

文章编号: 1001-3806(2012)03-301-06

选区激光熔化直接成型个性化舌侧托槽的研究

孔卫东¹ 王淑范² 王迪³ 卢建斌³ 杨永强³

(1. 暨南大学附属第一医院 口腔科, 广州 510010; 2. 华南理工大学医院 口腔科, 广州 510640; 3. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

摘要: 为了探讨应用选区激光熔化快速成型技术直接制造个性化金属舌侧托槽的可行性, 采用3维激光扫描仪采集与重建牙颌模型数据, 并以该数字模型为基础, 应用3维软件进行了个性化舌侧托槽的CAD设计, 再通过自主研发的选区激光熔化快速成型机直接制造出个性化金属舌侧托槽, 并对托槽的直接成型质量进行了理论分析和实验验证。结果表明, 3维激光扫描仪获得的牙颌模型数据可以满足个性化舌侧托槽设计要求; 应用选区激光熔化技术能够制造出与实际牙颌模型相一致的个性化舌侧托槽, 取得了个性化前牙槽沟宽度为 $0.471\text{mm} \pm 0.009\text{mm}$ 数据, 前牙槽沟宽度CAD设计值为 0.460mm , 两者间没有统计学上的差异 ($p > 0.05$)。这一结果对选区激光熔化技术直接制造个性化金属舌侧托槽的实际应用是有帮助的。

关键词: 激光技术; 选区激光熔化; 个性化设计与制造; 舌侧托槽

中图分类号: TN249; TG665 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.004

Preliminary study on direct manufacturing of customized lingual brackets by selective laser melting

KONG Wei-dong¹, WANG Shu-fan², WANG Di³, LU Jian-bin³, YANG Yong-qiang³

(1. Department of Stomatology, the First Affiliated Hospital of Jinan University, Guangzhou 510010, China; 2. Department of Stomatology, Hospital of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: In order to investigate the feasibility of direct manufacturing customized lingual brackets by selective laser melting, firstly, a 3-D scanner was used to acquire and reconstruct teeth model, which was based on the customized lingual brackets designing with 3-D software; then customized metal lingual brackets were directly manufactured with a self-developed selective laser melting apparatus; finally the slot width of the bracket on front teeth was measured. The analysis shows that the teeth model obtained from the three dimensional laser scanner can meet the requirements for customized lingual brackets designing, and customized metal lingual brackets that can well fitted with teeth model can be produced precisely by selective laser melting process. Compared with the designed value 0.460mm on CAD model, the slot width of the front teeth was measured $0.471\text{mm} \pm 0.009\text{mm}$. The research proves it is feasible to manufacture precise and well fitted customized metal lingual brackets by means of selective laser melting technique.

Key words: laser technique; selective laser melting; customized design and manufacturing; lingual brackets

引言

选区激光熔化技术(selective laser melting, SLM)是在选区激光烧结技术(selective laser sintering, SLS)

的基础上发展起来的一种直接成型金属零件的快速制造(rapid manufacturing, RM)方法,是由快速成形(rapid prototyping, RP)技术发展而来的最新制造技术^[1]。SLM技术采用快速成形的基本原理,即先采用计算机设计出零件的3维计算机辅助设计(computer aided design, CAD)模型,然后通过专用软件对3维模型进行切片分层,得到各截面的轮廓数据,导入快速成形设备,设备根据轮廓数据,控制激光束选择性地熔化各层的金属粉末材料,逐步堆叠成3维金属零件^[2]。SLM的最大特点是成型过程中金属粉末在理论上完全熔化,产生冶金结合,成型的金属零件只需简单后处理甚至可以直接使用。整个成型过程几乎不受零件复杂程

基金项目: 广东省教育部产学研结合基金重点资助项目(2010A090200072); 广东省自然科学基金资助项目(8151063201000071); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(21609503)

作者简介: 孔卫东(1965-),男,副教授,主要研究领域为口腔正畸学及口腔材料。

E-mail: tkongwd@jnu.edu.cn

收稿日期: 2011-10-19; 收到修改稿日期: 2011-11-04

度的限制,因而 SLM 技术具有很大的柔性,特别适合于个性化精密金属零件的直接制造。

自上世纪 70 年代 ORMCO 公司推出第 1 代 Kurz 舌侧托槽以来,舌侧正畸治疗逐步引起口腔正畸界的关注。随着实验与临床研究的深入开展,舌侧矫治技术发展至今已日趋成熟。其中个性化舌侧矫治技术能够较好地克服传统舌侧托槽在矫正牙齿时容易出现定位不准确、重新粘结困难及精细调整阶段难度加大等问题^[3-4]。大量的临床实践也证实了个性化舌侧矫治技术有效性和可行性。在我国也有使用个性化舌侧正畸技术的临床治疗报告。然而,目前采用计算机辅助设计和计算机辅助制造(computer aided manufacturing, CAM)结合传统铸造方法生产制作的个性化舌侧矫治器耗时长、步骤繁多复杂,导致矫治器产能过低、费用太高、病人轮候时间长等缺点。随着快速成型技术的不断改进,计算机辅助制造方法为直接加工金属个性化矫治器提供了可能性,减少了铸造法的中间环节。本研究在计算机辅助设计基础上,探讨应用选区激光熔化快速成型技术直接加工制造个性化金属舌侧托槽的可行性。

1 个性化舌侧矫治器设计与弓丝弯制

1.1 牙颌模型数据的采集与重建

将排牙后牙颌模型(见图 1)固定于 Laserdent 非



Fig. 1 A set-up jaw model

接触式五轴自转 3 维激光扫描仪工作台上,启动扫描程序,进行全方位扫描,直到激光覆盖整个牙模表面,选择计算机功能让扫描影像转换成数据,扫描结果以三角面片格式(stereolithography interface, STL)开放 3 维格式输出,在计算机上获得与原牙颌模型一致的数字化牙颌模型(见图 2)。非接触式五轴全自动旋转平



Fig. 2 STL 3-D jaw model rebuilt by laser scanner

台可以让激光触及任何角度位置包括倒凹等,不损伤模型,每次可扫描半口牙颌模型。激光精度达 0.020mm。

1.2 个性化舌侧托槽的 CAD 设计

在 Pro/Engineer 软件环境下,分别进行 CAD 个性化舌侧底板设计及托槽体部设计。前牙为垂直向槽沟,前磨牙、磨牙为水平向槽沟。

将 3 维扫描牙颌模型的 STL 格式数据导入 Pro/Engineer 软件计算机,在 Pro/Engineer 软件环境下,分别进行 CAD 个性化舌侧底板设计及托槽体部设计。首先是舌侧底板的设计,按牙齿舌侧面画出底板覆盖范围,设计与牙齿舌侧面解剖形态均匀一致、厚度为 0.50mm 个性化底板。个性化托槽底板与牙齿舌侧面基本吻合,之间仅有少许空隙。底板面积根据牙齿的个别形态设计,可以使底板与牙齿接触面积最大化,有利于加强粘结力(见图 3)。其次是托槽体部设计,将槽沟大小确定为 0.46mm(槽沟尺寸大小可以根据实际需要任意设计),按照牙弓形态确定托槽体的厚度,在符合直丝弓设计原理前提下,尽量减少托槽体部的厚度,结扎翼及牵引沟设计原则是既要减少托槽厚度又要保障临床容易操作。前牙为垂直向槽沟(见图 4),前磨牙和磨牙为水平向槽沟(见图 5)。依据牙弓及牙冠形态将预成的托槽体部(见图 6)置于托槽底板适合位置上,使所有牙列槽沟置于同一个平面上,最终确定出每个牙齿的槽沟高度、前倾角及转矩值(见图 7)。最后,导出个性化舌侧托槽的 CAD 模型(见图 8),保存为适合快速成型使用的 STL 格式文件。



Fig. 3 Customized bracket's base

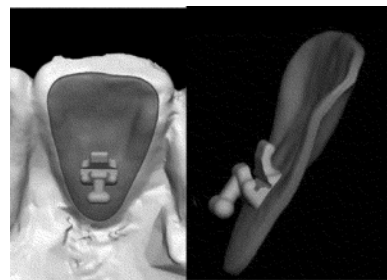


Fig. 4 The slot direction of the front teeth bracket is vertical

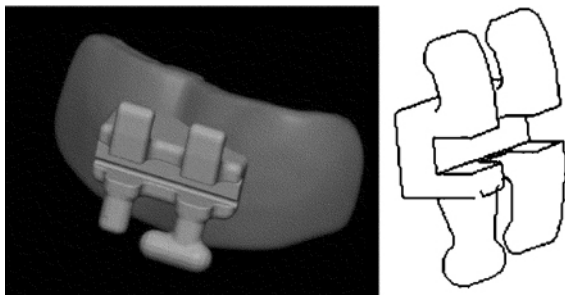


Fig. 5 The slot direction of the molar and premolar are horizontal



Fig. 6 The designed brackets' body



Fig. 7 The bracket's slot surfaces are on same level



Fig. 8 3-D model of the lingual brackets

1.3 个性化舌侧弓丝的 CAD 设计与制作

将牙列上所有托槽槽沟置于同一个平面上,依据数字化牙颌模型的牙弓形态及槽沟位置,在 CAD 中绘制出只含第一序列曲的弓形图,再依据该弓形图弯制出各种能够实际应用矫治弓丝。

依照直丝弓矫治技术原理,全尺寸矫治方丝与托槽结扎后,能够使牙齿获得准确的 3 维控制。因此,在 CAD 设计时,将所有的舌侧托槽沟排列在同一个平面上,依据所定平面,通过补偿托槽体部厚度来确定牙列中每个牙齿的前倾角和转矩角。再按牙弓形状及槽沟位置绘制出仅含第一序列曲个性化弓形图(见图 9),消除了第二序列和第三序列曲的弯制。临床上可以根

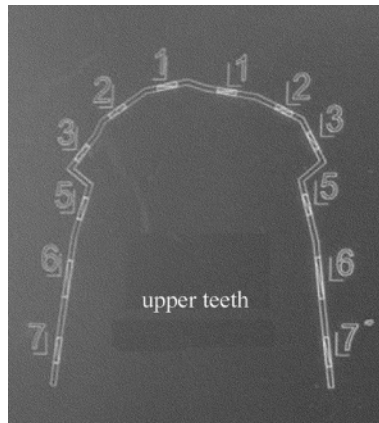


Fig. 9 Customized arc wire

据设计弓形图弯制出各种所需的个性化弓丝。

2 个性化舌侧托槽的选区激光熔化直接成型

2.1 实验设备与材料

2.1.1 选区激光熔化快速成型设备 舌侧托槽成型采用自主研发的 Dimetal-280 快速成型设备。SLM 快速成型技术包括 3 维 CAD 模型生成、STL 文件转换、切片、扫描成型、后处理等基本流程。成型时,将所设计的 3 维模型进行切片离散及扫描路径规划,得到可控制激光束扫描的切片轮廓信息。随后,计算机逐层调入切片轮廓信息,通过扫描振镜,控制激光束选择性地熔化金属粉末,逐层堆积成与模型相同的 3 维实体。由于金属材料在熔化过程中易发生氧化,因此,选区激光熔化过程在通有保护气体的密封成型室中进行。Dimetal-280 的主要工艺参量见表 1。

Table 1 Main process parameters of Dimetal-280

item	parameter	item	parameter
laser wavelength	1090nm	focal length	163mm
peak laser power	200W	largest part size	280mm × 280mm × 300mm
beam quality M^2	≤1.1	scanning speed	50mm/s ~ 2000mm/s
spot diameter	70μm	layer thickness	20μm ~ 50μm

2.1.2 实验材料 本研究中的实验使用雾化 - 500 目 316L 球形不锈钢粉末,粉末主要成分见表 2。粒度分布为: 粒径小于 15μm 的质量分数为 0.5, 粒径小于 30μm 的质量分数为 0.9, 平均粒径是 17.11μm(见图 10); 粉末的松装密度是 4.04g/cm³。球形不锈钢粉末具有很好的流动性。316L 不锈钢为奥氏体不锈钢,总体性能优良,在工业与医疗领域有广泛应用。采用 A3 钢加工成 100mm × 100mm × 100mm 的正方块作为基板,采用氮气作为保护气体。

Table 2 Mass fraction of the main compositions of 316L stainless steel

C	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	O	Fe
0.0003	0.175	0.1206	0.0206	0.0086	0.003	0.0013	balance

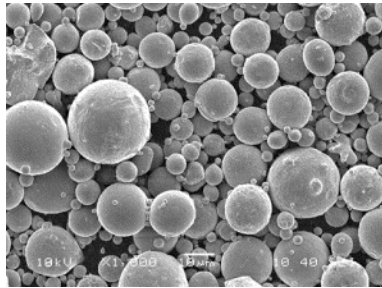


Fig. 10 SEM topography of -500 mesh size 316L stainless steel powder

2.2 个性化金属舌侧托槽直接制造工艺

2.2.1 选区激光熔化制造流程 选区激光熔化直接成型托槽的流程如图 11 所示。首先将设计好的 CAD 个性化舌侧托槽的 STL 格式文件载入 MAGICSL3.0 软件进行模型摆放、支撑添加和分层切片,再使用华南理工大学自主开发的扫描路径生成软件 ScanPath 生成激光扫描路径。将托槽切片模型与激光扫描路径文件调入 Dimetal-280 系统按照设置好的工艺参量控制激光功率、扫描速度和层片厚度,逐层熔化、堆积出个性

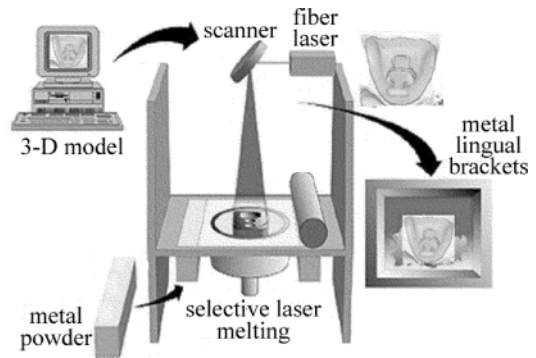


Fig. 11 Schematic diagram of selective laser melting process

化托槽。成型后,由基板上取下托槽,去除支撑,进行打磨抛光等后处理程序。

2.2.2 个性化托槽选区激光熔化优化工艺 个性化舌侧托槽有多个制造难点,包括个性化底板悬垂面的成型、槽沟尺寸精度和托槽致密度等方面。经过长期的基础工艺研究和实验试制,得到 SLM 个性化托槽优化后的加工参量如表 3 所示。

Table 3 Optimized SLM process parameters for customized metal brackets

laser power/W	layer thickness/ μm	spot diameter/ μm	scanning strategy	scanning speed/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	spot compensation/mm	scanning space/mm
150	25	70	(1) contour scan	300	0.06	—
			(2) $x-y$ orthogonal + inter-layer stagger	600	0.08	0.08
			(3) surface re-melting	800	0.06	0.08

SLM 与其它快速制造工艺一样不可避免地存在台阶效应,同时,金属粉末快速成型时存在 z 向(堆积方向)激光能量穿透及金属凝固引起的 z 向坍塌问题,为避免 z 轴方向的穿透收缩及台阶效应对托槽槽沟质量的影响,在 MAGICSL 中对托槽进行了特定方位的摆放:将槽沟垂直于基板(见图 12),与逐层堆积的方向平行。由于在成型时,槽沟方向被设置为平行于 z 轴方向,在保证槽沟尺寸精度的同时,使部分托槽的个性化底板在成型时成为了悬垂结构。悬垂结构在 SLM 成型过程中容易出现表面悬垂物和翘曲变形等缺陷,经过实验发现,激光功率/扫描速率(P/v)对成型时悬垂面上激光深穿透和热应力变形有重要作用,从而影响了 SLM 成型悬垂面的能力(见图 13)。

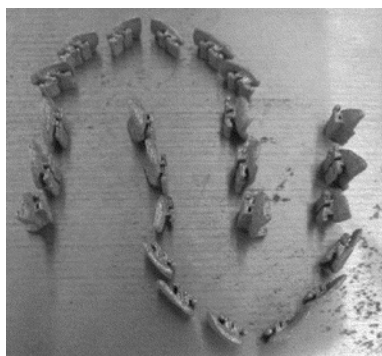


Fig. 12 Placement of SLM customized brackets

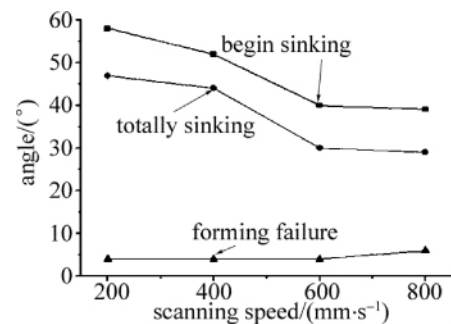


Fig. 13 Effect curve of different scanning speed on overhanging structure (laser power $P = 120\text{W}$, layer thickness $h = 25\mu\text{m}$)

故在个性化舌侧托槽成型时,选择了悬垂面成型能力相对较好的参量($P = 120\text{W}$, $v = 600\text{mm/s}$, $P/v = 0.2\text{J/mm}$)。

为避免成型件边缘“凸点累积”^[5]效应对成型面尺寸精度的影响,采取了复合扫描策略进行成型以提高成型件的尺寸高度(见图 14)。首先,每一层开始扫描时,先进行轮廓扫描,选用扫描线熔道宽度较稳定的扫描速率 300mm/s ,并以其宽度平均值的 $1/2$ (0.06mm) 作为光斑补偿值 l_c ;轮廓扫描后,用 $x-y$ 正交 + 上下层交错的扫描方式填充轮廓内部,扫描间距取 0.08mm ,使扫描线熔道之间充分搭接,光斑补偿 $l_{xy} = 0.08\text{mm}$,大于 l_c ,不影响外部轮廓,如图 14 所示。

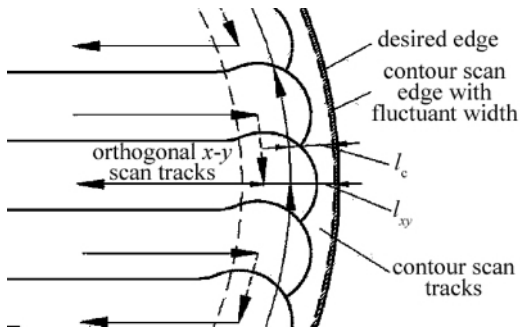


Fig. 14 Schematic diagram of compound scanning strategy

为弥补激光能量不足带来的致密度下降,还在 SLM 成型过程加入了激光表面重熔(laser surface re-melting, LSR)^[6]工艺。在每层扫描结束后,将该层扫描线偏转 90°,以相对 SLM 快的速度和大的间距对表面进行重熔。每一道重熔的扫描线,垂直扫过 SLM 层的扫描线,重新熔化 SLM 扫描线顶峰,并填平相邻或多道扫描线之间的沟壑,使扫描层表层趋于平滑致密,令下一层铺粉均匀降低扫描时产生微孔的可能性(见图 15)。

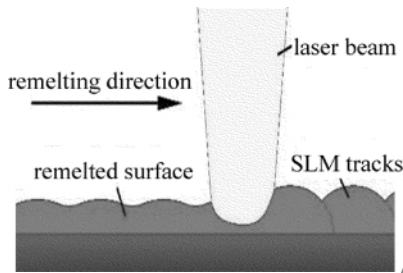


Fig. 15 Schematic diagram of laser surface re-melting (LSR)

2.3 个性化托槽选区激光熔化成型效果

采用优化用的工艺直接制造的个性化托槽,精度高、致密度高、力学性能优良,达到了各项使用要求。在个性化悬垂底板的形状精度方面,z 轴方向上的尺寸误差小于 0.1mm,水平方向上误差小于 0.01mm,对设计模型非常接近(见图 16)。在槽沟宽度上,应用日本生产 3 维坐标测量仪在放大 50 倍下测量个性化舌侧金属托槽槽沟宽度为 $0.471\text{mm} \pm 0.009\text{mm}$ (见图 17),CAD 设计值为 0.460mm,两者间没有统计学上的

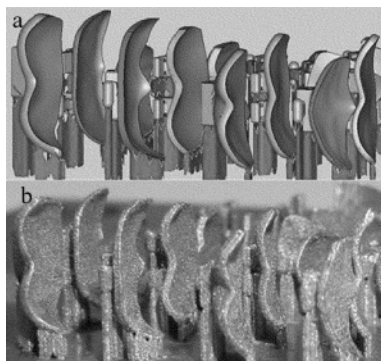


Fig. 16 Comparison between sliced model and fabrication results
a—sliced model b—fabrication results

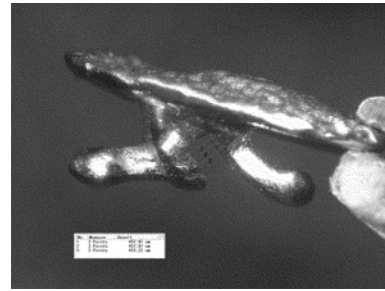


Fig. 17 Slot width measurement of the front teeth

差异($p > 0.05$)。在致密度方面,通过排水法测得致密度达到 99.36%。抛光后表面致密光滑,没有明显的微孔,表面粗糙度为 $20\mu\text{m}$ (见图 18);力学性能(抗拉强度、表面硬度)优于铸造件(见表 4)。最后,将制备好的个性化金属托槽直接粘接到实际牙颌模型上,可见个性化的底板与实际模型牙齿的舌面基本吻合(见图 19)。



Fig. 18 Customized lingual brackets fabricated by SLM after hand-polishing

Table 4 Comparison of the mechanical properties between SLM and casting parts

samples	tensile strength/MPa	elongation rate/%	micro-hardness/HV
sample 1	636	35	265
sample 2	624	31	258
sample 3	582	29	270
casting part	>480	39	>220



Fig. 19 Direct adhesion of lingual brackets to tooth

3 结果与讨论

德国 WIECHMANN 医师^[7]率先将计算机辅助设计和制造技术应用于舌侧正畸托槽及弓丝的生产加工上,研制开发出个性化舌侧矫治系统,该系统具有托槽厚度薄、患者舒适度高、托槽脱落率低、脱落托槽直接

再粘结及容易实现精细调整等优点,简化和降低了舌侧矫治技术的难度,有效地克服了传统舌侧矫治系统固有的局限性^[8],实现了医师操作方便、患者舒适美观的特点,现已成为当今欧洲正畸临床的主流舌侧矫治技术。我国也有使用该技术的报告^[9]。但使用此产品存在价格昂贵、制作时间长、步骤过于繁琐、运输及个别托槽因遗失重新定制周期长等缺点,影响了该项技术在国内普及与推广。其中此项技术使用快速成型技术制造的个性化舌侧托槽蜡型成型件,虽有良好的外形精度,但不具备机械强度和机械性能,还需要经过铸造才能得到金属件,工序较为繁琐,其精确性会因操作人员的不同存在较大差异。因此,为了能够获得更高质量的舌侧矫治效果,除了个性化舌侧矫治器制作尽早实现国产化外,另一个途径应该是简化生产制作流程,克服制作时间过长、精度难以控制的缺点。

应用快速成型技术将虚拟的 CAD 舌侧托槽转为实体舌侧托槽是 CAM 技术的重要环节。快速成型技术原理是通过分层软件将 CAD 生成的 3 维虚拟模型分解为 2 维的细微薄层,在激光束扫描作用下,将液态或粉状物质分层固化堆积成与原设计相符合的实体原型,其过程等同于 3 维激光打印机的工作原理。激光快速成型技术与诸多传统的加工方法比较有其独特的优越性,可以制成任意几何形状的复杂零件,不受传统机械加工方法中刀、模具的成型限制,故快速成型技术不仅在工业设计与制造上应用广泛,而且在口腔医学应用方面也呈快速成长之势^[10]。目前个性化托槽制作较为成熟的方法是根据 CAD 设计的虚拟托槽模型文件,利用专用快速成型设备将液状树脂(或蜡)转化为固体的个性化树脂(或蜡型)舌侧托槽,再结合技术成熟的传统铸造方法制造出个性化金属托槽实体。显然,现行的个性化舌侧托槽制造工序较为繁琐,生产流程长,受多种控制环节的影响,如果能减少制作树脂(或蜡型)中间环节,直接运用快速成型设备制造出个性化金属托槽实体,无论对节约成本还是提高精确度都有利。因此,由金属粉末直接成型制造个性化舌侧托槽的快速成型技术为舌侧矫治技术的开展与提高有现实意义。

随着计算机辅助设计和计算机辅助制造技术发展,将计算机设计的特殊零件直接制造转化为精密的金属零件已经成为可能。国内外科研机构就其在相关领域已经进行了有益探索^[11],实现了应用选区激光熔化技术直接制作出精密的金属零件。选区激光熔化是一种新型的快速成型技术,它是集计算机辅助设计、数控技术、快速成型于一体的先进制造技术,此项技术能将金属粉末直接成型高致密、高精度金属零件。选区

激光熔化方法利用直径 $70\mu\text{m} \sim 80\mu\text{m}$ 的聚焦激光束,把金属或合金粉末选区逐层熔化,堆积成一个冶金结合、组织致密的实体,其外形不需进一步加工,精密零件经抛光或简单表面处理可直接使用。选区激光熔化技术克服了选区激光烧结技术不能采用纯金属粉末、成型致密性及力学性能差、后处理工艺复杂的缺点,使用的材料能扩展到多种纯金属或合金材料,成型件相对密度接近或达到 100%,尺寸精度及表面粗糙度好。实验中所采用的激光快速成型系统为自主研发的选区激光熔化快速成型机 Dimetal-280,实验表明,应用该设备所制造的金属零件的致密度接近 100% 的实体,表面粗糙度为 $20\mu\text{m}$,尺寸误差在 $\pm 0.15\text{mm}$ 以内。本实验中根据 CAD 设计的虚拟托槽模型文件,利用自主研发的选区激光熔化快速成型设备将金属粉末直接转化为金属质的个性化舌侧托槽,省略了先制造蜡型再应用传统铸造方法制造出金属托槽实体过程,既提高了效率又减少工作流程过长的误差。将个性化金属舌侧托槽及按设计图弯制的弓丝放置于原设计牙颌模型上,结果表明,CAD 设计个性化舌侧托槽、个性化弓丝图都与原石膏牙颌模型上的个性化金属舌侧托槽及个性化弓丝基本一致(见图 20),达到了设计制造要求。

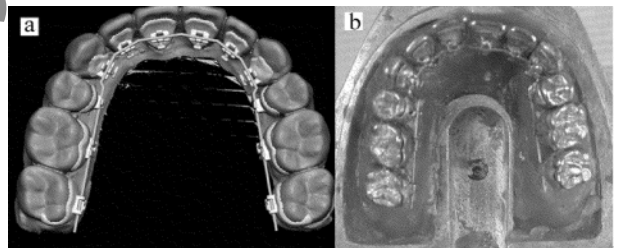


Fig. 20 Customized lingual braces(arc wire , brackets)
a—CAD model b—SLM fabricated parts

4 结论

运用计算机 CAD 技术进行个性化舌侧托槽与弓形图的设计,根据扫描后获得的牙齿舌侧解剖形态设计托槽底板的形态与厚度,然后将预成的槽沟体部放置于底板上,调整厚度与高度使所有槽沟均位于同一水平面上,从而获得不同牙齿的个性化数字托槽,并将此数字托槽通过选区激光快速成型技术制作出精密的金属托槽。研究结果表明,所得的个性化托槽底板通过能够与原设计牙齿的舌面基本相吻合,直接粘按时容易将托槽放在预先设计的位置上,有效消除了传统舌侧托槽需要依赖粘结剂厚度补偿的弊端,既可使托槽更好保持口腔卫生,又能够有效克服传统舌侧托槽脱落后重新粘接困难的缺点。按照实际需要设计槽沟方向及大小,前牙为垂直槽沟,后牙为水平槽沟,此设

(下转第 311 页)

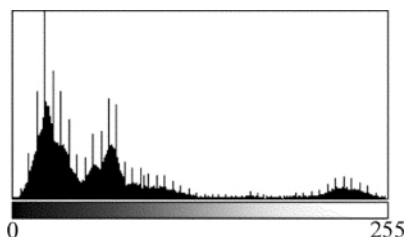


Fig. 13 Histogram of the optimized algorithm

5 结论

该算法经过理论推导与仿真实验证明切实可行,其处理所需内存空间大幅度减小,且处理后的图像质量等同于标准平台直方图均衡效果,同时算法处理速度快,十分适用于基于 DSP/FPGA 等片内内存较小的实时成像系统。

参考文献

- [1] VICHERS V E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery [J]. *Optimized Engineering*, 1996, 35(7): 1921-1926.
- [2] GONZALEZ R C, RICHARD E W. *Digital image processing* [M]. 2nd ed. New Jersey, USA: Prentice Hall, 2002: 287-290.
- [3] WANG B J, LIU Sh Q, ZHOU H X, *et al.* Self-adaptive contrast

- enhancement algorithm for infrared images based on plateau histogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, 34(2): 299-301 (in Chinese).
- [4] LIU Zh C, LI Zh G. A review on image process technique of thermal imager [J]. *Infrared Technology*, 2000, 22(6): 27-32 (in Chinese).
- [5] LAI R, YANG Y T, WANG B J, *et al.* A quantitative measure based infrared image enhancement algorithm using plateau histogram [J]. *Optics Communications*, 2010, 283(21): 4283-4286.
- [6] CHANDRASHEKAR M, NARESH K U, SUDERSHAN R K, *et al.* FPGA implementation of high speed infrared image enhancement [J]. *International Journal of Electronic Engineering Research*, 2009, 1(3): 279-285.
- [7] MUNTEANU C, ROSA A. Gray-scale image enhancement as an automatic process driven by evolution [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, 34(10): 1292-1298.
- [8] BRADSKI G, KAEHLER A. *Learning OpenCV: computer vision with the OpenCV library* [M]. Sebastopol, California, USA: O'Reilly Media, 2008: 151-161.
- [9] GADY A. *Introduction to programming with OpenCV* [M]. Chicago, USA: Illinois Institute of Technology, 2006: 132-189.
- [10] LAGANIERE R. *OpenCV2 computer vision application programming cookbook* [M]. Birmingham, UK: Packt Publishing, 2011: 268-298.
- [11] LIU H T, WANG Zh Zh, LI Ch, *et al.* Numerical simulation analysis for detectability of spaceborne lidars [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6): 614-617 (in Chinese).

(上接第 306 页)

计有利于前后牙齿的滑动并更容易使弓丝入槽,保证了前牙转矩控制可靠性及前后牙滑动关闭间隙的灵活性。因此,采用选区激光熔化直接制造方法,可以根据个性差异实现定制化舌侧托槽的制造,而且制造精度高,使托槽可以尽量贴合牙表面,能够满足个性化舌侧矫治设计要求。

参考文献

- [1] MUMTAZ K A, ERASENTHIRAN P, HOPKINSON N. High density selective laser melting of waspaloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 2008, 195(1/3): 77-87.
- [2] KRUTHA J P, FROYENB L, van VAGERBERGHA J. Selective laser melting of iron-based powder [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1/3): 616-622.
- [3] SHAPACK N, GERON S, FLORIS I. Bracket placement in lingual vs labial systems and direct vs indirect bonding [J]. *Angle Orthodontist*, 2007, 77(3): 509-517.
- [4] PAULS A H. Therapeutic accuracy of individualized brackets in lingual orthodontics [J]. *Journal of Orofacial Orthopedics*, 2010, 71(5): 348-361.

- [5] WU W H, YANG Y Q, WANG H W, *et al.* Research on direct rapid manufacturing of 316L fine metal part using fiber laser [J]. *Laser Technology* 2009, 33(5): 486-489 (in Chinese).
- [6] MORGAN R, SUTCLIFFE C J, O'NEILL W. Density analysis of direct metal laser re-melted 316L stainless steel cubic primitives [J]. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(4): 1195-1205.
- [7] WIECHMANN D. A new bracket system for lingual orthodontic treatment [J]. *Journal of Orofacial Orthopedics* 2002, 63(3): 234-245.
- [8] WIECHMANN D, RUMMEL V, THALHEIM A. Customized brackets and archwires for lingual orthodontic treatment [J]. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics* 2003, 124(5): 593-599.
- [9] DING Y, XU B H. Characteristics and applications of personalized lingual orthodontic technology [J]. *Chinese Journal of Orthodontics*, 2007, 14(3): 138-139 (in Chinese).
- [10] HE X R, YANG Y Q, KONG W D, *et al.* Direct manufacturing of customized crowns and fixed bridge by selective laser melting [J]. *Laser Technology* 2010, 34(1): 1-4 (in Chinese).
- [11] YANG Y Q, HE X R, HUANG W H, *et al.* Direct manufacturing of customized orthopedics surgery orienting model by selective laser melting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(12): 2460-2464 (in Chinese).