

文章编号: 1005-5630(2023)06-0025-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202302270030

基于图像技术量化皮秒激光治疗纹身 祛除效果研究

熊利能¹, 陈琦², 杜根¹, 项华中¹, 张大伟³, 王成¹, 王秀丽²

(1. 上海理工大学生物医学光学和视光学研究所, 上海 200093;

2. 同济大学上海皮肤病医院光医学研究所, 上海 200443;

3. 上海理工大学光学仪器与系统教育部工程研究中心, 上海 200093)

摘要: 尽管纹身的人数在增加, 但希望祛除纹身的需求量也在增加。现在纹身祛除大多采用激光进行治疗, 但仅凭肉眼观察的单次疗效不够理想, 往往需要重复治疗。因此, 研究了基于图像技术量化评价治疗的效果。使用皮秒激光对猪皮的不同颜色的纹身进行照射, 采集治疗部位与正常皮肤组织的图像, 再标准化提取部位, 并对此部位的图像进行特征提取后, 量化照射前后的纹身所占面积比, 进而得到祛除率。为了验证量化算法的可靠性, 设计了不同对比度的标准图像来计算色素占比, 得到的误差均小于 0.01%, 证明该算法是可靠的。对于色素祛除的量化评价能客观反映激光祛除色素的效果, 避免了因医师的主观判断所造成的疗效偏差, 为治疗参数的选择及疗效的提高等提供了帮助。

关键词: 皮秒激光; 纹身; 图像分割; 特征提取; 量化

中图分类号: Q 334 **文献标志码:** A

Research on quantifying the tattoo removal effect of picosecond laser treatment based on image technology

XIONG Lineng¹, CHEN Qi², DU Gen¹, XIANG Huazhong¹,

ZHANG Dawei³, WANG Cheng¹, WANG Xiuli²

(1. Institute of Biomedical Optics and Optometry, University of Shanghai for

Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Institute of Photomedicine, Shanghai Dermatology Hospital, Tongji University, Shanghai 200443, China;

3. Optical Instruments and Systems Engineering Research Center of the Ministry of Education, University of Shanghai for

Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Despite the rising popularity of tattoos, demand for their removal has also increased. Tattoo removal is mostly treated by laser. But it requires repeated treatment, and the single curative effect is not accurate enough by visual examination. This article mainly studies the quantitative evaluation of treatment effect based on image technology. Tattoos were made on the pigskin with

收稿日期: 2023-02-27

第一作者: 熊利能(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生物医学光学。E-mail: 18386144057@163.com

通信作者: 王成(1977—), 男, 副教授, 研究方向为生物医学光学。E-mail: shhwangcheng@163.com

different colors, then we used a picosecond laser set at various energy parameters to remove the tattoos. The images of the treated area and normal skin tissue were collected, and the extracted area was standardized. After extracting features, the area ratio of tattoos before and after irradiation was quantified, and then the removal rate was obtained. In order to verify the reliability of the quantization algorithm, standard images with different contrast are designed to calculate the proportion of pigment, and the errors obtained are all less than 0.01%, which proves that the algorithm is reliable. The quantitative evaluation of pigment removal can objectively reflect the effect of laser pigment removal, and avoid the deviation of curative effect caused by subjective judgment. This study provides great help in selecting laser treatment parameters and improving the efficacy.

Keywords: picosecond laser; tattoo; image segmentation; feature extraction; quantify

引 言

纹身是一种古老的习俗,现在也依然在很多地方流行^[1]。一些有纹身的人,或因为不满意纹身效果,或悔于当初因好奇、冲动做了纹身,或由于学习和工作要求,需要对纹身进行祛除。激光治疗是主要的祛除手段,并已经成为祛除纹身的金标准。在激光治疗中,脉冲持续时间为纳秒级的调Q激光和强脉冲光应用比较广泛,在纹身祛除及许多良性的色素性皮肤病治疗中都有较好的疗效。但纳秒激光祛除纹身也存在红肿、疼痛、结痂等不良反应,甚至有色素脱失,色素沉着,疤痕形成等风险^[2-3]。皮秒激光的脉冲宽度更窄,只有 10^{-12} s量级。皮秒激光主要是通过所产生的机械效应作用于表皮及真皮中的黑色素并将其破坏掉,随后由吞噬细胞将这些色素排出体外^[4-5]。皮秒激光在纹身祛除上获得了良好的效果,且与纳秒激光相比,效率更高,疗效更好。2012年,皮秒激光通过美国食品药品监督管理局的认证,被批准用于纹身等皮肤病的治疗^[6]。

而关于纹身祛除的疗效评价,目前多为由几名专家或医生采用独立盲法进行评价。在疾病疗效的判断上,病理活检是金标准。然而,这个过程是复杂的,在很大程度上依赖于医学专家的经验。通常情况下,激光祛除需要经过几个治疗阶段,以实现纹身墨水的完全祛除。然而,以往的研究对每次治疗后纹身墨水残留量的量化分析较

少。皮肤科医生一般使用量表评分系统来测量激光治疗后纹身的清除情况^[7-10]。该评分系统采用较差(祛除率0~25%)、一般(祛除率26%~50%)、良好(祛除率51%~75%)和优秀(祛除率76%~100%)来进行临床评分。但是,该评分是医学专家主观分析的结果,很难作为反映纹身墨水祛除量的量化指标,从而容易导致非必要的进一步治疗。此外,激光祛除治疗过量会产生一些副作用,包括瘢痕纤维化,色素沉着过多,以及多次治疗后由于祛除不完全或过度/累积的热损伤导致纹身色素颜色改变^[11-12]。疗效评价也会受到许多因素的干扰,因为医学专家需要花费大量的时间来观察组织学样本并做出准确的判断。此外,由于不同实验室拍摄环境的不同,所得到的图片也有差异,很难提取到准确的参数。临床上也有采用视觉模拟评分法来对疗效进行客观评价,但是这种方法需要医务人员对患者进行耐心的解释说明,这将耗费较多的时间。在一项评估激光对豚鼠纹身祛除效果的研究中,研究人员采用色度计来测量色素沉着的变化,基于光的吸收原理来计算黑色素的多少,但吸光度的计算是比较复杂的^[13]。此外,有学者利用Image J软件中的颜色阈值调整工具对纹身区域图像中的黑点像素进行量化,以评估激光祛除的效率^[14]。但阈值调整的过程往往是主观的(依赖于测量方法)。目前,临床上也有用Visia面部皮肤检测仪用来检测面部皮下状态,它功能全面,能检测各种指标,但仍不能对检测出的色素进行量化。因此,

需要一种新方法, 它不仅能快速准确地对皮肤上的色素进行量化, 且操作简单, 不需要医务人员花费太多时间进行训练。

本文将图像处理技术应用到皮秒激光皮肤色素祛除的量化评价中。利用 532 nm 和 1064 nm 的皮秒激光对纹身模型进行祛除, 然后对色素祛除前后的图像进行处理, 并对比计算出祛除率。该方法既避免了当前临床上人为评价的弊端, 又提高了治疗效果和效率, 有望成为评价色素祛除率及其他疾病病理诊断效果的有效手段之一。

1 材料和方法

1.1 实验材料及色素模型制作

使用的 Alice-PS 型固体激光器有 1064 nm 与 532 nm 2 种输出波长: 其中 1064 nm 波长下的最大输出能量为 500 mJ; 532 nm 波长下的最大输出能量为 250 mJ。激光器脉宽为 300 ps, 重复频率为 1~10 Hz, 且可调。使用猪皮制作了离体色素模型, 用纹身器及纹身墨水在猪皮上纹上不同颜色的色素, 待色素稳定后用皮肤镜拍下色素的分布情况。接着用皮秒激光对这些色素进行祛除, 针对不同颜色色素采用合适的激光参数, 再次用皮肤镜拍下激光祛除后的照片。基于图像处理技术对色素祛除率进行评价。

1.2 分割方法

1.2.1 基本原理

为了更准确地提取色素部位的信息, 先对图像进行了预处理。先将图像灰度化后对灰度图进行观察, 针对灰度图局部亮度的不均匀进行了局部直方图均衡化, 以提高图像对比度; 然后, 使用中值滤波或高斯滤波去除噪声。经过预处理操作后, 采用不同方法对图像进行分割。

1.2.2 图像二值化

图像二值化就是将图像中像素点的灰度值设置为 0 和 255(只有黑白 2 种颜色, 黑(0)是背景, 白(255)是前景)。关键是寻找一个阈值 T , 使图像中灰度值小于阈值 T 的像素点变为 0, 而大于 T 的像素点变为 255^[15], 这样就可以把需要的内容分割出来。其表达式为

$$B(x,y) = \begin{cases} 255, & \text{if } A(x,y) > T(x,y) \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $B(x,y)$ 为图像二值化后 (x,y) 点的灰度值; $A(x,y)$ 为图像二值化前 (x,y) 点的灰度值; T 为分割阈值。

1.2.3 大津阈值分割

大津阈值分割法, 也叫最大类间方差法, 由日本学者 Otsu(大津展之)在 1978 年提出^[16], 经常被用来作为一种阈值选取方法。它是在最小二乘法基础上推导出来的, 其基本思想是把图像的直方图以某一灰度为阈值分成 2 组, 即前景与背景。背景和前景的分界值就是要求得的阈值。遍历不同的阈值, 计算不同阈值下对应的背景和前景之间的类内方差, 当类内方差取得极大值时, 就以这个灰度值作为阈值来分割图像^[17]。

1.2.4 局部自适应阈值分割

自适应阈值分割法的主要思想不是计算全局阈值, 而是根据图像不同区域的亮度分布, 计算其局部阈值, 所以对于不同区域, 它能够自适应计算不同的阈值。这样就不会损失这一部分的特征值^[18]。具体计算是将图像分成很多小区域, 通过区域内平均或高斯加权进行阈值计算, 其表达式为

$$T(x,y) = F(x,y) - C \quad (2)$$

式中: $T(x,y)$ 为图像分割阈值; $F(x,y)$ 为图像像素的平均值或高斯加权滤波的卷积在像素点 (x,y) 的值; C 是一个从均值或加权均值中提取的常数。

1.2.5 分割方法的选择

大津阈值分割对单峰值或比较平坦的灰度值有很好的效果, 对双峰或者多峰的情况则较差。也有学者发现, 如果要分割的目标面积较小时, 大津阈值分割效果不理想, 会出现欠分割现象。因为它是一种全局阈值分割法, 所以当图像之间光照不够均衡时, 则会出现过分割现象。为了解决这些问题, 可以选择基于局部阈值的自适应阈值法来对图像进行分割, 它能更好地处理明暗差异较大的图像, 获得更好的分割效果, 从而得到更准确的祛除率。

1.2.6 图像采集标准化

色素祛除率需要在同一实验样品上对激光祛

除前后的同一区域进行评价，需要保证祛除前后所选评价区域的一致性。所以，拍摄时需要保持前后条件不变，且拍摄前后所得图片像素大小一致。为此，制作了相机固定支架，以控制物体与相机间距不变；在暗室环境下进行拍摄以避免外界环境中光的干扰；拍摄时保持前后的光照强度一致，曝光时间一致。随后，需将色素目标拍全，即保证所需图像信息是完整的，保持图片大小不变，即可达到图像标准化采集的目的。

2 实验结果与分析

2.1 分割方法的验证

在计算色素的祛除率之前，先对分割算法的准确性进行了验证。制作图 1(a)所示的标准色块模板，其中的像素灰度值为随机分布，然后用上述的局部自适应阈值分割方法对标准色块进行分割并计算色块在整个模板中所占的比值。制作了 3 个模板，大小均为 200 mm×200 mm，模板中设置了多个不同面积的色块，灰度值均大于 0。在 3 个模板中色块面积总和的占比分别为

25%，50%和 75%。局部自适应阈值分割法分割并计算后所得的色块占比分别为 24.99%，49.99%，74.99%，该分割方法的误差小于 0.01%，对色块的分割及祛除率计算较准确。标准色块及其分割图如图 2 所示。

2.2 分割后的图像特征及 2 种分割方法的对比

分别利用 1 064 nm 和 532 nm 波长的皮秒激光对色素进行祛除，发现波长为 1 064 nm 的皮秒激光对黑色色素祛除效果较佳，而波长为 532 nm 的皮秒激光对红色色素的祛除效果较佳，利用上述 2 种分割方法对图像进行分割并做对比。图 2 为实验得到的祛除效果较好的 2 组图片，其自变量为皮秒激光能量密度。图 2(a)和 (b)分别为 1 064 nm 的皮秒激光对黑色色素祛除前后的原图及分割图；图 2(c)和 (d)为 532 nm 的皮秒激光对红色色素祛除前后的原图及分割图。经过图像处理，色素更好地从周围组织中被分割了出来，这为色素祛除的评价提供了更客观的依据，也为各种色素性疾病治疗的诊断及治疗效果的评价提供了参考依据。分割结果显示，随着激光能量密度的增加，色素的祛除效果也更好。对比大津阈值分割法与自适应阈值分割法，

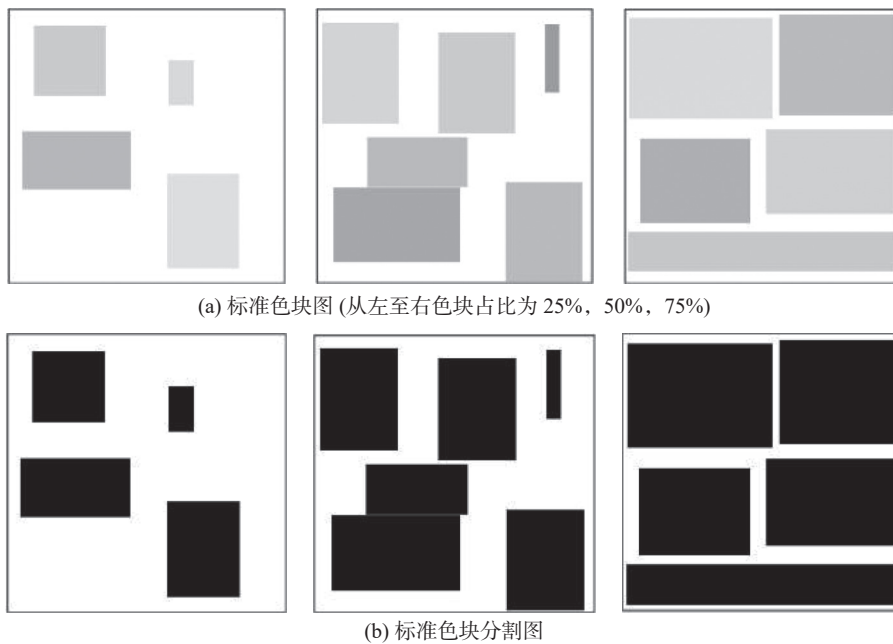


图 1 标准色块与其分割图的对比

Fig. 1 Comparison between standard color block and its segmentation diagram

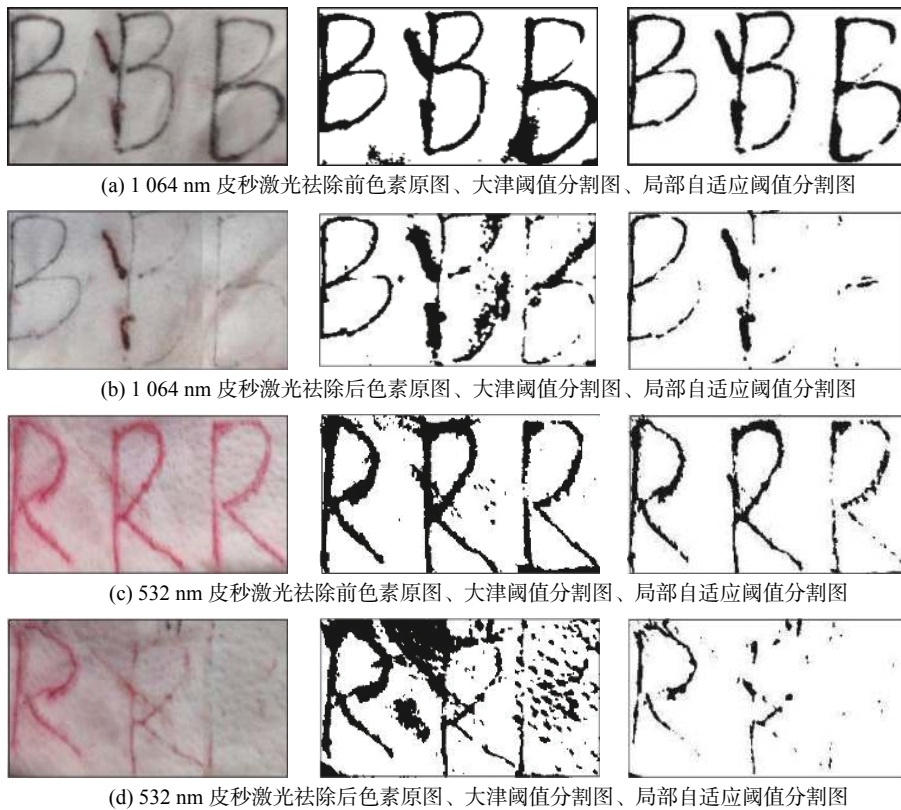


图 2 皮秒激光祛除结果

Fig. 2 Removal results of picosecond laser

发现大津阈值分割法出现了明显的过分割现象, 当分割目标不连续时, 其过分割现象更加明显, 这验证了之前有关这 2 种方法的分析。因此, 接下来将选择基于局部阈值的自适应阈值分割法对色素进行分割量化, 避免过分割现象, 以提高祛除率的计算准确性。

2.3 定量分析及祛除率计算

在验证了算法的可行性之后, 将算法应用到激光处理色素模型前后的图像上。尝试创建一个 50×50 像素大小的滑动窗口, 在图像上搜索感兴趣的区域, 并保证对激光祛除前后所拍摄的图像的选取区域是相同的。最后, 在图中背景与前景灰度相差较大的区域中选择 5 个窗口, 计算皮秒激光祛除前后的色素占比, 求出色素祛除率。图 3 所示为图像分割前后的对照图, 皮秒激光参数设置为: 光斑直径 5 mm; 频率 5 Hz。图 3(a) 为 1 064 nm 的皮秒激光祛除黑色色素前的组织原图, 3 种不同能量对应的 5 个区域的色素平均面积比分别为 43.75% (0.25 J/cm^2),

41.18% (0.50 J/cm^2), 51.20% (1.00 J/cm^2)。图 3(b) 为色素祛除后的组织图像, 3 种不同能量激光对应的 5 个区域的色素平均面积比分别为 14.10% (0.25 J/cm^2), 9.36% (0.50 J/cm^2), 7.63% (1.00 J/cm^2)。由此, 可计算得出黑色色素的祛除率分别为 67.78% (0.25 J/cm^2), 77.27% (0.50 J/cm^2), 85.10% (1.00 J/cm^2)。图 3(c) 为 532 nm 皮秒激光祛除红色色素前的组织, 3 种能量对应的 5 个区域的色素平均面积比为 43.99% (0.10 J/cm^2), 34.21% (0.25 J/cm^2), 31.19% (0.64 J/cm^2)。图 3(d) 为祛除后的组织图像, 3 种能量激光对应的 5 个区域的色素平均面积比为 33.69% (0.10 J/cm^2), 19.54% (0.25 J/cm^2), 3.74% (0.64 J/cm^2)。可得出红色色素祛除率分别为 23.41% (0.10 J/cm^2), 42.88% (0.25 J/cm^2), 88.01% (0.64 J/cm^2)。表 1 列出了 1 064 nm 与 532 nm 皮秒激光各激光能量密度对应的祛除率, 由此可见, 皮秒激光祛除色素的效果随其能量密度的增加而增强, 且使用图像处理的方法能直观清晰地计算出色素祛除率。

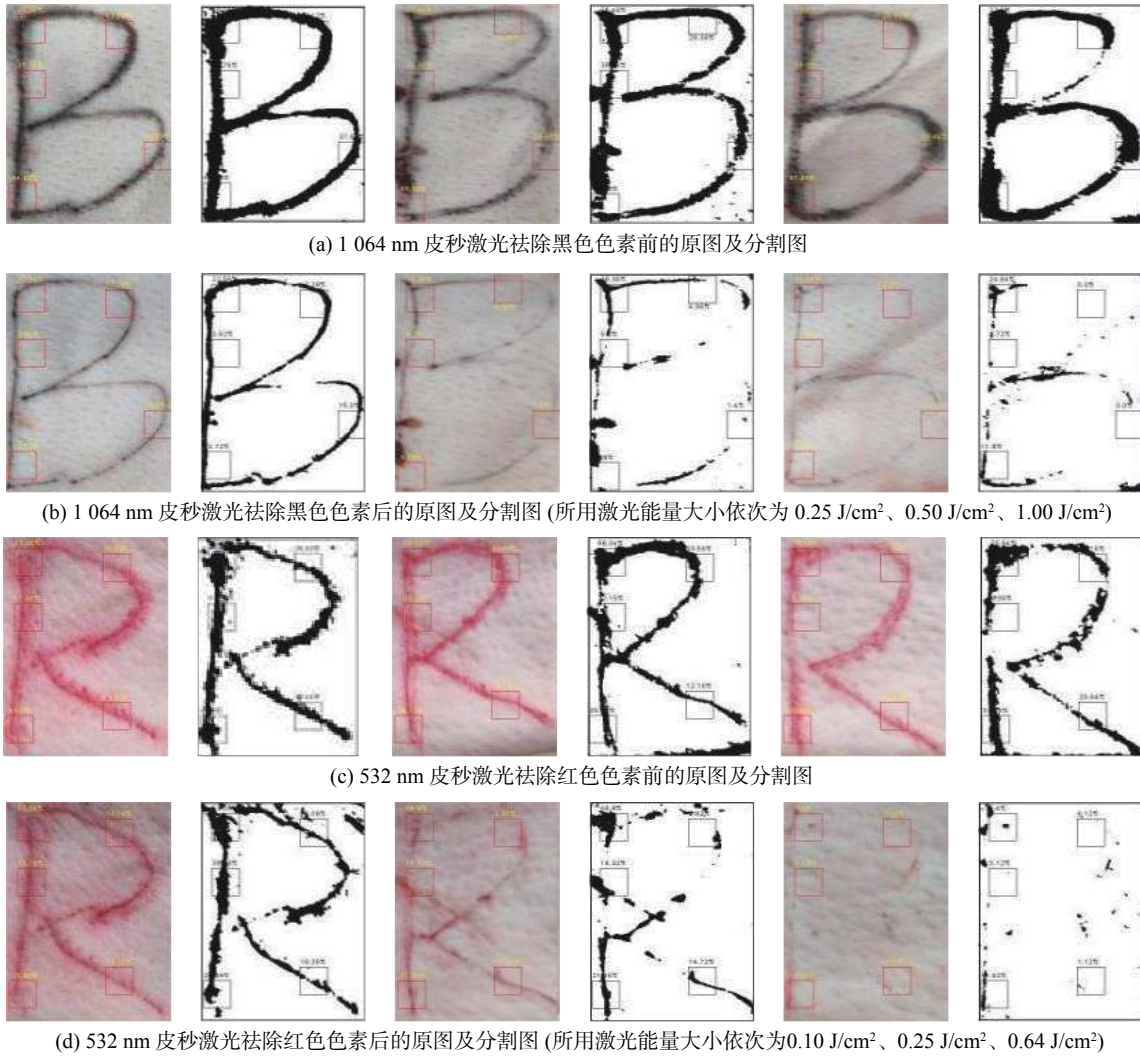


图 3 2 种波长的不同能量的激光祛除色素前后的原图及分割图对比

Fig. 3 Comparison of original and segmented images before and after removal of pigment by two kinds of lasers with different energies

表 1 激光祛除率统计

Tab. 1 Statistics of laser removal rate

激光波长/nm	色素颜色	能量密度/(J/cm ²)	祛除率/%
1 064	黑色	0.25	67.78
1 064	黑色	0.50	77.27
1 064	黑色	1.00	85.10
532	红色	0.10	23.41
532	红色	0.25	42.88
532	红色	0.64	88.01

3 总结与展望

激光器自被发明以来，便在各个领域中得到

广泛应用。随着医疗技术的进步，激光也被应用到美容与皮肤病的治疗上，并被证实其具有显著的疗效和较好的安全性^[19-21]。目前在纹身祛除及皮肤色素性疾病的治疗上应用得较广泛的是纳秒激光，其作用机理是选择性光热理论。虽然纳秒激光疗效不错，但其光热效应和光化学效应对皮肤造成损伤^[22]。而皮秒激光相较于纳秒激光，其主要的作用机制是光机械效应，它利用更小的能量可达到较好的治疗效果，治疗周期也大大缩短，故其能更安全高效地应用于纹身祛除及色素性疾病的治疗中。通过猪皮组织进行的色素祛除实验发现，1 064 nm 和 532 nm 皮秒激光的光斑、频率、能量均对色素祛除有影响，其中能

量的影响最大。但由于当前使用的是猪皮组织进行的体外实验, 故不能评估治疗方法的安全性和复发率。所以该实验所得出的适宜激光能量只能认为其治疗效果很好, 但不能保证其安全性, 需要进行下一步实验, 通过活体动物或临床数据来验证其安全性。

本文采用了图像处理的方法来对皮秒激光祛除色素的效果进行评价, 实验证明这种评价方法更为直观、便捷、简单, 便于使用者对疗效迅速做出判断。该方法不需要耗费大量的人力和时间来观察图像以做出评价, 且不需要评价人员有经验累积, 使用者能用这种方法快速评价祛除效果, 减少了病理诊断所需的人力。通过对色素祛除率的量化, 还可以实现对祛除次数的预测, 更精准地评估治疗, 避免过度治疗, 提高安全性。

但本研究是在离体猪皮组织上进行的, 所以只能对祛除效果进行评价, 不能反映活体对色素吞噬的状态, 也不能给出对应的人体不良反应结果。在接下来的研究中, 将建立更多的动物模型并制作组织染色切片, 收集临床数据, 积累其他相关疾病的数据, 以研究出更多更优秀的分割方法, 用来解决更多疾病的病理诊断问题, 争取以最少成本做出更加高效且高质量的诊断。

参考文献:

- [1] LAUMANN A E, DERICK A J. Tattoos and body piercings in the United States: a national data set[J]. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2006, 55(3): 413 – 421.
- [2] HUSAIN Z, ALSTER T S. The role of lasers and intense pulsed light technology in dermatology[J]. *Clinical, Cosmetic and Investigational Dermatology*, 2016, 9: 29 – 40.
- [3] MCKESEY J, TOVAR-GARZA A, PANDYA A G. Melasma treatment: an evidence-based review[J]. *American Journal of Clinical Dermatology*, 2020, 21(2): 173 – 225.
- [4] KONO T, SHEK S Y, CHAN H H L, et al. Theoretical review of the treatment of pigmented lesions in Asian skin[J]. *Laser Therapy*, 2016, 25(3): 179 – 184.
- [5] TORBECK R, BANKOWSKI R, HENIZE S, et al. Lasers in tattoo and pigmentation control: role of the PicoSure[®] laser system[J]. *Medical Devices: Evidence and Research*, 2016, 9: 63 – 67.
- [6] CHAN J C Y, SHEK S Y N, KONO T, et al. A retrospective analysis on the management of pigmented lesions using a picosecond 755 nm alexandrite laser in Asians[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2016, 48(1): 23 – 29.
- [7] EL-DOMYATI M, HOSAM W, NASIF G, et al. Tattoo removal by Q-switched Nd: YAG laser: an objective evaluation using histometry[J]. *Journal of Cosmetic and Laser Therapy*, 2019, 21(6): 328 – 331.
- [8] VANGIPURAM R, HAMILL S S, FRIEDMAN P M. Accelerated tattoo removal with acoustic shock wave therapy in conjunction with a picosecond laser[J]. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2018, 50(9): 890 – 892.
- [9] PINTO F, GROBE-BÜNING S, KARSAI S, et al. Neodymium-doped yttrium aluminium garnet (Nd: YAG) 1 064 nm picosecond laser vs. Nd: YAG 1 064 nm nanosecond laser in tattoo removal: a randomized controlled single-blind clinical trial[J]. *British Journal of Dermatology*, 2017, 176(2): 457 – 464.
- [10] HSU V M, ALDAHAN A S, MLACKER S, et al. The picosecond laser for tattoo removal[J]. *Lasers in Medical Science*, 2016, 31(8): 1733 – 1737.
- [11] EKLUND Y, RUBIN A T. Laser tattoo removal, precautions, and unwanted effects[M]//SERUP J, KLUGER N, BÄUMLER W. *Tattooed Skin and Health*. Basel, Switzerland: Karger, 2015: 88 – 96.
- [12] HANDLEY J M. Adverse events associated with nonablative cutaneous visible and infrared laser treatment[J]. *Journal of the American Academy of Dermatology*, 2006, 55(3): 482 – 489.
- [13] CHOI M S, SEO H S, KIM J G, et al. Effects of picosecond laser on the multi-colored tattoo removal using Hartley guinea pig: a preliminary study[J]. *PLoS One*, 2018, 13(9): e0203370.
- [14] D'ARIENZO F, DO BOMFIM F R C, SELLA V R G, et al. Dosimetry of a carbon dioxide laser for black tattoo removal in a rat model[J]. *Photomedicine and Laser Surgery*, 2018, 36(12): 667 – 675.
- [15] KUMAR H C S, SARKAR S, BHAI RANNAWAR S S, et al. An adaptive threshold based FPGA implementation for object and face detection[C]//2015 Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP). Wagnaghat: IEEE, 2015: 157 – 161.

- [16] 潘旭伟, 顾新建, 仇元福, 等. 面向知识管理的知识建模技术 [J]. 计算机集成制造系统—CIMS, 2003, 9(7): 517 – 521.
- [17] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1979, 9(1): 62 – 66.
- [18] PHUNG S L, CHAI D, BOUZERDOUM A. Adaptive skin segmentation in color images[C]//IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Hong Kong, China: IEEE, 2003.
- [19] 王雪, 杨智, 万屏, 等. 皮肤光老化信号通路及激光、强脉冲光对信号通路影响的研究新进展 [J]. *中国皮肤性病学杂志*, 2015, 29(6): 629 – 631.
- [20] 李康英. 激光医学的最新进展 [J]. *中国激光医学杂志*, 2016, 25(5): 263 – 264.
- [21] 刘孝兵, 宋印娥, 杨帆, 等. 超脉冲 CO₂ 点阵激光与微针治疗面部痤疮凹陷性瘢痕的疗效对比 [J]. *中国中西医结合皮肤性病学期刊*, 2017, 16(4): 315 – 317.
- [22] 匡薇薇, 任虹, 解春桃, 等. 调 Q 开关 Nd : YAG 激光治疗色素性皮肤病疗效及对皮肤屏障功能的影响 [J]. *中华医学美容美容杂志*, 2018, 24(5): 354 – 356.

(编辑: 李晓莉)