

·综述·

基于医学影像的脂肪组织分割与定量方法研究

王志明¹,周鸿宇²,瞿少成¹

(1.华中师范大学物理科学与技术学院电子信息系,湖北 武汉 430000;

2.中国科学院深圳先进技术研究院生物医学与健康工程研究所,广东 深圳 518000)

摘要:随着社会发展和生活水平的逐步提高,超重和肥胖已经成为全球性的问题,由肥胖所引起的代谢类疾病以及癌症已经严重威胁全球人类健康。肥胖是由于人体摄入的过量能量以甘油三酯的形式存储在脂肪细胞中引起的。大量医学证明,人体不同部位的脂肪组织具有不同的生理特点,因此对体内脂肪组织进行分割与定量具有重要的临床意义。医学影像技术的发展可以对人体总脂肪组织(TAT)无创成像,并且通过图像分割技术能实现总脂肪组织的分割。本文主要综述近年来国内外脂肪组织分割与定量的相关研究,旨在为从事肥胖或脂肪组织图像分割的研究人员提供新的思路与借鉴。

关键词:脂肪组织;计算机断层扫描;磁共振成像;图像分割

中图分类号:TP391

文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.1006-1959.2021.11.009

文章编号:1006-1959(2021)11-0028-04

Research on Adipose Tissue Segmentation and Quantification Method Based on Medical Imaging

WANG Zhi-ming¹,ZHOU Hong-yu²,QU Shao-cheng¹(1.Department of Electronic Information,College of Physical Science and Technology,Central China Normal University,
Wuhan 430000,Hubei,China;2.Institute of Biomedicine and Health Engineering,Shenzhen Institute of Advanced Technology,Chinese Academy of Sciences,
Shenzhen 518000,Guangdong,China)

Abstract: With the development of society and the gradual improvement of living standards, overweight and obesity have become global problems. Metabolic diseases and cancers caused by obesity have seriously threatened global human health. Obesity is caused by the body's excessive intake of energy stored in fat cells in the form of triglycerides. A large number of medical proofs have shown that adipose tissue in different parts of the human body has different physiological characteristics, so segmentation and quantification of adipose tissue in the body has important clinical significance. The development of medical imaging technology can non-invasively image human body total adipose tissue (TAT), and segmentation of total adipose tissue can be achieved through image segmentation technology. This article mainly reviews the domestic and foreign research on adipose tissue segmentation and quantification in recent years, and aims to provide new ideas and references for researchers engaged in obesity or adipose tissue image segmentation.

Key words: Adipose tissue; Computed tomography; Magnetic resonance imaging; Image segmentation

在全球范围内,肥胖(obesity)已经成为普遍流行的公共卫生问题之一^[1]。在未来几年内,肥胖及其相关的心血管疾病和糖尿病等代谢类疾病以及癌症将持续威胁人类健康^[2,3]。人体吸收能量过剩引起的脂肪组织含量增加是导致肥胖的直接原因。相关研究表明^[4,5],不同的脂肪组织可能具有不同的生理或病理相关性,从而造成不同的身体疾病。因此,不同脂肪组织的精确测量能够实现肥胖类相关疾病的风险预测,从而避免因肥胖导致更严重的健康问题。近年来,随着各种医学影像技术的进步,通过计算机断层扫描(computed tomography, CT)技术和磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)技术可以实现全身组织成分的定量分析。本文深入剖析国内外医学影像上人体脂肪组织图像分割的研究进展,旨在为未来人体脂肪组织分割与定量的研究应用提供理论基础。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:61673190、61901462)

作者简介:王志明(1995.11-),男,河南林州人,硕士研究生,主要从事人工智能、图像处理技术及信号处理方向的研究

通讯作者:瞿少成(1971.1-),男,湖北武汉人,博士,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理与非线性控制技术等方面的研究

1 图像分割的基本理念

图像分割作为计算机视觉研究领域中的一个经典难题,已经成为图像处理领域极为关注的热点之一。所谓图像分割,就是将目标图像分成若干个独立的、具有特定性质的区域并突出感兴趣区域的图像处理技术。近年来,图像分割技术在医学图像上的应用层出不穷,极大地促进了医疗水平的发展^[6]。

医学图像处理的对象是各种不同成像机理的医学影像,临床广泛使用的医学成像种类主要有超声波成像(ultrasonic imaging, UI)、正电子发射断层扫描(positron emission tomography, PET)、CT和MRI四类。其中,CT与MRI已经被用于人体全身组织成分(包括脂肪组织)的定量分析中^[7]。预处理是脂肪组织图像分割前期进行的准备工作,主要目的是归一化、降噪、提高对比度等,进而为搭建图像分割模型提供必要条件^[8]。

人体总脂肪组织(total adipose tissue, TAT)可以分割为内脂肪组织(internal adipose tissue, IAT)与皮下脂肪组织(subcutaneous adipose tissue, SAT)。IAT进一步可被分割为内脏脂肪组织(visceral adi-

pose tissue, VAT)、棕色脂肪(brown adipose tissue, BAT)、骨髓(bone marrow, BM)和肌肉间/内脂肪组织(interior intra-muscular adipose tissues, IMAT)^[9, 10]等。不同的脂肪组织有不同的生理特性及生活功能,与人体健康息息相关。利用医学影像技术,对脂肪组织图像精准分割并定量分析可以预测肥胖类相关疾病风险,极大减少由肥胖导致的严重健康问题。

2 CT 和 MRI 图像中的脂肪组织信号

2.1 CT 图像中的脂肪组织信号 CT 图像是利用 X 射线对人体进行断层扫描后,将探测器接收的模拟信号经模数转换后变为数字信号,通过电子计算机计算出每一个像素的衰减系数之后,经过图像重建而得到^[11]。利用各组织的固有信号强度,可以将脂肪组织与其他解剖结构区域进行分割。组织信号强度——CT 值,是各组织与 X 射线衰减系数相当的对值,单位一般为 HU。在校准的 CT 系统中,纯水的 CT 值为 0 HU;将背景、肺部与肠道中的空气排除在外,脂肪组织是人体内唯一 CT 值为负值的组织,而其他非脂肪组织均为正值。另外,在不同的场景中,脂肪组织 CT 阈值略有不同^[12]。脂肪组织的阈值差异可能是系统校准误差或者获取 CT 数据方法(如 X 射线剂量设置与层厚设置等)的不同造成的。

2.2 MRI 图像中的脂肪组织信号 MRI 图像中脂肪组织信号的产生与 CT 图像相比有较大差异。MRI 提供多种脉冲序列,包括 T₁ 和 T₂ 加权成像、化学(频率)选择性成像(如水抑制)和化学位移编码成像等,以产生脂肪和非脂肪组织之间的信号对比^[13]。MRI 图像中脂肪组织信号没有共同的阈值范围,这主要取决于获取数据的特定脉冲序列,并且受诸如射频发射增益、射频接收线圈等硬件设备的影响。

然而, MRI 成像容易受到 B₁ 磁场不均匀性的影响,这有可能导致组织信号对比度不均匀。在 3.0T 及更高的磁场强度中,磁场的均匀性会因磁化率和介电效应而加剧,尤其是在腹部和骨盆区域^[14]。随之引入的多通道射频传输技术在一定程度上降低了磁场不均性的影响^[15]。近年来,为了克服磁场强度不均匀性的缺点,基于多回波化学位移编码的水-脂成像的质子密度脂肪分数(PDFF)图像被用于脂肪组织分割与定量^[16]。利用两个分离的图像数据集(水图和脂肪图)比值,PDFF 图像有效地消除了前述磁场不均性的影响^[17]。不仅如此,基于梯度-回波脉冲序列进行化学位移编码的水-脂图像,可以使用其他参数图像(T₂^{*} 图等)信息辅助脂肪组织图像分割。总之,基于化学位移编码的 PDFF 图像在脂肪组织分割与定量中的应用愈加广泛。

3 脂肪组织分割的现有方法

从目前现有的分割方法来看,手动、半自动或者

全自动的脂肪组织分割方法主要有基于信号强度的直方图阈值法、边缘检测法、区域增长法、基于多模板(multi-atlas)的图像分割法以及深度学习方法。多数分割算法的成功运用从根本上取决于脂肪组织的成像机理,不同的成像机理使得脂肪组织图像特征在统计学上与体内其他组织有所不同。因此,对基于不同成像技术的脂肪组织图像分割要选取合适的分割方法,才能事半功倍。

3.1 基于信号强度的直方图阈值法 基于信号强度的直方图阈值法核心在于从双模态或多模态直方图中选择一个脂肪组织与其他组织完全或部分分离的阈值。基于 CT 数据脂肪图像分割,阈值采用组织信号 CT 值;基于 MRI 数据的脂肪图像,阈值可以选择原始信号强度、弛豫时间测量(如 T₁、T₂ 或 T₂^{*})和其他定量指标(如 PDFF)等。该方法的过程主要包含以下几个步骤:首先经过预处理去除图像信息中的噪声(如图像背景与肠道中的空气),并将图像转换为二值化图像;之后经过偏置场校正算法,使用模糊 C 均值(fuzzy C-means, FCM)或 K 均值(K-means, KM)与直方图阈值法结合从而将目标图像分割为不同的脂肪组织图像。曹鸿吉等^[18]提出改进的 K-means 算法实现了脂肪区域与非脂肪区域以及 SAT 与 VAT 的自动分割。Valentinitsch AC 等^[19]基于多参数方法(水图像,脂肪图像以及“水+脂肪”图像等)和 K-means 聚类算法实现了 IMAT 的分割。

3.2 边缘检测法 边缘检测法主要包含分水岭法、图形切割法、水平集算法以及形态统计模型等。该类方法通常通过预处理将图像目标区域二值化,以确定目标区域的内外边界。之后采用形态学(如膨胀、侵蚀、Open 或 Close)对目标区域及边界进一步细化操作。另外,采用空间笛卡尔坐标到极坐标的转换可以方便地进行边缘检测。Wald D 等^[20]采用形态统计模型实现全身脂肪组织分割, Sadananthan SA 等^[21]利用图割法和水平集方法分割浅层和深层 SAT,并分析与半自动分割法的相关性。

3.3 区域增长法 区域增长法是图像分割经常用到的分割方法之一。该方法首先识别脂肪组织中单个或多个初始种子体素,然后相邻体素会随着一定范围内信号强度的变化自动地标记并添加到不断增长的目标区域中;最后通常采用几何模型去除脊柱周围区域,以剔除骨髓脂肪组织。有相应的图像处理软件可辅助此类方法的脂肪图像分割^[22-24],例如 Matlab、AVW 和 ITK-SNAP 等。Nemoto M 等^[25]采用形态学和区域生长等算法实现骨骼、脂肪与肌肉的分割,并用手动分割验证结果的准确性。

3.4 基于多模板(multi-atlas)的图像分割法 多模板(multi-atlas)的图像分割法是一种全自动图像分割

的方法,前提条件是创建一个手工分割的真值模板集。基于多模板的图像分割已经成为一个公认的概念,被广泛应用于脑结构分割,将此类方法运用于脂肪组织的分割是一种逻辑意义上的扩展。首先,要分割的目标数据从多模板集中匹配到一个可比数据集,匹配的模板集可以根据人体测量数据进行选择。之后计算出目标区域与模板之间的非刚性配准以及由此产生的形变场,并将该形变应用于模板集中手工分割的组织分类标签。最后与目标数据相对应的变形标签就是自动分割的结果,该过程可以通过迭代实现分割结果的优化。Joshi AA 等^[26]提出的基于 Atals 方法实现全身的 SAT 与 VAT 分割。

3.5 深度学习 近年来,深度学习(deep learning)在机器视觉领域中迅猛发展,并成功应用于医学图像分割的研究中。与传统方法不同的是,深度学习模拟人脑视觉激励模式建立多参数的网络学习模型,通过大量数据加以训练,使得模型能够提取数据各个层次的抽象特征并加以分析,从而自动的实现目标数据的学习。深度卷积神经网络(convolutional neural network,CNN)是深度学习的核心,在图像分割任务中诞生了很多经典模型,包括 U-Net、LeNet、AlexNet、GoogleNet、VGG、ResNet ST^[27]等以及这些模型的改进与变形。Shen N 等^[28]利用深度学习 U-net 网络实现对 MRI 腹部 VAT 与 SAT 的分割。Langner T 等^[29]基于全连接网络实现多参数水-脂 MRI 图像 SAT 与 VAT 的分割。

目前,基于无监督性网络、对抗性网络^[30]以及 3D(three dimensional)学习网络是脂肪组织分割的最新研究方向,期待它们在脂肪组织分割中取得突破性的进展。

4 总结与展望

脂肪组织的分割与定量分析,已经成为人体组织成分与肥胖研究的重要组成部分。前期脂肪组织图像手动分割一直被认为是极为耗时费力的任务,尤其是涉及数百名受试者的纵向研究中,每名受试者可能有上百张的图像切片。随后许多半自动和全自动分割方法被提出,并成功应用于脂肪组织分割领域中。但是这些方法可能存在的一个问题是,多数分割算法的提出者对图像处理领域有很深的造诣,但他们可能对影像学技术没有深入的研究,这就使得前端的成像技术与后期图像处理技术无法真正融合,人体脂肪组织分割的结果不能达到统一标准。科学界应该促进脂肪组织分割算法的广泛可用性,制定相应的策略,使成像协议、数据采集与图像处理等跨领域的研究人员更加统一标准化,便于海内外从事脂肪或肥胖的研究人员成果共享、共同进步。

近年来,采用正电子发射计算机断层扫描(PET-

CT)和正电子发射磁共振成像(PET-MR)等组合方式较为流行,新成像技术的发展将为脂肪组织分割提供新的研究思路及领域。相关研究表明,人体 BAT 与新陈代谢、能量调节以及肥胖等生理特性息息相关,利用 PET-CT 或者 PET-MR 对人体 BAT 可进行无创性成像,从而开辟了对 BAT 研究的新领域。

总之,相关科研工作人员可紧密结合当前科研前沿与社会发展,对脂肪组织以及肥胖相关热点问题进行深入的研究,拓展此领域的广度与深度,推动未来医疗技术的进步。

参考文献:

- [1]Upadhyay J,Farr O,Perakakis N,et al.Obesity as a disease [J]. Medical Clinics,2018,102(1):13-33.
- [2]Messiah SE,Vidot DC,Somarriva G,et al.Obesity and cardiometabolic disease risk factors among US adolescents with disabilities[J]. World Journal of Diabetes,2015,6(1):200-207.
- [3]Chadid S,Singer MR,Kreger BE,et al.Midlife weight gain is a risk factor for obesity-related cancer[J]. British Journal of Cancer, 2018,118(12):1665-1671.
- [4]Bizino MB,Sala ML,de Heer P,et al.MR of multi-organ involvement in the metabolic syndrome [J]. Magnetic Resonance Imaging Clinics,2015,23(1):41-58.
- [5]刘慧,白冰.血管周围脂肪组织与心血管疾病的关系[J]. 心血管病学进展,2018,39(4):640-643.
- [6]潘晓航.医学图像分割方法[J]. 电子技术与软件工程,2018 (11):84-85.
- [7]Graffy PM,Pickhardt PJ.Quantification of hepatic and visceral fat by CT and MR imaging:relevance to the obesity epidemic, metabolic syndrome and NAFLD [J]. The British Journal of Radiology,2016,89(1062):20151024.
- [8]庄俐,张惠莉,张瑞霞.棕色脂肪形成的内分泌及环境影响因素研究[J]. 医学信息,2019,32(4):36-38.
- [9]Pham TT,Ivaska KK,Hannukainen JC,et al.Human Bone Marrow Adipose Tissue is a Metabolically Active and Insulin-Sensitive Distinct Fat Depot [J]. Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism,2020,105(7):1-11.
- [10]Borga M,West J,Bell JD,et al.Advanced body composition assessment:from body mass index to body composition profiling [J]. BMJ Open Access,2018,66(5):887-895.
- [11]张守华,丁兰洲,常琼,等.能谱 CT 成像技术指标与脂肪密度模型相关性[J]. 中华实用诊断与治疗杂志,2017,31(2):153-155.
- [12]王萍,唐光才,舒健,等.非酒精性脂肪肝病/脾 CT 值与血脂的关系研究[J]. 西南医科大学学报,2018,41(1):67-70.
- [13]Hu HH,Kan HE.Quantitative proton MR techniques for measuring fat[J]. Nmr in Bio-medicine,2013,26(12):1609-1629.
- [14]Fritz S.Whole-body MRI at high field:technical limits and clinical potential[J]. European Radiology,2005,15(5):946-959.
- [15]骆睿,胡小情,陈潇,等.磁共振多通道射频接收线圈性能评估[J]. 集成技术,2016,5(3):79-83.

(下转第 39 页)

(上接第30页)

[16]祝乐群,李冠武,施丹,等.多回波化学位移编码水/脂MRI评估骨髓脂肪的可行性研究[J].实用放射学杂志,2018,34(2):283-286.

[17]Cheng C,Zou C,Liang C,et al.Fat-water separation using a region-growing algorithm with self-feeding phasor estimation[J].Magnetic Resonance in Medicine,2017,77(6):2390-2401.

[18]曹鸿吉,盛斌,吴雯,等.基于改进K-Means的腹内脂肪自动定量检测算法[J].计算机辅助设计与图形学学报,2017,29(4):575-583.

[19]Valentinitsch AC,Karampinos D,Alizai H,et al.Automated unsupervised multi-parametric classification of adipose tissue depots in skeletal muscle[J].Journal of Magnetic Resonance Imaging,2013,37(4):917-927.

[20]Wald D,Teucher B,Dinkel J,et al.Automatic quantification of subcutaneous and visceral adipose tissue from whole-body magnetic resonance images suitable for large cohort studies[J].Journal of Magnetic Resonance Imaging,2012,36(6):1421-1434.

[21]Sadanathan SA,Prakash B,Leow KS,et al.Automated segmentation of visceral and subcutaneous (deep and superficial) adipose tissues in normal and overweight men[J].Journal of Magnetic Resonance Imaging,2015,41(4):924-934.

[22]陈春林.基于Micro-CT的脂肪测量软件设计开发[D].西安电子科技大学,2014.

[23]刘淑霞,王小红,朱春,等.腹部脂肪面积定量CT测定及其与肥胖并发症关系的临床研究[J].影像研究与医学应用,2018(1):176-177.

[24]晏乘曦,王玲,姚丁华,等.CT定量测量腕部骨折患者腕部肌肉、脂肪面积及CT值的可重复性、可信度分析[J].山东医药,2018,58(16):58-60.

[25]Nemoto M,Yeernuer T,Masutani Y,et al.Development of automatic visceral fat volume calculation software for CT volume data[J].Journal of Obesity,2014(2014):495084.

[26]Joshi AA,Hu HH,Richard M,et al.Automatic intra-subject registration-based segmentation of abdominal fat from water-fat MRI[J].Journal of Magnetic Resonance Imaging,2013,37(2):423-430.

[27]Krishna ST,Kalluri HK.Deep learning and transfer learning approaches for image classification[J].International Journal of Recent Technology and Engineering(IJRTE),2019,7(5S4):427-432.

[28]Shen N,Li X,Zheng S,et al.Automated and accurate quantification of subcutaneous and visceral adipose tissue from magnetic resonance imaging based on machine learning[J].Magnetic Resonance Imaging,2019(64):28-36.

[29]Langner T,Hedstrom A,Morwald K,et al.Fully convolutional networks for automated segmentation of abdominal adipose tissue depots in multicenter water-fat MRI[J].Magnetic Resonance in Medicine,2019,81(4):2736-2745.

[30]张嘉祺,赵晓丽,董晓亚,张翔.面向图像语义分割的生成对抗网络模型[J].传感器与微系统,2019,38(8):50-53.

收稿日期:2020-11-16;修回日期:2020-11-24

编辑/成森