

文章编号 1004-924X(2017)07-1927-07

颅骨点云模型的优化配准

赵夫群^{1, 2}, 周明全^{2, 3*}

- (1. 咸阳师范学院 教育科学学院, 陕西 咸阳 712000;
2. 西北大学 信息科学与技术学院, 陕西 西安 710127;
3. 北京师范大学 信息科学与技术学院, 北京 100875)

摘要: 由于颅骨的三维点云数据模型复杂且不同人的颅骨差异较小, 对其配准精度要求较高。为了提高颅骨点云模型的配准精度和收敛速度, 提出了一种先粗配准再细配准的配准方法。首先, 对颅骨点云数据模型进行去噪、简化和归一化等预处理; 然后, 通过区域划分、区域配准和求解组合系数以及求解刚体变换等步骤实现区域层次上的颅骨粗配准; 最后, 通过引入动态迭代系数来改进基于旋转角约束的迭代最近点算法, 并采用该改进的 ICP 算法实现颅骨的细配准, 从而达到精确配准的目的。实验结果表明: 与 ICP 算法相比, 改进的 ICP 算法的配准精度和收敛速度分别提高了约 30% 和 50%。证明该种先粗配准再细配准的颅骨点云模型配准方法是一种精度高、速度快的有效颅骨配准算法。

关键词: 颅骨配准; 粗配准; 迭代最近点; 旋转角约束; 动态迭代系数

中图分类号: TP317.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172507.1927

Optimization registration of point cloud model of skull

ZHAO Fu-qun^{1,2}, ZHOU Ming-quan^{2,3*}

- (1. School of Education Science, Xianyang Normal University,
Xianyang 712000, China;
 2. School of Information Science and Technology, Northwest University,
Xi'an 710127, China;
 3. School of Information Science and Technology,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China)
- * Corresponding author, E-mail: m qzhou@nwu.edu.cn

Abstract: As the three dimensional point cloud model for skull is complex and there is little difference in skulls of different people, it has high requirement for the registration accuracy. In order to improve the registration accuracy and the convergence rate of point cloud model for skull, a kind of registration method of coarse regulation first and fine regulation second was proposed. Firstly, the point cloud model for skull should be subject to de-noising, simplification, normalization and other pretreatments; Then, based on regional partition, regional regulation, solving combination coefficient, solving rigid body transformation and other steps, coarse regulation for skull in regional level was realized; Finally, through introducing dynamic iteration coefficient algorithm, the iterative closest point based

收稿日期: 2016-12-30; 修订日期: 2017-02-17.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61373117, No. 61305032)

on the constraint of rotation angle was promoted; and improved ICP algorithm was used to realize the fine regulation for skull in order to achieve the purpose of accurate registration. The experimental result shows that comparing with ICP algorithm, the registration accuracy and the convergence rate of the improved ICP algorithm are separately improved about 30% and 50%. therefore, the kind of registration method of point cloud model for skull of coarse regulation first and fine regulation second is an effective skull regulation algorithm with high accuracy and fast speed.

Key words: skull registration; coarse registration; iterative closest point; rotation angle constraint; active iterative coefficient

1 引言

颅面复原是颅骨身份认定的重要途径之一,已经在医学研究、灾难调查和考古等方面^[1-3]得到了一定应用。颅骨配准是颅面复原的一个重要步骤,其基本思路为:从已有颅骨数据库中找出与待复原颅骨 U 最为相似的颅骨 S,那么颅骨 S 的面貌即可作为待复原颅骨 U 的参考面貌,也称参考颅骨,从而为颅面复原提供可能的依据。

由于颅骨的三维点云数据模型复杂,且不同人的颅骨差异非常小,对其配准精度的要求较高,因此目前的颅骨配准方法大多采用特征点标定法^[4-5],但是配准效果并不十分理想。为了提高配准精度,采用先粗配准再细配准的方法来实现颅骨的精确配准。粗配准就是将两个位于不同坐标系中的颅骨进行粗略对齐的过程,通常采用点云的特征实现,如法向和曲率特征^[6-7],以及积分不变量^[8]计算的或凹或凸的特征区域等。细配准就是在粗配准的基础上,将两个颅骨进行进一步细对齐的过程,从而达到精确配准的目的。目前应用最为广泛的细配准算法是由 Besl P J 等人^[9]提出的最近点迭代(Iterative Closest Point, ICP)算法。该算法步骤简单且易于实现,但要求两个待配准的点云间要存在包含关系。对此国内外学者提出了很多改进算法,如王欣等人^[10]提出了基于点云边界特征点的改进 ICP 算法,提高了逆向工程中点云数据配准的效率和精度; Li W 等人^[11]提出了一种基于动态调整因子的 ICP(ICP-DAF)算法,在不影响配准精度和收敛方向的情况下,可以大大提高算法的配准速度; Mavridis P 等人^[12]提出了一种基于混合优化系统的稀疏 ICP 算

法,提高了点云配准的精度和速度; DuS 等人^[13]提出了概率 ICP(PICP)算法,提高了点云配准的抗噪性; DuS 等人^[14]提出了尺度 ICP 算法,解决了含尺度因素的点云配准问题。

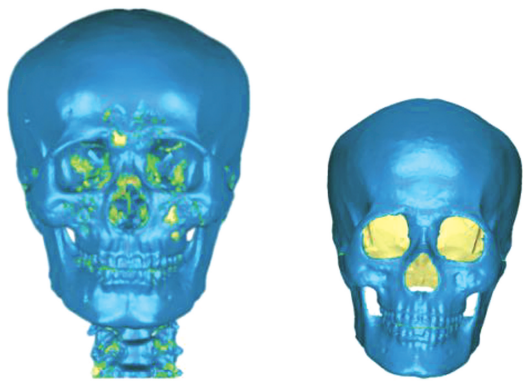
以上这些算法在点云配准的精度、速度、抗噪性以及尺度因素等方面有了一定程度的改进,但是对颅骨数据的配准结果却并不十分理想。这是由于颅骨点云模型的点云数据量较大,配准中涉及到的颅骨数量较多,因此对算法的收敛速度要求较高,此外由于颅骨个体差异较小,对配准精度的要求也更高。针对颅骨点云配准中的配准精度和速度的问题,提出一种先粗配准再细配准的配准算法。首先采用基于区域层次上的自动点云配准算法实现粗配准,然后通过基于旋转角约束的 ICP 算法中加入动态迭代系数的方式来改进 ICP 算法,并将其应用到颅骨点云的细配准中,不仅可以提高配准的精度,而且可以大大提高算法的收敛速度,从而实现颅骨的快速精确配准。

2 颅骨粗配准

在粗配准前,首先对颅骨的三维点云数据模型进行去噪、简化和归一化等预处理^[15],处理结果如图 1 所示。

对于颅骨的三维点云数据模型,其粗配准采用基于区域层次上的自动点云配准算法^[16]来实现,该算法分为区域划分、区域配准、求解组合系数以及求解刚体变换等四个基本步骤。粗配准的输入为未知颅骨 U 与参考颅骨 S 的点云数据模型,其初始相对位置和重叠比例未知。

首先,对颅骨的三维点云数据模型进行区域划分;对于未知颅骨 U 和参考颅骨 S,分别对其进



(a) 预处理前

(b) 预处理后

(a) Before pretreatment (b) After pretreatment

图1 颅骨点云模型预处理前后对比图

Fig.1 Comparison of skull point cloud model before and after pretreatment

行随机均匀采样,以均匀采样点为初始聚类中心,执行多次基于欧氏距离的C-均值聚类,即可将每组颅骨点云划分成一系列互不相交的区域,从而完成区域划分。通常划分的区域数目与颅骨点云的重叠比例有关,经过反复实验,建议将区域数目设置为1到20个。这里假设未知颅骨U和参考颅骨S分别被划分为M和N个区域。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 + q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: $q_0 \geq 0$, $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ 。

\mathbf{R} 可以通过求解下面的约束优化问题求解,如式(B):

$$\begin{cases} \min_{q_0, q_1, q_2, q_3} \|\mathbf{R}^* - \mathbf{R}\|_F^2 \\ \text{s. t. } q_0 \geq 0, q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1 \end{cases}. \quad (3)$$

通过以上四个步骤,就完成了两组颅骨点云数据的初始粗配准,接下来就可以进行细配准了。

3 颅骨细配准

颅骨细配准采用一种改进的ICP算法实现,即在基于旋转角约束的ICP算法的基础上,引入动态迭代系数,在不影响算法的配准精度和收敛方向的情况下,进一步提高算法的收敛速度。

3.1 ICP算法

对于两个待配准的颅骨U和S,假设U为待复原颅骨,S为颅骨库中的某一参考颅骨,其对应

然后,进行区域配准;与颅骨点云配准相比,区域配准是一种规模更小的配准过程,因此采用穷举法进行配准,并按照配准后两个区域的重叠比例来评价配准的效果,由此得到最佳区域匹配。

再次,求解组合系数;这里引入可信性和一致性的概念,通过最大化能量函数来求解组合系数,能量函数的定义如式(1):

$$\begin{cases} E(\omega) = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^L \omega_i \omega_j c_1(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j) c_2(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j) \\ \text{s. t. } \sum_{i=1}^L \omega_i^2 = 1, \omega_i \geq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\omega = \{\omega_i\}_{i=1}^L$ 是待求解的组合系数, $c_1(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$ 和 $c_2(\mathbf{T}_i, \mathbf{T}_j)$ 是可信性信息,即真实的全局刚体变换的可能性,全局刚体变换 $\mathbf{T} = \sum_{i=1}^L \omega_i \mathbf{T}_i / \sum_{i=1}^L \omega_i$, $L = MN$ 。

最后,求解刚体变换。通过求解组合系数得到的线性变换一般不是刚体变换,因此为了求解刚体变换就要将该变换分解成一个旋转矩阵 \mathbf{R} 和一个平移向量 \mathbf{t} ,这里 \mathbf{R} 采用四元数法可表示为:

的点云模型分别为 $\mathbf{D} = \{\mathbf{d}_i\}_{i=1}^{N_d}$ 和 $\mathbf{M} = \{\mathbf{m}_j\}_{j=1}^{N_m}$, N_d 和 N_m 分别表示点集 \mathbf{D} 和 \mathbf{M} 中的点云数目。ICP算法就是寻找从点集 \mathbf{D} 到点集 \mathbf{M} 的旋转和平移变换,使其能够达到最佳配准,其计算方法如式(4)所示。

$$\min_{\mathbf{R}, \mathbf{t}, j \in \{1, 2, \dots, N_m\}} \left(\sum_{i=1}^{N_d} \|\mathbf{R}\mathbf{d}_i + \mathbf{t} - \mathbf{m}_j\|_2^2 \right), \quad (4)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{R}\mathbf{R} = \mathbf{I}_m, \det(\mathbf{R}) = 1$$

式中: \mathbf{R} 是一个旋转矩阵, \mathbf{t} 是一个平移矢量。

ICP算法的具体实现步骤如下:

(1)建立点集 \mathbf{D} 和 \mathbf{M} 的相关性,计算式如式(5):

$$c_{k+1}(i) = \operatorname{argmin}_{j \in \{1, 2, \dots, N_m\}} \|\mathbf{R}_k \mathbf{d}_i + \mathbf{t}_k - \mathbf{m}_j\|_2^2, \quad (5)$$

式中, $i = 1, 2, \dots, N_d$ 。

(2)计算点集 \mathbf{D} 和 \mathbf{M} 的新的旋转和平移变

换,计算式如式(6):

$$(\mathbf{R}^*, \mathbf{t}^*) = \underset{\mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}_n, \det(\mathbf{R}) = 1, \mathbf{t}}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{i=1}^{N_d} \left\| (\mathbf{R} \mathbf{R}_k \mathbf{d}_i + \mathbf{t}_k) + \mathbf{t} - \mathbf{m}_{k+1}^{(d)} \right\|_2^2 \right) \quad (6)$$

然后分别用 $\mathbf{R}_{k+1} = \mathbf{R}^* \mathbf{R}_k$ 和 $\mathbf{t}_{k+1} = \mathbf{R}^* \mathbf{t}_k + \mathbf{t}^*$ 更新 \mathbf{R}_{k+1} 和 \mathbf{t}_{k+1} 。

重复步骤(1)和(2),直到满足终止条件为止。

3.2 改进的 ICP 算法

3.2.1 旋转角约束

旋转角约束是指为刚体变换中的旋转角设置上界和下界,以解决由旋转角变化过大而引起的配准效果不佳的问题。

定义旋转矩阵^[17]为 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_x \mathbf{R}_y \mathbf{R}_z$, 其中:

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x & -\sin \theta_x \\ 0 & \sin \theta_x & \cos \theta_x \end{bmatrix}, \mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y & 0 & \sin \theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y & 0 & \cos \theta_y \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_z & -\sin \theta_z & 0 \\ \sin \theta_z & \cos \theta_z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。 \theta_x, \theta_y, \theta_z \text{ 是 3 个旋转角,}$$

$\theta_{xb}, \theta_{yb}, \theta_{zb}$ 是旋转角的均值, $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z$ 是旋转角的偏差, $\theta_{xb} - \Delta\theta_x, \theta_{yb} - \Delta\theta_y, \theta_{zb} - \Delta\theta_z$ 是旋转角的下界, $\theta_{xb} + \Delta\theta_x, \theta_{yb} + \Delta\theta_y, \theta_{zb} + \Delta\theta_z$ 是旋转角的上界。

那么加入旋转角约束后,两个颅骨点云模型 \mathbf{D} 和 \mathbf{M} 的配准问题可描述如式(7):

$$\left\{ \begin{array}{l} (\mathbf{R}_k, \mathbf{t}_k) = \underset{\mathbf{R}_k^T \mathbf{R}_k = \mathbf{I}_n, \det(\mathbf{R}) = 1, \mathbf{t}_k}{\operatorname{argmin}} \left(\sum_{\min} \left\| \mathbf{R}_k \mathbf{D} + \mathbf{t}_k - \mathbf{M} \right\|_2^2 \right) \\ s. t. \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}_n, \det(\mathbf{R}) = 1 \\ \theta_x \in [\theta_{xb} - \Delta\theta_x, \theta_{xb} + \Delta\theta_x] \\ \theta_y \in [\theta_{yb} - \Delta\theta_y, \theta_{yb} + \Delta\theta_y] \\ \theta_z \in [\theta_{zb} - \Delta\theta_z, \theta_{zb} + \Delta\theta_z] \\ \Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z \end{array} \right. \quad (7)$$

式中: \mathbf{R} 为旋转矩阵, \mathbf{t} 为平移矢量。

3.2.2 动态迭代系数

在 ICP 算法中引入旋转角约束的目的是为了提高点云配准的精度,对配准速度的影响相对较小。为了进一步提高算法的迭代收敛速度,在此引入动态迭代系数 h 。

动态迭代系数 h 是一个整数值,它可以自动调整刚体变换的参数,能够在不影响算法的配准

精度和收敛方向的情况下,大大减少算法的迭代次数,从而提高收敛速度,并降低算法的耗时。

通常 h 取大于等于 0 的整数, h 不同,算法的收敛速度也不同。通常,随着 h 的增大,收敛速度也会越来越快,但是当 h 增大到一定的程度,收敛曲线会出现震荡,可能不再收敛。通过多次实验,建议 h 的取值在 0~4 之间。当 h 等于 0 时,该算法就等同于 ICP 算法。

在 ICP 算法中加入动态迭代系数 h 的步骤如下:

(1) 计算刚体变换矢量 $\mathbf{q} = [\mathbf{R} | \mathbf{t}]^T$ 以及 \mathbf{q}_k 的相邻两次迭代的变化量 $\Delta\mathbf{q}_k$;

(2) 用刚体变换矢量 $\Delta\mathbf{q}_k$ 更新 ICP 算法中的 \mathbf{D} 共 h 次,即执行 $\mathbf{D}_k = \Delta\mathbf{q}_k (\mathbf{D}_k)$ 共 h 次。为了获取 $\Delta\mathbf{q}_k$,改进的 ICP 算法对 ICP 算法的步骤(2)中刚体变换参数的计算方法进行了改变。也就是说,ICP 算法是从 \mathbf{M}_0 到 \mathbf{D}_k 计算刚体变换参数,而改进的 ICP 算法从 \mathbf{M}_k 到 \mathbf{Y}_k 计算刚体变换参数。

3.2.3 ICP 算法的改进方法

在基于旋转角约束的 ICP 算法中引入动态迭代系数后,改进 ICP 算法的具体实现步骤如下:

(1) 给定刚体变换初值 $\mathbf{q}_0 = [\mathbf{R}_0, \mathbf{t}_0]^T$, \mathbf{R}_0 为初始旋转矩阵, \mathbf{t}_0 为初始平移矢量,令 $\mathbf{D}_0 = \mathbf{R}_0 \mathbf{D} + \mathbf{t}_0$,迭代次数 $k=0$,动态迭代系数 $h=0$;

(2) 估计旋转角 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 的边界,即 $\theta_x \in [\theta_{xb} - \Delta\theta_x, \theta_{xb} + \Delta\theta_x]$, $\theta_y \in [\theta_{yb} - \Delta\theta_y, \theta_{yb} + \Delta\theta_y]$ 和 $\theta_z \in [\theta_{zb} - \Delta\theta_z, \theta_{zb} + \Delta\theta_z]$;

(3) 利用式(5)建立点云 \mathbf{D} 和 \mathbf{M} 的相关性 $c_k(i)$;

(4) 利用奇异值分解法计算旋转矩阵 \mathbf{R}_{k+1} 和平移矢量 \mathbf{t}_{k+1} ,则 $\mathbf{q}_{k+1} = [\mathbf{R}_{k+1}, \mathbf{t}_{k+1}]^T$;

(5) 计算 \mathbf{q}_{k+1} 的相邻两次迭代的变化量 $\Delta\mathbf{q}_{k+1}$;

(6) 利用式(7)计算 \mathbf{D}_{k+1} ,即新的刚体变换 $(\mathbf{R}_{k+1}, \mathbf{t}_{k+1})$;

(7) 判断均方根误差 RMS ,若 $RMS_{k+1} - RMS_k > \epsilon$,则执行 $h = h + 1$ 操作,否则执行 $h = 0$ 操作, RMS 的定义如式(8):

$$RMS = \left(\sum_{i=1}^{N_D} \left\| \mathbf{R}_{k+1} \mathbf{D}_{k+1} + \mathbf{t}_{k+1} - \mathbf{M}_{k+1} \right\|_2^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

(8) 判断动态迭代系数 h ,若 $h > 0$,则通过执

行 $D_{k+1} = \Delta q_{k+1}(D_{k+1})$ 共 h 次来更新点集 D_{k+1} ;

(9)判断终止条件,若满足 $|RMS_{k+1} - RMS_k| < \epsilon$ 或 $k > Step_{max}$ 则算法终止,否则转到步骤(10),这里 ϵ 是预先设置的阈值, $Step_{max}$ 是最大迭代次数;

(10)令 $k = k + 1$,并转步骤(2)。

4 实验结果与分析

实验采用西北大学可视化技术研究所采集的 298 套完整的 CT 扫描的颅骨点云数据模型,即 298 个人的颅骨数据模型。未知颅骨 U 与颅骨库中的某一参考颅骨 S 的配准过程为:首先采用基于区域层次上的自动点云配准算法实现两个颅骨的粗配准,然后分别采用 ICP 算法和提出的改进 ICP 算法实现颅骨 U 和 S 的细配准。

在细配准过程中,动态迭代系数 h 取不同值时,算法的迭代次数和配准误差之间的关系如图 2 所示。针对已有的颅骨数据,经多次实验,当动态迭代系数 $h = 3$ 时的配准效果最佳。

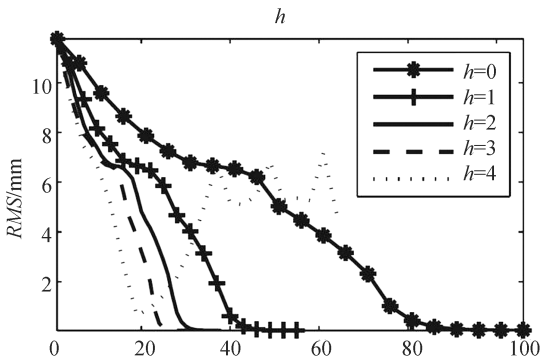
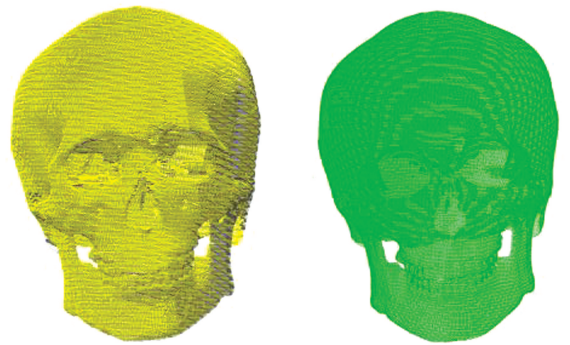


图 2 迭代收敛曲线

Fig. 2 Iterative convergence curves

通过将未知颅骨 U 与颅骨库中的 298 套颅骨进行配准,找到了未知颅骨 U 的一个最为相似的参考颅骨 S,如图 3 所示。其粗配准结果如图 4 所示,ICP 算法和改进 ICP 算法的细配准结果分别如图 5 和图 6 所示。

从图 4、图 5 以及图 6 的配准结果来看,基于区域层次上的粗配准算法可以将两个颅骨初步对齐,而细配准则实现了两个颅骨的精确对齐。而且从图 5 和图 6 的细配准结果来看,与 ICP 算法相比,提出的改进 ICP 算法的配准效果明显更

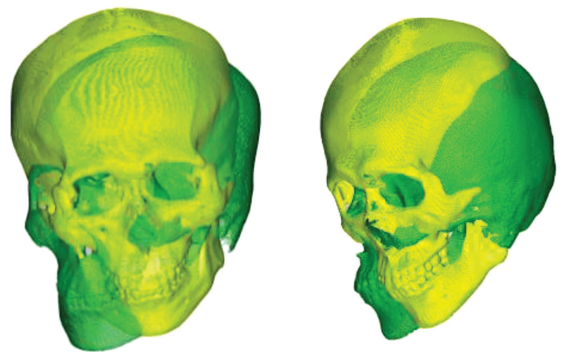


(a) 未知颅骨(U) (b) 参考颅骨(S)

(a) Unknown skull (U) (b) Reference skull (S)

图 3 两个待配准的颅骨

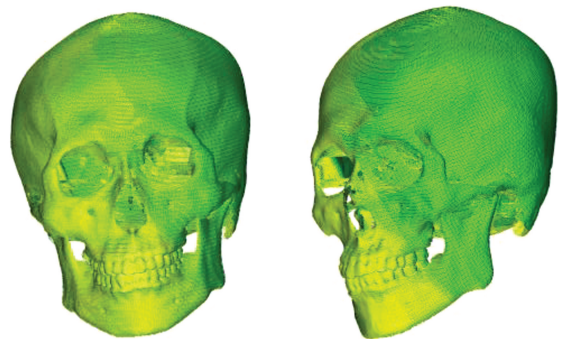
Fig. 3 Two skulls needed to registered



(a) 正面 (b) 侧面
(a) Front (b) Side

图 4 粗配准结果

Fig. 4 Coarse registration results



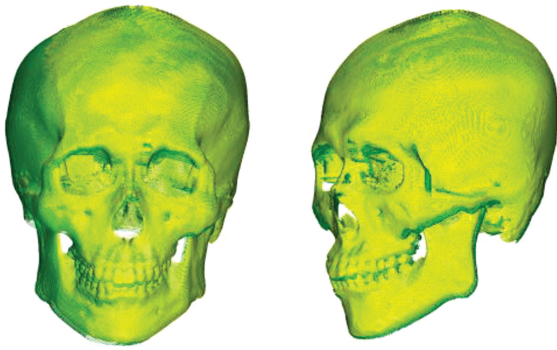
(a) 正面 (b) 侧面
(a) Front (b) Side

图 5 ICP 的细配准结果

Fig. 5 Registration results of ICP

好,配准精度有了明显的提高。

为了进一步验证提出的改进 ICP 算法在细



(a) 正面 (b) 侧面
(a) Front (b) Side
图 6 改进 ICP 的细配准结果

Fig. 6 Registration results of improved ICP

配准阶段的性能, 细配准过程再分别采用 ICP-DAF 算法^[11]和 PICP 算法^[13]实现。ICP 算法、ICP-DAF 算法、PICP 算法以及改进 ICP 算法等四种细配准算法的配准误差 RMS、迭代次数以及耗时等配准参数如表 1 所示。

从表 1 的配准结果来看, 改进 ICP 算法的配准精度和速度最高。与 ICP 算法相比, 改进 ICP 算法的配准精度和收敛速度分别提高了约 30% 和 50%; 跟 ICP-DAF 算法相比, 改进 ICP 算法的配准精度提高了约 30%, 算法的收敛速度基本差不多; 跟 PICP 算法相比, 改进 ICP 算法的配准速度提高了约 20%, 配准精度基本差不多。因此说改进 ICP 算法一种精度更高、速度更快的颅骨点云模型细配准算法, 提出的先粗再细的颅骨点云模型配准算法是一种有效的颅骨配准算法。

参考文献:

- [1] SHUI W Y, ZHOU M Q, DENG Q Q, *et al.*. Densely calculated facial soft tissue thickness for craniofacial reconstruction in Chinese adults [J]. *Forensic Science International*, 2016, 266: 573. e1-573. e12.
- [2] 张石, 董建威, 余黎煌. 医学图像分割算法的评价方法[J]. 中国图象图形学报, 2009, 14(9): 1872-1880.
- ZHANG S, DONG J W, YU L H. The methodology of evaluating segmentation algorithms on medical image [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2009, 14(9): 1872-1880. (in Chinese)

表 1 细配准算法的运行参数

Tab. 1 Running parameters of fine registration algorithms

| 待配准 颅骨 | 点云 数目 | 配准 算法 | 配准误 差/mm | 迭代 次数 | 耗时 /s |
|-----------|----------|----------|-------------|----------|----------|
| | | ICP | 0.006 4 | 69 | 6.15 |
| 未知颅骨 U | 217 897 | ICP-DAF | 0.007 1 | 34 | 3.02 |
| 参考颅骨 S | 201 962 | PICP | 0.004 6 | 45 | 4.13 |
| | | 改进 ICP | 0.004 2 | 35 | 3.12 |

5 结 论

颅骨配准是计算机辅助颅面复原技术的重要研究内容之一, 其配准结果的准确与否会直接影响到将来颅面复原的精度。针对颅骨点云数据模型配准中的配准精度和收敛速度的问题, 提出了一种先粗配准再细配准的配准方法。首先采用基于区域层次上的配准方法实现颅骨粗配准, 然后采用改进的 ICP 算法实现颅骨细配准, 其配准精度和收敛速度比 ICP 算法分别提高了约 30% 和 50%, 实现了颅骨的最终精确配准。该由粗到细的点云配准算法自动、精确、快速, 是一种有效的颅骨点云模型配准方法。在今后的研究中, 要进一步利用颅骨配准的结果, 提出颅骨面貌复原框架以及基于软组织厚度的评价方法, 实现颅骨面貌的复原研究, 并将其应用到人类考古和刑事案件侦破等领域, 提高颅面复原的应用价值。

- [3] 蔺素珍, 王栋娟, 钟家让, 等. 利用曲率特征虚拟拼接青铜器小碎片的方法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2016, 43(6): 151-156.
- LIN S Z, WANG D J, ZHONG J R, *et al.*. Approach to reassembling virtual small bronze fragments using the curvature feature [J]. *Journal of Xidian University*, 2016, 43(6): 151-156. (in Chinese)
- [4] 冯筠, 陈雨, 仝鑫龙, 等. 三维颅骨特征点的自动标定[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1388-1394.
- FENG J, CHEN Y, TONG X L, *et al.*. Automatic feature point extraction for three-dimensional skull [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1388-1394. (in Chinese)
- [5] LINDBERG T. Scale Selection Properties of gen-

- eralized scale-space interest point detectors [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2013, 46(2): 177-210.
- [6] IZUMIYA S, NABARRO A C, SACRAMENTO A D J. Pseudo-spherical normal Darboux images of curves on a timelike surface in three dimensional Lorentz-minkowski space [J]. *Journal of Geometry and Physics*, 2015, 97: 105-118.
- [7] 程国华, 王阿川, 陈舒畅, 等. 多源遥感影像高精度自动配准方法研究[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(6): 604-612.
CHENG G H, WANG A C, CHEN SH C, *et al.*. High accuracy-automatic registration method research on multi-source remote sensing image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(6): 604-612. (in Chinese)
- [8] CAO Z C, MA F L, FU Y L, *et al.*. A scale invariant interest point detector in Gabor based energy space [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(10): 2356-2363.
- [9] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(2): 239-256.
- [10] 王欣, 张明明, 于晓, 等. 应用改进迭代最近点方法的点云数据配准[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(9): 2068-2077.
WANG X, ZHANG M M, YU X, *et al.*. Point cloud registration based on improved iterative closest point method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 2068-2077. (in Chinese)
- [11] LI W M, SONG P F. A modified ICP algorithm based on dynamic adjustment factor for registration of point cloud and CAD model [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2015, 65: 88-94.
- [12] MAVRIDIS P, ANDREADIS A, PAPAIOANNOU G. Efficient sparse ICP [J]. *Computer Aided Geometric Design*, 2015, 35-36: 16-26.
- [13] DU S Y, LIU J, ZHANG C J, *et al.*. Probability iterative closest point algorithm for m-D point set registration with noise [J]. *Neurocomputing*, 2015, 157: 187-198.
- [14] DU S Y, ZHENG N N, XIONG L, *et al.*. Scaling iterative closest point algorithm for registration of m-D point sets [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2010, 21(5-6): 442-452.
- [15] 吴禄慎, 史皓良, 陈华伟. 基于特征信息分类的三维点数据去噪[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1465-1473.
WU L SH, SHI H L, CHEN H W. Denoising of three-dimensional point data based on classification of feature information [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1465-1473. (in Chinese)
- [16] 韩宝昌, 曹俊杰, 苏志勋. 一种区域层次上的自动点云配准算法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27(2): 313-319.
HAN B CH, CAO J J, SU ZH X. Automatic point clouds registration based on regions [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015, 27(2): 313-319. (in Chinese)
- [17] Wikipedia. Rotation matrix[EB/OL]. 2014. http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Rotation_matrix&oldid=624815514.

作者简介:



赵夫群(1982—),女,山东临沂人,博士研究生,讲师,2004年、2007年于西安石油大学分别获得学士学位、硕士学位,主要从事图形图像处理和三维建模等方面的研究。E-mail: fuqunzhao@126.com

导师简介:



周明全(1954—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,1976年、1988年于西北大学分别获得学士、硕士学位,主要从事计算机可视化技术、软件工程、中文信息处理等领域的基础理论及其应用工程创新的研究。E-mail: m qzhou@nwu.edu.cn