

基于反馈加权 3D-GS 算法的三维多焦点调控方法研究

翟中生¹, 李梦雨¹, 吕清花^{2*}, 王选择¹, 冯维¹, 熊芝¹

¹湖北工业大学机械工程学院现代制造质量工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;

²湖北工业大学理学院, 湖北 武汉 430068

摘要 针对超快激光三维多焦点均匀性不高的问题, 本文提出了一种基于反馈加权 3D-GS 算法的三维多焦点光场重建技术。用 CCD 相机实时采集多焦点的能量和位置信息, 优化全息图, 然后将优化后的全息图加载至空间光调制器, 得到目标结构的高均匀性三维多焦点光束。利用此方法实现了 4 个面 47 个点的“HBUT”三维多焦点结构以及 15 个面 15 个点的三维多焦点螺旋结构, 前者的多光束均匀性超过了 96%, 后者的多光束均匀性达到了 94%。将传统 3D-GS 算法与反馈加权 3D-GS 算法迭代计算得到的上述两种结构的多焦点能量分布结果进行对比, 结果显示, 反馈加权 3D-GS 算法能有效提高三维多焦点的焦斑能量分布均匀性。

关键词 激光光学; 反馈加权 3D-GS 算法; 三维多焦点; 光场重建; 高均匀性; 空间光调制器

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221118

1 引言

激光具有高亮度、高方向性、高单色性和高相干性等特点。在激光加工过程中, 激光束能量密度高, 加工速度快, 而且是非局部加工, 对非激光照射区域没有影响或影响极小。超快激光加工是一种冷加工, 其超短的脉冲宽度降低了热效应对加工区域的影响, 大幅提升了加工质量^[1]。尽管激光具有这些优势, 但超快激光的单焦点直写加工技术存在加工区域小、能量利用低等问题, 因而无法用于材料的大面积加工、体加工以及结构一次成型加工等应用场景^[2]。

为了解决上述问题, 研究人员普遍采用多光束并行加工方法。Yang 等^[3]利用多焦点双光子聚合技术制备了微透镜阵列和三维光子结构, 但此方法本质上还停留在二维多光束阶段。Obata 等^[4]通过空间光调制器 (SLM) 动态加载计算机全息图 (CGH) 来控制多焦点的位置及明暗, 产生了不同位置分布的多焦点阵列。但这两种方法都不是真正意义上的三维多焦点技术, 需要配合工作平台的移动才能实现三维结构的加工。Jesacher 等^[5]利用加权 Gerchberg-Saxton 算法 (加权 GS 算法) 得到了三维多光束, 并尝试修改全息图设计来获得更好的处理结果, 但他们在此项研究中并未系统地测量多光束的能量均匀性。利用矢量 GS 迭代优化算法^[6]能够控制焦斑阵列的空间位置和点阵间距, 但要想实现三维结构加工, 则要动态加载全息图才能使激光光斑移动, 从而降低了多焦点技术的稳定性

和灵活性。此外, 在实际光路中存在器件的安装误差和制造误差, 这些误差会对最终的加工结果产生较大影响, 但现有迭代算法很少有针对此类误差进行补偿的。并行加工技术中最重要的是实现三维多光束——在三维空间内直接实现目标结构的三维多焦点光束。三维聚焦是各种三维光学应用中颇具前景的方法, 该方法在光存储技术^[7]、光波导打印技术^[8]以及荧光显微镜^[9]、其他光通信设备^[10]中被广泛应用。考虑到工业应用, 激光聚焦需要精确控制才能获得高质量的结果。因此, 本文提出了基于反馈加权 3D-GS 算法的三维多焦点调控方法。

基于空间光调制器和 CCD 相机的反馈迭代技术已被广泛应用于各种自适应光学成像仪器中。王晓斌^[11]设计并搭建了无波前传感自适应光学原理系统, 其中的波前校正器采用纯相位液晶空间光调制器, 通过 CCD 相机收集畸变波前的光强信息 (用于目标函数优化), 最终实现了无波前传感自适应光学原理闭环校正功能。范文强等^[12]在自适应光学和视网膜光学相干层析技术的基础上, 对自适应光学在视网膜光学相干层析成像应用上的国内外发展现状进行了论述, 总结了自适应光学相干层析视网膜高分辨成像在宽带光源色差校正、眼球运动伪影减少、自适应光学视场扩大、波前传感与校正系统简化等方面的关键技术及未来发展趋势。王凯迪^[13]通过自适应光学系统对波前畸变进行了实时校正, 使得成像系统能够克服大气湍流的干扰并始终保持良好的成像质量。他们研究了大气湍流

收稿日期: 2022-08-08; 修回日期: 2022-09-02; 录用日期: 2022-10-20; 网络首发日期: 2022-11-04

基金项目: 国家自然科学基金 (32071457)、湖北省创新群体项目 (2022CFA006)、武汉市重点研发计划 (2022012202015034)

通信作者: *linsa080@hbut.edu.cn

对波前相位扰动的数值模拟方法以及自适应光学系统的控制方法,但该方法在多焦点调控方面的应用较少。

空间光调制器的可编程特性使得其被广泛应用于光束整形^[14]、光栅衍射^[15]、光束重建^[16]等领域,同时也促进了激光三维多焦点技术的发展。空间光调制器配合一定的光路设计通过加载计算机全息图对激光光束的振幅、相位、偏振等光学参数进行调控,就可以在目标区域得到任意光场强度分布^[17]。本文基于空间光调制器的光场调控特性配合具有 CCD 相机的反馈调控光路系统,在传统 3D-GS 算法的基础上增加反馈调节,得到了高均匀性的三维多焦点光束。在实验中,通过 CCD 相机实时采集多光束的相关参数信息,并将其反馈至控制终端进行闭环反馈控制。动态调整每束激光束的参数信息,同时实时监测输出光束的参数信息与质量,消除了光学器件制造误差和安装误差造成的影响,从而保证了入射至工件表面的每束激光束均可以到达对应的设定目标。

2 三维多焦点全息图的算法原理

实现多光束技术的关键是得到对应的相位全息图,利用计算机全息图可以灵活控制出射激光束的数量、位置及焦点能量分布。产生全息图的算法主要分为迭代算法和非迭代算法。非迭代算法^[18-19]能够一次性计算出全息图,这种算法虽然运算速度快,但衍射效率较低,得到的多光束的能量均匀性不高。迭代算法主要有遗传算法^[20](GA 算法)、直接搜索算法^[21](DS 算法)、最优螺旋角算法^[22](ORA 算法)以及 GS 算法^[23]等。传统迭代算法一般适用于理想光路,在实际光路中,由于器件制造和安装误差,真实的结果与理想条件下的结果之间存在较大误差。本文利用 CCD 相机反馈真实位置处的结果,此结果包含了制造和安装等误差,因此将该结果进行反馈迭代,能够消除真实光路中的各种影响,能够用于真实光路的加工。

为了得到三维多光束的光场分布,研究人员大多采用 3D-GS 算法这一经典的迭代算法进行迭代计算。同时,该算法可以得到计算所需的全息图相位。通过空间光调制器可在透镜聚焦区域的相应位置产生期望的光场分布。在成像空间中,期望光场的振幅定义为 $A_{T_{k,0}}$ 。为了找到目标相位 $\varphi_{H,n}$,从随机相位 $\varphi_{H,0}$ 和恒定单位振幅 $A_{H,0}$ 的全息图平面开始迭代。对于第 1 次迭代,全息图平面的光场分布表示为

$$U_{H,0} = A_{H,0} \cdot \exp(i\varphi_{H,0}) \quad (1)$$

在传统的 3D-GS 算法中,对于第 n 次迭代,第 1 个目标平面(透镜后焦平面)的光场表示为

$$U_{T_{0,n}} = \text{FT}\{U_{H,n}\} \quad (2)$$

式中:FT 表示傅里叶变换。第一个目标平面的复振幅分布为

$$U_{T_{0,n}} = A_{T_{0,n}} \cdot \exp(i\varphi_{T_{0,n}}) \quad (3)$$

后焦平面上的光场分布经过菲涅耳衍射(FrT)后得到第 k 个目标平面的光场分布,菲涅耳衍射基于角谱算法(AS)^[24]表示为

$$U_{T_{k,n}} = \text{IFT} \left\{ \text{FT} \{ U_{T_{0,n}} \} \cdot \exp \frac{i2\pi}{\lambda z [1 - \lambda^2 (u^2 + v^2)]} \right\} \quad (4)$$

式中: λ 为入射光波长; z 为第 1 个目标平面与第 k 个目标平面在 Z 轴方向上的距离; u 、 v 表示衍射面的空间频率;IFT 表示傅里叶逆变换。

第 k 个目标平面的光场表示为

$$U_{T_{k,n}} = A_{T_{k,n}} \cdot \exp(i\varphi_{T_{k,n}}) \quad (5)$$

此处作收敛判断,即判断期望光场振幅 $A_{T_{k,0}}$ 与实际目标振幅 $A_{T_{k,n}}$ 的差别是否小于预设阈值。如果小于,则认为迭代收敛,输出目标相位 $\varphi_H = \varphi_{H,n}$,否则,使相位 $\varphi_{T_{k,n}}$ 保持不变,用期望光场振幅 $A_{T_{k,0}}$ 替换实际目标振幅 $A_{T_{k,n}}$ 。对实际空间中的光场复振幅进行修正,得到

$$U_{T_{k,0}} = A_{T_{k,0}} \cdot \exp(i\varphi_{T_{k,n}}) \quad (6)$$

修正后的光场通过逆菲涅耳衍射传播回第 1 个目标平面,得到

$$U_{T_{1,n}} = A_{T_{1,n}} \cdot \exp(i\varphi_{T_{1,n}}) \quad (7)$$

然后再经过傅里叶逆变换(IFT)回到全息面,得到

$$U_{H,n+1} = A_{H,n} \cdot \exp(i\varphi_{H,n+1}) \quad (8)$$

接下来保持相位不变,将振幅 $A_{H,n}$ 替换为恒定单位振幅 $A_{H,0}$,进行下一次循环,直至得到目标相位。传统 3D-GS 算法的流程图如图 1 所示。

图 1 中的红色虚线框内表示 3D 傅里叶变换与 3D 傅里叶逆变换过程,凸透镜的 3D 傅里叶变换关系如图 2 所示。位于凸透镜前焦面的全息图经过凸透镜作傅里叶变换,得到后焦面(第 1 个目标平面)的光场分布,不同 Z 轴位置处的焦点通过后焦面发生菲涅耳衍射,得到偏离后焦面的目标平面的光场分布;不同目标平面的光场分布经过菲涅耳逆变换回到凸透镜后焦面,再经过傅里叶逆变换回到全息面。可以明显看出,只要知道全息面与目标平面中的任意一个光场分布,就能通过 3D 傅里叶变换或 3D 傅里叶逆变换计算出另外一个。三维多光束相位全息图的计算公式为

$$\varphi_{\text{sum}} = \text{mod} \{ \text{angle}(U_1 + U_2 + \dots + U_k), 2\pi \} \quad (9)$$

式中: k 为目标平面数量; U_k 为第 k 个目标平面的复振幅。将三维多光束相位全息图加载至空间光调制器,经过 3D 傅里叶变换可以得到三维多焦点光束。但传统的 3D-GS 算法往往容易陷入局部最优值,得不到最优解,利用此算法得到的多焦点光束的焦斑能量分布均匀性较差。

为了提高多光束能量分布的均匀性,本文提出了一种改进的 3D-GS 算法,即反馈加权 3D-GS 算法。与

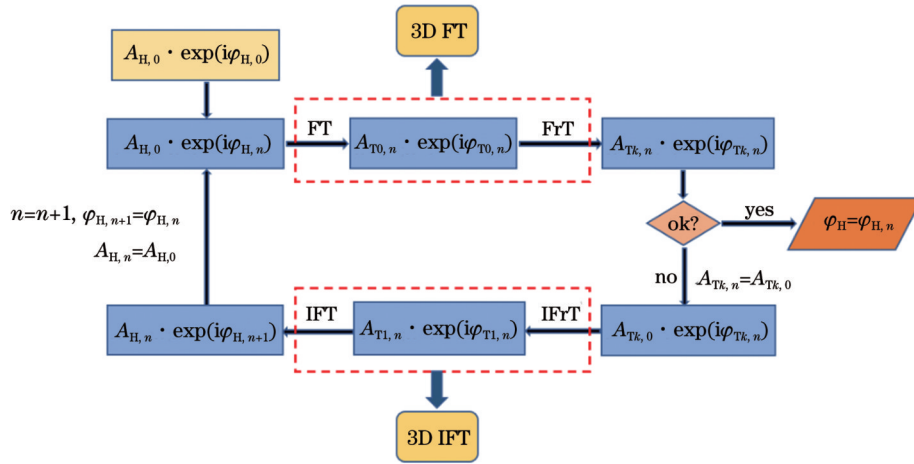


图1 传统 3D-GS 算法流程图
Fig. 1 Flow chart of traditional 3D-GS algorithm

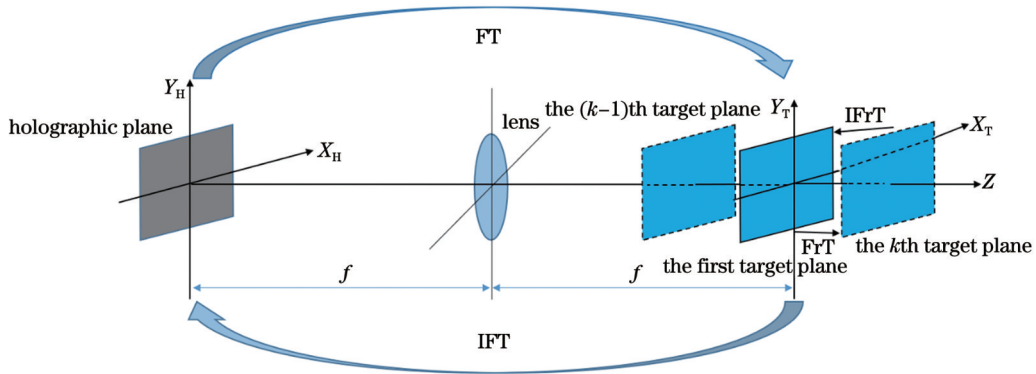


图2 3D 傅里叶(逆)变换过程
Fig. 2 Three-dimensional Fourier transform (inverse) process

传统的 3D-GS 算法相比,该算法利用 CCD 相机对菲涅耳衍射后的光场分布进行实时数据采集,然后将监测到的多焦点能量与位置信息传递给计算机,计算机程序通过对多光束相关参数信息进行及时处理,不断

优化多光束的计算机全息图,最终得到高均匀性的三维目标多焦点光束。反馈加权 3D-GS 算法的计算流程如图 3 所示,该算法在传统 3D-GS 算法的基础上加入了 CCD 相机进行反馈调节。CCD 相机能够实时采

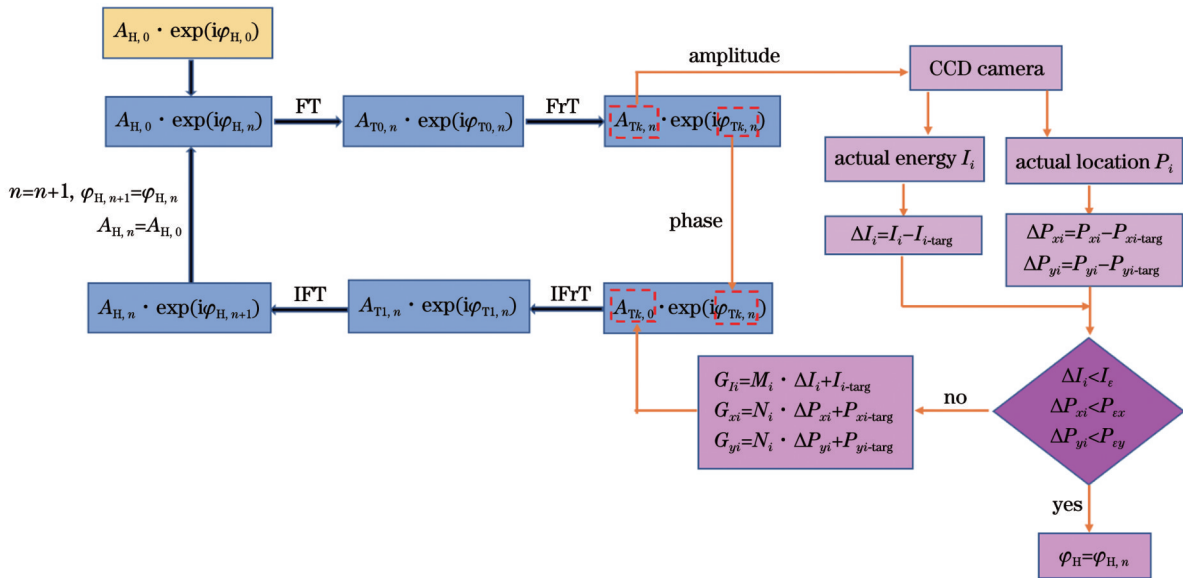


图3 反馈加权 3D-GS 算法流程图
Fig. 3 Flow chart of feedback weighted 3D-GS algorithm

集菲涅耳衍射后的光场分布信息。判断采集到的实际能量值 I_i 与实际位置坐标 P_i 是否满足预设匹配条件, 如果满足预设匹配条件, 则输出目标相位 $\varphi_H = \varphi_{H,n}$ 。预设匹配条件为

$$\Delta I_i = I_i - I_{i-\text{targ}}, \quad (10)$$

$$\Delta P_{xi} = P_{xi} - P_{xi-\text{targ}}, \quad (11)$$

$$\Delta P_{yi} = P_{yi} - P_{yi-\text{targ}}, \quad (12)$$

$$\Delta I_i < I_\varepsilon, \quad (13)$$

$$\Delta P_{xi} < P_{\varepsilon x}, \quad (14)$$

$$\Delta P_{yi} < P_{\varepsilon y}, \quad (15)$$

式中: I_i 为第 i 束激光束的实际能量值; $I_{i-\text{targ}}$ 为第 i 束激光束的期望能量值; P_{xi} 和 P_{yi} 分别表示第 i 束激光束在 X 轴和 Y 轴上的实际位置坐标; $P_{xi-\text{targ}}$ 和 $P_{yi-\text{targ}}$ 分别表示第 i 束激光束在 X 轴和 Y 轴上的期望位置坐标; ΔI_i 为第 i 束激光束的实际能量值 I_i 与期望能量值 $I_{i-\text{targ}}$ 之间的能量偏差值; ΔP_{xi} 和 ΔP_{yi} 分别表示第 i 束激光束的实际位置坐标与期望位置坐标在 X 轴和 Y 轴上的位置坐标偏差值; I_ε 为预设能量偏差阈值; $P_{\varepsilon x}$ 和 $P_{\varepsilon y}$ 分别为预设 X 轴和 Y 轴上的位置坐标偏差阈值。

如果不满足预设匹配条件, 则根据能量偏差值和位置坐标偏差值对目标光场进行修正, 然后继续进行迭代循环。具体的修正公式为

$$G_{Ii} = M_i \cdot \Delta I_i + I_{i-\text{targ}}, \quad (16)$$

$$G_{xi} = N_i \cdot \Delta P_{xi} + P_{xi-\text{targ}}, \quad (17)$$

$$G_{yi} = N_i \cdot \Delta P_{yi} + P_{yi-\text{targ}}, \quad (18)$$

式中: M_i 为第 i 束激光束的能量权重系数; N_i 为第 i 束激光束的位置坐标权重系数; G_{Ii} 为第 i 束激光束修正

后的能量值; G_{xi} 和 G_{yi} 分别为第 i 束激光束修正后在 X 轴和 Y 轴上的位置坐标值, i 的取值范围为 $[1, h]$, h 为激光束的总数。

将修正后的目标平面光场的振幅与菲涅耳衍射后的相位结合, 继续进行迭代循环, 直到得到满足要求的目标相位。利用此算法, 可以得到期望的多光束数量和位置, 并且能够对多光束的能量均匀性进行实时优化。

3 实验系统

为了验证利用反馈加权 3D-GS 算法实现高均匀性三维多焦点的可行性, 搭建了如图 4 所示的实验光路系统。本实验采用的激光器是武汉锐科光纤激光技术股份有限公司生产的纳秒激光器, 型号为 RFL-P20QE (激光波长为 1064 nm, 脉冲宽度为 130 ns, 重复频率为 30~60 kHz, 光斑直径为 6.4 mm, 平均输出功率为 20 W, 最大单脉冲能量为 0.67 mJ); 空间光调制器为 Hamamatsu 公司生产的 X13138-9625 反射式纯相位型液晶空间光调制器; CCD 相机为 Basler acA3088-48, 其分辨率为 3088 pixel \times 2064 pixel, 像素大小为 1.85 μm \times 1.85 μm 。由于 CCD 相机只能检测到二维平面上的光场分布, 因此将 CCD 相机固定在一个线性平移载物台 (导轨) 上, 通过移动载物台改变相机的位置, 从而可以观察到空间光调制器加载目标三维结构相位全息图 (由文中所提算法迭代计算得到) 后所产生的三维空间内三维多焦点在不同平面上的光场分布。上述线性平移载物台为 Thorlabs 公司生产的 LTS300, 其行程范围为 150 mm, 水平方向的最大速度为 50 mm/s。

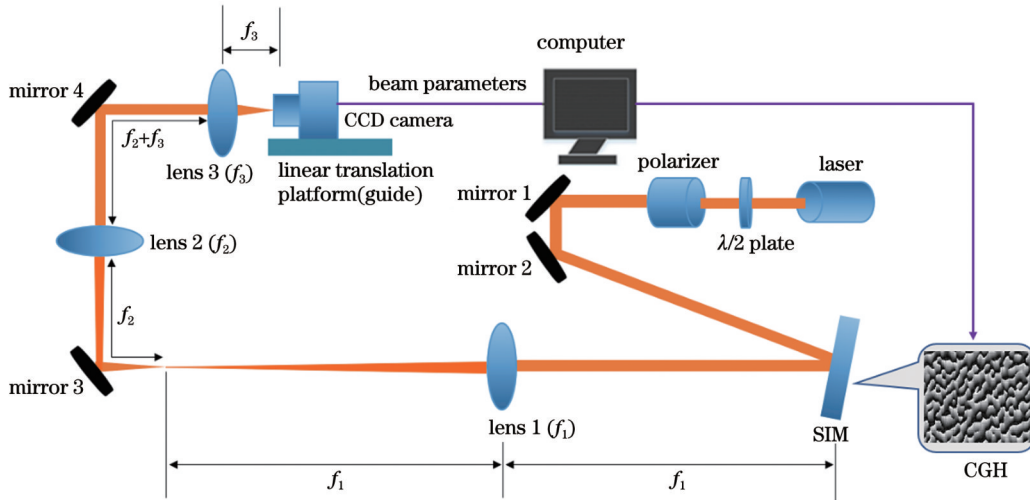


图 4 三维多焦点实验光路图

Fig. 4 Optical path of three-dimensional multi-focus experiment

在实验中, 利用偏振分光棱镜将原始激光束调制为水平偏振光和垂直偏振光 (半波片与偏振分光棱镜相结合可以调节激光束的功率), 然后利用反射镜使水平偏振光入射到空间光调制器。通过空间光调制器加载全息图对入射光束进行调制。对于空间光调制器来说, 其入射光与反射光之间的夹角要求小于 10° 。光路

采用透镜 1 ($f_1=500$ mm) 与透镜 2 ($f_2=300$ mm) 组成的 $4f$ 系统, 空间光调制器位于透镜 1 的前焦面上, 即透镜 2 的后焦面与空间光调制器分别位于 $4f$ 系统的输出面和输入面。由于总光束的直径超出了 CCD 相机的瞳孔直径, 因此利用透镜 3 ($f_3=75$ mm) 聚焦光束, 将光束会聚至 CCD 相机内。

实验中不是将 CCD 采集的图像直接反馈到全息图进行计算,而是先根据图像计算出聚焦区域的能量值,再对能量值进行反馈;而且为了适应不同分辨率的 CCD,根据聚焦光斑的尺寸选定一个合适的区域进行能量计算,将计算值代入算法中进行迭代。根据设定的目标距离移动 CCD 到相应位置,将实际聚焦位置作为衍射距离。反馈过程中相机将实时采集到的光束参数信息传递给计算机,优化全息图,然后将优化后的全息图再次加载至空间光调制器进行反馈计算。

4 实验结果与分析

4.1 目标三维结构模型

为验证将反馈加权 3D-GS 算法生成的三维多焦点全息图加载至空间光调制器产生目标三维多焦点的可行性,设计了两种目标三维结构。一种结构属于多点少面型,即,47 个点组成的“HBUT”结构,该结构由

4 个字母组成,且 4 个字母放置在 4 个不同的 Z 轴平面上,它们的 z 坐标依次为 $z_1=1380 \mu\text{m}$, $z_2=740 \mu\text{m}$, $z_3=100 \mu\text{m}$, $z_4=-540 \mu\text{m}$,它们在二维平面上的具体点阵位置如图 5 所示。另一种结构属于多面少点型,即,15 个点组成的三维螺旋结构,该结构中的每个点分别放置在 15 个不同的 Z 轴平面上,相邻两点之间的 z 间距为 $550 \mu\text{m}$,其中第 8 个点位于 $z=0$ 平面上。螺旋结构俯视图及三维模型如图 6 所示,其中螺距为 $5120 \mu\text{m}$ 。

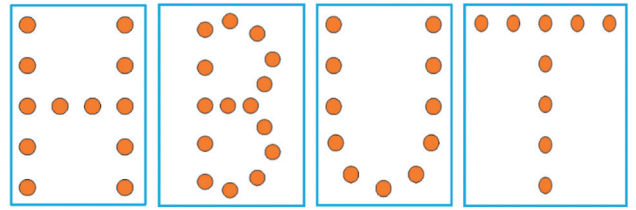


图 5 “HBUT”在二维平面内的点阵位置
Fig. 5 Lattice position of “HBUT” in a two-dimensional plane

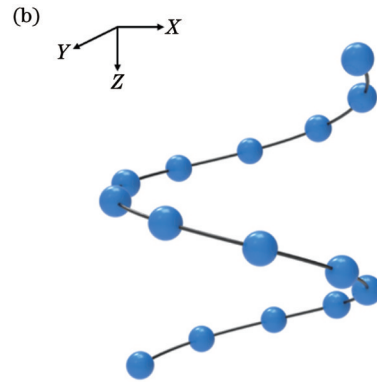
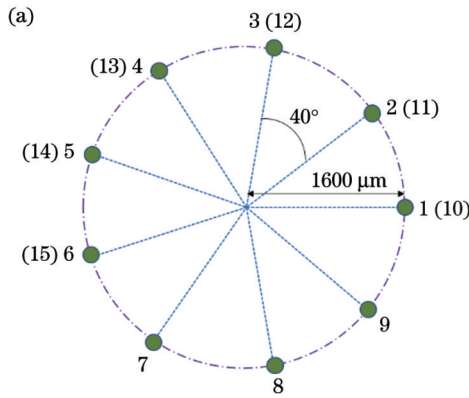


图 6 螺旋结构模型。(a)螺旋结构的俯视图;(b)螺旋结构的三维模型

Fig. 6 Spiral structure model. (a) Top view of spiral structure; (b) three-dimensional model of spiral structure

4.2 实验结果

设置了不同 Z 轴平面上期望三维结构的相关坐标参数,分别采用反馈加权 3D-GS 算法与传统 3D-GS 算法计算了三维多焦点光束的能量分布均匀性。结果显示,通过 CCD 相机反馈调节得到的目标三维结构全息图能产生高均匀性的多光束。采用反馈加权 3D-GS 算法进行多次反馈迭代计算,多光束的能量分布均匀性可达到最大值。每个焦点迭代一次的时间为 5 s,所以完成一次整个“HBUT”三维结构 47 个点的迭代时间为 235 s,完成整个三维螺旋结构的一次迭代过程所需时间为 75 s,其中包括导轨移动时间、CCD 相机的捕捉时间(包括捕获、识别光斑和图像处理的时间)、SLM 的响应时间(包括更新、归一化、保存、合成全息图的时间)、傅里叶变换计算时间和计算机中的其他信号处理时间。

多光束均匀性的具体值可以由计算机程序读出的相关反馈参数计算得到。采用反馈加权 3D-GS 算法进行 20 次反馈迭代计算,“HBUT”期望三维结构的

焦点均匀性达到最大值,此时计算机程序显示多光束最大均匀性的相关反馈参数如下: $I_{\text{max}}=1.037 \mu\text{J}$, $I_{\text{min}}=0.967 \mu\text{J}$, $(I_{\text{max}}-I_{\text{min}})/M=0.007$,其中焦斑预设期望平均能量值 $M=1 \mu\text{J}$ 。在已知 $(I_{\text{max}}-I_{\text{min}})/M$ 的情况下,可以利用式(19)快速粗略计算出多焦点的均匀性。同时,通过式(20)所示的多光束均匀性公式可以计算出焦斑能量分布的均匀性。计算结果显示:目标多光束的均匀性超过了 96%。

$$U_1 = 1 - \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{2M}, \quad (19)$$

$$U_2 = 1 - \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}, \quad (20)$$

式中: I_{max} 、 I_{min} 分别代表三维多焦点光束强度的最大值与最小值。相关反馈参数的变化过程如图 7 所示。将传统 3D-GS 算法计算所得的目标多焦点均匀性的相关参数定义为反馈调节计算过程中第 0 次迭代参数,从图 7 中可以看出:从第 0 次反馈迭代计算开始, $(I_{\text{max}}-I_{\text{min}})/M$ 值快速下降,即多焦点均匀性提高,经过 20 次反馈迭代计算后,4 个不同平面上 47 个衍射点的

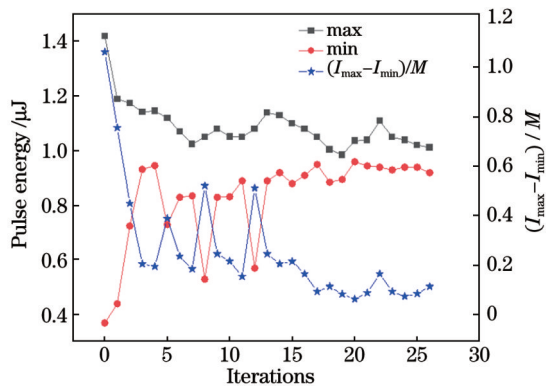


图7 “HBUT”结构的最大、最小脉冲能量以及 $(I_{\max} - I_{\min})/M$ 值随迭代次数的变化

Fig. 7 Variations of maximum and minimum pulse energies and $(I_{\max} - I_{\min})/M$ with iterations for “HBUT” structure

均匀性从最初的47%改善到了最大值96%。由于激光光源的不稳定性、CCD相机移动过程中的晃动、光

学设备本身存在的制造误差以及搭建光路实验系统时人为造成的光路系统误差等,光斑能量分布存在振荡。

通过CCD相机分别在 $z_1=1380\ \mu\text{m}$ 、 $z_2=740\ \mu\text{m}$ 、 $z_3=100\ \mu\text{m}$ 和 $z_4=-540\ \mu\text{m}$ 的不同Z轴位置处检测到的“HBUT”多焦点光场分布如表1所示。可见,通过线性平移载物台改变相机位置,可以使相机在“H”“B”“U”“T”各自焦平面位置检测到相应的目标光场分布,该光场分布是通过空间光调制器加载两种不同算法计算得到的目标结构全息图结合光路系统产生的。需要指出的是,由于CCD相机放在4f系统后面,激光通过4f系统后,物像坐标会发生翻转,所以用CCD相机采集到的多焦点分布与实际结构相比是翻转的结构。因此,为了观察到正立的焦点分布,三维目标结构的原始坐标需要按照翻转的像进行设置。

表1 不同算法计算得到的“HBUT”多焦点光场分布对比

Table 1 Comparison of “HBUT” multi-focus light field distribution calculated by different algorithms

z position coordinate	Distribution of target light field calculated by traditional 3D-GS algorithm	High uniformity target light field distribution calculated by feedback weighted 3D-GS algorithm
$z_1=1380\ \text{mm}$		
$z_2=740\ \text{mm}$		
$z_3=100\ \text{mm}$		
$z_4=-540\ \text{mm}$		

由表1可以看出:利用传统3D-GS算法计算所得的三维多焦点能量分布均匀性较差,存在一些过曝(表中已用红色圆圈标出,并给出了相应光斑的放大图)或强度不明显的光斑(表中已用绿色圆圈标出,并给出了相应光斑的放大图);利用反馈加权3D-GS算法经过20次迭代反馈计算得到的多焦点能量分布均匀性达到了96%。

同理,利用反馈加权3D-GS算法进行5次反馈迭代计算,三维螺旋结构的多焦点均匀性达到了最大值,此时计算机程序显示多光束最大均匀性的相关反馈参数如下: $I_{\max}=1.047\ \mu\text{J}$, $I_{\min}=0.927\ \mu\text{J}$, $(I_{\max} - I_{\min})/M=$

0.12。通过式(19)、式(20)计算焦斑能量分布的均匀性,计算结果显示目标多光束的均匀性达到了94%左右。

迭代计算过程中相关反馈参数的变化过程如图8所示。将通过传统3D-GS算法计算所得的目标多焦点均匀性的相关参数定义为反馈调节计算过程的第0次迭代参数。从图8中可以看出,从第0次反馈迭代计算开始, $(I_{\max} - I_{\min})/M$ 值快速下降,即多焦点均匀性提高,经过5次反馈迭代计算后,15个不同平面上的15个衍射点的均匀性从最初的47%改善到了最大值94%。由于多焦点数量大幅度减少,利用反馈加权

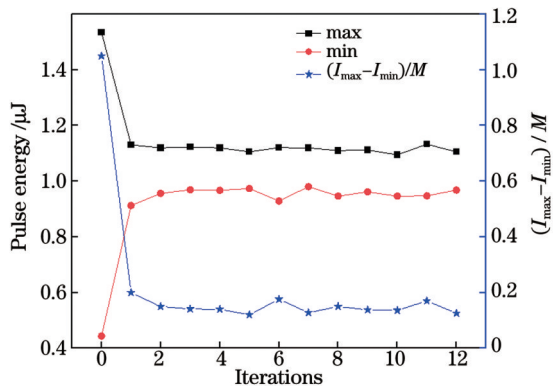


图8 螺旋结构的最大、最小脉冲能量以及 $(I_{\max}-I_{\min})/M$ 值随迭代次数的变化

Fig. 8 Variations of maximum and minimum pulse energies and $(I_{\max}-I_{\min})/M$ with iterations for spiral structure

3D-GS算法迭代计算得到的螺旋结构的光斑能量分布振荡幅度小于“HBUT”的振荡幅度,达到多光束能量分布均匀性最大值所需要的迭代次数也明显减少。

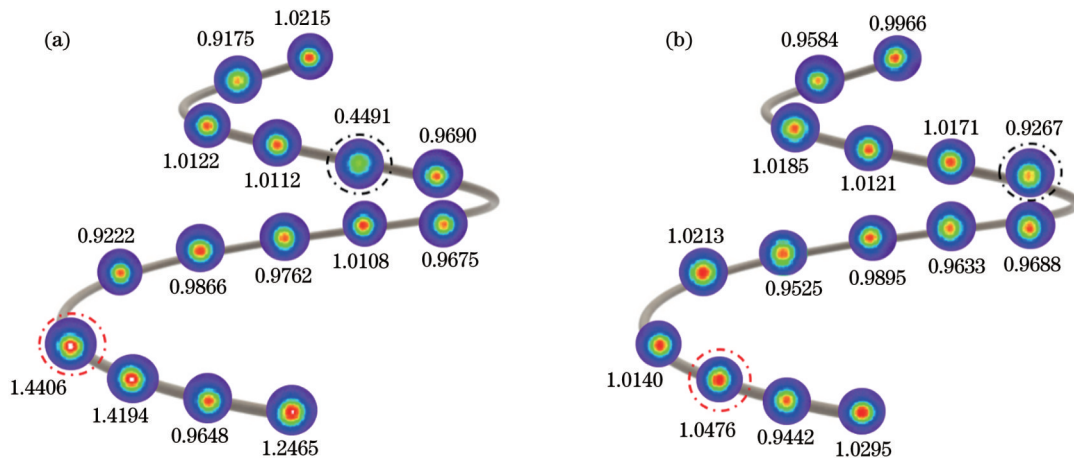


图9 不同算法计算得到的螺旋结构多焦点光斑能量分布及对应的光强值(单位为 μJ)。(a)传统3D-GS算法;(b)反馈加权3D-GS算法
Fig. 9 Energy distributions and corresponding light intensity of spiral structure multi-focus spot calculated by different algorithms (unit: μJ). (a) Traditional 3D-GS algorithm; (b) feedback weighted 3D-GS algorithm

综上,对比两种不同算法得到的两种不同期望三维结构重建光场的多焦点能量分布均匀性以及所得光斑能量分布可知,反馈加权3D-GS算法可以明显提高三维多焦点能量分布均匀性。

5 结 论

依据基于空间光调制器和CCD相机的反馈加权3D-GS算法,本文提出了一种激光高均匀性三维多焦点光场的重建方法,该方法能够补偿实际光路中器件的制造误差和安装误差。应用此技术得到了“HBUT”结构以及螺旋结构的高均匀性三维多焦点光束。通过对迭代反馈计算中的反馈参数进行分析计算,得到所提方法产生的三维多光束的均匀性高达95%左右。对比以上两种三维多焦点目标结构的光场重建结果可以发现,反馈迭代过程中多点少面型“HBUT”三维结构的光斑能量起伏变化大于多面少点型三维螺旋结

利用CCD相机分别在 $z_1=-3840\ \mu\text{m}$ 、 $z_2=-3291\ \mu\text{m}$ 、 $z_3=-2743\ \mu\text{m}$ 、 $z_4=-2194\ \mu\text{m}$ 、 $z_5=-1645\ \mu\text{m}$ 、 $z_6=-1096\ \mu\text{m}$ 、 $z_7=-548\ \mu\text{m}$ 、 $z_8=0\ \mu\text{m}$ 、 $z_9=548\ \mu\text{m}$ 、 $z_{10}=1096\ \mu\text{m}$ 、 $z_{11}=1645\ \mu\text{m}$ 、 $z_{12}=2194\ \mu\text{m}$ 、 $z_{13}=2743\ \mu\text{m}$ 、 $z_{14}=3291\ \mu\text{m}$ 、 $z_{15}=3840\ \mu\text{m}$ 共15个不同Z轴位置检测聚焦光斑能量分布,根据螺旋结构三维模型将对应位置的光斑进行填充。采用传统3D-GS算法与反馈加权3D-GS算法经过5次反馈迭代计算得到的三维螺旋结构的光斑能量分布如图9所示。采用传统3D-GS算法计算得到的三维多焦点能量分布均匀性较差,如图9(a)所示,其中存在一些过曝或强度不明显的点;而利用反馈加权3D-GS算法经过5次迭代反馈计算得到的多焦点能量分布均匀性达到了94%,高均匀性三维螺旋结构光斑能量分布如图9(b)所示。在图9中,分别用红色圆圈和黑色圆圈标出了两种算法下的能量最大、最小光斑,并分别给出了各个光斑的具体光强值(单位为 μJ)。

构,同时,前者达到最大均匀性所需的迭代次数也明显增加,但两者均匀性的最大值差别不大。由此可知,三维结构多焦点的数量在反馈迭代计算过程中对重建三维多焦点光场稳定性的影响高于三维结构中 z 平面数量的影响。本文提出的激光高均匀性三维多焦点光场重建技术可用于三维结构的加工。

参 考 文 献

- [1] Xie X Z, Zhou C X, Wei X, et al. Laser machining of transparent brittle materials: from machining strategies to applications[J]. Opto-Electronic Advances, 2019, 2(1): 180017.
- [2] 刘思垣,张静宇.基于空间光调制器的超快激光加工原理及应用[J].激光与光电子学进展,2020,57(11):111431.
Liu S Y, Zhang J Y. Principles and applications of ultrafast laser processing based on spatial light modulators[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111431.
- [3] Yang L, El-Tamer A, Hinze U, et al. Parallel direct laser writing of micro-optical and photonic structures using spatial light

- modulator[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 70: 26-32.
- [4] Obata K, Koch J, Hinze U, et al. Multi-focus two-photon polymerization technique based on individually controlled phase modulation[J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 17193-17200.
- [5] Jesacher A, Booth M J. Parallel direct laser writing in three dimensions with spatially dependent aberration correction[J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 21090-21099.
- [6] 周立强. 矢量聚焦光场及其在激光微加工中的应用[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021: 18-36.
Zhou L Q. Vector tightly focused light field and its application in laser micromachining[D]. Yantai: Ludong University, 2021: 18-36.
- [7] Davis K M, Miura K, Sugimoto N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(21): 1729-1731.
- [8] Glezer E N, Milosavljevic M, Huang L, et al. Three-dimensional optical storage inside transparent materials[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(24): 2023-2025.
- [9] Nakamura O. Three-dimensional imaging characteristics of laser scan fluorescence microscopy-2-photon excitation vs single-photon excitation[J]. *Optik*, 1993, 93(1): 39-42.
- [10] Watanabe W, Asano T, Yamada K, et al. Wavelength division with three-dimensional couplers fabricated by filamentation of femtosecond laser pulses[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(24): 2491.
- [11] 王晓斌. 无波前传感自适应光学原理系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017: 1-29.
Wang X B. Design and realization of adaptive optical principle system without wavefront sensing[D]. Xi'an: Xidian University, 2017: 1-29.
- [12] 范文强, 王志臣, 陈宝刚, 等. 自适应光学相干层析在视网膜高分辨成像中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(10): 20200333.
Fan W Q, Wang Z C, Chen B G, et al. Application of adaptive optics coherence tomography in retinal high resolution imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200333.
- [13] 王凯迪. 大气湍流波前畸变的自适应光学校正技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2021: 4-35.
Wang K D. Research on correction technology of wavefront distortion from atmospheric turbulence by adaptive optics system [D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2021: 4-35.
- [14] 翟中生, 张艺, 吕清花, 等. 基于组合光栅的光束整形方法研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(13): 1305001.
Zhai Z S, Zhang Y, Lü Q H, et al. Beam shaping method based on combined gratings[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(13): 1305001.
- [15] 翟中生, 黄缘胜, 李沁洋, 等. 基于空间光调制器的正交相位光栅衍射特性[J]. *光学学报*, 2022, 42(16): 1605002.
Zhai Z S, Huang Y S, Li Q Y, et al. Diffraction characteristics of orthogonal phase grating based on spatial light modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(16): 1605002.
- [16] 谢家俊, 唐诗瑶, 陈永强, 等. 贝塞尔光束在生物组织中的自重特性研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(5): 0507302.
Xie J J, Tang S Y, Chen Y Q, et al. Self-reconstruction characteristics of Bessel beam in biological tissue[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(5): 0507302.
- [17] Clark T W, Offer R F, Franke-Arnold S, et al. Comparison of beam generation techniques using a phase only spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6249-6264.
- [18] Zhu L W, Yang R, Zhang D W, et al. Dynamic three-dimensional multifocal spots in high numerical-aperture objectives[J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 24756-24766.
- [19] Kuang Z, Liu D, Perrie W, et al. Parallel diffractive multi-beam laser surface micro-structuring[J]. *Applied Surface Science*, 2009, 255(13): 6582-6588.
- [20] Brooks S P, Morgan B J T. Optimization using simulated annealing[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series D*, 1995, 44(2): 241-257.
- [21] Meister M, Winfield R J. Novel approaches to direct search algorithms for the design of diffractive optical elements[J]. *Optics Communications*, 2002, 203(1/2): 39-49.
- [22] Bengtsson J. Kinoform design with an optimal-rotation-angle method[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(29): 6879-6884.
- [23] 周源, 李润泽, 于湘华, 等. 基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(11): 1123001.
Zhou Y, Li R Z, Yu X H, et al. Progress in study and application of optical field modulation technology based on liquid crystal spatial light modulators (invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(11): 1123001.
- [24] Yu L F, Kim M. Wavelength-scanning digital interference holography for tomographic three-dimensional imaging by use of the angular spectrum method[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(16): 2092-2094.

Three-Dimensional Multi-Focus Controlling Method Based on Feedback-Weighted 3D-GS Algorithm

Zhai Zhongsheng¹, Li Mengyu¹, Lü Qinghua^{2*}, Wang Xuanze¹, Feng Wei¹, Xiong Zhi¹

¹Hubei Key Laboratory of Modern Manufacturing Quantity Engineering, School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China;

²School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, Hubei, China

Abstract

Objective Ultrafast laser direct writing processing technology with a single focus has a small processing area and low energy utilization and is not suitable for applications in large-area processing, volume processing, and the single forming of structures. To solve these problems, researchers generally adopt multibeam parallel processing method. The most important aspect of parallel processing technology is to realize three-dimensional (3D) multibeams and form 3D multi-focus with the same energy. Therefore, a method for generating 3D multi-focus is urgently required. In industrial applications, laser focusing requires precise control to obtain high quality results. Moreover, in the actual optical path, setup and manufacturing errors exist in the optical elements and have a significant impact on the final machining results; however, the existing iterative algorithms rarely compensate for such errors. Therefore, a 3D multi-focus control method based on a feedback-weighted 3D-GS algorithm is proposed in this study.

Methods A spatial light modulator (SLM) can adjust optical parameters such as amplitude, phase, and polarization of a laser beam by loading computer-generated holograms. With the help of SLM, the light intensity distribution in the target region can be easily controlled. The key to obtaining uniform 3D multiple beams with SLM is to obtain the corresponding computer-generated holograms, which can then be used to flexibly control the number, position, and focus energy distribution of the outgoing laser beam. In this study, to improve the uniformity of the energy distribution of multiple beams, a feedback method was used to improve the traditional 3D-GS algorithm. Each beam was set using a weight coefficient. The feedback-weighted 3D-GS algorithm collected the energy and position information of multiple foci through a CCD camera in real time and fed the information back to the controlling terminal to dynamically adjust the weight coefficient of each beam. After a couple of iterations, 3D multi-focus with high uniformity were obtained.

Results and Discussions The coordinate parameters related to the desired 3D structures in different Z -axis planes are set, and the energy uniformity of the 3D multi-focus is calculated using the feedback-weighted 3D-GS algorithm and traditional 3D-GS algorithm. For the expected 3D structure of “HBUT,” the feedback-weighted 3D-GS algorithm improved the uniformity of 47 diffraction points on four different planes from 47% to more than 96% after 20 iterative feedback calculations. Using the feedback-weighted 3D-GS algorithm, the homogeneity of the 3D multi-focus energy distribution is significantly improved, as shown in Table 1. Another experiment was performed for the 3D spiral structure, and the feedback-weighted 3D-GS algorithm improved the uniformity of 15 diffraction points on 15 different planes from 47% to 94% after five iterative feedback calculations. The spots at the corresponding positions were filled according to the 3D model of the spiral structure (Fig. 9). From a comparison of spot energy distribution calculated by different algorithms, it can be found that the presented feedback-weighted 3D-GS method can effectively improve the uniformity of 3D multi foci.

Conclusions Based on the feedback-weighted 3D-GS algorithm and programmable SLM, this study proposes a method to generate 3D multi-focus with high uniformity to compensate for the fabrication and setup errors of devices in real optical paths. The designed pattern of “HBUT” and helical structures are used to prove the validity of the method. Through the analysis and calculation of feedback parameters in iterative feedback calculations, the uniformity of the 3D multibeam obtained by this method is verified to be 95%. The number of multifocal points in the 3D structure has a greater influence on the stability of the reconstructed 3D multi-focus light field than the number of Z -planes in the 3D structure during the feedback iterative calculation. Additionally, the laser high-uniformity 3D multi-focus optical field reconstruction technique proposed in this study can be used for 3D structure machining.

Key words laser optics; feedback-weighted 3D-GS algorithm; three-dimensional multi-focus; light field reconstruction; high uniformity; spatial light modulator