

· 基础研究 ·

四种组合方法规划髌臼前柱置钉通道的比较研究

易礼杨¹, 李必文¹, 唐鹏¹, 唐虎¹, 谭文甫²

(1. 南华大学机械工程学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 南华大学附属第二医院创伤骨科, 湖南 衡阳 421001)

【摘要】 目的: 探讨基于大密度点云数据实现对髌臼前柱置钉通道的全局优化。方法: 2022 年 1 月至 2023 年 1 月行完整 CT 扫描成年人正常骨盆 CT 数据 40 例, 其中男 22 例, 女 18 例; 年龄 20~54 岁。选取其中 3 个样本的医学影像数据进行试验研究。规划髌臼前柱置钉通道, 针对现行 CAD 规划方法是否具有先进性的问题, 提出了点云获取渠道相同、方向线创建软件各异、三维设计与虚拟试验软件相同的 4 种组合方法: Mimics+Imageware+UG、Mimics+3DReshaper+UG、Mimics+ZEISS Quality Suite+UG 与 Mimics+Design X+UG, 并依据二次修剪模型的中心点点集和实体点云分别创建方向线, 应用于 3 个髌臼样本左侧前柱置钉通道的规划。以未出现髌臼窝和耻骨穿破现象的最大内接圆柱体作为髌臼前柱的置钉安全通道来评价各方法的先进性。结果: 在选取相关特征明显的中心点点集作为样本点时, 方向线的拟合效果均优于未去噪的实体点云拟合效果; Mimics+Imageware+UG 和 Mimics+3DReshaper+UG 的组合方法在利用中心点点集进行规划时能够高效、稳定地获得理想的规划结果, 分别在髌臼样本 1、2、3 中得到的最大内接圆直径为 10.35、9.62、9.24 mm; 方向线依据实体点云时, Mimics+ZEISS Quality Suite+UG 和 Mimics+Design X+UG 的组合方法均不适用; 而 Mimics+3DReshaper+UG 的实体点云去噪规划法可以稳定地获得数值最大的置钉安全通道, 分别在髌臼样本 1、2、3 中得到的最大内接圆直径为 10.66、10.96、9.48 mm。结论: 在进行髌臼内固定术时推荐置钉通道规划人员采用鲁棒性好的 Mimics+Imageware+UG 或 Mimics+3DReshaper+UG 中心点点集规划法, 如果时间充裕, 建议采用 Mimics+3DReshaper+UG 的实体点云去噪规划法以获得数值最大的置钉安全通道。

【关键词】 髌臼前柱置钉通道; 全局优化; 方向线创建方法; 规划差异机制

中图分类号: R687.3

DOI: 10.12200/j.issn.1003-0034.20231036

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**A comparative study of four combined methods for planning access to the anterior acetabular column for nail placement**

YI Li-yang¹, LI Bi-wen¹, TANG Peng¹, TANG Hu¹, TAN Wen-fu² (1. School of Mechanical Engineering, University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China; 2. Department of Orthopaedics Trauma, the Second Affiliated Hospital of University of South China, Hengyang 421001, Hunan, China)

ABSTRACT Objective To investigate global optimisation of anterior acetabular column pinning channels can be achieved based on large density point cloud data. **Methods** Data were collected on the CT scans of the normal pelvis in 40 adults from January 2022 to January 2023, including 22 males and 18 females, aged 20 to 54 years old. Medical imaging data from three of the samples were selected for experimental study. In planning access for anterior acetabular column pinning, to address the issue of whether the current CAD planning methods were advanced or not, four combinations of the same point cloud acquisition channels, different directional line creation software, and the same 3D design and virtual experiment software were proposed: Mimics+Imageware+UG, Mimics+3DReshaper+UG, Mimics+ZEISS Quality Suite+UG and Mimics+Design X+UG, and directional lines created based on the centroid point set and solid point cloud of the secondary pruning model, respectively, and it applied to the planning of the left anterior column pinning channel of the three acetabular samples. The maximum internally connected cylinder without acetabular socket and pubic bone penetration was used as a safe passage for nailing of the anterior acetabular column to evaluate the advancement of each method. **Results** The fitting effect of the directional line was better than that of the unnoised solid point cloud when the central point set with obvious relevant features was selected as the sample points; and the combination of Mimics+Imageware+UG and Mimics+3DReshaper+UG could efficiently and stably obtain the desirable planning results when planning with the central point set, respectively, in the three acetabular samples 1, 2, 3. The maximum internal joint circle diameters obtained in samples 1, 2, and 3 were 10.35 mm, 9.62 mm, and 9.24 mm; and when the

基金项目: 南华大学博士科研启动资金项目(编号: 2015XQD39)

Fund project: Doctoral Research Start-up Funding Project of Nanhua University (No. 2015XQD39)

通讯作者: 李必文 E-mail: libiwen68@163.com

Corresponding author: LI Bi-wen E-mail: libiwen68@163.com

directional lines were based on the solid point cloud the combined methods of Mimics+ZEISS Quality Suite+UG and Mimics+Design X+UG were not applicable; whereas the Mimics+3DReshaper+UG the solid point cloud denoising planning method could stably obtain the maximum value of the safe channel for nail placement, and the maximum internal joint circle diameters obtained in acetabular samples 1, 2, and 3 are 10.66 mm, 10.96 mm, and 9.48 mm, respectively. **Conclusion** It is recommended that the nail placement channel planners use robust Mimics+Imageware+UG or Mimics+3DReshaper+UG centre point set planning method, and if there is enough time, it is recommended to use the solid point cloud denoising planning method of Mimics+3DReshaper+UG in order to obtain the maximum value of safe channels for nail placement.

KEYWORDS Acetabular anterior column pinning access; Global optimisation; Direction line creation method; Planning variance mechanism;

施行髌臼前柱或后柱内固定术需先行确定方向、位置、直径及深度等置钉通道参数。就前柱而言, 基于 CAD 技术规划置钉通道参数的一般流程为: 在 Mimics 中沿髌臼前方顶点—髌臼切迹连线去除后柱得到只含前柱置钉区域的髌臼 3D 修剪模型^[1], 再获取该模型的拟合中心线; 在 Imageware 中对置钉通道区段拟合中心线的中心点点集进行最小二乘直线拟合, 以此初定置钉通道方向线; 在 UG 中得到模型在通道方向线正截面的投影点云, 作出其内轮廓的最大内切圆后, 以圆心调整方向线的位置; 设计出合理的深度后得到完整的安全置钉通道参数, 以此作为置钉瞄准器的设计依据^[2]。虚拟置钉试验结果表明, 基于大密度点云数据进行置钉通道规划, 该方法实现的全局优化参数具有很好的安全性和适用性。这种 Mimics+Imageware+UG 的组合方法是以中心点点集的最小二乘直线先入为主地确定通道方向, 进行方向线位置调整后再确定其它通道参数, 该方法是否具有直径最大化的比较优势仍存疑。为此, 本研究再引入三款点云处理软件, 以三个髌臼样本为研究对象, 对左侧前柱进行置钉通道规划, 通过比较 Mimics+Imageware+UG、Mimics+3DReshaper+UG、Mimics+ZEISS Quality Suite+UG 与 Mimics+Design X+UG 等 4 种组合方法分别以修剪模型中心点点集、实体点云创建通道方向线的规划结果, 评价适用性并揭示规律特征, 从数学原理的角度阐述规划结果出现差异的机制, 结合规划效率推荐先进的规划方法。

1 资料与方法

1.1 病例选择

纳入标准: 年龄 ≥ 18 岁; 完善骨盆 CT 检查; 无骨盆疾病。排除标准: 骨盆骨折; 骨盆先天性结构异常; 严重骨质疏松; 骨盆肿瘤。

1.2 临床资料

纳入 2022 年 1 月至 2023 年 1 月行完整 CT 扫描成年人正常骨盆 CT 数据 40 例, 其中男 22 例, 女 18 例; 年龄 20~54 岁。选取其中 3 个样本的医学影像数据进行试验研究。

1.3 原理与方法

1.3.1 中心点点集生成原理 无论采用哪一种组合方法, 修剪模型中心点点集的获取途径为: 用 Mimics 的 Fit Centerline 功能得到修剪模型的曲线状拟合中心线; 再用三维点云处理软件 (Imageware 或 3DReshaper 或 ZEISS Quality Suite 或 Design X) 从众多的拟合中心线中提取置钉通道区段的中心点点集^[3], 不同之处在于只有 3DReshaper 可以设置点距。Mimics 生成曲线状拟合中心线的原理为: 将重建的髌臼 3D 修剪模型细分为三角形表面网格, 计算每个三角形表面的法线向量; 将微区段内相邻的法线向量聚合后找到与之最匹配的轴向, 作为该区段干形的轴向; 过微区段中部作出干形轴向的正截面, 运用寻优方法找出正截面内到最近骨边界点矢量模之和为最小的点, 作为该截面的中心点; 将各相互不平行截面的中心点点集成后进行光滑处理并进行样条拟合, 形成一簇曲线状拟合中心线。

1.3.2 各三维点云处理软件创建方向线的数学原理 Mimics+Imageware+UG、Mimics+3DReshaper+UG、Mimics+ZEISS Quality Suite+UG 与 Mimics+Design X+UG 等 4 种组合方法涉及 4 款三维点云处理软件, 均能依据修剪模型中心点点集或实体点云创建方向线, 但基于的数学原理不同, 以下分别阐述。

(1) 最小二乘直线拟合法。Imageware 和 3DReshaper 软件的直线拟合功能均基于最小二乘直线法^[4], 具有线性特性、无偏性和最小方差性^[5-7]。普通最小二乘直线拟合法的一般形式为:

$$\min f(x) = \sum_{i=1}^N [y_i - f(x_i, \omega_1)]^2$$

式中, x_i, y_i 为观测量的坐标, ω_1 为待定系数, N 为样本点的数量。

通常认为观测量的选取会影响拟合结果, 以相关特征明显的样本点拟合则效果更佳^[8-9]。普通最小二乘直线拟合法一般用于处理线性问题, 在试验和工程实际问题中应用较多。

(2) 高斯最佳拟合法和切比雪夫最佳拟合法。ZEISS Quality Suite 软件的直线拟合功能基于高斯最佳拟合法或切比雪夫最佳拟合法。

高斯最佳拟合法采用了高斯—牛顿迭代法求拟合直线,是用泰勒级数展开式近似地代替可线性化的非线性回归模型,通过多次迭代来不断修正回归系数使之逼近非线性回归模型的最佳回归系数,最后使初值模型的残差平方和达到最小^[10-11]。该法具有收敛性好、效率高、准确率高的特点,可以有效地解决复杂的非线性方程组,通常用于统计学、峰值分析和数据分析等多项应用中。

切比雪夫最佳拟合采用切比雪夫逼近理论求拟合直线,是基于切比雪夫多项式的性质和优势而建立的^[12],其一般形式为: $T_n(x)=\cos(n/\cos(x))$ 式中, n 为多项式的阶数, x 为观测量。

切比雪夫逼近在给定区间上的最大绝对值之差小,可以提供精确的逼近结果,但其精确性受到选择区间和多项式阶数的制约。该法在信号处理、数据拟合和数值计算等领域具有广泛的应用。

(3)N 西格玛准则法和标准化欧式距离法。Design X 软件的直线拟合功能基于 N 西格玛准则法或标准化欧式距离法。

N 西格玛准则用来度量数据的分布,标准差的计算公式一般为: $\sigma=\sqrt{\frac{\sum(x_i-\bar{x})^2}{n-1}}$ 式中, x_i 为样本点, \bar{x} 表示样本均值, n 表示样本个数。

N 西格玛准则用来衡量样本中值关于均值的离散程度,以数据的标准差为基础来确定拟合的精度,且以 N 倍的标准差作为拟合的阈值^[13-14]。该法可以处理数据中的一部分离群值,不容易受到极端值的影响。

标准化欧式距离能将不同量纲的数据转化为同一量纲^[15-18],它的计算公式一般为:

$$d(x,y)=\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i-y_i)^2}{s^2}}$$

式中, x_i,y_i 分别为向量 x 和的第 i 个特征值, s 为标准差, n 为观测点的数量。

标准化欧式距离将每个特征值除以其标准差,使每个特征值的方差都为 1,从而避免了特征值之间的量纲差异对距离计算结果的影响。

1.3.3 四种组合方法规划髌臼前柱置钉通道的流程 以对髌臼样本 1 左侧前柱置钉通道的规划叙述 4 种组合方法的操作流程。如图 1a 所示,只含前柱置钉区域的髌臼 3D 修剪模型包含了扁平状的髌骨、深凹半球形的髌臼以及腰鼓状的耻骨,模型向前及向内侧凹陷,耻骨上支还有扭曲^[19]。规划置钉通道旨在使满足强度要求的植入螺钉不能穿破髌臼窝和耻骨。鉴于修剪模型的解剖学结构还是非常复杂的,为减少冗余信息对规划的干扰,必须对模型进行二次修剪,图 1b 中间部位即为包含了关键解剖学结构

信息的二次修剪模型,前述的修剪模型指的就是二次修剪模型。

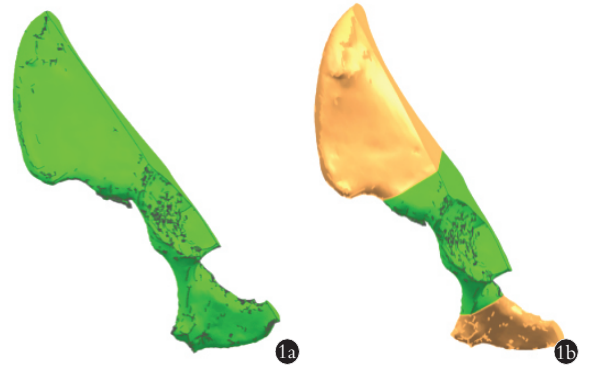


图 1 髌臼样本 1 左侧前柱 1a. 一次修剪模型 1b. 二次修剪模型
Fig.1 Left anterior column of acetabular sample 1 1a. Primary trimming model 1b. Secondary trimming model

需要说明的是,无论是依据中心点点集还是实体点云创建出的方向线,仅用来确定置钉通道的方向,而不是作为置钉通道最大内接圆柱体的轴线,必须通过 UG 软件将实体点云在该方向线的正截面上进行投影,求取投影点云内轮廓的最大内接圆并依此调整方向线位置后,才能确定通道的最大内接圆柱体参数及进钉点位置,故所有组合方法均有 UG 软件的使用。

(1)Mimics+Imageware+UG 规划流程。即在 Imageware 中依据中心点点集或实体点云创建二次修剪模型的方向线,以 UG 中实体点云的投影点云内轮廓获取最大内接圆,再沿调整了位置的方向线拉伸,获得最大内接圆柱体,具体操作参见文献^[2]。

(2)Mimics +3DReshaper +UG 规划流程。用 3DReshaper 创建二次修剪模型的方向线时,如果依据的是中心点点集则无法利用去噪点功能,而如果依据的是实体点云,一般采用黄金分割法^[20-21]在 0%~50% 区间获取最优的去噪比例。图 2 从左至右分别为依据中心点点集、实体点云未去噪、实体点云去噪 32% 时创建的方向线。UG 中的操作步骤相同。必须强调的是,尽管可以利用 3DReshaper 的“最佳圆柱”功能逐步微调而凑出二次修剪模型的最大内接圆柱体,但由于方向线位置未作调整,得到的最大内接圆柱体的直径普遍过小,没有应用价值。

(3)Mimics+ZEISS Quality Suite+UG 规划流程。使用 ZEISS Quality Suite 时,点击 GOM Inspect 后使用“构造一线一拟合线”功能,再选择高斯最佳拟合法或切比雪夫最佳拟合法对中心点点集或实体点云创建二次修剪模型的方向线。图 3 从左至右分别为采用高斯最佳拟合方法创建的中心点点集、实体点云方向线。UG 中的操作步骤同上。

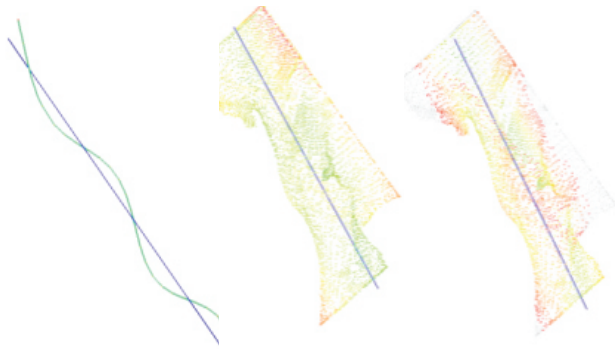


图 2 在 3DReshaper 中创建方向线
Fig.2 Creating directional lines in 3DReshaper

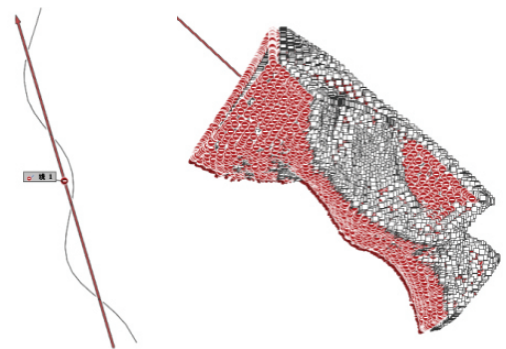


图 3 在 ZEISS Quality Suite 中创建方向线
Fig.3 Creating directional lines in ZEISS Quality Suite

(4)Mimics+Design X+UG 规划流程。在 Design X 软件使用“模型—线—方法—提取”功能,可选择 N 西格玛准则法或标准化欧式距离法对中心点点集或实体点云创建二次修剪模型的方向线。图 4 从左至右分别为采用 N 西格玛准则方法创建的中心点点集、实体点云方向线。UG 中的操作步骤同上。

2 结果

4 种组合方法对 3 个髌臼样本二次修剪模型左侧前柱置钉通道的规划结果见表 1~3, 显示了能否得到投影点云的内轮廓, 以及内轮廓最大内接圆的直径。投影点云无内轮廓是指由于方向线严重偏离了二次修剪模型干形的理想轴线, 导致方向线正截

表 1 样本 1 不同点云类型在不同规划方法下左侧前柱的最大内接圆直径

Tab.1 Sample 1 maximum internal joint circle diameter of the left front column for different point cloud types under different planning methods

| 点云类型 | Imageware | 3DReshaper 最小二乘直线法 | | ZEISS Quality Suite | | Design X | |
|-------|-----------|--------------------|----------|---------------------|-----------|----------|----------|
| | 最小二乘直线法 | 未去除噪点 | 去除 32%噪点 | 高斯最佳拟合法 | 切比雪夫最佳拟合法 | N 西格玛拟合法 | 标准化欧式距离法 |
| 中心点点集 | 10.35* | 10.35 | 无法去噪 | 10.34* | 8.42* | 10.09* | 10.09* |
| 实体点云 | 7.02 | 7.02 | 10.66* | 5.79 | 3.74 | 投影点云无内轮廓 | 投影点云无内轮廓 |

单位: mm

注: *直径数据分别为不同样本的不同规划方法中相对最大内接圆直径。下同

表 2 样本 2 不同点云类型在不同规划方法下左侧前柱的最大内接圆直径

Tab.2 Sample 2 maximum internal joint circle diameter of the left front column for different point cloud types under different planning methods

| 点云类型 | Imageware | 3DReshaper 最小二乘直线法 | | ZEISS Quality Suite | | Design X | |
|-------|-----------|--------------------|----------|---------------------|-----------|----------|----------|
| | 最小二乘直线法 | 未去除噪点 | 去除 25%噪点 | 高斯最佳拟合法 | 切比雪夫最佳拟合法 | N 西格玛拟合法 | 标准化欧式距离法 |
| 中心点点集 | 9.62* | 9.62 | 无法去噪 | 9.43* | 10.90* | 10.02* | 10.64* |
| 实体点云 | 5.76 | 5.76 | 10.96* | 5.96 | 4.10 | 5.36 | 投影点云无内轮廓 |

单位: mm

表 3 样本 3 不同点云类型在不同规划方法下左侧前柱的最大内接圆直径

Tab.3 Sample 3 maximum internal joint circle diameter of the left front column for different point cloud types under different planning methods

| 点云类型 | Imageware | 3DReshaper 最小二乘直线法 | | ZEISS Quality Suite | | Design X | |
|-------|-----------|--------------------|---------|---------------------|-----------|----------|----------|
| | 最小二乘直线法 | 未去除噪点 | 去除 8%噪点 | 高斯最佳拟合法 | 切比雪夫最佳拟合法 | N 西格玛拟合法 | 标准化欧式距离法 |
| 中心点点集 | 9.24* | 9.24 | 无法去噪 | 9.18* | 8.92* | 8.91* | 7.90* |
| 实体点云 | 8.62 | 8.62 | 9.48* | 8.58 | 投影点云无内轮廓 | 8.35 | 投影点云无内轮廓 |

单位: mm

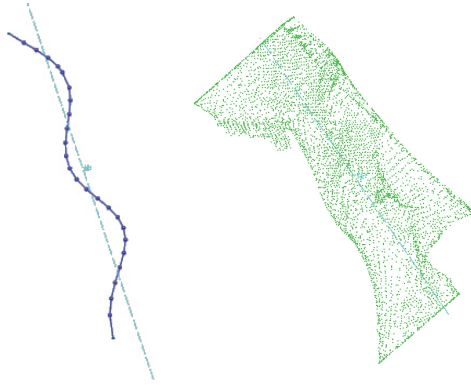


图 4 在 Design X 中创建方向线

Fig.4 Creating directional lines in Design X

面被二次修剪模型表面致密点云的投影点云充满,用相关边缘提取方法得不到投影点云的内轮廓。

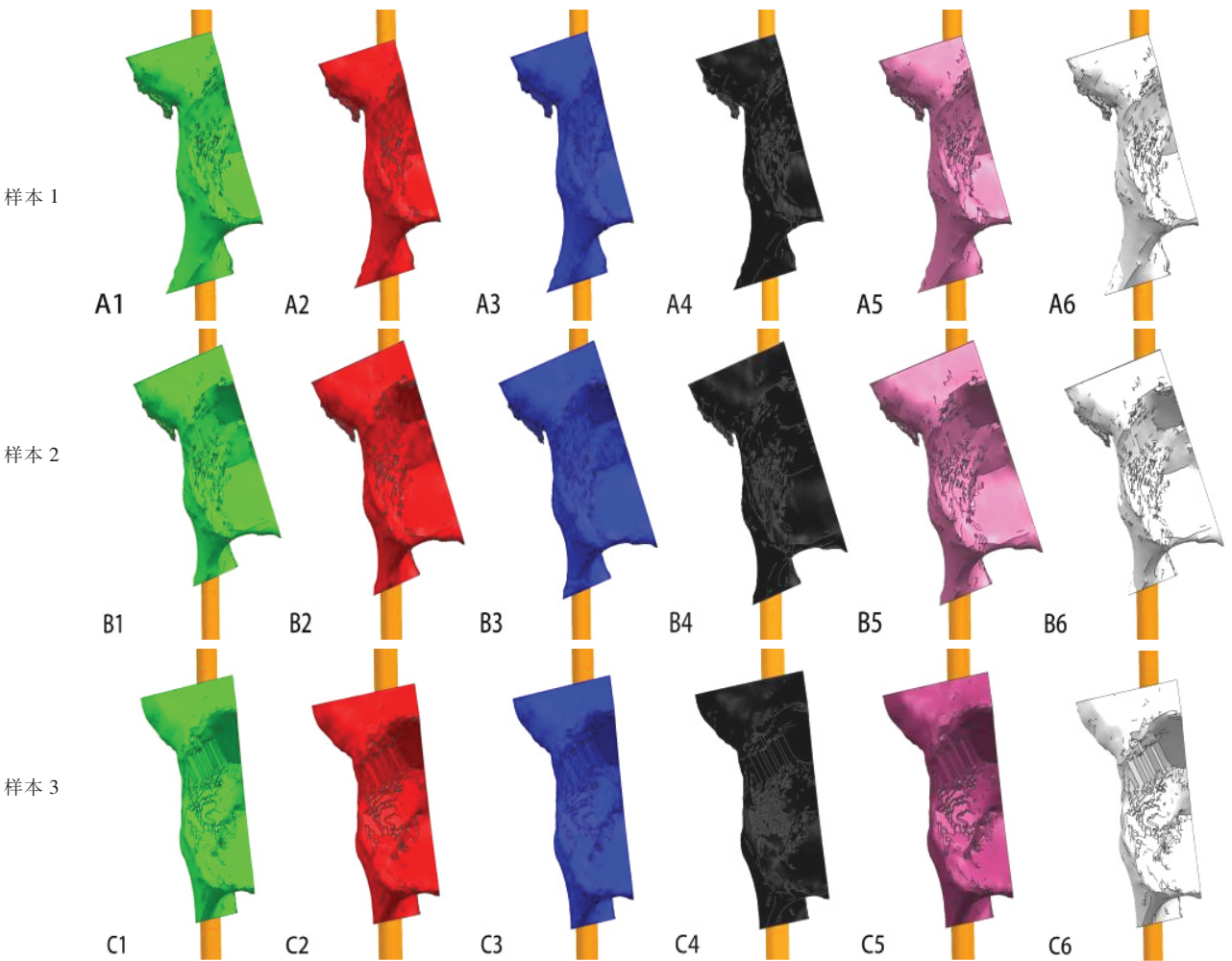
依据通道最大内接圆柱体进行的虚拟置钉试验见图 5, 其中 A-C 中的圆柱直径分别对应表 1~表 3

中带*号的最大内接圆直径数据(即 A1 为样本 1 的中心点点集在最小二乘直线法拟合形成的最大内接圆直径 10.35 mm, A2 为样本 1 的实体点云在最小二乘直线法去除噪点后拟合形成的最大内接圆直径 10.66 mm, 以此类推), 结果表明均未出现髌臼窝和耻骨的穿破现象, 最大内接圆柱体形成了置钉安全通道。

现总结出 4 种组合方法规划结果的一般规律(见图 6)。

(1)方向线依据中心点点集时,所有组合方法能对二次修剪模型进行前柱置钉通道规划,且规划结果基本上有适用性(仅标准化欧式距离法对样本 3 的规划结果略小)。

(2)方向线依据中心点点集时,Imageware、3DR-eshaper 的最小二乘直线法和高斯最佳拟合法的规划结果非常接近且比较稳定,N 西格玛法的规划结果虽比较稳定但与前三者比不是都具优势,而切比



注:A-C 中的圆柱直径分别对应表 1~表 3 中带*号的最大内接圆直径数据(即 A1 为样本 1 的中心点点集在最小二乘直线法拟合形成的最大内接圆直径 10.35 mm, A2 为样本 1 的实体点云在最小二乘直线法去除噪点后拟合形成的最大内接圆直径 10.66 mm, 以此类推)

图 5 虚拟置钉试验结果

Fig.5 Results of virtual pegging experiments

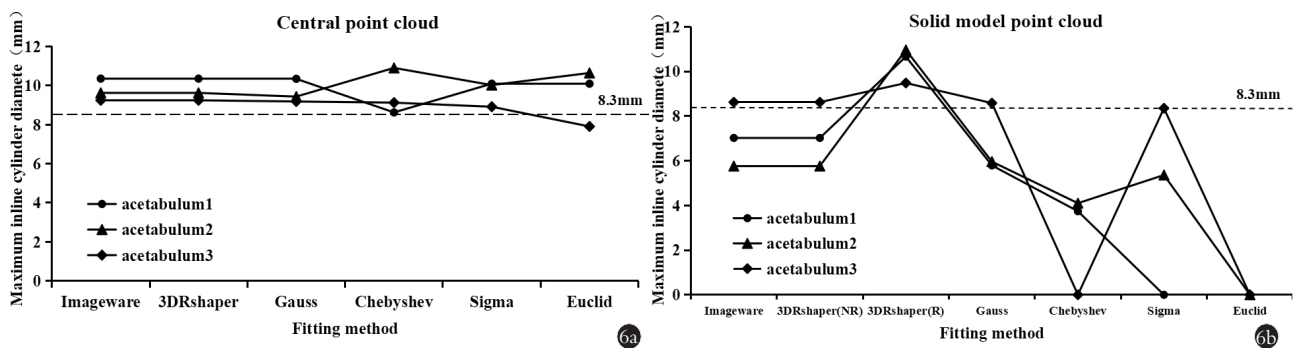


图 6 规划结果的规律及其适用性 6a. 依据中心点点集时 6b. 依据实体点云时

Fig.6 Patterns of planning results and their applicability 6a. Based on the centroid point set 6b. Based on the solid point cloud

雪夫最佳拟合法和标准化欧式距离法的规划结果鲁棒性不如前 4 种。

(3)方向线依据实体点云时,切比雪夫最佳拟合法和 N 西格玛法对部分样本可行,标准化欧式距离法则对所有样本不可行。

(4)Imageware、3DRshaper(不去噪)的最小二乘直线法和 Gauss 最佳拟合法方向线依据中心点点集的规划结果均优于依据实体点云的规划结果。

(5)方向线依据实体点云时,3DRshaper(去噪)的最小二乘直线法获得的最大内接圆柱体的直径均最大,而其它的规划结果仅样本 3 的稍具实用性。

4 种组合方法的规划结果规律及其适用性直观反映见图 6,图中以 >8.3 mm 为最大内接圆柱体的适用直径,这是依据文献^[22-23]提供的统计数据,将螺钉直径设为 5.5 mm、皮质骨厚度设为 1.1 mm、置钉瞄准器设计制造和使用偏差设为 0.3 mm 而得到的。

3 讨论

就 Imageware 和 3DRshaper 软件的最小二乘直线拟合法数学原理而言,选取相关特征明显的中心点点集作为样本点,方向线的拟合效果整体上优于未去噪的实体点云拟合效果。之所以 3DRshaper 在去噪情况下依据实体点云创建方向线得到的规划结果更为理想,是因为前期 Mimics 形成曲线状拟合中心线时进行了光滑处理,使各截面的中心点或多或少地偏离了截面的几何中心,从而在一定程度上影响了方向线的角度,进而影响了最大内接圆柱体的直径尺寸,而 3DRshaper 的实体点云去噪规划法有效地减少了冗余信息的干扰、保留了关键解剖学结构信息,具有比较优势。但 Mimics 提供的中心点点集适合所有组合方法并能得到具有适用性规划结果的事实,说明中心点点集的精度具有可信性。

方向线依据二次修剪模型的所有实体点云时,ZEISS Quality Suite 软件内设的高斯最佳拟合法允许误差率数值会不同程度地影响到拟合效果,从而影响鲁棒性;同一软件内设的切比雪夫最佳拟合法选

择区间和多项式阶数,一方面影响到方向线的精确性,另一方面可能导致过度拟合或震荡现象,综合作用的结果是方向线偏离二次修剪模型干形的理想轴线的程度比较严重;Design X 软件内设的作为拟合阈值的 N 倍的标准差不能完全适用于处理解剖学结构非常复杂的二次修剪模型点云数据,一部分离群值会干扰到方向线的创建结果;标准化欧式距离法尽管适用于处理中心点点集的稀疏数据,却在对大规模实体点云标准化后丢失一些数据信息,导致方向线非常严重地偏离了二次修剪模型干形的理想轴线。

修剪合适的髌臼 3D 模型的中心点点集具有较高的可信度,4 种组合方法均能对其创建方向线并得到具有适用性的规划结果,推荐采用鲁棒性好的 Mimics+Imageware+UG 或 Mimics+3DRshaper+UG 中心点点集规划法,高效率地获得理想的规划结果。如果时间充裕,建议采用 Mimics+3DRshaper+UG 的实体点云去噪规划法以获得数值最大的置钉安全通道,因采用黄金分割法获取最优去噪比时会多花费约 1 h 的时间。对中心点点集生成原理和规划差异机制的阐述有助于从本质上理解对先进组合方法的选择。

参考文献

[1] 王林超,李必文,胡良斌,等. 个体化髌臼前柱置钉通道 CAD 精确规划技术[J]. 医疗装备,2018,31(5):7-10.
WANG L C, LI B W, HU L B, et al. The research of CAD precisely planning technology of individualized acetabular anterior column nailing channel[J]. Med Equip, 2018, 31(5):7-10. Chinese.

[2] 周先阳. 基于点云数据的髌臼置钉瞄准器通道参数优化[D]. 衡阳:南华大学,2021.
ZHOU X Y. Optimization of acetabular nail sight channel parameters based on point cloud data[D]. Hengyang: University of South China, 2021. Chinese.

[3] 李杰. 髌臼后柱置钉通道调控规划及装配式瞄准器研究[D]. 衡阳:南华大学,2020.
LI J. Study on the planning of the screw channel in the posterior column of the acetabulum and the assembled aiming device [D].

- Hengyang: University of South China, 2020. Chinese.
- [4] 吴桂池. 基于三维激光扫描技术的隧道断面变形监测研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
WU G C. Tunnel profile deformation monitoring studying based on terrestrial laser scanning technology[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. Chinese.
- [5] LV Y T, YAO Y B, ZHOU J, et al. Complete consistency for the weighted least squares estimators in semiparametric regression models[J]. *Commun Stat Theory Meth*, 2023, 52(22): 7797–7818.
- [6] MOHIUDDIN A M, BANSAL J C. An improved linear prediction evolution algorithm based on nonlinear least square fitting model for optimization[J]. *Soft Comput A Fusion Found Methodol Appl*, 2023, 27(19): 14019–14044.
- [7] JIANG C, WANG F L, NING Y. Application of least squares fitting algorithm in transformer terminal unit electrical quantities acquisition[J]. *IOP Conf Ser: Earth Environ Sci*, 2022, 983(1): 012021.
- [8] 张艳莉. 基于最小二乘法拟合直线的研究[J]. *信息通信*, 2014, 27(11): 44–45.
ZHANG Y L. The research of Fitting Straight-line least square method[J]. *Inf Commun*, 2014, 27(11): 44–45. Chinese.
- [9] 丁克良, 沈云中, 欧吉坤. 整体最小二乘法直线拟合[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2010, 29(1): 44–47.
DING K L, SHEN Y Z, OU J K. Methods of line-fitting based on total least-squares[J]. *J Liaoning Tech Univ Nat Sci*, 2010, 29(1): 44–47. Chinese.
- [10] WANG X S, SONG Y H, YU M Y. Comprehensive probability method of buffer insertion based on Gaussian fitting under process variation condition[J]. *Microelectron J*, 2023, 134: 105728.
- [11] CHEN M C, ZHAO Y. Gauss-newton iteration estimation to the parameters in nonlinear regression models[J]. *Adv Mater Res*, 2013, 709: 571–574.
- [12] 张云芝, 刘付永红, 林万荣. 用切比雪夫最佳逼近理论求拟合直线方法[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 1999, 27(1): 117–119.
ZHANG Y Z, LIU F Y H, LIN W R. Method for fin fitting straight line by Chebyshev's b approximation theory[J]. *J South China Univ Technol Nat Sci Ed*, 1999, 27(1): 117–119. Chinese.
- [13] NISHIMURA H, FUJIMORI T, MISUMI T, et al. Resurgence and semiclassical expansion in two-dimensional large-N sigma models[J]. *J High Energy Phys*, 2022, 2022(6): 151.
- [14] ZHAO P, LIU G Z. Application of sample screening method based on single Sigma criterion in spectral noninvasive blood detection [C]//2nd International Conference on Signal Image Processing and Communication (ICSIPC 2022). Qingdao, China. SPIE, 2022.
- [15] SUN L R, MAO H F, ZHENG C, et al. Interval-valued functional clustering based on the improved Euclidean distance with application to air quality index[J]. *Appl Math Model*, 2023, 123: 627–643.
- [16] XU H S, XU D P, LI S J, et al. Stress tensor similarity index based on Euclidean distance for numerical back analysis of in situ stress fields[J]. *Comput Geotech*, 2023, 159: 105457.
- [17] LI G, FU L S, GAO C Q, et al. Multi-class detection of kiwifruit flower and its distribution identification in orchard based on YOLOv5l and Euclidean distance[J]. *Comput Electron Agric*, 2022, 201: 107342.
- [18] DENIPITIYAGE D, JAYASUNDARA V, RODRIGO R, et al. Point-Caps: raw point cloud processing using capsule networks with Euclidean distance routing[J]. *J Vis Commun Image Represent*, 2022, 88: 103612.
- [19] 朱新红, 闵继康, 张强华, 等. 经腹直肌外侧切口入路联合跟骨异形钢板内固定治疗累及四边体的髌臼骨折[J]. *中国骨伤*, 2022, 35(11): 1031–1036.
ZHU X H, MIN J K, ZHANG Q H, et al. Treatment of acetabular fracture involving quadrilateral body by external rectus abdominis incision combined with calcaneal profiled plate internal fixation [J]. *China J Orthop Traumatol*, 2022, 35(11): 1031–1036. Chinese.
- [20] 欧阳尉, 袁成功, 房成群, 等. 异步电机基于改进黄金分割法效率优化仿真[J]. *电工技术*, 2021(15): 8–9, 14.
OUYANG W, YUAN C G, FANG C Q, et al. Optimization simulation of asynchronous motor efficiency based on improved golden section method[J]. *Electr Eng*, 2021(15): 8–9, 14. Chinese.
- [21] LIU Y T, YE N H, HU X L, et al. An improved fatigue damage model based on the virtual load spectrum of golden section method[J]. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*, 2021, 44(8): 2101–2118.
- [22] 白雅致. 髌臼前柱拉力螺钉置钉位置的数字化研究[D]. 太原: 山西医科大学, 2021.
BAI Y Z. Digital study on the position of anterior acetabular lag screw[D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2021. Chinese.
- [23] 孙剑伟, 尹望平, 张春才, 等. 髌臼区域皮质骨厚度分布特征的三维图像测量[J]. *中国组织工程研究*, 2012, 16(22): 4006–4009.
SUN J W, YIN W P, ZHANG C C, et al. The thickness distribution characteristics of cortical bone around acetabulum measured by three-dimensional image[J]. *Chin J Tissue Eng Res*, 2012, 16(22): 4006–4009. Chinese.

(收稿日期: 2024-03-18 本文编辑: 王玉蔓)