

文章编号:1007-2780(2019)01-0063-07

# 基于视角方向的全景虚拟视图合成

陈剑钊\*, 陈莹, 宋佳润

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

**摘要:**针对3DOF+视频搭建了一套基于视角方向的全景视频虚拟视图合成系统,利用极少视点位置的视频信息即可准确渲染任意视点位置的视频内容,从而为用户提供真实的观看体验。将所合成的新视点位置视图与相机采集的真实视图进行比较。实验结果表明,所合成的虚拟视图平均客观指标PSNR为23 dB左右,主观质量良好,较为真实且能够提供良好的交互性与视觉体验。

**关键词:**虚拟现实;全景视频;虚拟视点合成;视觉体验

**中图分类号:**TN27 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20193401.0063

## Panoramic video virtual view synthesis based on viewing angle

CHEN Jian-zhao\*, CHEN Ying, SONG Jia-run

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University,  
Xi'an 710071, China)

**Abstract:** In order to provide users with a true viewing experience, a panoramic video virtual view synthesis system based on view angle for 3DOF + video was built, which could accurately render arbitrary viewpoint position by using video information with few viewpoint positions. Comparing the synthesized new viewpoint position view with the real view collected by the camera, the experimental results show that the synthesized objective view has an average objective index PSNR of about 23 dB, good subjective quality, and is realistic and can provide good interactivity and visual experience.

**Key words:** virtual reality; panoramic video; view synthesis; visual experience

## 1 引言

随着虚拟现实技术和计算机图形学的不断发展,全景视频作为沉浸式媒体的重要表现形式,在虚拟现实领域扮演着重要的角色<sup>[1]</sup>,受到了广泛地追捧。凭借其良好的临场感和沉浸感<sup>[2]</sup>,全景

视频可以带给用户真实的观看体验。目前,全景视频已在影视娱乐、教育教学、工业仿真、医学研究等众多领域广泛应用。

传统的全景视频借助头戴显示设备,允许用户在视点位置不变的情况下通过头部旋转运动自由地改变视角,观看不同视角的视频内容。但这种视频无法为用户展现视点位置变化时对应的视

收稿日期:2018-08-02;修订日期:2018-10-22.

基金项目:国家自然科学基金(No.61601349)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61601349)

\* 通信联系人, E-mail: jzchen1993@stu.xidian.edu.cn

频内容。对此,国际标准化组织 MPEG 在 MPEG-I<sup>[3]</sup>标准中提出了一种能够反映视点位置变化的 3DOF+视频。这类视频允许用户的视点在一定范围内移动,同时提供视点运动带来的视差效果,让用户能够观看到任意视点下的全景视频内容。当用户视点发生移动,对应视角下的视频内容也会相应地发生变化,但由于拍摄条件和网络传输带宽限制,通常情况下无法获得任意视点位置上的全景视频内容。如何利用有限视点的全景视频信息来获得任意视点下的视频内容是当前 3DOF+视频需要解决的关键问题。

基于深度图像的虚拟视点合成技术(DIBR)<sup>[4]</sup>是预测虚拟视点视频内容的一种最重要的技术。利用 3D-Warping 投影,视图融合,插值等技术可直接生成虚拟视点处的图像。这种方法的绘制速度快,且生成的虚拟图像较为真实。传统的基于图像的绘制技术针对的是普通平面视频,而对于全景视频,由于其映射方式<sup>[5-8]</sup>不同于平面视频,已有的算法无法直接应用于全景视频。基于 DIBR 的算法框架,文献[9]提出了全景视频的虚拟视点合成方法,但这种算法的局限性在于只能对相同视角方向的全景视频进行虚拟视点合成,并且,该算法要求的输入必须是经过拼接处理的完整全景视频。但全景视频的拼接算法<sup>[10]</sup>复杂度较大,且拼接过程往往会带来视频质量的损失。

为了能够渲染任意视点的全景视频,本文设计了一套基于视角方向的全景虚拟视图合成系统,该系统能够利用极少视点位置的视频信息,根据用户视点与视角的变化的对应关系合成出相应的虚拟视图,进行渲染显示,提供给用户更好的临场感与观看体验。

## 2 全景视频虚拟视图合成系统

针对视点位置变化的情况,本文设计搭建了一套基于视角方向的全景虚拟视图合成系统,该

系统能够在用户的视点发生运动的情况下,提供新视点位置的观看视角朝向下的视频内容,给用户以更强的沉浸感和更好的交互体验。该系统主要包括了虚拟视图生成模块和渲染显示模块。其中,虚拟视图生成模块使用基于深度图像的绘制技术,生成用户新视点观看视角下的视频内容。渲染显示模块负责对生成的虚拟视图进行效果增强与显示,借助头戴式显示设备提供给用户观看。

### 2.1 全景视频虚拟视图生成

#### 2.1.1 视频源

为了响应 MPEG-I 关于 3DOF+视频源的要求,文献[10]提供了多种不同相机排列分布下采集得到的视频源序列。如何合理且有效地利用这些视频源实现 3DOF+视频成为了一个热门的话题。

在本文设计的全景视频虚拟视图合成系统中,直接使用文献[11]提供的 Facebook 公司的 360°相机 Surround-360-X24 采集获得的 ERP (Equirectangular Projection) 格式<sup>[11]</sup>的纹理图与深度图来构建用户新视点位置观看视角下的视频内容。整个相机的结构如图 1 所示,其可以采集 24 个不同视角朝向的视频内容,每个视角的视域范围为  $180^\circ \times 180^\circ$ ,其中各视角下的相机姿态如表 1 所示,  $(\alpha, \beta, \gamma)$  表示欧拉角,用来反映与相机姿态对应的视角朝向。图 2 给出了不同用户视角下的视频源样本,其中(a)为 5 号相机采集得到的,(b)为 8 号相机采集得到的。可以看到,不同视角对应的视频内容具有明显的差异。



图 1 Surround-360-X24 相机结构

Fig.1 Surround-360-X24 camera structure

表 1 Surround-360-X24 相机姿态

Tab.1 Surround-360-X24 camera position

| 编号 | $\alpha$  | $\beta$           | $\gamma$          | 编号 | $\alpha$  | $\beta$           | $\gamma$          |
|----|-----------|-------------------|-------------------|----|-----------|-------------------|-------------------|
| 0  | $0^\circ$ | $61.467\ 6^\circ$ | $40.375\ 9^\circ$ | 2  | $0^\circ$ | $16.467\ 6^\circ$ | $24.812\ 1^\circ$ |
| 1  | $0^\circ$ | $61.467\ 6^\circ$ | $14.109\ 5^\circ$ | 3  | $0^\circ$ | $61.467\ 6^\circ$ | $14.109\ 5^\circ$ |

续 表

| 编号 | $\alpha$ | $\beta$    | $\gamma$  | 编号 | $\alpha$ | $\beta$    | $\gamma$  |
|----|----------|------------|-----------|----|----------|------------|-----------|
| 4  | 0°       | 61.467 6°  | 40.375 9° | 14 | 0°       | 118.532 4° | 14.109 5° |
| 5  | 0°       | 16.467 6°  | 24.812 1° | 15 | 0°       | 118.532 4° | 40.375 9° |
| 6  | 0°       | 8.532 4°   | 40.375 9° | 16 | 0°       | 163.532 4° | 24.812 1° |
| 7  | 0°       | 73.532 4°  | 24.812 1° | 17 | 0°       | 118.532 4° | 14.109 5° |
| 8  | 0°       | 28.532 4°  | 14.109 5° | 18 | 0°       | 106.467 6° | 24.812 1° |
| 9  | 0°       | 28.532 4°  | 40.375 9° | 19 | 0°       | 151.467 6° | 14.109 5° |
| 10 | 0°       | 73.532 4°  | 24.812 1° | 20 | 0°       | 151.467 6° | 40.375 9° |
| 11 | 0°       | 28.532 4°  | 14.109 5° | 21 | 0°       | 151.467 6° | 14.109 5° |
| 12 | 0°       | 163.532 4° | 24.812 1° | 22 | 0°       | 151.467 6° | 40.375 9° |
| 13 | 0°       | 118.532 4° | 40.375 9° | 23 | 0°       | 106.467 6° | 24.812 1° |



(a) 5 号相机拍摄内容

(a) View captured by camera5



(b) 8 号相机拍摄内容

(b) View captured by camera8

图 2 视频源样本

Fig.2 Video source sample

### 2.1.2 视频源的视角映射特性

用户所能观看的全景视频内容取决于其观看

视角朝向。Surround-360-X24 相机能够采集具有不同视角朝向、视域为  $180^\circ \times 180^\circ$  的视频内容,如图 3 所示, $R$  和  $V$  分别表示不同用户视角。借助旋转变换,可以将  $R$  视角下的视频内容映射至  $V$  视角下的视频内容。接下来,将详细分析各视角之间的映射特性。

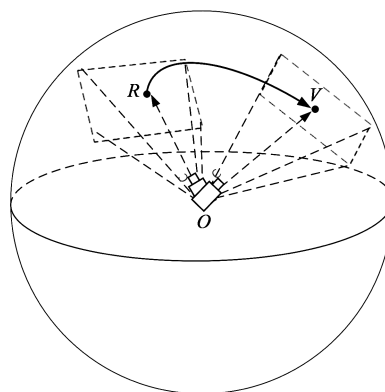


图 3 视角映射特性示意图

Fig.3 View angle mapping characteristics

用户的视角朝向与相机姿态一一对应,而相机姿态通常采用欧拉角<sup>[12-13]</sup>来描述。如图 4 所示,在右手笛卡尔坐标系下,欧拉角( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ )分别描述了绕  $X$  轴旋转的俯仰角(pitch),绕  $Y$  轴旋转的偏航角(yaw)以及绕  $Z$  轴旋转的翻滚角(roll)。当相机分别绕  $X$  轴旋转  $\alpha$  角度,绕  $Y$  轴旋转  $\beta$  角度,绕  $Z$  轴旋转  $\gamma$  角度时,分别对应的旋转矩阵  $R_x(\alpha)$ ,  $R_y(\beta)$ ,  $R_z(\gamma)$  分别如公式(1), (2), (3)所示。

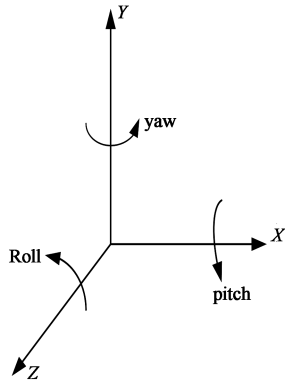


图 4 欧拉角示意图

Fig.4 Euler angles diagram

$$\mathbf{R}_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Surround-360-X24 中每个相机的姿态  $(0, \beta, \gamma)$  是由基准姿态  $(0, 0, 0)$  先绕 Y 轴旋转  $\beta$  角度再绕 Z 轴旋转  $\gamma$  角度这样的组合旋转生成的。且不同的相机姿态可通过两次旋转操作进行转换, 先旋转至基准姿态, 再旋转至目标相机姿态。具体过程如下: 假设相机姿态为  $E_r(0, \beta, \gamma)$ , 基准姿态为  $E_b(0, 0, 0)$ , 目标相机姿态为  $E_t(0, \beta_1, \gamma_1)$ 。参考相机先绕 Z 轴旋转  $\gamma$  角度, 再绕 Y 轴旋转  $\beta$  角度, 即可恢复至基准姿态  $E_b$ , 该过程的旋转矩阵记为  $\mathbf{R}_1$ , 如公式(4)表示。再由基准姿态先绕 Y 轴旋转  $\beta_1$  角度, 再绕 Z 轴旋转  $\gamma_1$  角度, 即可转换至目标相机姿态, 该过程的旋转矩阵记为  $\mathbf{R}_2$ , 如公式(5)表示。

$$\mathbf{R}_1 = \mathbf{R}_y(-\beta) \cdot \mathbf{R}_z(-\gamma), \quad (4)$$

$$\mathbf{R}_2 = \mathbf{R}_z(\gamma_1) \cdot \mathbf{R}_y(\beta_1). \quad (5)$$

通过相机姿态的旋转即可完成用户视角的变换, 由此可用于构建任意用户视角的视频内容, 为下一步生成用户新视点位置观看视角下的虚拟视图奠定了基础。

### 2.1.3 虚拟视图生成算法

当用户的视点位置发生变化, 其观看视角下

的视频内容也相应变化。为了提供给用户在新视点位置观看视角下的虚拟视图, 本系统中设计了一种基于视角方向的全景虚拟视图生成算法。该算法主要利用 DIBR 技术, 借助参考视点位置的视图及其深度信息, 通过 ERP 投影, 3D-Warping 等技术直接生成目标视点处的虚拟视图。算法的流程如图 5 所示, 接下来将重点介绍各个环节的实现原理及主要步骤。

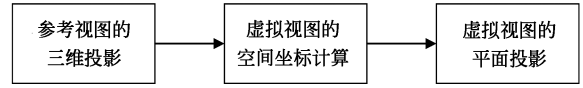


图 5 虚拟视图生成算法框图

Fig.5 Block diagram of virtual view generation algorithm

#### 2.1.3.1 参考视图的三维投影

参考视图三维投影的目标是将获得的参考视图中每个像素投影至其三维空间点  $P(X, Y, Z)$ 。如图 6 所示, 对于分辨率为  $W \times H$  的 ERP 格式视频, 左上角为原点, 像素坐标用  $(m, n)$  表示,  $m \in [0, W), n \in [0, H)$ , 通过公式(6)投影至球面经纬度坐标  $(\varphi, \theta)$ 。再借助深度图  $(m, n)$  坐标对应值, 得到真实深度  $z$ , 通过公式(7)可得到参考视图对应的空间坐标系下三维点  $P(X, Y, Z)$ 。

$$\begin{cases} \varphi = \left(\frac{m}{W} - 0.5\right) \cdot 2\pi \\ \theta = \left(0.5 - \frac{n}{H}\right) \cdot \pi \end{cases}, \quad (6)$$

$$\begin{cases} X = z \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) \\ Y = z \cdot \sin(\theta) \\ Z = -z \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) \end{cases}. \quad (7)$$

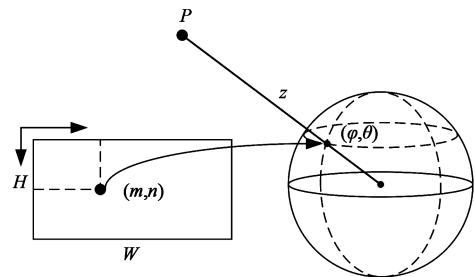


图 6 参考视图的三维投影示意图

Fig.6 3D projection of the reference view diagram

#### 2.3.1.2 虚拟视图的空间坐标计算

虚拟视图的空间坐标计算的主要任务是将参

考视图的三维点  $P(X, Y, Z)$  变换到虚拟视图对应的三维点  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 。

首先,通过旋转变换使参考视图对应的空间坐标系与世界坐标系对齐。参考视点位置的视角用其相机姿态  $E_r(0, \beta, \gamma)$  表示,虚拟视点位置的视角用虚拟相机姿态用  $E_v(0, \beta_1, \gamma_1)$  表示,基于视频源的视角映射特性,借助旋转矩阵  $R_1$ ,将点  $P(X, Y, Z)$  旋转至  $P'(X', Y', Z')$ 。该过程可用公式(8)来表示:

$$P' = R_1 \cdot P. \quad (8)$$

然后,如图 7 所示,虚拟相机与参考相机在世界坐标系下的偏移量  $T(T_x, T_y, T_z)$ 。通过公式(9)即可获得世界坐标系下虚拟视点下空间点  $P''(X'', Y'', Z'')$ 。

$$\begin{cases} X'' = X' + T_x \\ Y'' = Y' + T_y \\ Z'' = Z' + T_z \end{cases}. \quad (9)$$

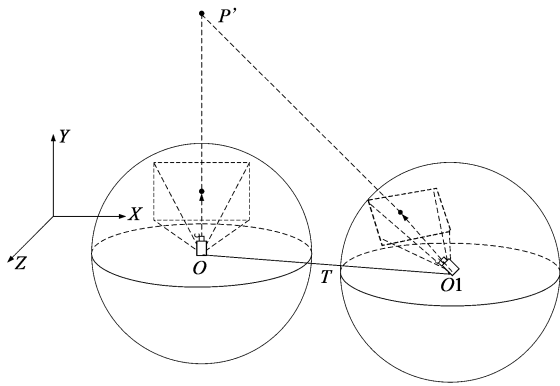


图 7 空间坐标映射示意图

Fig.7 Spatial coordinate mapping diagram

最后,借助旋转矩阵  $R_2$ ,将点  $P''(X'', Y'', Z'')$  旋转至  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$ ,即获得了虚拟视图对应的坐标系下的三维空间坐标,如公式(10)所示。

$$P_1 = R_2 \cdot P''. \quad (10)$$

### 2.3.1.3 虚拟视图的投影变换

虚拟视图的投影变换是将获得的虚拟视图对应的坐标系下的三维点  $P_1(X_1, Y_1, Z_1)$  投影回像素平面。首先,通过公式(11),将三维空间坐标投影至球面经纬度坐标  $(\varphi', \theta')$ 。再通过公式(12),将球面经纬度坐标  $(\varphi', \theta')$  映射至二维图像坐标  $(m', n')$ 。

$$\begin{cases} \varphi' = \arctan\left(-\frac{Z_1}{X_1}\right) \\ \theta' = \arcsin\left(\frac{Y_1}{\sqrt{X_1^2 + Y_1^2 + Z_1^2}}\right) \end{cases}, \quad (11)$$

$$\begin{cases} m' = \left(\frac{\varphi'}{2\pi} + 0.5\right) \cdot W \\ n' = \left(0.5 - \frac{\theta'}{\pi}\right) \cdot H \end{cases}. \quad (12)$$

通过以上几个步骤,即可生成用户在新视点位置观看视角下的虚拟视图。

## 2.2 渲染显示

通过上述的算法,能够通过一个参考视图的信息来直接生成虚拟视点位置用户视角下的视图。但是只使用一个视点位置的信息往往会带来许多的空洞。这些空洞,可能是由遮挡造成的,也可能是由投影过程像素坐标取值造成的。为了增强虚拟视图的渲染显示质量,通常选用处于虚拟视点两侧的左右视点作为参考视点共同生成虚拟视图,这是由于一个视点的遮挡区域在另一个视点中未必被遮挡。通过参考多个视点上的信息,绝大多数由于遮挡引起的空洞都能利用不同参考视点的像素互相填充。本文直接采用文献[14]提出了基于视点基线距离的视图融合方法,对于左右视点映射变换得到的公共部分可通过虚拟视点与参考视点之间的距离进行加权,确定最后的像素值。

融合得到的视图仍会存在一些无法填充的空洞,通常是由于参考视点上没有捕获到其对应的像素信息。对于这些空洞,一般将其认为是背景,借助视图融合后的深度图,搜索该空洞附近的背景像素进行填充<sup>[15]</sup>。

在完成空洞填补之后,就可以将合成的虚拟视图进行渲染显示了。本文设计的全景视频虚拟视图合成系统的显示模块<sup>[16]</sup>直接使用 OpenGL、SDL 以及 OpenVR 等相应功能函数来完成对合成的虚拟视图的显示与渲染。用户可以借助头戴显示设备进行观看。

## 3 合成效果与实验分析

本文采用运行 Windows 10 64 位操作系统的主机作为测试平台,展示系统的虚拟视图合成效果。测试平台的相关配置参数如表 2 所示。

表 2 测试平台硬件配置

Tab.2 Test platform hardware configuration

| 硬件参数   | 配置                     |
|--------|------------------------|
| 显卡型号   | NVIDIA GeForce GTX 970 |
| 处理器型号  | Intel i7 6700K 4.00GHz |
| 操作系统   | Windows 10 64 位        |
| 显示器分辨率 | 3840 ×2160             |

本文搭建的全景视频虚拟视图合成系统，其系统输入有：参考视点的纹理图与深度图，参考视点的相机参数，其中相机参数包括外部参数和内部参数。外部相机参数主要为相机的位置 and 相机的姿态，即视点的坐标信息和用户视角信息，相机的内部参数主要有相机的焦距和主点偏移。

下面给出该系统合成效果的示例图。使用 Surround-360-X24 中的 5 号相机与 8 号相机采集得到的纹理图与深度图，合成 6 号相机视角中的视频内容。其中，5 号和 8 号相机采集样本如图 2 所示，如图 8 所示，(a)为该系统合成的 6 号相机视点位置的虚拟视图，(b)对应的是 6 号相机采集到的真实视图。

同时，为了衡量当前系统合成算法的性能，本文对合成的视图进行了客观质量 PSNR 以及主观质量评分，其中主观质量采取 5 分制的评分系统，1~5 分分别对应于视频显示质量“很差”、“差”、“一般”、“好”、“很好”。本文列举了 4 组作为示例，如表 3 所示。实验结果表明，所合成的虚拟视图平均客观指标 PSNR 为 23 dB 左右，但主观质量均能达到 3 分及以上，较为良好。

综上所述，通过观察与比较可以看出，本文提

表 3 质量评价

Tab.3 Quality evaluation

| 参考视图  | 合成视图 | PSNR/dB | 主观评价/分 |
|-------|------|---------|--------|
| 5、8   | 6    | 23.197  | 4      |
| 10、11 | 9    | 22.952  | 3      |
| 23、19 | 14   | 22.923  | 3      |
| 12、13 | 22   | 23.819  | 4      |

出的基于视角方向的全景视频视图合成算法可合成新视点位置的用户视角方向上的虚拟视图。



(a) 系统合成视图

(a) System synthesis view



(b) 6 号相机拍摄内容

(b) View captured by camera6

图 8 系统合成效果示意图

Fig.8 Example of panoramic virtual view synthesis system

4 结 论

针对当前 VR 全景视频无法应对视点位置变化问题，本文从用户观看全景视频的情景出发，提出了一种基于视角方向的全景视频虚拟视图合成算法，同时设计搭建了一套完整的全景虚拟视图合成系统。该系统允许用户不仅可以在相同视点位置上更换视角观看视频内容，而且可以移动视点位置来观看相应视角内的视频内容，让用户与视频内容有了一定的交互，提供给用户更好的临场感与观看体验。

## 参 考 文 献:

- [1] QIAN F, HAN L J, GOPALAKRISHNAN V. Optimizing 360 video delivery over cellular networks [C]// Proceedings of the 5th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications and Challenges. New York: ACM, 2016:1-6.
- [2] CUMMINGS J J, BAILENSEN J N. How immersive is enough? A meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence [J]. *Media Psychology*, 2016, 19(2): 272-309.
- [3] CHAMPELM L, KOENEN R, LAFRUIT G, *et al.* Working Draft 0.2 of TR: Technical report on architectures for immersive media [R]. ISO/IEC JTC1/SC29/WG11, Doc. MPEG-2017 N16918, Hobart, 2017.
- [4] FEHNC. Depth-image-based rendering (DIBR), compression, and transmission for a new approach on 3D-TV [C]// Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XI. International Society for Optics and Photonics, 2004, 5291: 93-105.
- [5] SZELISKI R, SHUM H Y. Creating full view panoramic image mosaics and environment maps [C]// *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York: ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997: 251-258.
- [6] NG K T, CHAN S C, SHUM H Y. Data compression and transmission aspects of panoramic videos [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2005, 15(1): 82-95.
- [7] HUANG K C, CHIEN P Y, CHIEN C A, *et al.* A 360-degree panoramic video system design [C]// *Proceedings of Technical Papers of 2014 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test*. Taiwan, China: IEEE, 2014:1-4.
- [8] FU C W, WAN L, WONG T T, *et al.* The rhombic dodecahedron map: an efficient scheme for encoding panoramic video [J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2009, 11(4): 634-644.
- [9] WEGNER K, STANKIEWICZ O, DZIEMBOWSKI A, *et al.* Omnidirectional 6-DoF/3-DoF + rendering [R]. MPEG-I visual of ITU-T SG16 WP3 and ISO/IEC JTC1/SC29/WG11. MPEG Doc. m40806, 2017:1-6.
- [10] ZHANG F, LIU F. Casual stereoscopic panorama stitching [C]// Proceedings of 2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Boston, MA, USA: IEEE, 2015: 2002-2010.
- [11] Wikipedia. Equirectangular projection [EB/OL]. (2018-02-21) [2018-3-30]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Equirectangular\\_projection](https://en.wikipedia.org/wiki/Equirectangular_projection).
- [12] 贾瑞才. 重力/地磁辅助的欧拉角无迹卡尔曼滤波姿态估计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(12): 3280-3286.  
JIA Rui-cai. Attitude estimation base on gravity/magnetic assisted Euler angle UKF. [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(12): 3280-3286.
- [13] 王永, 姚太克, 周烽, 等. 望远镜副镜的三自由度并联支撑构型研究与运动分析[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2860-2869.  
WANG Y, YAO T K, ZHOU F, *et al.* Type synthesis of 3-DOF parallel support system for telescope secondary mirror [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2860-2869.
- [14] STANKIEWICZ O, WEGNER K, TANIMOTO M, *et al.* Enhanced view synthesis reference software (VSRS) for free-viewpoint television [R]. ISO/IEC JTC, 2013, 1: 533-541.
- [15] LEE C, HO Y S. Common-hole filling for boundary noise removal in VSRS [R]. MPEG2010/M18514, Guangzhou, China 2010.
- [16] 汪泽伟, 于有光, 杨付正. 基于 HTC Vive 的全景视频显示质量评估[J]. *液晶与显示*, 2018, 33(1): 85-91  
WANG Z W, YU Y G, YANG F Z. Panoramic video display quality assessment based on HTC Vive [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(1): 85-91.

## 作者简介:



陈剑钊(1993—),男,福建泉州人,硕士研究生,2017 年于西安电子科技大学获得学士学位,主要从事计算机图形学与虚拟现实的研究。E-mail: jzchen1993@stu.xidian.edu.cn。