

激光自动变位测量汽车三维形状的研究

王学军

(汽车管理学院 蚌埠 233011)

提要 介绍了一种将激光和 CCD 用于测量汽车等大型三维曲面形状的光学三角自动变位测量方法。分析了该测量方法的原理和过程。介绍了实验系统和测量实验,并给出了实测结果。较好地解决了测量精度与位移的关系。结果表明这种测量法具有一定的实用价值。

关键词 激光, 自动变位测量, 汽车, 三维形状

1 引 言

汽车车身的研究设计制造技术是汽车工程中的重要组成部分,而汽车三维形状数据测量技术又是车身工程中的首要技术环节。虽然激光测量曲面位移的方法有多种,但是一般的光学三角法只适用于测量较小位移的一维曲面。对于测量汽车车身等较大位移的三维曲面形状,还是沿用三坐标机接触式测量法,但速度慢、效率低、测针易磨损,影响精度,测量过程难以实现自动化和智能化。为了解决这些问题,国内外都在研究把激光非接触测量法应用于大型三维曲面的测量,改进传统的接触式测量法,使曲面测量技术朝着光、机、电和计算机一体化的方向发展,为汽车 CAD/CAM (计算机辅助设计/计算机辅助制造, Computer Aided Design/Computer Aided Manufacture) 技术研制开发新产品快速准确地提供曲面形状数据,促进汽车工业的发展。

2 不垂直光学三角法测量一维曲面的位移

图 1(a) 为激光和 CCD 测量装置的结构示意图,左边是一个 He-Ne 小型激光器和光束聚焦准直镜头,右边是一个线阵 CCD 图像传感器和摄像机镜头。激光束垂直地投射到曲面上,并与镜头透镜主光轴相交成 α 角,其交点为 P_m 点。 Z_0 为基准平面,CCD 对曲面位移的最大可测范围是在 Z_0 到 Z_m 之间。当曲面处于 Z_0 位置时, P_0 点激光斑经透镜成像在 CCD 上光敏元的 b_0 点(设定 b_0 点某一相元为 CCD 左边极限成像位置)。当曲面升高到 Z_1 位置时,曲面上 P_1 点的光斑在光敏元的 b_1 点成像。当曲面继续升高到可测范围的最大位置 Z_m 时,曲面上 P_m 点光斑成像在光敏元的 b_m 点(设定 b_m 点某一相元为 CCD 右边极限成像位置)。CCD 上的光斑像点光敏元输出光电脉冲数信号到计算机,计算机通过有关数据采集计算等程序,计算出各处曲面的位移值。这就是一维曲面的位移测量。

为了使可测范围内曲面上的激光斑能够清晰地成像在 CCD 的光敏元上,像点光敏元位置

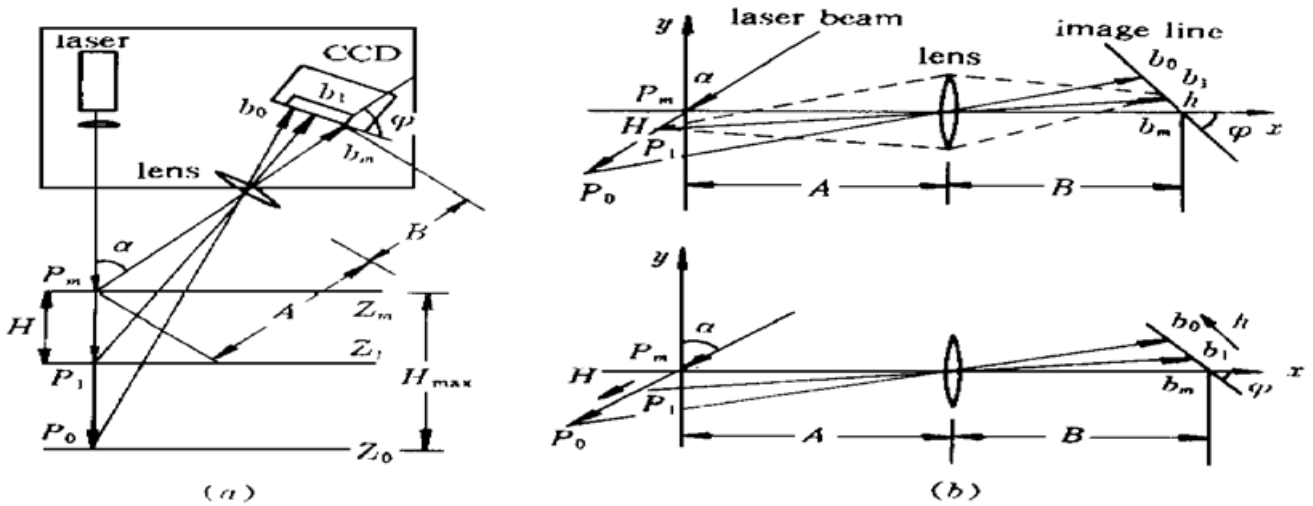


图 1 激光和 CCD 不垂直光学三角法测量一维曲面的位移

Fig. 1 A laser and CCD non-vertical optical trigonometry method of measuring 1-D position shifting

又能够精确地表示曲面的位置, 必须将线阵 CCD 放置在激光束经过透镜的共扼像线上。所以线阵 CCD 光敏元平面与透镜主光轴之间有一定的夹角 φ 。为了得到曲面上位移 H 与 CCD 上像点位移 h 之间的三角关系, 必须使激光器、CCD 和镜头三者之间有正确的几何位置关系, 如图 1(a), (b) 所示。激光束方程可表示为

$$y = x \cdot \text{tg}\alpha \tag{1}$$

设镜头的焦距为 f , 物距为 A , 像距为 B , 沿激光束方向曲面上的光斑点为 $P_1(x, y)$, 经透镜后的成像点为 $b_1(x', y')$ 。根据光学三角原理可以得到关系式

$$\frac{1}{A - x} + \frac{1}{x' - A} = \frac{1}{f} \tag{2}$$

$$\frac{-y}{A - x} = \frac{-y'}{x' - A} \tag{3}$$

由以上三式联立求解, 消去 x, y 后得到激光束经过透镜后的共扼像线方程为

$$y' = \frac{(A - f) \cdot \text{tg}\alpha}{f} \cdot x' - \frac{A}{f} \cdot \text{tg}\alpha \tag{4}$$

共扼像线与透镜主光轴的夹角 φ 的正切 $\text{tg}\varphi$ 就是共扼像线的斜率,

$$\text{tg}\varphi = \frac{(A - f) \cdot \text{tg}\alpha}{f} \quad \varphi = \text{tg}^{-1} \left[\frac{A - f}{f} \cdot \text{tg}\alpha \right] \tag{5}$$

确立了 φ 角之后, 建立曲面上位移 H 与 CCD 上光斑像点位移 h 之间的关系

$$H \cdot \sin\alpha = n \cdot h \cdot \sin\varphi \tag{6}$$

式中 n 为镜头透镜的放大倍数。不难证明

$$n = \frac{H \cdot \sin\alpha}{h \cdot \sin\varphi} = \frac{(A + H \cdot \cos\alpha) - f}{f} \tag{7}$$

$$H = \frac{(A - f) \cdot \sin\varphi \cdot h}{f \cdot \sin\alpha \cdot (1 - h \cdot \text{ctg}\alpha \cdot \sin\varphi/f)} \tag{7}$$

$$H = \frac{K_1 \cdot h}{1 - K_2 \cdot h} \tag{8}$$

式中
$$K_1 = \frac{(A - f) \cdot \sin\varphi}{f \cdot \sin\alpha} \quad K_2 = \frac{\text{ctg}\alpha \cdot \sin\varphi}{f} \tag{9}$$

当式中的参数 A, f, α, φ 确立后, 测量系统的 K_1, K_2 为常数。根据(8)式建立数学模型, 设计编制曲面一维位移的计算程序, 为计算机测量计算提供软件。

测量系统采用 4096 相元, 驱动频率为 10 MHz, 每个光敏元长 $\Delta h = 14 \mu\text{m}$ 的线阵 CCD 图像传感器。在 CCD 上的光斑像点最大允许位移量 $h_{\text{max}} = m \cdot \Delta h$, 其中 m 为相元数。曲面上的最大可测位移量 $H_{\text{max}} = K_1 \cdot m \cdot \Delta h / (1 - K_2 \cdot m \cdot \Delta h)$ 。测量系统的最小位移分辨率 $\Delta H = K_1 \cdot \Delta h / (1 - K_2 \cdot \Delta h)$ 。因此, 要想有较大的可测范围, 系数 K_1, K_2 取偏大的值, 但是误差增大, 精度下降。反之, 要想有较高的测量精度, 系数 K_1, K_2 取偏小的值, 但是测量范围减小, 不适用于大位移的车身曲面的测量。要较好地解决这一问题, 一方面可以采用激光束直径较细而亮度较高的激光器, 选择更好的镜头和更高分辨率的 CCD; 另一方面可以采用更适用的测量方法, 这是解决这一问题的主要途径。

3 激光和 CCD 光学三角自动变位法测量大位移的车身三维曲面形状

激光和 CCD 自动变位测量法建立在前述的不垂直光学三角法的基础上, 它把光学三角法的可测范围扩大了。如图 2 所示, 已知光学三角法有一定的精度要求时, 只能测量从 Z_0 到 Z_m 之间较小的范围。当曲面位置超过 Z_m 而处于 Z_n 时, 超出了最大可测范围, Z_n 位置曲面上的 P_n 点光斑因不能在 CCD 上成像而无法测量。为了使 Z_m 位置以外的曲面也可测, 测头必须自动变位测量。

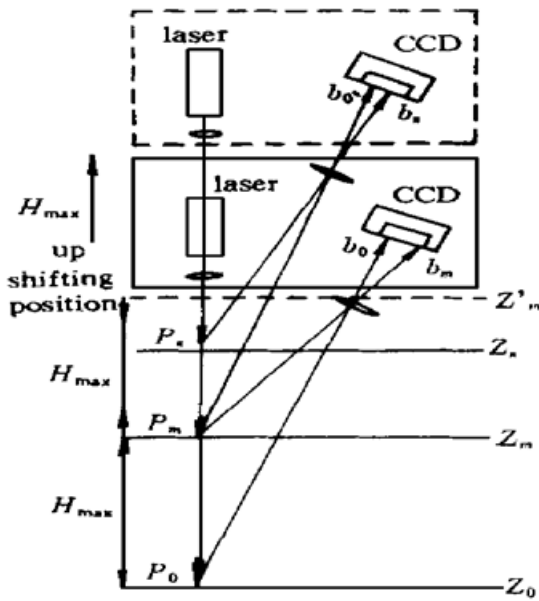


图 2 光学三角自动变位测量法

Fig. 2 Optical trigonometry automatic position shifting measurement

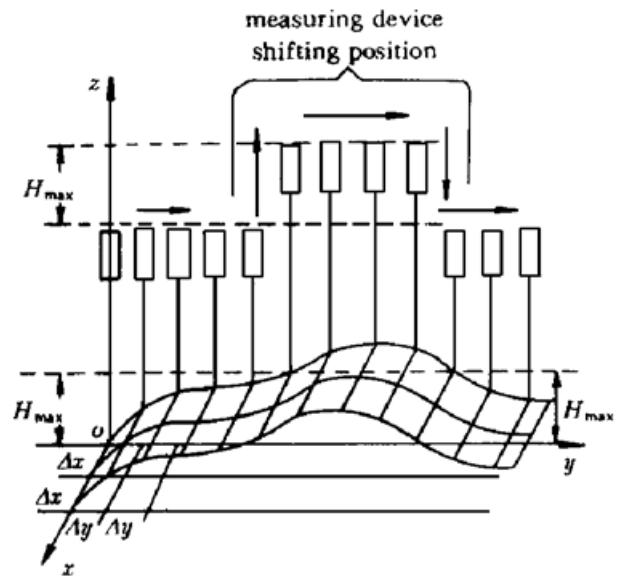


图 3 激光 CCD 自动变位测量过程

Fig. 3 Laser and CCD automatic position shifting measuring process

在测量过程中, 当曲面超出 CCD 可测范围时测头怎样实现自动变位呢? 下面结合图 3 与图 2 进行分析。开始测量位置在低位, 位于 $Z_0 Z_m$ 之间的曲面, 测头由扫描机构带动从 y 方向向右平移测量, 随曲面升高, 在 CCD 上的光斑像点自左(b_0 点) 向右移动, 计算机按给定的测量步长 Δy 测取 CCD 上输出的脉冲数, 经计算后作为 z 方向一维坐标, $Z_k = Z_m - H_k$ 。另外对于二维

坐标 x, y , 计算机从 x, y 方向扫描机构步进电机工作脉冲数中读取数据, $X_i = i \cdot \Delta x, Y_j = j \cdot \Delta y$, 即曲面上激光扫过的各点坐标为 $a_{ijk}(X_i, Y_j, Z_k), (i = 1, 2, 3, \dots, m; j = k = 1, 2, 3, \dots, n)$ 。当曲面升高到 Z_m 时, P_m 点光斑在 CCD 上右极限相元 b_m 点成像输出脉冲数到计算机, 由测控程序判别出 CCD 上像点已到右极限相元, 使 y 方向步进电机暂停, 向 z 方向步进电机输出正转工作脉冲数, 使测头上移一段距离 H_{\max} , CCD 上的光斑像点回到左极限 b_0 点光敏元上, 计算机暂停向 z 方向步进电机输出工作脉冲数, 又继续向 y 方向步进电机输出工作脉冲数, 继续向右测量。测头变位后, z 方向坐标变为 $Z_k = 2Z_m - H_k$ 。当曲面过了最高位置后由高变低, 降到 CCD 可测范围的下极限位置时, CCD 上的光斑像点在左极限 b_0 点光敏元上输出脉冲数到计算机, 计算机使 y 方向步进电机暂停, 使 z 方向步进电机反转, 测头向下移动一段距离 H_{\max} , 降到位后继续向右测量。这时 z 坐标又变为原来的 $Z_k = Z_m - H_k$ 。测取曲面上的第一条曲线各点 $a_{111}, a_{122}, a_{133}, \dots, a_{1m}$ 的三维坐标。测第二条曲线时计算机输给 x 方向扫描机构步进电机一个步长增量 Δx 的工作脉冲数, 测头向前移动一个步长增量 Δx 。同理, 又可以测曲面上的第二条曲线, 各点坐标为 $a_{211}, a_{222}, a_{233}, \dots, a_{2m}$ 。最后一条曲线的各点坐标为 $a_{m11}, a_{m22}, a_{m33}, \dots, a_{mnn}$ 。计算机将测取的各点数据按规则存放, 每条曲线为一组数据, 顺序按 a_{ijk} 的序号排列。

当测完上述 xoy 平面上的曲面(如车身的顶面)之后, 需测量 yoz 平面上的曲面(如车身的侧面)或 xoz 平面上的曲面(如车身的前、后面)时, 激光测头在计算机控制下自动转过 90° 角(测头的安装连接器方向由步进电机控制)。使测头垂直于被测曲面所在的三维坐标平面。此时, 计算机自动将坐标作相应的平移, 将 CCD 上测量的坐标 z 自动转变成相应的坐标 x 或 y 。测量过程和原理与前述相同。

4 实测结果与分析

实现这种自动变位法测量汽车车身曲面形状(大位移三维曲面)的实验系统, 主要由激光器和 CCD 自动变位测头, x, y, z 三维坐标扫描机构(包括步进电机、微型减速机、精密传动和导向机构)、测量平台(平台、框架结构)、计算机(586 微机)各种计算机软件(数据采集、计算和存取软件, 系统测控软件等)、驱动器(CCD 和步进电机驱动器)、计算机接口(CCD 和步进电机与计算机的接口)、直流稳压电源等组成。利用该实验系统对标准测量仪产生的不同长度的标准位移 L_1, L_2, L_3, L_4 等进行多次重复测量, 其结果列于表 1。从表 1 可以看出, 在测量同一长度的每一组数据中, 只出现三个不同的数, 而且呈正态分布, 这说明测量结果正常。因为 CCD 上

表 1 标准位移 L 实测结果

Table 1 The results of the experimentally measured standard position shifting L

$L (\pm 0.001)/\text{mm}$	data records/mm				
10	10.015	10.000	10.000	10.015	10.000
	9.985	10.000	9.985	10.000	10.015
50	50.019	50.019	50.000	50.000	49.981
	50.000	50.000	49.981	49.981	50.000
100	99.980	100.000	100.000	100.020	99.980
	100.000	100.000	100.000	100.020	100.000
1000	1000.038	1000.000	1000.000	1000.000	999.962
	1000.000	1000.038	1000.000	999.962	1000.000

的分辨率为一个相元长度 $\Delta h = 0.014 \text{ mm}$, 则反映在测量标准长度位移的分辨率为 $\Delta L = K_1 \cdot \Delta h / (1 - K_2 \cdot \Delta h)$, 所以, 在 CCD 上光斑像点的位移误差为正负一个相元 $\pm \Delta h$, 测量标准长度位移的误差为 $\pm \Delta L$, 其长度为 $L \pm \Delta L$ (mm)。测量结果表明, 在一定长度位移范围内的误差不大于 $\pm 0.02 \text{ mm}$, 即不精确度不大于 0.04 mm , 测量系统的一维(单轴)位移误差不大于 $\pm 0.038 \text{ mm/m}$, 即一维(单轴)不精确度不大于 0.076 mm/m 。误差的主要来源是激光斑在曲面上漫反射的强度变化误差、CCD 的最小分辨率误差、测头上激光器和 CCD 镜头之间的安装误差、测量方法原理误差等。其中有些系统误差可以用修正和补偿的方法加以消除。

利用该实验系统对汽车模型作了实测, 在计算机上对测量数据进行了数据处理, 用车身 CAD 和 3D 生成了如图 4 所示的三维图形。

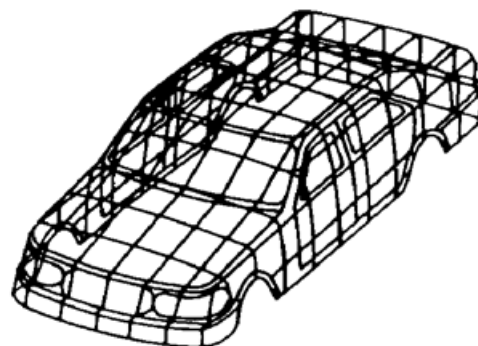


图 4 汽车三维曲面图形

Fig. 4 3D pattern of the auto-body

5 结 论

本文探讨了将激光和 CCD 光学三角自动变位测量法用于非接触测量大位移的车身三维曲面形状, 分析了这一测量法的原理和过程, 介绍了实现这一方法的实验系统和实测结果。实验结果表明, 这一测量法有效地解决了激光光学三角测量中的测量精度与测量范围之间的矛盾, 既可以用于测量小位移和大位移的三维曲面, 又可以获得较好的测量精度, 它与其它测量法相比, 具有高效精确和自动化程度高等先进性。经过进一步的改进和提高之后具有一定的实用性。

参 考 文 献

- 1 Shi Jinfa, Wang Xuejun, Liang Xichang. The non-contact photoelectron measurement method for the 3-D curved surface. *Experimental Technology & Management*, 1995 (3): 16~ 19
- 2 Shi Jinfa, Pan Xufeng, Wang Xuejun *et al.*. The analyse of the non-contact photoelectron measurement method for the curved surface shape. The Tenth National Academic Exchanges Conference. The Proceedings of Conference about High-new Technique Applied in the Instruments and Meters. Sanming, Fujian, 1995, 10, 15~ 21
- 3 T. Akuta, Y. Negishi. Development of a automatic 3-D shape measuring system using a new auto-focusing method. *Measurement Science & Technology*, 1991, 9(3): 98~ 103

Study of a Laser Automatic Position Shifting Measuring System for the Auto-body 3-D Shape Measurement

Wang Xuejun

(Auto-management Institute, Bengbu 233011)

Abstract A kind of the laser and CCD optigonometry automatic position shifting measuring method for the auto-body 3-D curved surface shape is presented in this paper. The principle and the measuring process of the method are analyzed. The expermental system is described. The results of the experiment are provided and have shown that the measurement method and system may be practically valuable.

Key words laser, automatic position shifting measuring, auto-body, 3-D shape