

基于标志点的测量数据自动拼接方法

欧阳祥波 宗志坚 熊会元

(中山大学工学院, 广州 510275)

摘要 为了对测量数据进行自动拼接, 提出了一种新的数据拼接方法。该方法根据标志点的空间拓扑关系, 先利用关系匹配自动找出对应的标志点对, 以降低数据拼接的操作复杂性; 同时应用 Rodrigues 参数表示位姿变换矩阵, 并引入中间参数进行分步求解。数据拼接实例的拼接结果表明, 该方法计算过程简单、稳定性好。

关键词 自动拼接 标志点 关系匹配 Rodrigues 参数

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)02-0298-04

An Automatic Registration Method for Point-clouds Based on Marked Points

OUYANG Xiang-bo ZONG Zhizhan XIONG Huiruan

(College of Engineering, Sun Yat-Sun University, Guangzhou 510275)

Abstract To register point sets automatically, a method was proposed in this paper. It used the relational matching to get the counterparts of marked points based on the topology and introduced the Rodrigues parameters to describe the transition matrix. The matrix was solved simply and steadily by using a temporary variant. Finally a registration experiment was presented.

Keywords automatic registration, marked point, relational matching, Rodrigues parameters

1 引言

在 3 维物体外形检测的过程中, 由于受设备测量范围的限制或者被测物体表面互相遮挡, 一次只能获得物体的局部数据。这就需要从不同的方位对物体进行多次测量, 然后通过对测得的数据进行拼接来生成一个统一坐标系下的 3 维数据点集。由于测量数据的拼接是一种刚性的运动, 因此可以通过求得不同测量方位的相对位姿来实现, 目前主要用以下 3 种方法解决这个问题:

(1) 精确控制测量设备或物体的运动^[1,2], 即由控制系统提供准确的旋转矩阵 R 和平移 T 。虽然该方法的拼接精度高, 但需要精密的辅助设备, 由于体积庞大、操作复杂, 因此不便于实际应用。

(2) 通过 ICP 算法 (iterative closest point

registration) 进行拼接^[3]。该方法需要相邻的两片测量数据有重叠部分以及若干明确的对应点, 拼接时, 先以这些点作为初始公共特征点, 再通过迭代算法求解坐标变换矩阵来进行拼接。该方法不但算法复杂、效率低, 而且精度也不高。

(3) 先在两次测量数据的公共区域布置若干标志点, 再通过标志点的对齐计算变换矩阵^[4]来进行拼接。这种方法操作简单, 并具有一定的拼接精度。通常由于该方法需要利用手工方式明确指定标志点的对应关系, 故操作效率比较低。

本文提出一种基于标志点的拼接方法。该方法是根据标志点的空间拓扑关系, 利用关系匹配自动找出对应的标志点对, 同时应用 Rodrigues 参数表示位姿变换矩阵, 并通过引入中间参数简化了求解过程。

基金项目: 广东省科技厅项目 (2003A1040704, 20070928021)

收稿日期: 2006-07-03 改回日期: 2006-08-25

第一作者简介: 欧阳祥波 (1973~), 男, 博士研究生。从事计算机视觉测量、逆向工程等领域的研究。E-mail: oyxb126@126.com

2 对应点查找

对应点查找就是先在被测物体表面粘贴一系列特殊的图形标记或球形标记, 然后采用各种非接触式、接触式测量方法, 来方便地获得标志点的空间坐标。但该标志点的位置应随机地分布在两次测量时公共区域的最外围, 同时需具有尽可能大的多边形面积; 标志点的位置应选择容易测量和不会发生变形的地方; 标志点的设计和获取可参看文献 [5]。本节主要讨论在已知标志点集的情况下, 如何获得标志点之间的对应关系。

2.1 标志点集的描述

任何一个标志点集均由以下 3 部分所组成^[6]:

(1) 一组基本特征元素。例如点、线和面, 在关系匹配中, 它们组成一个集合, 其中的面主要是三角形平面。例如图 1 所示的点集 A , 其特征集合 F 由 4 个点, 6 条边和 4 个面组成, 即

$$F = \{v_1, \dots, v_4; e_1, \dots, e_6; a_1, \dots, a_4\}$$

(2) 特征元素的空间关系。例如, 边元素由点对定义, 仍以图 1 为例, 边元素由以下关系定义:

$$R_{\text{edge}} = \{ \langle v_1, v_2 \rangle, \langle v_1, v_3 \rangle, \langle v_1, v_4 \rangle, \langle v_2, v_3 \rangle, \langle v_2, v_4 \rangle, \langle v_3, v_4 \rangle \}$$

面元素由关系 R_{area} 定义:

$$R_{\text{area}} = \{ \langle e_1, e_2, e_3 \rangle, \langle e_1, e_2, e_4 \rangle, \langle e_1, e_3, e_4 \rangle, \langle e_2, e_3, e_4 \rangle \}$$

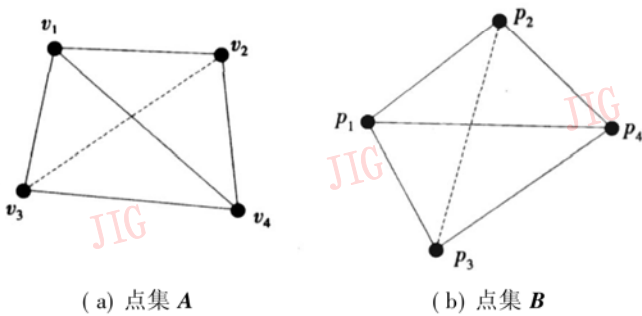


图 1 标志点集

Fig 1 Marked points

(3) 特征元素的性质, 主要指几何性质, 例如点的坐标、边的长度、面的面积等。

本文采用图 2 所示的层次结构记录一个标志点集, 其中最上层为连接任意 3 个标志点所形成的三角面, 中间层为三角面的 3 条边, 最下层为各条边的顶点。该结构基本包括了标志点集描述的 3 个部分。

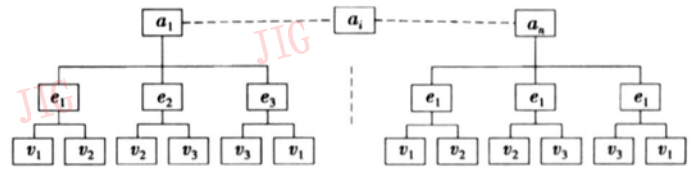


图 2 标志点集的层次结构描述

Fig 2 Description marked points using hierarchy

2.2 对应点的查找

为了获得标志点的对应关系, 需要设计一个变换 h , 将点集 A 上的点映射到点集 B , 然后比较特征元素性质的相似程度, 而具有最大相似程度的变换就确定了两个点集之间的对应关系。例如图 1 中的点集 A 与点集 B , 假设变换 h_1 为

$$\begin{aligned} v_1 &\rightarrow p_1; & v_2 &\rightarrow p_2 \\ v_3 &\rightarrow p_3; & v_4 &\rightarrow p_4 \end{aligned}$$

则点集 A 、 B 具有最大的相似程度。

对应点的查找就是在 一组变换 $H = \{h_1, h_2, \dots, h_n\}$ 中, 寻找最佳的变换, 使得两个点集具有最大的相似程度, 这个过程称为关系匹配。在两个标志点集中, 由于可能的匹配是大量的, 并且不是每一个点都能够在另一个点集中找到对应点, 因此最佳匹配的寻找时间可能会很长。为了加速计算, 本文导出以下一种分级的最佳匹配寻找方法:

(1) 比较三角面元素的面积, 根据式 (1) 判断两个面的面积是否兼容, 其中 A_1, A_2 为三角形的面积, T_A (下角 A 代表 area) 为预先设定的面积阈值; 找出所有面积兼容的面:

$$-T_A < \frac{A_1 - A_2}{\min(A_1, A_2)} < T_A \quad (1)$$

(2) 对于面积兼容的三角面, 可根据式 (2) 找出长度兼容的边的数量 N_{edge} , 其中 L_1, L_2 为三角形的边长, T_L (L 代表 length) 为预先设定的边长阈值; 如果 $N_{\text{edge}} = 3$ 则认为两个三角面兼容;

$$-T_L < \frac{L_1 - L_2}{\min(L_1, L_2)} < T_L \quad (2)$$

(3) 对兼容的三角面, 则记录 3 个点之间的对应关系; 如果没有兼容的三角面, 则这两个标志点集不能进行拼接;

面积阈值和边长阈值是寻找最佳匹配的关键参数, 它们与测量系统的测量范围、测量误差以及误差的统计学分布规律有着密切的联系, 在实际应用中需要根据设备的具体情况进行设定。在本文的拼接实例中, 边长阈值设定为 2.5%, 面积阈值设定

为 5%。

通过以上的步骤,即可以快速可靠地找到两个标志点集的对应点。对于一个精度可靠的测量系统来说,当兼容三角面的数量大于 1 的时候,一个标志点对将会在数个兼容的三角面中被找到;但一个标志点最多只能找到一个对应点。

3 变换矩阵的求解

设点 P 在坐标系 C_1, C_2 中的坐标分别为 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$, C_1, C_2 之间的相对旋转矩阵为 R , 相对平移向量为 $t = (t_x, t_y, t_z)^T$, 则

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = R \cdot \begin{pmatrix} x_2 + t_x \\ y_2 + t_y \\ z_2 + t_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

旋转正交矩阵 R 可利用反对称矩阵

$$U = \begin{pmatrix} 0 & -u_z & u_y \\ u_z & 0 & -u_x \\ -u_y & u_x & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

表示为

$$R = (I - U)^{-1} \cdot (I + U) \quad (5)$$

向量 $U = (u_x, u_y, u_z)$ 为坐标系 C_2 相对于坐标系 C_1 的 Rodrigues 参数^[7], 其几何意义表示刚体绕定点转动的旋转轴方向。

将式 (4)、式 (5) 带入式 (3), 并按已知量和未知量进行整理, 可得

$$\begin{pmatrix} 0 & z_1 + z_2 & -(y_1 + y_2) \\ -(z_1 + z_2) & 0 & x_1 + x_2 \\ y_1 + y_2 & x_1 + x_2 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & -u_z & u_y \\ u_z & 1 & -u_x \\ -u_y & u_x & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}$$

引入辅助参数

$$\begin{pmatrix} a \\ b \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -u_z & u_y \\ u_z & 1 & -u_x \\ -u_y & u_x & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} \quad (6)$$

整理上式, 得

$$\begin{pmatrix} 0 & (z_1 + z_2) & -(y_1 + y_2) & 1 & 0 & 0 \\ -(z_1 + z_2) & 0 & x_1 + x_2 & 0 & 1 & 0 \\ y_1 + y_2 & -(x_1 + x_2) & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ a \\ b \\ d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \\ z_1 - z_2 \end{pmatrix}$$

简记为 $M \cdot X = \Delta$

对于 $n (n \geq 3)$ 个标志点对, 可以得到如下的方程组:

$$\begin{pmatrix} M_1 \\ M_2 \\ \vdots \\ M_n \end{pmatrix} \cdot X = \begin{pmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \vdots \\ \Delta_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

式 (7) 是一个系数矩阵列满秩的线性方程组, 若用最小二乘法求解, 则可得到 Rodrigues 参数以及引入的辅助参数。根据式 (5) 可求得旋转矩阵 R , 根据式 (6) 可求得平移向量 t 即

$$\begin{pmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{pmatrix} = \frac{1}{1 + u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \cdot \begin{pmatrix} 1 + u_x^2 & u_x \cdot u_y + u_z & u_x \cdot u_z - u_y \\ u_x \cdot u_y - u_z & 1 + u_y^2 & u_y \cdot u_z + u_x \\ u_x \cdot u_z + u_y & u_y \cdot u_z - u_x & 1 + u_z^2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a \\ b \\ d \end{pmatrix}$$

4 数据拼接实例

本文的试验数据采用双目立体视觉测量系统获得, 该系统的硬件主要包括两个 DH HV 1300FC 摄像机、M 2514MP 镜头和一个光栅投影仪, 该系统单次测量的范围为 $300\text{mm} \times 400\text{mm}$, 单次测量误差小于 0.05mm 。对于较大的物体来说, 由于单次测量只能获得被测物体的局部数据, 因此必须进行数据拼接。拼接的标志点是人工贴在物体表面的易于识别的图形, 粘贴的位置应选择曲面上相对平坦的区域。出于精度和速度方面的考虑, 在单次拼接时, 通常选择 4~6 个标志点。

图 3(a)、图 3(b) 为相邻的两片测量数据, 数据之间有一定的重叠部分, 其中的彩色十字形是测量系统检测出的标志点。利用本文方法, 首先在两个标志点集中找出对应的标志点对, 图 3(a)、图 3(b) 中颜色相同的十字形为一个标志点对; 然后以标志点对为基础, 解得刚性变换的旋转矩阵和平移向量。

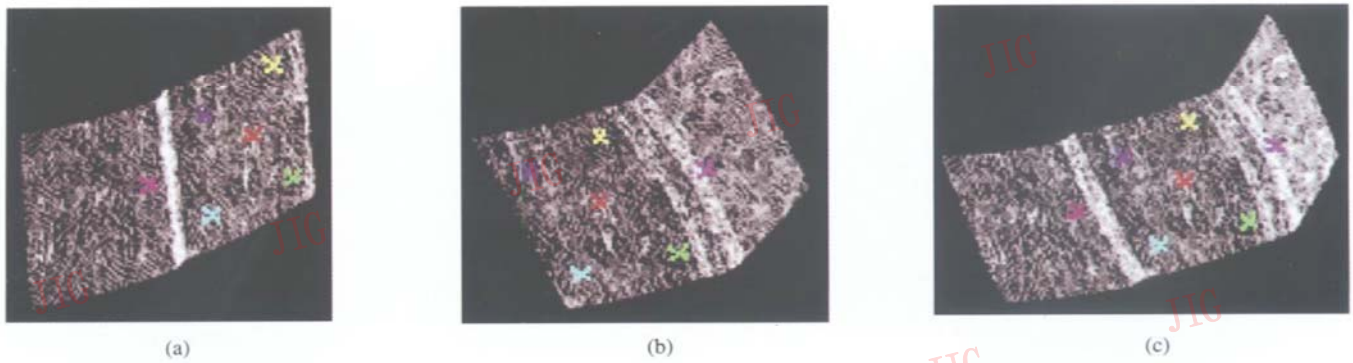


图 3 拼解实例

Fig 3 Example of registration

图 3(c)为拼接后的点云数据,图 3(c)没有对重叠区域进行均匀化处理。表 1所示为拼接后标志点对之间的距离误差,这个误差值远小于测量系统的测量误差,这说明采用本方法能够较好地实现测量数据的拼接,并且精度完全满足实际的需要。

表 1 标志点拼接误差

Tab 1 The error of mached counterpoints

点对	1-a	2-b	3-c	4-d	5-e
距离 (mm)	0.0207	0.0203	0.0165	0.0201	0.0220

5 结 论

本文给出的数据拼接方法能够自动识别标志点集之间的对应关系,并有效地提高了数据测量的操作效率; Rodrigues 参数的引入,使得位姿矩阵的求解过程主要是一些低阶向量和矩阵的代数运算,且计算简单、稳定性好。该方法既适合于 3 个对应点,也适合于 3 个以上对应点的测量数据拼接,且操作简单,精度高,非常适合于实际应用。

参考文献 (References)

- 1 Chan V H, Bradley C, Vickers G W. A multi-sensor approach to automating coordinate measuring machine based reverse engineering [J]. Computers in Industry, 2001, 44(2): 105~115.
- 2 Xie Ze-xiao, Zhang Qiu-mei, Zhang Guo-xiong. Modeling and calibration of a structured-light sensor-based five-axis scanning system [J]. Measurement, 2004, 36(2): 185~194.
- 3 Liu Yong-huai. Improving ICP with easy implementation for free form surface matching [J]. Pattern Recognition, 2004, 37(2): 211~226.
- 4 Shen Hai-ping, Da Fei-peng, Lei Jia-yong. Research of point-clouds registration based on least-square method [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 10(9): 1112~1116 [沈海平, 达飞鹏, 雷家勇. 基于最小二乘法的点云数据拼接研究 [J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(9): 1112~1116].
- 5 Ahn S J, Rauh W. Circular coded target for automation of optical 3D-measurement and camera calibration [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2001, 15(6): 905~919.
- 6 Zhang Zhu-xun, Zhang Jian-qing. Digital Photogrammetry [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 1997: 198~202 [张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997: 198~202].
- 7 Zhou Jiang-hua, Miao Yu-hong, Wang Ming-hai. Attitude representation using Rodrigues parameter [J]. Journal of Astronautics, 2004, 25(5): 514~519 [周江华, 苗育红, 王明海. 姿态运动的 Rodrigues 参数描述 [J]. 宇航学报, 2004, 25(5): 514~519].