

文章编号:1001-5078(2014)07-0711-04

· 激光应用技术 ·

波前控制在激光照射皮肤组织中的应用

许莉莉¹, 刘磊²

(1. 首都医科大学生物医学工程学院, 北京 100069;

2. 固体激光技术重点实验室, 北京 100015)

摘要:简述了激光光束波前校正计算过程,并介绍了激光光束波前控制在血管性皮肤损伤中应用的前景,建立了利用改变激光波前来提高透过皮肤组织光强的实验装置,详细报道了波前控制技术用于激光照射皮肤组织的实验结果。实验结果表明在照射激光剂量不变的情况下,通过波前控制可以大幅度提高穿透皮肤的激光局部能量密度。

关键词:波前控制;激光光束波面;皮肤

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.07.001

Application of wavefront control in the laser dermatology

XU Li-li¹, LIU Lei²

(1. School of Biomedical Engineering, Capital Medical University, Beijing, 100069, China;

2. National Key Laboratory of Solid-State Laser Technology, Beijing 100015, China)

Abstract: The calculation of laser wavefront correction is described, and the application prospect of wavefront control in laser dermatology is introduced. The experimental device to improve transmitted intensity through skin tissue by wavefront control is established. And the experimental results of wavefront control for irradiating skin tissue by laser are reported. The experiment results show that local laser energy density through skin tissue can be greatly increased by using wavefront control when laser irradiation dose is invariant.

Key words: wavefront control; laser wave front; skin

1 引言

皮肤病是一种常见的多发疾病,多数比较轻,不影响健康。现代人对美容要求高,皮肤损伤,尤其是头面部的皮肤损伤,受到越来越多的关注。血管性皮肤损伤,例如鲜红斑痣,毛细血管扩张等,多发于人体头面部,对人体外观影响很大,还可能是一些疾病,例如青光眼的并发症。激光的产生使得这些血管性皮肤疾病更容易被治疗,这也是目前最常见的皮肤科激光治疗的适应症之一。激光刚产生不久,就被用于治疗血管性皮肤损伤。1965年Goldman报道使用红宝石激光能有效去除文身而治疗后瘢痕非常轻微^[1];之后,应用Nd:YAG激光来消除文身

及治疗表浅血管畸形^[2];20世纪70年代中期,氩激光首次被用来治疗血管性皮肤损伤^[3]。

2 激光在治疗血管性皮肤损伤中的限制

激光对血管性皮肤损伤的治疗依赖于选择性光热作用^[4-5]。选择性光热作用可看作极度的局部加热,它取决于:①波长能够达到靶结构的深部并优先为之吸收;②曝光时间少于或等于靶结构冷却所需

基金项目:北京高等学校青年英才计划项目(No. 11351108)资助。

作者简介:许莉莉(1979-),讲师,博士,主要从事医学图像处理 and 激光医学研究工作。E-mail: xvlili2001@sina.com.cn

收稿日期:2013-12-06; **修订日期:**2013-12-10

的时间;③足够的能量以破坏靶组织。激光治疗血管性皮肤损伤是利用含氧血红蛋白对一定波长的激光选择性地吸收。通过氧合血红蛋白的选择作用,血管吸收了足够的能量,使血液凝固。

激光治疗血管性皮肤损伤的疗效取决于病灶在皮肤中的深度,当病灶是处于皮肤浅表的血管时,激光治疗效果良好;而病灶是深在血管时,治疗效果欠佳。

皮肤结构复杂,对激光在其中的传输影响显著。通常情况下,激光与皮肤组织的相互作用主要表现为反射、散射、传导和吸收,如图1所示。皮肤组织的散射和吸收使得激光进入皮肤深部组织的能量密度减小,血管吸收的能量不足,血液不易凝固,激光治疗效果欠佳。通常靶向治疗皮肤内血管可用的最高能量密度受限于表皮的加热,因此不能无限制地提高治疗时的激光剂量。这要求我们采用新的技术调整激光波前,将激光更有效地传输到靶组织,确保靶位置局部能量密度足够高,以获得更好的治疗效果。

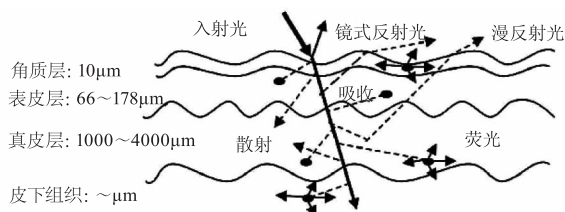


图1 皮肤组织中光的传输

3 波前控制技术能提高皮肤组织中的能量密度

为了使血管性皮肤损伤获得最佳处理,研究人员一直在不停优化治疗方法,产生了很多新的思路,其中包括增加真皮损伤与表皮损伤间的比率,即增加了真皮中局部的光子能量密度。那么,理论上就可以采用更小的激光照射剂量,从而达到对表皮一定程度地保护。

波前控制技术的出现可以显著提高激光照射在皮肤深部的局部能量密度。激光经光束整形系统后,本身具有质量很高的波前,例如球面波前。这样的波前很容易在特定位置处聚焦,产生局部能量密度极大。但在皮肤组织中的传输使得激光的波前遭到破坏,产生了畸变,无法良好聚焦。波前控制技术能将产生畸变的激光波前补偿回来,使激光波前在预期的靶组织处重新聚焦,从而实现局部能量密度极大。

4 波前校正控制方法

通常的波前控制方法是利用波前传感器测量波前畸变,然后控制驱动器改变激光光束波前校正畸变。但是本文讨论的是聚焦的激光穿透皮肤后如何通过波前控制来获得更高的激光能量,即如何获得更好的聚焦效果。这与通常的波前校正对象有两点不

同,一是当激光光束传过皮肤后会产生强烈的散射,散射光的波前不具有完整性,二是激光光束是聚焦后传过皮肤组织的,而通常情况下的激光波前是平面波。这两点不同决定了在这种情况下不能采用传统的波前控制方法,而应该采取一种非波前探测型的波前控制方法,在这种方法中,用一个光电探测器阵列(CCD)代替波前传感器,以探测器上的局部光强信号作为反馈信号,通过不断调整变形镜电压分布,最终使探测器上的局部光强最大。在寻找这个光强最大值所对应的变形镜电压矩阵过程中,可以采用多种算法,如漫步法、模拟退火法、爬山法等。其中遗传算法就是一种较好的全局寻优算法,理论表明,只要选择合适的参量,遗传算法一定可以找到问题的最优值^[6-7]。

遗传算法是一种非常强健的优化方法,它特别适用于寻找复杂的多目标问题的全局最优解,其基本原理:模拟自然界优胜劣汰的进化现象,把搜索空间映射为遗传空间,把可能的解编码成一个向量——染色体,向量的每个元素称为基因。通过不断计算各染色体的适应值,选择最好的染色体,获得最优解。图2是这种算法的流程图,可见算法执行可分解为以下几个步骤:①初始化种群;②对种群中个体的编码操作;③个体的适应度函数计算;④个体的选择操作;⑤个体间的交叉和变异操作;⑥算法中止判定条件。

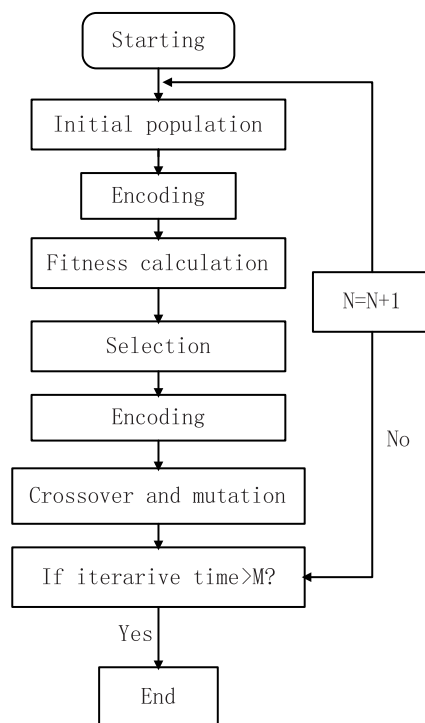
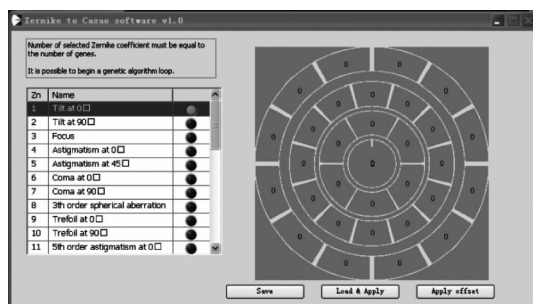


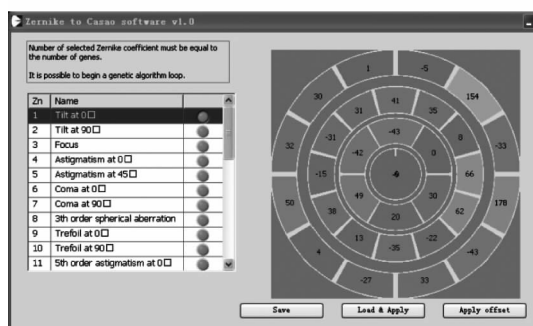
图2 遗传算法基本流程图

其中,种群由一定数量的个体组成,每个个体对应于实际问题的一个可能解,个体可以通过二进制编码,也可以通过实数编码,编码后的个体就是染色体。编码后,计算每个个体的适应度,适应度用来衡量种群中每个个体可能达到或接近于最优解的优良程度。在求解最大值的计算中,适应度越大的个体被选出参与后期交叉操作与变异操作的概率就越大。遗传算法经过6个步骤执行一次,就会产生一个新的种群,每一个新的种群称为一代。一段算法不断迭代执行以上6个步骤,直到算法中止条件满足为止,最后的个体就是对应问题的最优解。

本文采用的变形镜是由32个单元组成的,每个单元可以通过施加电压的方式产生形变,然后推动对应的镜面,产生面形变化,每个单元电压范围为 $-200 \sim 300$ V,如果电压步长为1 V,则变形镜可以有50032个不同的电压组合,每个电压组合对应于变形镜的一个面形。采用遗传算法的目的就是在50032个面形中找到最佳面形,使透过激光光强最大。将32单元组成的变形镜电压矩阵作为个体,将电压值作为个体对应的染色体的一个基因组合,将CCD反馈的光强作为适应度函数,利用遗传算法可以逼近最佳驱动器电压组合,也就是找到最佳面形。



(a) 单元位移均为零



(b) 单元位移不为零

图3 实验中所用的32单元变形镜

图3所示为实验中所用32单元变形镜,(a)图中每个单元均无位移,(b)图则显示了经上述计算后,控制系统对每个单元的控制电压。变形镜位移

后,使得经由皮肤组织的激光光斑强度增大,实验结果显示在下文中。

5 激光照射猪皮组织实验结果

图4为波前控制系统的布局图,主要由光强探测器,32单元变形镜和波前控制系统组成。由激光器出射的经过光束整形系统的激光,经变形镜反射和皮肤组织透射后被光强探测器接收,光强探测结果反馈给遗传算法,获得下一步的控制信号,这个控制信号将驱动变形镜不断变化,最终使变形镜产生能够补偿皮肤组织畸变的表面面形,实现对波前的实时闭环控制。实验中采用的激光波长632.8 nm,变形镜镜面孔径80 mm,有效通光口径50 mm,响应频率2.51 kHz。

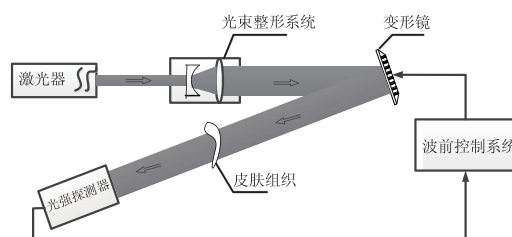


图4 波前控制系统布局图

实验中我们采用解冻的猪皮组织作为实验样本。实验前,将猪皮组织中的脂肪层尽量去除,剩下含有角质层、表皮和真皮及少量脂肪的猪皮样本。

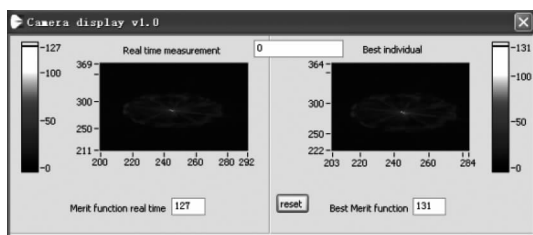
本文给出了波前控制前后,激光照射在猪皮的不同厚度处的测量结果,由于结果主要用于对比波前控制前后的强度,文中未列出光强单位。结果如表1所示。

位置记号	厚度/mm	外观	调整前最高光强	调整后最高光强
1	0.756	接近透明	131	504
2	1.128	几乎不透明	76	178

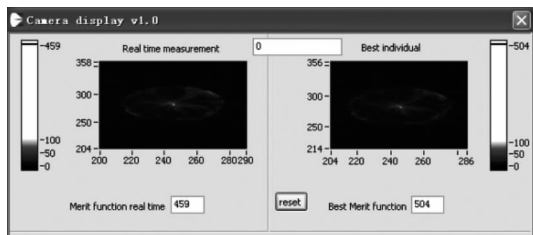
图5(a)为1位置处,未做波前控制,即变形镜的每个子镜位移量均为零,整个变形镜相当于一个平面镜,光强探测器采集的激光光斑信息。在实时采集过程中,单次测量到的最高光强为131。经光强探测器反馈控制后,单次采集到的激光光斑最高光强为504,如图5(b)所示。波前控制系统的调整过程如图5(c)所示。

图5(c)表明,波前控制系统对波前的控制是多次迭代逐步实现的。尽管加入波前控制系统后,对最高光强的调整未达到数量级上的变化,且强度仍有起伏。但加入波前控制后的最高光强平均水平仍显著高于未加入波前控制系统前。在进行到20多次迭代后,透射光斑中的最高强度就已经跟最终结果一致,

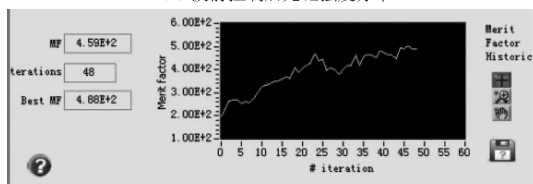
随后透射光斑的最高强度还有所降落。这是由于波前控制系统在透射光斑的最高光强未趋于平稳前,并不能主动判断迭代结束,在下次迭代的过程中可能会造成光强的降低。一旦光强趋于平稳,再做多次迭代也无非是最高光强在平均值附近做微小的起伏。



(a) 波前控制前光斑强度分布

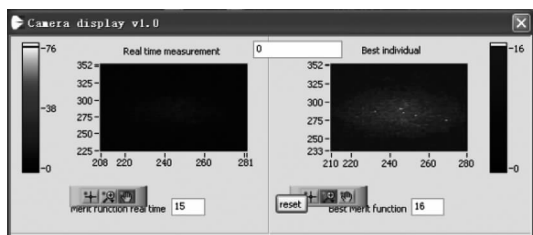


(b) 波前控制后光斑强度分布

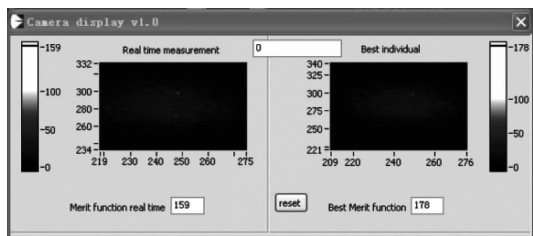


(c) 波前控制迭代过程

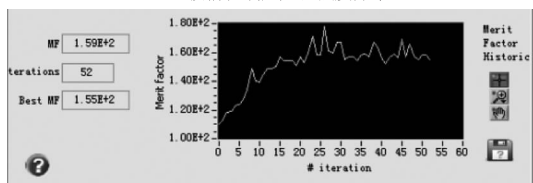
图5 猪皮组织1位置波前控制前后光强变化



(a) 波前控制前光斑强度分布



(b) 波前控制后光斑强度分布



(c) 波前控制迭代过程

图6 猪皮组织2位置波前控制前后光强变化

图6给出与图5类似的结果。由于2位置猪皮组织的厚度有所增加,波前控制前后激光的透射光强均有减弱。但经过波前控制后,透射光强的最高强度仍然比未加波前控制前有较大提高。

6 结论

本文报道了我们将波前控制系统用于激光照射皮肤组织的实验结果,结果表明经过波前控制激光经皮肤组织的出射光强有显著改善。这个结果在临床采用激光照射治疗皮肤深部的血管性损伤上有重要的意义。如能预先检测出皮肤中血管性损伤的深度,在激光治疗系统中,加入波前控制系统,使损伤位置的激光照射能量处于局部最大,就能在不增加激光照射剂量,保护表皮的前提下改善皮肤深部血管性损伤的治疗效果。

参考文献:

- [1] L Goldman, R Wilson, P Hornby. Radiation from a Q-switched ruby laser: effect of repeated impacts of power output of 10 megawatts on a tattoo of man[J]. J Invest Dermatol, 1965, 44: 69-71.
- [2] L Goldman, G Nath, G Schindler, et al. High power neodymium-YAG laser surgery[J]. Acta Dermato Venereologica (Stockholm), 1973, 53: 45.
- [3] DB Apfelberg, MR maser, H Lash. Argon laser management of cutaneous vascular deformities: a preliminary report[J]. West J Med, 1976, 124: 99-101.
- [4] RR Anderson, JA Parrish. Microvasculature can be selectively damaged using dye laser: a basic theory and experimental evidence in human skin[J]. Lasers Surg Med, 1981, 1: 263-276.
- [5] RR Anderson, JA Parrish. Selective photothermolysis: precise microsurgery by selective absorption of pulsed radiation[J]. Science, 1983, 220: 524-527.
- [6] YANG Ping, XU Bing, JIANG Wenhan, et al. Study of genetic algorithm used in an adaptive optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(9): 1628-1632. (in Chinese)
- [7] 杨平, 许冰, 姜汉文, 等. 遗传算法在自适应光学系统中的应用[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1628-1632.
- [8] YANG Ping, AO Mingwu, LIU Yuan, et al. Adaptive optics genetic algorithm based on zernike mode coefficients[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 3: 367-372. (in Chinese)
- [9] 杨平, 敖明武, 刘渊, 等. 基于泽尼克模式系数的自适应光学遗传算法[J]. 中国激光, 2008, 3: 367-372.