

doi:10.3788/gzxb20184706.0610003

多层光场三维显示及其图像计算的优化

周云峰,徐良,李海峰,刘旭

(浙江大学 光电科学与工程学院,现代光学仪器国家重点实验室,杭州 310058)

摘要:为了实现对多层光场三维显示技术的优化,利用亚克力板和光学胶片实现光场的还原,增加多层权重和光场权重,扩大调整显示效果的自由度,在计算过程中能够在外部参数不变的情况下改变多层装置的显示效果,证明了水平视场下各行图像的相互独立性,采用行分治方法进行计算,降低了拟合运算的时间复杂度,节省了运算所需的时间与内存,使有限时间内更高精度的计算成为可能.在其他参数确定的情况下,采用原始方法能够进行计算的最大尺寸是 $900 \times 1\,200$ 像素,而行分治方法能够计算 $1\,800 \times 2\,400$ 像素的图像而不出现内存不足的问题.基于图像方差建立了衡量光场重建效果的标准,在此标准下,发现增加层数、分辨率,减少视场大小和平均多层权重可以提高整体成像质量,增加特定视场角的权重能够提高其特定方向的成像质量.从实际制作的 3 层共 2 mm 厚的多层模型中观测到了视差,证明了多层装置在光场还原方面的显著优势.

关键词:显示设备;几何光学;光线追踪;图像重建;立体图像处理;最小二乘法拟合

中图分类号:TN27

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)06-0610003-9

Tomographic 3D Display and Imaging Optimization

ZHOU Yun-feng, XU Liang, LI Hai-feng, LIU Xu

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: In order to enhance the imaging quality of tomographic 3D display technique, the original light field was firstly reconstructed with acrylic panels and films before exerting adjustments. The freedom for adjusting display quality was expanded by adding layer weight and light field weight as factors, enabling the display quality to be changed while external factors remain stable. The mutual independence of line images under a horizontal parallax circumstance was confirmed, and thus a line division method was applied in the calculation to eliminate the time complexity of the fitting proceed. As the memory is saved and efficiency is enhanced, it is possible to achieve more accurate calculation in limited time. Given other factors are determined, the maximum resolution of images to be calculated under the original method is $900 \times 1\,200$ pixel, but the line division method is able to calculate $1\,800 \times 2\,400$ pixel images without memory overflow. The evaluation standard of the effect of image reconstruction is established based on the image variance, under which it is found that increasing resolution and layer number, decreasing field of view or balancing layer weight can enhance holistic reconstruction quality, and the quality of a certain angle of view can be promoted by adding to its light field weight correspondingly. Parallax is observed in a fabricated 3-layer model with 1mm layer distance, denoting the distinguished advantage of tomographic 3D display in the reconstruction of light field.

Key words: Display devices; Geometrical optics; Ray tracing; Image reconstruction; Stereo image processing; Least squares approximations

基金项目:国家重点研发计划(No.2016YFB0401901)资助

第一作者:周云峰(1997-),男,学士,主要研究方向为三维光学成像与光学显示. Email:3150105218@zju.edu.cn

导师(通讯作者):刘旭(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为光电显示、光学薄膜、光学成像与生物光学技术. Email:liuxu@zju.edu.cn

收稿日期:2017-12-05;录用日期:2018-03-06

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

三维显示技术是近年来一个热门的研究方向,传统的三维显示技术基于人眼的双目效应,即通过对两眼看到图像的信息的差异进行分析来形成对深度的感知,经典的三维显示技术都与这种双目视差有关,如双目眼镜立体显示,头盔式的虚拟现实设备,体视三维显示,基于光栅视差的裸眼三维显示^[1]等等.这些三维显示均存在调焦与汇聚的矛盾,因此长时间观看容易视觉疲劳,同时造成心理不适,头晕头痛等问题.

光场显示是一种新兴的三维显示技术^[2].与之前所述的视差原理不同,光场显示与人眼所在位置无关,而是致力于还原实际三维物体在各个方向的光线分布,是一种真正的三维显示技术.光场显示视场大,能够更好地反映真实三维空间中物体的关系,而且长时间观看不会给人眼带来不适,因此发展潜力巨大.光场显示有多种类型,如扫描型技术,并行投影或显示技术等.作为光场显示的一种新技术,多层光场三维显示技术^[3]一出现,就凭借其系统结构简单,与现有平板显示器强兼容等特点,吸引了大家的广泛兴趣.

自从2011年问世以来,多层光场显示技术已经得到了一定的改进.人们已经将光场显示与液晶显示技术相结合,并在实际测试中获得了30dB的信噪比^[4-5].针对人眼视觉特点的近场三维显示将该技术的显示效果进一步优化,而且减少了边缘视场的数据规模,提高了运算的效率^[4].同时,有关集成光场系统的研究也对该技术的视差校正、畸变校正和亮度提升提供了帮助^[6-7].

多层光场显示技术的运算过程,实质上是多层衰减器对各个方向图像的同时拟合.该拟合过程的原理是最小二乘法.本文针对这一原理,分析了分层显示中各个变量对成像质量的影响,增加了运算过程中变量调整的自由度,并在运算速度、成像质量方面进行了优化与改进.

1 多层光场显示原理

1.1 符号定义

本文用到的数学符号定义见表1.

表1 数学推导符号定义

Symbol	Type	Explanation
L_F	Matrix	Light field matrix
L_Y	Matrix	Layer matrix
A	Matrix	Transfer matrix
A'	Matrix	Weighted transfer matrix
x	Matrix	Unknown matrix
B	Matrix	Light field parameter matrix
P	Matrix	Light field weight matrix
Q	Matrix	Layer weight matrix
k	Matrix parameter	Current layer
m, n	Matrix parameter	Pixel 2-D coordinate
c	Matrix parameter	Current color channel
dx, dy	Matrix parameter	2-D coordinate offset
i, j	Matrix parameter	Space angle
h	Device parameter	Layer spacing
d	Device parameter	Pixel spacing
θ	Device parameter	Resolution angle

1.2 多层装置对光场重建的原理

多层装置的基本模型是相互之间有一定间距地堆叠在一起的多个二维图案.当光透过装置时,分别在各个二维图案上被衰减.由于不同方向上的光透过装置时经过的是每个二维图案的不同位置,多次衰减得到的结果不同,因此从不同方向观察装置能够看到不同的图像.

若已知想要在不同方向显示出的二维图案,要求出每层上各自的二维衰减函数^[8],这实际上是一个线性方

程组的不定解问题,需要使用最小二乘法解出每层上的图像,使之能够最好地重建各个角度上的光场信息.

定义显示物体的光场矩阵 L_F 和多层显示矩阵 L_Y , 分别记录光场和多层装置的全部信息. 光场矩阵是一个五维矩阵^[3]

$$L_F(i, j, m, n, c) \quad (1)$$

式(1)中, i, j 表示获取此光场图像时采用的空间角, 由于实验中默认每两个视场角间隔相同的角度, 所以只需要用整数的 i, j 表示是第几个空间角即可. m, n 是该图像水平与垂直的像素点个数. c 为颜色通道, 对于灰度图像和彩色图像, c 分别是 1 和 3. L_F 中每个位置的值, 表示该空间坐标对该颜色通道的透过率, 为获取的已知量.

同样, 可以用一个 4 维矩阵 L_Y 来表征多层装置的信息, 即

$$L_Y(k, m, n, c) \quad (2)$$

式中, k 表示当前图层是多层装置的第 k 层. 各层之间的间距相同, 所以 k 包含了该层的空间信息. m, n, c 的定义与 L_Y 矩阵中相同. 此矩阵中每个元素为方程组所要求解的未知数.

根据上述原理, 重建光场的方程组为

$$\prod_{k=1}^{k_0} L_Y(k, m + dy, n + dx, c) = L_F(i, j, m, n, c), \quad i = 1, 2, \dots, i_0, j = 1, 2, \dots, j_0 \quad (3)$$

式(3)对所有符合条件的 m, n 成立. 符合条件是指 (m, n) 与 $(m + dy, n + dx)$ 表示的像素点在多层显示的范围. 其中, dx, dy 是在某一视场角下叠加时, 需要在每一层叠加的偏移量. 对应最小分辨角为 θ 、层间距为 h 的情况下, 第 k 层上的偏移量为

$$dy = (k-1)h\theta \lfloor i - \frac{i_0}{2} \rfloor \quad (4)$$

$$dx = (k-1)h\theta \lfloor j - \frac{j_0}{2} \rfloor \quad (5)$$

式(4), (5)中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 是向下取整符号. 系统对光线的总透过率为各层透过率的乘积, 故式中用连乘符号. 通过取对数, 将连乘关系变成求和关系, 即构建出线性方程组^[3]

$$\sum_{k=1}^{k_0} \ln(L_Y(k, m + dy, n + dx, c)) = \ln(L_F(i, j, m, n, c)), \quad i = 1, 2, \dots, i_0, j = 1, 2, \dots, j_0 \quad (6)$$

通常情况下, 未知数的数量不等于方程的数量, 即式(6)没有确定的解, 因此需要采用最小二乘法求出方程组的最优解.

1.3 改进算法: 加权最小二乘法

在上文的推导中, 已经得到了所构建的线性方程组式(6), 为便于参考将其简记为

$$Ax = B \quad (7)$$

式(7)中, 未知数向量 x 为多层装置中各像素点对光的透过率, B 为已经获取的光场中各像素点对光的透过率, A 为表征前述求和关系的传递矩阵. 设 A 中元素为

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(6)可知, A 由 0 和 1 组成.

在 A 的行与列上分别乘以某一值有

$$A' = PAQ = \begin{bmatrix} p_1 a_{11} q_1 & p_1 a_{12} q_2 & \cdots & p_1 a_{1n} q_n \\ p_2 a_{21} q_1 & p_2 a_{22} q_2 & \cdots & p_2 a_{2n} q_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_m a_{m1} q_1 & p_m a_{m2} q_2 & \cdots & p_m a_{mn} q_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & p_m \end{bmatrix}, \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & q_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

并将相似的变化加到另外两个向量上

$$\mathbf{x}' = \mathbf{x}\mathbf{Q} \quad (11)$$

$$\mathbf{B}' = \mathbf{P}\mathbf{B} \quad (12)$$

式(9)~(12)中, \mathbf{P} 称为光场权重, 调整的是各个光场视场角对解的影响; \mathbf{Q} 称为多层权重, 调整的是每一层在系统显示中的影响. 在存在唯一解的情况下, 这种做法不会改变所得到的值; 而在没有确定解的情况下, 通过改变两个权重矩阵的数值则可以调整最小二乘法计算出的解, 使之更符合具体显示的要求^[9].

1.4 行分治方法

在增加计算的数据量时, 不但光场矩阵与多层矩阵会变大, 联系二者的传递矩阵 \mathbf{A} 也会迅速增大, 且大小等于前两个矩阵的乘积. 这样大小的矩阵会占用庞大的内存空间并且延长运算时间, 对程序计算效率造成影响.

通过下面的估算可以了解计算中所需数据量的规模. 假设每个像素点为 double 类型, 在电脑中占用 8 个字节; 每幅图像为 $1\,920 \times 1\,080 \times 3$ 像素点, 光场为 7×7 个视场角, 多层装置为 3 层. 那么光场矩阵的大小为

$$1\,920 \times 1\,080 \times 3 \times 7 \times 7 \times 8 \text{ byte} = 2.3 \text{ GB}$$

多层装置矩阵的大小为

$$1\,920 \times 1\,080 \times 3 \times 3 \times 8 \text{ byte} = 142 \text{ MB}$$

而传递矩阵 \mathbf{A} 原本占用的空间是这两个值的乘积, 在稀疏矩阵表示法下, 可以降到与光场矩阵同一个量级. 即便如此, 在运算中需要占用 GB 量级的内存, 在通常情况下也是不可取的.

而在时间层面上, 取方程组格式为式(6)

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{B}$$

在有确定解的情况下, 对该线性方程组的求解过程可以表示为对传递矩阵的 L-U 分解与两个三角矩阵方程求解的过程:

$$\mathbf{A} = \mathbf{L}\mathbf{U} \quad (13)$$

$$\mathbf{L}\mathbf{y} = \mathbf{B} \quad (14)$$

$$\mathbf{U}\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (15)$$

式(13)求解的时间复杂度为 $O(n^3)$, 式(14), (15)的求解为 $O(n^2)$. 通过类比可以得出, 在数据量扩大时, 运算时间将会以三次方增加, 严重影响运算进程.

为了解决效率与内存占用的问题, 本文提出一种行分治方法来对运算过程和数据进行分割, 以减少所需内存和运算时间.

假设光场与多层装置的数据中每个图像原本为 $m \times n \times 3$ 矩阵, 现在将其进行水平分割, 变成 m 个 $1 \times n \times 3$ 矩阵. 则每次运算中, 光场矩阵与多层装置矩阵大小降低为原来的 $\frac{1}{m}$, 传递矩阵降低为 $\frac{1}{m^2}$. 将这样的运算重复 m 次再将每次计算得到的单行图像进行组合, 即可得到所需的结果. 而在时间上, 由于原始计算的时间复杂度为 $O(n^3)$, 这样的分割也可以大幅度降低运算所需的时间, 使更大规模数据量的计算成为可能.

通过行分治方法计算得到的结果与原本的计算结果等价的充分条件是需要还原的光场只有水平分量而没有垂直分量. 证明如下:

在之前的推导中, 得到的方程组为

$$\prod_{k=1}^{k_0} \mathbf{L}_Y(k, m + dy, n + dx, c) = \mathbf{L}_F(p, q, m, n, c), i = 1, 2, \dots, i_0, j = 1, 2, \dots, j_0$$

$$dy = (k-1)h\theta \left[i - \frac{i_0}{2} \right]$$

$$dx = (k-1)h\theta \left[j - \frac{j_0}{2} \right]$$

在没有垂直分量的情况下, $j_0 = 1$, 于是求出 $dx = 0$, 式(1)化简为

$$\prod_{k=1}^{k_0} L_Y(k, m + dy, n, c) = L_F(i, 1, m, n, c), i = 1, 2, \dots, i_0 \quad (16)$$

式(16)中变量 n 可以分离为

$$\prod_{k=1}^{k_0} L_Y(k, m + dy, n', c) = L_F(i, 1, m, n', c), i = 1, 2, \dots, i_0, n' = 1, 2, \dots, n_0 \quad (17)$$

式(17)中 n' 对应的每个值即为分割出的一行水平图像. 容易看出, 上面两个式子是等价的, 即行分治可以得到与原来相同的结果.

1.5 图像拟合程度的量化标准

对计算出的多层装置各层图像在各个角度上重建, 可以得到与原始图像相似的拟合图像. 定义该矩阵为

$$\mathbf{B}' = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (18)$$

式(18)中 \mathbf{A} 和 \mathbf{x} 的意义同式(7). 为与最小二乘法计算拟合目的相符, 本文采用原始图像与拟合图像之间的方差取反来表征两幅图像之间的拟合程度.

$$F(\mathbf{B}, \mathbf{B}') = 1 - S^2 = 1 - \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\mathbf{B}(i, j) - \mathbf{B}'(i, j))^2 \quad (19)$$

由于矩阵中各元素表征图像对光线的透过率, 每点元素值在 $[0, 1]$ 之间, 故方差值也在 $[0, 1]$ 之间. 用 1 减去该方差值, 令拟合程度与目标值呈正相关, 可以使拟合值便于理解.

由于本实验所计算的三维物体均以白色为背景, 图像方差值普遍偏高, 因此单个方向或曲线的方差本身意义不大, 重要的是在某变量变化时整条曲线随之变化的趋势.

2 光场获取与显示方法

2.1 获取方法

2.1.1 用 3DMAX 等软件对虚拟三维物体获取

虚拟或已拍摄物体的三维信息, 可以导入 3DMAX 等软件之中. 借助这种软件的摄影机功能, 能够同时获取某一三维物体各个方向的图像, 从而全面获得光场信息.

由于物体的三维信息已经被完全记录下来, 所以在三维处理软件中进行的过程完全不会受到其他因素的干扰. 而且虚拟摄影机没有大小, 便于获得物体在更加密集的视场角下的图像. 但这一过程并没有对真实物体进行图像拍摄, 获取初始数据依然需要依赖实际的相机.

2.1.2 通过景深相机获取实际物体的三维信息

现有的景深相机不仅可以获取物体的色彩信息, 也可以获取物体在空间中的深度信息. 对这些信息进行综合处理可以得到三维图像, 并用上一节的方法获取其光场.

本实验中采用英特尔的 realsense 摄像头 SR300 实现三维信息的获取, 然后再将三维数据导入到三维软件中进行处理.

相对于直接使用普通相机阵列来说, 景深相机成本更低, 更加灵活, 因此适用于更广泛的情形, 但同时也存在对物体深度的要求高、易受到干扰等缺点.

2.2 显示方法

本文采用亚克力板与光学胶片的组合作为显示装置^[3], 具体模型如图 1 所示.



图 1 多层装置模型

Fig.1 Model for the multi-layer display device

图中, h_0 为光学胶片厚度, 可忽略不计; h_1 为亚克力板厚度, 根据实际计算需要可进行调整。

装置中胶片之间的亚克力板的作用为保持上下两张胶片的间距固定不变, 以与计算模型相符; 顶部与底部亚克力板的起到保护作用, 其厚度可适当大于 h_1 以增大强度。

光学胶片是计算结果图像的载体, 将结果中多层装置的各层图像打印在光学胶片上并将胶片按顺序固定在亚克力板上, 即可进行显示效果的查看。

为保证图像色彩质量与和模型相符的透过率, 实验中采用高精度的彩色喷墨打印。

3 实验数据与实际效果验证

3.1 景深相机获取的光场信息

使用 Intel 的 SR300 景深相机, 一方面可以获取色彩图像, 另一方面获取景深图像, 将两幅图像融合, 即将色彩图像作为贴图放在景深图像所获取的三维模型上, 即可重建该光场, 图 2 与图 3 分别为景深相机获取的色彩图像和深度图像。



图 2 景深相机获取的色彩图像
Fig.2 Color image captured by SR300



图 3 景深相机获取的深度图像
Fig.3 Depth image captured by SR300

3.2 行分治方法的有效性

表 2 为行分治方法与原始方法在计算相同数据量时计算时间的对比, 为忽略其他因素的影响, 这里提供的是各计算时间与 225×150 像素的计算时间的比值, 表中数值无量纲, 从表 2 可以看出, 行分治方法大大降低了运算时间复杂度, 允许进行更大的数据量的计算。

表 2 行分治与原始方法计算时间对比

Table 2 Comparison of calculating time between partition method and original method

Resolution/pixel	Line division method	Original method
225×150	1	1
225×300	1.272 7	3.485 8
450×300	1.699 7	6.485 1
450×600	2.488 6	13.571 3
900×600	4.608	30.993 6
$900 \times 1\ 200$	6.623 5	80.869 3
$1\ 800 \times 1\ 200$	6.707 6	Out of memory
$1\ 800 \times 2\ 400$	8.495 6	Out of memory

3.3 不同参数对成像质量的影响

本文衡量了视场角大小、层数与层间距、分辨率, 以及权重对多层装置成像质量的影响, 其衡量标准为在式(19)中定义的图像方差取反后的值, 通过控制变量得到的结果如图 4 所示, 从图中可以直接得出结论: 减小视场角大小、扩大层数和层间距、增大图像分辨率以及对多层权重适当取值可以改善整体拟合程度曲线, 在视场权重中增大边缘视场权重可以使曲线中心部分下降, 边缘部分上升。

通过降低视场角大小可以提高相应范围内的成像质量, 但由于在评估系统的三维成像效果时, 视场大小是十分重要的评判标准, 因此这种方法并不是提高系统整体成像效果的有效措施。

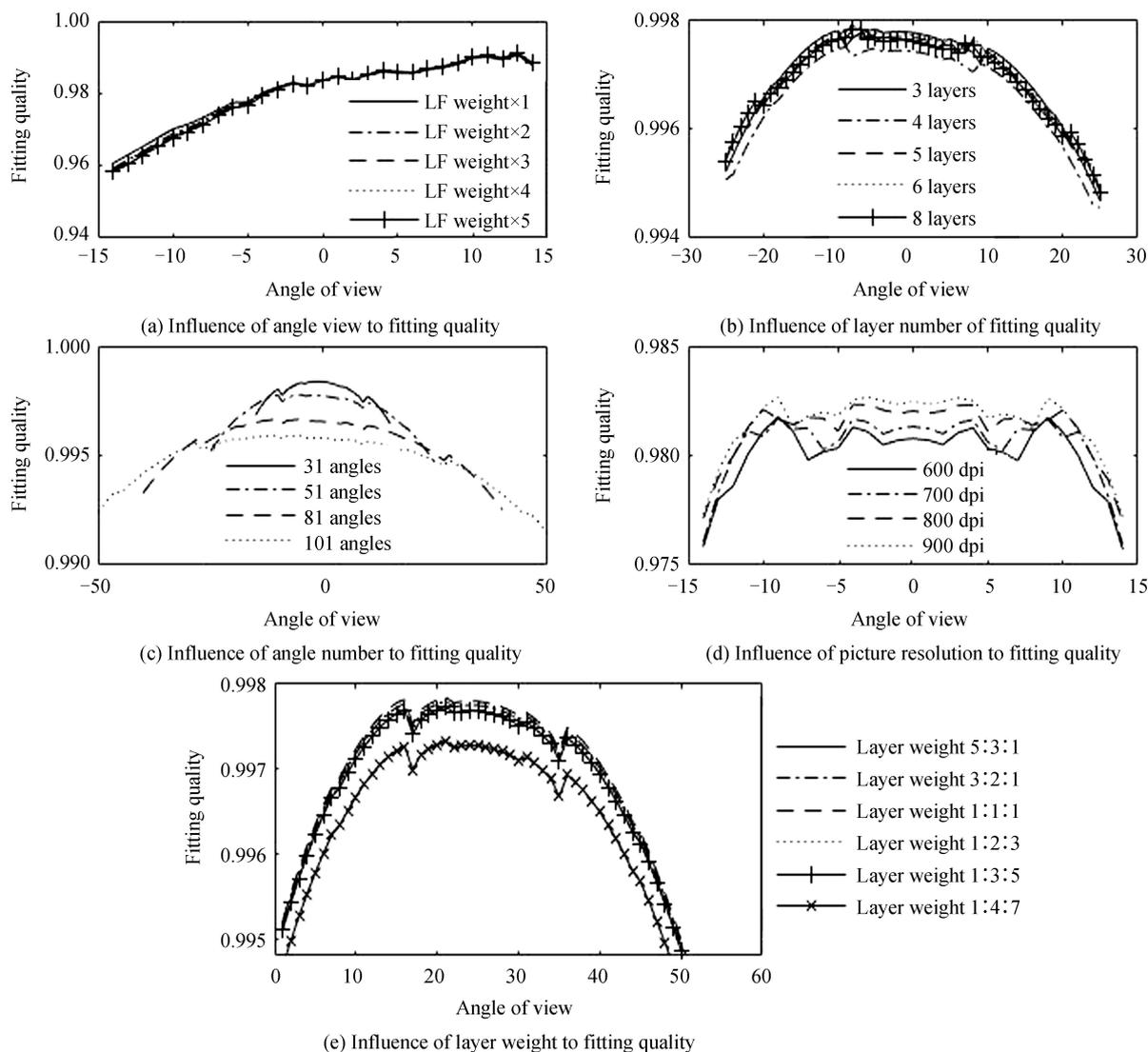


图4 各参数对成像效果的影响
Fig.4 Influence of different parameters on imaging quality

3.4 实际重建效果

图5中的12幅图像分为4排3列,是一次典型的计算、重建与对比结果.其中,第1排的3幅为多层图像,是需要直接显示在胶片上用于光场重建的图案,多层图像左上与右下的十字为组装时校准用.第2排为原始图像,或者说拟合的目标图像.第3排为重建图像.第4排为原始图像与重建图像的差值图,用以直观说明重建光场的拟合效果.第2~4排每排为3幅,从左到右依次对应视场左侧边界、视场中心、视场右侧边界的图像.从对比图像中可以看出,本文采用的方法很好地重建出了原始光场,尤其是中心视场.表3为该模型

表3 实际模型参数

Table 3 Parameters for actual model

Parameter	Value
Model name	Butterfly
Pixel number	450×600
Resolution	400 dpi
Angleresolution	1°
Field of view	±14°
Layer number	3
Layer distance	1 mm



图5 多层图像与理论重建效果
Fig.5 Theoretical reconstruction



图6 实际制作模型效果
Fig.6 Actual reconstruction

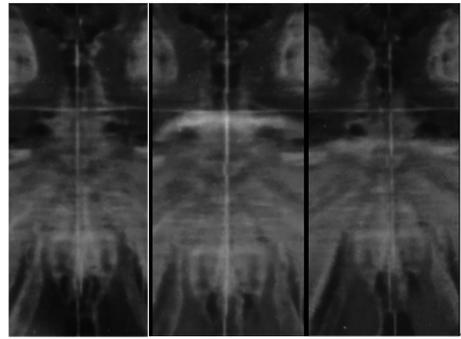


图7 不同视角下实际模型细节对比
Fig.7 Comparison of details in each view

的具体参数,图6为实际制作的光场重建蝴蝶模型,图7为该模型的蝴蝶躯干部分在不同角度的实际拍摄图案对比.

4 结论

本文提出了一种多层光场三维显示的改进优化算法,实现了多层光场三维显示技术从光场获取到重建光场显示的一系列目标.通过对图像计算方法的改进,本文减小了图像计算所需的计算时间与运行内存,使更大规模的数据运算成为可能;同时将解图像方程时用到的最小二乘法改进为加权最小二乘法,在相同数据量时能够通过权重的选取提升成像质量.最后,本文探究了光场及计算中各个参数的变化对成像质量的影响,研究发现适当小的视场角、更大的层数和分辨率,以及对多层和不同视场角的光场的权重的选取能够进一步提升成像质量.

本文对该技术的改进与探究仍存在诸多不足.在行分治方法中,本文以垂直光场的牺牲为代价换得了内存和计算之间的节省,而在同时考虑垂直和水平光场的情况下如何实现大数据量的运算仍是一个需要解决的问题.本文进行运算的数据依然是小视场范围的光场数据,如何在保证重建质量的同时扩大视场也是一个难点.这些问题仍需进一步的研究.

参考文献

- [1] LANMAN D, HIRSCH M, KIM Y, *et al.* Content-adaptive parallax barriers[C]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, **29**(6): 1. December.
- [2] LIU Xu, LI Hai-feng. Spatial three-dimensional display based on the light-field reconstruction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 194-198.
刘旭, 李海峰. 基于光场重构的空间三维显示技术[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9):194-198.
- [3] WETZSTEIN G, LANMAN D, HEIDRICH W, *et al.* Layered 3D: tomographic image synthesis for attenuation-based light field and high dynamic range displays[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, **30**(4): 95.
- [4] DING Jun. The research of near-eye 3D displays based on multi-layer LCDs[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
丁俊. 基于多层液晶的近眼三维显示研究[D]. 杭州:浙江大学, 2016.
- [5] CHEN Xiao-xi, LI Guang-yong, WANG Ji-min, *et al.* Liquid crystal multi-layer 3D display system and algorithm design [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Display*, 2017, **32**(4): 302-307.
陈晓西, 李光勇, 王继岷, 等. 基于液晶多层屏的 3D 显示系统和算法设计[J]. *液晶与显示*, 2017, **32**(4):302-307.
- [6] WANG Han. Optimization of light field integral display[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
王涵. 集成光场三维显示系统优化方法[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [7] FRAUEL Y, JAVIDI B. digital three-dimensional object reconstruction and correlation based on integral imaging[C]. *SPIE*, 2003, **6150**(3):61502M.
- [8] XIA Xin-xing. Principle and establishment of horizontal light field three-dimensional displays[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
夏新星. 水平光场三维显示机理及实现技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [9] JIA Xiao-yong, XU Chuan-sheng, BAI Xin. The invention and way of thinking on leastsquares[J]. *Journal of Northwest University(Natural Science Edition)*, 2006, **36**(3): 507-511.
贾小勇, 徐传胜, 白欣. 最小二乘法的创立及其思想方法[J]. *西北大学学报:自然科学版*, 2006, **36**(3):507-511.
- [10] SU Chen, LI Hai-feng. Survey on light field 3D display applied to mixed reality[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2016, **28**(6): 905-912.
苏忱, 李海峰. 应用于混合现实的光场三维显示研究综述[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2016, **28**(6):905-912.
- [11] LIU Cheng, GU Wei-guo, WANG De-zhong, *et al.* Study of image reconstruction using dynamic grids in tomographic gamma scanning[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2012, **23**(5): 277-283.
- [12] ZUO Guang-xia, ZHANG Quan-hu, JIA Xiao-long, *et al.* Experimental research on the algorithms for emission image reconstruction of tomographic gamma scanning[J]. *Nuclear Electronics & Detection Technology*, 2012, **32**(11): 1276-1279.
左广霞, 张全虎, 贾小龙, 等. 层析 Γ 扫描发射图像重建实验研究[J]. *核电子学与探测技术*, 2012, **32**(11):1276-1279.
- [13] WONG Wen-qing, WANG De-zhong, ZHANG Yong, *et al.* Reconstruction algorithm of transmission image in tomographic gamma scanning[J]. *Nuclear Techniques*, 2008, **31**(5): 396-400.
翁文庆, 王德忠, 张勇, 等. 层析 Γ 扫描透射图像重建算法研究[J]. *核技术*, 2008, **31**(5):396-400.
- [14] LIANG Yan-ming, ZHANG Pei-qing, GUAN Ye-feng, *et al.* Reconstruction and visualization of multi-plane images based on spatial light modulator[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1820-1824.
梁艳明, 张培晴, 关焯锋, 等. 基于空间光调制器的多层图像的构建与可视化[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10):1820-1824.
- [15] ZHOU Xin-xin, SU Chen, LI Hai-feng, *et al.* Research on monocular focusing characteristic for horizontal light field three-dimensional display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(9): 107-114.
周欣鑫, 苏忱, 李海峰, 等. 水平光场三维显示单目聚焦特性研究[J]. *光学学报*, 2017, **37**(9):107-114.
- [16] LI Bao-sheng, WANG Yi-cheng, LU Rong-sheng. Optical tomography imaging system of conical scan[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2016(2): 33-39.
李保生, 王易诚, 卢荣胜. 圆锥形光学扫描层析成像寻的系统研究[J]. *光电工程*, 2016(2):33-39.
- [17] RANIERI N, HEINZLE S, SMITHWICK Q, *et al.* Multi-layered automultiscopic displays[C]. *Computer Graphics Forum*, Blackwell Publishing LTD, 2012: 2135-2143.
- [18] LEE B, CHOI H J, KIM H, *et al.* Three-dimensional display technologies of recent interest: principles, status, and issues[invited][J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(34): H87.

Foundation item: The National Key Research and Development Program of China(No.2016YFB0401901)

引用格式: ZHOU Yun-feng, XU Liang, LI Hai-feng, *et al.* Tomographic 3D Display and Imaging Optimization[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(6): 0610003

周云峰, 徐良, 李海峰, 等. 多层光场三维显示及其图像计算的优化[J]. *光子学报*, 2018, **47**(6):0610003