

中图分类号: TP399 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2022)03-0655-17

论文引用格式: Jiang X, Yuan Y X, Wang Y P, Xiao Z X, Zhu M L, Chen Z H, Liu T M and Shen D G. 2022. A 20-year retrospect and prospect of medical imaging artificial intelligence in China. Journal of Image and Graphics 27(03):0655-0671(蒋希,袁奕萱,王雅萍,肖振祥,朱美芦,陈泽华,刘天明,沈定刚. 2022. 中国医学影像人工智能20年回顾和展望. 中国图象图形学报 27(03):0655-0671) [DOI: 10.11834/jig.211162]

中国医学影像人工智能 20 年回顾和展望

蒋希¹, 袁奕萱^{2,3}, 王雅萍⁴, 肖振祥¹, 朱美芦², 陈泽华⁴, 刘天明^{5*}, 沈定刚^{6,7*}

1. 电子科技大学生命科学与技术学院生物医学工程系, 成都 611731; 2. 香港城市大学电机工程系, 香港 999077;
3. 香港城市大学深圳研究院, 深圳 518057; 4. 郑州大学信息工程学院, 郑州 450001;
5. 美国佐治亚大学计算机科学系, 佐治亚雅典 30602, 美国; 6. 上海科技大学生物医学工程学院, 上海 201210;
7. 上海联影智能医疗科技有限公司, 上海 200230

摘要: 在过去 20 年里, 医学影像技术、人工智能技术以及这两项技术相结合的临床应用都取得了长足发展。中国在该领域的研究也取得卓越成就, 并且在全世界范围内的贡献比例仍在逐步提高。为了记录和总结国内同行的科研成果, 本文对中国医学影像人工智能过去 20 年的发展历程进行回顾和展望。重点分析了国内同行在公认的医学影像人工智能领域的国际顶级刊物 Medical Image Analysis (MedIA) 和 IEEE Transactions on Medical Imaging (TMI) 以及顶级会议 Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) 发表的论文, 定量统计了论文发表数量、作者身份、发表单位、作者合作链、关键词和被引次数等信息。同时总结了近 20 年中国医学影像人工智能发展进程中的重要事件, 包括举办的医学影像人工智能知名国际和国内会议、《中国医学影像 AI 白皮书》的发布以及国内同行在 COVID-19 (corona virus disease 2019) 期间的贡献, 最后展望了中国医学影像人工智能领域未来的发展趋势。上述统计结果系统性地反映了在过去 20 年里中国在医学影像人工智能领域所取得的突出成绩。许多研究论文的作者将数据和源代码公开给全世界共享, 为全世界医学影像人工智能的科研和教学做出了杰出贡献。通过本文中国医学影像人工智能领域的发展历程, 可为医学影像人工智能同行, 尤其为新一代的学者和学生提供科研和教学参考, 也为继续促进和加强国际合作交流, 为全世界该领域进一步的蓬勃发展做出重要贡献。

关键词: 医学影像; 人工智能 (AI); 发展历程; 国际合作; 定量统计

A 20 – year retrospect and prospect of medical imaging artificial intelligence in China

Jiang Xi¹, Yuan Yixuan^{2,3}, Wang Yaping⁴, Xiao Zhenxiang¹, Zhu Meilu², Chen Zehua⁴,
Liu Tianming^{5*}, Shen Dinggang^{6,7*}

1. Department of Biomedical Engineering, School of Life Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. Department of Electrical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; 3. City University of Hong Kong Shenzhen Research Institute, Shenzhen 518057, China;
4. School of Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 5. Department of Computer Science,

收稿日期: 2021-12-03; 修回日期: 2022-01-05; 预印本日期: 2022-01-12

所有作者为共同一作, * 通信作者: 刘天明 tliu@cs.uga.edu; 沈定刚 dgshen@shanghaitech.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61976045, 62001410, U1504606, 62131015); 四川省科技计划基金项目 (2021YJ0247); 中国博士后科学基金项目 (2016T90679); 河南省高等学校重点科研项目计划 (20A510009)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (61976045, 62001410, U1504606, 62131015); Sichuan Science and Technology Program (2021YJ0247); China Postdoctoral Science Foundation (2016T90679); Key Research Projects of Henan Higher Education Institutions (20A510009)

University of Georgia, Athens GA 30602, USA; 6. School of Biomedical Engineering, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

7. Department of Research and Development, Shanghai United Imaging Intelligence Co., Ltd., Shanghai 200230, China

Abstract: The development of medical imaging, artificial intelligence (AI) and clinical applications derived from AI-based medical imaging has been recognized in past two decades. The improvement and optimization of AI-based technologies have been significantly applied to various of clinical scenarios to strengthen the capability and accuracy of diagnosis and treatment. Nowadays, China has been playing a major role and making increasing contributions in the field of AI-based medical imaging. More worldwide researchers in the context of AI-based medical imaging have contributed to universities and institutions in China. The number of research papers published by Chinese scholars in top international journals and conferences like AI-based medical imaging has dramatically increased annually. Some AI-based medical imaging international conferences and summits have been successfully held in China. There is an increasing number of traditional medical, internet technology and AI enterprises contributing to the research and development of AI-based medical imaging products. More collaborative medical research projects have been implemented for AI-based medical imaging. The Chinese administrations have also planned relevant policies and issued strategic plans for AI-based medical imaging, and included the intelligent medical care as one of the key tasks for the development of new generation of AI in China in 2030. In order to review China's contribution for AI-based medical imaging, we conducted a 20 years review for AI-based medical imaging forecasting in China. Specifically, we summarized all papers published by Chinese scholars in the top AI-based medical imaging journals and conferences including Medical Image Analysis (MedIA), IEEE Transactions on Medical Imaging (TMI), and Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention (MICCAI) in the past 20 years. The detailed quantitative metrics like the number of published papers, authorship, affiliations, author's cooperation network, keywords, and the number of citations were critically reviewed. Meanwhile, we briefly summarized some milestone events of AI-based medical imaging in China, including the renowned international and domestic conferences in AI-based medical imaging held in China, the release of the "The White Paper on Medical Imaging Artificial Intelligence in China", as well as China's contributions during the COVID-19 (corona virus disease 2019) pandemic. For instance, the total number of published papers in the past 20 years and the proportion of published papers in 2021 by Chinese affiliations have reached to 333 and 37.29% in MedIA, 601 and 42.26% in TMI, and 985 and 44.26% in MICCAI. In those published papers by Chinese institutes, the proportion of the first and the corresponding Chinese authors is 71.97% in MedIA, 69.64% in TMI, and 77.4% in MICCAI in 2021. The average number of citations per paper by Chinese institutes is 22, 28, and 9 in MedIA, TMI, and MICCAI, respectively. In all published papers by Chinese institutes, the predominant research methods were transformed from conventional approaches to sparse representation in 2012, and to deep learning in 2017, which were close to the latest developmental trend of AI technologies. Besides conventional applications such as medical image registration, segmentation, reconstruction and computer-aided diagnosis, etc., the published papers also focused on healthcare quick response in terms of COVID-19 pandemic. The China-derived data and source codes have been sharing in the global context to facilitate worldwide AI-based medical imaging research and education. Our analysis could provide a reference for international scientific research and education for newly Chinese scholars and students based on the growth of the global AI-based medical imaging. Finally, we promoted technology forecasting on AI-based medical imaging as mentioned below. First, strengthen the capability of deep learning for AI-based medical imaging further, including optimal and efficient deep learning, generalizable deep learning, explainable deep learning, fair deep learning, and responsible and trustworthy deep learning. Next, improve the availability and sharing of high-quality and benchmarked medical imaging datasets in the context of AI-based medical imaging development, validation, and dissemination are harnessed to reveal the key challenges in both basic scientific research and clinical applications. Third, focus on the multi-center and multi-modal medical imaging data acquisition and fusion, as well as integration with natural language such as diagnosis report. Fourth, awake doctors' intervention further to realize the clinical applications of AI-based medical imaging. Finally, conduct talent training, international collaboration, as well as sharing of open source data and codes for worldwide development of AI-based medical imaging.

Key words: medical imaging; artificial intelligence (AI); developmental history; international cooperation; quantitative statistics

0 引言

在过去20年里,医学影像技术、人工智能技术以及这两项技术相结合的临床应用在全世界范围内得到了快速长足的发展。随着医学影像数据的扩增、人工智能算法模型的改进优化以及软硬件设备的提升,越来越多的人工智能技术开始应用并落地于临床医学影像场景中,从而帮助医生提高诊疗效率和诊疗精度,缩短患者就诊等待时间,降低患者就医成本等(Chinese Innovative Alliance of Industry, Education, Research and Application of Artificial Intelligence for Medical Imaging 2019)。

中国医学影像人工智能领域在这20年同样取得了突飞猛进的发展,在全世界范围内扮演了日益重要的角色。在科学研究方面,吸引了众多业内顶尖学者投身医学影像人工智能领域,在医学影像人工智能领域的国际顶级刊物及顶级会议发表的论文数量逐年增加,在国内举办的医学影像人工智能领域国际知名会议数量和影响力不断增强。在应用落地方面,越来越多的传统医疗公司、互联网科技公司以及新生的人工智能公司开始大力发展医学影像人工智能产品。同时,越来越多的医院也开始积极参与医学影像人工智能的合作研究项目,为将来人工智能在医学影像应用的最终落地夯实基础。国家决策部门也在2017年发布的《新一代人工智能发展规划》中将智能医疗列入面向2030年国家新一代人工智能发展的重点任务之一,并且后续又出台了一系列的规划。

为了记录和总结过去20年中国在医学影像人工智能领域的努力和贡献,特意对中国医学影像人工智能过去20年的发展历程进行回顾,并对今后的发展进行展望。在医学影像人工智能领域的国际主流期刊(例如 Medical Image Analysis (MedIA)、IEEE Transactions on Medical Imaging (TMI)、IEEE Transactions on Biomedical Engineering (TBME)、NeuroImage、Human Brain Mapping等)和会议(例如 Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention

(MICCAI)、The International Conference on Information Processing in Medical Imaging (IPMI)等)中,考虑到期刊和会议收录该领域论文的全面性,以及本文作者资源和时间的有限性,重点定量分析了国内同行在期刊 MedIA 和 TMI 以及会议 MICCAI 发表的论文情况(截至2021年11月)。此外,我们回顾并简要总结了近20年国内医学影像人工智能发展进程中的重要事件,包括国内主办的医学影像人工智能知名国际和国内会议、《中国医学影像 AI 白皮书》的发布以及国内同行在新冠肺炎(corona virus disease 2019, COVID-19)期间的贡献。最后,展望了国内医学影像人工智能领域未来的发展趋势。

在检索期刊论文收录情况时,使用的数据来源为 Web of Science 核心数据集(不包括 early access 论文),设置出版物标题为“Medical Image Analysis”或“IEEE Transactions on Medical Imaging”,索引日期为“2000-01-01至2021-11-26”,国家/地区为中国(含港澳台地区)。此外,包括了1998年(第一届 MICCAI 会议)至2021年的所有 MICCAI 论文。值得注意的是,在检索上述期刊或会议论文中,限定所有作者中至少有一位署名为中国单位的中国学者。此外,为了排除同名作者造成的影响,还引入 Scopus 数据库提供的作者标识符(Author ID)来区分同名作者。

1 论文发表数量

1.1 MedIA

图1为2000年以来中国每年在 MedIA 发表论文数量和占比。由图1可见,2000—2021年(截至11月),国内单位在 MedIA 期刊共发表论文333篇。自2003年发表第一篇论文开始,2003—2012年论文发表数量较少,一共仅11篇,平均每年1.1篇。2013年开始,论文发表数量有较明显增长,2013—2016年共发表44篇,平均每年11篇。2017年开始,国内单位的论文发表数量增长迅速,2017—2021年11月共发表278篇,平均每年55.6篇,其中2021年(截至11月)增长更为明显,较2020年增长69

篇,达到132篇。此外,自2012年开始,国内单位每年在MedIA发表论文占比也呈现整体上升趋势,2019—2021年(截至11月)分别达到27.07%、39.13%和37.29%。

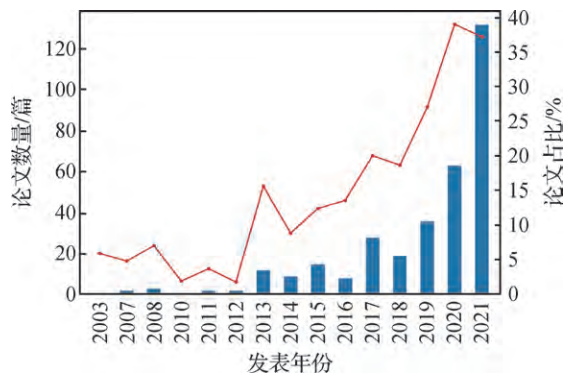


图1 2000年以来国内单位每年在MedIA发表论文数量和占比

Fig. 1 The number and proportion of published papers by Chinese affiliations in MedIA per year since 2000

1.2 TMI

图2为2000年以来中国每年在TMI发表论文数量和占比。由图2可见,2000—2021年(截至11月),国内单位在TMI期刊共发表论文601篇。2000—2011年间,中国在该期刊上发表的论文数量较少,每年的总数都不超过15篇。而从2012年开始,每年的论文发表数量呈现稳定增长趋势,在2020年达到129篇。其中,2019—2020年的增长幅度最大,为54篇。截至2021年11月,2021年的论文总数已达到了112篇,预计年底能够追平甚至将超过2020年。此外,自2011年开始,国内单位每年在TMI发表论文占比也呈现稳定上升趋势,2019—

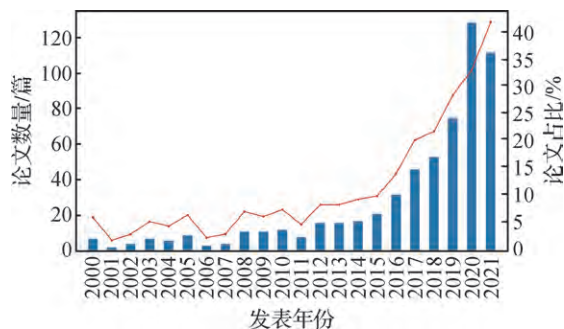


图2 2000年以来国内单位每年在TMI发表论文数量和占比

Fig. 2 The number and proportion of published papers by Chinese affiliations in TMI per year since 2000

2021年(截至11月)分别达到28.63%、33.33%和42.26%。

1.3 MICCAI

图3为1998年以来中国每年在MICCAI发表论文数量和占比。由图3可见,1998—2021年,国内单位在MICCAI会议发表论文共985篇。从1999年发表最初的2篇论文开始,1999—2003年论文发表数量较少,一共仅8篇,其中1999年、2000年、2002年、2003年各发表2篇。从2004年开始,国内单位论文发表数量有较明显增长,2004—2015年共发表179篇,平均每年15篇。自2016年开始,国内单位发表论文数量迅速增长,2016—2018年共发表154篇,平均每年51篇。2019—2021年年均发表论文超过了180篇,分别达到188、221、235篇。此外,自2014年开始,国内单位每年在MICCAI发表论文占比也呈现整体上升趋势,2019—2021年分别达到34.75%、40.63%和44.26%。

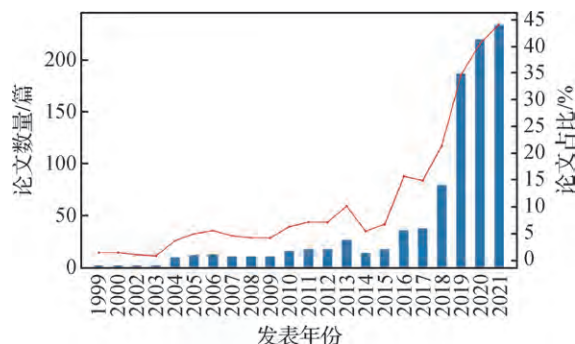


图3 1998年以来国内单位每年在MICCAI发表论文数量和占比

Fig. 3 The number and proportion of published papers by Chinese affiliations in MICCAI per year since 1998

2 论文作者身份

2.1 MedIA

图4为2000年以来国内作者发表MedIA论文的身份占比。由图4可见,自2000年以来,国内作者发表MedIA期刊论文的身份具有显著变化。在论文发表数量和占比整体逐年上升(图1)的情况下,第一作者和通信作者均为国内单位的论文数量占比(图4蓝色部分)也在逐年提高。其中,2013—2019年总占比为44.53%,而2020年和2021年(截至11月)占比分别显著提高到71.43%和71.97%。

(由于2003—2012年论文发表数量及占比较少,故不纳入此分析)。

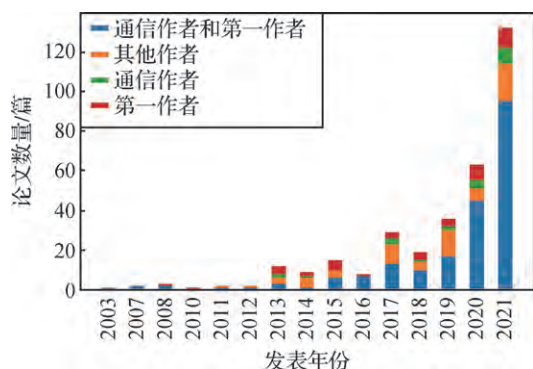


图4 2000年以来国内作者发表 MedIA 论文的身份占比

Fig. 4 Proportion of the identity of Chinese authors in published MedIA papers since 2000

2.2 TMI

图5为2000年以来国内作者发表TMI论文的身份占比。由图5可见,自2000年以来,国内作者发表TMI期刊论文的身份具有显著变化。2012年之前,在论文发表数量较少和占比较低的情况下(图2),第一作者和通信作者均为国内单位的论文数量的占比也较低(图5蓝色部分)。自2012年开始,该占比整体增长,几乎此后所有年份的占比都超过50%,平均占比高达61.09%。其中2019年和2021年(截至11月)的占比分别达到75.00%和69.64%。

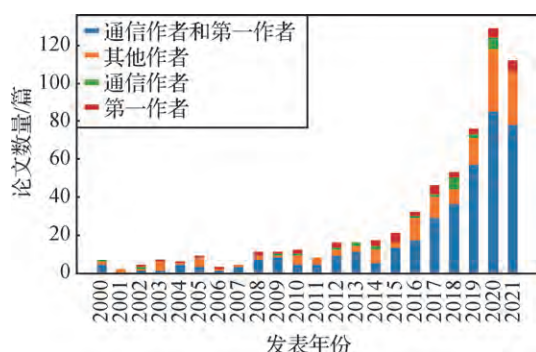


图5 2000年以来国内作者发表 TMI 论文的身份占比

Fig. 5 Proportion of the identity of Chinese authors in published TMI papers since 2000

2.3 MICCAI

图6为1998年以来国内作者发表MICCAI论文的身份占比。由图6可见,自1998年以来,国内作者在MICCAI会议发表论文的身份具有显著变化。在论文发表数量和占比整体逐年上升(图3)的

情况下,第一作者和通信作者均为国内单位的论文数量占比(图6蓝色部分)也在逐年提高。其中,2009—2018年整体占比约60.9%,而2019—2021年占比分别为68.1%、67.9%和77.4%(由于1998—2009年国内作者论文发表数量较少且通信作者没有明确标识,误差较大,故不纳入此分析)。

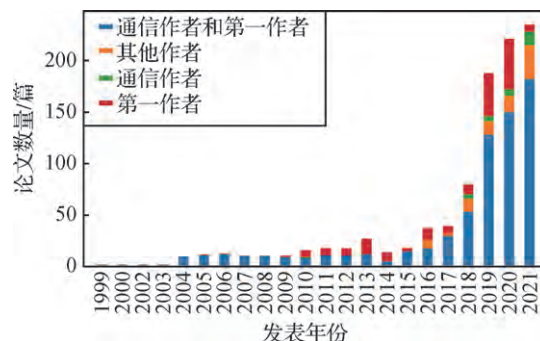


图6 1998年以来国内作者发表 MICCAI 论文的身份占比

Fig. 6 Proportion of the identity of Chinese authors in published MICCAI papers since 1998

3 论文发表单位

3.1 MedIA

图7为2000年以来国内单位发表MedIA期刊论文的数量统计图。发表论文总数量较多的国内单位包括中国科学院(注:由于中国科学院下属研究单位机构众多,故在本文中合并统计,而中国科学院大学单独统计)(42篇,12.61%)、上海交通大学(35篇,10.51%)、香港中文大学(33篇,9.91%)、深圳大学(25篇,7.51%)、西北工业大学(21篇,6.31%)、上海联影智能医疗科技有限公司(17篇,5.11%)、四川大学(17篇,5.11%)、中山大学(17篇,5.11%)、复旦大学(15篇,4.50%)、北京理工大学(14篇,4.20%)、东南大学(14篇,4.20%)、中国科学院大学(14篇,4.20%)、厦门大学(14篇,4.20%)、浙江大学(14篇,4.20%)、华中科技大学(13篇,3.90%)、南方医科大学(13篇,3.90%)、北京大学(12篇,3.60%)、香港理工大学(11篇,3.30%)、电子科技大学(11篇,3.30%)、哈尔滨工业大学(10篇,3.00%)、上海科技大学(10篇,3.00%)和清华大学(10篇,3.00%)。

3.2 TMI

图8为2000年以来国内单位发表TMI期刊论

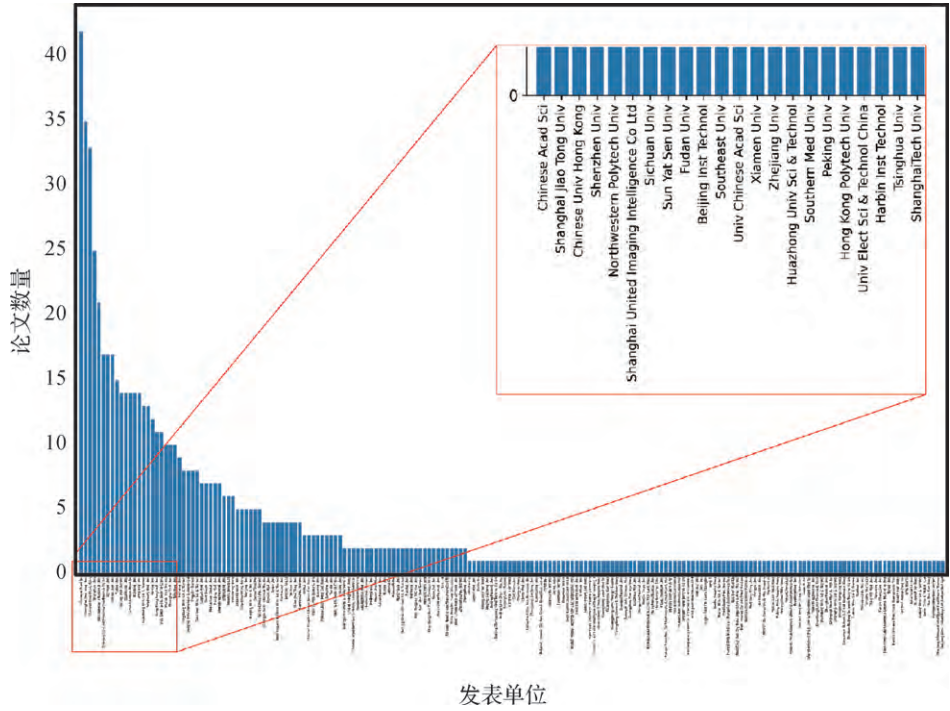


图 7 2000 年以来国内单位在 MedIA 发表论文总数量

Fig. 7 The total number of published papers by each Chinese affiliation in MedIA since 2000

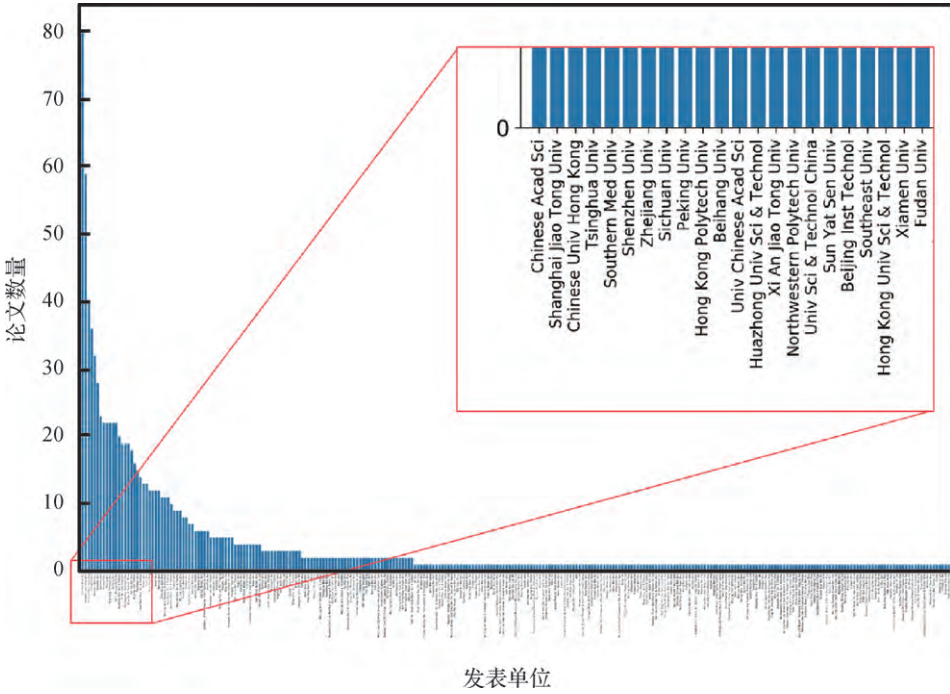


图 8 2000 年以来国内单位在 TMI 发表论文总数量

Fig. 8 The total number of published papers by each Chinese affiliation in TMI since 2000

文的数量统计图。发表论文总数量较多的国内单位包括中国科学院(80篇,13.31%)、上海交通大学(59篇,9.82%)、香港中文大学(40篇,6.66%)、清华大学(36篇,5.99%)、南方医科大

学(32篇,5.32%)、深圳大学(28篇,4.66%)、浙江大学(23篇,3.83%)、香港理工大学(22篇,3.66%)、四川大学(22篇,3.66%)、北京大学(22篇,3.66%)、北京航空航天大学(22篇,3.66%)、

中国科学院大学(22篇,3.66%)、华中科技大学(20篇,3.33%)、西安交通大学(19篇,3.16%)、西北工业大学(19篇,3.16%)、中国科学技术大学(19篇,3.16%)、中山大学(18篇,3.00%)、北京理工大学(16篇,2.66%)和东南大学(15篇,2.50%)。

3.3 MICCAI

图9为1998年以来国内单位在MICCAI会议发表论文的数量统计图。发表论文总数量较多的国

内单位包括中国科学院(120篇,12.18%)、上海交通大学(103篇,10.46%)、西北工业大学(72篇,7.31%)、香港中文大学(69篇,7.01%)、浙江大学(51篇,5.18%)、深圳大学(47篇,4.77%)、北京大学(43篇,4.37%)、中山大学(33篇,3.35%)、清华大学(32篇,3.25%)、上海联影智能医疗科技有限公司(30篇,3.05%)、中国科学技术大学(29篇,2.94%)、中国科学院大学(27篇,2.74%)和香港科技大学(25篇,2.54%)。

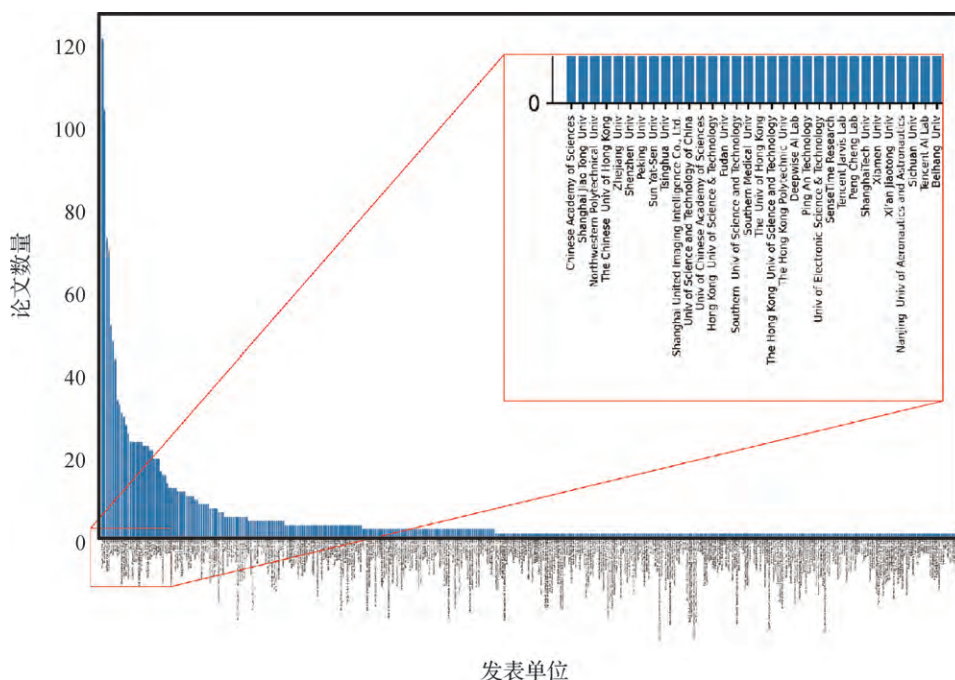


图9 1998年以来国内单位在MICCAI发表论文总数量

Fig. 9 The total number of published papers by each Chinese affiliation in MICCAI since 1998

4 论文作者合作链

4.1 MedIA

采用公开的 igraph 工具包来绘制论文作者之间的关系链示意图(图10—图12)。以国内第一作者作为主要节点来对同篇论文中的其他参与作者进行连接,图中红色节点表示第一作者且作者姓名字体大小与该作者参与论文数量成正比,节点之间的连线粗细与作者之间合作论文的数量成正比。图10显示了2000年以来发表MedIA论文的国内作者的合作链。为了使合作链示意图更加清晰,省略了不存在

合作链或发文量仅一篇的作者。在纳入统计的333篇论文中,发表论文数量相对较多且国内外合作者较多的国内作者有Shen Dinggang^①(43篇,占总篇数的12.91%)、Li Shuo^②(32篇,9.61%)、Heng Pheng-Ann(21篇,6.31%)、Chen Bo(13篇,3.90%)、Liu Tian-ming/Li Baiying/Chen Hao(各12篇,各占3.60%)、Guo Lei/Qin Jing(各10篇,各占3.00%)、Liu Mingxia/Zhang Heye/Wang Tianfu/Ye Chuyang/Dou Qi(各9篇,各占2.70%)、Zhang Daoqiang/Yang Xin/Zhang Yi(各8篇,各占2.40%)、Ni Dong/Gao Yaozong/Zheng Yefeng/Wang Liansheng/Chen Yang(各7篇,各占2.10%)、Wang Qian/Shi Feng/Zhang Tuo/Zhuang Xi-

① 总共发表64篇(包括所有作者单位均为国外单位,因不符合本文检索标准而未纳入统计的论文);② 总共发表39篇(包括所有作者单位均为国外单位,因不符合本文检索标准而未纳入统计的论文)

ahai/Fu Huazhu(各6篇,各占1.80%)、Feng Qianjin/
Han Junwei/Zhu Dajiang/Jiang Xi/Jie Biao/Xu Yan-

wu/Zhang Shaoting/Ma Kai/Bian Cheng/Jin Yueming/
Xiao Jing/Chen Geng(各5篇,各占1.50%)等。

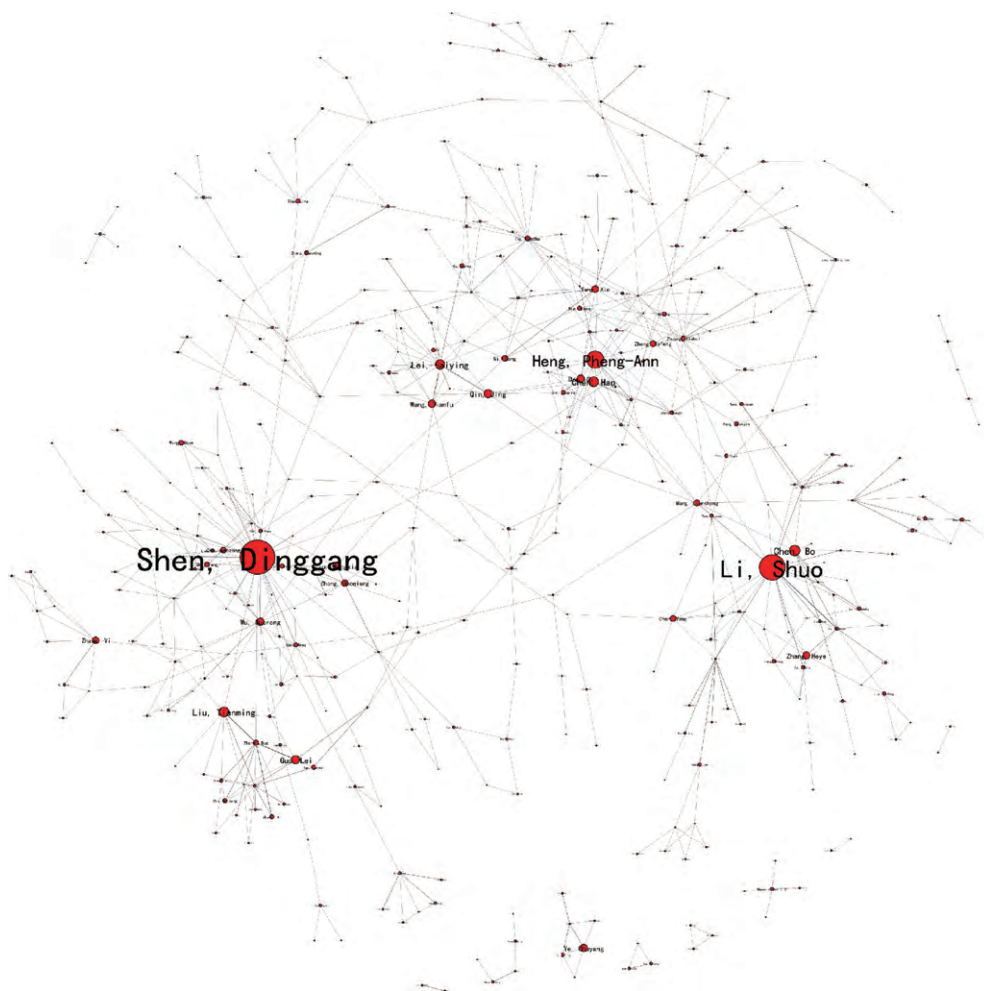


图10 2000年以来发表MedIA论文的国内作者合作链关系图

Fig. 10 Relationship diagram of Chinese authors in published MedIA papers since 2000

4.2 TMI

图11显示了2000年以来发表TMI论文的国内作者的合作链。为了使合作链示意图更加清晰,设置节点顶点和顶点名称在图中显示的大小与作者参与论文数量成正比,同时省略了一些合作较少的作者。在纳入统计的601篇论文中,发表论文数量相对较多且国内外合作者较多的国内作者有 Shen Dinggang^③(33篇,占总篇数的5.49%)、Heng Pheng-Ann(30篇,各占4.99%)、Tian Jie/Ma Jianhua/Yu Lequan(各14篇,各占2.33%)、Liu Jiang(各13篇,各占2.16%)、Chen Wufan/Chen Hao/Dou Qi(各12篇,各占2.00%)、Zhang Yi(各11篇,

各占1.83%)、Feng Qianjin/Liu Dong/Feng David Dagan(各10篇,各占1.66%)、Ni Dong/Zhang Daoqiang/Luo Jianwen/Qin Jing/Du Jiangfeng(各9篇,各占1.50%)、Wang Qian/Xia Yong/Liu Mingxia/Chen Xinjian/Yang Xin/Zheng Hairong/Cheng Jun/Mou Xuanqin/Lu Hongbing/Zeng Dong/Zhao Yitian/Lin Weili(各8篇,各占1.33%)、Liang Dong/Chen Yang/Zhang Hao/Yang Wei/Song Yang/Cai Weidong(各7篇,各占1.16%)等。

4.3 MICCAI

图12显示了1998年以来发表MICCAI会议论文的国内作者的合作链。由于MICCAI会议国内单

③ 总共发表72篇(包括所有作者单位均为国外单位、因不符合本文检索标准而未纳入统计的论文)

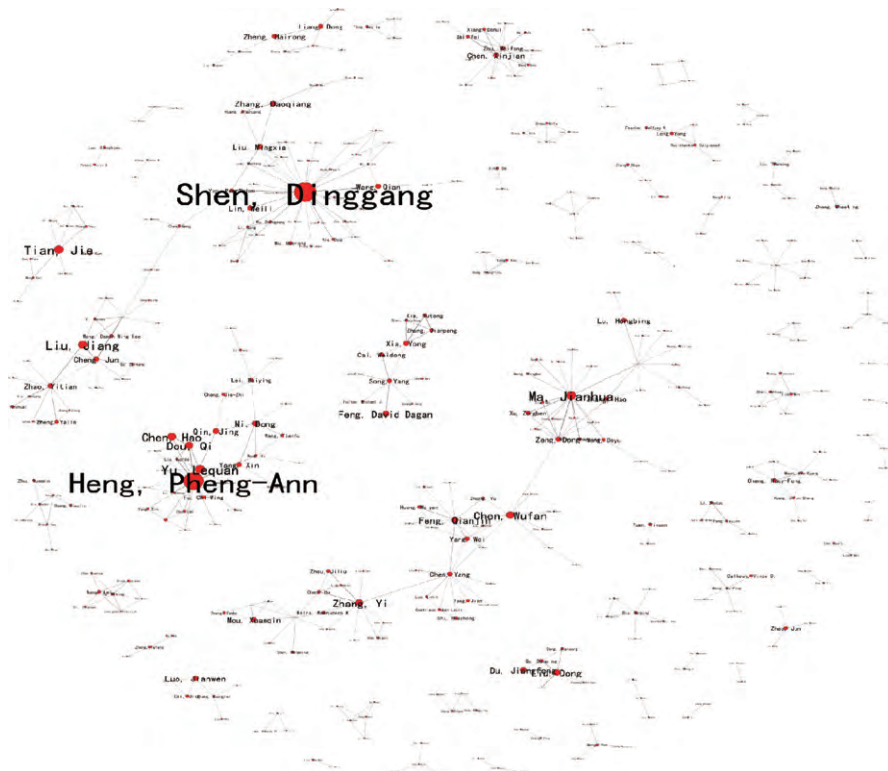


图 11 2000 年以来发表 TMI 论文的国内作者合作链关系图

Fig. 11 Relationship diagram of Chinese authors in published TMI papers since 2000

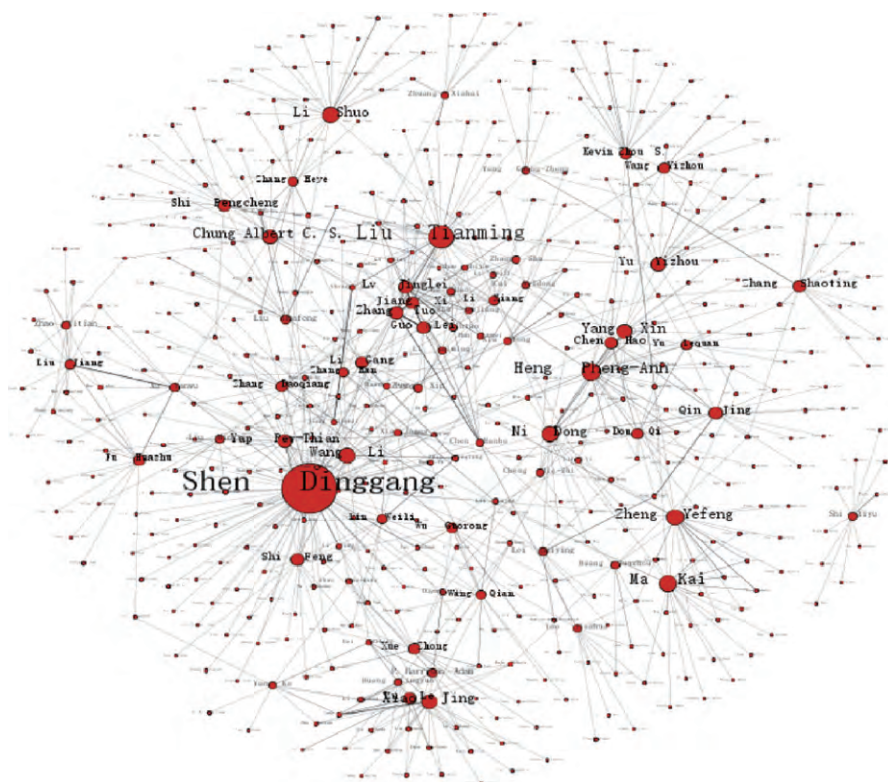


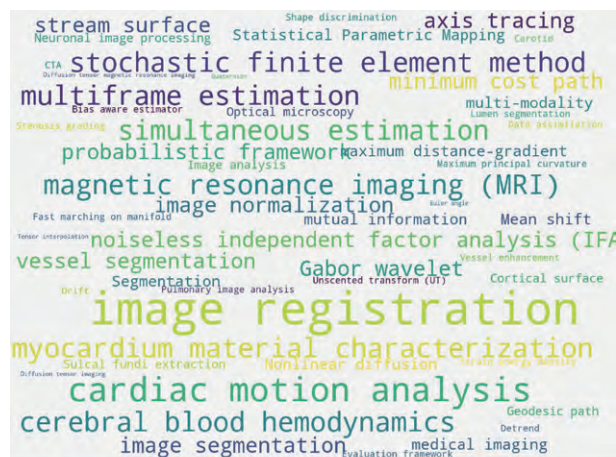
图 12 1998 年以来发表 MICCAI 论文的国内作者合作链关系图

Fig. 12 Relationship diagram of Chinese authors in published MICCAI papers since 1998

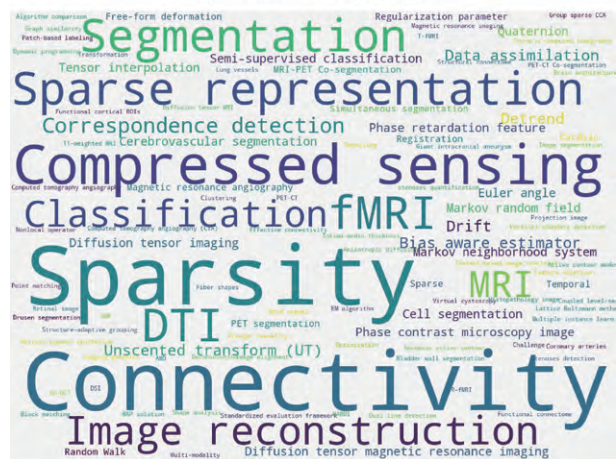
位的论文数量较多,为了使合作链示意图更加清晰,将发文少于8篇的作者省略。在纳入统计的985篇论文中,发表论文数量相对较多且国内外作者较多的国内作者有 Shen Dinggang^④(96篇,占总篇数的9.75%)、Liu Tianming^⑤(44篇,4.47%)、Heng Pheng-Ann(39篇,3.96%)、Guo Lei(33篇,3.35%)、Zheng Yefeng(29篇,2.94%)、Ma Kai(28篇,2.84%)、Xiao Jing(27篇,2.74%)、Qin Jing(24篇,2.44%)、Ni Dong/Li Shuo(23篇,2.34%)、Kevin Zhou S./Zhang Tuo(各22篇,各占2.23%)、Lu Le(21篇,2.13%)、Chung Albert C. S./Liu Jiang/Yu Yizhou(各20篇,各占2.03%)、Shi Pengcheng/Zhang Shaoting(各19篇,各占1.93%)、Wang Li(18篇,1.83%)、Li Gang(16篇,1.62%)、Wang Qian/Xue Zhong/Yang Xin/Zhang Heye/Liu Huafeng(各15篇,各占1.52%)、Zhang Daoqiang/Hu Xintao/Lin Weili/Fu Huazhu/Wang Yizhou(各14篇,各占1.42%)、Shi Feng/Xia Yong/Zhang Han/Dou Qi(各13篇,各占1.32%)、Jiang Xi/Li Baiying/Shi Yiyu(各12篇,各占1.22%)、Lyu Jinglei/Li Xiang/Zhuang Xiahai/Liu Mingxia/Huang Junzhou/Yan Ke(各11篇,各占1.12%)、Jiang Tianzi/Han Junwei/Yao Jianhua/Zhao Yitian/Cai Weidong(各10篇,各占1.02%)等。

5 论文关键词

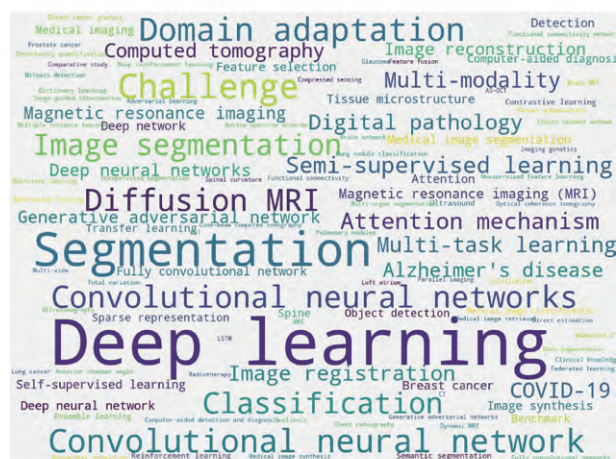
图13—图15分别为对国内单位在 MedIA、TMI 和 MICCAI 发表的论文关键词信息进行统计得到的词云图。由图13(a)、图14(a)、图15(a)可见2012年之前发表在上述三者的论文研究方法多集中于传统的影像分析方法。其中 MedIA 论文主要包括最小成本路径、统计参数图、随机有限元法和 Gabor 小波(图13(a))、TMI 论文主要包括参数估计、可变形模型、小波变换和模糊聚类(图14(a))、MICCAI 论文主要包括水平集、判别分析和基于模板的分析(图15(a))。2012年之前发表在上述三者的论文研究对象多集中在心脏、血管和大脑。此外 TMI 论文对乳腺和视网膜(图14(a))、MICCAI 论文对肺



(a) 2000—2011 年词云图



(b) 2012—2016 年词云图



(c) 2017—2021 年词云图

图13 2000—2021年国内作者发表 MedIA

期刊论文的关键词词云分析结果

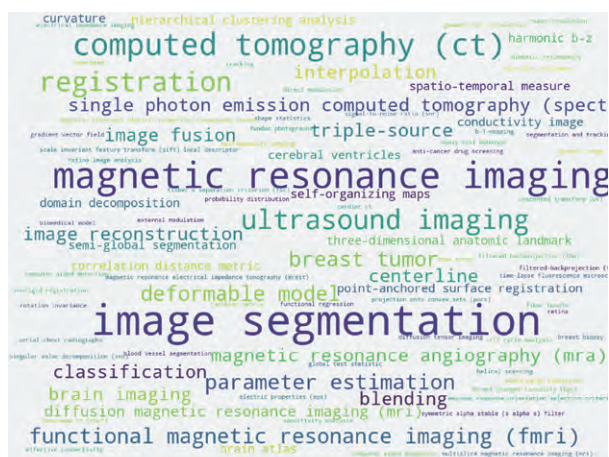
Fig. 13 Word cloud analysis of the keywords in published

MedIA papers by Chinese authors in 2000—2021

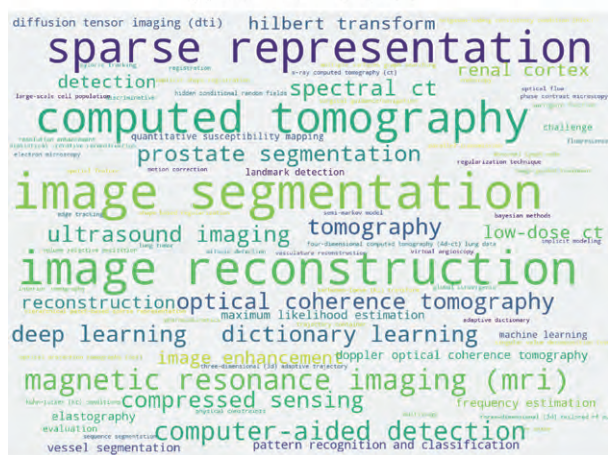
((a) 2000—2011; (b) 2012—2016; (c) 2017—2021)

部(图15(a))也有较多研究。2012年之前发表在上述

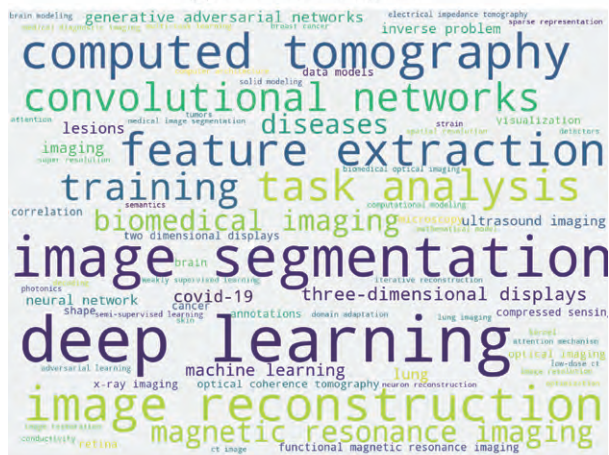
④ 总共发表243篇(包括所有作者单位均为国外单位、因不符合本文检索标准而未纳入统计的论文); ⑤ 总共发表62篇(包括所有作者单位均为国外单位、因不符合本文检索标准而未纳入统计的论文)



(a) 2000—2011 年词云图



(b) 2012—2016 年词云图



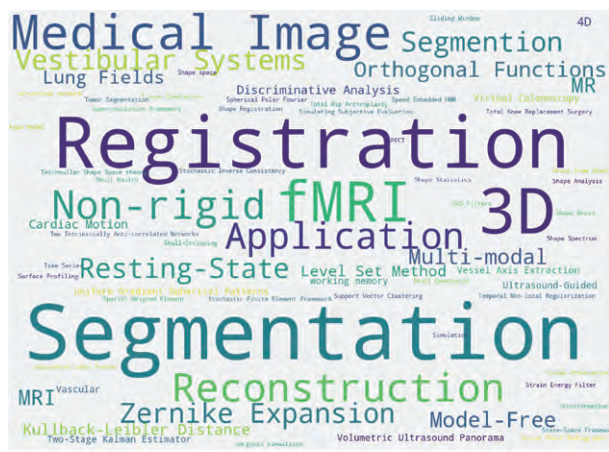
(c) 2017—2021 年词云图

图 14 2000—2021 年国内作者发表 TMI 期刊论文的关键词词云分析结果

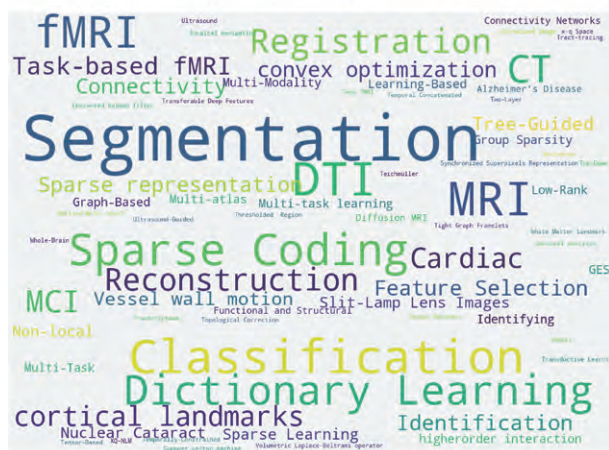
Fig. 14 Word cloud analysis of the keywords in published TMI papers by Chinese authors in 2000—2021

((a) 2000—2011; (b) 2012—2016; (c) 2017—2021)

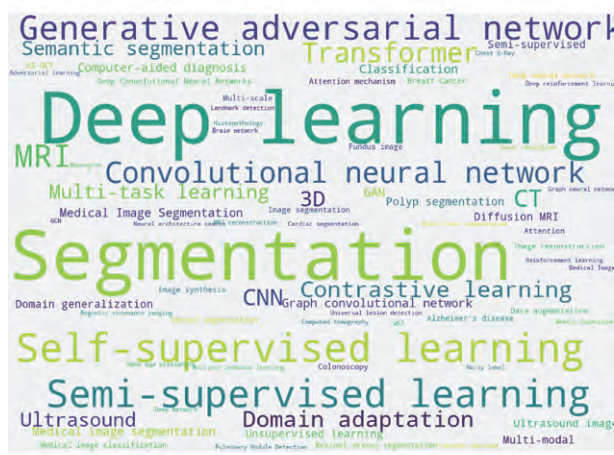
述三者的论文研究目标多集中在医学影像的配准和分割。此外 MedIA 论文对医学影像的标准化(图 13(a)), TMI 论文对医学影像的重建、分类、融合和聚



(a) 1998—2011 年词云图



(b) 2012—2016 年词云图



(c) 2017—2021 年词云图

图 15 1998—2021 年国内作者发表 MICCAI 会议论文的关键词词云分析结果

Fig. 15 Word cloud analysis of the keywords in published MICCAI papers by Chinese authors in 1998—2021

((a) 1998—2011; (b) 2012—2016; (c) 2017—2021)

类(图 14(a)) 也有较多研究。2012 年之前发表在上述三者的论文研究影像模态主要为磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)。此外 TMI 论文

对 CT (computed tomography)、超声 (ultrasound) 以及多模态磁共振成像,例如功能磁共振成像 (functional MRI, fMRI)、弥散张量成像 (diffusion tensor imaging, DTI) 和磁共振血管成像 (magnetic resonance angiography, MRA) 等有较多研究 (图 14(a))。

由图 13(b)、图 14(b)、图 15(b) 可见,随着相关技术的发展和普及,2012—2016 年发表在上述三者的论文主要研究方法从 2012 年之前的传统影像分析方法演变为稀疏表达。此外,MedIA 论文对压缩感知 (图 13(b))、TMI 论文对字典学习、压缩感知和深度学习 (图 14(b))、MICCAI 论文对字典学习和多任务学习 (图 15(b)) 也有较多研究。2012—2016 年发表在上述三者的论文研究对象有一定差异。其中 MedIA 论文主要包括大脑连接、细胞和脑血管等 (图 13(b))、TMI 论文多为前列腺、血管和肾皮质等 (图 14(b))、MICCAI 论文除了心脏、血管和眼部,对大脑疾病 (例如老年痴呆和轻度认知障碍) 和大脑皮层特征点识别有较多研究 (图 15(b))。2012—2016 年发表在上述三者的论文研究目标除了传统的医学影像的分割、分类、配准和重建之外,MedIA 论文对大脑结构及功能特性相关的功能或有效连接分析 (图 13(b))、TMI 论文对计算机辅助检测和医学影像增强 (图 14(b)) 有较多研究。2012—2016 年发表在上述三者的论文研究影像模态除了多模态磁共振成像 (例如 fMRI 和 DTI 等) 之外,MedIA 论文对相差显微镜影像 (phase contrast microscopy image) 和正电子发射型计算机断层显像 (positron emission computed tomography, PET) (图 13(b))、TMI 论文对 CT、超声、弹性成像 (elastography) 和多普勒光学相干断层扫描 (Doppler optical coherence tomography, Doppler OCT) (图 14(b))、MICCAI 论文对 CT 和超声 (图 15(b)) 有较多研究。

由图 13(c)、图 14(c)、图 15(c) 可见,随着深度学习及其相关技术的发展和普及,2017—2021 年发表在上述三者的论文主要研究方法从 2012 年之前的传统影像分析方法和 2012—2016 年的稀疏表达演变为深度学习。其中 MedIA 论文包括卷积神经网络、生成对抗网络、深度神经网络、迁移学习、对比学习、半监督学习、自监督学习和注意力机制等 (图 13(c))。TMI 论文包括卷积神经网络、生成对抗网络等,此外 3 维可视化、特征提取、特征学习和网络训练等也备受关注和青睐 (图 14(c))。MICCAI 论

文包括卷积神经网络、生成对抗网络、Transformer、对比学习、图卷积网络、自监督学习、半监督学习、深度神经网络和多任务学习等 (图 15(c))。2017—2021 年发表在上述三者的论文研究对象具有一定差异。其中 MedIA 论文主要包括老年痴呆、乳腺癌、新型冠状病毒肺炎 (COVID-19) 和大脑等 (图 13(c))、TMI 论文主要包括 COVID-19、大脑和器官病变等 (图 14(c))、MICCAI 论文主要包括脑疾病、脑网络、视网膜眼底疾病、乳腺和血管等 (图 15(c))。2017—2021 年发表在上述三者的论文研究目标除了传统的医学影像配准、分割、分类和重建之外,MedIA 论文对医学影像合成 (图 13(c))、TMI 论文对医学影像可视化 (图 14(c))、MICCAI 论文对计算机辅助检测 (图 15(c)) 也有较多研究。2017—2021 年发表在上述三者的论文研究影像模态除了传统的 CT 和 MRI 之外,MedIA 论文对数字病理影像和多模态影像 (图 13(c))、TMI 论文对超声、X 射线和光学相干断层扫描 (optical coherence tomography, OCT) (图 14(c))、MICCAI 论文对超声和多模态影像 (图 15(c)) 也有较多研究。

综上所述,国内单位在 MedIA、TMI 和 MICCAI 发表的论文关键词信息在过去 20 年具有以下发展特点和趋势:研究方法紧跟人工智能技术的最新发展潮流;研究对象除了传统的器官,也紧密结合医疗健康领域的重点和难点问题,例如 COVID-19;研究目标除了传统的医学影像分析,计算机辅助检测近年来也受到一定重视,但已发表论文仍侧重于医学影像计算 (medical image computing, MIC),而计算机辅助介入 (computer assisted intervention, CAI) 的相关研究偏少,需引起足够重视;研究影像模态也逐步从单一模态扩展到多模态融合,包括与自然语言 (例如诊断报告) 的融合。

6 论文引用次数

6.1 MedIA

2000—2021 年 (截至 11 月),国内单位在 MedIA 期刊发表的 333 篇论文共被 Web of Science 核心数据集引用 7 481 次,平均每篇被引 22 次。被引次数较多的 10 篇论文分别为 “Validation, Comparison, and Combination of Algorithms for Automatic Detection of Pulmonary Nodules in Computed Tomo-

graphy Images: The LUNA16 Challenge”(268次)、“A Deep Learning Model Integrating FCNNs and CRFs for Brain Tumor Segmentation”(265次)、“3D Deeply Supervised Network for Automated Segmentation of Volumetric Medical Images”(240次)、“Magnetic Resonance Image Reconstruction from Undersampled Measurements Using a Patch-based Nonlocal Operator”(203次)、“Assessment of Algorithms for Mitosis Detection in Breast Cancer Histopathology Images”(194次)、“DCAN: Deep Contour-aware Networks for Object Instance Segmentation from Histology Images”(192次)、“ISLES 2015—A Public Evaluation Benchmark for Ischemic Stroke Lesion Segmentation from Multispectral MRI”(190次)、“Gland Segmentation in Colon Histology Images: The Glas Challenge Contest”(187次)、“Central Focused Convolutional Neural Networks: Developing A Data-driven Model for Lung Nodule Segmentation”(170次)和“A Blind Deconvolution Approach to Recover Effective Connectivity Brain Networks from Resting State fMRI Data”(136次)。

6.2 TMI

2000—2021年(截至2021年11月),国内单位在TMI期刊发表的601篇论文共被Web of Science核心数据集引用16 623次,平均每篇被引28次。被引次数较多的10篇论文分别为“Generalized q -Sampling Imaging”(426次)、“Low-Dose CT with a Residual Encoder-Decoder Convolutional Neural Network”(380次)、“Penalized Weighted Least-Squares Approach to Sinogram Noise Reduction and Image Reconstruction for Low-Dose X-ray Computed Tomography”(358次)、“Low-Dose X-ray CT Reconstruction via Dictionary Learning”(357次)、“Stacked Sparse Autoencoder (SSAE) for Nuclei Detection on Breast Cancer Histopathology Images”(351次)、“H-DenseUNet: Hybrid Densely Connected UNet for Liver and Tumor Segmentation from CT Volumes”(320次)、“Low-Dose CT Image Denoising Using a Generative Adversarial Network with Wasserstein Distance and Perceptual Loss”(305次)、“Automated Melanoma Recognition in Dermoscopy Images via Very Deep Residual Networks”(292次)、“Automatic Detection of Cerebral Microbleeds from MR Images via 3D Convolu-

tional Neural Networks”(287次)和“Retinopathy Online Challenge: Automatic Detection of Microaneurysms in Digital Color Fundus Photographs”(266次)。

6.3 MICCAI

1998—2021年,国内单位在MICCAI会议发表的985篇论文共被引用8 916次(截至2021年11月,由Plum Metrics评价系统提供),平均每篇被引9次。被引次数较多的10篇论文分别为“Medical Image Synthesis with Context-Aware Generative Adversarial Networks”(268次)、“DeepVessel: Retinal Vessel Segmentation via Deep Learning and Conditional Random Field”(245次)、“3D Deeply Supervised Network for Automatic Liver Segmentation from CT Volumes”(186次)、“Accurate Pulmonary Nodule Detection in Computed Tomography Images Using Deep Convolutional Neural Networks”(142次)、“Cardiac Image Super-Resolution with Global Correspondence Using Multi-Atlas PatchMatch”(91次)、“Automated Pulmonary Nodule Detection via 3D ConvNets with Online Sample Filtering and Hybrid-Loss Residual Learning”(88次)、“ASDNet: Attention Based Semi-supervised Deep Networks for Medical Image Segmentation”(84次)、“Automated Nucleus and Cytoplasm Segmentation of Overlapping Cervical Cells”(81次)、“Uncertainty-Aware Self-ensembling Model for Semi-supervised 3D Left Atrium Segmentation”(69次)和“Multi-modal Image Registration by Minimising Kullback-Leibler Distance”(65次)。

7 其他相关重要事件总结

7.1 中国举办的医学影像人工智能知名国际会议

作为医学图像人工智能领域的国际顶级学术会议,医学影像计算与计算机辅助介入会议(MICCAI)已在中国成功举办过2届。第13届会议(MICCAI 2010)于2010年9月20—24日首次在北京举办,大会主席为中国科学院自动化研究所蒋田仔教授。会议共接收论文251篇,来自全球参会者达800余名。第22届会议(MICCAI 2019)于2019年10月13—17日在深圳举行,大会主席为上海科技大学沈定刚教授和美国佐治亚大学刘天明教授,当地主席为深圳大学倪东教授。第22届会议创造了多项纪录:会

议注册人数突破 2 300 人; 论文投稿数量相比 2018 年增加 63% , 最终接收 538 篇 , 其中来自亚洲的录取论文比例(37%) 首次超过美洲 , 中国贡献了绝大多数论文(188 篇) ; 讲习班、研讨会和挑战赛的举办数量多达 60 余个; 创纪录地资助了 113 名全球学生参会 , 其中包括 48 名本科生 , 并且中国高校本科生占多数; 赞助商达 20 余家; 会议也吸引了大量工业界人士和医生参会。MICCAI 2019 的成功举办对中国医学图像人工智能的长远发展和青年后备人才的培养具有深远的影响。

除了 MICCAI 之外 , 中国还成功举办了其他知名医学图像人工智能国际会议。例如 2014 年的生物医学成像国际论坛 ISBI(The IEEE International Symposium on Biomedical Imaging) 于 2014 年 4 月 29 日至 5 月 2 日在北京举办 , 大会主席为美国伦斯勒理工学院王革教授和美国卡耐基梅隆大学贺斌教授 , 程序委员会主席之一为中国科学院自动化研究所田捷教授。第 26 届医学成像信息处理国际会议 IPMI(The International Conference on Information Processing in Medical Imaging) 于 2019 年 6 月 2—7 日在香港举行 , 大会主席为香港科技大学 Albert C. S. Chung 教授和美国宾夕法尼亚大学 James Gee 教授。第 18 届人脑图谱组织年会 OHBM(The 18th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping) 于 2012 年 6 月 10—14 日在北京举行 , 当地主席为北京大学高家红教授。

7.2 中国举办的其他医学影像人工智能会议

2014 年 12 月 , 在上海科技大学沈定刚教授(原美国北卡罗来纳大学教堂山分校) 的倡议下 , 医学图像计算青年研讨会 MICS(Medical Imaging Computing Seminar) 在深圳大学首次由倪东教授举办。该会议最大特色及宗旨是为医学图像计算领域的华人青年学者提供国内学术交流平台 , 促进该领域青年科研学者与医生等其他领域专家的相互了解 , 帮助其融入国内学术研究大家庭。每届会议聚焦近 3 年内的医学图像计算领域有影响力的原创研究 , 经过 2014 年—2021 年共 8 届会议 , MICS 从线下参会人数不足百人到最多 2 000 余名。此外 , MICS 还组织了每两周一次的在线学术讲座。MICS 已迅速发展成为国内医学图像计算领域最具影响力的学术活动和组织之一 , 为推进中国医学影像人工智能领域的发展做出了贡献。

2017 年 9 月 , 由电子科技大学李纯明教授发起的图像计算与数字医学国际研讨会 ISICDM(International Symposium on Image Computing and Digital Medicine) 在成都首次举办。该会议坚持理工医跨学科交流特色 , 学术讨论围绕图像计算和数字医学中的理论、算法与应用问题 , 旨在促进电子信息、数学和医学等领域学者的交流合作 , 近 4 届会议共 2 000 余人次线下参会。此外 , 中国生物医学工程学会每年主办的青年论坛也为医学影像人工智能领域提供了交流合作和共同发展的平台。

7.3 中国医学影像 AI 白皮书

为促进中国医学影像人工智能(artificial intelligence , AI) 相关产业技术的创新和发展 , 中国医学影像 AI 产学研用创新联盟(以下简称“联盟”) 于 2018 年 4 月在上海成立。首届联盟理事长由上海长征医院刘士远教授担任。2019 年 3 月 , 该联盟正式发布了《中国医学影像 AI 白皮书》(Chinese Innovative Alliance of Industry , Education , Research and Application of Artificial Intelligence for Medical Imaging 2019) 。白皮书由该联盟召集国内三甲医院关注人工智能的影像专家、研究学者和人工智能医学公司等产学研用各环节代表联合起草 , 从人工智能在医疗领域的应用、医学影像人工智能算法的最新进展、医学影像人工智能的需求调研、临床应用现状与展望、政策、挑战与建议等 6 个方面深度分析了医学影像各个领域的现状、需求和未来 , 并对政策做出建议。在近几年医学影像人工智能蓬勃发展但泡沫和乱象并存的时期 , 该权威性报告为中国医学影像人工智能的未来发展提供了蓝图。

7.4 国内同行在 COVID-19 期间的贡献

2019 年新型冠状病毒肺炎(COVID-19) 的爆发给全世界人民生命健康安全带来严重影响 , 也给全世界医疗健康领域带来巨大挑战。医疗成像 , 尤其是胸部成像是 COVID-19 患者的诊断、预测和管理方面发挥着重要作用。为了应对这一全球危机 , 全世界医学影像人工智能领域同行迅速采取行动 , 开发和分享了针对 COVID-19 成像数据的管理和分析的深度学习模型和工具 , 以及医学影像分析方法(Zhang 等 2020) 。2020 年 2 月 18 日 , 在国内疫情最严峻的时刻 , MICS 组织了 COVID-19 在线论坛 , 邀请国内知名医学专家、医学影像人工智能研究学者和公司代表讨论了基于 CT 影像诊断 COVID-19

的进展,以及人工智能在辅助医生诊断 COVID-19 中发挥的作用。Shi 等人(2021)和 Dong 等人(2021)在综述中分别从不同角度总结回顾了针对 COVID-19 成像数据的医学影像分析以及深度学习方法和工具。Liu 等人(2021)和 Shen 等人(2020)分别在 MedIA 和 TMI 上创办了名为“Intelligent Analysis of COVID-19 Imaging Data”和“Imaging-based Diagnosis of COVID-19”的联合特刊,从互补角度聚焦 COVID-19 成像的核心问题,共汇集出版了 20 多篇提出新方法和报告新实验结果的论文,其中中国同行贡献了近一半数量。从方法的角度,中国同行发表在上述特刊论文可分为 3 类:1) COVID-19 成像数据的分割和诊断(Gao 等,2021; Yang 等,2021a; Di 等,2021; Ouyang 等,2020);2) COVID-19 严重程度评估和预后预测(Zhu 等,2021; Xue 等,2021);3) COVID-19 影像数据的临床管理(Zhong 等,2021; Han 等,2020; Wang 等,2020)。

8 结 语

本文对中国医学影像人工智能过去 20 年的发展历程进行了回顾。着重定量分析了国内同行在医学影像人工智能领域国际顶级刊物(MedIA 和 TMI)以及顶级会议(MICCAI)发表的论文情况,包括论文发表数量、作者身份、发表单位、作者合作链、关键词以及被引次数等信息,介绍了中国近 20 年在医学影像人工智能领域取得的突飞猛进的成绩。同时,许多研究论文的作者将数据和源代码公开给全世界共享,为全世界医学影像人工智能的科研和教学做出了杰出的贡献。此外,还回顾并简要总结了国内近 20 年医学影像人工智能发展进程中的重要事件。期望本文能为医学影像人工智能同行提供一个科研和教学参考,为新一代从事医学影像人工智能领域研究的学者和学生提供一个了解中国该领域发展历史的线索,促进该领域将来在中国的蓬勃发展。

通过对中国医学影像人工智能的发展历程回顾可以发现,首先,随着人工智能技术的飞速发展,机器学习,尤其是深度学习正广泛运用于医学影像的成像、识别、分类和量化等各个领域。由于具有强大的从数据中归纳特征而非根据领域特定知识手工识别特征的能力,深度学习近年来已迅速成为主流的人工智能技术,并显著提高了医学影像应用的性能

(Shen 等,2017)。故此建议将来进一步提高深度学习的能力,包括最优和高效的深度学习、可推广的深度学习、可解释的深度学习、公平的深度学习以及负责任和值得信赖的深度学习等。其次,医学影像人工智能结构化数据服务和共享需要进一步提升,以促进医学影像和深度学习领域的专家学者以最佳方式协同推进基础科研和临床应用落地研究。再次,需要加强多中心和多模态医学影像数据的采集和融合分析,包括与自然语言的融合。进一步,由第 4 节“论文作者合作链”可以看出,医学影像人工智能是一个医工交叉学科。建议该领域研究者进一步与医生加强密切合作,聚焦当前人工智能在医学影像临床应用中的真正难点和痛点,将医学影像人工智能技术真正落地。最后,期望医学影像人工智能领域的国内研究学者要以国家战略需求为导向,坚持“四个面向”(世界科技前沿、经济主战场、国家重大需求、人民生命健康),勇于探索领域内的高难度、需要长期投入以及出成果周期长的关键科学问题,加强人才培养特别是校企联合培养,并且继续扩大和加强国际合作,坚持开源研究相关数据和源代码(Yang 等,2021b),为全世界医学影像人工智能领域的发展继续贡献中国力量。

致 谢 以下同学参与了本文相关论文数据的前期整理或后期统计工作:郭炜同、王梓帆、毛伟(电子科技大学)、麦晓春(香港城市大学)、马情楠(郑州大学)。此外本文也得到了上海科技大学王乾、西北工业大学郭雷、胡新韬、张拓、赵世杰、张枢、清华大学高跃、上海大学施俊、陕西师范大学葛宝等教授的宝贵建议,在此表示感谢。

声 明 由于特定检索标准的限制,可能存在部分论文未纳入统计的问题,也可能在我们统计分析过程中出现疏忽和错误,如果出现这样的情况敬请读者批评谅解;另外,由于资源和时间有限,本文只统计了 MedIA、TMI 和 MICCAI 的论文,其他杂志和会议未做统计,敬请读者谅解。

参考文献(References)

- Chinese Innovative Alliance of Industry, Education, Research and Application of Artificial Intelligence for Medical Imaging. 2019. Releasing of the white paper on medical imaging artificial intelligence in China. Chinese Medical Sciences Journal, 34(2): #89 [DOI: 10.

24920/003620]

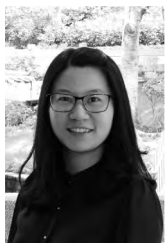
- Di D L, Shi F, Yan F H, Xia L M, Mo Z H, Ding Z X, Shan F, Song B, Li S R, Wei Y, Shao Y, Han M F, Gao Y Z, Sui H, Gao Y and Shen D G. 2021. Hypergraph learning for identification of COVID-19 with CT imaging. *Medical Image Analysis*, 68: #101910 [DOI: 10.1016/j.media.2020.101910]
- Dong D, Tang Z C, Wang S, Hui H, Gong L X, Lu Y, Xue Z, Liao H E, Chen F, Yang F, Jin R H, Wang K, Liu Z Y, Wei J W, Mu W, Zhang H, Jiang J Y, Tian J and Li H J. 2021. The role of imaging in the detection and management of COVID-19: a review. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 14: 16-29 [DOI: 10.1109/RBME.2020.2990959]
- Gao K, Su J P, Jiang Z B, Zeng L L, Feng Z C, Shen H, Rong P F, Xu X, Qin J, Yang Y X, Wang W and Hu D W. 2021. Dual-branch combination network (DCN): towards accurate diagnosis and lesion segmentation of COVID-19 using CT images. *Medical Image Analysis*, 67: #101836 [DOI: 10.1016/j.media.2020.101836]
- Han Z Y, Wei B Z, Hong Y F, Li T Y, Cong J Y, Zhu X, Wei H F and Zhang W. 2020. Accurate screening of COVID-19 using attention-based deep 3D multiple instance learning. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 39(8): 2584-2594 [DOI: 10.1109/TMI.2020.2996256]
- Liu T M, Shen D G, Gao Y, Greenspan H, Niessen W, Reikik I, Schnabel J and Thrall J. 2021. Special issue on intelligent analysis of COVID-19 imaging data. *Medical Image Analysis*, 71: #102056 [DOI: 10.1016/j.media.2021.102056]
- Ouyang X, Huo J Y, Xia L M, Shan F, Liu J, Mo Z H, Yan F H, Ding Z X, Yang Q, Song B, Shi F, Yuan H, Wei Y, Cao X H, Gao Y Z, Wu D J, Wang Q and Shen D G. 2020. Dual-sampling attention network for diagnosis of COVID-19 from community acquired pneumonia. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 39(8): 2595-2605 [DOI: 10.1109/TMI.2020.2995508]
- Shen D G, Gao Y Z, Munoz-Barrutia A, Debuc D C and Percannella G. 2020. Guest editorial: special issue on imaging-based diagnosis of COVID-19. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 39(8): 2569-2571 [DOI: 10.1109/TMI.2020.3008025]
- Shen D G, Wu G R and Suk H I. 2017. Deep learning in medical image analysis. *Annual Review of Biomedical Engineering*, 19: 221-248 [DOI: 10.1146/annurev-bioeng-071516-044442]
- Shi F, Wang J, Shi J, Wu Z Y, Wang Q, Tang Z Y, He K L, Shi Y H and Shen D G. 2021. Review of artificial intelligence techniques in imaging data acquisition, segmentation, and diagnosis for COVID-19. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 14: 4-15 [DOI: 10.1109/RBME.2020.2987975]
- Wang J, Bao Y M, Wen Y F, Lu H B, Luo H, Xiang Y F, Li X M, Liu C and Qian D H. 2020. Prior-attention residual learning for more discriminative COVID-19 screening in CT images. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 39(8): 2572-2583 [DOI: 10.1109/TMI.2020.2994908]
- Xue W F, Cao C Y, Liu J, Duan Y L, Cao H Y, Wang J, Tao X M, Chen Z J, Wu M, Zhang J X, Sun H, Jin Y, Yang X, Huang R B, Xiang F X, Song Y, You M J, Zhang W, Jiang L L, Zhang Z M, Kong S S, Tian Y, Zhang L, Ni D and Xie M X. 2021. Modality alignment contrastive learning for severity assessment of COVID-19 from lung ultrasound and clinical information. *Medical Image Analysis*, 69: #101975 [DOI: 10.1016/j.media.2021.101975]
- Yang D, Xu Z Y, Li W Q, Myronenko A, Roth H R, Harmon S, Xu S, Turkbey B, Turkbey E, Wang X S, Zhu W T, Carrafiello G, Patel-la F, Cariati M, Obinata H, Mori H, Tamura K, An P, Wood B J and Xu D G. 2021a. Federated semi-supervised learning for COVID region segmentation in chest CT using multi-national data from China, Italy, Japan. *Medical Image Analysis*, 70: #101992 [DOI: 10.1016/j.media.2021.101992]
- Yang J C, Shi R and Ni B B. 2021b. MedMNIST classification decathlon: a lightweight autoML benchmark for medical image analysis// *Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging*. Nice, France: IEEE: 191-195 [DOI: 10.1109/ISBI48211.2021.9434062]
- Zhang K, Liu X H, Shen J, Li Z H, Sang Y, Wu X W, Zha Y F, Liang W H, Wang C D, Wang K, Ye L S, Gao M, Zhou Z G, Li L, Wang J, Yang Z H, Cai H M, Xu J, Yang L, Cai W J, Xu W Q, Wu S X, Zhang W, Jiang S P, Zheng L H, Zhang X, Wang L, Lu L, Li J M, Yin H P, Wang W, Li O L, Zhang C, Liang L, Wu T, Deng R Y, Wei K, Zhou Y, Chen T, Lau J Y N, Fok M, He J X, Lin T X, Li W M and Wang G Y. 2020. Clinically applicable AI system for accurate diagnosis, quantitative measurements, and prognosis of COVID-19 pneumonia using computed tomography. *Cell*, 181(6): 1423-1433. E11 [DOI: 10.1016/j.cell.2020.04.045]
- Zhong A X, Li X, Wu D F, Ren H, Kim K, Kim Y, Buch V, Neumark N, Bizzo B, Tak W Y, Park S Y, Lee Y R, Kang M K, Park J G, Kim B S, Chung W J, Guo N, Dayan I, Kalra M K and Li Q Z. 2021. Deep metric learning-based image retrieval system for chest radiograph and its clinical applications in COVID-19. *Medical Image Analysis*, 70: #101993 [DOI: 10.1016/j.media.2021.101993]
- Zhu X F, Song B, Shi F, Chen Y B, Hu R Y, Gan J Z, Zhang W H, Li M, Wang L Y, Gao Y Z, Shan F and Shen D G. 2021. Joint prediction and time estimation of COVID-19 developing severe symptoms using chest CT scan. *Medical Image Analysis*, 67: #101824 [DOI: 10.1016/j.media.2020.101824]

作者简介



蒋希, 1986年生, 男, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为脑成像分析和计算机辅助脑疾病诊断。

E-mail: xijiang@uestc.edu.cn



袁奕萱,1988年生,女,副研究员,博士生导师,主要研究方向为内窥镜图像分析和计算机辅助疾病诊断。

E-mail: yxyuan. ee@ cityu. edu. hk



陈泽华,1996年生,男,硕士研究生,主要研究方向为医学图像处理与分析。

E-mail: asd140245@ 163. com



王雅萍,1980年生,女,副教授,博士生导师,主要研究方向为医学图像处理与分析、神经科学脑认知。

E-mail: ieypwang@ zzu. edu. cn



刘天明,通信作者,男,教授,博士生导师,主要研究方向为脑成像、计算神经科学和类脑人工智能。

E-mail: tliu@ cs. uga. edu



肖振祥,1999年生,男,硕士研究生,主要研究方向为磁共振脑成像数据分析。

E-mail: xiao. zhenxiang@ std. uestc. edu. cn



沈定刚,通信作者,男,教授,博士生导师,主要研究方向为早期脑发育和自闭症的诊断,老年痴呆症的早期诊断与预测、肿瘤的诊断、预后和放射治疗。

E-mail: dgshen@ shanghaitech. edu. cn



朱美芦,1991年生,男,硕士,主要研究方向为多任务学习、弱监督学习。

E-mail: meiluzhu2@ cityu. edu. hk