

文章编号: 0258-7025(2001)06-0533-04

光学三维形面分区域测量数据的拼接研究^{*}

张舜德 卢秉恒 丁玉成

(西安交通大学机械工程学院先进制造技术研究所 西安 710049)

提要 根据空间坐标组合变换原理,提出在三维形面相邻子区域重合区人为引入空间非共线三点以实现测量对象全形面数字化的方法,分析了测量数据的合成精度,并以光切法三维测量系统作为应用对象进行了实验研究。结果表明,利用该方法实现三维形面分区域测量及后序多片数据拼接,具有速度快、精度高、可操作性强等特点。

关键词 轮廓术, 三维形面, 坐标变换, 精度

中图分类号 TN 247, TP 274 **文献标识码** A

Study on Data Registration of Subdivided Shapes in Optical 3-D profilometry

ZHANG Shun-de LU Bing-heng DING Yu-cheng

(The Institute of AMT, College of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

Abstract Based on the combined transformation theory of the space coordinates, a scheme, which introduces three non co-linear marked points in the public areas of the adjacent subdivided shapes to digitize the whole profile, is proposed. The blending accuracy of the result data is analyzed and a verification about this is done in light-sectioning measurement system. Experimental results show that this approach can realize the subdivided shapes measuring and data registering as the features of rapid speed, high accuracy and simple operation in optical three dimensional profilometry.

Key words profilometry, three-dimension object shape, coordinate transformation, accuracy

现代社会生活与生产中的众多领域对三维物体面形的测量需求越来越多,光测法因其非接触、无损、快速、高精度和易于实现自动化等特点已被广泛用于三维面形测量。典型的光学轮廓术有:莫尔轮廓术^[1]、傅里叶变换轮廓术^[2]、相位测量轮廓术^[3]及光切法^[4]等。工程实际中,面形测量数据一般用于物体的三维显示或其数字模型的三维重建中,故要求实际测量数据必须是坐标归一化和完整的。由于:1)光线的方向性很强,光学三维测量对于复杂形面上的某些区域往往存在投影编码盲点或视觉死区,技术上很难在一次测量中实现全部形面的数字化,需要通过调整测量系统方位进行补测;2)对于大型曲面,受测量系统测量范围的限制,必须分块测量;3)对被测物体有定位及夹紧要求,一次测量无法同时获得定位面及夹紧面的测量数据,需引入二次测量。上述情况下,测量结果是多块具有不同系

统参数且存在冗余的“点云”数据,不能为许多三维重构系统接受,因而必须进行坐标归一化和消除冗余数据的处理。针对多个三维几何形体的对接有人已作了一些研究^[5,6],其出发点是将三维几何形体视为刚体,通过求取刚体相对运动的平移和旋转矩阵实现对接。本文提出一种基于人为设定的三个标志点坐标的组合变换实现多块测量数据拼接的方法,即所谓“三点法”。

1 “三点法”数据拼接原理

“三点法”数据拼接实现的前提是在规划测量方案时,相邻子区域必须存在公共重叠区域,如图 1, $O-XYZ$ 为测量系统世界坐标系,测量对象为欧氏空间的任意曲面 $S(x, y, z)$, $o-uvw$ 为 $S(x, y, z)$ 的局部坐标系, $S(x, y, z)$ 上的几何要素与 $o-uvw$ 的空间位置不受 $S(x, y, z)$ 移动及分解的影响,也就是说 $o-uvw$ 和 $S(x, y, z)$ 是一种刚性关系。若将 $S(x, y, z)$ 划分成两个包含部分重叠区域 $R(x, y, z)$ 的子曲面 $S_1(x, y, z)$ 和 $S_2(x, y, z)$ 并分别进行测量,为了

^{*} 国家 863 计划 No. 863-511-708-007 资助项目。

收稿日期 2000-04-27

保证两块子曲面的测量质量,它们在测量坐标系 $O-XYZ$ 中的位置和姿态的调整要求可能不尽相同,这样就导致 $S_1(x, y, z)$ 和 $S_2(x, y, z)$ 的局部坐标系 $o_1-u_1v_1w_1$ 和 $o_2-u_2v_2w_2$ 不重合。测量完成后,曲面 $S(x, y, z)$ 在世界坐标系中被离散为分别对应于 $S_1(x, y, z)$ 和 $S_2(x, y, z)$ 的两组互不相关的数据点集 $\{P_{1i}(x, y, z) | P_{1i}(x, y, z) \in S_1(x, y, z); i = 1, 2, \dots, m\}$, $\{P_{2j}(x, y, z) | P_{2j}(x, y, z) \in S_2(x, y, z); j = 1, 2, \dots, m\}$, 它们都包含对应于公共区域 $R(x, y, z)$ 的测量点集 $\{Q_k(x, y, z) | Q_k(x, y, z) \in R(x, y, z); k = 1, 2, \dots, l\}$, 为了实现 $\{P_{1i}(x, y, z)\}$ 与 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$ 的坐标归一化,就必须在测量坐标系中变换 $o_2-u_2v_2w_2$ 和 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$, 使 $o_2-u_2v_2w_2$ 与 $o_1-u_1v_1w_1$ 完全重合,就可实现 $\{P_{1i}(x, y, z)\}$ 与 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$ 的拼接。

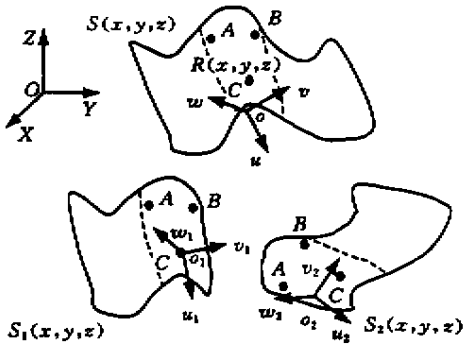


图 1 设置了标志点的三维形面分区测量
Fig.1 3D measuring by subdividing object shape and setting marked points

将 $o_2-u_2v_2w_2$ 变换到与 $o_1-u_1v_1w_1$ 完全重合的位置,首先需要将 $o_1-u_1v_1w_1$ 的原点 $o_1(x_{10}, y_{10}, z_{10})$ 平移至 $o_2(x_{20}, y_{20}, z_{20})$ 处,然后绕 $o_2(x_{20}, y_{20}, z_{20})$ 点旋转 $o_1-u_1v_1w_1$ 使其与 $o_1-u_1v_1w_1$ 完全重合。为了实现坐标变换,必须已知 $x_{10}, y_{10}, z_{10}, x_{20}, y_{20}, z_{20}$ 六个坐标平移变换参数及 φ, θ, ψ 三个坐标旋转交换的欧拉角,为了利用平移变换公式和旋转变换公式求解这 9 个参数,至少应已知三个相关点对的世界坐标,故测量前在公共测量区 $R(x,$

$$T_r = \begin{bmatrix} \cos\varphi\cos\psi - \sin\varphi\sin\psi\cos\theta & -\cos\varphi\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi\cos\theta & \sin\varphi\sin\theta & 0 \\ \sin\varphi\cos\psi + \cos\varphi\sin\psi\cos\theta & -\sin\varphi\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi\cos\theta & -\cos\varphi\cos\theta & 0 \\ \sin\psi\sin\theta & \cos\psi\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中欧拉角 φ, ψ, θ ($-\pi \leq \varphi, \theta, \psi \leq \pi$) 可由 P_{1b}, P_{2b} 求得。

y, z) 上布置三个标记点 A, B, C (理论上标记点可多于三个),测量完成后,标记点 A, B, C 在 $\{P_{1i}(x, y, z)\}$ 中的对应点分别为 P_{1a}, P_{1b}, P_{1c} , 在 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$ 中的对应点分别为 P_{2a}, P_{2b}, P_{2c} , 利用这三个点对的测量值就可以唯一确定实现两组测量“点云” $\{P_{1i}(x, y, z)\}$ 与 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$ 组合变换的 9 个参数,也就是说,只要通过变换使这三个点对在测量坐标系中完全重合,就实现了 $\{P_{1i}(x, y, z)\}$ 与 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$ 的拼接。

标记点的布置原则是:1) A, B, C 三点不能共线,应避免 $\triangle ABC$ 成为狭长三角形, $\triangle ABC$ 面积应足够大;2) 标记点既可以是人工设定的,也可以是测量对象固有的,但必须是能够在测量数据点集中准确识别、匹配和定位的点。

为了便于实现两块测量数据拼接过程的可视化交互式操作,采用以下步骤:

a) 固定 $\{P_{1i}(x, y, z)\}$, 平移 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$ 使 P_{2a} 与 P_{1a} 重合, 平移变换矩阵为

$$T_{t1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_{1a} - x_{2a} & y_{1a} - y_{2a} & z_{1a} - z_{2a} & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

b) 固定 $\{P_{1i}(x, y, z)\}$, 绕点 P_{1a} 旋转 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$ 使 P_{2b} 与 P_{1b} 重合。这是一个绕空间任意点旋转的组合变换,由三个步骤完成:1) 将全部数据点云平移 T_{+p} , 使 P_{2a} 与 P_{1a} 位于测量坐标系原点;2) 固定 $\{P_{1i}(x, y, z)\}$, 绕 P_{1a} 点旋转 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$ 使 P_{2b} 与 P_{1b} 重合;3) 将全部数据点云平移 T_{-p} , 使 P_{1a} 位于原始测量坐标系原点。则绕 P_{1a} 旋转的组合变换矩阵为

$$T_{t2} = T_{+p} \cdot T_r \cdot T_{-p} \quad (2)$$

其中

$$T_{\pm p} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \mp x_{1a} & \mp y_{1a} & \mp z_{1a} & 1 \end{bmatrix}$$

c) 固定 $\{P_{1i}(x, y, z)\}$ 绕 $P_{1b}-P_{1a}$ 旋转 $\{P_{2j}(x, y, z)\}$ 使 P_{2c} 与 P_{1c} 重合。这是绕空间任意直线

旋转的组合变换,由7个步骤完成:1)将全部数据点云平移 T_{+p} ,使 P_{2a} 与 P_{1a} 位于测量坐标系原点;2)使 $P_{1b}-P_{1a}$ 绕Z轴以 α 角旋转 $T_{+\alpha}$ 与XOZ面重合;3)再使 $P_{1b}-P_{1a}$ 绕Y轴以 β 角旋转 $T_{+\beta}$ 与Z轴重合;4)固定 $\{P_{1i}(x,y,z)\}$,使 $\{P_{2j}(x,y,z)\}$ 以 δ 角绕Z轴旋转 T_{δ} ;5)全部点云以 $T_{-\beta}$ 复位;6)全部点云以 $T_{-\alpha}$ 复位;7)全部点云以 T_{-p} 复位。则绕 $P_{1b}-P_{1a}$ 旋转 $\{P_{2j}(x,y,z)\}$ 的 δ 角的组合变换矩阵为

$$T_{I3} = T_{+p} \cdot T_{+\alpha} \cdot T_{+\beta} \cdot T_{\delta} \cdot T_{-\beta} \cdot T_{-\alpha} \cdot T_{-p} \quad (3)$$

其中

$$T_{\pm\alpha} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \mp\sin\alpha & 0 & 0 \\ \pm\sin\alpha & \cos\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{\pm\beta} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \pm\sin\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \mp\sin\beta & 0 & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{\delta} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \sin\delta & 0 & 0 \\ -\sin\delta & \cos\delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left[\frac{x_{1b} - x_{1a}}{\sqrt{(x_{1b} - x_{1a})^2 + (z_{1b} - z_{1a})^2}} \right]$$

$$\beta = \sin^{-1} \left[\frac{y_{1b} - y_{1a}}{\sqrt{(x_{1b} - x_{1a})^2 + (y_{1b} - y_{1a})^2 + (z_{1b} - z_{1a})^2}} \right]$$

$$\delta = \cos^{-1} \left(\frac{d_1^2 + d_2^2 - d^2}{2d_1d_2} \right)$$

$$d = \sqrt{(x_{2c} - x_{1c})^2 + (y_{2c} - y_{1c})^2 + (z_{2c} - z_{1c})^2}$$

$$d_i = \frac{\sqrt{F^2 + G^2 + H^2}}{\sqrt{(x_{1b} - x_{1a})^2 + (y_{1b} - y_{1a})^2 + (z_{1b} - z_{1a})^2}},$$

$$F = (z_{1b} - z_{1a}) \delta (y_{1c} - y_{1b}) - (y_{1b} - y_{1a}) \delta (z_{1c} - z_{1a})$$

$$G = (x_{1b} - x_{1a}) \delta (z_{1c} - z_{1a}) - (z_{1b} - z_{1a}) \delta (x_{1c} - x_{1a})$$

$$H = (y_{1b} - y_{1a}) \delta (x_{1c} - x_{1a}) - (x_{1b} - x_{1a}) \delta (y_{1c} - y_{1a})$$

$$(i=1,2)$$

至此,已实现了 $\{P_{1i}(x,y,z)\}, \{P_{2j}(x,y,z)\}$ 的坐标归一化,则对曲面 $S(x,y,z)$ 分片两次测量的总结果为

$$\{P(x,y,z)\} = \{P_{1i}(x,y,z)\} \cup \{T_{I1} \cdot T_{I2} \cdot T_{I3} \cdot P_{2j}(x,y,z)\} \quad (4)$$

公共区域的测量点集为

$$\{Q_k(x,y,z)\} = \{P_{1i}(x,y,z)\} \cap$$

$$\{T_{I1} \cdot T_{I2} \cdot T_{I3} \cdot P_{2j}(x,y,z)\} \quad (5)$$

最后还需消除 $\{Q_k(x,y,z)\}$ 中冗余数据,对于 Q_k 的任意邻接点 $Q_g(Q_g(x,y,z) \in \{Q_k(x,y,z)\})$,若这两点间的距离

$$|Q_k - Q_g| \leq \varepsilon \quad (6)$$

则去除 Q_k ,否则保留 Q_k , $|\varepsilon|$ 为要求的测量数据密度。

上述数据拼接算法包含大量的低阶向量和矩阵运算,非常适合计算机处理,因此实际拼接速度很快。

2 精度分析

在实际测量中,由于测量过程受某些因素的影响,使测量结果包含有误差。对于“三点”数据拼接法,标志点坐标误差来源有:1)测量误差;2)三维连续曲面用有限数字化点集表示时引入的量化误差;3)对同一实际物理标志点在分次测量识别时产生的定位误差。因此对同一标志点在分区域测量时,标志点对之间产生了相对误差。第 a)次变换中,数据拼接误差只与标志点 P_{1a}, P_{2a} 相对误差有关,误差向量

$$\sigma_1 = T_{I1} \cdot P_{2a} - P_{1a} \quad (7)$$

第 b)次变换中,数据拼接误差为

$$\sigma_2 = T_{I2} \cdot P_{2b} - P_{1b} \quad (8)$$

第 c)次变换中,数据拼接误差为

$$\sigma_3 = T_{I3} \cdot P_{2c} - P_{1c} \quad (9)$$

如图2,数据拼接总误差 σ 实质上是标志点对的相对误差在各次变换中影响的一个逐步累加

$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (10)$$

为了提高数据拼接的整体精度,除了提高系统测量精度外,还可采取以下措施:

1)选择测量中易于识别和能准确定位的标志点,如 \circ, \square, \times 等;2)在公共测量区域内,应使三个标志点距离足够大,尽可能使三个标志点组成的空

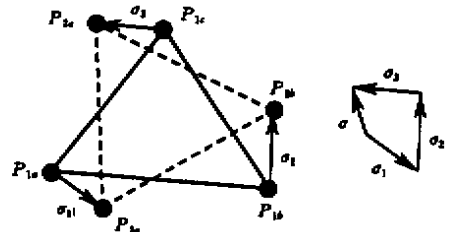


图2 拼接误差合成

Fig.2 Registration errors compounding

间三角形接近等边三角形,避免出现狭长三角形 3) 可对标志点进行多次识别,取其平均值,以减小随机定位误差 4) 测量数据的稀疏操作应在标志点识别后进行。

3 应用实例

为实现分区域多次测量结果的数据拼接,我们在 WINDOWS 环境下,根据本文“三点法”数据拼接原理,利用 VISUALC++ 开发出一套可视化交互式三维数据点集成系统。测量系统是我们自行研制的基于双视觉传感器光切法三角测量原理的 3DSCAN-300 三维激光数字化仪,它可实现平面扫描和旋转扫描,在 150 mm 的有效景深范围内其扫描精

度为 ± 0.05 mm。本文测量对象为某制鞋厂的一新款铝制鞋楦,该鞋楦外表面无论采用平面扫描还是旋转扫描都不可能通过一次定位测得全部较完整的形面数据,必须变基准分片测量,图 3(a),(b),(c)(d)为四次测量结果,测量数据点数分别为 63408,95389,54577,90703。公共区域的标志点 \oplus 是通过在鞋楦上压印产生的,其深度大于 1 mm,为了降低拼接误差的累加效应,采用两两拼接的策略,即首先分别使(a)与(b)(c)与(d)实现拼接,然后再进行总拼接。图 3(e)为第一片数据和第二片数据拼接的结果,图 3(f)为第三片和第四片数据拼接的结果,图 3(g)为按 0.08 mm 的点距去除 54472 个冗余数据点后全部测量结果拼接的结果。通过对拼接结果的综合分析,相对拼接误差不大于 2%。

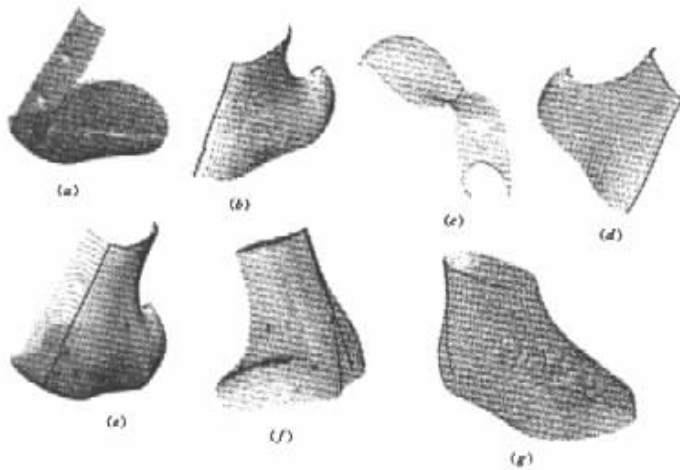


图 3 鞋楦的分区域测量数据拼接

Fig.3 Data registering for multiple measured sub-shapes of a shoe tree

4 结论

“三点法”是一种操作简单可靠的实用数据拼接技术,它与现有光学三维形面测量系统结合可完成复杂形面的全轮廓测量,是对现有光学三维测量系统功能的低成本延伸,其精度损失主要来源于标志点的识别和定位误差,很大程度上取决于操作者的经验和仔细程度。还需指出的是这种方法也适用于三坐标测量机(CMM)、工业 CT 等三维测量系统的数据拼接。

参 考 文 献

1 Guan-Chang Jin, Shouhong Tang. Automated moiré contouring

of diffuse surfaces. *Opt. Eng.*, 1989, **28**(11):1211 ~ 1215

2 M. Takeda, K. Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24):3977 ~ 3982

3 V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18):3105 ~ 3108

4 Y. Sato, H. Kitagawa, H. Fujita. Shape measurement of curved objects using multiple slit-ray projections. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1982, **PAMI-4**(6):641 ~ 646

5 P. J. Besl, N. D. McKay. A method for registration of 3D shape. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **PAMI-14**(2):239 ~ 256

6 O. D. Faugeras, M. Hebert. The representation, recognition, and locating 3-D objects. *Int. J. Robotic Research*, 1986, **5**(3):27 ~ 52