0.42	-0.44	19.67	0.23	-0.05
9	20.51	0.35	0.29	20.35	0.23	0.15	20.63	-0.43	-0.45	19.61	0.20	-0.02
10	20.49	0.36	0.30	20.39	0.22	0.13	20.58	-0.41	-0.41	19.65	0.20	-0.01
均值	20.44	0.35	0.30	20.35	0.22	0.15	20.60	-0.41	-0.44	19.67	0.20	-0.02
均方差	0.15	0.01	0.01	0.04	0.02	0.01	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02

6 结 论

本文提出的用于阵列式多线结构光测头的误差补偿方法, 能够消除由光刀间不平行和不等距引起的测量误差. 由于该方法仅仅借助于一个标准三角块来完成, 因此实现起来简单可靠, 得到的数据比较

准确, 但由于补偿中用到的误差公式是在基于阵列式结构的多线结构光测头, 以及视觉测量原理的前提下得出的, 因此该方法及补偿公式仅适用于结构误差较小的阵列式多线结构光测量系统的测头误差补偿.

参考文献:

- [1] 李兵, 罗意平, 王昭, 等. 多光刀三维轮廓快速测量方法研究[J]. 光子学报, 2003, 36(6): 738-741.
Li Bing, Luo Yiping, Wang Zhao, et al. Study on the rapid measuring method of multi light-knife for 3D profile[J]. Acta Phot Sinica, 2003, 32(6): 738-741.
- [2] 解则晓, 张成国, 张国雄. 线结构光测头的误差补偿[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(7): 667-670.
Xie Zexiao, Zhang Chengguo, Zhang Guoxiong. Error compensation for structured light sensors[J]. Chinese Journal Scientific Instrument, 2005, 26(7): 667-670.
- [3] Zhang Jianxin, Djordijevich A. Study on laser stripe sensor [J]. SENS ACTUA, 1999, 72(3): 224-228.
- [4] Boverie S, Devy M, Lerasle F. Comparison of structured light and stereovision sensors for new airbag generations [J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(12): 1413-1421.
- [5] Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun. Complete calibration of a structured light stripe vision sensor through planar target of unknown orientations [J]. Image Vision Computing, 2005, 23(1): 59-67.
- [6] Yang Zaiming, Wang Y H. Error analysis of 3D shape construction from structured lighting [J]. Pattern Recognition, 1996, 29(2): 189-206.
- [7] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 1995: 14-20.

(编辑 管咏梅)