

## 论著·基础研究

## 透视立体影像分析技术在假体无菌性松动检测中的应用研究

杨 涵<sup>1\*</sup>, 雷 浩<sup>2\*</sup>, 徐彼得<sup>1</sup>, 吴 昊<sup>3</sup>, 马寻君<sup>4</sup>, 皇艳波<sup>5</sup>, 毛远青<sup>6</sup>, 张经纬<sup>6</sup>, 王金武<sup>6</sup>

1. 上海交通大学生物医学工程学院数字医学临床转化教育部工程研究中心, 上海 200030; 2. 上海徐汇卓越医工交叉与医学人工智能技术创新中心, 上海 200233; 3. 上海大学医学院, 上海 200444; 4. 徐州医科大学医学信息与工程学院, 徐州 221004; 5. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200082; 6. 上海交通大学医学院附属第九人民医院骨科, 上海 200011

**[摘要]** **目的**·验证基于2D-3D配准的透视立体影像分析 (fluoroscopic stereophotogrammetric analysis, FSA) 技术在关节假体无菌性松动早期迁移检测的精度及临床应用可行性。**方法**·通过图像合成实验验证以光源为中心和以投影物体为中心的二维 (two dimension, 2D)-三维 (three dimension, 3D) 配准算法在不同工况下 FSA 技术的精度, 通过真实模型实验验证临床应用可行性。图像合成实验通过在虚拟环境下建立与真实环境参数相同的透视投影, 记录 3D 模型 (骨或假体) 在六自由度变换时的 2D 透视图像, 使用不同的 2D-3D 配准算法还原 3D 模型的六自由度变换, 计算配准算法的误差。真实模型验证通过骨-假体高精度迁移模拟器模拟关节置换术后骨与假体之间的迁移, 利用计算机断层成像及光学扫描重建骨或假体的 3D 模型, 使用透视设备拍摄假体迁移前后的 2D 透视图像, 再通过基于 2D-3D 配准的 FSA 技术还原假体的迁移, 计算 FSA 技术的误差。**结果**·以光源为中心的 2D-3D 配准算法在不同工况下的精度均高于以投影物体为中心的算法。配准初始条件较好时, 以光源为中心的算法与以投影物体为中心的算法相比: 旋转误差降低, 差异存在统计学意义 ( $P=0.021$ ); 位移误差降低, 差异存在统计学意义 ( $P=0.000$ )。并且, 以光源为中心的算法满足临床应用要求所需的相似度更低、配准次数更少。**结论**·基于 2D-3D 配准的 FSA 技术在人工关节假体早期迁移检测中精度满足临床应用要求。该技术可通过检测关节置换术后假体的早期迁移预警假体的晚期无菌性松动, 有望通过进一步研究应用于临床。

**[关键词]** 关节假体; 无菌性松动; 早期迁移检测; 透视分析技术

**[DOI]** 10.3969/j.issn.1674-8115.2024.09.001 **[中图分类号]** R319 **[文献标志码]** A

## Application of fluoroscopic stereophotogrammetric analysis in the detection of aseptic loosening of prostheses

YANG Han<sup>1\*</sup>, LEI Hao<sup>2\*</sup>, XU Bide<sup>1</sup>, WU Hao<sup>3</sup>, MA Xunjun<sup>4</sup>, HUANG Yanbo<sup>5</sup>, MAO Yuanqing<sup>6</sup>, ZHANG Jingwei<sup>6</sup>, WANG Jinwu<sup>6</sup>

1. Engineering Research Center of Digital Medicine and Clinical Translation, Ministry of Education of China, School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. Shanghai Xuhui Excellent Medical and Industrial Intersection and Medical Artificial Intelligence Technology Innovation Center, Shanghai 200233, China; 3. School of Medicine, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 4. School of Medical Information and Engineering, Xuzhou Medical University, Xuzhou 221004, China; 5. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China; 6. Department of Orthopaedic Surgery, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China

**[Abstract]** **Objective**·To verify the accuracy and clinical feasibility of fluoroscopic stereophotogrammetric analysis (FSA) technology based on two dimension (2D)-three dimension (3D) registration for early migration detection of aseptic loosening of joint prostheses. **Methods**·2D-3D registration algorithms centering on the light source and projected object respectively in FSA technology were verified under various working conditions through image synthesis experiments, and the feasibility of clinical application was verified through real model experiments. The image synthesis experiment established a perspective projection environment with the same parameters as the real environment in a virtual environment, the 2D perspective images of the 3D model

**[基金项目]** 国家重点研发计划 (2022YFF1202600); 上海市科学技术委员会“科技创新行动计划”国内科技合作领域项目 (22015820100); 上海交通大学医学院双百人项目 (20152224); 上海交通大学医学院转化医学创新基金 (TM201613, TM201915)。

**[作者简介]** 杨 涵 (1993—), 男, 硕士; 电子信箱: yanghan0609@sjtu.edu.cn。雷 浩 (1975—), 男, 硕士; 电子信箱: haolei@emeai.org.cn。\*为共同第一作者。

**[通信作者]** 王金武, 电子信箱: Jinwu\_wang@163.com。

**[Funding Information]** National Key R&D Program of China (2022YFF1202600); Science and Technology Innovation Action Plan of Shanghai Science and Technology Committee (22015820100); “Two-hundred Talents” Program of Shanghai Jiao Tong University School of Medicine (20152224); Translational Medicine Innovation Project of Shanghai Jiao Tong University School of Medicine (TM201613, TM201915)。

**[Corresponding Author]** WANG Jinwu, E-mail: Jinwu\_wang@163.com。



(bone or prosthesis) during the six degrees of freedom transformation were recorded, and the six degrees of freedom transformation of the 3D model was restored by using different 2D-3D registration algorithms. The error of each registration algorithm was calculated. For real model validation, the migration between bone and prosthesis after joint replacement surgery was simulated with a high precision bone prosthesis migration simulator. The 3D model of the bone or prosthesis was reconstructed by using computed tomograph (CT) images and optical scanning, and the 2D perspective images before and after prosthesis migration were captured by using a fluoroscopy device. The migration of the prosthesis was restored by using FSA technology based on 2D-3D registration, and the error of FSA technology was calculated. **Results** The accuracy of the 2D-3D registration algorithm centering on the light source was higher than that of the algorithm centering on the projected object under different working conditions. When the initial registration conditions were favorable, the algorithm centering on the light source reduced the rotation error compared to the algorithm centering on the projected object, with a statistical difference ( $P=0.021$ ), and the displacement error decreases, with a significant statistical difference ( $P=0.000$ ). Moreover, algorithms centering on the light sources required lower similarity and fewer registration times to meet clinical application requirements. **Conclusion** The accuracy of FSA technology based on 2D-3D registration in early migration detection of artificial joint prostheses meets clinical application requirements. This technology can warn of late aseptic loosening of prostheses by detecting early migration of prostheses after joint replacement surgery, and is expected to be applied to clinical practice through further research.

**[Key words]** joint prosthesis; aseptic loosening; early migration detection; fluoroscopic analysis technology

人工关节置换术是晚期骨关节疾病的有效治疗手段之一,在临床上被广泛应用。2019年我国髋关节置换和膝关节置换总量已超过95万例,且以年均近20%的速度高速增长<sup>[1]</sup>。关节假体正常的使用寿命为15~20年,但是很多假体并不能达到最大的使用年限就会失效,无菌性松动是关节置换术后假体失效与翻修的最主要原因<sup>[2-4]</sup>。研究<sup>[5-9]</sup>表明,关节假体随着时间的持续迁移是植入物失效的早期预测因素,目前已经确定假体的早期迁移与晚期的无菌性松动相关。假体早期迁移分析主要关注置换术后2年内假体与骨之间不同时间段的相对位移量。关节置换术后早期正常情况下假体的迁移量应不超过2 mm,因此松动的早期检测需要高精度的检测手段,国际上常用的检测技术为放射线立体摄影测量分析(roentgen stereophotogrammetric analysis, RSA)技术<sup>[5-6]</sup>。RSA技术是假体迁移测量的金标准,通过在骨骼上植入特殊钽标记物来测量骨骼的位置和方向。RSA技术虽然精度高,但存在着工作量过大和高侵入性等重大限制<sup>[5-6]</sup>。透视分析技术主要使用基于二维(two dimension, 2D)–三维(three dimension, 3D)的轮廓配准方法进行姿态估计,该方法同样可获得关节植入物的位置和方向<sup>[10-12]</sup>。2012年,上海交通大学医学院附属第九人民医院王金武教授团队在国内率先将基于模型和图像的透视立体影像分析(fluoroscopic stereophotogrammetric analysis, FSA)技术应用于髋关节假体无菌性松动的诊断<sup>[13-14]</sup>。针对FSA技术缺乏专用分析软件、精度低等问题,王金武教授团队

开发了FSA专用分析软件。本研究主要通过图像合成实验及真实模型验证,评估FSA技术应用于临床上假体无菌性松动早期迁移检测的可行性。

## 1 对象与方法

### 1.1 研究对象

本研究通过图像合成实验、真实模型验证实验及模拟双平面图像合成实验的分析,验证基于2D–3D配准算法的FSA技术精度及临床应用可行性。人工关节松动的关键指标包括假体绕轴线的旋转(内旋)及沿着纵向轴向的平移(沉降)。因此,本研究主要监测指标是沿人工关节假体长轴的位移量( $t_y$ )和旋转量( $r_y$ )。

### 1.2 图像合成实验

本研究通过图像合成实验验证基于以投影物体为中心(算法1)及以光源为中心(算法2)的2种2D–3D配准算法的FSA技术分别在2种工况下的精度。以投影物体为中心的算法的基本原理为光源移动,3D模型固定不动进行投影变换;以光源为中心的算法的基本原理为光源固定不动,3D模型移动进行投影变换。2种算法可类比为人的眼睛观察物体,算法1即物体不动,眼睛移动视角来四处观察物体;算法2即眼睛视角固定,移动物体来观察。2种工况条件分别为:①工况1配准初始条件较好,透视图像分辨率为1 024×1 024,假体随机六自由度变换为平移范围±5 mm,旋转范围±10°。②工况2配准初始条

件相对较差,透视图像分辨率为 $512 \times 512$ ,假体随机六自由度变换为平移范围 $\pm 10$  mm,旋转范围 $\pm 10^\circ$ 。

本研究在虚拟环境下建立与真实环境参数相同的透视投影环境(图1)。首先记录3D模型(骨或假体)的初始位置 $A(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 及初始2D透视图像;其次对3D模型施加随机的六自由度几何变换,并记录变换的真实值 $T_1(t_{x1}, t_{y1}, t_{z1}, r_{x1}, r_{y1}, r_{z1})$ ;再次,通过不同的2D-3D配准算法将三维模型配准还原至与初始位置相似度最高(通过图像灰度值计算)的配准位置,并记录配准位置变换的六自由度变换数值 $T_2(t_{x2}, t_{y2}, t_{z2}, r_{x2}, r_{y2}, r_{z2})$ ,配准值与真实值两者之间的差值 $\Delta T(t_x, t_y, t_z, r_x, r_y, r_z)$ 即为算法的误差。本研究参考PRINS等<sup>[15]</sup>的实验设置,设定临床应用要求为各方向上平移误差 $\leq \pm 1$  mm,旋转误差 $\leq \pm 1^\circ$ 。误差低于此数值即认为可满足临床应用要求。

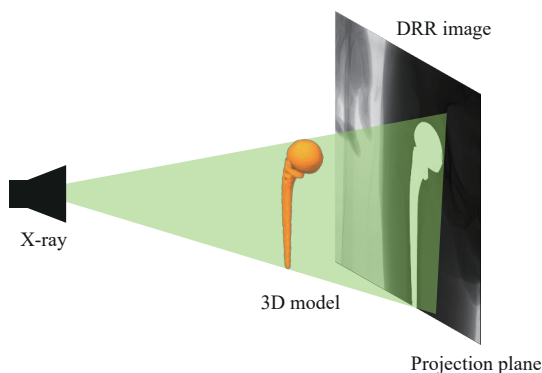


图1 数字重建放射影像投影原理

Fig 1 Principles of digitally reconstructed radiograph (DRR) image projection

### 1.3 真实模型验证

本研究设计了骨-假体高精度迁移模拟器,并基于图像合成实验验证的结果,选择精度较高的算法,进行真实模型验证,验证FSA技术在真实模型下的精度。

**1.3.1 骨-假体高精度迁移模拟器** 本研究采用猪的股骨(后腿)切除股骨头以模拟关节置换,植入髋关节假体,将假体与股骨先黏合再分离,模拟骨与假体之间的松动。如图2所示,骨-假体高精度迁移模拟器包含3个平移轴(X, Y, Z)和1个旋转轴(R),以及猪股骨、金属关节假体柄。模拟器由微分头驱动。各轴的行程为X轴 $\pm 6.5$  mm, Y轴 $\pm 10$  mm, Z轴 $\pm 6.5$  mm; R轴 $360^\circ$ 粗调,  $\pm 5^\circ$ 精调。X、Y、Z轴的

最小刻度为0.01 mm, R轴的最小刻度为 $10'$ 。

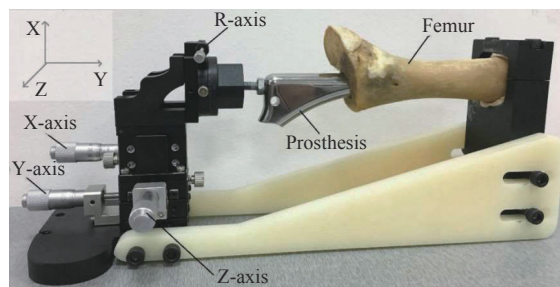


图2 骨-假体高精度迁移模拟器

Fig 2 High precision bone-prosthesis migration simulator

**1.3.2 研究步骤** 首先将骨和假体分别使用计算机断层成像(computed tomograph, CT)设备及光学扫描设备扫描并建立3D模型,而后将骨和假体先黏合再分离模拟假体松动,通过骨-假体高精度迁移模拟器为骨和假体施加相对位移及旋转(松动量),使用医用血管造影X射线机拍摄透视图像,结合基于2D-3D配准的FSA技术来计算假体与骨之间的相对位移。以骨-假体高精度迁移模拟器的实际位移数据为金标准,将FSA技术分析的数据与金标准数据进行对比,验证FSA技术2D-3D配准的精度。

**1.3.3 数据采集** 通过CT扫描设备(LightSpeed RT16 CT系统, GE医疗系统集团,英国)采集股骨断层影像数据(层厚0.5 mm)。通过医用血管造影X射线机(Innova IGS 540, GE医疗系统集团,英国)采集2D透视图像。通过精度为0.1 mm的光学扫描仪(Creaform公司,加拿大)对假体进行扫描。

由于金属假体在CT扫描时存在伪影,利用CT序列重建的假体三维模型往往受到干扰,导致不能重建出完全符合实际的三维模型,从而影响配准的精度。已有研究<sup>[6]</sup>证明基于计算机辅助设计或逆向工程获取的假体模型同样适用于早期假体迁移的检测,因此本研究采用光学扫描获取假体的三维模型。

**1.3.4 3D重建** 采用BOHOLO医学影像软件(上海宝葫芦医疗科技有限公司)重建股骨模型,通过软件的3D重建、阈值调整、橡皮擦、平滑等功能对模型进行重建及调整(图3)。通过光学扫描仪扫描生成假体的3D模型(图4)。

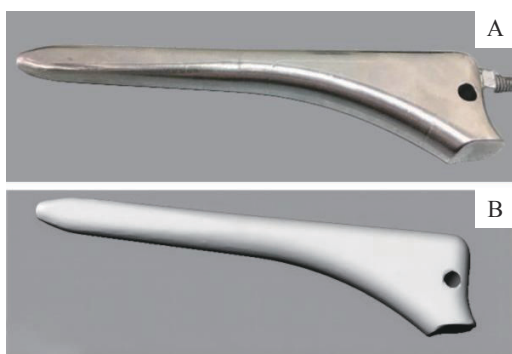
**1.3.5 2D-3D配准** 载入连续多帧的2D透视图像,分别对假体与骨进行配准;在每帧图像的配准中,手动调整模型位置至距真实位置平移 $\pm 5$  mm以内,旋转 $\pm 10^\circ$ 以内,随后进行自动化配准,直至相似度达到最低要求(图5)。





图3 骨的3D模型

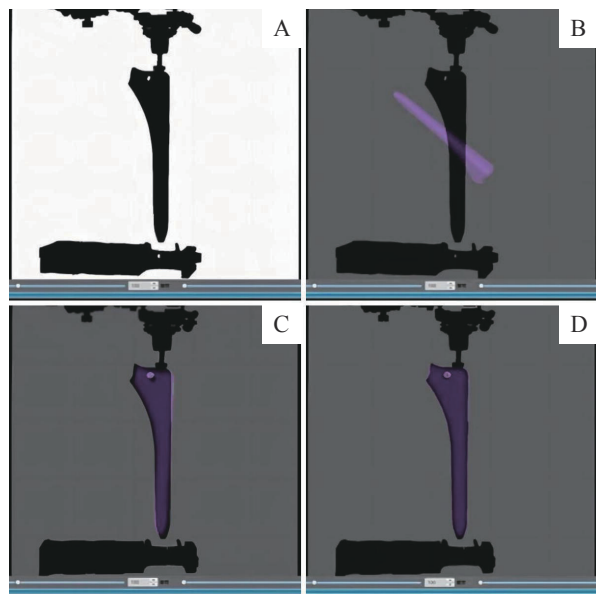
Fig 3 3D bone model



Note: A. Prosthesis. B. Optical scanning model of prosthesis.

图4 假体及假体光学扫描模型

Fig 4 Prosthesis and optical scanning model



Note: A. Window width and window level adjustment. B. Loading a 3D model. C. Manual adjustment. D. Registration completed.

图5 假体2D-3D配准过程

Fig 5 2D-3D registration process of prostheses

**1.3.6 数据分析** 采用模拟器中骨与假体之间的零迁移以及5°、5 mm迁移2种方式进行验证。零迁移, 即骨与假体之间的相对旋转和相对位移均为0; 5°、5 mm迁移, 即骨与假体之间的相对旋转为5°、相对位移为5 mm。模拟器迁移数据(真实值)与骨和假体配准后的相对位移及相对旋转数据(配准值)之间的差值即为配准误差。

#### 1.4 模拟双平面图像合成实验

双平面透视相对单平面而言可提高分析精度, 但对透视设备的要求较高。本研究采用模拟的双平面FSA方法, 假设患者在透视时保持站立位固定姿势, 通过C型臂围绕患者水平旋转拍摄2张透视图像模拟双平面透视(图6)。通过图像合成实验, 验证相同工况下, 模拟双平面与单平面透视的精度差别。

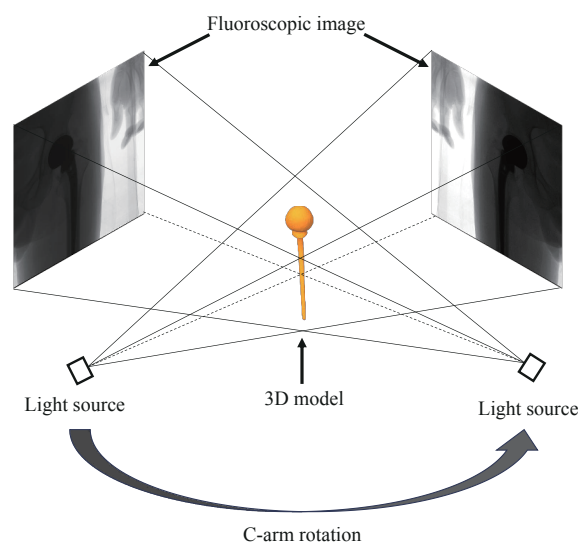


图6 模拟双平面示意

Fig 6 Simulated dual FSA

#### 1.5 统计学分析

采用SPSS 17.0软件进行统计学分析。采用 $\chi^2$ 检验对2组的准确率进行比较,  $P < 0.05$ 表示差异有统计学意义。

相似性度量采用归一化互相关(normalized cross-correlation, NCC)方法进行计算, 公式如下:

$$NCC = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M [I_X(i,j) - \bar{I}_X][I_{DRR}(i,j) - \bar{I}_{DRR}]}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I_X(i,j) - \bar{I}_X)^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (I_{DRR}(i,j) - \bar{I}_{DRR})^2 \right]}}$$

其中,  $I_X(i, j)$ 表示原始图像中点 $(i, j)$ 处的图像灰度,  $I_{DRR}(i, j)$ 表示待配准图像中点 $(i, j)$ 处的图像灰度,  $\bar{I}_X$ 表示原始图像灰度均值,  $\bar{I}_{DRR}$ 表示待配准图像灰度均值。2幅图像越相似, NCC的结果越趋近于1。

## 2 结果

### 2.1 图像合成实验结果

针对算法1及算法2,在2种工况下各进行了50次图像合成配准实验,结果见图7~图10。如表1所示,配准工况1时,算法2与算法1相比,旋转误差

( $r_y$ )降低,位移误差( $t_y$ )降低,差异均具有统计学意义( $P=0.021$ ,  $P=0.000$ );配准工况2时,算法2与算法1相比,旋转误差( $r_y$ )的差异无统计学意义,位移误差( $t_y$ )降低,差异具有统计学意义( $P=0.000$ )。

算法1与算法2在不同工况下满足临床要求的最低相似度如表2所示。在配准初始条件相对较差的情况下(工况2),算法1的精度不能满足临床应用要求。在工况1的条件下,算法2满足临床应用要求所需的相似度更低、配准次数更少,更容易满足临床应用要求。因此本研究选择算法2作为FSA的2D-3D配准算法。

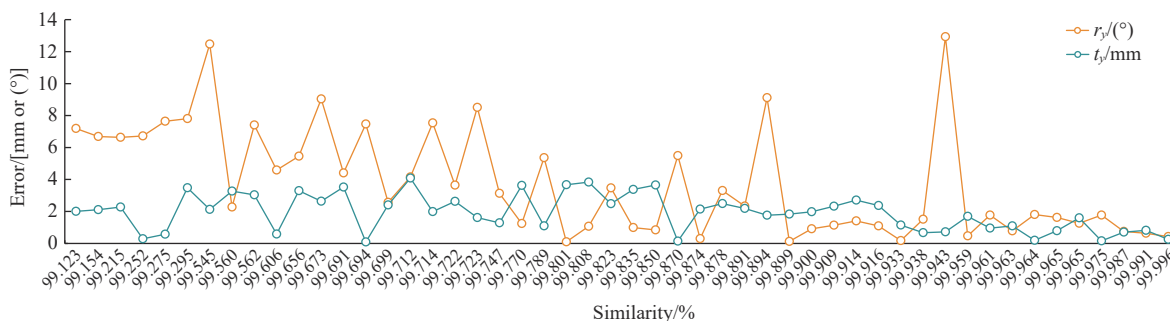


图7 算法1在工况1下的配准结果

Fig 7 Registration results of algorithm 1 under condition 1

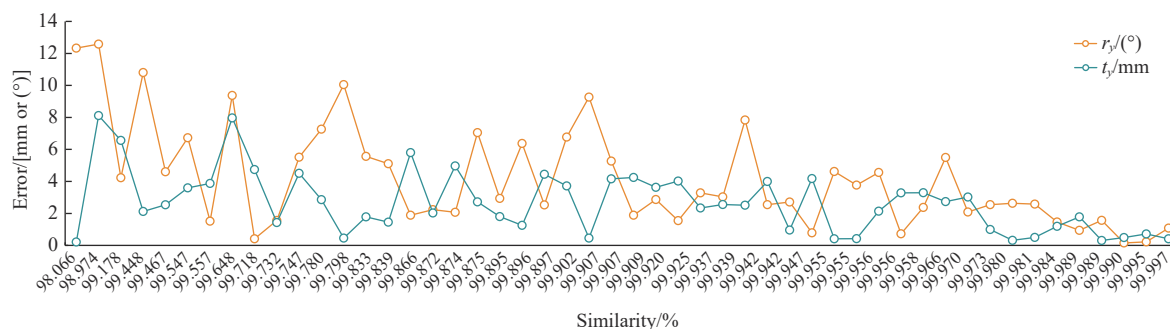


图8 算法1在工况2下的配准结果

Fig 8 Registration results of algorithm 1 under condition 2

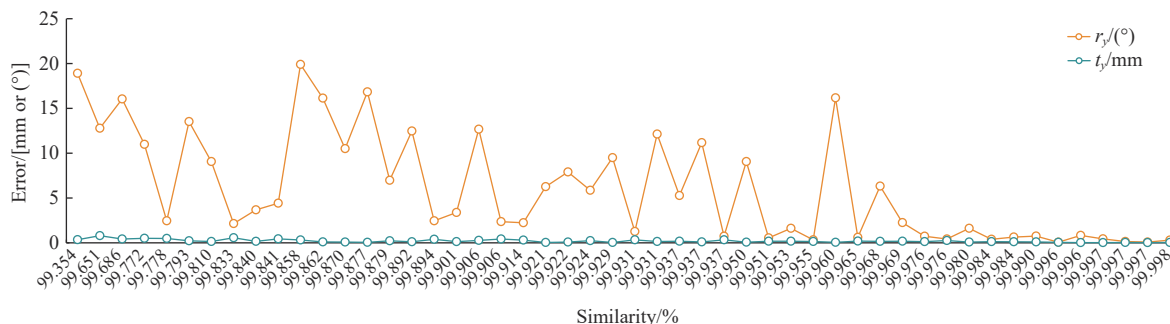


图9 算法2在工况1下的配准结果

Fig 9 Registration results of algorithm 2 under condition 1

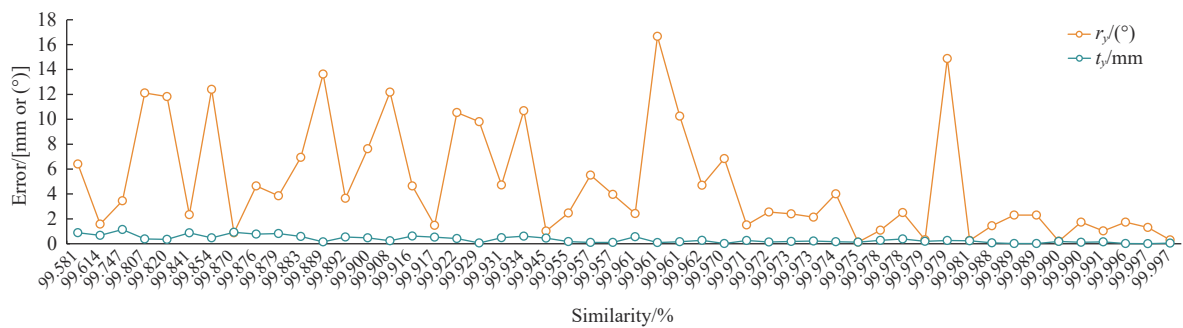


图 10 算法 2 在工况 2 下的配准结果  
Fig 10 Registration results of algorithm 2 under condition 2

表 1 2 种工况下算法 1 和算法 2 误差对比  
Tab 1 Error comparison of algorithm 1 and algorithm 2 under different working conditions

Item	Algorithm 1	Algorithm 2	<i>t</i> value	<i>P</i> value
Working condition 1				
$r_y/(^{\circ})$	6.06±5.95	3.79±3.36	2.352	0.021
$t_y/\text{mm}$	1.91±1.15	0.20±0.17	10.436	0.000
Working condition 2				
$r_y/(^{\circ})$	4.15±3.18	3.47±2.79	1.135	0.259
$t_y/\text{mm}$	2.68±1.95	0.34±0.28	8.396	0.000

表 2 算法 1 与算法 2 临床应用要求满足情况比较  
Tab 2 Comparison of clinical application requirements satisfied by algorithm 1 and algorithm 2

Item	Algorithm 1		Algorithm 2	
	Working condition 1	Working condition 2	Working condition 1	Working condition 2
Minimum similarity to meet clinical application requirements/%	99.987	/	99.984	99.997
Average number of registrations required to meet clinical application requirements/ <i>n</i>	16.67	/	5.56	50.00
$r_y$ error that meets clinical application requirements/( $^{\circ}$ )	0.60±0.13	/	0.40±0.27	0.81±0.50
$t_y$ error that meets clinical application requirements/mm	0.59±0.24	/	0.06±0.04	0.03±0.02

2.2 真实模型验证实验结果

本研究连续拍摄了 8 组相同视野下, 股骨与假体之间相对位移 5 mm、相对旋转 5° 时的透视图像, 其误差结果见表 3。股骨与假体的配准相似度均在 99.984%

以上, 其旋转误差 ( $r_y$ ) 和位移误差 ( $t_y$ ) 均被认为可以满足临床应用需求。与零迁移相比, 相对位移 5 mm、相对旋转 5° 时, 旋转误差增大, 差异有统计学意义 ( $P=0.000$ ); 位移误差间差异无统计学意义。

表 3 真实模型验证实验结果  
Tab 3 Experimental results of real model validation

Error	Zero migration	Relative displacement 5 mm, relative rotation 5°	<i>t</i> value	<i>P</i> value
$r_y/(^{\circ})$	0.37±0.21	0.84±0.15	4.879	0.000
$t_y/\text{mm}$	0.44±0.22	0.47±0.19	0.073	0.943

2.3 模拟双平面实验结果

对算法 2 在工况 2 下进行了 50 次图像合成配准实验, 结果见图 11。算法 2 在模拟双平面下与单平面相

比 (表 4), 旋转误差 ( $r_y$ ) 降低, 差异具有统计学意义 ( $P=0.000$ ); 位移误差 ( $t_y$ ) 降低, 差异具有统计学意义 ( $P=0.009$ )。

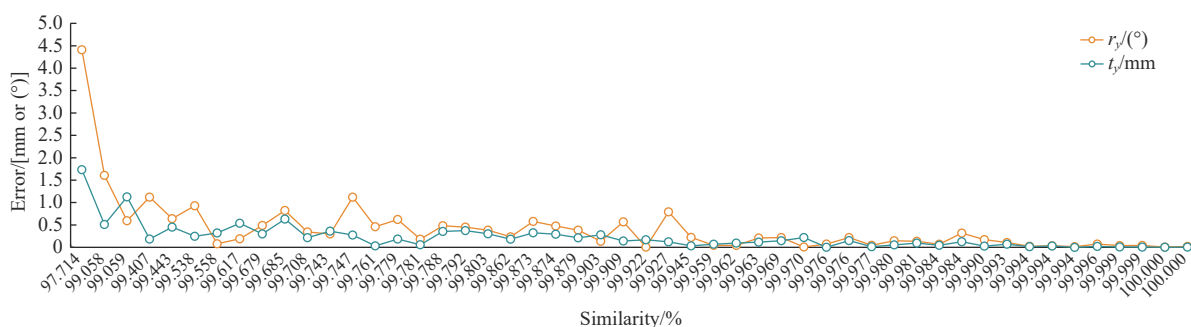


图 11 双平面算法 2 在工况 2 下的配准结果

Fig 11 Registration results of simulated dual FSA algorithm 2 under condition 2

表 4 相同工况下算法 2 在单平面和双平面的误差对比

Tab 4 Comparison of errors of algorithm 2 in FSA and simulated dual FSA under the same operating conditions

Error	FSA	Dual FSA	<i>t</i> value	<i>P</i> value
$r_y/(^{\circ})$	6.06±5.95	0.41±0.67	6.666	0.000
$t_y/\text{mm}$	0.20±0.17	0.12±0.11	2.680	0.009

### 3 讨论

人工关节的无菌性松动是困扰关节置换术的一大难题。假体无菌性松动的早期诊断是评估假体长期植入性能的有效手段,可以有效避免劣质假体造成更大的危害。目前,常用的检测手段均存在一定的临床应用限制。精度较高的 RSA 技术对数据要求高、侵入性强,而无侵入性、对数据要求低的单图像放射性股骨假体分析技术精度过低且只能提供假体的 2D 迁移量<sup>[5-8]</sup>。目前,国外众多研究机构均在探究可以满足临床应用的、更便捷的人工关节假体早期迁移检测方法<sup>[16-18]</sup>。

基于 2D-3D 配准的 FSA 技术,可通过 CT 数据及光学扫描数据重建的骨与假体的 3D 模型与医用血管造影 X 射线机拍摄的 2D 透视图像进行 2D-3D 配准,仅需通过 2D 图像便可计算假体与骨之间的相对位移变化,从而分析人工关节假体的早期迁移情况。与常用的 RSA 技术相比, FSA 技术对设备的要求低、自动化程度高、精度可以满足临床应用的要求,为假体无菌性松动的早期诊断提供了更便捷、更实用的检测方法。

本研究针对人工关节置换术后假体的早期迁移,验证了基于 2D-3D 配准的 FSA 技术在假体早期迁移检测应用的可行性,并检验了其精度和有效性。通过图像合成实验测试了以投影物体为中心及以光源为中心的 2 种 2D-3D 配准算法的 FSA 技术分别在 2 种工况下的精度,验证适合单平面 FSA 的算法与配准初始环

境,提高了 2D-3D 配准的精度。通过骨-假体高精度迁移模拟验证基于 2D-3D 配准的 FSA 技术在骨与假体真实迁移配准上的精度,证实了 FSA 技术在临床应用的可行性。并且,本研究针对人工关节假体早期迁移分析,提出了一种模拟的双平面 FSA 方法;该方法在不改变设备要求的情况下,精度更高,更适合临床应用,是 FSA 技术未来研究方向之一。

FSA 技术可用于不同关节假体的迁移检测,但不同类型的假体可能会影响 2D-3D 配准的精度。本研究仅探究了股骨柄假体迁移检测的精度,在未来的工作中还将探索不同假体类型对 FSA 技术的假体迁移检测精度的影响。此外,本研究尚未进行临床真实数据验证。临床真实环境中,不同精度的 CT 断层数据重建的 3D 模型以及不同精度的透视图像等,均有可能对 2D-3D 配准结果产生影响。因此,在未来的工作中还需验证 FSA 技术在临床真实数据中的假体迁移检测精度。

综上,本研究针对基于 2D-3D 配准的 FSA 技术,初步验证了其在人工关节假体早期迁移检测中的精度及可行性,实验结果显示其可满足临床应用要求。该技术有助于建立人工关节假体的临床实验分级审查原则,筛查出安全性和有效性不达标的劣质假体,以保障患者的安全。

#### 利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

## 作者贡献/Authors' Contributions

王金武、毛远青、雷浩、杨涵负责实验设计; 杨涵、张经纬、马寻君、皇艳波负责实验的具体执行; 杨涵、雷浩、徐彼得、吴昊负责数据整理、论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by WANG Jinwu, LEI Hao, MAO Yuanqing and YANG Han. The experiments were performed by YANG Han,

ZHANG Jingwei, MA Xunjun and HUANG Yanbo. The data organization, paper writing, and revision were completed by YANG Han, LEI Hao, XU Bide and WU Hao. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

- Received: 2024-01-10
- Accepted: 2024-02-09
- Published online: 2024-09-28

## 参 · 考 · 文 · 献

- [1] 边焱焱, 程开源, 常晓, 等. 2011至2019年中国人工膝关节置换手术量的初步统计与分析[J]. 中华骨科杂志, 2020, 40(21): 1453-1460.
- BIAN Y Y, CHENG K Y, CHANG X, et al. Reports and analysis of amount of hip and knee arthroplasty in China from 2011 to 2019[J]. Chinese Journal of Orthopaedics, 2020, 40(21): 1453-1460.
- [2] LEWIS P L, GRAVES S E, CUTHBERT A, et al. What is the risk of repeat revision when patellofemoral replacement is revised to TKA? An analysis of 482 cases from a large national arthroplasty registry[J]. Clin Orthop Relat Res, 2019, 477(6): 1402-1410.
- [3] ROOF M A, NARAYANAN S, LORENTZ N, et al. Impact of time to revision total knee arthroplasty on outcomes following aseptic failure[J]. Knee Surg Relat Res, 2023, 35(1): 15.
- [4] OLTEAN-DAN D, APOSTU D, TOMOAI A G, et al. Causes of revision after total hip arthroplasty in an orthopedics and traumatology regional center[J]. Med Pharm Rep, 2022, 95(2): 179-184.
- [5] FONTALIS A, HADDAD F S. Roentgen stereophotogrammetric analysis: still a very valuable tool in the orthopaedic research armamentarium[J]. Bone Joint Res, 2022, 11(4): 210-213.
- [6] XU J, SONNTAG R, KRETZER J P, et al. Model-based roentgen stereophotogrammetric analysis to monitor the head-taper junction in total hip arthroplasty *in vivo*: and they do move[J]. Materials, 2020, 13(7): 1543.
- [7] DAMMERER D, BLUM P, PUTZER D, et al. Subsidence of a metaphyseal-anchored press-fit stem after 4-year follow-up: an EBRA-FCA analysis[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2022, 142(8): 2075-2082.
- [8] DAMMERER D, BLUM P, PUTZER D, et al. Good mid-term results with the trident peripheral self-locking cup: a clinical evaluation and migration measurement with EBRA[J]. Arch Orthop Trauma Surg, 2021, 141(2): 327-332.
- [9] CLARKE S G, LOGISHETTY K, HALEWOOD C, et al. Low dose CT-based spatial analysis (CTSA) to measure implant migration after ceramic hip resurfacing arthroplasty (HRA): a phantom study[J]. Proc Inst Mech Eng H, 2023, 237(3): 359-367.
- [10] LI G A, VAN DE VELDE S K, BINGHAM J T. Validation of a non-invasive fluoroscopic imaging technique for the measurement of dynamic knee joint motion[J]. J Biomech, 2008, 41(7): 1616-1622.
- [11] ZOU D Y, TAN J Q, ZHENG N, et al. Larger medial contact area and more anterior contact position in medial-pivot than posterior-stabilized total knee arthroplasty during *in-vivo* lunge activity[J]. Bioengineering, 2023, 10(3): 290.
- [12] HU Y, ZOU D Y, JIANG M D, et al. Postoperative hip center position is associated with gait symmetry in range of axial rotation in dysplasia patients after THA[J]. Front Surg, 2023, 10: 1135327.
- [13] 廖广珊. 基于模型和图像的动态Fluoroscopic Stereophotogrammetric Analysis(FSA)技术检测人工膝关节无菌性松动的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- LIAO G S. A study on the detection of aseptic loosening of artificial hip joints using dynamic fluoroscopic stereographic analysis (FSA) technology based on models and images [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [14] 廖广珊, 李慧武, 王金武, 等. 人工膝关节无菌性松动失效的生物力学分析与诊断推理[J]. 医用生物力学, 2012, 27(3): 251-257.
- LIAO G S, LI H W, WANG J W, et al. Biomechanical analysis and reasoning on aseptic loosening failure after total hip arthroplasty[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2012, 27(3): 251-257.
- [15] PRINS A H, KAPTEIN B L, STOEL B C, et al. Performance of local optimization in single-plane fluoroscopic analysis for total knee arthroplasty[J]. J Biomech, 2015, 48(14): 3837-3845.
- [16] FONSECA ULLOA C A, SEEGER A, HAGEDORN F S, et al. Development and validation of an algorithm to determine the minimal factors needed for non-invasive measurement of the *in vivo* primary stability of cementless hip implants[J]. Med Eng Phys, 2023, 111: 103932.
- [17] KIEVIT A J, BUIJS G S, DOBBE J G G, et al. Promising results of a non-invasive measurement of knee implant loosening using a loading device, CT-scans and 3D image analysis[J]. Clin Biomech, 2023, 104: 105930.
- [18] HEILEMANN M, WENDLER T, MÜNST P, et al. A novel micromotion measurement method to gain instructive insight into the acetabular bone-implant interface[J]. Med Eng Phys, 2020, 86: 138-145.

[本文编辑] 徐 敏