

文章编号 1004-924X(2008)11-2268-06

应用空间编码投影法测量三维大物体面形

刘 晨,金施群,费业泰,唐黎莺,姜 晨

(合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院,安徽 合肥 230009)

摘要: 三维图像拼接技术是实现大型物体形貌测量的关键。本文在图像控制点约束的基础上,提出了一种实现三维图像拼接的新方法,即将一伪随机空间编码投射到一大型物体表面,然后用 CCD 在不同视角拍摄不同视场中的物体,利用重叠区域相同的某一窗口特征点进行配准,然后采用四元组法求取坐标转换矩阵,从而实现大范围自由曲面三维形貌的测量。实验结果表明:应用空间编码的图像拼接新方法可以实现大尺度三维面形的测量,拼接数据相对误差 $<0.8\%$ 。

关键词: 空间编码;3D 测量;3D 图像配准;3D 图像拼接

中图分类号: TP391.4 **文献标识码:** A

Shape measurement of 3D large object by space code projection

LIU Chen, JIN Shi-qun, FEI Ye-tai, TANG Li-ying, JIANG Chen

(*School of Apparatus Science and Photo-electric Engineering,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China*)

Abstract: 3D image merging is a key technique in large scale free-form surface measurement. Based on image-control-point-restraint theory, a new 3D image merging method is presented. In the method, a pseudo-random space code is firstly projected on a large object surface, and the images of the object are taken from different angles of view. Through matching the interest points on the overlapping region, the coordinate transformation matrix is obtained and 3D measurement of large-scale free-form surface can be realized. The experimental results show that this new image merging method by space code projection can measure large-scale 3D shape and the relative error of merging data is less than 0.8%.

Key words: space code; 3D measurement; 3D image registration; 3D image merge

1 引言

大型物体自由曲面测量中由于摄像机的视场有限,使得被测物体无法一次完成表面测量,所以需要根据被测对象,从不同角度对不同的区域进

行分块测量,然后再将测量数据拼接构成 3D 数据模型^[1]。

三维图像拼接技术是实现大型物体形貌测量的关键技术,目前已有许多学者从事三维图像拼接技术的研究^[2-6],其方法和技术的总体思路是不对测量物体增加辅助设施,仅仅依靠物体表面自

收稿日期:2007-10-22;修订日期:2008-04-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50275049);安徽省二期科技攻关计划资助项目;安徽省高等学校现代测试与制造质量工程重点实验室资助项目

身特征信息进行空间图像拼接,算法比较复杂。本文提出了一种实现三维图像拼接的新方法,即将一伪随机空间编码投射到一大型物体表面,然后用 CCD 在不同视角拍摄不同视场中的物体,利用空间编码窗口唯一性的特征,对重叠区域相同的某一窗口特征点进行配准,采用四元组法求取坐标转换矩阵,从而实现大范围的自由曲面三维形貌的测量。

2 三维测量的基本原理

三维视觉传感系统由投影仪、视觉传感器和计算机测控系统组成^[7],如图 1 所示:

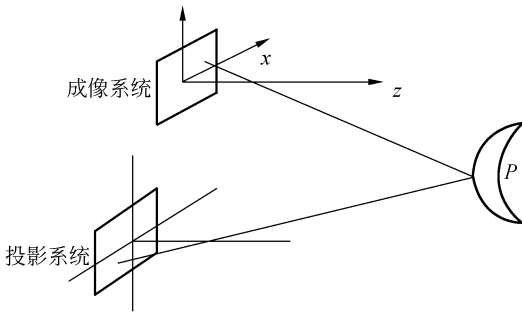


图 1 三维测量原理图

Fig.1 Principle of 3D measurement

将投影仪视为一个逆向摄像机,它和数码摄像机即组成一个典型的双目立体视觉测量系统,根据几何关系,可以得到:

$$\begin{cases} x = x_0 + \frac{x_p}{f_p}(f_p + z_0 - z) \\ y = y_0 + \frac{y_p}{f_p}(f_p + z_0 - z) \\ z = \frac{f_c f_p}{f_c x_p - f_p x_c} [(x_0 + x_p - x_c) + \frac{x_p z_0}{f_p}] \end{cases}, \quad (1)$$

式(1)中投影面的中心 O' 的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 投影点 P_p 的坐标为 $(x_0 + x_p, y_0 + y_p, z_0)$, 在成像系统中对应的点的坐标为 $(x_c, y_c, 0)$, f_p 为投影仪的焦距, f_c 为相机的焦距,由此可见,由投影点 $P_p(x_p, y_p)$ 和与之相对应的像点 $P_c(x_c, y_c)$, 即可求出物体任一点的三维坐标 x, y, z 。

3 基于空间编码的大物体自由曲面的测量

3.1 伪随机彩色编码设计

采用一种编码方法对上述投影仪进行了编码,使一幅图像所覆盖的三维场景空间表面特征化,因伪随机彩色编码具有良好的窗口特性^[8],因此本文采用伪随机彩色编码来对投影仪进行编码。伪随机编码可表示为伪随机序列和伪随机阵列两种形式,伪随机序列可由反馈移位寄存器产生。 m 阶线性反馈移位寄存器具有 m 个存储器,设每个存储器有 q 个状态,当时钟脉冲到来时,各存储器的状态依次向右输出,成为一个周期为 $n = q^m - 1$ 的循环序列,即伪随机序列。它需要一逻辑传递函数来不断生成新的值,可表示为:

$$a_{i+m} = k_{m-1}a_{i+m-1} + k_{m-2}a_{i+m-2} + \dots + k_1a_{i+1} + k_0a_i. \quad (2)$$

相应的多项式 $h(x) = x^m + k_{m-1}x^{m-1} + \dots + k_2x^2 + k_1x + k_0$ 为本原多项式,只要选定了本原多项式,就知道逻辑传递函数,再设定一个非全零的初始值 $a_0 a_1 a_2 \dots a_{m-1}$ 作为激励源,就可唯一确定伪随机序列 $a_0 a_1 a_2 \dots$ 。理论上,伪随机编码阵列可用一个 $n_1 \times n_2$ 维伪随机矩阵表示,将该伪随机序列转化成伪随机阵列的过程可以比喻成在做填空题,将序列填到一个 $n_1 \times n_2$ 的阵列里,填的原则是从左上角开始,沿主对角线方向往下依次填,当到达阵列的右边界(或下边界)时,则要从下一行的左边界(或下一列的上边界)开始继续填充,直到将序列中的所有元素填写到阵列中为止。这里令 $q=4, k_1=3, k_2=2$, 选定 6 阶 ($m=k_1 \times k_2=6$) 移位寄存器,其本原多项式为 $h(x) = x^6 + x^2 + x + A$, 就可以产生一个具有 $n=63 \times 65=4\ 095$ 个元素的伪随机矩阵,如选择方形编码,并将 0, 1, A, A^2 分别用绿色、红色、蓝色、黄色代替,由于黑色与其他颜色的色距较大,这里选用黑色作为整个编码模板的背景色。根据其原理,本文用 C++ 编程产生伪随机阵列得到了一个伪随机彩色编码图案如图 2 所示。

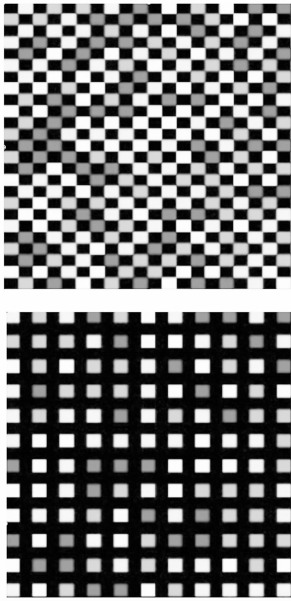


图 2 彩色编码模板

Fig. 2 Color code formwork

3.2 伪随机编码图像特征点的提取与匹配

利用彩色编码模板将编码结构光通过投影系统投射到物体上,获取图像后要对图像进行特征点提取和匹配,从而实现 3D 形貌的测量。本文采用 Harris 算子来进行特征点的提取,Harris 算子受信号处理中自相关函数的启发,给出与自相关函数相联系的矩阵 \mathbf{M} , \mathbf{M} 阵的特征值是自相关函数的一阶曲率,如果两个曲率值都高,那么就认为该点是点特征。Harris 算子的公式如下:

$$\begin{cases} \mathbf{M} = G(s) \otimes \begin{bmatrix} g_x & g_x g_y \\ g_x g_y & g_y \end{bmatrix} \\ R = \det(\mathbf{M}) - k \operatorname{tr}^2(\mathbf{M}), k = 0.04 \end{cases}, \quad (3)$$

其中, g_x 为 x 方向的梯度, g_y 为 y 方向的梯度, $G(s)$ 为高斯模板, \det 为矩阵的行列式, tr 为矩阵的迹, k 为默认常数,其意义是:对操作的灰度图像的每个点,计算其在横向和纵向的一阶导数以及二者的乘积,这样可以得到 3 幅新的图像,3 幅图像中每个像素对应的属性值分别代表 g_x , g_y , $g_x g_y$,对这 3 幅图像分别进行高斯滤波,再计算原图像上对应的每个点的兴趣值。Harris 算法认为,特征点是局部范围内的极大兴趣值对应的像素点。因此,在计算完各点的兴趣值后,要提取原始图像中所有局部兴趣值最大的点,实际操作中,依次从以每个像素为中心的 3×3 的邻域中提取最大值,如果中心点像素的兴趣值是最大值,则该

点就是特征点。

在由二维到三维的重构过程中,除了要知道特征点在图像上的二维坐标外,还需要确定这个坐标到底是哪个编码特征点的,即对编码特征点进行匹配,方法如下:(1)把彩色编码模板中的编码图案根据伪随机编码的窗口特性建立一个坐标与颜色排列的索引表;(2)对每个探测出的特征点,考察其周围的颜色区域与排列情况,然后通过查索引表确定该点在彩色编码模板中的坐标,对所有探测出的特征点做一次扫描。

3.3 孔径拼接转换

用上述方法可得到小范围物体的三维信息,对于大的物体,由于受 CCD 视场的限制,不能一次测量完成,需从不同角度对不同区域进行分块测量,然后再将测量数据拼接构建成 3D 数据模型,因此三维图像拼接技术是实现大物体形貌测量的关键。本文根据伪随机彩色编码窗口唯一的特性,利用四元组法实现三维坐标变换,最终完成空间图像间的拼接。

伪随机空间编码拼接方法要求相邻的两个拼接区域必须有共同的重叠区域,根据伪随机编码窗口唯一特性可在两幅原图像中寻找某一个共同的 3×2 窗口,具体算法如下:区域中的像素点集合按顺序设为 P_1, P_2, \dots, P_n 。在另一图中任取一块和它相同大小的区域,其中的点设为 Q_1, Q_2, \dots, Q_n 。对应的其 RGB 分量分别为 $P_1, R, P_1, G, P_1, B, Q_1, R, Q_1, G, Q_1, B, \dots$ 。将两区域中相对应的所有点的 RGB 分量值相乘,再求和。如公式 (4) 所示:

$$M = \sum_{i=1}^n (P_i, R \times Q_i, R + P_i, G \times Q_i, G + P_i, B \times Q_i, B). \quad (4)$$

当 P_i 点和 Q_i 点颜色相同时颜色分量相乘 ($P_i, R \times Q_i, R + P_i, G \times Q_i, G + P_i, B \times Q_i, B$) 得正值,由此可看出当取两图中颜色分布相同的区域时, M 得最大值。

为找到 M 的最大值,可由相同大小配准区域从 0 行 0 列逐像素开始搜索。找到相同区域并由此得到 3×2 共同窗口的 24 个特征点,根据两组 24 个特征点的三维坐标点集,采用四元组法^[9-10]可解出坐标旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矢量 \mathbf{T} 。坐标旋转矩阵 \mathbf{R} 可以由 \mathbf{q} 表示:

$$\mathbf{R}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

令平移矢量 $\mathbf{T} = [t_x, t_y, t_z]^T$, 两组一一对应的三维坐标点集分别为 $\{\bar{\mathbf{P}}_i\}, \{\bar{\mathbf{q}}_i\}$, 每个点集中点的个数为 $N(N \geq 4, \text{这里取 } N = 24)$, 现将求解单位矢量 $\mathbf{q} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ 的计算过程总结如下:

(1) 分别计算三维点集 $\{\bar{\mathbf{P}}_i\}, \{\bar{\mathbf{q}}_i\}$ 的各自质心 $\bar{\boldsymbol{\mu}}_P, \bar{\boldsymbol{\mu}}_q$

$$\bar{\boldsymbol{\mu}}_P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{P}}_i, \bar{\boldsymbol{\mu}}_q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{q}}_i.$$

(2) 将三维点集 $\{\bar{\mathbf{P}}_i\}, \{\bar{\mathbf{q}}_i\}$ 作相对于各自质心的平移, 得到新的点集 $\{\bar{\mathbf{P}}_i'\}, \{\bar{\mathbf{q}}_i'\}$

$$\bar{\mathbf{P}}_i' = \bar{\mathbf{P}}_i - \bar{\boldsymbol{\mu}}_P, \bar{\mathbf{q}}_i' = \bar{\mathbf{q}}_i - \bar{\boldsymbol{\mu}}_q.$$

(3) 计算点集 $\{\bar{\mathbf{P}}_i'\}, \{\bar{\mathbf{q}}_i'\}$ 的协方差矩阵 \mathbf{M}

$$\mathbf{M} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{P}}_i' \cdot (\bar{\mathbf{q}}_i')^T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{\mathbf{P}}_i \bar{\mathbf{q}}_i^T - \bar{\boldsymbol{\mu}}_P \bar{\boldsymbol{\mu}}_q^T.$$

(4) 由矩阵 \mathbf{M} 中元素 $M_{ij} (i, j = 1, 2, 3)$ 构造 4×4 对称矩阵 \mathbf{M}_a

$$\mathbf{M}_a = \begin{bmatrix} M_{11} + M_{22} + M_{33} & M_{32} - M_{23} & M_{13} - M_{31} & M_{21} - M_{12} \\ M_{32} - M_{23} & M_{11} - M_{22} - M_{33} & M_{12} + M_{21} & M_{31} + M_{13} \\ M_{13} - M_{31} & M_{12} + M_{21} & -M_{11} + M_{22} - M_{33} & M_{23} + M_{32} \\ M_{21} - M_{12} & M_{31} + M_{13} & M_{23} + M_{32} & -M_{11} - M_{22} + M_{33} \end{bmatrix}.$$

(5) \mathbf{M}_a 的最大特征根对应的单位特征向量即为所求的四元组矢量 $\mathbf{q} = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$, 由此可计算出旋转矩阵 \mathbf{R} , 另外平移矢量 \mathbf{T} 可由下式计算:

$$\mathbf{T} = \bar{\boldsymbol{\mu}}_q - \mathbf{R} \bar{\boldsymbol{\mu}}_P.$$

4 物体 3D 测量实验验证

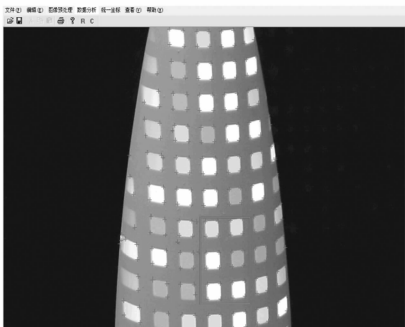
首先在计算机上生成伪随机彩色编码图案, 如图 2 所示, 然后将伪随机编码图案通过已标定投影仪投射到被测物体表面, 用数码相机在某一位置拍摄一幅图像, 然后移动数码相机在另一位

```
文件(F) 编辑(E)
506,455,10
536,454,14
569,452,21
598,449,27
507,587,12
538,485,15
570,483,25
598,480,27
508,520,11
540,520,15
573,520,20
601,516,27
508,553,13
541,552,15
572,549,26
602,547,30
511,586,11
543,586,17
574,585,25
605,580,28
511,619,10
545,617,15
574,616,27
604,612,30
```

- (b) 炮弹上半部分某一特征窗口 24 个特征点的三维坐标
- (b) 3D coordinates of 24 feature points within a feature window in the upper part of a shell

图 3 上半部分的测量

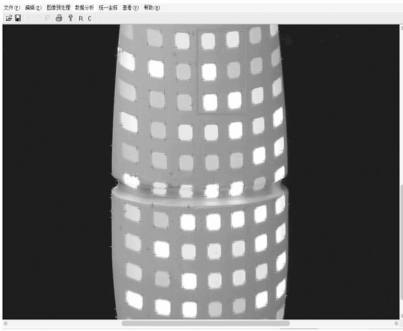
Fig. 3 Measurement of the upper part of shell



(a) 炮弹上半部分图像
(a) Upper part of shell picture

置再拍摄一幅图像, 两图像有重叠区域, 读入上半部分编码图进行角点检测, 对得到的 24 个角点的二维坐标, 进行三维重构, 输出其三维坐标, 如图 3 所示。读入下半部分编码图像图, 重复上面的步骤, 输出其三维坐标, 如图 4 所示。

载入保存有两幅图像的特征点三维坐标文件, 通过程序后台运算得到坐标变换的转换矩阵 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} :



(a) 炮弹下半部分图像
(a) Lower part of shell picture

文件(F)	编辑(E)	格
504,66,12		
535,65,14		
567,63,22		
597,60,27		
505,97,12		
536,96,16		
567,94,25		
597,90,28		
506,132,11		
538,132,15		
571,129,21		
598,127,28		
509,198,12		
540,197,16		
571,195,26		
600,191,30		
509,198,10		
541,197,17		
570,195,26		
602,191,29		
510,230,10		
541,228,15		
573,227,27		
602,229,30		

(b) 炮弹下半部分某一特征窗口 24 个特征点的三维坐标
(b) 3D coordinates of 24 feature points within a feature window in the lower part of a shell

图 4 下半部分的测量

Fig. 4 Measurement of the lower part of shell

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9285 & -0.01539 & -0.37101 \\ 0.01999 & 0.99976 & 0.00854 \\ 0.37079 & -0.01535 & 0.29858 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 136.084 & 220.7 \\ -19.403 & 449.30 \\ 63.466 & 661.616 \end{bmatrix}.$$

调用求得的 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} , 实现拼接如图 5 所示。

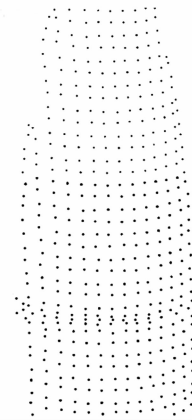


图 5 炮弹拼接结果点云图

Fig. 5 Point cloud of shell merging result

为了对所拼接的结果进行精度分析, 对拼接后炮弹的圆弧曲率半径与实际物体的曲率半径进行了比较, 以最小二乘法拟合球面后得拟合后的曲率半径为 32.75 mm, 而炮弹实物的半径为 33 mm, 误差为 0.25 mm。实验结果表明: 此拼接的方法具有很高的精度。

5 结 论

本文对三维检测系统的工作过程进行了全面分析, 建立起一种完整的大物体面形测量处理方法。实验结果表明: 基于空间编码的图像拼接新方法, 可以实现大尺度三维面形的测量, 拼接数据相对误差 $< 0.8\%$, 是一种经济而实用的数字图像处理技术, 在精密制造行业中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 吴斌, 郝继贵, 杨学友, 等. 大型物体自由曲面测量技术的研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4 增): 294-296.
WU B, ZHU J G, YANG X Y, *et al.*. A study for the free-form surface measurement of large-scale objects[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(4Supp.): 294-296. (in Chinese)
- [2] HSIEH J W, LIAO H Y, FAN K C, *et al.*. Image registration using a new edge-based approach[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1997, 67(2): 112-130.
- [3] MASUDA T. A unified approach to volumetric registration and integration of multiple range image[C]. *Proc. of*

Int. Conf. on Pattern Recognition, 1998(2):977-981.

- [4] FELDMAR J, AYACHE N. Rigid, affine and locally affine registration of free-form surface[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1996, 18(2):99-119.
- [5] JOHNSON A E, HEBERT M. Surface registration by matching oriented points[C]. *Proc. of Int Conf. on 3D Digital Imaging and Modeling*, 1997:121-128.
- [6] CORTELAZZO G M, DORETTO G, LUCCHESI L, et al.. A frequency domain method for registration of range data[C]. *Proceeding of ISCAS, USA: Monterey, CA*, 1998:518-521.
- [7] 刘巽亮. 光学视觉传感[M]. 北京:中国科学技术出版社, 1998.
LIU J L. *Optical Vision Sensing*[M]. Beijing: Science and Technique Publishing House in China, 1998. (in Chinese)
- [8] JESSIE F, WILLIAMS M, SLOANE N J A. Pseudo-random sequences and arrays[J]. *IEEE*, 1976, 64(12):1715-1729.
- [9] HORM B K P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions[J]. *Opt. Soc. Am. Ser. A*, 1987, 4:629-642.
- [10] 顾元亮, 李新军, 吕晓东, 等. 标志点拼接技术在大型薄壁件型面非接触测量中的应用[J]. *塑性工程学报*, 2004, 11(6):26-28.
GU Y L, LI X J, LV X D, et al.. Application of marked point registration in non-contact surface measurement of large dimension sheet parts[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2004, 11(6):26-28. (in Chinese)

作者简介:刘 晨(1965—),男,安徽巢湖人,副教授,主要从事光电测试技术方面的研究。E-mail:liuchen1965@yahoo.com.cn

费业泰(1934—),男,安徽肥东人,教授,博士生导师,主要从事精密测试技术及仪器的研究。

●下期预告

新颖的非对称群峰结构无阀压电泵的理论分析

夏齐霄¹, 张建辉², 雷 红¹, 王守印³, 成 伟²

(1. 北京联合大学 机电学院, 北京 100020; 2. 南京航空航天大学 精密驱动研究所, 江苏 南京 210016;

3. 中国科学院 长春光学精密机械及物理研究所, 吉林 长春 130022)

提出了一种新颖的非对称群峰结构无阀压电泵。该泵利用泵底的空间,沿泵的出入口轴线方向开发出非对称群峰结构,从而在泵腔内部形成串联的渐扩/渐缩流道,替代了传统的安装在泵腔外的渐扩/渐缩流管。当泵工作时,非对称群峰结构能驱使流体形成单一方向流动。建立了数学模型以表达该泵的平均能量损失与流量之间的关系。基于数学模型,分析了该泵的工作原理。最后,试验验证了理论分析的正确性,当一个坡面角固定为 90° ,而另一坡面角在 $10\sim 60^\circ$ 变化时,试验数据与理论计算的误差 $<10\%$ 。