



一种极线近似的双目结构光相位立体匹配方法*

唐笑虎¹, 胡丹², 刘凯¹

(1. 四川大学电气工程学院, 成都 610065; 2. 四川省产品质量监督检验检测院, 成都 610199)

摘要: 针对双目结构光三维重建中的相位立体匹配效率较低问题, 提出了一种极线近似的快速匹配方法。首先依据两相机光心与左像素形成平面与右成像平面交线对极线进行描述; 对每行像素中部分区域的对应极线进行近似, 结合立体视觉的连续性约束, 使得孤立的沿各自极线搜索匹配相位改为区域内沿近似极线连续搜索匹配相位; 同时结合双目相机位姿特性, 实现全局均匀分区, 避免针对每行数据重复分区; 计算过程中采用查表法辅助计算。实验结果表明, 立体匹配后获得点云平均误差为 0.436 mm, 属可接受误差范围内, 立体匹配计算速度平均提升 10.18 倍, 对 640×480 尺寸图像可在 17 ms 内完成立体匹配, 可应用于结构光实时三维重建。

关键词: 极线几何; 立体匹配; 三维重建; 双目结构光; 相位匹配

中图分类号: TP391

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202234.220102

A phase stereo matching method based on integrated epipolar line using binocular structured light

Tang Xiaohu¹, Hu Dan², Liu Kai¹

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu, 610065, China;

2. Chengdu Institute of Product Quality Inspection, Chengdu, 610199, China)

Abstract: For the low efficiency of phase stereo matching in binocular structured light 3D reconstruction, a fast matching method with polar line approximation is proposed. Firstly, the polar lines are described based on the intersection line between the optical centers of the two cameras and the left pixel forming plane and the right imaging plane; the corresponding polar lines of some regions in each row of pixels are approximated, and the continuity constraint of stereo vision is combined, so that the isolated search for matching phase along the respective polar lines is replaced by the continuous search for matching phase along the approximate polar lines in the region; meanwhile, the global uniform partitioning is realized by combining the bit pose characteristics of binocular cameras to avoid repeated partitioning for each row of pixels; the calculation is assisted by the table look-up method. The global uniform partitioning is combined with the binocular camera pose characteristics to avoid repeated partitioning for each row of data. The experiments show that the average error of the point cloud obtained after stereo matching is 0.436 mm, which is within the acceptable error range, and the average speed of stereo matching calculation is increased by 10.18 times.

Key words: epipolar geometry, stereo matching, 3D reconstruction, binocular structured light, phase matching

双目立体视觉技术作为一种三维重建技术, 通过模拟人眼对被摄物体的感知, 计算双目相机成像视差以重建物体的三维模型^[1]。双目立体视觉技术通常可分为被动立体视觉与主动立体视觉, 被动立体视觉方法根据匹配基元不同, 可分为基于特征的匹配^[2]和基于区域的匹配^[3]等。被动式三维重建易产生匹配歧义, 且对无纹理区域无法进行匹配^[4-5], 重建精度低。而主动立体视觉技术^[6-7], 通过结构光投影机主动向重建对象表面投射可控制的结构光, 解码后获得相位图像, 利用极线约束等方法对相位进行匹配, 可获得稠密的视差图。结构光所形成的相位图像能对无纹理区域进行有效描述, 并可形成稠密视差图像, 重建精度显著高于被动式三维重建, 但同时也引入了相位的非线性失真问题与极线约束计算耗时高的问题。针对非线性失真问题, Wang Yongchang^[8]等提出一种混合方式

* 收稿日期: 2022-04-09; 修订日期: 2022-05-25

联系方式: 唐笑虎, scu_xiaohutang@163.com。

通信作者: 胡丹, demyd03@163.com。

对相位进行修正,实现对噪声及非线性的鲁棒,孙进^[9]等人则使用输入光强与输出光强的多项式模型进行主动矫正,能有效减低非线性失真影响。针对极线约束计算耗时较高的情况,多集中于使用极线矫正配合立体视觉的连续性约束与一致性约束实现亚像素匹配^[10-11],但该类算法对噪声以及相位偏差较为敏感,也有部分学者采用投影具有一定特征的结构光图像,如两组相互垂直的光栅获取两条等相位线通过等相位线相交的方法定位匹配点对^[12],但该方法需额外投影结构光图像,增加了编解码的时间。本文针对双目立体视觉中逐像素计算极线并沿极线搜索匹配计算耗时较高的问题,提出一种极线近似的方法,将水平方向上的局部像素的极线进行近似处理,使该区域内像素的极线不变,结合立体匹配的连续性、唯一性、一致性约束,实现在区域内所有点沿近似极线连续匹配相位;并结合双目相机位姿特性,实现图像全局均匀分区,可实现每行并行计算,进而实现实时立体匹配。

1 双目结构光重建原理

双目结构光的三维重建首先将左右相机进行标定后,通过投影光机投射相移正弦波条纹图像于重建对象表面,并在左右相机中拍摄不同相移的时间序列条纹图像,根据编码策略进行解包裹相位后形成相位图像参与立体匹配并重建。投影光机所投影的图像编码通常使用相移正弦波条纹^[13],双目结构光的立体匹配根据立体匹配的一致性与连续性约束,常使用水平方向变化的条纹编码如图1所示。

左右相机捕获的经重建对象调制后的条纹图像中各点光强可表述为

$$I_n^C = A^C + B^C \cos\left(\varphi - \frac{2\pi n}{N}\right) \quad (1)$$

式中: I_n^C 代表图像中每点光强, A^C 和 B^C 分别为一维离散傅里叶变换的直流分量和调制量, φ 为一维傅里叶离散变换的相位, n 为当前相移步数, N 为总相移步数。其中 B^C 和 φ 可通过多步相移进行计算得到包裹相位。

相较传统多步相移方法,多频外差^[14-15]方法具有较好的鲁棒性能,对复杂环境下的对象能保留更多的细节。为了更好地抑制非线性误差与减少过曝点,本文采用四频六步相移进行外插解相位,沿水平方向进行正弦编码^[16-17]。针对六步相移图像组形成的每频率下的 B^C 及相位解码过程使用查找表方法进行计算,其计算过程使用查找表方法进行实时计算可获得结果。对求得的左右相位图像,需使用对极几何进行全局亚像素相位匹配。对极几何表述了双目相机光心、成像平面以及重建对象之间的几何关系,属于三平面相交的几何问题,对极几何可表现为图2所示的模型。其中 O^L, O^R 为左右相机光心, l^R 为过图像极点 e^R 的极线, (X^W, Y^W, Z^W) 为重建对象的世界坐标。其中 O^L, O^R 之间的连线成为基线,成像平面与基线交点为极点。对极几何中的像素成像在世界坐标系下的各位置成像均满足单应性原理,即遵守极线约束。

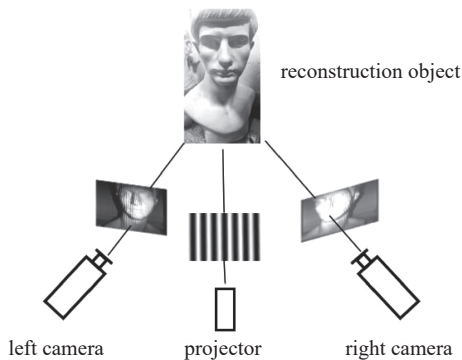


Fig. 1 Binocular structured light 3D reconstruction system

图1 双目结构光重建系统

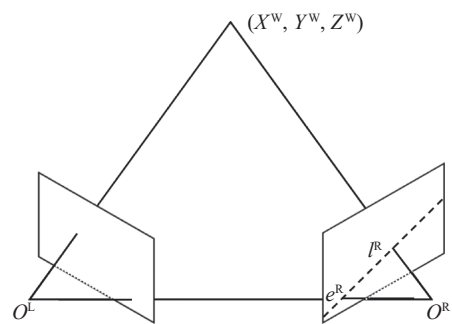


Fig. 2 Diagram of epipolar geometry^[18]

图2 对极几何示意^[18]

对极几何中的极线约束可使用基础矩阵与图像齐次坐标进行描述

$$mFm' = 0 \quad (2)$$

式中: m, m' 指对应像素点的齐次坐标, F 指基础矩阵。基础矩阵为不满秩的矩阵,其秩为2,因此,关于式2对特定像素点只能求解为一条直线,该直线通过极点与匹配点称为极线。为加速对于极线的计算, Liu Kai^[18]等提出一种拓展极线几何方法,利用三平面的相交关系,通过模拟重建对象在左相机光心处以及在无穷远处的位置,分别得到极线上两点,从而实现对于极线的计算。对于对极几何,所有极线均过成像平面的极点这一不动点,因此可将极线通过点斜式方程进行描述^[18],即

$$k = \frac{y_{\infty}^R - y_e^R}{x_{\infty}^R - x_e^R} \quad (3)$$

其中： k 为根据左点求出的斜率， $x_{\infty}^R, y_{\infty}^R$ 为右相机成像点， x_e^R, y_e^R 为右相机极点。得到极线后，将相位图像逐像素沿极线搜索相位相等点进行插值后根据相位所代表的深度信息即可进行三维重建。

根据立体视觉的唯一性约束，在插值过程搜索第一个大于左相机点的相位记为 φ_1^R ，位置记为 x_1^R ，其前点记为 φ_0^R ，位置记为 x_0^R ，于是可将左相机相位与前后两点相位作为关系在前后两点位置中进行插值(如图3所示)获得

$$x^R = \frac{\varphi^L - \varphi_1^R}{\varphi_1^R - \varphi_0^R} + x_1^R \quad (4)$$

式中： x^R 表示在右相机成像中的匹配相位亚像素位置。获得亚像素级匹配点后，即可根据匹配点信息进行点云计算，同时点云计算过程也可构建查找表进行加速。

2 极线近似策略

随成像质量提升，逐点搜索匹配的计算时间复杂度倍增，且有效计算逐步减少，较多时间被浪费在极线计算以及沿各自极线重复搜索中。因此，快速计算极线与减少重复搜索时长是研究重点。本文设计了一种极线近似的快速匹配相位的方法，针对其中的冗余计算过程进行优化。根据双目相机位姿特性与水平相移条纹形成的相位图像特性，其在待匹配图像中的极线斜率方向与相位单调方向一致且极线趋于水平如图4所示。

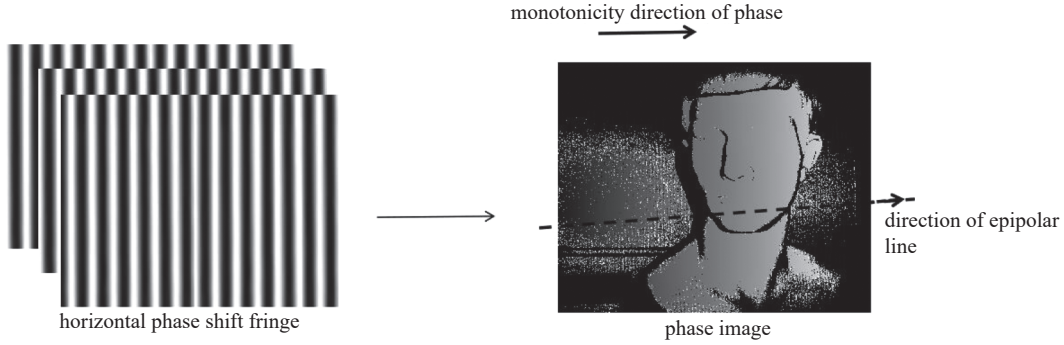


Fig. 4 Horizontal phase shift fringe align with the phase monotonicity direction and epipolar line of phase image

图4 水平相移条纹图像使得相位单调方向与极线方向一致

可见，在图像范围内极线上像素点的位置变化主要为横轴变化，其纵轴变化极小，通常为几像素。因此，在像素级粗定位时，在相同步长下于右相机成像中沿极线搜索的像素纵轴位置无差异时，可视为在同一极线上，本文称之为像素无差极线，即满足

$$\Delta k W_s < 1 \quad (5)$$

其中： Δk 表示水平方向上首尾像素点对应极线的斜率差值； W_s 为同步搜索长度，即不同极线搜索时所经历的不同步长。因此在特定步长下，该区域内不同像素的极线可视为同一极线，在像素级搜索中结果是无差的，同时根据立体视觉的一致性与连续性约束，因此一定区域内的同行相位可实现连续搜索，即后续点的搜索起点可从前点的搜索终点开始连续搜索，进而无需进行重复前置搜索，提升匹配效率。但若以式(5)所示条件对图像进行分区可能由于数据差异导致每行所形成数据段长度不一致，如图5所示，因而每行均重新计算从而增加了一定的计算量。

为实现均匀分区避免每行重复计算对式(3)所示的极线斜率计算进行分解可得

$$k = \frac{a_1 n_x + b_1 n_y + c_1 n_z}{a_2 n_x + b_2 n_y + c_2 n_z} \quad (6)$$

式中： $(n_x, n_y, n_z)^T$ 为由Hartley^[19]算法计算得到的左光心与重建对象的单位向量， a_i, b_i, c_i 为通过重投影矩阵^[20]与左相机像素点求得的参数，可通过下式求得

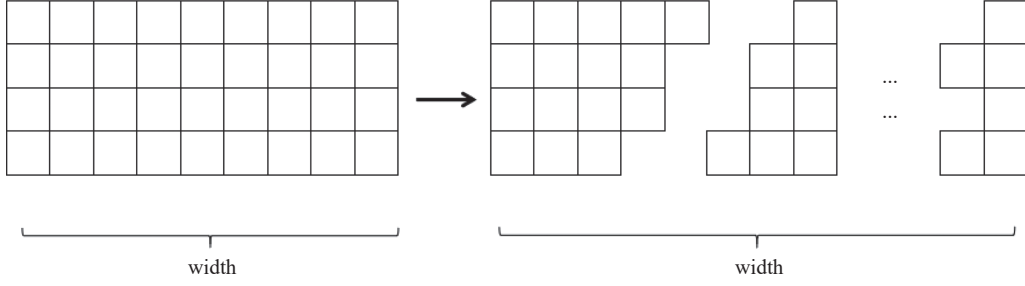


Fig. 5 The region divided by integrated epipolar line

图 5 极线区域分段示意图

$$\begin{cases} a_1 = M_{31}^R y_e^R - M_{21}^R \\ b_1 = M_{32}^R y_e^R - M_{22}^R \\ c_1 = M_{32}^R y_e^R - M_{23}^R \end{cases}, \begin{cases} a_2 = M_{31}^R x_e^R - M_{21}^R \\ b_2 = M_{32}^R x_e^R - M_{22}^R \\ c_2 = M_{33}^R x_e^R - M_{23}^R \end{cases} \quad (7)$$

式中: M_{ij}^R 为右相机的重投影矩阵的第 i 行第 j 列, 于是结合式 (3) 和 (7) 可将中间过程进行参数化表达, 得到斜率直接关于左相机像素点的计算表达式

$$k = \frac{p_1 x^L + q_1 y^L + t_1}{p_2 x^L + q_2 y^L + t_2} \quad (8)$$

其中 p_i, q_i, t_i 为参数化的矩阵, 计算过程可通过下式计算

$$(p_i, q_i, t_i)^T = C(a_i, b_i, c_i)^T, \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

可见, 对于左相机成像中的每行像素点, 其垂直方向行数值固定, 因此极线斜率变化呈现为单调的反比例函数, 故可直接将首尾斜率插值作为水平方向的最大差值进行计算获得最大像素变化

$$S = \Delta k' W \quad (10)$$

其中: $\Delta k'$ 为首尾斜率差值, S 为最大变化像素数, 由于像素变化为像素级, 因此 S 需向上取整, W 为相机成像宽, 所得 S 即为在水平方向上的最大变化像素, 根据该值可得到水平方向的最大分区数。同时结合双目相机的水平位姿特性, 可通过相机内参与相机间位姿联合可得

$$q_2 = 0 \quad (11)$$

于是, 联立式 (8) 并在同行内计算斜率, 斜率计算将会退化为一次函数, 因此可将水平方向的斜率变化视为线性变化。便可将根据 S 将水平方向上的左相机像素点进行等分, 即将原相机成像宽条相机成像宽步长极线简化为 S 条相机成像宽步长像素无差极线上的连续相位匹配, 其中每段无差极线斜率为该段中心的极线斜率。即可实现全局均匀分区, 如图 6 所示, 无需对每行数据进行重复计算。

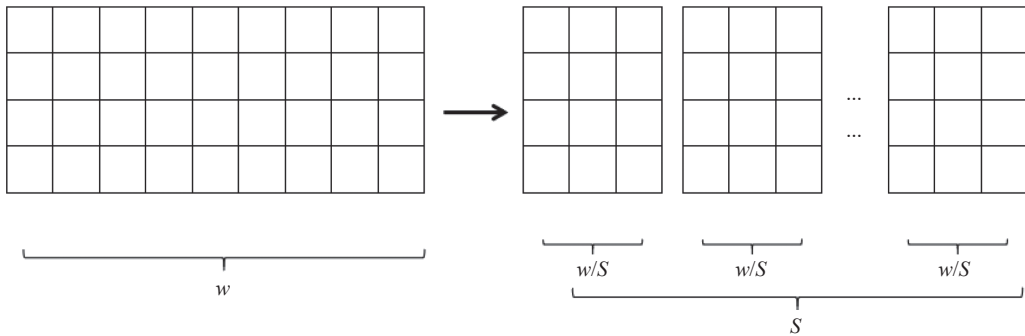


Fig. 6 The region divided by integrated epipolar line using unified partitioning policy

图 6 极线区域分段示意图

3 实验分析

为验证本文提出方法的可行性与速度提升, 使用了 Visual Studio 2015 平台编程验证, 设备配置为 Intel(R) Core(TM) i5-10500 CPU @3.10 GHz, 32 G 内存, 并使用无锡微视传感科技双目相机 PD1000/200-600 进行实验。采用文献 [18] 中所提出的查找表方法作为对照参考, 该方法相比传统非查找表方法计算速度提升约为 10 倍。为在常见图像尺寸

下,针对不同极线分区数以及不同数量级总像素的匹配速度及精度进行测试,分别以 640×480 、 1280×1024 、 2448×2048 成像分辨率进行了结构光三维重建,并以耗时时间作为度量标准并进行重建,对比结果如表 1 和图 7 所示。如表 1 所示,本文方法在三种尺寸下均可比传统查表法的极线匹配有明显提升,平均提升 10.69 倍。

表 1 不同分辨率匹配时间对比

Table 1 Matching time spent comparison of different resolution

resolution	original time spent/s	improved time spent/s	enhancing rate
640×480	0.223	0.017	12.72
1280×1024	1.008	0.109	9.29
2448×2048	3.256	0.324	10.05



(a) reconstruction using original method



(b) reconstruction using our method

Fig. 7 3D reconstruction of plaster statue

图 7 不同方法重建结果

同时,本文为验证无差极线方法的可重复性,针对 640×480 分辨率下的不同场景进行了对比测试;其中以墙面为基准参考,Scene 1 为添加单石膏像的简单场景,Scene 2 为添加多对象的较复杂场景,其对比结果如表 2 所示。由表 2 可知,本文方法在不同场景下均能保持有效地速度提升,平均提升 10.18 倍,但针对场景复杂度不同将会对结果出现影响。经实验分析发现,复杂场景下的匹配点对数目明显少于简单场景与墙面,且点对的缺少与场景复杂度呈现正相关。因此当匹配点丢失时,传统方法直接跳过该点,而本文方法由于缺失点将会影响后续匹配,等同在缺失点附近恢复传统算法,故速率提升有所降低。因此,图像中出现的由于成像角度差异所形成的不可匹配像素点越多(如图 7 中鼻梁两侧区域),匹配速度受到影响将会加剧。

表 2 不同场景匹配时间对比

Table 2 Matching time spent comparison of different scene

resolution	original time spent/s	improved time spent/s	enhancing rate
wall	0.250	0.031	8.06
scene 1	0.223	0.017	12.72
scene 2	0.156	0.016	9.75

同时,为验证本文方法的精确性,将不同分辨率下的重建点云进行差分对比,以点云差分平均值及差分标准差作为误差度量,如表 3 所示。由表 3 可见,在 3 种分辨率下,本文所提出的误差极线方法所产生的误差均小于 1 mm,均能有效进行三维重建。并针对其中误差原因进行分析,主要分为两种:(1)相位图像中出现的相位突变现象导致

表 3 不同分辨率重建点云差分对比

Table 3 Difference of 3D reconstruction point cloud of different resolution

resolution	average/mm	standard deviation/mm
640×480	0.436	0.316
1280×1024	0.339	0.296
2448×2048	0.221	0.346

极线上的相位不单调导致匹配错误,该误差可通过相位滤波、增加分段数量及添加匹配缓冲带进行抑制,其中增加分段数量抑制效果明显优于匹配缓冲带,但二者均需一定速度牺牲;(2)主要是集中在前景与背景突变区域形成的较大深度突变位置(如图7(b)中头顶标注区域),该部分相位值产生剧烈变化,通过对相位图像进行阈值滤波等预处理可有效降低该部分误差。

4 结 论

相位立体匹配往往耗费大量时间进行计算,本文提出的像素无差极线代替传统逐点计算极线的匹配方法在保证精度的情况下,通过将相近极线的匹配进行合并实现沿极线连续匹配相位,使得相位匹配耗时降低1数量级,配合查表方法可实现实时三维重建。实验和误差分析表明,该方法可兼顾精度与速度,多种分辨率下的相位匹配速度平均提升1个数量级,可达到实时性要求;同时该方法仅需结构光相移方向为水平方向,对其他参数并无要求,实用性较强。后续研究将针对相位突变问题进行,在保持匹配速度同时进一步抑制误差,尝试从提升相位质量入手减少相位突变情况,提高匹配结果精确性。

参考文献:

- [1] Sebastian T, Puthiyadam J J. A survey on video summarization techniques[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2015, 132(13): 31-33.
- [2] Sadeghi H, Moallem P, Monadjemi S A. Feature based dense stereo matching using dynamic programming and color[J]. *International Journal of Computational Intelligence*, 2004, 4(3): 179-186.
- [3] 何人杰. 双目立体视觉区域局部匹配算法的改进及其实现[J]. *现代电子技术*, 2009, 32(12): 68-70. (He Renjie. Improvement of regional related match algorithm for binocular stereo vision and its implementation[J]. *Modern Electronics Technique*, 2009, 32(12): 68-70)
- [4] Scharstein D, Szeliski R. High-accuracy stereo depth maps using structured light[C]//*Proceedings of 2003 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2003: 195-202.
- [5] Yoon K J, Kweon I S. Adaptive support-weight approach for correspondence search[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(4): 650-656.
- [6] Liu Kai, Wang Yongchang. Phase channel multiplexing pattern strategy for active stereo vision[C]//*Proceedings of 2012 International Conference on 3D Imaging (IC3D)*. 2012: 1-8.
- [7] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47(1): 7-12.
- [8] Wang Yongchang, Liu Kai, Hao Qi, et al. Robust active stereo vision using Kullback-Leibler divergence[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(3): 548-563.
- [9] 孙进, 马煜中, 杨晗, 等. 结构光三维测量非线性相位误差主动校正法[J]. *仪表技术与传感器*, 2019(10): 117-121,126. (Sun Jin, Ma Yuzhong, Yang Han, et al. Active correction of nonlinear phase error for structural light three-dimensional measurement[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(10): 117-121,126)
- [10] 肖志涛, 卢晓方, 耿磊, 等. 基于极线校正的亚像素相位立体匹配方法[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(s1): 225-230. (Xiao Zhitao, Lu Xiaofang, Geng Lei, et al. Sub-pixel matching method based on epipolar line rectification[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(s1): 225-230)
- [11] 关芳芳, 程筱胜. 基于极线校正的相移结构光三维测量[J]. *南京工程学院学报(自然科学版)*, 2014, 12(2): 9-13. (Guan Fangfang, Cheng Xiaosheng. Three-dimensional measurement using phase moving structured light based on epipolar line rectification[J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology (Natural Science Edition)*, 2014, 12(2): 9-13)
- [12] Zhao Huijie, Li Jianjie. Stereo image matching based on phase unwrapping[C]//*Proceedings of SPIE 5253, Fifth International Symposium on Instrumentation and Control Technology*. 2003: 394-397.
- [13] 赵成星, 杨宇, 张晓玲. 光栅四步相移法的三维重建[J]. *激光杂志*, 2020, 41(10): 34-38. (Zhao Chengxing, Yang Yu, Zhang Xiaoling. Three-dimensional reconstruction of grating four-step phase shift method[J]. *Laser Journal*, 2020, 41(10): 34-38)
- [14] 陈玲, 邓文怡, 娄小平. 基于多频外差原理的相位解包裹方法[J]. *光学技术*, 2012, 38(1): 73-78. (Chen Ling, Deng Wenyi, Lou Xiaoping. Phase unwrapping method base on multi-frequency interferometry[J]. *Optical Technique*, 2012, 38(1): 73-78)
- [15] 陈松林, 赵吉宾, 夏仁波. 多频外差原理相位解包裹方法的改进[J]. *光学学报*, 2016, 36: 01412004. (Chen Songlin, Zhao Jibin, Xia Renbo. Improvement of the phase unwrapping method based on multi-frequency heterodyne principle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36: 01412004)
- [16] 黄亚楠, 娄小平. 基于多频外差原理的相位校正及匹配方法研究[J]. *应用光学*, 2014, 35(2): 237-241. (Huang Yanan, Lou Xiaoping. Phase correction and matching based on multi-frequency heterodyne method[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(2): 237-241)
- [17] 肖丹, 陈良洲, 干江红. 基于数字光栅相移法的三维重构[J]. *光电技术应用*, 2011, 26(5): 17-20. (Xiao Dan, Chen Liangzhou, Gan Jianghong. 3D reconstruction based on digital grating phase-shifting[J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2011, 26(5): 17-20)
- [18] Liu Kai, Song Jianwen, Lau D L, et al. Reconstructing 3D point clouds in real time with look-up tables for structured light scanning along both horizontal and vertical directions[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(24): 6029-6032.
- [19] Hartley R, Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision[M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [20] 陈至坤, 胡连军, 王一, 等. 单圆姿态识别二义性的矩形约束消除[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54: 101501. (Chen Zhikun, Hu Lianjun, Wang Yi, et al. Solution of duality in pose estimation of a single circle using rectangle constrain[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54: 101501)