

# 基于随机抽样一致算法的误匹配标志点校正方法

雷玉珍 李中伟 钟 凯 王从军

(华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要** 大型零件三维测量过程中常需要粘贴较多的标志点来进行自动拼接。由于人工粘贴标志点的随机性与噪声等因素的影响,标志点自动匹配时极易产生误匹配标志点,影响了多次测量时点云数据自动拼合的稳定性。针对此问题,在实现标志点自动匹配的基础上引入随机抽样一致(RANSAC)算法去除误匹配标志点。该方法根据选定好的目标模型和相关评判准则,将所有的匹配标志点分为内点和外点,利用内点计算出当前最佳目标模型参数,经过一定次数的随机采样后计算出最终的最佳目标模型参数,从而有效地去除大型零件点云数据自动拼合过程中出现的距离误匹配标志点和噪声误匹配标志点。模拟实验和拼接实例表明该方法是可行的,能有效地提高大型零件点云数据自动拼合的稳定性。

**关键词** 机器视觉;去除误匹配;随机抽样一致算法;标志点自动匹配;自动拼合

中图分类号 TN209 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0315002

## Mismatching Marked Points Correction Method Based on Random Sample Consensus Algorithm

Lei Yuzhen Li Zhongwei Zhong Kai Wang Congjun

(State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

**Abstract** It is often needed to paste many marked points to realize auto-registration in the process of large parts three-dimensional (3D) measurement. Because of the randomness of artificially pasted marked points and noise factors, mismatching marked points often exist in auto-matching, which affect the stability of point-clouds auto-registration for repeated measurements. For this problem, a method is presented which uses random sample consensus (RANSAC) algorithm to remove the mismatching marked points based on the auto-matching of marked points. The method divides all matching marked points into inner points and outer points according to the selected target model and related criteria, calculates the current optimum target model parameters using the inner points and finally calculates the best parameters after a certain times of random sampling. It effectively removes the distance and noise mismatching marked points which are generated in the process of point-clouds auto-registration of large parts. Simulation experiment and registration examples demonstrate that the method is practicable and improves the stability of point-clouds auto-registration effectively.

**Key words** machine vision; correcting mismatching marked points; random sample consensus algorithm; marked points auto-matching; auto-registration

**OCIS codes** 150.1135; 150.3040; 150.3045

## 1 引言

面结构光三维(3D)测量技术由于具有速度快、

分辨率高和非接触等优点,在工业自动检测、产品质量控制、生物医学、虚拟现实和文物复制等众多领域

收稿日期: 2012-09-05; 收到修改稿日期: 2012-11-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(HUST:2012QN036)、材料成形与模具技术国家重点实验室自主创新基金(02-25-110093)、国家科技支撑计划(2012BAF08B03)和欧盟框架七项目“Casting of Large Ti Structures”(265697)资助课题。

作者简介: 雷玉珍(1986—),女,硕士研究生,主要从事光学测量、机器视觉和点云数据处理等方面的研究。

E-mail: little1616@163.com

导师简介: 李中伟(1981—),男,讲师,硕士生导师,主要从事光学测量、机器视觉和数字图像处理等方面的研究。

E-mail: zwli@hust.edu.cn

得到了广泛应用<sup>[1~5]</sup>。使用此技术测量大型零件时,由于设备测量范围有限以及被测物体表面互相遮挡,需要从不同的方位对物体进行多次测量,然后将多次测量的数据拼接到统一坐标系下。在拼接过程中通常引入人工标志点来进行辅助拼接,其关键是实现匹配标志点的查找。张维中等<sup>[6]</sup>提出了一种编码标志点与非编码标志点相结合查找匹配标志点的方法;刘晓利等<sup>[7]</sup>提出了一种基于非编码标志点的相对位置的刚体不变性查找匹配标志点的方法;另外,文献[8]提出了一种利用匹配标志点间的相互约束关系自动找出匹配标志点的方法,该方法建立在标志点的空间特征不变性原理之上,本文采用的就是此方法。但由于人工粘贴标志点的随机性与噪声等因素的影响,用上述方法查找匹配标志点时极易产生误匹配标志点,它们的存在大大降低了大型零件多次测量时点云数据自动拼合的稳定性。

这个问题是机器视觉领域经常存在的问题,在如下文献中已经做了探讨:文献[9]提出了一种渐进式抽样一致性(PROSAC)算法,该算法能够有效地减少计算负担。文献[10]提出了一种基于匹配强度的特征点匹配消除歧义算法,该算法用匹配支持值消除匹配歧义,可以较好地去除一对多误匹配情况。文献[11]提出了一种基于偏最小二乘(PLS)的尺度不变特征变换(SIFT)误匹配校正方法,该方法利用SIFT匹配后的特征点对的位置信息,通过偏最小二乘法进行重新描述,利用定义的影响函数,将影响大的特征点对剔除,可以有效地去除误匹配点。但上述方法都是用于去除基于特征点的拼合过程中出现的误匹配点。

本文提出了一种基于随机抽样一致(RANSAC)算法的去除误匹配标志点的方法,该方法利用标志点的空间特征不变性实现标志点的自动匹配,根据误匹配标志点产生的原因将其分为距离误匹配标志点和噪声误匹配标志点两种类型,利用RANSAC根据一个容许误差将所有的初匹配标志点分为内点和外点,利用内点数据比较准确的特点来进行参数估计,经过多次随机采样后最终确定模型的参数。与现有的去除误匹配点的方法相比,本文所提出的方法具有以下三个优点:1)利用RANSAC思想去除基于标志点的点云数据自动拼合中出现的误匹配标志点;2)能够有效地去除因标志点之间的位置关系不恰当引起的距离误匹配标志点;3)能够有效地去除因噪声等因素引起的噪声误匹配标志点。

## 2 标志点自动匹配原理

本文标志点自动匹配的实是建立在标志点的空间特征不变性原理之上的,即被测物体上标志点间的空间位置关系不随测量视角的变化而变化,利用匹配标志点间的相互约束关系自动找出匹配标志点对。

假设面结构光测量设备在两个不同视角下测得的局部三维点云数据1和点云数据2有公共区域,其中点云数据1中的标志点为: $S=\{s_i|s_i\in S,i=1,2,\dots,k\}$ ,点云2中的标志点为: $T=\{t_i|t_i\in T,i=1,2,\dots,l\}$ 。标志点的自动匹配就是找到两片点云数据中由被测物上同一标志点所构成的匹配标志点对。设 $S$ 和 $T$ 中由被测物上同一标志点构成的标志点子集分别为: $P=\{p_i|p_i\in P,i=1,2,\dots,n\}$ 和 $Q=\{q_i|q_i\in Q,i=1,2,\dots,n\}$ 。其中 $(p_i,q_i)$ 为匹配标志点对, $n\geq 3$ , $p_i,q_i$ 为标志点的空间三维坐标。

根据标志点的空间特征不变性,若 $(p_i,q_i)$ 为匹配标志点对,必满足如下两个判据。

判据1:对于匹配标志点对 $(p_i,q_i)$ 来说, $p_i$ 到标志点集 $S$ 中每个点的距离依次与匹配点 $q_i$ 到标志点集 $T$ 中所有点的距离相比较,满足下式的总个数最多,且个数至少为2,

$$|\|p_i-s_i\|_2-\|q_i-t_i\|_2|<\delta, \quad (1)$$

式中 $\delta$ 为给定的阈值, $\|\cdot\|_2$ 为取2-范数。

判据2:对于匹配标志点对 $(p_i,q_i)$ 来说,至少存在另外两对匹配标志点满足 $p_i,p_j$ 之间的距离和这两点在标志点子集 $Q$ 中的匹配点 $q_i$ 和 $q_j$ 之间的距离相等(实际应用中,只要满足距离误差不超过给定的阈值 $\delta$ 即可认为相等),即满足

$$|\|p_i-p_j\|_2-\|q_i-q_j\|_2|<\delta. \quad (2)$$

通过计算距离矩阵并根据上述两个判据便可实现标志点的自动匹配。但就大型零件的测量而言,由于人工粘贴标志点的随机性与噪声等因素的影响,标志点自动匹配后得到的初匹配标志点集中往往存在一定数量的误匹配标志点,它们的存在大大降低了多次测量时点云数据自动拼合的稳定性。因此,有效地去除误匹配标志点成为提高大型零件点云数据自动拼合稳定性的关键。

## 3 基于RANSAC的误匹配标志点的去除原理及算法实现

### 3.1 误匹配标志点类型

测量大型零件时,标志点自动匹配之后得到的初

匹配标志点集中存在着两种类型的误匹配标志点。

1) 距离误匹配标志点:同一表面上因标志点之间的位置关系不恰当而产生“一对一”误匹配或“一对多”误匹配现象,如图1所示。图1(a)中的 $(p_1, q_1)$ 和 $(p_2, q_2)$ 是两对正确的匹配标志点对,但初匹配之后形成了 $(p_1, q_2)$ 、 $(p_2, q_1)$ 两对误匹配标志点;

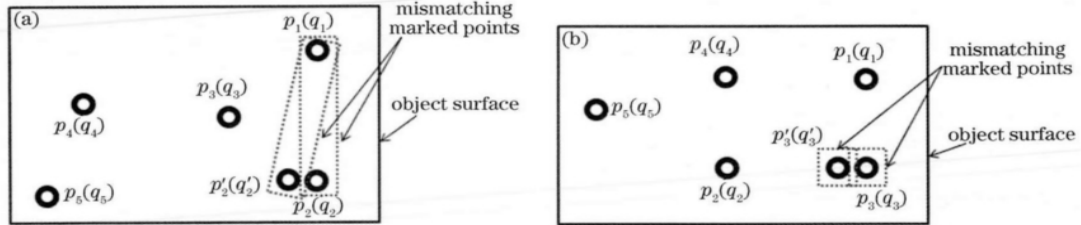


图1 误匹配标志点类型。(a)“一对一”误匹配;(b)“一对多”误匹配

Fig.1 Types of mismatching marked points. (a) One-to-one; (b) one-to-multiple

2) 噪声误匹配标志点:因噪声等因素的影响使得计算出来的标志点的空间三维坐标不准确,而产生“一对一”误匹配或“一对多”误匹配现象,如图1所示。图1(a)中 $(p_1, q_1)$ 和 $(p_2, q_2)$ 是两对正确的匹配标志点对,但由于噪声使得 $q'_2$ 空间三维坐标计算不准确,相当于计算出来的空间三维坐标与 $q_2$ 点的空间三维坐标一样,初匹配之后形成了 $(p_1, q'_2)$ 和 $(p_2, q_1)$ 两对误匹配标志点;同理,图1(b)中标志点初匹配之后,对于点 $p_2$ 形成了两对匹配点 $(p_2, q_2)$ 和 $(p_2, q'_3)$ ,其中 $(p_2, q_2)$ 是正确匹配标志点对, $(p_2, q'_3)$ 是误匹配标志点对。图1(a)中点 $p_1, p_2$ 以及图1(b)中的点 $q'_3$ 即为误匹配标志点,这种因为“噪声”等原因而形成的误匹配标志点即为噪声误匹配标志点。

针对上述两种类型的误匹配标志点,本文提出了一种去除误匹配标志点的方法,该方法建立在RANSAC基础之上,主要用于去除基于标志点的点云数据自动拼合过程中出现的误匹配标志点。

### 3.2 基于RANSAC去除误匹配标志点的原理

RANSAC通过对匹配点进行多次随机取样,每次随机取出尽可能少但充分多个匹配点来确定模型参数,再根据已确定的模型对所有匹配点进行划分,一部分匹配点在此模型的一定误差范围内视为内点,一部分数据在误差范围外视为外点。因为外点是杂乱无章的异常数据,由它所确定的模型,落在误差范围内的匹配点占少数,大部分匹配点都落在误差范围外。而由内点所确定的模型逼近于真实的模型,大多数匹配点会落在误差范围内。经过多次随机取样试验后,RANSAC找出落在误差范围内最

而图1(b)中标志点初匹配之后,对于点 $p_2$ 形成了两对匹配点 $(p_2, q_2)$ 和 $(p_2, q_3)$ ,其中 $(p_2, q_2)$ 是正确匹配标志点对, $(p_2, q_3)$ 是误匹配标志点对。图1(a)中点 $p_1, p_2$ 以及图1(b)中的点 $q_3$ 即为误匹配标志点,这种因“距离”原因而形成的误匹配标志点即为距离误匹配标志点。

多的匹配点的集合,再用此集合来做最优化,最终确定模型的参数。

RANSAC充分利用了所有的初步匹配点,根据一个容许误差将所有的匹配点分为内点和外点,利用内点数据比较准确的特点来进行参数估计,从而剔除了不准确的匹配点<sup>[12]</sup>。

### 3.3 算法实现

1) 根据两片点云数据之间的投影变换关系,确定目标模型。本文采用欧式变换,从不同视角下测得的两片点云数据公共区域的标志点满足如下变换关系:

$$\begin{bmatrix} x_1^i \\ y_1^i \\ z_1^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_2^i \\ y_2^i \\ z_2^i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{11} \\ t_{21} \\ t_{31} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_2^i \\ y_2^i \\ z_2^i \end{bmatrix} + \mathbf{T}, \quad (3)$$

即满足

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{R} \cdot \mathbf{q}_i + \mathbf{T}, \quad (4)$$

式中 $\mathbf{p}_i(x_1^i, y_1^i, z_1^i)$ ,  $\mathbf{q}_i(x_2^i, y_2^i, z_2^i)$ 为一对匹配标志点对, $\mathbf{R}$ 为旋转矩阵, $\mathbf{T}$ 为平移矩阵。本文采用单位四元数法来求解旋转矩阵和平移矩阵。

2) 设定采样次数 $N$ 和初始残余误差 $E_{rr}$ 。

3) 根据1)中的目标模型可知计算旋转矩阵和平移矩阵至少需要3对匹配标志点,因此,从初始匹配标志点集中随机抽取3对匹配标志点作为初始内点,根据文献[13]提供的方法求解旋转矩阵和平移矩阵。

4) 对初始匹配标志点集中所有匹配标志点对根据

$$d = \|\mathbf{p}_i - (\mathbf{R} \cdot \mathbf{q}_i + \mathbf{T})\|_2 \quad (5)$$

计算旋转平移后的距离误差  $d$ , 如果距离误差值小于给定的阈值  $\delta'$ , 则确定该匹配标志点为内点, 算出所有内点并计算内点个数  $m'$ 。

5) 如果内点个数  $m'$  大于等于给定的内点个数  $m$ , 则利用此数据集中所有的内点根据文献[13]提供的方法重新计算旋转矩阵、平移矩阵和残余误差  $e_r$ 。若残余误差小于初始残余误差, 则将此时计算得到的旋转矩阵和平移矩阵作为当前最佳估计目标模型参数, 更新旋转矩阵、平移矩阵和初始残余误差

$E_r$ , 否则转到 6); 如果内点个数  $m'$  小于给定的内点数目  $m$ , 则直接转到 6)。

6) 重复步骤 3)~5), 直到重复次数等于随机采样次数  $N$  即可。将最后一次随机采样后得到的当前最佳估计目标模型参数作为最终的最佳目标模型参数。

综上所述, 基于 RANSAC 的误匹配标志点去除方法实现的流程如图 2 所示。

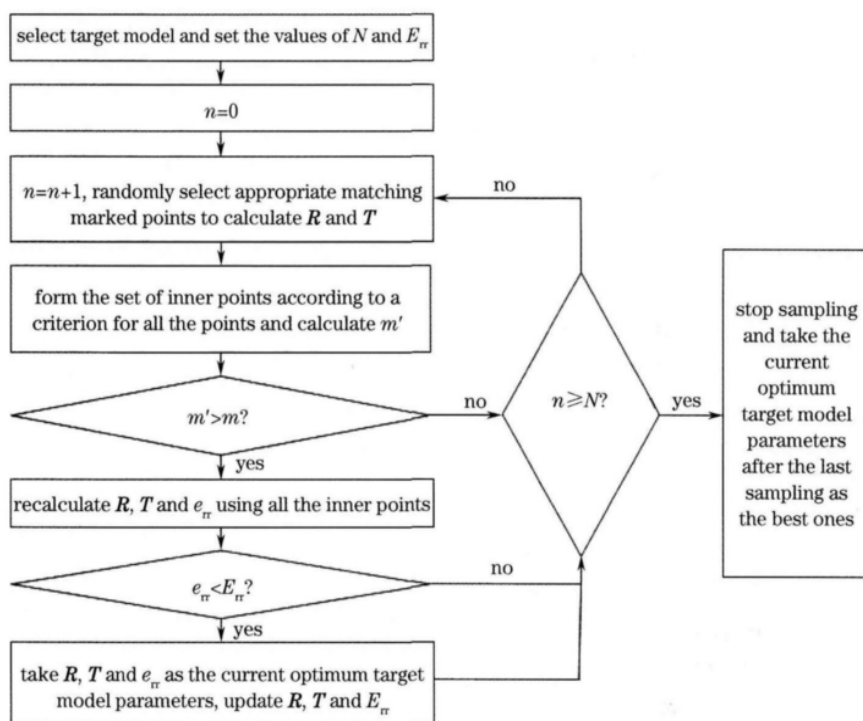


图 2 基于 RANSAC 的误匹配标志点去除方法实现流程图

Fig. 2 Flow chart of correcting mismatching marked points based on RANSAC

## 4 模拟实验

### 4.1 模拟实验设计原理

在被测物体同一表面上无论是距离误匹配标志点还是噪声误匹配标志点, 使用本文提供的方法去除误匹配标志点时, 当随机抽取的 3 对匹配标志点为正确匹配标志点的时候, 计算出来的旋转矩阵和平移矩阵是比较准确的, 而利用此旋转矩阵与平移矩阵计算出来的误匹配标志点的实际值与理论值之间的距离误差至少为 10 mm(标志点半径为 5 mm), 以图 1(a)中的情况举例说明如下:

$p_1$  是距离误匹配标志点, 当随机抽取的 3 对匹配标志点分别为  $(p_3, q_3)$ 、 $(p_4, q_4)$ 、 $(p_5, q_5)$  时, 利用这 3 对匹配标志点计算出来的  $p_1$  三维坐标理论值

与实际值之间的距离误差为  $\delta' = \|R \cdot q_2 + T - p_1\|_2 \geq 10(\text{mm})$ 。

假设两个标志点集中的标志点对完全匹配, 残余误差为零, 对任意一个标志点集中某个标志点的三维坐标沿三个坐标轴正方向均施加一个均等的大小为  $t$  的位移偏差, 设定  $\delta'$  值, 则该标志点成为误匹配标志点的条件为  $t \geq \frac{\delta'}{\sqrt{3}}$ 。

### 4.2 模拟实验

用面结构光测量设备测得 5 个标志点的三维数据(如表 1 所示), 构成标志点集  $A$ , 根据随意给定的

旋转矩阵  $R = \begin{bmatrix} 0.1402 & 0.5240 & -0.8402 \\ -0.8906 & 0.4376 & 0.1242 \\ 0.4327 & 0.7308 & 0.5280 \end{bmatrix}$  和

平移矩阵  $T = \begin{bmatrix} 577.0646 \\ 179.9396 \\ 99.4501 \end{bmatrix}$  计算坐标转换后对应标志

点的三维坐标,得到标志点集  $B$ 。假设  $A$  和  $B$  为标志点自动匹配后的初始匹配标志点集。为了模拟更加真实的实验环境,现对标志点集  $B$  中  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $p_4$  四个点均施加一个较小的位移偏差(均值为 0.2, 方差为 0.001 成正态分布的三维高斯噪声),对点  $p_5$  施加一个近似线性增加的位移偏差[均值随函数  $y=x(x \geq 0)$  线性增加,方差为 0.01 成正态分布的三维高斯噪声],在 Matlab 软件中根据本文提供的方法进行模拟并绘制残余误差  $e_r$  随位移偏差均值(MVDD)大小的变化曲线,结果如图 3 所示。模拟实验过程中用到的相关参数设置如表 2 所示。

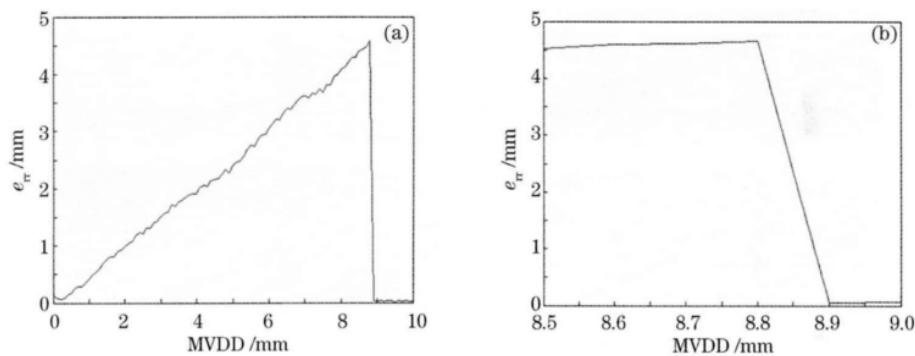


图 3 模拟实验结果。(a)残余误差随位移偏差均值大小的变化曲线;(b)局部放大

Fig. 3 Results of simulation experiment. (a) Curve of  $e_r$  with MVDD; (b) partially enlarged

从实验结果可以看出:当位移偏差小于一定值的时候,依然把点  $p_5$  视为正确匹配标志点,因此随着位移偏差的增加,旋转矩阵和平移矩阵的计算误差就会增大,残余误差也随之增大;但当位移偏差超过该值的时候,残余误差值就会迅速下降而后基本保持稳定,说明此时点  $p_5$  已成为误匹配标志点而被除去,由图 3(b)知该值约为 8.8 mm,与理论值  $8.661 \text{ mm} \left( \frac{\delta'}{\sqrt{3}} = \frac{15}{\sqrt{3}} = 8.661 \right)$  很接近(本模拟实验沿三坐标轴所施加的位移偏差不是均等的而是成正态分布的高斯噪声,所以不可能与理论值完全一样,同时也说明了残余误差随位移偏差均值的下降曲线不是一条垂线而是有一个过程)。本实验同时也证明了本文提出的基于 RANSAC 的去除误匹配标志点的方法是可行的,而且效果良好。

## 5 拼接实例

本文实验数据是由华中科技大学快速制造中心

表 1 五个标志点的三维坐标

Table 1 3D coordinates of five marked points

	$x/\text{mm}$	$y/\text{mm}$	$z/\text{mm}$
$p_1$	-71.790161	44.201721	622.34418
$p_2$	-53.609787	107.64728	575.89673
$p_3$	-46.32478	6.4283447	659.98187
$p_4$	-48.905689	-84.811157	740.90387
$p_5$	-27.774952	-41.80011	646.12445

表 2 模拟实验相关参数

Table 2 Related parameters in simulation experiment

$N$	$\delta'/\text{mm}$	$m$	$E_r/\text{mm}$
50	15	4	100

三维测量组自主研发的 PowerScan-II 型面结构光三维测量设备获得的,该设备的硬件主要包括两个大恒 1394 接口的工业相机,16 mm PENTAX 镜头和一个数字光栅投影仪,单次的测量范围为  $350 \text{ mm} \times 280 \text{ mm}$ ,单次测量误差为  $\pm 0.03 \text{ mm}$ 。拼接的标志点是人工粘贴在物体表面的黑底白面的圆形标志点,粘贴的位置应选在被测物体上相对平坦的区域。

### 5.1 大型薄壁零件

采用本文提出的方法对如图 4(a)所示的大型薄壁零件( $880 \text{ mm} \times 177 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ )进行了 26 次有重叠测量,得到自动拼接后的整体点云数据,如图 4(b)所示。拼接精度采用标志点的平均重合度误差,整体拼接误差为  $0.0340 \text{ mm}$ 。

为了更好地体现本文所提方法的优势所在,同时用未采用 RANSAC 去除误匹配标志点的测量软件对该零件进行测量。当测量到第 13 组数据的时候,便提示拼合错误。因此本实验中对采用了 RANSAC 去除误匹配标志点的测量软件下测得的

前 12 组数据[点云数据 1,如图 4(c)所示]和单独测量的第 13 组数据[点云数据 2,如图 4(d)所示]进行如下处理:对两片点云数据中的标志点进行初匹配,得到初始匹配标志点集,求取旋转矩阵和平移矩阵,而后将点云数据 2 转换到点云数据 1 的坐标系下,

将转换后的点云数据在 Geomagic 软件中进行显示,拼合结果如图 4(e)所示。采用 RANSAC 去除误匹配标志点后的点云数据自动拼合结果如图 4(f)所示。

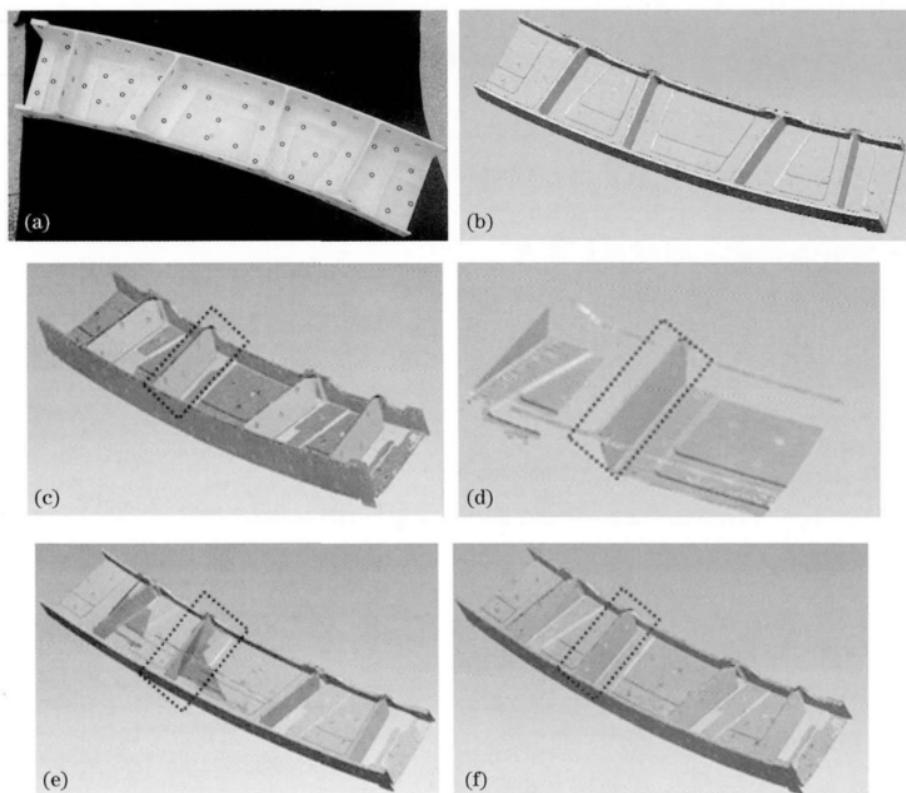


图 4 大型薄壁零件点云数据的拼合。(a)被测物实物图;(b)整体点云数据;(c)点云数据 1;(d)点云数据 2;  
(e)未采用 RANSAC 思想的拼合结果;(f)采用 RANSAC 思想的拼合结果

Fig. 4 Point-clouds registration of large thin-walled part. (a) Original part; (b) whole point-clouds; (c) point-clouds 1;  
(d) point-clouds 2; (e) without RANSAC; (f) with RANSAC

## 5.2 大型复杂曲面零件

为了更好地验证本文所提方法的可行性,对如图 5(a)所示的大型复杂曲面零件(510 mm×260 mm×60 mm)进行了 45 次有重叠测量,得到自动拼接后的整体点云数据,如图 5(b)所示。拼接精度采用标志点的平均重合度误差,整体拼接误差为 0.0335 mm。

采用与大型薄壁零件相同的测量方法对零件进行测量(本实验中从零件前表面开始测量),当测量到第 18 组数据的时候,便提示拼合错误。对测得的前 17 组数据[点云数据 1,如图 5(c)所示]和单独测量的第 18 组数据[点云数据 2,如图 5(d)所示]进行与大型薄壁零件相同的处理,处理结果如下:未采用

RANSAC 去除误匹配标志点后的点云数据拼合结果如图 5(e)所示;采用 RANSAC 去除误匹配标志点后的点云数据自动拼合结果如图 5(f)所示。

## 5.3 实验结果分析

从上述两个拼接实例的实验结果可以发现,在基于标志点的大型零件点云数据自动拼合过程中如果不及及时有效地去除误匹配标志点,则随着测量次数的增加自动拼合的总体误差也会增大,甚至导致拼合失败。而本文所提出的基于 RANSAC 的去除误匹配标志点的方法能够有效地去除自动拼合过程中出现的误匹配标志点,保证自动拼合的顺利完成,从而有效地提高多次测量时点云数据自动拼合的稳定性。

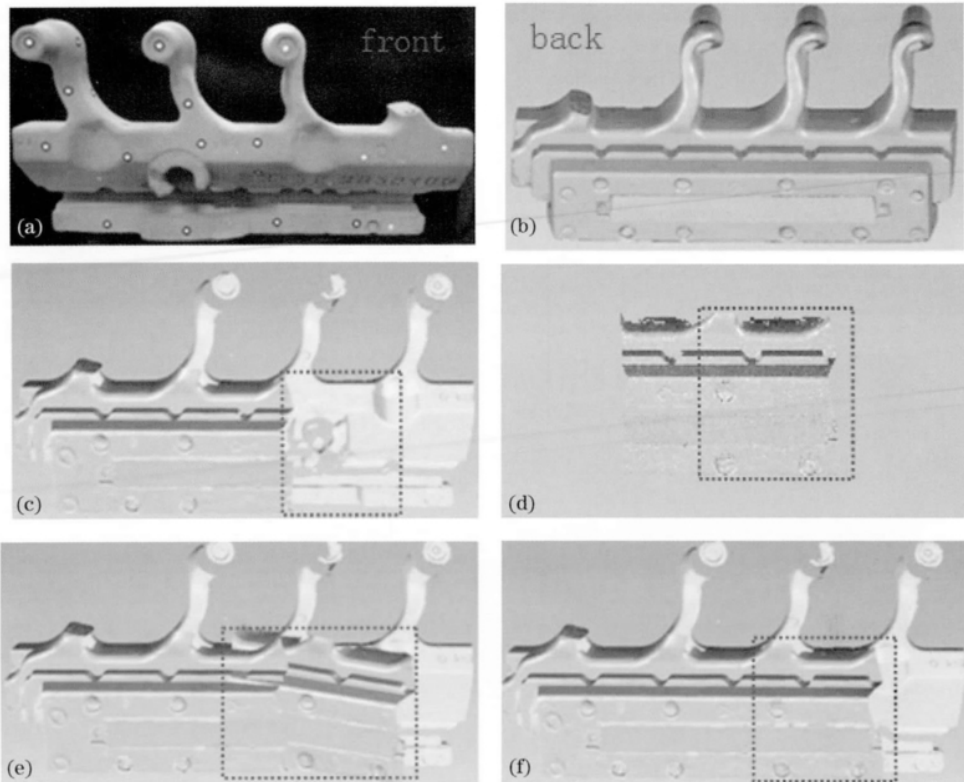


图5 大型复杂曲面零件点云数据的拼合。(a)被测物实物图;(b)整体点云数据;(c)点云数据 1;(d)点云数据 2;  
(e)未采用 RANSAC 思想的拼合结果;(f)采用 RANSAC 思想的拼合结果

Fig.5 Point-clouds registration of large complex-surface part. (a) Original part; (b) whole point-clouds;  
(c) point-clouds 1; (d) point-clouds 2; (e) without RANSAC; (f) with RANSAC

## 6 结 论

提出一种基于 RANSAC 的去除误匹配标志点的方法。该方法在基于标志点空间特征不变性原理实现标志点自动匹配的基础上充分利用 RANSAC 思想在参数估计方面的优势,通过随机采样并根据选定好的目标模型和相关评判准则,将所有的匹配标志点分为内点和外点,并根据内点比较准确的优点计算出当前最佳目标模型参数,经过一定次数的采样后,便可计算出最终的最佳目标模型参数,从而有效地去除了大型零件点云数据自动拼合过程中出现的距离误匹配标志点和噪声误匹配标志点的影响。模拟实验和拼接实例表明该方法是可行的,而且效果良好,提高了多次测量时点云数据自动拼合的稳定性,适用于大型零件的快速三维测量。

## 参 考 文 献

- 1 Li Zhongwei, Shi Yusheng, Zhong Kai *et al.*. Projector calibration algorithm for the structured light measurement technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3061~3065  
李中伟, 史玉升, 钟 凯 等. 结构光测量技术中的投影仪标定算

法[J]. 光学学报, 2009, **29**(11): 3061~3065

- 2 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun *et al.*. A new calibration method for two-sensor measurement system based on line structure light[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 259~264  
吴庆阳, 苏显渝, 向立群 等. 线结构光双传感器测量系统的标定方法[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 259~264
- 3 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 4 Liu Xiaoli, Peng Xiang, Yin Yongkai *et al.*. 3D auto-inspection for large thin-wall object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(3): 0312006  
刘晓利, 彭 翔, 殷永凯 等. 大尺寸薄壳物体表面的三维光学自动检测[J]. 光学学报, 2011, **31**(3): 0312006
- 5 Zhai Aiping, Cao Yiping, He Yuhang. 3D measurement with orthogonal composite structure light based on two-plus-one phase-shifting algorithm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0208003  
翟爱平, 曹益平, 何宇航. 基于“2+1”相移算法的正交复合光三维测量方法[J]. 中国激光, 2012, **39**(2): 0208003
- 6 Zhang Weizhong, Zhang Liyan, Zhang Hui *et al.*. 3D reconstruction from multiple perspective views with marked points[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, **17**(16): 1711~1715  
张维中, 张丽艳, 张 辉 等. 基于标记点的多帧透视图像三维重建算法[J]. 中国机械工程, 2006, **17**(16): 1711~1715
- 7 Liu Xiaoli, Peng Xiang, Yin Yongkai *et al.*. A method for global registration of range data combined with markers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1010~1014

- 刘晓利, 彭 翔, 殷永凯 等. 借助标志点的深度数据全局匹配方法[J]. 光学学报, 2009, **29**(4): 1010~1014
- 8 Liang Yunbo, Deng Wenyi, Lou Xiaoping *et al.*. Automatic registration method of multi-view 3D data based on marked points [J]. *J. Beijing Information Science and Technology University*, 2010, **25**(1): 30~33
- 梁云波, 邓文怡, 娄小平 等. 基于标志点的多视三维数据自动拼接方法[J]. 北京信息科技大学学报, 2010, **25**(1): 30~33
- 9 O. Chum, J. Matas. Matching with PROSAC-progressive sample consensus[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2005. 220~226
- 10 Li Zhi, Wang Yan, Yang Dawei. Research of algorithm for disambiguating matching of feature points in image matching[J]. *Transactions of Shenyang Ligong University*, 2008, **27**(5): 46~49
- 李 志, 王 琰, 杨大为. 一种基于匹配强度的特征点匹配消除歧义算法[J]. 沈阳理工大学学报, 2008, **27**(5): 46~49
- 11 Yan Weidong, Tian Zheng, Wen Jinhuan *et al.*. SIFT mismatching correction based on partial least squares [J]. *J. Computer Applications*, 2012, **32**(5): 1255~1257, 1268
- 延伟东, 田 铮, 温金环 等. 基于偏最小二乘的 SIFT 误匹配校正方法[J]. 计算机应用, 2012, **32**(5): 1255~1257, 1268
- 12 Zhou Jianjun, Ouyang Ning, Zhang Tong *et al.*. Image mosaic method based on RANSAC [J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, **30**(24): 5692~5694
- 周剑军, 欧阳宁, 张 彤 等. 基于 RANSAC 的图像拼接方法[J]. 计算机工程与设计, 2009, **30**(24): 5692~5694
- 13 B. K. P. Horn. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternion [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1987, **4**(4): 629~642

栏目编辑: 李文喆