



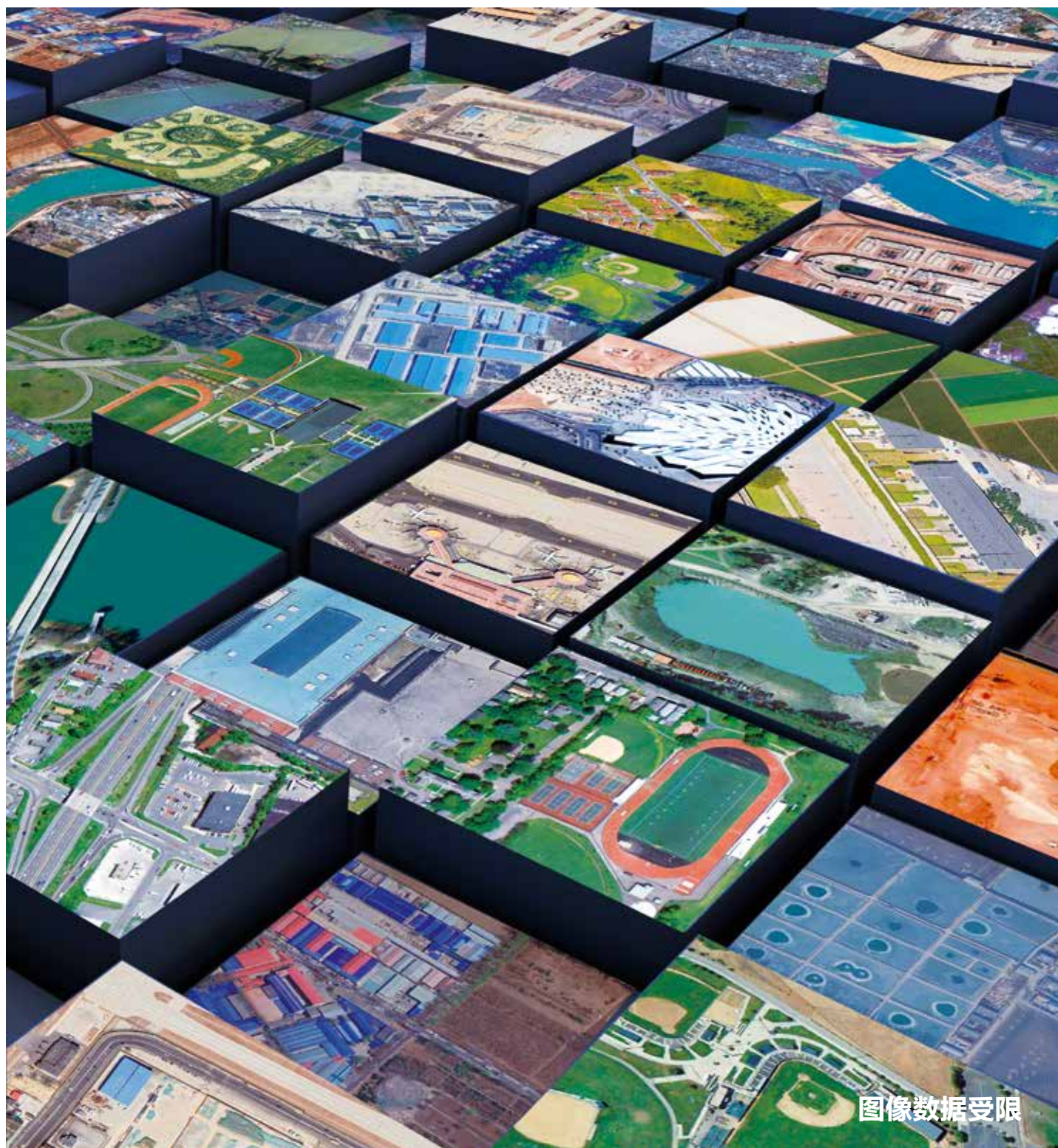
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

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

中国图象图形学报

2022
10
VOL.27

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



图像数据受限



第27卷第10期（总第318期）
2022年10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

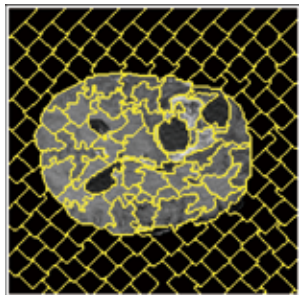
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Aerospace Information Research Institute, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

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

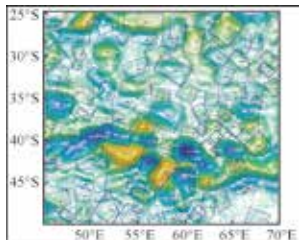
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 60.00元



MRI脑肿瘤图像的超像素/体素分割及发展现状(第2897页)



融合多尺度特征与全局上下文信息的X光违禁物品检测(第3043页)



融合多尺度旋转锚机制的海洋中尺度涡自动检测(第3092页)

图像数据受限

《中国图象图形学报》图像数据受限专栏简介

刘怡光, 孙显, 赵启军, 魏秀参, 王琦, 陈秀妍 2801

数据受限条件下的多模态处理技术综述

王佩瑾, 闫志远, 容雪娥, 李俊希, 路晓男, 胡会扬, 严启炜, 孙显 2803

图像数据受限下的处理与分析

刘怡光 2835

面向跨模态行人重识别的单模态自监督信息挖掘

吴岸聪, 林城栋, 郑伟诗 2843

小样本条件下的RGB-D显著性物体检测

何静, 傅可人 2860

综述

面向目标检测的对抗样本综述

袁珑, 李秀梅, 潘振雄, 孙军梅, 肖蕾 2873

MRI脑肿瘤图像的超像素/体素分割及发展现状

方玲玲, 王欣 2897

图网络层级信息挖掘分类算法综述

魏文超, 蔺广逢, 廖开阳, 康晓兵, 赵凡 2916

个性化图像美学评价的研究进展与趋势

祝汉城, 周勇, 李雷达, 赵佳琦, 杜文亮 2937

视盘和视杯分割在计算机辅助青光眼诊断中的应用综述

方玲玲, 张丽榕 2952

图像处理和编码

多监督损失函数光滑化图像超分辨率重建

孟志青, 张晶, 邱健数 2972

轻量级注意力约束对齐网络的视频超分重建

靳雨桐, 宋慧慧, 刘青山 2984

面向图像修复的增强语义双解码器生成模型

王倩娜, 陈焱 2994

图像分析和识别

动态模态交互和特征自适应融合的RGBT跟踪

王福田, 张淑云, 李成龙, 罗斌 3010

采用Transformer网络的视频序列表情识别

陈港, 张石清, 赵小明 3022

对抗型半监督光伏面板故障检测

卢芳芳, 牛然, 杜海舟, 杨振辰, 陈菁菁 3031

融合多尺度特征与全局上下文信息的X光违禁物品检测

李晨, 张辉, 张邹铨, 车爱博, 王耀南 3043

高速公路场景的车路视觉协同行车安全预警算法

汪长春, 高尚兵, 蔡创新, 陈浩霖 3058

结合卷积神经网络与曲线拟合的人体尺寸测量

马燕, 殷志昂, 黄慧, 张玉萍 3068

医学图像处理

U-Net支气管超声弹性图像纵膈淋巴结分割

刘羽, 吴蓉蓉, 唐璐, 宋宁宁 3082

遥感图像处理

融合多尺度旋转锚机制的海洋中尺度涡自动检测

杜艳玲, 刘倩倩, 王丽丽, 徐鑫, 魏泉苗, 宋巍 3092

集成注意力机制和扩张卷积的道路提取模型

王勇, 曾祥强 3102

空域协同自编码器的高光谱异常检测

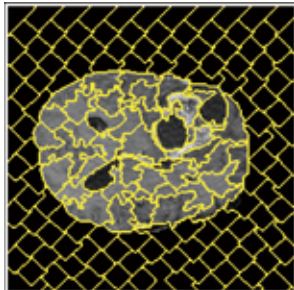
樊港辉, 马泳, 梅晓光, 黄珺, 樊凡, 李峰 3116

自适应权重金字塔和分支强相关的SAR图像舰船检测

郭伟, 申磊, 曲海成, 王雅萱, 林畅 3127

CONTENTS

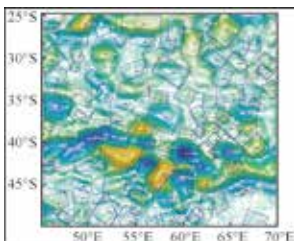
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



The review of superpixel/voxel segmentation of MRI brain tumor images(P2897)



Integrated multi-scale features and global context in x-ray detection for prohibited items(P3043)



Multi-scale rotating anchor mechanism based automatic detection of ocean mesoscale eddy(P3092)

Limited Image Data

Review of multimodal data processing techniques with limited data

Wang Peijin, Yan Zhiyuan, Rong Xuee, Li Junxi, Lu Xiaonan, Hu Huiyang, Yan Qiwei, Sun Xian ... 2803

The processing and analyzing derived of limited image data

Liu Yiguang 2835

Single-modality self-supervised information mining for cross-modality person re-identification

Wu Ancong, Lin Chengzhi, Zheng Weishi 2843

RGB-D salient object detection of using few-shot learning

He Jing, Fu Keren 2860

Review

Review of adversarial examples for object detection

Yuan Long, Li Xiumei, Pan Zhenxiong, Sun Junmei, Xiao Lei 2873

The review of superpixel/voxel segmentation on MRI brain tumor images

Fang Lingling, Wang Xin 2897

Survey of graph network hierarchical information mining for classification

Wei Wenchao, Lin Guangfeng, Liao Kaiyang, Kang Xiaobing, Zhao Fan 2916

The review of personalized image aesthetics assessment

Zhu Hancheng, Zhou Yong, Li Leida, Zhao Jiaqi, Du Wenliang 2937

The review of optic disc and optic cup segmentation applications in computer-aided glaucoma diagnosis

Fang Lingling, Zhang Lirong 2952

Image Processing and Coding

Multi-supervision loss function based smoothed super-resolution image reconstruction

Meng Zhiqing, Zhang Jing, Qiu Jianshu 2972

Super-resolution Video frame reconstruction through lightweight attention constraint alignment network

Jin Yutong, Song Huihui, Liu Qingshan 2984

Enhanced semantic dual decoder generation model for image inpainting

Wang Qianna, Chen Yi 2994

Image Analysis and Recognition

RGBT tracking based on dynamic modal interaction and adaptive feature fusion

Wang Futian, Zhang Shuyun, Li Chenglong, Luo Bin 3010

Video sequence-based human facial expression recognition using Transformer networks

Chen Gang, Zhang Shiqing, Zhao Xiaoming 3022

Generative adversarial networks based semi-supervised fault detection for photovoltaic panel

Lu Fangfang, Niu Ran, Du Haizhou, Yang Zhenchen, Chen Jingjing 3031

Integrated multi-scale features and global context in x-ray detection for prohibited items

Li Chen, Zhang Hui, Zhang Zouquan, Che Aibo, Wang Yaonan 3043

Vehicle-road visual cooperative driving safety early warning algorithm for expressway scenes

Wang Changchun, Gao Shangbing, Cai Chuangxin, Chen Haolin 3058

The convolution neural network and curve fitting based human body size measurement

Ma Yan, Yin Zhiang, Huang Hui, Zhang Yuping 3068

Medical Image Processing

U-Net-based mediastinal lymph node segmentation method in bronchial ultrasound elastic images

Liu Yu, Wu Rongrong, Tang Lu, Song Ningning 3082

Remote Sensing Image Processing

Multi-scale rotating anchor mechanism based automatic detection of ocean mesoscale eddy

Du Yanling, Liu Qianqian, Wang Lili, Xu Xin, Wei Quanmiao, Song Wei 3092

Road extraction model derived from integrated attention mechanism and dilated convolution

Wang Yong, Zeng Xiangqiang 3102

Spatial-coordinated autoencoder for hyperspectral anomaly detection

Fan Ganghui, Ma Yong, Mei Xiaoguang, Huang Jun, Fan Fan, Li Hao 3116

Ship detection in SAR images based on adaptive weight pyramid and branch strong correlation

Guo Wei, Shen Lei, Qu Haicheng, Wang Yaxuan, Lin Chang 3127

中图法分类号: TP301.6 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2022)10-3068-14

论文引用格式: Ma Y, Yin Z A, Huang H and Zhang Y P. 2022. The convolution neural network and curve fitting based human body size measurement. Journal of Image and Graphics, 27(10): 3068-3081 (马燕, 殷志昂, 黄慧, 张玉萍. 2022. 结合卷积神经网络与曲线拟合的人体尺寸测量. 中国图象图形学报, 27(10): 3068-3081 [DOI: 10.11834/jig.210208])

结合卷积神经网络与曲线拟合的人体尺寸测量

马燕*, 殷志昂, 黄慧, 张玉萍

上海师范大学信息与机电工程学院, 上海 200234

摘要: **目的** 人体尺寸测量是服装制作中的一个重要环节。非接触式人体测量具有效率高、方便快捷的优点, 但存在测量精度较低、对设备和外界环境要求高等问题。为进一步改进这些问题, 本文基于卷积神经网络建立模型, 相继提出人体分割和关键点检测的方法、基于 Bezier 曲线的人体肩宽测量方法和基于双椭圆拟合的人体围度测量方法。**方法** 通过摄像头获取人体的正面、侧面及背面图像; 利用 Deeplabv3+ 算法对人体图像进行分割获得人体轮廓, 利用 OpenPose 算法对人体关键点进行检测及定位, 利用肩部端点处的角度特征并结合人体肩部关节信息确定肩部端点, 利用肩部曲线与 Bezier 曲线的相似性通过计算肩部 Bezier 曲线的长度得到肩宽, 通过关键点信息确定胸围、腰围及臀围的宽度和厚度, 并建立围度曲线的双椭圆拟合模型, 采用线性回归法训练得到拟合模型中的参数, 最后利用双椭圆拟合曲线的周长得到人体围度。**结果** 根据本文方法对 100 位被测者进行肩宽计算, 对 132 位被测者进行人体围度计算, 平均绝对误差均在 3 cm 以内, 符合国家测量标准, 且整套方法操作方便, 结果稳定。**结论** 实验验证了本文方法在人体尺寸测量中的精度, 降低了非接触式人体测量法对外界环境和设备的依赖程度, 提高了系统的鲁棒性, 为非接触式人体测量走向实用化打下了坚实基础。

关键词: OpenPose; Deeplabv3+; Bezier 曲线; 曲线拟合; 人体测量

The convolution neural network and curve fitting based human body size measurement

Ma Yan*, Yin Zhiang, Huang Hui, Zhang Yuping

College of Information, Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China

Abstract: **Objective** The human body size measurement is developed in garment making based on contact and non-contact methods. The manual contact measurement mainly uses soft ruler and other tools to measure by hand. This method is time costly and inaccuracy, which is not appropriate for large-scaled human body size collection. The intelligent non-contact human body measurement obtains human body size through some equipment and instruments, which has the features of high efficiency, easy use and quick response. Traditional non-contact human body measurement is constrained of external factors, such as single color background and fixed lighting scenario. In addition, the traditional methods extract less number of human key points, or the position of human key points have some deviation for the human body with particular size. To further address these issues, we construct a convolution neural network model and facilitate the method for segmenting human body and detecting the key points. Meanwhile, we focus on the measurement method of shoulder width based on Bezier

收稿日期: 2021-03-24; 修回日期: 2021-06-30; 预印本日期: 2021-07-06

* 通信作者: 马燕 ma-yan@shnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61373004)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61373004)

curve, as well as the measurement method of body circumference based on double ellipse fitting. **Method** Three images of the front, side and back of the human body are captured through the camera. The acquired image is segmented using the Deeplabv3+ algorithm and the human body contour is obtained. Lightweight OpenPose algorithm is employed to detect the 13 human body key points, including shoulder joint, elbow joint, wrist joint, hip joint, knee joint, ankle joint, etc. First, the end point of shoulder is identified by integrated information of human shoulder joints because the angle between the tangent lines at the end of shoulder is less than the angle of its surrounding point. The two endpoints of shoulder curve can be regarded as the starting point and the ending point of the quadratic Bezier curve based on the similarity of shoulder curve and Bezier curve. Next, the intersection of the tangent lines of the two ends of shoulder width curve is used as the control point of the quadratic Bezier curve. The shoulder width is obtained by the calculated length of shoulder Bezier curve. The range of waist is determined by the key points of hip joint and elbow joint in the human contour curve. The average waist width and thickness within the range are taken as the width and thickness of the human waist. The waist curve of human body is as two ellipses with equal long axes and unequal short axes. The double ellipse fitting model is established for human circumference curve. The parameters of the double ellipse fitting model are trained by linear regression method. Finally, the waist length of human body is obtained with the circumference of the double ellipse fitting curves. Similarly, the measurement position of chest and hip circumference is roughly determined in accordance with the results of human segmentation and key detected points. The measurement curve of the whole chest and hip circumference is fitted to obtain the curve length. **Result** we compare the human key point detection performance of three algorithms, including Lightweight OpenPose, contour-based detection, and human proportion based detection. Our experimental results show that Lightweight OpenPose can extract human key points more accurately. Additionally, we also compare the network results and computation of OpenPose to Lightweight OpenPose. The results show that Lightweight OpenPose can simplify the computation and guarantee the detection accuracy. We select 100 shoulder categories for data evaluation of the measurement of shoulder width, including flat, wide or narrow, and sliding one. We compare the shoulder width measurement performance of three algorithms, including vanishing point and proportion based algorithm, regression analysis and the proposed algorithm. These experimental results demonstrate that our average absolute error of shoulder width measured is less than 2 cm. For the measurement of human circumference, 132 samples are selected for data evaluation. For the measurement of waist circumference, we evaluate four methods related to regression analysis method, support vector machine (SVM)-based waist circumference estimation algorithm, direct ellipse fitting method and the proposed algorithm. For the measurement of chest and hip circumference, we carry out the evaluations of three methods like regression analysis method, direct ellipse fitting method and the proposed algorithm. The comparative results show that the average abstract error of the proposed algorithm is within 3 cm, which is suitable for the national measurement standard. **Conclusion** Our algorithm evaluate the accuracy of human body size measurement, which reduces the dependence of the non-contact measurement on the external environment and equipment, improves the robustness of the system, and promotes the non-contact measurement in practice. The future research potentials can be improved through the robustness of human body segmentation method, the elimination of hair or other racial bodies on shoulder width and chest circumference measurement, and the detection accuracy of shoulder endpoint and chest positioning. It is challenged that more integrated human body data like chest, waist or hip contour need to be estimated for potential features of individual-based human body size further.

Key words: OpenPose; Deeplabv3+; Bezier curve; curve fitting; body size measurement

0 引言

随着人们生活水平和生活质量的大幅提高,消费能力显著提升,服装行业得到蓬勃发展。服装业主要是通过人体测量进行服装设计和个性化服装定制。目前,人体测量主要分为接触式和非接触式两

种方法。接触式测量一般指传统手工测量,主要通过软尺和人体测高仪等测量人体尺寸数据。该方法测量时间长、误差大,在进行大规模人体尺寸数据采集时人力物力消耗大、效率低(王力,2018;赵雅彬等,2017)。非接触式人体测量主要通过一些设备仪器获得人体信息,以进行批量的人体测量工作,具有测量精确、方便快捷等特点。非接触式人体测量

的核心问题在于人体关键点检测和围度测量两个方面。

人体关键点检测用于定位目标位置。传统检测方法有基于人体比例的人体关键点检测算法(邓卫燕等,2010)和基于人体轮廓编码的人体关键点检测算法(Jiang等,2012;Lin和Wang,2011)。基于人体比例的人体关键点检测算法提取人体关键点的速度快,但提取的人体特征点数量较少,因此只能得出有限的几组人体尺寸数据,无法满足人体尺寸测量要求。基于人体轮廓编码的人体关键点检测算法提取的人体关键点是相互独立的,彼此之间不存在依赖关系,该方法检测速度快,但提取效果与人体轮廓编码有关,对于一些特殊体型的人体,提取的人体关键点位置会发生一定偏差。本文使用基于 OpenPose 算法(Cao等,2021)优化的 Lightweight OpenPose 算法(Osokin,2018)进行人体关键点检测,相较传统的人体关键点检测方法准确率高、定位准确、检测结果完整,且相较 OpenPose 算法体量更轻,更适合部署在移动端。

围度测量是非接触式人体测量的另一个核心问题,也是非接触式人体测量的目的所在。传统的测量方法有莫尔条纹测量法(Meadows等,1970)、激光测量法(Jones等,1989;Crease,2010)和红外线测量法(Chao等,2015)等,但这些技术需要借助昂贵的设备才能实施。例如,一套德国产的 TechMat 测体间价格是 500 万元,这是一般企业无法承受的。而脱离这些大型设备,利用人体图像和数据也可以进行人体围度预测。目前常用的测量方法有基于椭圆曲线拟合的人体围度测量算法(黄秀丽,2009)、基于线性回归的人体围度测量算法(齐啸和计忠平,2019;徐枫等,2006)、基于消失点方法与比例法结合的人体围度测量算法(徐慧明等,2017)和基于支持向量机(support vector machine, SVM)的腰围估计方法(Seo等,2020)。

基于椭圆曲线拟合的人体围度测量算法拟合效果较好,但没有考虑不同体型的特殊性。对于一些特殊体型的人体围度会产生较大误差。基于线性回归的人体围度测量算法需要收集大量人体数据,并利用最小二乘法拟合人体各围度的计算方程,可以对新的被测者进行较快的围度测量。但是,影响人体围度的影响因素较多,包括身高、体重和臂长等,这些都会对人体围度产生影响。由于人体体型各

异,较难采用统一的拟合方程定义人体围度。基于消失点方法与比例法结合的人体围度测量算法利用消失点法,依据平行线无限远处相交原理计算身高和腿长等,利用比例法定位人体关键点,并结合之前获取的身高计算肩宽、腰宽、臂长。此方法虽然满足自动测量的要求,但精度依然不高,且所得的腰宽等也并非腰围等围度的最终计算结果。基于 SVM 的腰围估计方法利用 kinect 获取人体深度数据,通过正背面图像对腰部前后两条曲线分别拟合,从而获得腰宽和腰厚数据,并利用 SVM 回归方法训练出相应模型。该方法对拍摄条件要求较高,且计算精度依然不够理想。

针对以上问题,本文提出一种基于 Bezier 曲线和双椭圆曲线拟合的人体尺寸测量方法,只需获得人体 2 维图像和人体身高,即可快速计算出人体肩宽、胸围、腰围及臀围等数据,且便于移植到移动端,达到随时使用的目的。

1 方 法

本文设计的人体尺寸测量方法包括 5 部分。1) 图像采集,获取人体正面、侧面、背面图像;2) 人像分割,通过 Deeplabv3+ 算法对图像中的人体进行提取;3) 关键点检测,通过 OpenPose 算法对提取的人体进行关键点定位,包括肩关节、肘关节和髋关节等;4) 利用 Bezier 曲线特性计算人体肩宽,根据胸围、腰围、臀围的特性分别拟合出各部分人体围度;5) 评估预测结果。流程图如图 1 所示。

1.1 图像采集

本文方法要求获得人体的正面、侧面及背面图像。对被测者有以下要求:1) 挺直身体以确保人体数据正确;2) 拍摄正面(如图 2(a))和背面图像(如图 2(c))时,手臂伸直并与躯体呈大约 30° 角度,手臂暴露在外,不影响腰部数据;3) 拍摄侧面图像(如图 2(b))时,手臂下垂,中指贴住裤缝;4) 穿着为较贴身的衣服,使身体轮廓清晰。图 2 是满足要求的一组人体图像。

1.2 人体分割

从人体图像中提取人体轮廓是非接触式测量的关键环节之一。为提取准确的人体轮廓,大多方法需要对背景环境制订严格规定。Lin 和 Wang(2011, 2012)和 Jiang 等人(2012)提出对采集的图像进行

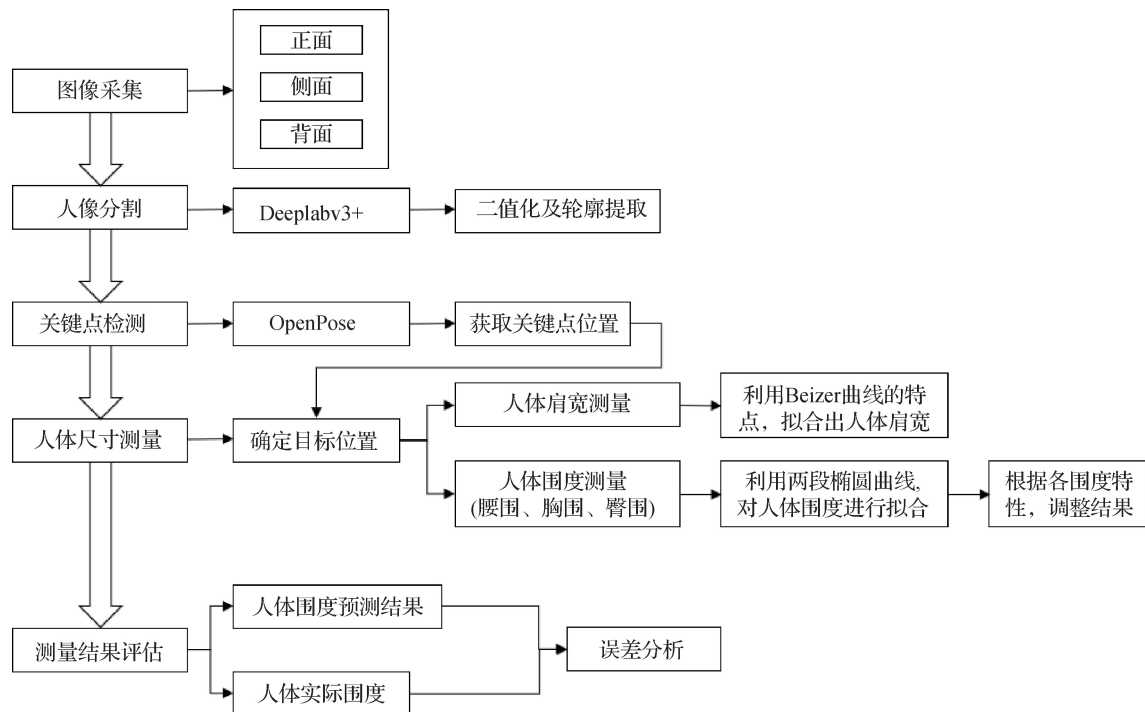


图1 人体尺寸测量方法流程图

Fig. 1 The flow chart of human body size measurement method

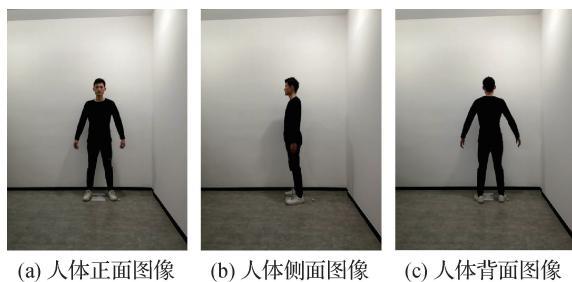


图2 人体图像

Fig. 2 Human body images((a) frontal image of human body; (b) side image of human body; (c) back image of human body)

边缘检测,最终得到较精确的人体轮廓,缺点在于对拍摄场景要求较高,同时需要被测者穿特定服装。邓卫燕等人(2008)提出利用背景差分法提取人体轮廓,但需要预先固定摄像机位置,并对人物和场景各拍一张照片,给实际使用带来了不便。

已有的人体分割方法对外界环境、被测者衣服和摄像机位置等要求较高,不能满足快速、自动获取人体轮廓的要求。本文采用语义分割网络 Deeplab v3 + (Chen 等, 2018a, b) 进行人体分割,通过 encoder-decoder 进行多尺度信息融合,编码器部分直接选用上一个版本的 Deeplabv3,同时保留原来的

空洞卷积和 ASSP(atrous spatial pyramid pooling)层,骨干网络使用 Xception 模型,提高了语义分割的健壮性和运行速率。Deeplabv3 + 网络采用的数据集为目前公开的精度最高的人像分割数据集 Supervisely Person 加上部分自制数据集的组合。图3是利用 Deeplabv3 + 对图2所示的人体图像进行分割的结果。可以看出,虽然图2的人体图像存在光照不均匀、阴影以及双脚间存在杂物等较多干扰因素,但利用 DeepLab v3 + 分割后可以得到较为准确的人体图像。

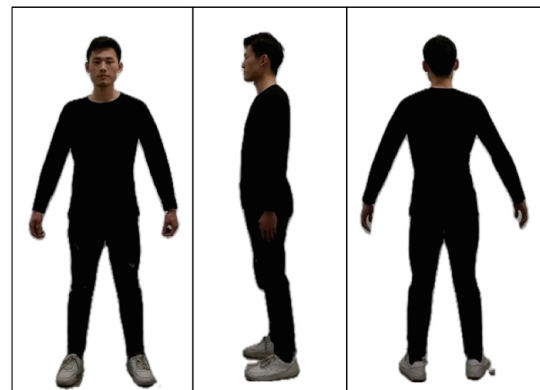


图3 人体分割结果

Fig. 3 The result of human segmentation

进一步对人体图像进行二值化,获得人体二值图,如图 4(a)所示。接着,对人体二值图采用形态学算法进行轮廓追踪,获得人体轮廓图,如图 4(b)所示。

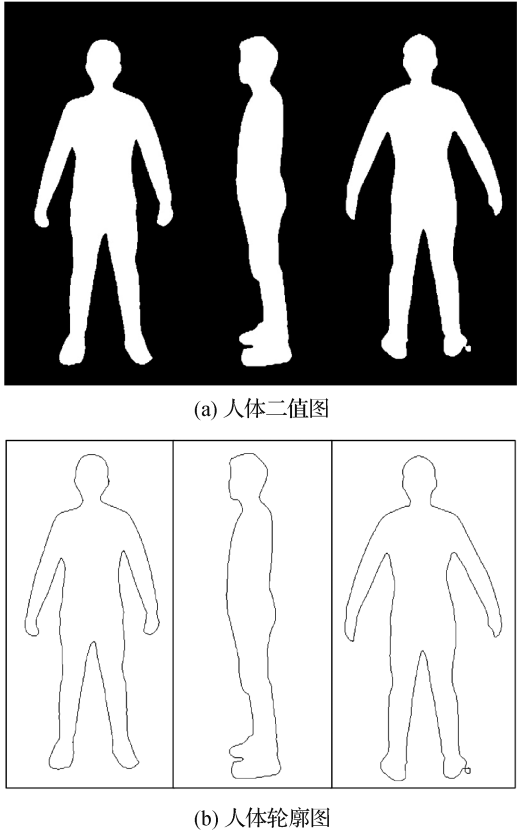


图 4 人体二值图和人体轮廓图
Fig. 4 Human binary and silhouette images
((a) human binary image; (b) human silhouette image)

1.3 人体关键点检测

人体头顶点、颈侧点、肩峰点和腋窝点等人体关键点与人体身高、肩宽和胸围等尺寸密切相关。如何精确提取人体关键点直接影响后续人体关键参数测量的准确性。因此,准确提取人体关键点是研究人体测量的关键之一。

本文采用的 Lightweight OpenPose 算法是 OpenPose 的轻量级优化。OpenPose 的体量较大,对硬件要求高,结合本项目的实际情况,轻量级的 Lightweight OpenPose 算法更适合使用场景,二者的区别主要体现在 3 个方面。1) 用于特征提取的骨干网络部分 OpenPose 算法使用 VGG (Visual Geometry Group) 结构,而 Lightweight OpenPose 算法使用带空洞卷积的 MobileNet 结构;2) 如图 5 所示,原始的

OpenPose 在生成部分亲和域 (part affinity fields, PAFs) 和关键点 (keypoints) 的阶段有两个预测分支,两个分支的结构是一样的,只是在输出阶段获得不同数量的输出结果。因此 Lightweight OpenPose 算法将该阶段的两个网络合并为一个,共享权值,只在输出时再分叉出两个输出;3) Lightweight OpenPose 将 OpenPose 中 7×7 的卷积核替换为 1×1 、 3×3 、 3×3 的卷积级联,为保持视野,在最后一个 3×3 使用膨胀参数为 2 的空洞卷积。

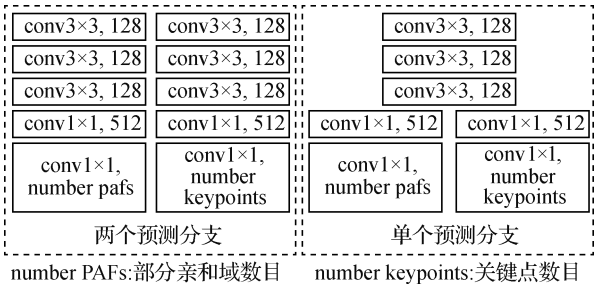


图 5 两种算法预测分支网络结构图
Fig. 5 Network structure diagrams of branch prediction based on two algorithms

图 6 为利用 Lightweight OpenPose 算法对人体关键点检测的结果。通过人体关键点检测,可以获得人体的肩关节、肘关节、腕关节、髋关节、膝关节和踝关节等 13 个人体关键点的位置。

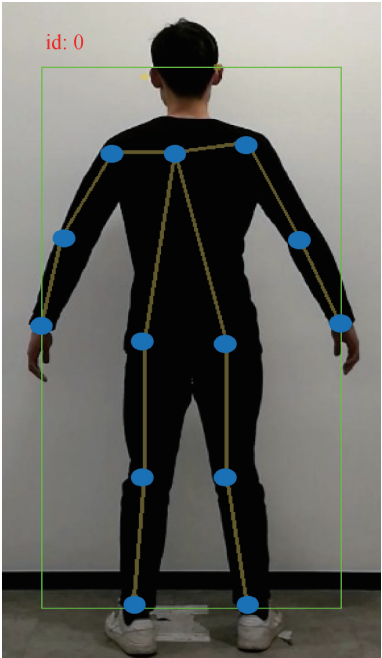


图 6 人体关键点检测结果
Fig. 6 The result of human keypoint detection

1.4 人体肩宽测量

手工测量人体肩宽的标准方法是测量从人体背面的左肩端点经第7颈椎点到右肩端点的长度。如图7(a)所示,皮尺构成的曲线基本可以视为人体的肩部曲线,曲线长度可以视为人体肩宽。利用Lightweight OpenPose算法,获得的是肩部关节点,并非手工测量的肩部端点,因此首先需要确定肩部端点的位置。

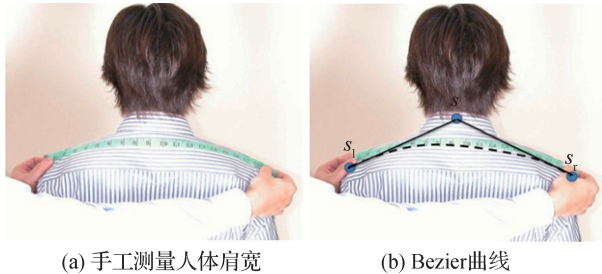


图7 人体肩宽测量示意图

Fig. 7 A schematic of human shoulder width measurement
(a) manual measurement of human shoulder width;
(b) Bezier curve)

1.4.1 肩部端点的确定

确定肩部端点的原则为:1)由于肩部端点位于肩与手臂转折处,因此以该点为中心计算其两端切线的夹角,该角度应小于其周围点的夹角;2)沿肩部关节点做水平线和垂线,得到与人体轮廓的两个交点,肩部端点一定位于这两个交点之间。

图8中, L 为肩部左关节点,沿 L 点向左边和上面两个方向分别做水平线和垂线,得到与人体轮廓的交点分别为 L_{start} 和 L_{end} , S_l 为左肩部端点处。从图8可见,以 S_l 为中心,其两端切线构成的夹角 θ 小于其周围点的夹角。另外, S_l 一定位于 L_{start} 与 L_{end} 两点之间。因此,要确定左肩部端点的位置,只要在 L_{start} 与 L_{end} 间计算所有轮廓点处的夹角,最小夹角对应的轮廓点即为左肩部端点。同理,按同样方法可以得到右肩部端点 S_r 。

假定 p_1 表示 L_{start} 与 L_{end} 间的任一轮廓点, p_1 处的夹角 θ 的计算步骤如下:

1)由 p_1 点沿人体轮廓线向下依次取出共 n 个像素(这里将 n 设置为5),这 n 个像素的坐标表示为 $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2), \dots, p_n(x_n, y_n)$ 。利用最小二乘法拟合这条经过 p_1 点的向上方向的切线 l_1 ,假定该直线表示为 $y = k_1x + b_1$,则其斜率 k_1 为

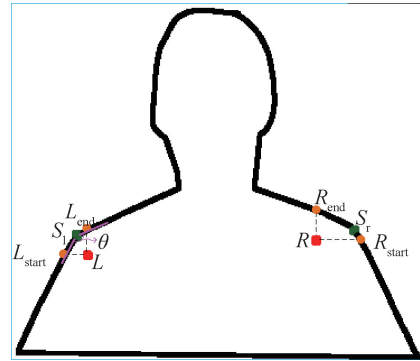


图8 肩部端点示意图

Fig. 8 A schematic of shoulder point

$$k_1 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (1)$$

$$b_1 = y_1 - k_1 x_1 \quad (2)$$

2)由 p_1 点沿人体轮廓线向上依次共取出 n 个像素,得到经过 p_1 点的向下方向的切线 l_2 ,表示为 $y = k_2x + b_2$,其中,按式(1)和式(2)分别计算 k_2 和 b_2 。

3)计算直线 l_1 与 l_2 之间的夹角 θ ,即

$$\tan \theta = \left| \frac{k_2 - k_1}{1 + k_1 \cdot k_2} \right| \quad (3)$$

按上述步骤计算 L_{start} 与 L_{end} 间的所有轮廓点的 θ_i ,则左肩部端点 S_l 满足

$$S_l = \arg \min(\theta_i | i \in [L_{start}, L_{end}]) \quad (4)$$

1.4.2 肩宽的测量

如图7(b)所示,分别位于两个肩部端点 S_l 和 S_r 的向上方向切线交于 S 点。从图中可见,人工测量肩宽的曲线可以通过由 S_l, S 和 S_r 3个控制点生成的二次Bezier曲线(严兰兰和梁炯丰,2008)来拟合。理由如下:1)肩宽曲线和Bezier曲线的起点和终点都分别位于 S_l 和 S_r 处;2)肩宽曲线与Bezier曲线的起点和终点的切线方向一致,分别等于 S_l 和 S_r 和 S 的连线方向;3)由 S_l, S 和 S_r 3个控制点生成的二次Bezier曲线与肩宽曲线的形状基本一致。

假定 S_l, S 和 S_r 3个控制点对应的坐标分别为 $(x_0, y_0), (x_1, y_1)$ 和 (x_2, y_2) ,则二次Bezier曲线计算为

$$x(t) = (1-t)^2 x_0 + 2t(1-t)x_1 + t^2 x_2 \quad (5)$$

$$y(t) = (1-t)^2 y_0 + 2t(1-t)y_1 + t^2 y_2 \quad (6)$$

式中,变量 t 取值范围为 $[0, 1]$ 。利用式(5)和式

(6) 可以计算得到 Bezier 曲线的长度 D , 具体为

$$D = \int_0^1 \sqrt{x'^2(t) + y'^2(t)} dt \quad (7)$$

式中, $x'(t)$ 和 $y'(t)$ 分别为 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的微分。这里的 Bezier 曲线的长度 D 代表的是图像上的人体肩宽, 如果需要得到实际肩宽, 可以利用转换公式, 具体为

$$D_{\text{true}} = \frac{H_{\text{true}}}{H} \times D \quad (8)$$

式中, H_{true} 表示人体实际身高, H 表示二值图中人体身高。

1.5 人体腰围测量

本文在基于曲线拟合(Lu 等, 2009)的人体腰围计算方法上进行改进, 采用基于双椭圆曲线拟合的人体尺寸测量方法, 在获取人体正面、侧面和背面图像后, 结合人体分割和关键点检测结果, 对腰围的测量位置进行大致定位, 再拟合整个腰围测量曲线, 计算曲线长度。

1.5.1 腰围的宽度和厚度

根据国标 GB/T16160-2008《服装用人体测量的部位与方法》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化委员会, 2008) 中对腰围的定义, 腰围指胯骨上端与肋骨下缘之间自然腰际线的水平围长。

人体背面及侧面图像关键点检测结果如图 9 所示。其中, P_h 表示髋关节关键点(图中方块), P_e 表示肘关节关键点(图中圆圈)。

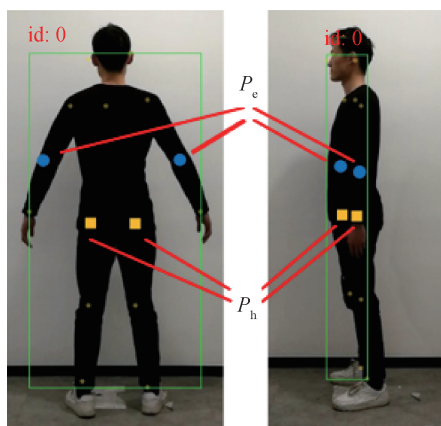


图 9 背面及侧面图像关键点

Fig. 9 The keypoints of back and side images

显然, 人体腰部位置在 P_e 与 P_h 之间, 再结合已经提取的人体轮廓图, 可以得出腰部在人体轮廓中

的范围, 如图 10 所示。

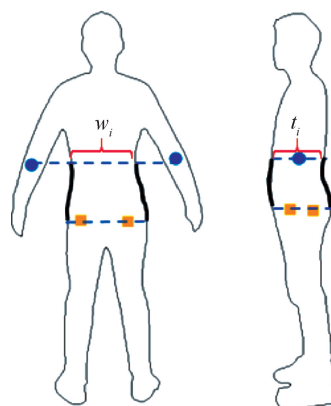


图 10 人体轮廓图中的腰部范围

Fig. 10 The range of waist range in human contour

对于图 10 左边的人体背面图像, 在相同纵坐标下的两端横坐标的差值构成了人体腰部宽度 w_i 。在 P_e 和 P_h 的纵坐标构成的区间 $[y_e, y_h]$ 中, 所有的腰部宽度 w_i 构成了集合 $W' = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, 取其平均值作为人体腰部宽度, 即

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{n} \quad (9)$$

同理, 对图 10 右边的人体侧面图像, 在相同纵坐标下的两端横坐标的差值构成了人体腰部厚度 t_i , 在区间 $[y_e, y_h]$ 中所有腰部厚度 t_i 构成了集合 $T' = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, 取其平均值作为人体腰部厚度, 即

$$T = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{m} \quad (10)$$

1.5.2 腰围的测量

如图 11 所示, 可以将人体的腰部曲线大致看成两段椭圆的结合。水平实线将人体腰围分为腹部和下背部两部分。由于腹部容易堆积脂肪, 因此腹部厚度大于下背部厚度。其中, 水平实线长度为人体的腰部宽度 W , 垂直虚线长度为人体的腰部厚度 T 。

已知椭圆的近似周长为

$$L = \pi \left[\frac{3}{2}(a + b) - \sqrt{ab} \right] \quad (11)$$

式中, a 表示长半轴长度, b 表示短半轴长度, 分别对应图 11 中 $W/2$ 和 $T/2$ 。

人体的腰围曲线可以看做由长轴相等、短轴不相等的两个椭圆构成。如图 11 所示, 椭圆的长轴均

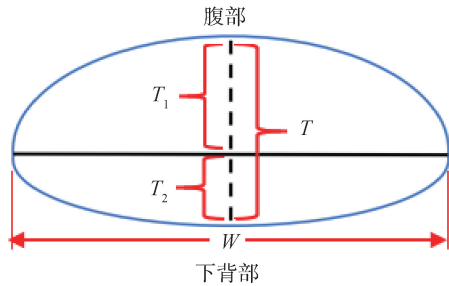


图11 人体腰围拟合曲线

Fig. 11 Fitting curve of human waist circumference

等于 W , 腹部和下背部对应椭圆的短半轴, 分别用 T_1 和 T_2 表示, 且满足

$$T_1 + T_2 = T \quad (12)$$

则由双椭圆拟合的腰围曲线周长为

$$L = \frac{\pi}{2} \left[\frac{3}{2}(W + T) - \sqrt{\frac{WT_1}{2}} - \sqrt{\frac{WT_2}{2}} \right] \quad (13)$$

关于 T_1 和 T_2 的取值, 首先将二者分别表示为 $T_1 = \text{ratio} \times T$, $T_2 = (1 - \text{ratio}) \times T$, $\text{ratio} \in (0.5, 1)$ 。观察图9右边的人体侧面轮廓的腹部曲线, 可以发现, ratio 的取值大小与这条腹部曲线的开口大小呈正相关性。即曲线的开口越小, 则腹部的突出程度越明显, 此时 ratio 应占比更大, 反之则占比越小。

由于人体侧面轮廓线上所有点的坐标已知, 可以利用最小二乘法对这条曲线进行拟合, 该条腹部曲线可以采用二次函数表示。即

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (14)$$

式中, A 为二次项系数。根据二次函数的性质可知, $|A|$ 表示曲线的开口大小。因此, 可以将 ratio 表示为

$$\text{ratio} = \alpha |A| + \beta \quad (15)$$

可以通过线性回归方法求出式(15)中的 α 和 β 。具体训练方法如下:

假定共有 k 组训练人体数据, 对每一组数据的 ratio 按取值范围(0.5, 1)之间进行遍历, 选择能使该组腰围数据与实际测量值误差最小的 ratio 值并保存。即

$$\text{ratio} = \arg \min_i |L_{ac} - L_i|, \quad 0.5 \leq i < 1 \quad (16)$$

式中, L_{ac} 表示实际腰围, L_i 表示比例为 i 时的腰围预测值。接着, 利用线性回归方法, 将 k 组 ratio 和 $|A|$ 作为训练数据计算式(15)中的 α 和 β 。经本文

实验, α 和 β 的数值分别等于 -32.1727 和 0.7197 。

当有被测者需要测量腰围, 只需要利用式(14)拟合腹部曲线, 得到 $|A|$ 值, 再按式(15)得到 ratio 值, 最后利用式(13)即可得到被测者的腰围长度。

1.6 人体胸围及臀围测量

对于人体胸围及臀围的测量仍然采用本文提出的基于双椭圆曲线拟合的人体尺寸测量方法。在获取人体正面、侧面、背面图像后, 结合人体分割和关键点检测结果, 对胸围和臀围的测量位置进行大致定位, 从而获取宽度和厚度信息, 拟合整个胸围和臀围的测量曲线, 计算曲线长度。

1.6.1 人体胸围测量

根据国标 GB/T 16160-2008《服装用人体测量的部位与方法》中的定义, 胸围指被测者直立, 正常呼吸, 用软尺经肩胛骨、腋窝和乳头测量的最大水平围长。

如图12左图所示, 结合已经提取的人体轮廓图, 利用肘关节关键点 P_h 确定用于定位腋窝点的左右两边起始点 L_{start} 和 R_{start} , 利用髋关节关键点确定左右两边终止点 L_{end} 和 R_{end} 。利用式(1)~(4), 在左起始点 L_{start} 与左终止点 L_{end} 间计算轮廓线上各点的夹角, 将最小夹角对应的轮廓点作为左腋窝点 S_l , 用同样方法确定右腋窝点 S_r 。

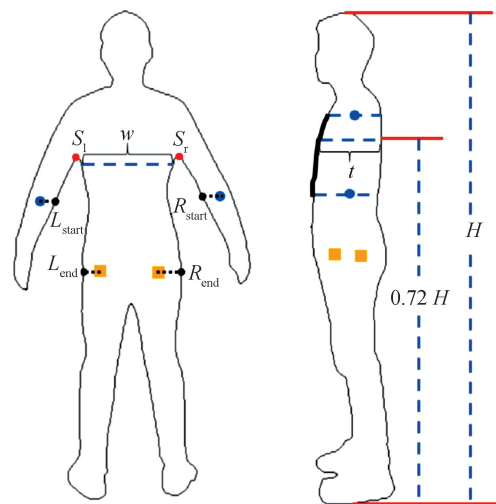


图12 胸宽及胸厚示意图

Fig. 12 Diagram of chest width and thickness

确定左右腋窝点 S_l 和 S_r 后, 沿垂直方向并向下 n 个像素(这里将 n 设置为5)。在此纵坐标下, 人体躯干轮廓线上两端横坐标的差值构成了人体胸部

宽度 w 。

对于人体胸厚,采取基于比例法的人体围度测量方法,人体各部位与身高的比例如表 1 所示。

表 1 人体各部位与身高的比例							
Table 1 The proportion of different body parts to height							
性别	身高	肩	胸部	腰部	臀部	大腿	膝盖
男	1.00	0.84	0.72	0.61	0.53	0.41	0.26
女	1.00	0.81	0.72	0.63	0.53	0.41	0.28

根据表 1,人体胸部到脚的长度占身高的 72%。图 12 右图所示为人体胸厚示意图,图中 H 表示此二值图中的人体身高,以轮廓中最低点向上取 $0.72H$ 的高度,设为 H_{chest} 。 H_{chest} 可大致认为是人体胸部的高度。为进一步提高精度,符合胸厚中“最突出部位厚度方向上的水平直线距离”这一定义,可以在 H_{chest} 上下依次取出共 n 个像素(这里将 n 设置为 10),在此区间内找到胸部最突出点定位胸厚,如图 13 所示。在此纵坐标下的两端横坐标的差值构成了人体胸部厚度 t 。

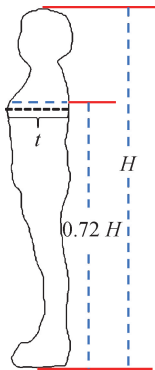


图 13 胸厚示意图

Fig. 13 Diagram of chest thickness

人体胸围拟合曲线大致与图 11 中人体腰围拟合曲线接近。图 12 右边人体侧面轮廓中加粗部分为人体胸部曲线,可以利用式(14)对其进行拟合, $|A|$ 表示曲线的开口大小。由于男女胸部曲线的差异问题,为了保证获取更准确有效的特征信息,利用线性回归方法分别对男性和女性数据训练出对应式(15)的 α 和 β 。经本文实验,若被测者为男性, α 和 β 的数值分别为 49.254 0 和 0.682 7;若被测者为女性, α 和 β 的数值分别为 14.418 5 和 0.664 7。

当有被测者需要测量胸围,只需要利用式(14)

拟合腹部曲线,得到 $|A|$ 值,再按式(15)得到 $ratio$ 值,最后利用式(13)即可得到被测者的胸围长度。

1.6.2 人体臀围测量

根据国标 GB /T 16160-2008《服装用人体测量的部位与方法》中的定义,臀围指被测者直立、在臀部最丰满处测量的臀部水平围长。

本文对臀部曲线的定义为,以髋关节关键点 P_h (图 9)水平高度为基准,上下依次共取出 n 个像素(这里将 n 设置为 20),处于 P_h 右边的所有点集合构成人体臀部曲线,如图 14 右图人体侧面轮廓加粗部分。

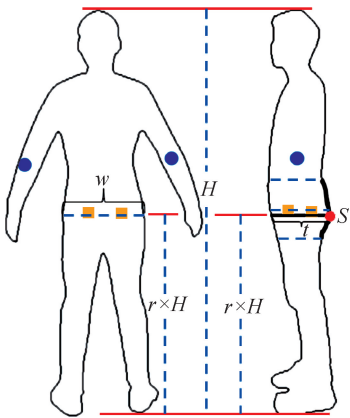


图 14 臀宽及胸厚示意图

Fig. 14 Diagram of hip width and thickness

与测量腰围和胸围不同,测量人体臀围时,需要先对臀厚进行测量。在已获得人体臀部曲线的点集中,选择最突出的一点,即水平位置最远的像素点 S 。设点 S 的纵坐标为 H_{hip} ,在 H_{hip} 上的两端横坐标的差值构成了人体臀部厚度 t ,臀部高度与身高的比例为

$$r = \frac{H_{\text{hip}}}{H} \tag{17}$$

因为臀宽没有较为明显的特征信息,依然使用比例法定位臀宽。为了定位更加准确,可以用式(17)所得的比例 r 代替表 1 中的臀部与身高比例值 0.53。在此纵坐标下,人体躯干轮廓线的两端横坐标的差值构成了人体臀部宽度 w 。

后面的过程与腰围测量类似,利用线性回归方法训练式(15)中的 α 和 β 。经本文实验, α 和 β 的数值分别为 - 1.499 0 和 0.676 2。最后利用式(13)—(15)得到被测者的臀围长度。

2 结果分析与评估

为验证本文方法的准确性和鲁棒性,所有被测者肩宽和腰围数据均由专业测量师手工测量,保证数据的真实性。被测者除衣着贴身、站姿如图2外,无其他要求。实验硬件包括1个高清摄像头(用于采集人体图像);1台装有Win10操作系统的计算机(用于图像处理),配置为i7-7700处理器、16 GB内存、NVIDIA GTX1060显卡。人体分割和人体关键点检测分别按第1.2和1.3节所述方法得到,主要对肩宽和腰围的测量结果进行分析。本文选用绝对误差对测量方法进行评估,即

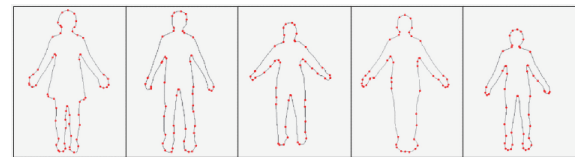
$$E = |T - L| \quad (18)$$

式中, E 表示绝对误差, T 表示真实测量值, L 表示利用本文测量方法得到的测量结果。所有真实测量值均为专业测量师手工测量获得。

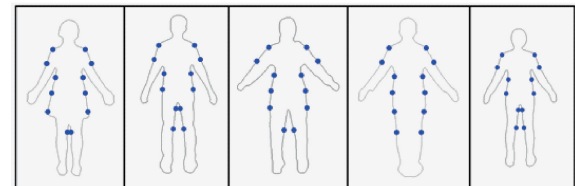
2.1 人体关键点检测

图15给出了5位被测者关键点检测的对比结果。5位被测者包括3位女性和2位男性。对5位被测者分别使用3种不同的关键点检测方法。分别是基于人体轮廓编码的人体关键点检测算法、基于人体比例的人体关键点检测算法和Lightweight OpenPose算法。从图15可以看出,基于人体轮廓编码的人体关键点检测算法得到的关键点较多,其中很多关键点是多余的,干扰较多;基于人体比例的人体关键点检测算法的针对性和准确率都有所提升,但精度依然不足,且无法对胸围等提供准确定位;而基于深度学习的Lightweight OpenPose算法可以较准确地提取人体关键点及骨架,以关键点确定范围,为后续的围度测量提供依据。

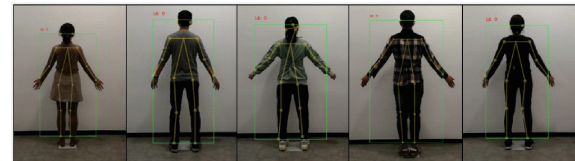
表2和表3(Osokin,2018)展示了OpenPose算法和Lightweight OpenPose算法的网络结果和计算量,其中AP(average precision)表示平均精度,GFLOPs(giga floating-point operations per second)表示运算量。OpenPose细化部分共5个阶段,从表2可以看出,经过1个细化阶段后,精度为43.6%,5个细化阶段后,精度为48.6%,性能提升不显著,但运算量增加了一倍。所以Lightweight OpenPose算法只使用一个细化阶段,在保证整体精度降低较少的情况下,对体量进行充分优化,GFLOPs仅为原来的1/15,运算量大幅减少。



(a) 基于人体轮廓编码的人体关键点检测结果



(b) 基于人体比例的人体关键点检测结果



(c) Lightweight OpenPose人体关键点检测结果

图15 人体关键点检测对比结果

Fig. 15 Comparison results of human key points detection ((a) human key point detection results based on human contour coding; (b) human key point detection results based on human proportion; (c) human key point detection results based on Lightweight OpenPose)

表2 OpenPose的网络结果和计算量

Table 2 Network results and computation of OpenPose

阶段	AP/%	GFLOPs	GFLOPs 累加值
骨干网络	n/a	37.8	37.8
con4_3	n/a	2.5	40.3
con4_4	n/a	0.6	40.9
初始阶段	35.5	2.2	43.1
细化阶段1	43.4	18.6	61.7
细化阶段2	46.2	18.6	80.3
细化阶段3	47.4	18.6	98.9
细化阶段4	48.1	18.6	117.5
细化阶段5	48.6	18.6	136.1

注:n/a表示不适用。

2.2 人体肩宽测量结果

图16给出了10位被测者肩部端点的确定结果。其中,第1行被测者编号为1—5,第2行被测者编号为6—10。在这10位被测者中,包括了人体肩部常见的4种类型,即平肩、宽肩、窄肩和溜肩。

表3 Lightweight OpenPose 的网络结果和计算量

Table 3 Network results and computation of Lightweight OpenPose			
阶段	AP/%	GFLOPs	GFLOPs 累加值
骨干网络	n/a	3.7	3.7
con4_3	n/a	0.3	4
con4_4	n/a	0.3	4.3
初始阶段	35	1.3	5.6
细化阶段1	41.4	3.4	9

注:n/a 表示不适用。

从图 16 可以看出,无论何种肩形,本文都能准确地获得肩部端点的位置。

表 4 为利用本文提出的肩宽测量方法得到的 10 位被测者的肩宽。可以看出,表 4 中最大误差值仅为 1.29 cm。

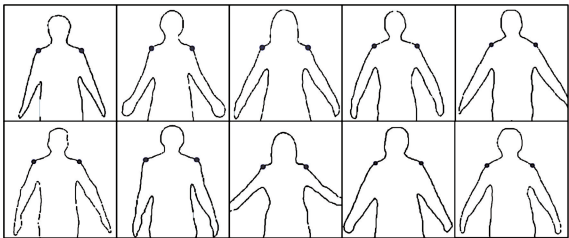


图 16 肩点定位结果

Fig. 16 The results of shoulder location

表 4 肩宽测量结果

Table 4 The measurement results of shoulder width					
/cm					
编号	性别	身高	实际肩宽	回归分析误差	本文误差
1	女	156	39	1.87	0.93
2	女	152	38	0.34	0.19
3	女	167	39	0.87	0.43
4	男	185	44	2.43	0.80
5	男	179	45	0.56	0.73
6	男	183	44	1.71	0.31
7	男	175	41	2.39	0.34
8	女	156	38	0.12	1.29
9	女	174	38	1.96	1.21
10	女	156	38	1.25	0.17

2.3 人体腰围测量结果

本文选取 6 位被测者进行人体围度测量实验,被测者侧面图像及二值图如图 17 所示。6 位被测者包括 3 位男性和 3 位女性,包含正常腹部和凸腹。

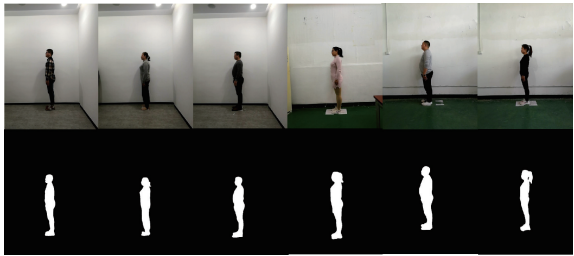


图 17 被测者侧面图像及二值图

Fig. 17 Side images and binary images of the subjects

利用本文提出的腰围测量法和直接椭圆拟合法,对这 6 位被测者的腰围进行计算,结果如表 5 所示。表 5 中 6 位被测者的腰围宽度和厚度均采用 1.5.1 小节的方法得到。从表 5 中 6 位被测者的测量误差来看,本文方法比采用直接椭圆拟合法明显要小,特别是对于 3 号和 5 号带有凸肚体型者,本文的测量误差比直接椭圆拟合法降低了约 1 cm 和 0.7 cm,可见本文方法测量结果更精确。

表 5 腰围测量结果

Table 5 The waist measurement results						
/cm						
编号	性别	身高	实际腰围	回归分析误差	椭圆拟合误差	本文误差
1	男	179	91	2.072 0	0.671 3	0.045 5
2	女	174	95	6.298 0	0.153 0	0.754 3
3	男	174	96	3.835 1	3.019 9	2.028 3
4	女	166	84	4.483 9	1.038 6	0.275 1
5	男	168	104	0.477 2	1.154 0	1.393 4
6	女	156	72	1.168 3	1.590 6	0.498 9

利用本文提出的胸围及臀围测量方法,同样对这 6 位被测者的胸围和臀围进行计算,结果如表 6 及表 7 所示。从表 6 及表 7 可见,本文方法在胸围及臀围的测量上依然能获得较为理想的效果,从 6 位被测者的测量误差来看,本文方法比采用直接椭圆拟合法也明显更小。

2.4 系统评估

对于肩宽测量,选择了 100 位被测者进行数据评估。其中,29 位男性被测者,71 位女性被测者,且被测者要求肩部图像较为清晰,无严重干扰。实验记录所有被测者的平均绝对误差以及误差在各区间的数量。将本文方法与基于消失点方法与比例法结

表 6 胸围测量结果
Table 6 The chest measurement results

编号	性别	身高	/cm			
			实际 胸围	回归分 析误差	椭圆拟 合误差	本文 误差
1	男	179	99	1.882 1	4.205 5	1.986 4
2	女	174	107	10.055 9	3.264 5	0.448 9
3	男	174	108	2.188 4	2.782 8	1.139 1
4	女	166	95	1.859 3	4.396 9	2.282 3
5	男	168	110	2.764 6	1.043 7	0.414 2
6	女	156	88	3.895 5	3.155 6	1.176 3

表 7 臀围测量结果
Table 7 The hip measurement results

编号	性别	身高	/cm			
			实际 臀围	回归分 析误差	椭圆拟 合误差	本文 误差
1	男	179	105	2.354 1	2.046 4	1.312 0
2	女	174	100	1.094 8	1.848 6	2.573 2
3	男	174	108	0.715 6	1.289 5	0.593 8
4	女	166	106	5.247 3	1.553 6	1.231 8
5	男	168	110	0.266 7	1.073 3	1.817 6
6	女	156	87	4.177 5	0.581 6	0.006 7

合的人体围度测量算法和回归分析方法进行对比,结果如表 8 所示。从表 8 可见,基于消失点方法与比例法结合的测量方法,因其未考虑实际肩宽测量方式,利用线段表示肩宽,误差较大且普遍偏小。与回归分析方法相比,本文方法整体好于基于回归分析的测量方法,平均误差及最大误差较小,且绝大部分被测者的肩宽平均绝对误差在 2 cm 以内,误差超过 3 cm 的数量明显低于回归分析方法,符合国家规定的测量标准。

表 8 肩宽测量评估结果
Table 8 Evaluation results of shoulder width measurement

测量方法	平均 误差	最大 误差	/cm			
			$E \leq 1$	$1 < E \leq 2$	$2 < E \leq 3$	$E > 3$
回归分析	1.97	5.71	21	29	23	27
比例法	4.29	8.22	3	7	13	77
本文	1.60	3.75	31	32	25	12

对于人体围度测量,选择了 132 位被测者进行数据评估,其中 48 位男性被测者,84 位女性被测者,且被测者要求衣物贴身,无严重干扰,胸部、腰部和臀部等特征信息可以清晰暴露。记录所有被测者的平均绝对误差以及误差在各区间的数量。对于腰围测量,将本文方法与回归分析方法、基于 SVM 的腰围估计方法和直接椭圆拟合方法进行对比,结果如表 9 所示。从表 9 可见,本文方法的平均误差较低,且误差低于 1 cm 和 2 cm 的数量明显多于其他方法,而误差超过 3 cm 的数量明显低于其他 3 种方法。绝大部分被测者的腰围平均绝对误差在 2 cm 以内,符合国家规定的测量标准。对于胸围及臀围测量,将本文方法与回归分析方法和直接椭圆拟合方法进行对比,结果如表 10 和表 11 所示。从表 10 和表 11 可见,本文方法的平均误差依然较低,

表 9 腰围测量评估结果
Table 9 Evaluation results of waist measurement

测量方法	平均 误差	最大 误差	/cm			
			$E \leq 1$	$1 < E \leq 2$	$2 < E \leq 3$	$E > 3$
回归分析	3.15	10.59	26	27	22	57
SVM 回归	3.06	9.17	32	21	28	51
椭圆拟合	1.44	3.19	49	44	34	5
本文	1.39	3.35	54	39	35	4

表 10 胸围测量评估结果
Table 10 Evaluation results of chest measurement

测量方法	平均 误差	最大 误差	/cm			
			$E \leq 1$	$1 < E \leq 2$	$2 < E \leq 3$	$E > 3$
回归分析	2.79	10.07	33	25	26	48
椭圆拟合	3.59	8.45	22	18	17	75
本文	2.68	6.89	31	27	30	44

表 11 臀围测量评估结果
Table 11 Evaluation results of hip measurement

测量方法	平均 误差	最大 误差	/cm			
			$E \leq 1$	$1 < E \leq 2$	$2 < E \leq 3$	$E > 3$
回归分析	2.53	7.90	36	27	24	45
椭圆拟合	2.71	9.77	26	29	26	51
本文	2.55	5.21	28	34	32	38

且误差在 3 cm 以内的数量低于其他两种方法。虽然在臀围测量评估中,回归分析的平均误差略低于本文方法,但在最大误差和误差在 3 cm 以内的数量的表现都不如本文方法,因此本文方法测量的稳定性更高。

3 结 论

本文提出了一种结合卷积神经网络与曲线拟合的人体尺寸测量方法,可以在复杂环境下准确快速地计算出人体尺寸。本文手工测量数据均为专业测量师手工测量,数据真实有效,且最终结果满足国家规定的测量标准。虽然本文方法的测量精度已经很高,但是依然存在一定误差,具有一定的局限性。一是人体分割和关键点检测对测量结果影响很大,图像质量差或人体轮廓不明显都会给计算造成困难;二是被测者肩部或腋下不清晰,女性长发影响胸厚,以及腹部、臀部含有衣物堆积等情况,都会给人体各围度测量带来不同程度误差,导致实验结果不够理想。未来研究方向主要集中在以下几个方面:1) 提高人像分割方法的鲁棒性,以过滤不属于人体的部分;2) 消除头发或其他异物对肩宽、胸围测量时的影响,提高肩部端点、胸部位置定位的准确率;3) 消除衣物堆积所带来的测量困难,对于胸部、腰部和臀部等轮廓特征不明显的个体,应结合其他人体数据进行估算。

参考文献 (References)

- Cao Z, Hidalgo G, Simon T, Wei S E and Sheikh Y. 2021. OpenPose: realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 43(1): 172-186 [DOI: 10.1109/TPAMI.2019.2929257]
- Chao H, Luximon A and Yeung K W. 2015. Functional 3D human model design: a pilot study based on surface anthropometry and infrared thermography. *Computer-Aided Design and Applications*, 12(4): 475-484 [DOI: 10.1080/16864360.2014.997644]
- Chen L C, Papandreou G, Kokkinos I, Murphy K and Yuille A L. 2018a. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 40(4): 834-848 [DOI: 10.1109/TPAMI.2017.2699184]
- Chen L C, Zhu Y K, Papandreou G, Schroff F and Adam H. 2018b. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation//*Proceedings of the 15th European Conference on Computer Vision*. Munich, Germany: Springer: 833-851 [DOI: 10.1007/978-3-030-01234-2_49]
- Crease R P. 2010. *Invasion of the full-body scanners*. Wall Street Journal Eastern Edition.
- Deng W Y. 2008. *Research on Method of 3D Personalized Human Body Modeling Based on Photos and Neural Network*. Hangzhou: Zhejiang University (邓卫燕. 2008. 基于用户照片和神经网络的三维个性化人体建模方法研究. 杭州: 浙江大学)
- Deng W Y, Lu G D, Wang J and Chen L. 2010. Extraction of feature parameters of three-dimensional human body based on image. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 44(5): 837-840 (邓卫燕, 陆国栋, 王进, 陈龙. 2010. 基于图像的三维人体特征参数提取方法. 浙江大学学报(工学版), 44(5): 837-840) [DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2010.05.001]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China and Standardization Administration of the People's Republic of China. 2008. GB/T 16160-2008 Location and method of anthropometric surveys for garments. Beijing: Standards Press of China: 1-5 (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2008. GB/T 16160-2008 服装用人体测量的部位与方法. 北京: 中国标准出版社: 1-5)
- Gittos M J R, Bezodis I N and Wilson C. 2009. An image-based approach to obtaining anthropometric measurements for inertia modeling. *Journal of Applied Biomechanics*, 25(3): 265-270 [DOI: 10.1123/jab.25.3.265]
- Huang X L. 2009. *Research on Measurement of Young Female's Bodies Based on Digital Images*. Suzhou: Soochow University (黄秀丽. 2009. 基于数字图像的青年女体测量系统研究. 苏州: 苏州大学)
- Jiang L Y, Yao J, Li B P, Fang F, Zhang Q and Meng M Q H. 2012. Automatic body feature extraction from front and side images. *Journal of Software Engineering and Applications*, 5(12B): 94-100 [DOI: 10.4236/jsea.2012.512B019]
- Jones P R M, West G M, Harris D H and Read J B. 1989. The loughborough anthropometric shadow scanner (LASS). *Endeavour*, 13(4): 162-168 [DOI: 10.1016/S0160-9327(89)80004-3]
- Lin Y L and Wang M J J. 2011. Automated body feature extraction from 2D images. *Expert Systems with Applications*, 38(3): 2585-2591 [DOI: 10.1016/j.eswa.2010.08.048]
- Lin Y L and Wang M J J. 2012. Constructing 3D human model from front and side images. *Expert Systems with Applications*, 39(5): 5012-5018 [DOI: 10.1016/j.eswa.2011.10.011]
- Meadows D M, Johnson W O and Allen J B. 1970. Generation of surface contours by moiré patterns. *Applied Optics*, 9(4): 942-947 [DOI: 10.1364/AO.9.000942]
- Osokin D. 2018. Real-time 2D multi-person pose estimation on CPU: lightweight OpenPose//*Proceedings of the 8th International Confer-*

- ence on Pattern Recognition Applications and Methods. Prague, Czech; SciTePress
- Pan L, Wang J, Yao T and Yu Z J. 2013. Comparison of contact with non-contact measuring data in garment. *Journal of Dalian Polytechnic University*, 32(2): 140-142 (潘力, 王军, 姚彤, 于佐君. 2013. 接触与非接触式人体测量数据比较. *大连工业大学学报*, 32(2): 140-142) [DOI: 1674-1404(2013)02-014003]
- Qi X and Ji Z P. 2019. Size measurement and fitting based on 3D human body model. *Modern Computer*, (7): 74-81 (齐啸, 计忠平. 2019. 基于三维人体模型的尺寸测量和拟合. *现代计算机*, (7): 74-81) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-1423.2019.07.016]
- Seo D, Kang E, Kim Y M, Kim S Y, Oh I S and Kim M G. 2020. SVM-based waist circumference estimation using Kinect. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 191: #105418 [DOI: 10.1016/j.cmpb.2020.105418]
- Wang L. 2018. *Research on Non-Contacting Human Body Measurement and Modeling Technology Based on Image*. Xi'an: Xi'an Polytechnic University (王力. 2018. 基于图像的非接触式人体测量与建模技术研究. 西安: 西安工程大学)
- Xu F, Zhang H and Zheng R. 2006. Prediction for bust girth using regression analysis from photographic and anthropometric data. *Journal of Textile Research*, 27(8): 49-52 (徐枫, 张浩, 郑嵘. 2006. 照相测量中胸围拟合的回归分析. *纺织学报*, 27(8): 49-52) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-9721.2006.08.014]
- Xu H M, Xia L K, Yang Q, Liu Y J, Tang S Y and Yang J. 2017. Human featured automatic measurement system. *Journal of Image and Graphics*, 22(2): 225-231 (徐慧明, 夏立坤, 杨琪, 刘宇杰, 唐宋元, 杨健. 2017. 新型人体参数自动测量系统. *中国图象图形学报*, 22(2): 225-231) [DOI: 10.11834/jig.20170210]
- Yan L L and Liang J F. 2008. The quadratic Bezier curves that shape can adjust. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 31(1): 93-97 (严兰兰, 梁炯丰. 2008. 形状可调二次Bezier曲线. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 31(1): 93-97) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-3504.2008.01.019]
- Zhao Y B, Zhu W M and Wei Y H. 2017. Human body data extraction system based on personalized customization. *Shanghai Textile Science and Technology*, 45(11): 9-10, 62 (赵雅彬, 朱伟明, 卫杨红. 2017. 服装定制人体测量技术的研究. *上海纺织科技*, 45(11): 9-10, 62) [DOI: 10.16549/j.cnki.issn.1001-2044.2017.11.003]

作者简介

马燕,女,教授,硕士生导师,主要研究方向为图像处理和模式识别。E-mail: ma-yan@shnu.edu.cn

殷志昂,男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理和模式识别。E-mail: yinzhiang0407@sina.com

黄慧,女,副教授,主要研究方向为图像处理和模式识别。E-mail: huanghui@shnu.edu.cn

张玉萍,女,教授,主要研究方向为计算机辅助设计。E-mail: yp_zhang@shnu.edu.cn