

平行立体图像视差自适应调整

龙桂铃¹, 李其昌^{2*}

¹宜春学院网络与教育技术中心, 江西 宜春 336000;

²深圳西顺万合科技有限公司, 广东 深圳 518000

摘要 为使立体图像在 3D 显示时有更好的立体视觉效果和舒适度, 提出一种针对立体图像水平视差的自适应调整方法来提高立体显示效果。通过特征点匹配获取拍摄场景的深度分布信息, 提取最大深度和最小深度, 结合当前的基线以及人眼可接受的最大视差和最小视差重新调整基线, 直到获取合适的基线, 从而保证拍摄场景在舒适立体成像区内成像。所提方法不会引起任何立体图像失真。为验证该方法对视差的控制效果, 设计并完成了相应的实验。实验结果表明, 该方法能够自适应调整视差, 实现强烈的立体视觉效果。

关键词 成像系统; 立体图像; 视差; 自适应调整; 深度分布; 基线; 零视差平面

中图分类号 TN26

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.211102

Scene-Adaptive Parallax Adjustment for Parallel Stereoscopic Imaging

Long Guiling¹, Li Qichang^{2*}

¹Center of Network and Education Technology, Yichun University, Yichun, Jiangxi 336000, China;

²Shenzhen Xishun Wanhe Technology Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China

Abstract To achieve good stereoscopic effect and avoid visual discomfort, an adaptive horizontal parallax adjusting method is presented for stereoscopic images. The depth information in a scene is extracted by feature point matching, obtaining the maximum and minimum depths. An appropriate baseline is obtained after the resetting of baseline based on the current baseline and the maximum and minimum parallaxes acceptable to the human eye, ensuring that the scenes are imaged in a comfortable stereo imaging area. The proposed method does not introduce stereo image distortion. The control effect of the proposed method is verified by experiments. Experimental results show that the proposed method can adaptively adjust the parallax and realize strong stereoscopic effect.

Key words imaging systems; stereo image; parallax; adaptive adjustment; depth distribution; baseline; zero-parallax-plane

OCIS codes 110.1085; 110.2990

1 引言

近年来, 立体图像显示技术在电影、虚拟现实和视频游戏等领域得到越来越广泛的应用, 三维立体显示技术已成为当今图像显示领域的热门研究课题^[1-2]。但是, 立体内容的实际制作仍然是一个巨大的挑战。通常, 强立体视觉需要大视差, 但视差逐渐增加可能会导致观看者出现不适和疲劳^[2-4]。因此, 需要引入视差自适应调整来捕获立体图像, 从而产生令人印象深刻且舒适的 3D 观看体验。立体图像

的视差与场景的深度分布直接相关, 视差需要和场景深度信息相适应才能实现舒适的立体视觉^[5]。

观看立体图像的视觉舒适度是立体视觉研究的关键。造成视觉不适的原因有很多, 如用于融合左右眼图像产生立体图像所需佩戴的眼镜、立体图像之间的重影或串扰、闪烁的可见性或运动伪影、晶状体调节与双眼辐辏冲突^[6-8]等。双眼辐辏与焦点调节的不一致性存在于所有视差立体显示设备中, 是影响视觉舒适最关键的因素^[3, 6], 即使观看者能够感知到一致的立体视图, 但用于消除调节辐辏冲突

收稿日期: 2019-04-22; 修回日期: 2019-05-01; 录用日期: 2019-05-06

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ161042, GJJ161677)

* E-mail: liqichang8@126.com

所需的方法也可能导致严重的疲劳和视觉不适^[1,9]。一般情况下,视觉舒适度的极限被定义为在各种观看条件下的特定视差范围^[3,10],因此获取舒适视觉的关键问题是如何在捕获立体图像时控制和调整视差范围。

研究者提出了一系列提高视觉舒适度的方法,包括:通过视点合成控制深度范围的方法来提高视觉舒适度^[11-13];通过视图间渲染技术减少过度视差,以增强立体图像的舒适度。针对不同观看条件,有学者提出了采用非线性深度缩放^[9-14]和非线性深度变换^[15]的方法来加强视差的控制。但是,视点间合成和非线性深度变换的处理方法均会在立体图像中引入图像失真,降低图像质量,使得立体视觉效果不佳。

针对以上问题,本文提出一种立体图像的水平视差自适应调整方法。通过特征点匹配获取拍摄场景的深度分布信息,提取出最大深度和最小深度,结合当前的基线以及人眼可接受的最大视差和最小视差重新调整基线,直到获取合适的基线,从而保证拍摄场景在舒适立体成像区内成像。该算法中唯一涉及的图像处理方法是位移,因此所呈现出的立体图像不会出现任何失真和变形。利用基线可调的立体相机系统对该算法进行了测试和验证,实验结果表明,该算法能生成高质量的立体图像,实现视差的自适应调整,且在实现较强的立体视觉效果时不会造成视觉不适。

2 图像视差自适应调整

2.1 算法框架

研究的视差调整算法框架如图1所示。第一组立体图像的像素点 $[I_l^{(1)}, I_r^{(1)}]$ 由设定了初始基线的平行立体相机捕获, I_l 和 I_r 分别代表左边和右边的

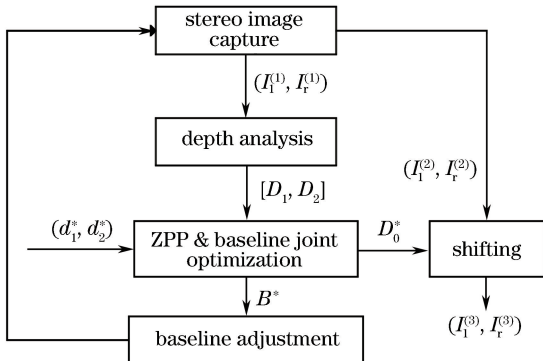


图1 视差自适应调整算法框架

Fig. 1 Framework of scene-adaptive parallax adjustment

图像。显然,图像 $(I_l^{(1)}, I_r^{(1)})$ 的视差可能与所需的特定视差范围 (d_1^*, d_2^*) 不匹配,其中, (d_1^*, d_2^*) 是允许的不引起图像失真的最大视差范围^[3]。立体相机的初始基线距离已经设置好^[16],通过特征点匹配获取场景图像的深度分布信息^[17],得出深度范围为 $[D_1, D_2]$ 。优化基线距离 B 和零视差平面(ZPP)^[1]的深度 D_0 ,求得 B 和 D_0 的最佳解 (B^*, D_0^*) ,用于确保视差范围 (d_1^*, d_2^*) 是能够保证视觉舒适度的范围。调整立体相机的基线距离至 B^* ,捕获第二幅立体图像 $(I_l^{(2)}, I_r^{(2)})$ 。通过水平平移 $(I_l^{(2)}, I_r^{(2)})$ 得到第三组立体图像 $(I_l^{(3)}, I_r^{(3)})$,得到深度为 D_0^* 的ZPP^[1],从而确保图像 $(I_l^{(3)}, I_r^{(3)})$ 具有合适的视差范围和最大立体感,并且不会引起视觉不适。

2.2 场景深度分析

为提高速度,将FAST特征点检测^[18]和BRIEF(Binary Robust Independent Elementary Features)特征点描述^[19]用于特征点匹配。选用完全校准好的立体相机,每个2D特征匹配点对应一个组成深度样本的3D特征点。由于特征匹配的模糊性,深度样本可能包含许多异常值。为了解决这个问题,应用3D空间中的几何滤波器来移除可能由错误匹配引起的孤立深度样本。同时,移除剩余深度样本中最近和最远的3%深度样本。因此,深度范围 $[D_1, D_2]$ 对少数异常值的敏感性较小。通过实验测试了深度范围估计的稳定性。

2.3 基线和ZPP联合优化

ZPP平面上的3D点投影到左右图像平面(IP)上的视差是0。由于在前置摄像机的配置中已设置好ZPP,因此当前置摄像机拍摄的立体图像显示在3D显示器上时,ZPP上的点将出现在显示器屏幕上,而其他点则可能出现在屏幕之外或之中。平行相机成像不存在ZPP,因此有必要移动由平行摄像机捕获到的立体影像(通常左右图像在相反的水平方向上移位),以便在其显示在3D显示器上之前生成ZPP。

图2显示了理想平行摄像机在图像平面水平移位生成零视差平面ZPP的模型。在图2中, O_l, I_{Pl} 和 C_l 分别代表左摄像机的光学中心、图像平面和图像平面的中心。同时, O_r, I_{Pr} 和 C_r 分别代表右摄像机的光学中心、图像平面和图像平面的中心。 I_{Pl} 和 I_{Pr} 水平相向移动相同的量,使得穿过 O_l 和 C_l 的线,以及穿过 O_r 和 C_r 的线可以在 O 点处相交。因此,穿过 O 并平行于图像平面的平面将成为由移位

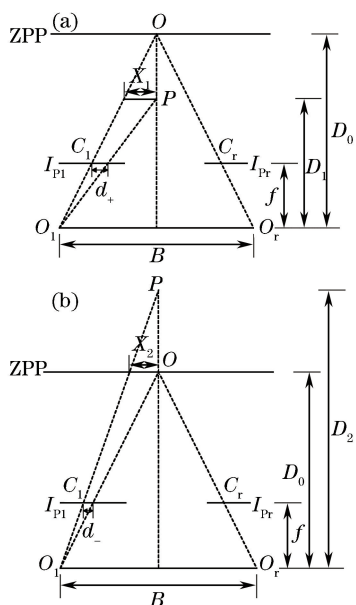


图 2 移动平行立体相机的视差。(a)正视差示例；

(b)负视差示例

Fig. 2 Parallax of shifted parallel stereo cameras.

(a) Positive parallax case; (b) negative parallax case

产生的 ZPP。设 B 为 O_1 和 O_r 之间的基线距离, X_1 和 X_2 是相机 O_1 光轴与两个相机中心线的距离, 设 f 和 D_0 分别是光学中心到 IP 和 ZPP 的距离, D_0 为 ZPP 到光学中心的深度距离。分析移位的平行相机模型中任意 3D 点 P 的视差, 证明具有相同深度的 3D 点具有相同的视差。因此, 在不失一般性的情况下, 让 P 在垂直线上穿过 O 与 O_1 和 O_r 的中点。在图 2(a) 中, P 的深度即 D_1 小于 ZPP 的深度 D_0 ($0 < D_1 < D_0$)。设 d_+ ($d_+ > 0$) 为 C_1 与 P 投影到 I_{pl} 上的点之间的距离, d_1 为 I_{pl} 和 I_{pr} 上 P 的正视差。显然, $d_1 = 2d_+ > 0$ 。基于图 2(a) 中的几何关系, 得出

$$\frac{d_+}{X_1} = \frac{f}{D_1}, \quad (1)$$

$$X_1 \frac{2}{B} = \frac{D_0 - D_1}{D_0}. \quad (2)$$

从(1)式和(2)式可以推断:

$$d_1 = 2d_+ = fB \frac{D_0 - D_1}{D_0 D_1}. \quad (3)$$

同样, 当 P 的深度, 即 D_2 , 大于 D_0 ($D_2 > D_0$), 如图 2(b) 所示, P 的负视差, 即 d_2 ($d_2 < 0$) 可以根据(4)式计算, 即

$$d_2 = -2d_- = fB \frac{D_0 - D_2}{D_0 D_2}, \quad (4)$$

(4)式中 d_- 的定义与 d_+ ($d_+ > 0$) 相同。结合(3)式和(4)式, 根据图 2(a) 和 (b), 可得

$$d = fB \frac{D_0 - D}{D_0 D} = fB \left(\frac{1}{D} - \frac{1}{D_0} \right), \quad (5)$$

式中: D 表示任意 3D 点的深度; d 表示任意 3D 点在左右图像平面上的视差。

设 $d_1^* > 0$, $d_2^* < 0$ 为期望的最大正、负视差, 估计得到相机参数 f 和场景的深度范围 $[D_1, D_2]$, 调整 B^* 的基线距离并捕获一个新的立体图像对 $(I_1^{(2)}, I_r^{(2)})$, 然后水平移位 $(I_1^{(2)}, I_r^{(2)})$ 以形成深度等于 D_0^* 的 ZPP, 则能够获得最佳立体图像对 $(I_1^{(3)}, I_r^{(3)})$, 其最大正、负视差分别等于 d_1^* 和 d_2^* 。基于这个想法, 进行以下运算:

$$d_2^* = fB^* \frac{D_0^* - D_1}{D_0^* D_1}, d_1^* = fB^* \frac{D_0^* - D_2}{D_0^* D_2}, \quad (6)$$

$$B^* = \frac{D_1 D_2 (d_1^* - d_2^*)}{f (D_2 - D_1)}, \quad (7)$$

$$D_0^* = \frac{D_1 D_2 (d_1^* - d_2^*)}{D_1 d_1^* - D_2 d_2^*}. \quad (8)$$

通过求解二元二次方程[(6)式], 即可得到(7)式和(8)式中 (B^*, D_0^*) 的唯一最优解。

2.4 平移

图 3 说明了如何移位 $(I_1^{(2)}, I_r^{(2)})$ 以生成 $(I_1^{(3)}, I_r^{(3)})$, 其中, ZPP 的深度等于 D_0^* 。如图 3 所示, 将左图像平面 I_{pl} 向右移位 h 等效于将左图像 $I_1^{(2)}$ 向左移动 h 。基于图 3 所示的几何关系可得

$$h = \frac{fB^*}{2D_0^*} = \frac{D_2 d_2^* - D_1 d_1^*}{2(D_1 - D_2)}. \quad (9)$$

类似地, 可以通过将 $I_r^{(3)}$ 向右移位 h 来产生 $I_r^{(3)}$ 。基于(3)式和(4)式, 当场景的深度范围是 $[D_1, D_2]$ 时, 相应的视差范围为

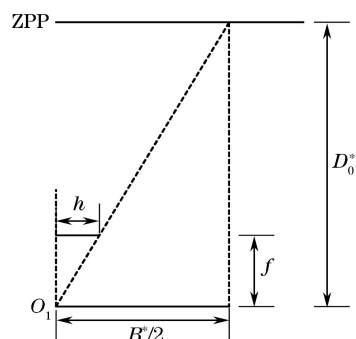


图 3 图像移位相当于移动图像平面的示意图

Fig. 3 Diagram of image shifting equivalent to shifting the image plane

$$\Delta d = d_1 - d_2 = fB \left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2} \right). \quad (10)$$

由此可知, 视差范围 Δd 与 D_0 无关, 即与 ZPP 的选

择无关。也就是说,简单地移动图像无法调整 Δd , 因此调整基线是必要的。

3 实验结果

图 4 显示了用于测试所提出的视差调整方法的基线可调立体摄像机系统。将两台配有 RICOH 6 mm 镜头和 MD50-T 500 万像素传感器的相机安装在水平移动台上。单片机通过 RS232 协议接收来自计算机的命令,并驱动移动平台精确调整两台摄像机之间的基线。完全校准好两台摄像机^[9],从而可以对立体图像进行校正以实现理想的平行相机模型。



图 4 基线可调立体摄像机系统

Fig. 4 Baseline-adjustable stereo camera system

图 5 显示了一个特征匹配的示例,其中顶部和底部的图像分别被左边和右边的相机捕获。彩色的圆圈表示关键点,彩色的线段表示匹配点。从图中可以看到,匹配结果基本上是正确的,关键点均匀分布在图像上。由于相机是完全校准的,因此可以根据特征匹配结果获取深度范围 $[D_1, D_2]$ 。虽然捕获了相同的图像场景,但是由于存在轻微的光照变化、物体移动(例如缓慢旋转的玩具鸟)和图像噪声,FAST 检测的特征点^[18]和相应的匹配点仍然变化较大。

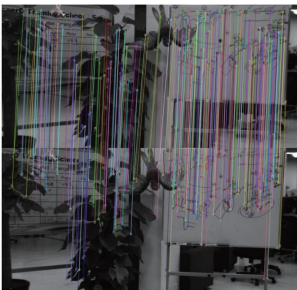


图 5 特征匹配示例

Fig. 5 Example of feature matching

图 6 显示了深度范围的稳定性,图中水平轴表示同一场景的 100 次深度估计。通过实验可知,采用所提出的场景深度分析方法获取的最小深度 D_1 和最大深度 D_2 相对稳定(D_1 和 D_2 的标准偏差分别为 0.0269 m 和 0.0653 m)。

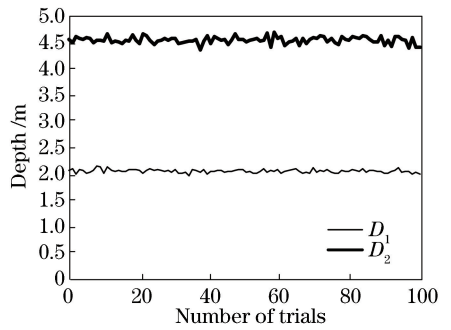


图 6 深度分析的稳定性评估

Fig. 6 Stability evaluation of depth analysis

为测试所提出的视差调整方法的性能,选用分辨率为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$ 的 3D 显示器,其理想视差范围 $(d_2^*, d_1^*) = (-56 \text{ pixel}, 28 \text{ pixel})$ 。场景中的玩具鸟被放置在 10 个深度的不同位置,对不同深度范围的场景进行 10 次视差调整。如图 7 所示,视差调整后的视差范围通过特征匹配获取。所得结果与预期一致,调整后的最大正、负视差,即图 7 中 d_1 和 d_2 分别稳定在 28 pixel 和 -56 pixel 附近。微小的波动主要是由特征检测和匹配的不稳定性所致。视差调整之前和之后的 3D 图像(红蓝格式)如图 8(a) 和 (b) 所示,其中基线距离最初为 0.0558 m,在视差调整后变为 0.1012 m。由实验结果可知,图 8(a) 中的视差范围太小,尤其是负视差;而在图 8(b) 中,视差范围被调整为 $(-56 \text{ pixel}, 28 \text{ pixel})$,其立体视觉比图 8(a) 好很多。

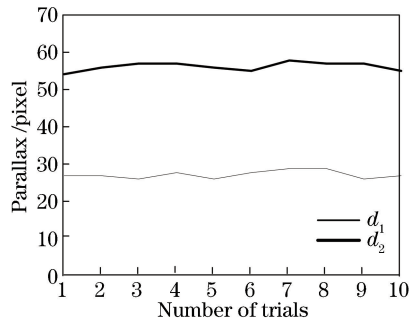


图 7 视差控制的稳定性评估

Fig. 7 Stability evaluation of parallax control

4 结 论

提出一种适用于平行立体图像的视差自适应调整方法。通过特征点匹配获取拍摄场景的深度分布信息,提取最大深度和最小深度,结合当前的基线以及人眼可接受的最大视差和最小视差重新调整基线,直到获取合适的基线,从而保证拍摄场景在舒适立体成像区内成像。该算法可以实现强烈的立体视

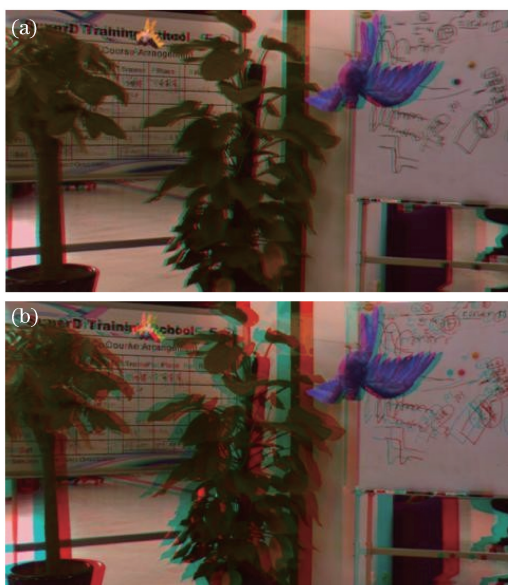


图 8 3D 图像(红-蓝格式)。(a)视差调整前($B=0.0558$ m);

(b)视差调整后($B=0.1012$ m)

Fig. 8 3D images (in red-blue format). (a) Before parallax adjustment ($B=0.0558$ m); (b) after parallax adjustment ($B=0.1012$ m)

觉效果,并且不会产生视觉不适。在基线可调立体摄像机系统中对该算法进行测试和验证,结果显示,深度信息分布和视差控制效果均较好。该方法能够在场景变化的情况下调整基线距离,实现视差的自适应调整,得到强烈的立体视觉效果。

参 考 文 献

- [1] Xia Z P, Cheng C. Stereoscopic display image depth adjustment based on visual saliency[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0133001.
夏振平, 程成. 基于视觉显著性的立体显示图像深度调整[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0133001.
- [2] Hoffman D M, Girshick A R, Akeley K, *et al.* Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue[J]. Journal of Vision, 2008, 8(3): 33.
- [3] Shibata T, Kim J, Hoffman D M, *et al.* The zone of comfort: predicting visual discomfort with stereo displays[J]. Journal of Vision, 2011, 11(8): 11.
- [4] Hu J J, Li S M, Chang Y L, *et al.* Comfortable disparity range of stereo image based on salient region [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0811001.
胡佳洁, 李素梅, 常永莉, 等. 基于显著区域的立体图像舒适视差范围研究[J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0811001.
- [5] Hou C P, Pu L Z, Yan W Q, *et al.* A disparity

adjustment algorithm for stereo image based on linear transformation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(5): 90-94.

侯春萍, 浦亮洲, 阎维青, 等. 立体图像视差线性调整算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(5): 90-94.

- [6] Zou B C, Liu Y, Guo M. Stereoscopic visual comfort and its measurement: a review [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2018, 30(9): 1589-1597.
邹博超, 刘越, 郭玫. 立体图像及显示舒适度评价方法研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2018, 30(9): 1589-1597.
- [7] Kooi F L, Toet A. Visual comfort of binocular and 3D displays[J]. Displays, 2004, 25(2/3): 99-108.
- [8] Hu J J, Li S M, Chang Y L, *et al.* Measurement of comfortable contrast range of stereo image based on salient region[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0215001.
胡佳洁, 李素梅, 常永莉, 等. 基于显著区域的立体图像舒适对比度范围的测量[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 0215001.
- [9] Holliman N. Smoothing region boundaries in variable depth mapping for real-time stereoscopic images[J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5664: 281-292.
- [10] Tam W J, Speranza F, Yano S, *et al.* Stereoscopic 3D-TV: visual comfort [J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(2): 335-346.
- [11] Kim D, Sohn K. Depth adjustment for stereoscopic image using visual fatigue prediction and depth-based view synthesis[C]// 2010 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, July 19-23, 2010, Suntec City, Singapore. New York: IEEE, 2010: 956-961.
- [12] Kishi S, Kim S H, Shibata T, *et al.* Scalable 3D image conversion and ergonomic evaluation[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6803: 68030F.
- [13] Park J I, Um G M, Ahn C, *et al.* Virtual control of optical axis of the 3DTV camera for reducing visual fatigue in stereoscopic 3DTV [J]. ETRI Journal, 2004, 26(6): 597-604.
- [14] Holliman N S. Mapping perceived depth to regions of interest in stereoscopic images [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5291: 117-128.
- [15] Lang M, Hornung A, Wang O, *et al.* Nonlinear disparity mapping for stereoscopic 3D[C]// SIGGRAPH '10 ACM SIGGRAPH 2010 papers, July 26-30, 2010, New York, NY, USA. New York:

- ACM, 2010: 75.
- [16] Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [17] Mikolajczyk K, Schmid C. A performance evaluation of local descriptors[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(10): 1615-1630.
- [18] Rosten E, Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection[M] // Leonardis A, Bischof H, Pinz A. *Computer vision-ECCV 2006. Lecture notes in computer science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006, 3951: 430-443.
- [19] Calonder M, Lepetit V, Strecha C, *et al.* BRIEF: binary robust independent elementary features[M] // Daniilidis K, Maragos P, Paragios N. *Computer vision-ECCV 2010. Lecture notes in computer science*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, 6314: 778-792.