



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象学报

2022
03
VOL.27

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



医学图像及临床应用



第27卷第3期（总第311期）
2022年3月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院空天信息创新研究院
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 吴一戎
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
通信地址 北京市海淀区北四环西路19号
邮 编 100190
电子信箱 jig@aircas.ac.cn
电 话 010-58887035
网 址 www.cjig.cn

广告发布登记号 京朝工商广登字20170218号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Aerospace Information Research Institute, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief Wu Yirong
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
Address No. 19, North 4th Ring Road West, Haidian District, Beijing, P. R. China
Zip code 100190
E-mail jig@aircas.ac.cn
Telephone 010-58887035
Website www.cjig.cn

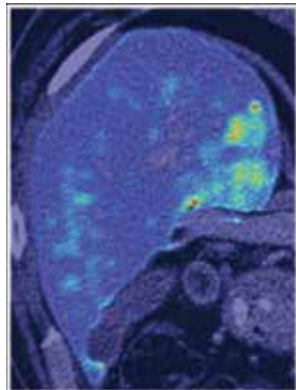
Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ

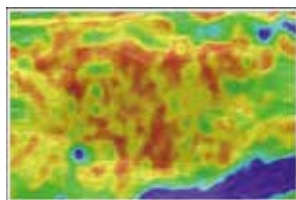
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



慢阻肺患者CT图像中肺内血管分割及定量分析(第0762页)



基于特征选择与残差融合的肝肿瘤分割模型(第0838页)



面向乳腺超声计算机辅助诊断的两阶段深度迁移学习(第0898页)

专刊封面展示了上海科技大学生物医学工程学院和上海联影智能医疗科技有限公司合作的脑影像智能分析方向研究成果。

《中国图象图形学报》医学图像及临床应用专刊简介

沈定刚, 刘天明, 周涛, 夏勇, 白相志, 王乾, 李刚, 徐寿平, 刘昊, 韩向娣 0653

综述

中国医学影像人工智能20年回顾和展望

蒋希, 袁奕宣, 王雅萍, 肖振祥, 朱美芦, 陈泽华, 刘天明, 沈定刚 0655

迁移学习在医学图像分类中的研究进展

黎英, 宋佩华 0672

生成对抗式网络及其医学影像应用研究综述

张颖麟, 胡衍, 东田理沙, 刘江 0687

基于深度学习的心脏磁共振影像超分辨率前沿进展

李书林, 冯朝路, 于鲲, 刘鑫, 江鑫, 赵大哲 0704

CT图像肺及肺病变区域分割方法综述

冯龙锋, 陈英, 周滔辉, 胡菲, 易珍 0722

计算机断层扫描图像

结构图注意力网络的新冠肺炎轻重症诊断

刘彦北, 李赫南, 张长青, 肖志涛, 张芳, 陈英, 高耀宗, 石峰, 单飞, 沈定刚 0750

慢阻肺患者CT图像中肺内血管分割及定量分析

赵宏, 李璋, 张杰华, 王琨, 孙家兴, 廖玺铭, 阎昱升, 钟正, 张鑫, 孙健, 于起峰, 葛俊辉 0762

基础信息保持和细节强化的胸部CT图像增强

张余, 张顺利, 白相志, 张利 0774

面向小样本股骨骨折分型的多视角注意力融合方法

张亚东, 汪玲, 兰海, 翟禹樵, 程洪 0784

三维多尺度嵌套U结构CT影像肺结节检测

许正奎, 张少敏, 支力佳, 周涛 0797

融合多尺度残差和注意力机制的特发性肺纤维化进展预测

陈舞, 孙军梅, 李秀梅 0812

COVID-19肺部CT图像多尺度编解码分割

陆倩杰, 柏正尧, 樊圣澜, 周雪, 许祝 0827

基于特征选择与残差融合的肝肿瘤分割模型

乔伟晨, 黄冕, 刘利军, 黄青松 0838

磁共振图像

面向多模态MRI脑胶质瘤区域三维分割与生存期预测的级联U-Net网络

余力, 刘霄雪, 闫朝阳, 李建瑞, 张志强, 黄轶枢, 徐军 0850

心脏动态MRI图像分割的时空多尺度网络

徐佳陈, 肖志勇 0862

融合跨阶段深度学习的脑肿瘤MRI图像分割

夏峰, 邵海见, 邓星 0873

融入平滑组稀疏化的脑部MRI图像分类

黄帅辉, 王金凤 0885

超声图像

面向乳腺超声计算机辅助诊断的两阶段深度迁移学习

贡荣麟, 施俊, 周玮珺, 汪程 0898

结合注意力机制的乳腺双模态超声分类网络

赵绪, 龚勋, 樊琳, 罗俊 0911

中医图像

视觉Transformer与多特征融合的脑卒中检测算法

赵琛琦, 王华虎, 赵涓涓, 冀伦文, 王麒达, 李慧芝, 赵紫娟 0923

多分支深度特征融合的中医脑卒中辅助诊断

王麒达, 冀伦文, 强彦, 王华虎, 赵琛琦, 李慧芝, 赵紫娟 0935

研究应用

多区域融合注意力网络模型下的核性白内障分类

章晓庆, 肖尊杰, Risa Higashita, 陈婉, 胡衍, 袁进, 刘江 0948

面向高度近视条纹损伤的深监督特征聚合网络

谭晓, 刁逸超, 陈新建, 石霏, 樊莹, 谢嘉受, 朱伟芳 0961

结合目标检测与匹配修正的手腕骨兴趣区域提取

毛科技, 汪敏豪, 陈立建, 陆伟, 武坤秀, 陈庆章, 赵小敏 0973

面向旷场实验视频分类的特征拼接矩阵学习方法

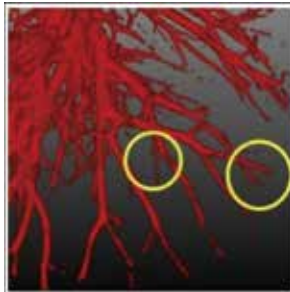
肖照林, 杨志林, 刘欢, 金海燕 0988

基于图像的介入器械前端变形建模与受力估计

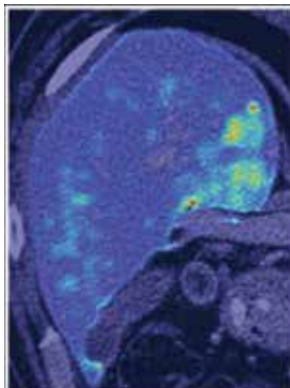
任龙飞, 孟偲, 刘博, 白相志, 周付根 1001

CONTENTS

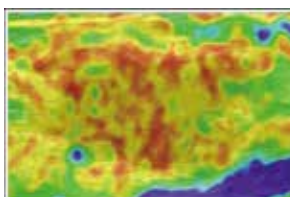
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Segmentation and quantitative analysis of intrapulmonary vasculature in CT images from COPD patients(P0762)



Feature selection and residual fusion segmentation network for liver tumor(P0838)



Two-stage deep transfer learning for human breast ultrasound computer-aided diagnosis(P0898)

Review

- A 20-year retrospect and prospect of medical imaging artificial intelligence in China
Jiang Xi, Yuan Yixuan, Wang Yaping, Xiao Zhenxiang, Zhu Meilu, Chen Zehua, Liu Tianming, Shen Dinggang 0655
- Review of transfer learning in medical image classification
Li Ying, Song Peihua 0672
- A review of generative adversarial networks and the application in medical image
Zhang Yinglin, Hu Yan, Risa Higashita, Liu Jiang 0687
- Critical review of human cardiac magnetic resonance image super resolution reconstruction based on deep learning method
Li Shulin, Feng Chaolu, Yu Kun, Liu Xin, Jiang Xin, Zhao Dazhe 0704
- Review of human lung and lung lesion regions segmentation methods based on CT images
Feng Longfeng, Chen Ying, Zhou Taohui, Hu Fei, Yi Zhen 0722

Computerd Tomography Image

- Diagnosis of COVID-19 by using structural attention graph neural network
Liu Yanbei, Li Henan, Zhang Changqing, Xiao Zhitao, Zhang Fang, Wei Ying, Gao Yaozong, Shi Feng, Shan Fei, Shen Dinggang 0750
- Segmentation and quantitative analysis of intrapulmonary vasculature in CT images from COPD patients
Zhao Hong, Li Zhang, Zhang Jiehua, Wang Kun, Sun Jiaxing, Liao Ximing, Yan Yusheng, Zhong Zheng, Zhang Xin, Sun Jian, Yu Qifeng, Ge Junhui 0762
- Human chest CT image enhancement based on basic information preservation and detail enhancement
Zhang Yu, Zhang Shunli, Bai Xiangzhi, Zhang Li 0774
- Multi-view attention fusion method for few-shot femoral fracture classification
Zhang Yadong, Wang Ling, Lan Hai, Zhai Yuqiao, Cheng Hong 0784
- Detection of pulmonary nodules in three-dimensional multiscale nested U-structure computed tomography images
Xu Zhengxi, Zhang Shaomin, Zhi Lijia, Zhou Tao 0797
- Multi-scale residual and attention mechanism fusion based prediction for the progression of idiopathic pulmonary fibrosis
Chen Wu, Sun Junmei, Li Xiumei 0812
- Multiscale codec network based CT image segmentation for human lung disease derived of COVID-19
Lu Qianjie, Bai Zhengyao, Fan Shenglan, Zhou Xue, Xu Zhu 0827
- Feature selection and residual fusion segmentation network for liver tumor
Qiao Weichen, Huang Mian, Liu Lijun, Huang Qingsong 0838

Magnetic Resonance Image

- Brain glioma tumor segmentation and survival prediction from multi-modality MRIs via cascaded U-Net
Yu Li, Liu Xiaoxue, Yan Chaoyang, Li Jianrui, Zhang Zhiqiang, Huang Yunzhi, Xu Jun 0850
- A spatio-temporal multi-scale network for cardiac dynamic MRI image segmentation
Xu Jiachen, Xiao Zhiyong 0862
- Cross-stage deep-learning-based MRI fused images of human brain tumor segmentation
Xia Feng, Shao Haijian, Deng Xing 0873
- Brain MRI image classification incorporating smooth group sparseness
Huang Shuaihui, Wang Jinfeng 0885

Ultrasound Image

- Two-stage deep transfer learning for human breast ultrasound computer-aided diagnosis
Gong Ronglin, Shi Jun, Zhou Weijun, Wang Cheng 0898
- Attention-based networks of human breast bimodal ultrasound imaging classification
Zhao Xu, Gong Xun, Fan Lin, Luo Jun 0911

Traditional Chinese Medical Image

- Cerebral stroke detection algorithm for visual Transformer and multi-feature fusion
Zhao Chenqi, Wang Huahu, Zhao Juanjuan, Ji Lunwen, Wang Qida, Li Huizhi, Zhao Zijuan 0923
- Multi-branch deep feature fusion method for traditional Chinese medicine intervened Human cerebral stroke aided diagnosis
Wang Qida, Ji Lunwen, Qiang Yan, Wang Huahu, Zhao Chenqi, Li Huizhi, Zhao Zijuan 0935

Research and Application

- Nuclear cataract classification based on multi-region fusion attention network model
Zhang Xiaoqing, Xiao Zunjie, Risa Higashita, Chen Wan, Hu Yan, Yuan Jin, Liu Jiang 0948
- Deep-supervision and feature-aggregation network for linear lesion segmentation of high myopia
Tan Xiao, Diao Yichao, Chen Xinjian, Shi Fei, Fan Ying, Xie Jiamin, Zhu Weifang 0959
- Hand-wrist region of interest extraction based on object detection and matching correction
Mao Keji, Wang Minhao, Chen Lijian, Lu Wei, Wu Kunxiu, Chen Qingzhang, Zhao Xiaomin 0973
- A spliced feature matrices learning method for open field test video classification
Xiao Zhaolin, Yang Zhilin, Liu Huan, Jin Haiyan 0988
- Image-based deformation modeling and force estimation of the front end of vascular interventional surgical apparatus
Ren Longfei, Meng Cai, Liu Bo, Bai Xiangzhi, Zhou Fugen 1001

中图法分类号: TP242.3 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2022)03-1001-08

论文引用格式: Ren L F, Meng C, Liu B, Bai X Z and Zhou F G. 2022. Image-based deformation modeling and force estimation of the front end of vascular interventional surgical apparatus. Journal of Image and Graphics, 27(03): 1001-1008 (任龙飞, 孟偲, 刘博, 白相志, 周付根. 2022. 基于图像的介入器械前端变形建模与受力估计. 中国图象图形学报, 27(03): 1001-1008) [DOI: 10.11834/jig.210653]

基于图像的介入器械前端变形建模与受力估计

任龙飞¹, 孟偲^{1,2*}, 刘博^{1,2}, 白相志^{1,2}, 周付根^{1,2}

1. 北京航空航天大学宇航学院, 北京 102206; 2. 北京航空航天大学生物医学工程高精尖创新中心, 北京 100083

摘要: **目的** 血管介入手术中介入器械与血管壁之间的接触力对手术安全有着重要意义, 然而目前缺乏直接测量器械前端与血管壁接触力的传感器和有效手段。为解决这一难题, 本文提出了一种通过图像观察器械前端变形程度从而估计器械与血管壁接触力的方法。**方法** 通过模拟血管介入手术过程来获取介入器械导丝的变形量和与之相对应的力, 从而对介入器械前端接触力与变形量关系进行建模。将介入器械前的端接触力分为垂直于接触面方向的力和沿着接触面方向的力并分别加以处理; 使用介入器械前端变形段的最大曲率变化量描述器械变形量, 通过图像观察导丝变形来计算导丝的最大曲率。为求解最大曲率, 使用器械上3个点构成的三角形并求其外接圆曲率来表示这3点所在段的曲率, 在介入器械前端进行依次遍历求取最大值以获得最大曲率。通过实验分析验证介入器械受力与最大曲率之间的关系。**结果** 实验表明介入器械前端的接触力与器械前端最大曲率变化率之间存在着映射关系, 且这种关系能用函数表达式准确地表达出来, 通过函数式来预测受力的平均误差在10%以内。**结论** 研究表明, 通过图像分析导丝前端的变形量、估计导丝前端接触力, 进而判断血管手术过程中介入器械与血管壁的接触状态的方法是可行的, 所计算的导丝前端受力能为手术过程提供参考信息。

关键词: 血管介入手术; 介入器械接触力; 介入器械变形量; 导丝图像; 最大曲率

Image-based deformation modeling and force estimation of the front end of vascular interventional surgical apparatus

Ren Longfei¹, Meng Cai^{1,2*}, Liu Bo^{1,2}, Bai Xiangzhi^{1,2}, Zhou Fugen^{1,2}

1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 102206, China;

2. Biomedical Engineering Innovation Center, Beihang University, Beijing 100083, China

Abstract: Objective At present, the prevalence of cardiovascular disease continues to increase in China. Approximately 290 million people in China suffer from cardiovascular and cerebrovascular diseases. In 2016, the mortality rate of cardiovascular disease was the highest in China. Cardiovascular disease has caused a serious burden on the society; thus, the prevention and treatment of cardiovascular disease are urgent. Vascular interventional surgery is one of the main methods for the treatment of cardiovascular diseases, which has the advantages of less blood loss, less trauma, less complications, and rapid postoperative recovery. In the process of vascular interventional surgery, the contact force between the front end of the interventional instrument and the vascular wall is greatly important to the safety of the operation. If the contact force is

收稿日期: 2021-08-16; 修回日期: 2021-12-16; 预印本日期: 2021-12-23

* 通信作者: 孟偲 Tsai@buaa.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划资助(2019YFB1311703); 国家自然科学基金项目(61873010)

Supported by: National Key R&D Program of China(2019YFB1311703); National Natural Science Foundation of China (61873010)

extremely large, then the vascular wall becomes scratched and punctured or the plaque is moved, thereby leading to the failure of the operation and may cause danger to the lives of patients. Therefore, measuring the contact force of the front end of interventional instruments is a difficult problem in the process of vascular interventional surgery. To solve this problem, this paper creatively proposes a method to estimate the contact force between the instrument and the vascular wall by observing the deformation of the front end of the instrument. **Method** To solve this problem, different from the commonly used force feedback method, a method to predict the contact force of the front end of interventional instrument based on image acquisition is proposed. An experimental environment was built to simulate the process of vascular interventional surgery, a force sensor was used to measure the contact force of the front end of the interventional device, and a camera was used to obtain the image containing the deformation of the interventional device. For the image with deformed guide wire, multi-frame background averaging method is used to model the background. Canny operator is used to detect the edge of the original image and the background. The edge in the background is removed from the edge of the original image, and then morphological filtering method is used to process the detected edge image to obtain the contour of the interventional device. The deformation of the front end of the interventional device is calculated by the contour of the interventional device. Here, the contact force and deformation of the front end of the interventional device are modeled. The contact force of the front end of the interventional device is divided into the force perpendicular to the contact surface and the force along the contact surface. A method is proposed to describe the deformation of the instrument by using the maximum curvature of the deformation section at the front end of the guide wire. We use the triangle composed of three points on the instrument to solve the maximum curvature, and its circumscribed circle curvature is calculated to represent the curvature of the segment, where the three points are located. Then, and it is traversed at the front end of the interventional instrument to obtain the maximum value, which is the maximum curvature. Subsequently, the relationship between the force and the maximum curvature of the interventional device is obtained by analyzing the experimental data. **Result** The results show some mappings between the front-end contact force and the maximum curvature of the interventional device. This relationship can be accurately expressed in functional expressions with an average error of less than 10% in predicting forces. At the same time, the force perpendicular to the contact surface is much greater than the force along the contact surface. The force perpendicular to the contact surface can be used to approximately replace the contact force between the front end of the interventional device and the vascular wall. In a certain range, the contact force of the front end of the interventional device increases with the increase in the maximum curvature. Beyond this range, the contact force of the front end of the interventional device reaches the maximum and does not continue to increase with the increase in the maximum curvature. **Conclusion** Therefore, we can estimate the contact force of the front end of the guide wire by obtaining the maximum curvature of the front end of the guide wire, and then judge the contact state between the interventional device and the vascular wall during vascular surgery. Through this method, adding sensors and other devices on the interventional device is unnecessary, and the contact force of the front end of the interventional device can be obtained to reduce the risk of vascular wall being scratched or punctured by the front end of the interventional device. In addition, the difficulty of operation is reduced, and the operation power is improved.

Key words: vascular interventional surgery; contact force of interventional device; deformation of interventional device; guide wire image; maximum curvature

0 引言

心脑血管疾病是人类健康第一杀手(胡盛寿等,2019)。心血管疾病对社会造成了巨大负担,对心血管疾病的防治刻不容缓(Lu等,2015)。

血管介入手术已经成为治疗心脑血管疾病的主要方法之一。在血管介入手术中,医生在股动脉或

桡动脉处置入导丝或导管等介入器械,将导丝或导管等介入器械在动脉中推进,使其到达冠状动脉、颈动脉等动脉狭窄症状易发区,以此来检查血管或对其进行治疗。血管介入手术出血量少、创伤小、并发症少、术后恢复迅速,属于安全可靠的治疗手段,是未来医学的发展主要趋势之一(Taylor和Stoianovici,2003)。

血管介入手术中使用的介入器械如导丝或导管

是具有一定刚度的柔性材料(刘洋等,2014)。这种材料使得在体外推动介入器械时,介入器械的前端沿着血管滑动前进;当它与血管壁碰撞时,介入器械的前端会产生一定的弯曲变形。变形越大,所受的力往往越大。因此,若介入器械变形过大,就有可能划伤或刺破血管壁,在这种情况下,必须停止推动介入器械,以避免器械前端与血管壁之间产生过大的接触力(于小滨等,2014)。

在血管介入手术过程中,医生或机器人在介入器械后端推动介入器械时,通过感知介入器械的推动阻力来判断器械前端与血管壁的接触状态。然而,医生或机器人所感知到的推力,实质上都是介入器械前端与血管壁之间的接触力和介入器械侧面与血管壁之间的摩擦力等共同作用的结果,不能准确反映介入器械前端与血管壁接触情况(Ahmed等,2010)。

为直接测量介入器械与血管壁的接触力,一些介入手术机器人(Cercenelli等,2017;Wang等,2018)将压力传感器集成在介入器械前端。压力传感器一般有压电式、压阻式和光纤式3种类型(Hooshier等,2020;Su等,2017)。其中光纤传感器有着良好的动态性能与抗干扰能力,体积较小,越来越多被应用到手术机器人的力传感中(Gao等,2018)。然而,由于介入设备无论是导管还是导丝的直径都很小,当传感器放置在介入器械前端时,不仅面临着尺寸限制的问题,而且还面临着信号和能量传输的问题,实用性不强,因此目前没有得到广泛应用。

为了能够估计介入器械前端的受力情况,本文开创性地提出了一种通过图像观察介入器械前端变形程度从而估计器械与血管壁接触力的方法。目前X光在疾病诊断和治疗中应用广泛(张智睿等,2020;),数字减影血管造影(digital subtraction angiography, DSA)就是其中之一。在建立介入器械前端受力与变形量之间关系的基础上,可通过获得DSA图像中的介入器械前端变形量来预测器械前端的受力情况。通过这种方法,既不需要在介入器械上增加传感器等其他设备,又能够获取到介入器械前端接触力的情况,从而降低血管壁被介入器械前端划伤、刺破或使斑块移动的风险,为血管介入手术实施提供信息参考。

1 基于图像的导丝受力估计方案

1.1 问题提出

如图1所示,在获取到的X光图像中能够清楚地看到介入器械导丝的轮廓。由于导丝为弹性材料,在受一定大小的力的情况下会产生相应形变,其中导丝前端由受力而产生的形变最为显著。若能够建立导丝受力与变形之间的联系,就可以直接在获取到的X射线图像中检测出导丝并计算变形,进而推断出导丝前端的受力情况。



图1 血管介入手术中的导丝器械

Fig.1 Guide wire in vascular interventional operation

1.2 导丝变形建模

由于导丝在与血管壁接触后会发生变形,需要用参数定量描述导丝的变形情况。曲率常常被用来描述曲线的弯曲状况。对于没有明显突变的一段导丝,本文提出使用变形段的最大曲率来描述其变形状况。对于本文实验中所用的导丝,选取从前端向里的一段导丝,将其看做一条曲线,获取其最大曲率来描述导丝的变形量。但是由于获取到的导丝轮廓曲线并没有用具体函数表达式描述,因此求具体每一个点的曲率有一定的困难。然而,由于得到的导丝轮廓曲线比较光滑,因此使用一定间隔的3个点来求取这一段的近似曲率。由于导丝前端一小段在不受力条件下本身就有一定的变形,如图2所示,这可能会对计算结果产生影响,因此在计算前端最大曲率时不考虑这一部分,只计算导丝前端上后一部分的最大曲率。经测量,在导丝前端弯曲部分的长度最长不超过10 mm。在图像上检测出导丝之后,可以通过计算该部分在图像上对应的像素数,从而可以在计算导丝前端变形时将这一部分去掉。

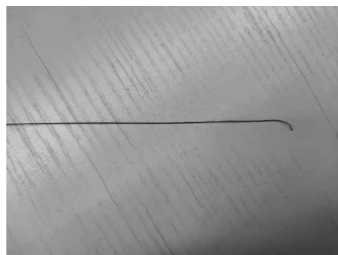


图2 实验所用导丝

Fig. 2 Guide wire for experiment

如图3所示,对于不在同一直线上的3个点,3点连线可以构成一个三角形,三角形一定存在外接圆,外接圆的曲率即为3点求取的近似曲率。如图3中A、B、C这3点,其对边边长分别为 a 、 b 、 c ,则其外接圆曲率为

$$k = \frac{2\sin B}{b} = \frac{2\sqrt{1 - \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}}}{b} \quad (1)$$

若在同一直线上,外接圆曲率为0,该公式也同样适用。最后从所选变形段中依次遍历,选出最大曲率即为导丝变形量,最大曲率越大也就代表着导丝的变形量越大。对于实际拍摄的含导丝的DSA图像,目前的导丝检测算法可以检测出的导丝为一连串点,因此,可以通过从头到尾对这些点进行排序,隔一段距离取一个点,从而得到一组点,然后通过这一组点来计算导丝的最大曲率。DSA图像的大小通常为 512×512 像素,在一幅DSA图像上导丝占据着几百个像素,清晰可见,故实际的DSA图像能够满足该方法的需求。

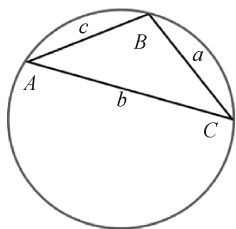


图3 三点求曲率法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three point curvature method

1.3 导丝前端受力分析

对于导丝前端的受力,由于在介入器械前端与血管壁之间存在着垂直于血管壁的力 F_y 之外,沿着血管壁的方向也存在着一定大小的力 F_x ,这两种力都有可能是导丝前端的主要受力,因此需要分别对这两种力进行分析,以判断哪些力是可能划伤或刺

破血管的主要因素。如图4所示。

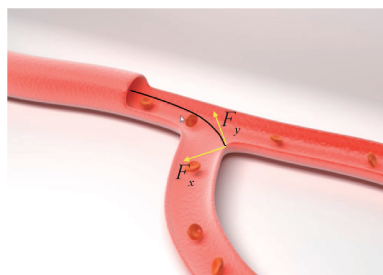


图4 导丝与血管壁的可能接触状态及受力

Fig. 4 Possible contact state and stress between guide wire and vascular wall

1.4 导丝前端接触力与变形关系建模

在导丝材料和型号一定时,介入器械前端的受力 F_x 、 F_y 与介入器械的变形情况即最大曲率之间可能存在着某种映射。

由于导丝前端所受的力对导丝产生了弯矩,这里为了便于估计,可以将变形后的导丝看做一根梁,当受到外力时,梁的轴线会发生弯曲,变成一条光滑并且连续的曲线,将变形后的梁轴称为挠曲轴。挠曲轴的弯曲变形公式为

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (2)$$

式中, M 为挠曲轴上某点的弯矩, $1/\rho$ 为该点的曲率, EI 为该点所在截面上的弯曲刚度,其中 E 是弹性模量, I 是截面惯性矩。由式(2)可以看出,在 EI 一定的情况下,某点处的曲率与其所受的弯矩成正比。而导丝前端弯矩 M 会随着其所受力 F 的增大而增大,故在一定范围内导丝前端的受力会随着最大曲率的增大而增加。但是这种关系也不是无限制的,导丝前端的受力不可能无限增大,理论上存在最大值。

本文通过实验来验证这一猜想。在获取到实验数据后,通过数据构建介入器械受力与前端最大曲率 k 大小的关系,并将这种曲线拟合根据实际情况拟合合成一定的函数表达式,即 $F_x = f_x(k)$ 、 $F_y = f_y(k)$ 。

2 实验

2.1 实验方案设计

为了验证能够通过分析导丝的变形来求出导丝前端的受力这一方案,本文设计了导丝受力变形实验

并搭建了实验装置。其实验设备包括力臂、力传感器、导丝、挡板和相机等。通过力传感器来获取导丝前端的受力情况,通过相机拍摄含有变形导丝的图片。

导丝变形实验的具体过程如图5所示,推动导丝使导丝前端接触到力臂前端挡板,导丝前端与挡板的接触力使导丝发生变形,将导丝受力情况分为 x 与 y 两个方向分别进行分析,由于导丝产生的力比较小,难以测量,因此借由力臂将测量力转变为测量传感器所受力矩 T_x 、 T_y ,同时求出力臂的长度,最后通过力矩算出力 F_x 、 F_y ,之后就可以分析导丝受力与变形量 k 之间关系,实验示意图如图5所示。

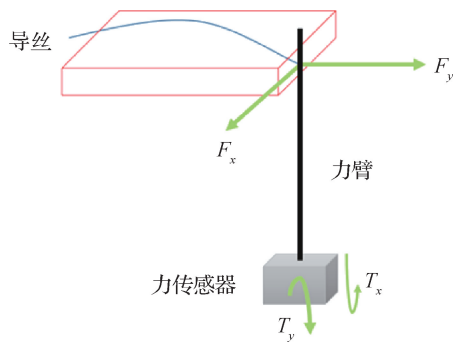


图5 导丝受力变形实验示意图

Fig. 5 Schematic diagram of guide wire stress deformation experiment

2.2 实验设备与条件

实验装置包括实验台、力传感器、介入器械导丝、摄像机和上位机等,摄像机位于实验台正上方,

实验台上设置有通道槽,力传感器固定在实验台上,介入器械位于通道槽内,且与力传感器接触,力传感器和摄像机均与上位机连接。如图6所示。

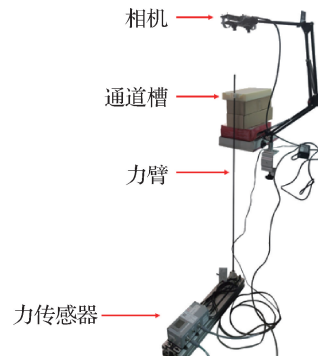


图6 实验设备

Fig. 6 Experimental equipment

2.3 具体实验

2.3.1 导丝提取

实验相机采用RGB彩色相机,在拍摄到含有弯曲变形导丝的图像后,首先需要将彩色图像转为灰度图像,之后使用Canny算子对图像进行边缘检测。在检测到的边缘之中除导丝边缘外还可能存在背景中的边缘,使用多帧图像平均的方法获取到不含导丝的背景图像,同时对其用Canny算子进行边缘检测,之后将含导丝边缘图像中的背景边缘去掉,就得到只含导丝的图像。之后对其进行形态学闭运算,将导丝的双边缘合二为一,就得到了效果比较好的导丝边缘图像。图7为提取图像中导丝的流程。

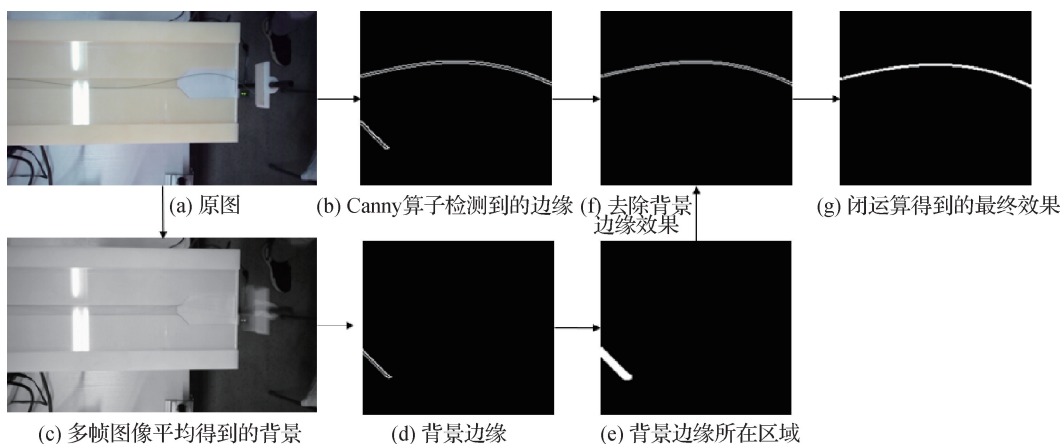


图7 导丝提取流程

Fig. 7 Guide wire extraction process

((a)original image;(b)edge image detected by Canny;(c)background averaged from multiple images;(d)edges in the background;
(e)areas of background edges;(f)result of removing background edges;(g)final image obtained by close operation)

在实际的导丝检测算法中,由于导丝实际所处的场景比较复杂,使用传统算法的检测性能一般较差,而基于深度学习的方法已经在医学分割领域得到了广泛且成功的应用(董婷等,2021),因此一般采用基于深度神经网络的方法来检测导丝,这些算法也有着良好的实时性。中国科学院自动化研究所提出的导丝检测算法(Zhou等,2020)的检测速率可以达到15帧/s,在算法的实时性方面有着良好的性能,有望应用到实际血管介入手术中。

2.3.2 导丝变形量获取

如图8所示,只需知道导丝上的3个点,就可以通过求解这3个点所构建的三角形的外接圆曲率的方式来对这3点所在导丝段的近似曲率进行求解,所选间隔为40个像素。依次从左到右进行遍历,在所有计算出的曲率中取最大值即为最大曲率。

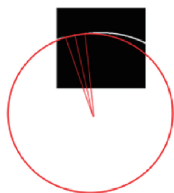


图8 计算导丝最大曲率示意图

Fig. 8 Schematic diagram of calculating maximum curvature of guide wire

2.3.3 导丝受力与变形量关系分析

实验得到的数据中,不同最大曲率下对应的沿着接触面方向的力 F_x 与垂直于接触面方向的力 F_y 的分布如图9所示。

从图9中可以看出,在导丝变形的最大曲率范围内(实际手术中导丝变形并不会太大),在同等变形条件下,垂直于接触面方向的力 F_y 要远大于沿着接触面方向的力 F_x ,因此介入器械前端的受力主要来自垂直于接触面方向的力。同时,随着导丝最大曲率 k 的增大,导丝垂直于接触面方向的力 F_y 逐渐增大;达到一定阈值后即使最大曲率继续增大, F_y 达到最大值并几乎保持不变。

3 实验结果分析

对获取到的数据,根据受力 F 与最大曲率 k 之间的关系,选择恰当的函数关系式,通过最小二乘法

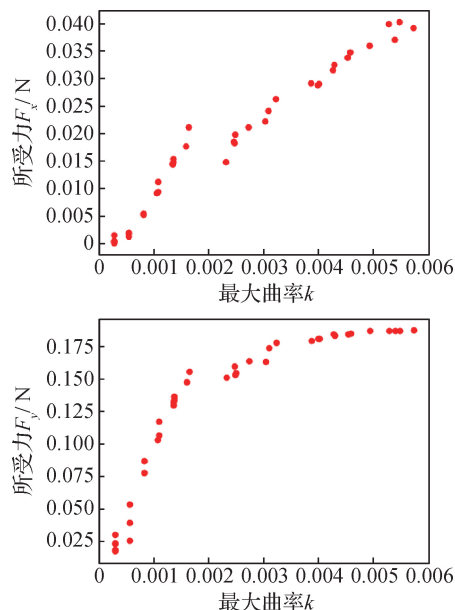


图9 不同曲率下对应的导丝受力

Fig. 9 Force of guide wire under different curvature

对其进行拟合,关系式为

$$F_x = 7.2668k + 0.00086 \quad (3)$$

$$F_y = \frac{0.38}{1 + e^{-942.81k - 0.1522}} - 0.19 \quad (4)$$

拟合曲线在原数据上的表现如图10(a)所示。获得拟合关系的表达式之后,利用关系式对之前用来拟合的最大曲率 k 对应的受力进行预测,对比实际值与预测值之间的关系。由于在数值较小时,预测值与实际值之间的相对误差会非常大,从而难以说明预测的准确性;而绝对误差计算每次预测值与实际值之间的差值,能反映出偏离真实值的大小。这里需要计算预测值与实际值的差值,因此计算的误差选用绝对误差更合适。表1描述了拟合方程对实验数据和测试数据的拟合程度,从中可以看出,预测值与实际值之间的各种误差都比较小,且相关系数非常接近1,因此该函数表达式对导丝受力情况有很好的拟合能力。

为了验证方法的稳定性,在同等实验条件下进行了深入实验,以比较实验数据在获得的受力变形关系曲线周围的分布情况,观察可以发现实验点依旧分布在获得的函数关系曲线周围,其结果如图10(b)所示。

表1可以看出,测试数据的误差依旧较小,实际值与预测值之间相关系数接近于1,相关性很高。这说明在导丝变形的过程中,变形量与受力之间存

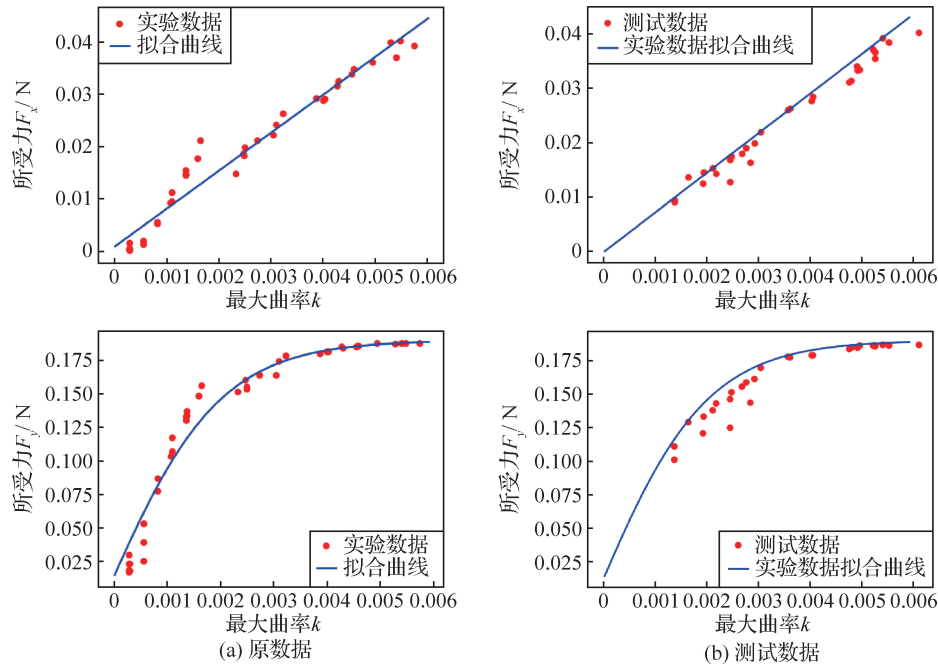


图 10 拟合曲线在原数据和测试数据上的表现

Fig. 10 Performance of fitting curve on original data and test data((a) original data;(b) test data)

表 1 实验数据和测试数据预测误差及相关系数

Table 1 Prediction error and correlation coefficient of experimental data and test data

		最大误差/N	最小误差/N	平均误差/N	均方差	实际值与预测值相关系数
实验数据	F_x	0.008 3	2.85×10^{-4}	0.002 31	7.27×10^{-6}	0.990 2
	F_y	0.036 0	6.16×10^{-4}	0.006 89	1.10×10^{-4}	0.962 1
测试数据	F_x	0.008 3	1.51×10^{-5}	0.002 0	7.02×10^{-6}	0.979 0
	F_y	0.036 0	6.09×10^{-5}	0.008 0	1.64×10^{-4}	0.981 3

在着某种映射。所拟合的受力变形关系公式在一定程度上能够描述导丝受力与变形之间的关系。因此,对于血管介入手术中,通过获取介入器械前端的变形情况来估计介入器械的受力情况的方法是可行的。

4 结 论

针对血管介入手术过程中介入器械前端接触力难以测量的问题,创新地提出了一种基于图像来获取介入器械前端变形进而预测介入器械前端接触力的方法。为验证方案的可行性,搭建了实验装置模拟导丝在血管受力时的变形状况。通过实验获取到导丝前端的接触力和带有变形导丝的图像,分析导丝前端的受力情况与变形量即最大曲率之间的关系,发现导丝前端的受力与最大曲率之间存在着映

射关系。这验证了在血管介入手术中通过图像来得知介入器械前端受力情况方案的可行性。之后使用函数关系式将导丝受力与变形量之间的关系进行拟合。在临床中,可借助 DSA 对器械变形进行观察来估计受力情况,从而控制接触力,避免划伤血管壁,有助于降低进行血管介入手术的技术难度,并提高血管介入手术的成功率。

本文方法目前是模拟实验装置开展的研究,与实际应用场景存在着一定的差异。未来需要在血管 3 维模型中搭建实验环境并进行实验,改善实验的方案,进一步验证本方案的可行性。

参考文献 (References)

Ahmed K, Keeling A N, Fakhry M, Ashrafian H, Aggarwal R, Naugh-

- ton P A, Darzi A, Cheshire N, Athanasiou T and Hamady M. 2010. Role of virtual reality simulation in teaching and assessing technical skills in endovascular intervention. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*, 21(1): 55-66 [DOI: 10.1016/j.jvir.2009.09.019]
- Cercenelli L, Bortolani B and Marcelli E. 2017. CathROB: a highly compact and versatile remote catheter navigation system. *Applied Bionics and Biomechanics*, 2017; #2712453 [DOI: 10.1155/2017/2712453]
- Dong T, Wei L and Nie D S. 2021. Research process of lung module segmentation based on CT images. *Journal of Images and Graphics*, 26(4):0751-0765 (董婷,魏琨,聂东升. 2021. CT影像肺结节分割研究进展. 中国图象图形学报,26(4):0751-0765) [DOI: 10.11834/jig.200201]
- Gao A Z, Zhou Y Y, Cao L, Wang Z D and Liu H. 2018. Fiber bragg grating-based triaxial force sensor with parallel flexure hinges. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(10): 8215-8223 [DOI: 10.1109/TIE.2018.2798569]
- Hooshier A, Najarian S and Dargahi J. 2020. Haptic telerobotic cardiovascular intervention: a review of approaches, methods, and future perspectives. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 13: 32-50 [DOI: 10.1109/RBME.2019.2907458]
- Hu S S, Gao R L, Liu L S, Zhu M L, Wang W, Wang Y J, Wu Z S, Li H J, Gu D F, Yang Y J, Zheng Z and Chen W W. 2019. Summary of the 2018 Report on Cardiovascular Diseases in China. *Chinese Circulation Journal*, 34(3): 209-220 (胡盛寿,高润霖,刘力生,朱曼璐,王文,王拥军,吴兆苏,李惠君,顾东风,杨跃进,郑哲,陈伟伟. 2019.《中国心血管病报告2018》概要. 中国循环杂志, 34(3): 209-220) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3614.2019.03.001]
- Liu Y, Wu Y H, Zheng Y F and Xi T F. 2014. The classification and development trend of interventional medical devices. *China Medical Device Information*, (9): 1-8 (刘洋,吴远浩,郑玉峰,奚廷斐. 2014. 介入器械分类及其发展趋势. 中国医疗器械信息, (9): 1-8) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-6586.2014.09.002]
- Lu Y, Shen S W, Qi H J, Fang N Y, Li F, Wang L, Meng C, Zou H H, Yun J T and Shen Z H. 2015. Prevalence of ideal cardiovascular health in southeast Chinese adults. *International Journal of Cardiology*, 184: 385-387. [DOI: 10.1016/j.ijcard.2015.02.104]
- Su H, Iordachita I I, Tokuda J, Hata N, Liu X, Seifabadi R, Xu S, Wood B and Fischer G S. 2017. Fiber-optic force sensors for MRI-guided interventions and rehabilitation: a review. *IEEE Sensors Journal*, 17(7): 1952-1963 [DOI: 10.1109/JSEN.2017.2654489]
- Taylor R H and Stoianovici D. 2003. Medical robotics in computer-integrated surgery. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(5): 765-781 [DOI: 10.1109/TRA.2003.817058]
- Wang K D, Chen B, Lu Q S, Li H B, Liu M H, Shen Y and Xu Z Y. 2018. Design and performance evaluation of real-time endovascular interventional surgical robotic system with high accuracy. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 14(5): e1915 [DOI: 10.1002/res.1915]
- Yu X B, Li X Q, Qian A M, Meng Q Y, Sang H F, Rong J J, Zhu L W and Lei F R. 2014. The treatment and preventive measures against iliac artery rupture during the process of endovascular therapy. *Chinese Journal of General Surgery*, 29(11): 831-834 (于小滨,李晓强,钱爱民,孟庆友,桑宏飞,戎建杰,朱礼炜,雷锋锐. 2014. 腔内治疗过程中髂动脉破裂的预防及处理. 中华普通外科杂志, 29(11): 831-834) [DOI: 10.3760/cma.j.issn.1007-631X.2014.11.005]
- Zhang Z R, Li Q and Guan X. 2020. Multilabel chest X-ray disease classification based on a dense squeeze-and-excitation network. *Journal of Image and Graphics*, 25(10):2238-2248 (张智睿,李锐,关欣. 2020. 密集挤压激励网络的多标签胸部X光片疾病分类. 中国图象图形学报, 25(10):2238-2248) [DOI: 10.11834/jig.200232]
- Zhou Y J, Xie X L, Bian G B and Hou Z G. 2020. A lightweight recurrent attention network for real-time guidewire segmentation and tracking in interventional X-Ray fluoroscopy//Proceedings of the 24th European Conference on Artificial Intelligence-ECAI 2020. Santiago de Compostela, Spain: IOS Press: 2848-2855 [DOI: 10.3233/FAIA200427]

作者简介



任龙飞,1999年生,男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理、深度学习。

E-mail: rlf12311@buaa.edu.cn



孟懿,通信作者,男,副教授,主要研究方向为计算机视觉、空间机器人视觉导航和医疗机器人导航与控制。

E-mail: Tsai@buaa.edu.cn

刘博,男,副教授,主要研究方向为机器学习、图像处理、三维成像技术及其在大型医疗设备中的应用。

E-mail: bo.liu@buaa.edu.cn

白相志,男,教授,主要研究方向为数学形态学、模糊理论、图像处理、模式识别、生物医学图像分析。

E-mail: jackybxz@buaa.edu.cn

周付根,男,教授,主要研究方向为目标检测、跟踪与识别技术、多模图像配准与融合技术、真实场景三维重建技术、生物医学成像、图像处理与识别技术。

E-mail: zhufugen@buaa.edu.cn