

星模拟器光学系统视场拼接方法的研究

付景怡 秦天翔 黄蕴涵 刘智颖

A field-of-view splicing method for the optical system of a star simulator

FU Jing-yi, QIN Tian-xiang, HUANG Yun-han, LIU Zhi-ying

引用本文:

付景怡, 秦天翔, 黄蕴涵, 刘智颖. 星模拟器光学系统视场拼接方法的研究[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1468–1475. doi: 10.37188/CO.2020–0221

FU Jing-yi, QIN Tian-xiang, HUANG Yun-han, LIU Zhi-ying. A field-of-view splicing method for the optical system of a star simulator[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1468-1475. doi: 10.37188/CO.2020-0221

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0221>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大视场空间可见光相机的杂散光分析与抑制

Analysis and suppression of space stray light of visible cameras with wide field of view

中国光学. 2019, 12(3): 678 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0678>

大视场高像质简单光学系统的光学-算法协同设计

Optical/algorithmic co-design of large-field high-quality simple optical system

中国光学. 2019, 12(5): 1090 <https://doi.org/10.3788/CO.20191205.1090>

离焦对激光通信接收视场的影响分析

Analysis of the influence of defocus on the field of view of laser communication reception

中国光学. 2018, 11(5): 822 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0822>

仿生复眼系统的子眼安装孔对准误差检测方法

Alignment error detection method of sub-eye mounting hole for bionic compound eye system

中国光学. 2019, 12(4): 880 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0880>

LED微阵列投影系统设计

Design of projection system for a micro-LED array

中国光学. 2019, 12(1): 88 <https://doi.org/10.3788/CO.20191201.0088>

简单光学系统的宽光谱点扩散函数估计

Wide-spectrum PSF estimation for simple optical system

中国光学. 2019, 12(6): 1418 <https://doi.org/10.3788/CO.20191206.1418>

文章编号 2095-1531(2021)06-1468-08

星模拟器光学系统视场拼接方法的研究

付景怡, 秦天翔, 黄蕴涵, 刘智颖*
(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要:大视场星模拟器可以提供更广的星图范围。但是现有星模拟器受显示芯片尺寸的限制,最大视场不超过 30° 。为了增大星模拟器光学系统视场,本文提出一种将同一规格的星模拟器视场进行拼接从而扩大视场的方法。为了降低成本及系统复杂程度、减少系统整体重量,以最少的拼接数目实现最大的拼接视场,文中对视场重叠区域进行了详细计算与分析,提出以平面拼接为基础的形式简化拼接模型,得到正三角形、正四边形、正六边形3种典型的拼接方式,并推导了3种拼接方式下视场利用率的计算方法。提出了单一视场坐标计算方法,据此确定每个视场的中心位置,得到准确拼接数目。对比结果显示,正六边形拼接方式具有视场利用率更高、拼接数目更少的突出优势,为大视场星模拟器设计提供依据。

关键词:视场拼接;星模拟器;大视场;拼接模型

中图分类号:TB133;O439 文献标志码:A doi:10.37188/CO.2020-0221

A field-of-view splicing method for the optical system of a star simulator

FU Jing-yi, QIN Tian-xiang, HUANG Yun-han, LIU Zhi-ying*
(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)
* Corresponding author, E-mail: lzy@cust.edu.cn

Abstract: The large field-of-view (FOV) star simulator provides wider star maps but the existing star simulator is limited by the size of the display chip, and the maximum FOV is not more than 30° . In order to increase the FOV of the star simulator, a splicing method is proposed. In order to reduce the cost, the overall weight and complexity of the system, and to achieve the largest splice FOV with the least amount of splicing, we carry out detailed calculation and analysis of the overlapping area of the field of view and propose a simplified splicing model based on plane splicing. Three typical splicing methods are produced including a regular triangle, a regular quadrilateral and a regular hexagon, and the calculation of the FOV utilization is deduced. This paper also provides a coordinate calculation method, determining the center position of each FOV and obtaining an accurate number of the stitching. The final comparison result shows that the regular

收稿日期:2020-12-31; 修订日期:2021-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61805025; No. 61705018); 吉林省科学技术发展项目(No. 20200401055GX)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61805025; No. 61705018); Science and Technology Development Programme of Jilin Province (No. 20200401055GX)

hexagon splicing method has the outstanding advantages of a higher utilization of the FOV and fewer splicing numbers, which provides a basis for the design of a large FOV star simulator.

Key words: field of view splicing; star simulator; large field of view; splicing model

1 引言

星模拟器是重要的地面标定设备^[1],可在地面模拟星体的排布、姿态,标定并检测星敏感器的探测能力^[2-3]。近年来,星模拟器要求视场更大、精度更高^[4-7]。为了增大视场,获得更广的视野范围,陈启梦等人通过拼接硅基液晶显示器件(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)显示器件的方式,解决了大视场下星图显示器件分辨率不足的问题,将准直系统的视场增大到 22° ^[8];刘欢等人提出了一种算法,能够很好地校正畸变,减少了像差对视场的约束,并且采用特殊的光学材料来优化光学系统,使光学系统的视场达到 20° ^[9];代雨等人利用二次成像方法,设计了一款双光组结合的投影系统,并使用DMD芯片作为星图显示器件,使视场达到 28.6° ^[10-11]。

单一星模拟器受到自身像质和显示芯片大小的限制,继续增大视场的实现度和性价比都很低,而且光学系统的设计会变得异常复杂与困难。

本文提出一种通过拼接视场增大星模拟器视场的方法。为了在增大视场的同时降低重量、简化组合方式、降低成本,本文根据平面几何关系得到不同拼接方式,计算并分析了各方式下的视场利用率,利用编程软件计算了每个单一视场中心坐标和相邻视场交点坐标,进而确定了所需的精准拼接数目。对比视场利用率与拼接数目,得到了最佳拼接方式,实现了视场的增大。

2 视场拼接原理

在视场拼接中,用一个圆锥体来模拟单一小视场的范围,张角的中心轴模拟小视场光学系统的光轴,圆锥体的顶角就是光学系统视场的张角。相同的视场要用相同大小的圆锥体表示;视场大小不同,圆锥体的底面积大小则不同。将处在不同角度、相同大小的小圆锥体拼接起来,可

以近似形成更大的圆锥体。通过这样的原理将在不同方位的单一小视场拼接起来,从而形成更大的视场^[12]。如图1所示, ω 为单一视场角, W 为拼接后形成的视场角。

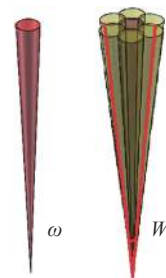


图1 拼接前后视场角对比图

Fig. 1 Contrast of the FOV angle before and after splicing

能否实现视场完全拼接,则取决于单一视场间的轴间夹角 θ_A ,即两个小圆锥轴线的夹角(见图2)。当轴间夹角小于圆锥锥角时,相邻的两个单一小视场范围之间有重叠,才能保证视场信息不丢失。若轴间夹角大于视场角,则两个单一小视场之间会出现间隙,从而导致得到的视场不连续。拼接完成后,显示部分将通过算法处理重叠问题,利用算法对每个单一星模拟器的星图进行修剪,剪裁掉多余的重叠像素,再拼接成一个完整的星图。

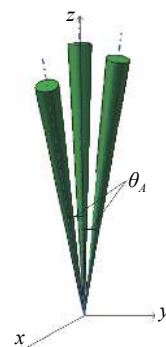


图2 圆锥轴间夹角示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the angle between shafts

3 平面拼接简化模型

针对小视场系统难以继续扩大视场的局限

性,为了简化大视场模型并实现无缝拼接,提出了一种基于平面的拼接方式。以单一的小视场为主体,当单一视场投影圆的内接正多边形能够无缝衔接起来时,就可以使各个小圆无空隙地拼接在一个面上,从而完成无缝拼接。以平面为模型的无缝拼接的前提是若平面产生微小弧度变化,相邻两单一视场间仍能保证没有空隙;而若平面拼接时有重叠部分,则拼接后的视场角度越大,重叠比例就越大。并且,这种拼接方式在拼接过程中对轴间夹角角度无特殊要求,适用于视场为任何大小的光学系统拼接。

若想使内接正多边形在平面上无缝拼接,则要满足以下条件:

$$\begin{cases} N = \frac{360^\circ}{180^\circ \times \frac{n-2}{n}} \\ n = \frac{2N}{N-2} \end{cases} \quad (n, N \in \mathbb{Z}, n \geq 3, N \geq 3), \quad (1)$$

其中, n 为正多边形的边数, N 为使用的多边形个数。

计算得到 n 分别为 3, 4, 6。也就是说,在平面上只有相同的正三角形、正四边形或正六边形能够不重叠地无缝拼接成一个平面,如图 3 所示。

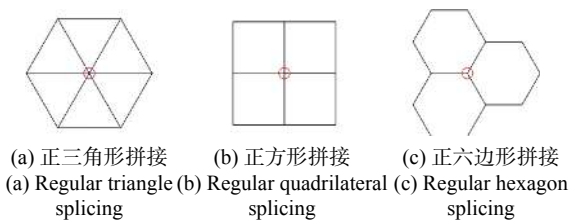


图 3 无缝拼接示意图

Fig. 3 Schematic diagram of three types of seamless splicings

由此得到 3 种视场拼接方式,分别为正三角形、正四边形和正六边形拼接,示意图如图 4 所示。

平面简化模型是为了更直观地获得视场拼接后的效果。但在实际应用中,各单一星模拟器分布在一个球面上。因此要通过后期算法实现平面向三维立体结构的转化。通过单一视场间的轴间夹角 θ_A 能够确定相邻星模拟器之间的固有关系,从而对图像进行剪切和拼接,使图像映射在球面上^[13]。

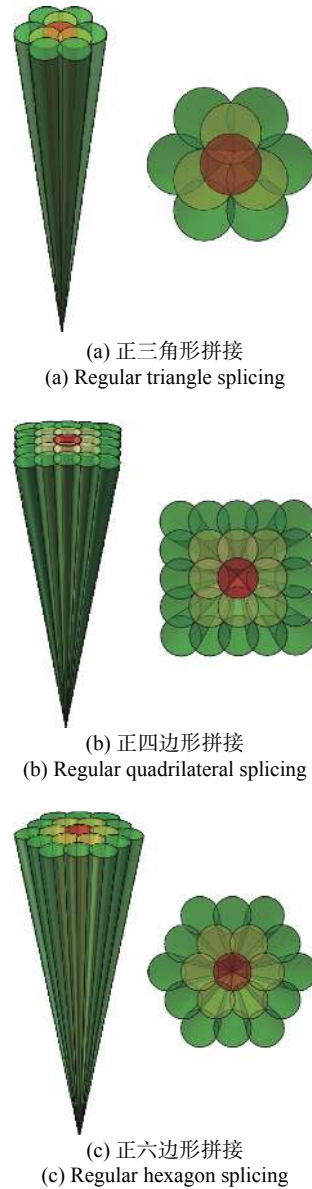


图 4 3 种拼接方式拼接效果

Fig. 4 Splicing effects of three splicing methods

4 视场利用率的计算方法

相邻的单一小视场之间要有一定的重叠部分,这样可以避免视场信息丢失,重叠区域大小直接影响可利用的视场大小。因此借鉴填充率概念^[14]提出了视场利用率的概念。视场利用率是指除去重叠部分,拼接后大视场覆盖的范围和拼接过程中使用的所有单一小视场覆盖范围的比值。根据各拼接方式下的几何关系,能够近似确定重叠部分。视场利用率为 η_n 的计算方式为:

$$\eta_n = \frac{S_L}{N_n S_S} ; \quad (2)$$

重叠部分所占比例 k_n 为

$$k_n = \frac{\pi - \frac{n}{2} \sin \frac{2\pi}{n}}{\pi} \times 100\% , \quad (3)$$

其中, N_n 为正 n 边形拼接方式下所需的 n 边形个数; S_L 为拼接后大视场覆盖面积; S_S 为单一小视场覆盖面积。

根据平面几何关系, 得到视场利用率与重叠部分的关系为

$$\eta_n = \frac{1}{1+k_n} . \quad (4)$$

5 拼接数目的计算模型

5.1 轴间夹角计算

轴间夹角是两个单一小视场中心轴线的夹角, 也可以说是单一视场之间的夹角。前文提到, 当轴间夹角小于单一视场角时, 相邻的两个单一小视场之间才会发生重叠, 保证视场信息不丢失。通过单一小视场的轴间夹角能够计算出各个小视场的准确位置, 进而精准地确定拼接数目, 因此轴间夹角的数值在拼接过程中具有重要作用。3 种拼接方式的轴间夹角如图 5 所示。

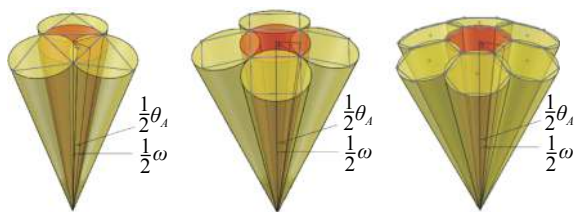


图 5 3 种拼接方式的轴间夹角

Fig. 5 The angle between the axes of the three splicing methods

图 5 展示出轴间夹角大小和单一小视场之间存在一定的几何关系, 得到以下关系式:

$$\tan \frac{\theta_{An}}{2} = \tan \frac{\omega}{2} \cdot \cos \frac{\pi}{n} , \quad (5)$$

其中 θ_{An} 为正 n 边形拼接的轴间夹角。

5.2 拼接数目计算

在平面拼接中, 3 种方式拼接后大视场的投

影图如图 6 所示, 可以明显看到 3 种方式都是以环形阵列的方式向外排布, 最终形成的视场形状也不是圆形, 而是正多边形, 因此利用该模型求出的解只能大致计算出每种方式的拼接数目。图 6 中展示了 3 种拼接方式下拼接两圈之后各自与圆形视场投影的关系。

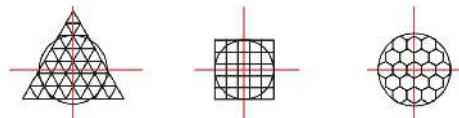


图 6 3 种拼接方式下视场投影情况

Fig. 6 Field of view projection results in three splicing modes

5.2.1 拼接圈数 C

对于拼接后大视场投影形成的圆形来说, 拼接的圈数位置定义在圆形的直径位置, 而对于拼接后形成的正多边形视场来说, 拼接圈数位置是正多边形的穿过重心平行底边的直线位置, 因此要在拼接过程中使两个位置统一。除正三角形拼接方式以外的其他方式单一视场的圆心都在同一直线上, 而正三角形拼接方式不同, 因此正三角形拼接方式要进行单独计算。定义除中心视场外, 向外排布的第一环为第一圈, 以此类推, 如图 7 所示。

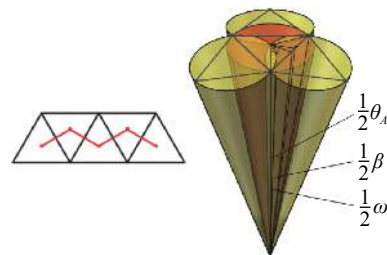


图 7 正三角形拼接方式夹角计算示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the calculation of the included angle of the regular triangle splicing method

正四边形拼接圈数与正六边形拼接圈数 C 的计算方式相同, 即:

$$C_n = \frac{W}{2\theta_{An}} , \quad (6)$$

取整, 其中 $n = 4$ 或 6 。

对于正三角形拼接法, 设在水平方向相邻两圈的夹角为 β , 则有

$$\tan \frac{\beta}{2} = \tan \frac{\theta_A}{2} \sin 60^\circ, \quad (7)$$

则得到三角形拼接圈数 C_3 为

$$C_3 = \frac{W}{2\beta}. \quad (8)$$

5.2.2 拼接数目 S_n

在计算了 3 种拼接方式的圈数后,就要对整体拼接数目进行求解,由图 4 可以看出每种方式的排布都是有规律的,找到每一圈排布个数的规律就能确定整体的排布个数。以 6 圈为例,就足以推导出 3 种方式的拼接数目。

5.2.2.1 正三角形拼接方式

对于正三角形拼接方式,其每一圈的个数如表 1 所示。

表 1 正三角形拼接方式的圈数与个数关系

Tab. 1 Relationship between the number of circles and the number of regular triangle splicing method

圈数 C	1	2	3	4	5	6
每圈个数 a_{3C}	15	33	51	69	87	105

由表 1 能够推导出每一圈的个数公式为

$$a_{3C} = 18C - 3, \quad (9)$$

则得到三角形拼接方式所需拼接数目为

$$S_{3C} = 9C^2 + 6C + 1. \quad (10)$$

5.2.2.2 正四边形拼接方式

正四边形拼接方式,其每一圈的个数如表 2 所示。

表 2 正四边形拼接方式的圈数与个数关系

Tab. 2 Relationship between the number of circles and the number of square splicing method

圈数 C	1	2	3	4	5	6
每圈个数 a_{4C}	8	16	24	32	40	48

由表 2 推导出每一圈的个数公式为

$$a_{4C} = 8C, \quad (11)$$

得到正四边形拼接方式所需拼接数目为

$$S_{4C} = (2C + 1)^2. \quad (12)$$

5.2.2.3 正六边形拼接方式

正六边形拼接方式,是以 6 的倍数向外排列,

其每一圈的个数如表 3 所示。

表 3 正六边形拼接方式的圈数与个数关系

Tab. 3 Relationship between the number of circles and the number of regular hexagon splicing method

圈数 C	1	2	3	4	5	6
每圈个数 a_{6C}	6	12	18	24	30	36

由表 3 推导出每一圈的个数公式为

$$a_{6C} = 6C, \quad (13)$$

最终推导出正六边形拼接方式所需的拼接数目为

$$S_{6C} = 3C^2 + 3C + 1. \quad (14)$$

以上能够得到 3 种拼接方式大致的拼接数目,但是由于拼接的实质是圆形小视场的内接正多边形无缝衔接,因此拼接过程中肯定会有视场部分缺失或冗余的情况,由图 6 也可以看出。要解决这个问题则需要计算每个视场所在的准确位置。

6 拼接数目的计算与分析

在大致了解各拼接方式需要的单一小视场数目之后,就要对单一小视场进行更精准的定位和详细计算,以确定各个方式所需要的准确拼接数目,从而决定采用哪种拼接方式。确定坐标时,选择将所有的坐标做归一化处理,以保证坐标位置只和单一视场角的大小有关。以正六边形拼接方式为例,建立坐标系如图 8(彩图见期刊电子版)所示。

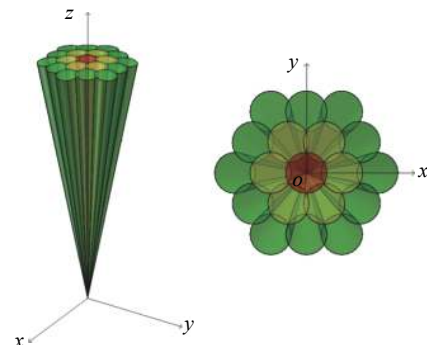


图 8 坐标系的建立

Fig. 8 Establishment of the coordinate system

计算坐标时,要找到各点间能够成立的几何关系。而不同位置的求解方法不同,需要求解的点分为 3 类:内部单一小视场中心坐标、对角线

位置单一小视场中心坐标和相邻小视场交点坐标。

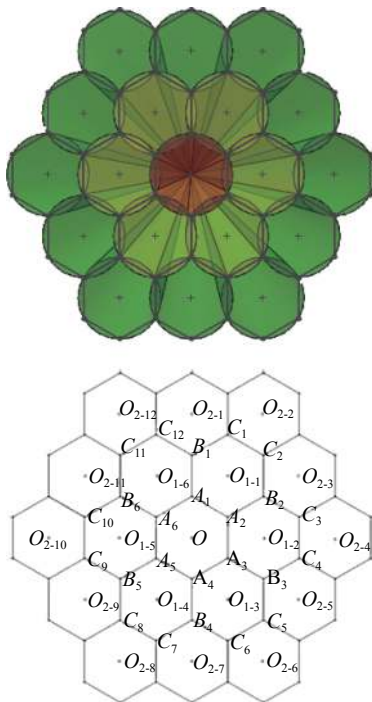


图 9 中心坐标与交点坐标位置排列

Fig. 9 Arrangement of the center coordinates and intersection coordinates

内部单一视场的中心坐标如图 9 中 O_{1-1} 、 O_{1-2} 、 O_{1-3} 、 O_{1-4} 、 O_{1-5} 、 O_{1-6} 所示, 这 6 个位置与 O 的夹角都相等, 均为轴间夹角, 放到图 9 下点 O_{1-1} 与点 A_1 、 A_2 的角度和直线距离都相等, 得到式 (15), 并据此得到其坐标位置。坐标边界位置计算示意图如图 10 所示。

$$\begin{cases} OA_1 = OA_2 \\ \langle O, O_{1-1} \rangle = \theta_A \end{cases} \quad (15)$$

对于相邻单一视场之间的交点坐标 B 、 C 等, 根据 B_1 与 O_{1-1} 、 O_{1-6} 的夹角都是单一小视场的半视场角, 有如下等式:

$$\begin{cases} \langle B_1, O_{1-1} \rangle = \frac{\omega}{2} \\ \langle B_1, O_{1-6} \rangle = \frac{\omega}{2} \end{cases} \quad (16)$$

对角线位置单一视场中心坐标 O_{2-2} 、 O_{2-4} 、 O_{2-6} 、 O_{2-8} 、 O_{2-10} 、 O_{2-12} 等, O_{2-2} 与 O_{1-1} 的夹角为轴间夹角, 其到点 O_{2-1} 、点 O_{2-3} 的直线距离相同, 得到式 (17)。而 O_{2-1} 、 O_{2-3} 皆可由式 (15) 求得。

$$\begin{cases} O_{2-2}O_{2-1} = O_{2-2}O_{2-3} \\ \langle O_{2-2}, O_{1-1} \rangle = \theta_A \end{cases} \quad (17)$$

根据式 (17), 利用编程软件编写程序可得到每个单一视场中心坐标与交点坐标。

根据式 (5) 能够计算出各个方式下的轴间夹角大小, 在编程软件中即可以得到每个单一视场中心坐标与交点坐标位置。为了确定精准的拼接数目, 需计算出拼接到所需大视场的边界坐标位置, 也就是最外圈所在的坐标位置, 将边界坐标点与编程软件中得出的坐标点进行对比, 在该边界坐标点以外的点都不在需求范围内。由于坐标是环状分布, 则无法给定 x 、 y 轴的边界位置, 但 z 轴方向的高度边界位置可求, 即

$$\begin{cases} z_0 = R \cos \frac{W}{2} \\ R^2 = \cos^2 \frac{W}{2} + \sin^2 \frac{W}{2} \end{cases} \quad (18)$$

其中, z_0 为边界位置的坐标高度。

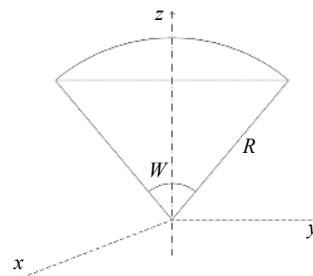


图 10 坐标边界位置计算示意图

Fig. 10 Schematic diagram of calculation of the coordinate boundary position

7 3 种拼接方式对比分析

针对以上 3 种拼接方式, 为了对他们的视场利用率以及相同视场所需要的单一小视场数目分别进行讨论, 以 $\omega=5^\circ$ 的单一视场向外拼接成为 $W=90^\circ$ 、 $W=120^\circ$ 、 $W=150^\circ$ 、 $W=180^\circ$ 为例, 对 3 种方式进行对比分析。

7.1 视场利用率对比

根据式 (2)~式 (4) 可知, 视场利用率只与单一小视场内接正多边形的边数有关, 即与拼接方式有关, 因此 3 种拼接方式下的视场利用率为定值。而根据式 (5), 各拼接方式下的轴间夹角的大小与单一小视场的视场角有关, 当给定单一小视场为 $\omega=5^\circ$ 时, 则可计算 3 种方式下的轴间夹角, 分别将 $n=3, 4, 6$ 与 $\omega=5^\circ$ 代入相应公式。得到结果如表 4 所示。

表 4 3 种方式的视场利用率对比

Tab. 4 Comparison of FOV utilization of three methods

拼接方式	n	η
正三角形	3	63.1%
正四边形	4	73.4%
正六边形	6	86.2%

对比结果显示: 正六边形拼接方式的视场利用率是 3 种方式中最大的, 重复部分最少。

7.2 拼接数目对比

由式 (6)~式 (14) 能够得到, 拼接数目与单一小视场角和拼接后的大视场角都有关, 拼接成不同的大视场, 所需的精确拼接数目会有所变化, 因此要讨论拼接成不同大视场的情况并做对比。用编程软件计算由 $\omega=5^\circ$ 的单一小视场拼接成 $W=90^\circ$ 、 $W=120^\circ$ 、 $W=150^\circ$ 、 $W=180^\circ$ 情况下的拼接数目, 见表 5。

表 5 3 种方式的拼接数目对比

Tab. 5 Comparison of the number of splices for three methods

拼接方式	拼接角度			
	90°	120°	150°	180°
正三角形	921	1321	2277	3255
正四边形	542	914	1481	2037
正六边形	421	673	1134	1554

由图 11 可以看出: 正三角形拼接的增长率很大, 拼接的视场越大, 增加的拼接数目越多; 而正

四边形与正六边形拼接变化相对平缓, 并且无论拼接为任何数值的大视场, 正六边形拼接的拼接数目始终最少。

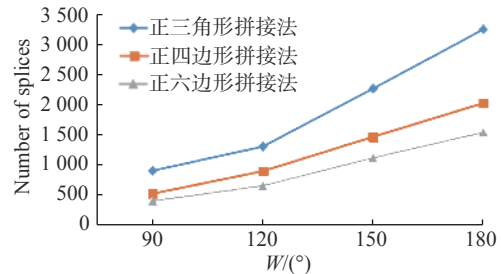


图 11 3 种方式的拼接数目趋势图

Fig. 11 Trends in the number of splices in three ways

8 结 论

本文针对星模拟器光学系统视场难以增大的问题, 提出了对星模拟器单一小视场进行拼接的方法, 以此达到增大视场的目的。以平面拼接模型为基础, 得到有效的拼接方式, 为正三角形、正四边形与正六边形 3 种, 并计算了各种方式的视场利用率。利用编程软件确定 3 种拼接方式的单一小视场坐标位置, 从而得到 3 种方式下的拼接数目。结果表明, 正六边形拼接方式的视场利用率最高, 可达到三角形拼接方式的 1.4 倍, 并且其拼接数目最少, 可以减少系统重量、降低成本。本次研究结果不仅可以应用在星模拟器准直光学系统视场增大中, 还可以应用于其他光学系统的视场增大, 对今后光学设计中模拟大视场具有一定意义。

参考文献:

- [1] 许洪刚, 韩冰, 李曼丽, 等. 高精度大视场多星模拟器设计与验证[J]. 中国光学, 2020, 13(6): 1343-1351.
XU H G, HAN B, LI M L, et al.. Design and verification of high-precision multi-star simulator with a wide field of view[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1343-1351. (in Chinese)
- [2] 陈娜, 王凌云, 李光茜, 等. 静态星模拟器准直光学系统设计[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2019, 42(5): 23-26.
CHEN N, WANG L Y, LI G X, et al.. Design of collimating optical system for static star simulator[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 42(5): 23-26. (in Chinese)
- [3] 郭敬明, 魏仲慧, 何昕, 等. CCD星图模拟器的设计及验证[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(5): 486-493.
GUO J M, WEI ZH H, HE X, et al.. Design of CCD star map simulator and its validation[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(5): 486-493. (in Chinese)
- [4] 梁斌, 朱海龙, 张涛, 等. 星敏感器技术研究现状及发展趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 16-29.
LIANG B, ZHU H L, ZHANG T, et al.. Research status and development tendency of star tracker technique[J]. *Chinese*

- Optics*, 2016, 9(1): 16-29. (in Chinese)
- [5] 李曼丽, 韩冰, 刘航, 等. 大视场多星模拟器标定技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2020, 43(3): 17-22.
LI M L, HAN B, LIU H, *et al.*. Study on calibration technology of large field of view multi-star simulator[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 43(3): 17-22. (in Chinese)
- [6] 李成浩, 何煦, 姬琪, 等. 高时空分辨率动态星模拟器设计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(3): 515-525.
LI CH H, HE X, JI Q, *et al.*. Design of high spatiotemporal resolution dynamic star simulator[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(3): 515-525. (in Chinese)
- [7] 孟遥, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于硅基液晶拼接的高对比度动态星模拟器光学系统[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(3): 511-520.
MENG Y, ZHANG G Y, SUN G F, *et al.*. Optical system of high contrast dynamic star simulator based on LCOS splicing technology[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 511-520. (in Chinese)
- [8] 陈启梦, 张国玉, 孙向阳, 等. 高精度LCOS动态星模拟器的光学系统设计[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): 0716003.
CHEN Q M, ZHANG G Y, SUN X Y, *et al.*. Optical system design of LCOS-based and high precision dynamic star simulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): 0716003. (in Chinese)
- [9] 刘欢. 大视场单星模拟器关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
LIU H. Key technology of single star simulator of large-field-view[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018. (in Chinese).
- [10] 代雨, 程欣, 张文明, 等. 基于DMD的大视场长出瞳距星模拟器光学系统设计[J]. *应用光学*, 2020, 41(5): 891-897.
DAI Y, CHEN X, ZHANG W M, *et al.*. Design of optical system based on DMD for simulator with large field of view and long exit pupil distance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(5): 891-897. (in Chinese)
- [11] 代雨. 大视场高动态星模拟器光学系统的设计与研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2020.
DAI Y. Design and research of optical system for large field of view dynamic star simulator[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science (Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences), 2020. (in Chinese).
- [12] 史立芳, 曹阿秀, 刘艳, 等. 大视场人工复眼结构设计方法与实验[J]. *光电工程*, 2013, 40(7): 27-33.
SHI L F, CAO A X, LIU Y, *et al.*. Design and experiments of artificial compound eye with large view field[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(7): 27-33. (in Chinese)
- [13] 史立芳. 大视场人工复眼成像结构研究与实验[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
SHI L F. Research and experiment on artificial compound eye imaging system with large field of view[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014. (in Chinese).
- [14] CLARE B W, KEPERT D L. The closest packing of equal circles on a sphere[J]. *Proceedings of the Royal Society A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1986, 405(1829): 329-344.

作者简介:



付景怡(1997—), 女, 黑龙江肇东人, 硕士, 2019年于长春理工大学获得学士学位, 主要从事光学设计与成像方面的研究。Email: fujingyi0127@163.com



刘智颖(1981—), 女, 辽宁朝阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 2002年、2004年、2009年于长春理工大学分别获得学士、硕士、博士学位, 主要从事光学设计与成像方面的研究。Email: lzzy@cust.edu.cn