

# 物体多视角三维图象对齐复位的一种新方法

衡 伟

(东南大学移动通信国家重点实验室, 南京 210096)

**摘 要** 为了高质量准确地对物体多视角三维图象进行快速对齐复位, 提出了一种将多个视角三维自然曲面数据精确对齐复位于同一坐标系中的新型迭代方法. 该方法根据三维自然曲面的共同特性, 并采用不同视角中对应曲面部分的若干单元法向量误差最小及与其对应顶点距离最小的迭代准则来进行对齐复位. 同时还详细地叙述了迭代算法的过程, 并讨论了提高算法速度与降低累积误差的方法. 实例表明, 该算法在无需约束三维数据采集过程和额外增加三维数据采集设备及操作的情况下, 不仅速度快, 而且由复位后的各视角三维曲面形成的整体表面效果自然逼真.

**关键词** 图象处理 三维图象 对齐复位

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-8961(2002)09-0922-04

## A Novel Approach for Aligning 3D Images Captured from Multiple Views of an Object Surface

HENG Wei

(National Mobile Communications Research Lab., Southeast Univ., Nanjing 210096)

**Abstract** A novel iterative approach is proposed for precise aligning multiple 3D images captured from different views of a natural object surface in one reference coordinate system. Based on common characteristic of 3D natural object surface, a hybrid principle is used which minimizes the difference between corresponded cell plane's vectors on different view's 3D images and the distances between vertexes and corresponded cell planes of another view. The process of iterative algorithm is described in detail. The formula derivation of algorithm is given. The ways to accelerate the iterative algorithm and the ways to avoid error accumulation are discussed and analyzed in detail. The examples show that the algorithm can reach high speed of alignment and perfect effect of whole surface made by aligned 3D images taken from different views without any restriction, any additional equipment and any additional operation when capturing 3D images.

**Keywords** Image processing, 3D image, Alignment

## 0 引 言

由于从各个角度获得的物体的三维曲面数据, 其参考坐标系不同, 因此必须分别通过一定的刚体坐标变换, 使之相互对齐、复位于同一个参考坐标系中, 以便使得这些三维数据之间原有的相对空间位置关系得以恢复, 并融合成一个整体来反映被观察物体较完整的曲表面. 通常三维曲面数据的对齐复

位方法可分为主动式和被动式两类, 其中, 主动式方法是指在进行各个视角三维曲面的数据采集时, 就主动地去记录可以直接导出各观察角度相互位置的信息, 如 Goshtasby 等人设计的关于牙齿三维扫描<sup>[1]</sup>的方法, 但有需要精密昂贵的位移装置等方面的严格限制; 被动式方法是指从各个视角三维曲面数据本身信息中提取相互之间的位置关系, 由于其对采集过程不附加任何特殊的操作规程和限制, 因而具有非常广泛的应用前景. 这类方法目前主要有

基于表面特征的对齐复位方法<sup>[2]</sup>及基于点匹配的对齐复位方法<sup>[3,4]</sup>。这些方法主要是通过对应区域最邻近点误差最小准则来迭代求坐标变换关系的,但是对自然物体曲表面的对应区域进行对齐复位的一个更重要的标志是对应位置曲表面法向量的吻合。本文将提出一种基于相关曲面部分若干单元面法向量误差最小及与其相关顶点误差最小迭代准则的对齐复位方法。

## 1 对齐复位算法

### 1.1 对齐复位的基本前提

由于在没有预设相互位置关系的情况下,只有从曲面之间存在的共同特性中提取出相互之间位置关系,因而曲面之间应存在一定的相关性是对齐复位的基本前提,具体就是,两个曲面应包含有被观测物体表面的共同区域,以及两曲面之间的共同区域具有随机的形状(即非平面或球面等规则的形状)。这两个要求在实际自然物体表面的三维观察中很容易得到满足。

### 1.2 对齐复位方法

在两个要进行对齐复位的曲面数据中,根据前面的描述,虽无法确定这两个曲面上点与点的对应关系,但它们包括有被观察物体曲表面的共同区域。如果将各个曲表面都划分成若干很小的面单元,则每个面单元都近似于平面的一部分,其相邻各面单元法向量变化的规律在不同观察角度中亦具有一致性,且当两曲面实现最佳对齐复位、共同区域吻合时,其对应的各面单元法向量也应达到最佳吻合。

根据这些基本原理,基于相关曲面部分若干单元面法向量误差最小及与其相关顶点误差最小的迭代准则的对齐复位方法可描述如下:

如图 1 所示,  $A$  和  $B$  分别为两个观察角度三维曲面数据,且满足对齐复位的两个前提条件。设定曲

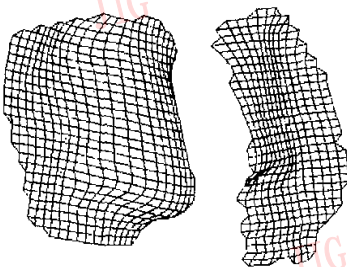


图 1 两个观察角度三维曲面数据面单元划分

面数据  $A$  不变,寻找  $B$  的旋转变换矩阵  $R$ 、平移向量  $T$ :

(1) 给定一抽样间隔,将上述两曲面分别划分为若干三角形面单元  $g_a, g_b$  (为清晰起见,图中的网络线仅连成四边形)及若干顶点  $v_a, v_b$ , 其中,  $g_a \in G_A, g_b \in G_B$ , 及顶点  $v_a \in V_A, v_b \in V_B$ 。

(2) 设定初始变换矩阵  $R, T$ , 其中

$$R = \begin{bmatrix} \cos\varphi \cos\theta & \sin\varphi \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\varphi \cos\theta - \cos\varphi \sin\theta \cos\psi & \cos\varphi \cos\theta \sin\psi + \sin\varphi \cos\psi & \cos\theta \sin\psi \\ \sin\varphi \sin\theta + \cos\varphi \sin\theta \cos\psi & -\cos\varphi \sin\theta + \sin\varphi \sin\theta \cos\psi & \cos\theta \cos\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

角  $\varphi, \theta, \psi$  分别为绕  $x, y, z$  轴旋转的角度

$$T = [T_x, T_y, T_z] \quad (2)$$

(3) 设定平移变换矩阵  $T$  的初始增量为  $\Delta T_0$ , 点-面单元匹配最大距离为  $D$ , 最小增量为  $\Delta T_{\min}$  及  $\Delta a_{\min}$ ;

(4) 作  $B_{\text{new}} = R \cdot B + T$ ;

(5) 对于曲面  $B$  上每一顶点  $v_b \in V_B$ , 在距离  $D$  内, 搜索曲面  $A$  上与之距离最近的面单元  $g_a \in G_A$ 。设  $V'_b$  为匹配搜索到目标的曲面  $B$  上的顶点集合,  $G'_a$  为匹配搜索到目标的曲面  $A$  上的面单元三角形的集合, 元素个数均设为  $M$ ;

(6) 令  $d_i$  为  $V'_b$  中  $i$  点到  $G'_a$  中对应的三角形的距离 ( $i=1, \dots, M$ )。

令  $v_{A_i}$  为  $G'_a$  中, 与  $V'_b$  中的  $d_i$  对应的各三角形面单元法向量 ( $i=1, \dots, M$ )。

令  $v_{B_i}$  为曲面  $B$  上, 与  $V'_b$  第  $i$  顶点相连的各三角形面单元的平均法向量,  $i=1, \dots, M$ 。计算  $d_i$  的均值  $\bar{d}_i$  及  $v_{A_i}$  与  $v_{B_i}$  差值模的平均值  $d_v$ :

$$\bar{d}_i = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M d_i \quad (3)$$

$$d_v = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \|v_{A_i} - v_{B_i}\| \quad (4)$$

(7) 采用“最速下降法”对旋转矩阵  $R$ 、平移矩阵  $T$  各个分量进行迭代优化:

$$\theta^{(k+1)} = \theta^{(k)} - \Delta \cdot d_v \cdot \frac{\partial d_v}{\partial \theta} \quad (5)$$

$$\varphi^{(k+1)} = \varphi^{(k)} - \Delta \cdot d_v \cdot \frac{\partial d_v}{\partial \varphi} \quad (6)$$

$$\psi^{(k+1)} = \psi^{(k)} - \Delta \cdot d_v \cdot \frac{\partial d_v}{\partial \psi} \quad (7)$$

$$T_x^{(k+1)} = T_x^{(k)} - \Delta \cdot \bar{d}_i \cdot \frac{\partial \bar{d}_i}{\partial T_x} \quad (8)$$

$$T_y^{(k+1)} = T_y^{(k)} - \Delta \cdot \bar{d}_i \cdot \frac{\partial \bar{d}_i}{\partial T_y} \quad (9)$$

$$T_z^{(k+1)} = T_z^{(k)} - \Delta \cdot \bar{d}_i \cdot \frac{\partial \bar{d}_i}{\partial T_z} \quad (10)$$

直至 $\bar{d}_i, d_i$  小于规定的误差值,或达到一定的迭代次数  $k$  为止.

### 1.3 提高算法迭代收敛速度的方法

至少有两种途径可以提高计算速度:

(1)对曲面采用从粗到细的分层次抽样,这样可减少点面匹配搜索及误差的计算次数;

(2)随着迭代中  $d_i$  的降低,而搜索范围  $D$  逐步减小,以减少搜索的范围.

### 1.4 防止误差累积的方法

一个较完整的表面往往需要进行十几个,甚至更多角度的三维数据采集,设  $s_1, s_2, \dots, s_m$  为同一物体一系列观察角度的三维曲面数据.若  $s_1$  与  $s_2$  通过共同区域相关对齐复位,即  $s_i$  与  $s_{i+1}$  对齐复位 ( $i=1, \dots, m-1$ ),那么复位后,  $s_1$  与  $s_m$  之间相对位置的误差将为前面  $m-1$  个对齐复位误差的累积.

为了解决这一问题,可以通过数据采集时,提供的一些富余信息来抑制误差累积.例如,增加一个观察角度,该角度观察到的三维曲面数据为  $s_{1m}, s_{1m}$  不仅与  $s_1$  满足复位条件,同时与  $s_m$  也满足复位条件.

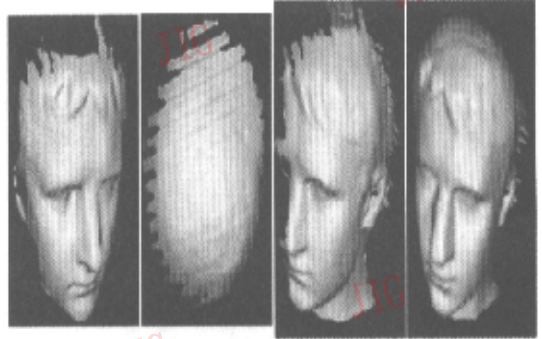
- 令  $m=6$ , 固定  $s_{16}$ , 复位  $s_1$ ;
- 固定  $s_{16}, s_1$  曲面数据不变, 复位  $s_6$ ;
- 固定  $s_{16}, s_1, s_6$  曲面数据不变, 复位  $s_2$ ;
- 固定  $s_{16}, s_1, s_6, s_2$  曲面数据不变, 复位  $s_5$ ;
- 固定  $s_{16}, s_1, s_6, s_2, s_5$  曲面数据不变, 复位  $s_3$ ;
- 固定  $s_{16}, s_1, s_6, s_2, s_5, s_3$  曲面数据不变, 复位  $s_4$ ;
- 固定  $s_{16}, s_1, s_6, s_2, s_5, s_3, s_4$  曲面数据不变, 复位  $s_7$ ;
- .....

这样,  $s_7$  与  $s_1$  只有两步误差累积,且在复位  $s_4$  的同时,受到  $s_3$  与  $s_5$  的约束,误差也会大大降低.

## 2 实例

图2为对一人头像模型的3个角度三维实测数据进行对齐复位的结果图,图3为对一鼠标模型的10个角度三维实测数据进行对齐复位的结果图.由图2、图3可见,对齐复位的三维图象形成了较自然完整曲面,不仅各观察数据之间无明显痕迹,且对齐复位后的三维数据与实际模型相比,其整体误差在0.2%左右(对于图2所示模型最大误差约为0.3mm,对于图3所示模型最大误差约为0.2mm),与文献[2]相比,相对误差减少了约30%.实验结果

表明,其迭代计算的时间为1~10s(PC计算机P800环境下,一般为2s左右),与文献[3]相比,速度提高约500%.



(a) 左视角 (b) 上视角 (c) 右视角 (d) 对齐复位后  
三维曲面 三维曲面 三维曲面 的三维曲面

图2 多视角人像三维曲面对齐复位效果图  
(三维数据加模拟光照的灰度效果)

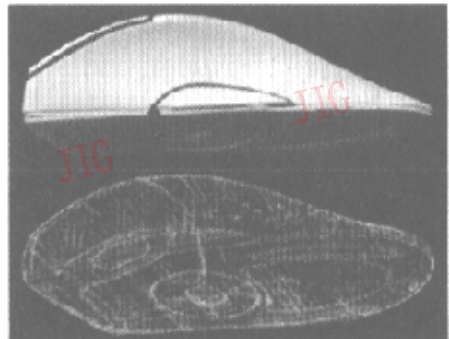


图3 多视角鼠标三维曲面对齐复位效果图  
(上图为对齐复位后三维数据加模拟光照灰度效果图,  
下图为其对齐复位后三维曲面透视图)

## 3 小结

本文提出了一种多视角曲面相关复位的一种迭代方法,该方法可使得三维数据采集过程无需任何附加约束,并在不额外增加三维数据采集设备及操作的情况下,可保证数据采集速度快,由复位后的各视角三维曲面形成的整体表面效果自然逼真.这一方法将为三维曲面形状测量的数据处理提供一种强有力的技术支持.

### 参考文献

1 Goshwasby A, Nambala A, Derijk W G *et al.* A system for

digital reconstruction of gypsum dental casts[J]. IEEE Trans. On Medical Imaging, 1997, 16(5):664~674.

- 2 Nohuhoko Wada *et al.* Reconstruction of an object shape from multiple incomplete range data sets using convex hulls[A]. In: Computer Graphics International'93 [C], Lausanne, Switzerland, 1993:240~243.
- 3 Buzinski M, Levine A, Stevenson W H *et al.* Performance characteristics of range sensors utilizing optical triangulation [A]. In: Proceedings of IEEE National Aerospace and Electronics Conference, 92[C]. 1992, 3:1230~1236.
- 4 Besl P, McKay N. A method of registration of 3D shapes[J]. IEEE Trans. PAMI, 1992, 14(2):239~256.



衡 伟 1965 年生, 1997 年获东南大学无线电工程系博士学位, 东南大学无线电工程副教授, 中国电子学会高级会员。长期从事图象处理的科研和教学工作, 其间曾在美国作过多年的博士后研究工作, 作为负责人承担或参与多项国家级和省部级科研项目, 发表论文 30 余篇。

## 《中国图象图形学报》迁址通告

最近本刊编辑部搬至中国科学院自动化所(地址:北京海淀区中关村东路 95 号), 如关心和支持本刊的读者、作者, 有事与本刊联系, 请改用新通讯地址:

北京 2728 信箱 《中国图象图形学报》编辑部 邮编: 100080  
电话: 010-82614429

本刊编辑部