

2-15-2019

Overview of Image Segmentation and Registration for Spine Biological Modeling

Juping Gu

1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;;2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;;

Tianyu Cheng

2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;;

Hua Liang

1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;;

Jianping Wang

1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Overview of Image Segmentation and Registration for Spine Biological Modeling

Abstract

Abstract: The prevalence of common spinal fractures is high in this day. Spinal image segmentation and registration are the key step and prerequisite of target recognition, biomechanical modeling and finite element analysis. They are also the key technology of noninvasive surgery navigation. *Aiming at the problems of spinal image processing, the classical medical image segmentation and registration algorithm is introduced. It also analyzes the defects and prospects of the future development trend of spine image processing.* The research results have certain significance for further understanding of spinal medical image processing and promoting the development of rehabilitation therapy for spinal fractures.

Keywords

spine, medical image, image segmentation, image registration

Authors

Juping Gu, Tianyu Cheng, Hua Liang, Jianping Wang, Zhao Jian, and Cao Yong

Recommended Citation

Gu Juping, Cheng Tianyu, Hua Liang, Wang Jianping, Zhao Jian, Cao Yong. Overview of Image Segmentation and Registration for Spine Biological Modeling[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(2): 167-173.

面向脊柱生物建模的图像分割与配准研究综述

顾菊平^{1,2}, 程天宇², 华亮¹, 王建平¹, 赵剑³, 曹涌⁴(1.南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019; 2.南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094;
3. 海军军医大学附属长征医院, 上海 200003; 4.南通大学附属医院, 江苏 南通 226021;)

摘要: 外伤常见的脊柱骨折患病率居高不下, 脊柱图像的分割和配准是目标识别、生物力学建模、有限元分析等的关键步骤和必要前提, 是无创手术导航治疗的关键技术。针对脊柱图像处理面临的问题, 介绍了较为经典的医学图像分割和配准算法, 分析其存在的缺陷, 并展望脊柱图像处理未来发展趋势。研究成果对深入了解脊柱医学图像处理, 以及推动脊柱骨折康复治疗的发展具有一定的意义。

关键词: 脊柱; 医学图像; 图像分割; 图像配准

中图分类号: TP301.6

文献标识码: B

文章编号: 1004-731X (2019) 02-0167-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0806

Overview of Image Segmentation and Registration for Spine Biological Modeling

Gu Juping^{1,2}, Cheng Tianyu², Hua Liang¹, Wang Jianping¹, Zhao Jian³, Cao Yong⁴

(1. School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

3. Affiliated Changzheng Hospital orthopedics, The Second Military Medical University, Shanghai 200003, China;

4. Affiliated Hospital Orthopaedics, Nantong University, Nantong 226021, China)

Abstract: The prevalence of common spinal fractures is high in this day. Spinal image segmentation and registration are the key step and prerequisite of target recognition, biomechanical modeling and finite element analysis. They are also the key technology of noninvasive surgery navigation. Aiming at the problems of spinal image processing, the classical medical image segmentation and registration algorithm is introduced. It also analyzes the defects and prospects of the future development trend of spine image processing. The research results have certain significance for further understanding of spinal medical image processing and promoting the development of rehabilitation therapy for spinal fractures.

Keywords: spine; medical image; image segmentation; image registration

引言

随着人口老龄化, 与脊柱骨折相关的急救诊和住院率正在迅速增加。脊柱骨折不仅面临疼痛、运动障碍等不适, 还存在迟发型偏瘫甚至完全偏瘫的

可能^[1]。目前, 传统椎弓根钉(Pedicle Screw, PS)系统是脊柱骨折治疗中较为普遍的手术方法, 而椎弓根钉植入位置是否得当较大程度的影响手术的成功率^[2]。因此, 为了突破医疗人员的经验主义, 弥补理论缺失, 促进该治疗技术的推广应用^[3], 围绕椎弓根钉进钉点以及植入角度等相关术前方案的制定, 深入开展相关的理论研究和实验验证亟待解决。

脊柱骨折损伤与其生物力学状况密切相关, 有限元分析是目前脊柱生物力学研究的主要方法^[4],



收稿日期: 2018-09-18

修回日期: 2018-12-04;

基金项目: 国家自然科学基金(61673226), 江苏省高等学校自然科学研究重大项目(18KJA470003);

作者简介: 顾菊平(1971-), 女, 江苏南通, 博士, 教授, 研究方向为电机及其控制, 医学图像处理。

<http://www.china-simulation.com>

而脊柱模型的精确度将直接影响有限元分析结果的准确性。从医学图像中获取相应骨肌信息,并用于模型建立是公认的有效手段^[5]。目前的研究大多基于 CT 图像结合图像处理及有限元软件建立脊柱三维有限元模型,而 CT 信息中更多反映了脊柱的骨骼信息,但在软组织信息方面有所欠缺,故所建脊柱模型都有不同程度的简化处理^[6],目前模型大多只包括椎体、椎间盘等,较少建立肌肉、韧带等软组织模型,而肌肉等软组织明显影响脊柱的应力状态,各种脊柱疾病的神经根及脊髓亦会受到不同应力从而产生相应症状,模型的准确性在脊柱生物力学的研究中极其重要。MRI 成像能反映脊柱图像的软组织信息,因此针对脊柱的三维多模态图像的组织分割和配准是高精度力学建模的关键步骤,是脊柱生物力学分析和脊柱外科康复手术的重要发展方向。

1 医学图像分割及其研究现状

传统医学图像分割,目前常用的是美国商用分割软件 Mimics,需手动分割每张二维图像中的各相邻组织,再通过图层堆叠最终完成三维分割。尽管精度能基本满足需要,但这种分割方法非常耗时,通常需要几个小时才能完成椎体、韧带和肌肉等组织分割^[7],且其效率和可重复性非常依赖研究者的专业经验。因此,临床研究中心亟需一种全自动的快速骨肌分割方法,以满足临床分析和后续研究的要求。

1.1 阈值分割

阈值分割是一种较为基础的分割方法,该方法要求目标灰度值区别于背景,通过设置相应的阈值将目标从背景中提取出来,分割效果依赖于阈值的选取。根据使用范围的区别可将阈值分割分为局部阈值、全局阈值和动态阈值。

目前针对医学图像中的组织分割,较为典型的算法有:信息熵、自适应阈值、最大类间方差法(Otsu)等。如 Yuncong Feng 等^[8]基于维数分解提出了一种

有效的三维 Otsu 分割算法,并基于快速局部拉普拉斯滤波器弱化医学图像中噪声和虚边缘的影响;谢亮^[9]等提出了一种基于信息熵和改进的粒子群算法的图像分割方法,在最大信息熵的约束下,完成了最佳阈值分割。阈值分割是一种较为基础且重要的分割方法,仅依靠阈值分割往往效果不佳且缺乏泛用性,但其作为医学图像预处理的一部分,可结合遗传算法、神经网络等理论改进分割效果。

1.2 区域生长

基于区域生长分割的实质是基于一定的相似性测度,利用图像的灰度信息以及体素间的空间几何关系,将特征相似的体素连通起来构成分割区域。

区域生长的原理是先选取初始生长点,再依据相应的相似性生长原则向邻域的体素生长延伸,再以新增点为基点向邻域延伸,直到到达生长停止要求。区域生长分割的 3 个重要的要素分别是初始点选择、生长的相似性标准和停止生长标准。A Javed 等^[10]基于区域生长改进了咽部气道的新型动态 MRI 研究的工作流程,使阻塞事件的可视化和检测成为可能;A Javadpour 等^[11]将遗传算法和区域生长相结合提出了一种全自动分割方法,初始点和相似性标准由遗传算法自动进行,以最大化图像分割的准确性和有效性。区域生长方法对体素特征均匀的目标区域具有较好的分割效果,且计算简单、效率高,但其缺点是易受到噪声的干扰,脊柱组织分割时受虚边缘影响较大。

1.3 基于活动轮廓模型

现阶段,基于活动轮廓模型的分割方法相比其他方法复杂度低,灵活性强,较为适合脊柱骨肌分割这类复杂的图像处理问题。该方法是应用对象的先验统计几何形状模型,结合物理学和近似理论的分割方法,尝试将模型向目标图像边缘逼近。如文献[12]提出了一种基于 GKFCM 和 RSF 混合的主动轮廓模型分割方法,该方法有助于基于轮廓模型的

曲线演变过程中的控制参数估计, 分割精度较高。文献[13]提出了一种各向异性滤波联合主动轮廓模型的算法, 发挥了各向异性滤波保持边缘的优势, 并以各向异性滤波代替传统高斯滤波, 增强了分割的准确性。文献[14]使用余弦函数来表示传统活动轮廓模型的数据能量拟合, 并提出基于截面图像恢复局部余弦拟合能量的主动轮廓模型, 算法中以离散形式描述模型, 并通过重新初始化水平集曲线来减少大量计算, 降低运算复杂度。

由于受到骨骼外轮廓的保护, 脊柱各节骨骼拥有较强的几何特征性, 然而临床实际使用中, 常常要处理骨折形变的脊柱, 以及肌肉、韧带等形变较大的软组织, 此时的运行效率则偏低。

1.4 基于图谱

基于图谱的分割方法是将先验性模板图谱作为参考图像, 对齐并合并到特定图谱中生成一个或多个引用坐标空间, 从而实现图像分割。例如文献[15]使用由许多健康受试者的 MR 图像构建的图谱数据库来分割膝盖软骨; Dam 等^[16]提出了一种基于 K 邻域算法在多结构设置中将多重配准与体素分类相结合的方法, 有效地实现了骨肌分割。温锐等^[17]提出了一种基于引导滤波的多图谱 MR 脑部图像分割方法, 利用引导滤波引入待分割图像的灰度信息以校正图谱匹配引起的误差, 增强分割的精确性。

尽管许多学者基于图谱的骨肌分割方法取得了令人满意的结果, 但当受试者差异性较大并且局部特征存在显著差异时, 这种方法的实验结果则不理想。此外, 基于活动轮廓模型和基于图谱的方法都较为依赖于骨骼形状的先验知识, 并且运算量大和分割时间需要较长。

1.5 其他分割方法

除了上述几种较为典型的医学图像分割方法, 还有很多有效的分割方法, 如文献[18]基于 K-means 聚类技术与模糊 C 均值算法的结合, 提出了一种有效的图像分割方法, 以提供准确的脑肿瘤

检测; 文献[19]将动态情境协同量子行为粒子群算法与多级阈值法结合, 以优化算法搜索能力, 提高分割精度; 文献[20]提出了一种基于软集合的软混合(软模糊粗糙 C-均值)分割算法, 用于脑部组织的肿瘤分割提取, 取得了较好的效果; 文献[21]基于图论的最优划分理论, 采用最小生成树法完成肺部图像分割; 文献[22]将改进的 SOM 神经网络应用在乳腺肿瘤图像分割中, 改善因神经元增多而导致的分割线变差和强噪声干扰等问题。

分割肌肉骨骼结构的困难主要在于变化的图像对比度、部分体积效应、图像强度的固有异质性, 由于运动和场的不均匀性造成的图像伪影以及脊柱结构的变化等因素。因此, 开发一个精准、稳定的肌肉骨骼分割方法是极具有挑战性的, 是目前急需且尚未解决的问题。

2 医学图像配准及其研究现状

在医学成像技术中, 不同的成像设备可以提供脊柱的多种体素信息。将 CT 图像提供的骨骼形态信息和 MRI 提供的肌肉、韧带等软组织信息配准融合, 为后续更高精度的脊柱生物力学建模提供更完善的信息。

2.1 基于特征点和标志点

基于特征点配准是利用图像内部较为显著的特征点, 如组织交叉点、拐点、边缘极值等。国外对医学图像的配准研究起步较早, 早在 1998 年, Harris 等^[23]便针对角点特征提出了 Harris 角点配准算法, 该算法的计算效率较高, 在当时得到了普遍的认可, 而其配准的精度在后续研究过程中也遭遇瓶颈。

基于标志点方法是通过外置标志作为配准过程中的基准点, 如 Andre G 等^[24]提出了在配准前设置标志点的先验性配准方案, 这种对齐标志点的方法可实现高精度配准, 在临床试用中也取得了满意的配准效果, 但是提前设置标志点将导致配准过程不可逆, 也会产生繁琐的配准准备工序, 普适性不强。

2.2 基于体素

基于体素的配准方法是直接利用图像的灰度信息进行配准,典型的算法有相关法、相对熵法和互信息法等。其中互信息方法以拥有精度高,稳定性强的优势在图像处理领域一直备受重视,Viola等^[25]最先将这种方法和医学图像配准联系实践起来。文献[26]将特征邻域概念引入互信息配准方式,新的相似性测度将多模态图像中的空间和结构属性联合起来,有效的提高了配准的精度。文献[27]将脉冲耦合神经网络(Pulse Coupled Neural Net, PCNN)和互信息方法相结合,完成从粗到细的配准过程,优化了互信息算法易陷入局部最优的缺陷。

然而,互信息的配准方式虽具有可观的精度,但其繁琐的运算过程是导致无法大幅度优化配准速度的重要因素,此时迫切需要引入一种新的配准理念,以打破配准速度上的瓶颈。

2.3 基于几何特征

基于几何特征是利用图像的几何边缘轮廓相似进行配准,是通过挖掘图像间局部或全局几何相似性测度的配准方法。文献[28]在 1992 年提出了最邻近迭代法(Iterative Closest Point, ICP),是一种基于纯粹几何特征的配准算法。文献[29]以一定的准则剔除了数据异常的点云,并使用点云拟合增强了算法的鲁棒性,但其迭代速度较慢的问题无法突破。文献[30]提出了一种 ICP 的优化算法,算法引入新型 STL 模型以及动态因子在迭代过程中调整变换参数,以减少迭代次数,有效提升了 ICP 算法的配准速度。相对于互信息算法极大的减少了需要处理的数据集,其配准速度相比以往的算法也有一定的改善。该算法无需提前设定对应点,但由于选取初始值的不同,其单调收敛无限趋向于的极值点时存在陷入局部最优的问题,同时 ICP 相关算法迭代速度较慢的问题无法突破,尽管伴随各类改进 ICP 算法的提出,基于 ICP 的配准算法日益成熟,但仍无法克服配准精度和速度上的瓶颈。因此,目前亟需引入新的元素来寻求配准效率上的突破。

同样是基于几何特征信息,一部分学者将几何代数(Clifford Algebra)引入到医学图像配准领域^[31-33]。几何代数以多重矢量表达的复杂几何对象,各组成部分的运动特性一致,即基于几何代数的运动表达能够有效保证三维椎体完整结构的保持性与整体性^[34]。同时,在几何代数空间中,平移、旋转、缩放和投影灯变换可以统一表达,如下式所示。式中可见,复杂几何对象的几何代数空间变换同时具有变换顺序无关的特性。

$$V \exp(B) V^{-1} = V(1 + B + \frac{1}{2!} B^2 + \dots) V^{-1} =$$

$$1 + V B V^{-1} + \frac{1}{2!} (V B V^{-1})^2 + \dots =$$

$$\exp(V B V^{-1})$$

几何代数新颖的几何运算和独到的约简计算方式在多个应用领域展现强大的优势。文献[35]将 ICP 算法与几何代数方法相结合,定义全新的相似性测度实现多模态三维配准,算法的优化效果可观。文献[36-37]利用待配准图像的几何相似性实现分割与配准,文中基于纯粹几何轮廓特征进行配准的方式,极大地提高了配准速度。文献[38]继续深入研究基于几何代数的配准方法,提出了感兴趣区域和几何代数特征不变量联合约束的方法,有效的提高了配准精度。上述文献为基于几何代数的医学图像配准算法的发展奠定了基础,目前几何代数配准方法仅应用于刚性配准,其向非刚性配准方式的延伸和推广将是基于几何特征配准算法中的重要发展方向。

2.4 非刚性配准

针对脊柱医学图像配准问题,分割出的骨骼具有刚性特性,可基于上述方法对骨骼进行分段的刚性配准。如果想对多模态的软组织配准,则应考虑其形变影响,属于非刚性弹性配准问题,主要有物理模型法和参数法等方法。物理模型法包含:弹性模型^[39]、粘性流体模型^[40]和光流场模型^[41]等,如 Lu X 等^[42]基于参考图像和浮动图像的 SIFT(尺度不变特征变换)来提取特征点以匹配特征点,使用

最小二乘法执行粗略配准, 然后使用光流模型算法实现精确配准。参数法包含基于样条函数^[43]和基于径向基函数^[44]的非刚性配准方法, 如 Pawar A 等^[45]提出了一种基于有限元方法(FEM)的非刚性图像配准的有效方法, 其中使用截断的分层 B 样条(THB 样条)来构造空间变换, 通过结合 THB 样条基函数的关键优势, 提高了矩阵稀疏性、计算效率和配准的精度。

3 结论

脊柱模型的建立对临床诊断、手术方案的制定、术后康复理疗等具有指导意义, 考虑肌肉、韧带等组织的全脊柱模型对分析椎骨受力至关重要。然而通过文献检索, 目前公开发表的文献中所建模型较少涉及腰椎周围的软组织的模型建立, 模型的准确度有一定的局限性。脊柱图像的分割和配准是建模的基础和前提, 而由于脊柱图像的复杂性和个体不确定性, 目前尚无可以有效的、泛用性实现脊柱图像组织分割和配准的公开文献发表。脊柱医学图像分割和配准中仍存在的问题有: 分割配准速度慢、自动化程度低和成像组织漂移, 针对多模态脊柱图像中复杂软组织的分割和配准研究尚少, 理论移植不成熟。

如何提高脊柱图像分割和配准的精度与速度, 是脊柱图像处理主要的研究趋势。上文分析可见, 基于几何代数空间特征的图像处理方法在精度和时耗上都有显著的优势, 极具潜力和前景。成熟有效的脊柱图像处理算法对脊柱模型的力学模型建立是至关重要的, 该研究方向的预期研究成果对医生的临床诊断, 脊柱退变机理的分析, 术前术后方案制定均具有指导意义, 可以用以缓解贫困地区专家少, 看病难的问题, 同时对促进人工智能在医疗领域的发展意义重大。

参考文献:

- [1] Liangjun J, Qiang Z, Hang L, et al. Injury Mechanism, Fracture Characteristics and Clinical Treatment of Pilon Fracture with Intact Fibula-A Retrospective Study of 23 Pilon Fractures[J]. J Clin Orthop Trauma (S0976-5662), 2017, 8: 9-15.
- [2] Woodall, Jr J W, Mc Guire, et al. Evidence for the Treatment of Thoracolumbar Turst Tractures[J]. Current Orthopaedic Practice (S1940-7041), 2012, 23(3): 188-192.
- [3] Ten J B, Saltzherr T P, Panneman M, et al. Incidence of Spinal Fractures in the Netherlands 1997-2012[J]. J Clin Orthop Trauma (S0976-5662), 2017, 8: 67-70.
- [4] 庄新明. 骶 1 双皮质椎弓根钉单点矫正和三维固定在腰骶固定的生物力学研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2016. Zhuang X M. The Biomechanical Studies of Mono-point Correction and Three Dimensional Fixation of the Sacralone Bicortical Pedicle Screw on the Lumbosacral Construct[D]. Jilin : Jilin University, 2016.
- [5] Gelb D, Ludwig S, Karp J, et al. Successful Treatment of Thoracolumbar Fractures with Short-segment Pedicle Instrumentation[J]. Journal of Spinal Disorders & Techniques (S1536-0652), 2010, 23(5): 293-301.
- [6] 杨程, 徐晓刚, 王建国. 图像配准技术研究[J]. 计算机科学, 2016(增 2): 142-144. Yang C, Xu X G, Wang J G. Research on Image Registration Technology[J]. Computer Science, 2016 (S2): 142-144.
- [7] Pedoia V, Majumdar S, Link T M. Segmentation of Joint and Musculoskeletal Tissue in the Study of Arthritis[J]. Magnetic Resonance Materials in Physics Biology & Medicine (S0968-5243), 2016, 29(2): 207-221.
- [8] Feng Y, Zhao H, Li X, et al. A Multi-scale 3D Otsu Thresholding Algorithm for Medical Image Segmentation[J]. Digital Signal Processing (S1051-2004), 2017, 60: 186-199.
- [9] 谢亮. 基于信息熵和改进粒子群算法的医学图像分割方法研究[J]. 半导体光电, 2016, 37(6): 894-898. Xie L. Medical Image Segmentation Method Based on Information Entropy and Improved Particle Swarm Algorithm[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(6): 894-898.
- [10] Javed A, Kim Y C, Khoo M, et al. Dynamic 3D MR Visualization and Detection of Upper Airway Obstruction during Sleep using Region Growing Segmentation[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering (S0018-9294), 2016, 63(2): 431-437.
- [11] Javadpour A, Mohammadi A. Improving Brain Magnetic Resonance Image (MRI) Segmentation via a Novel Algorithm based on Genetic and Regional Growth[J]. Journal of Biomedical Physics & Engineering

- (S2251-7200), 2016, 6(2): 95-108.
- [12] Gupta D, Anand R S, Tyagi B. A Hybrid Segmentation Method Based On Gaussian Kernel Fuzzy Clustering and Region Based Active Contour Model for Ultrasound Medical Images[J]. Biomedical Signal Processing & Control (S1746-8094), 2015, 16(2): 98-112.
- [13] 熊晶晶, 周亚丽, 张奇志. 基于各向异性主动轮廓模型的图像分割方法研究[J]. 计算机应用研究, 2017, 35(12): 3484-3487.
- Xiong J J, Zhou Y L, Zhang Q Z. Image Segmentation Method of Active Contour Model Based on Anisotropic Filtering[J]. Application Research of Computers, 2017, 35(12): 3484-3487.
- [14] Miao J, Huang T Z, Zhou X, et al. Image Segmentation Based On an Active Contour Model of Partial Image Restoration with Local Cosine Fitting Energy[J]. Information Sciences (S0020-0255), 2018, 447(1): 52-71.
- [15] Tamezpeña J G, Farber J, González P C, et al. Unsupervised Segmentation And Quantification of anatomical Knee Features: Data From The Osteoarthritis Initiative[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering (S0018-9294), 2012, 59(4): 1177-1186.
- [16] Dam E B, Lillholm M, Marques J, et al. Automatic Segmentation of High- And Low-Field Knee MRIs Using Knee Image Quantification with Data From The Osteoarthritis Initiative[J]. Journal of Medical Imaging (S2329-4302), 2015, 2(2): 024001.
- [17] 温锐, 陈宏文, 张雷, 等. 基于引导滤波的多图谱医学图像分割[J]. 南方医科大学学报, 2015, 35(9): 1263-1267.
- Wen R, Chen H W, Zhang L, et al. Medical Image Segmentation Based on Guided Filtering and Multi-atlas[J]. Journal of Southern Medical University, 2015, 35(9): 1263-1267.
- [18] Abdel-Maksoud E, Elmogy M, Al-Awadi R. Brain Tumor Segmentation based on a Hybrid Clustering Technique[J]. Egyptian Informatics Journal (S1110-8665), 2015, 16(1): 71-81.
- [19] Li Y, Jiao L, Shang R, et al. Dynamic-context Cooperative Quantum-behaved Particle Swarm Optimization based on Multilevel Thresholding applied to Medical Image Segmentation[J]. Information Sciences (S0020-0255), 2015, 294(1): 408-422.
- [20] Namburu A, Samay S K, Edara S R. Soft Fuzzy Rough Set-based MR Brain Image Segmentation[J]. Applied Soft Computing (S1568-4946), 2017, 54(1): 456-466.
- [21] 崔宝侠, 田佳, 段勇, 等. 基于图论分割的肺部 CT 图像的三维重建[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(6): 667-672.
- Cui B X, Tian J, Duan Y, et al. Three-dimensional Reconstruction of Lung CT Images Based on Graph Theory Segmentation[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(6): 667-672.
- [22] 邹瑜, 帅仁俊. 基于改进的 SOM 神经网络的医学图像分割算法[J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(9): 2533-2537, 2581.
- Zou Y, Shuai R J. Improved Segmentation Algorithm of Medical Images Based on SOM Neural Network[J]. Computer Engineering and Design, 2016, 37(9): 2533-2537, 2581.
- [23] Harris D, Stephens M. A Combined Corner and Edge Detector[C]. Matthews M M Proceedings of the Fourth Alvey Vision Conference Manchester the university of Sheffield printing Unt, 1998: 147-151.
- [24] Andre G, Wu K. Providing Visual Information to Validate 2-D to 3-D Registration[J]. Medical Image Analysis (S1361-8415), 2000, 4(4): 357-374.
- [25] Xu Y, Yu G, Wang Y, et al. A Hybrid Vehicle Detection Method Based on Viola-Jones and HOG + SVM from UAV Images[J]. Sensors (S1424-8220), 2016, 16(8): 1325.
- [26] Aksoy T, Spiclin Z, Pernus F, et al. Monoplane 3D-2D Registration of Cerebral Angiograms based on Multi-objective Stratified Optimization [J]. Physics in Medicine & Biology (S0031-9155), 2017, 62(24): 9377-9394.
- [27] 王观英, 许新征, 丁世飞. 基于 3D-PCNN 和互信息的 3D-3D 医学图像配准方法[J]. 计算机应用, 2017, 37(增 1): 215-219.
- Wang G Y, Xu X Z, Ding S F. 3D-3D Medical Image Registration Method Based on 3D-PCNN and Mutual Information[J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37(S1): 215-219.
- [28] Ouadah S, Jacobson M W, Stayman J W, et al. Correction of Patient Motion in Cone-beam CT using 3D-2D Registration[J]. Physics in Medicine & Biology (S0031-9155), 2017, 62(23): 8813-8831.
- [29] Liang L, Wei M, Szymczak A, et al. Nonrigid Iterative Closest Points for Registration of 3D Biomedical Surfaces[J]. Optics & Lasers in Engineering (S0143-8166), 2018, 100(1): 141-154.
- [30] Toth D, Panayiotou M, Brost A, et al. 3D/2D Registration with Superabundant Vessel Reconstruction for Cardiac Resynchronization Therapy[J]. Medical Image Analysis

- (S1361-8415), 2017, 42(1): 160-172.
- [31] 李洪波. 共形几何代数—几何代数的新理论和计算框架[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(11): 2383-2393.
- Li H B. Conformal Geometric Algebra — A New Framework for Computational Geometry[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2005, 17(11): 2383-2393.
- [32] Yuan L, Yu Z, Luo W, et al. Pattern Forced Geophysical Vector Field Segmentation based on Clifford FFT[J]. Computers & Geosciences (S0098-3004), 2013, 60(10): 63-69.
- [33] Dell'Acqua A, Sarti A, Tubaro S. 3D Motion from Structures of Points, Lines and Planes[J]. Image & Vision Computing (S0262-8856), 2008, 26(4): 529-549.
- [34] 李洪波. 共形几何代数与运动和形状的刻画[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(7): 895-901.
- Li H B. Conformal Geometric Algebra for Motion and Shape Description[J]. Journal of Computer-Aided Design and Computer Graphics, 2006, 18(7): 895-903.
- [35] 曹文明, 刘辉, 徐晨, 等. 基于共形几何代数的 3D 医学图像配准[J]. 中国科学: 信息科学, 2013, 43(2): 254-274.
- Cao W M, Liu H, Xu C, et al. 3D Medical Image Registration Based on Conformal Geometric Algebra[J]. Science China: Information Sciences, 2013, 43(2): 254-274.
- [36] 华亮, 黄宇, 丁立军, 等. Clifford 代数空间上的三维多模医学图像配准[J]. 光电工程, 2014, 41(1): 65-72.
- Huang L, Huang Y, Ding L J, et al. Multimodality 3D Medical Image Registration in Clifford Algebra Space[J]. Opto-Electronic Engineering, 2014, 41(1): 65-72.
- [37] 华亮, 丁立军, 黄宇, 等. Clifford 代数几何不变量 3D 医学图像配准的方法[J]. 计算机科学, 2014, 41(6): 304-308.
- Huang L, Ding L J, Huang Y, et al. Approach for 3D Medical Image Registration Based on Clifford Algebra Geometrical Invariance[J]. Computer Science, 2014, 41(6): 304-308.
- [38] 华亮, 程天宇, 顾菊平, 等. 基于 ROI 及 Clifford 代数相对不变量的 3D 医学图像配准[J]. 图学学报, 2017, 38(1): 90-96.
- Huang L, Cheng T Y, Gu J P, et al. 3D Medical Image Registration Based on Clifford Relative Invariant and Region of Interest[J]. Journal of Graphics, 2017, 38(1): 90-96.
- [39] Lu X, Ma H, Zhang B. A Non-rigid Medical Image Registration Method based on Improved Linear Elastic Model[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics (S0030-4026), 2012, 123(20): 1867-1873.
- [40] Chang H H, Tsai C Y. Adaptive Registration of Magnetic Resonance Images based on a Viscous Fluid Model[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine (S0169-2607), 2014, 117(2): 80-91.
- [41] Ji Hui-zhong, JIA Da-yu, DONG En-qing. Non-rigid Registrations based on Image Characteristics and Optical Flows[J]. Optics and Precision Engineering (S1004-924X), 2017, 25(9): 2469-2482.
- [42] Lu X, Zhao Y, Zhang B, et al. A Non-rigid Cardiac Image Registration Method based on an Optical Flow Model[J]. Optik - International Journal for Light and Electron Optics (S0030-4026), 2013, 124(20): 4266-4273.
- [43] 杜雪莹, 龚伦, 刘兆邦, 等. 基于自适应薄板样条全变分的肺 CT/PET 图像配准[EB/OL]. (2018-05-28) [2018-09-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20180524.1629.002.html>.
- Du X Y, Gong L, Liu Z F, et al. The CT/PET Lung Registration Using Adaptive Thin Plate Spline-based Total Variation Regularization[EB/OL]. (2018-05-28) [2018-09-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20180524.1629.002.html>.
- [44] Lapeer R J, Shah S K, Rowland R S. An Optimised Radial basis Function Algorithm for Fast Non-rigid Registration of Medical Images[J]. Computers in Biology & Medicine (S0010-4825), 2010, 40(1): 1-7.
- [45] Pawar A, Zhang Y, Jia Y, et al. Adaptive FEM-based Nonrigid Image Registration using Truncated Hierarchical B-splines[J]. Computers & Mathematics with Applications (S0898-1221), 2016, 72(8): 2028-2040.