光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2020.06.021

基于多尺度分析的快速相位立体匹配

蔡 超[1,2,3]，刘文波[1,2]，郑祥爱[1,2]，孟繁昌[3]，张滋黎[3,4]*，周维虎[3,4]，李亚杰[5]

（1. 南京航空航天大学 自动化学院，南京 211100；
2. 高速载运设施的无损检测监控技术工业和信息化部重点实验室，南京 211100；
3. 中国科学院微电子研究所，北京 100029；4. 中国科学院大学，北京 100049；
5. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院，北京 100192）

摘 要： 基于相位的立体匹配是双目投影光栅相位法中的重要步骤，但传统的相位匹配方法在处理高分辨率图像时因存储空间大大增加，难以达到匹配速度与精度的平衡。文章提出了一种基于多尺度分析的快速相位立体匹配算法，采用分层匹配的策略，对预处理后的左右绝对相位图进行降采样以生成图像金字塔，利用低分辨率的视差匹配结果以预测下一层视差，以此降低下层高分辨率图像的视差搜索范围，达到匹配速度与精度的平衡。实验结果表明，所提算法在保证精度的情况下能有效提升相位立体匹配速度，实现高分辨率相位图快速准确的立体匹配。

关键词： 投影光栅相位法；相位立体匹配；高分辨率；多尺度分析；三维重建

中图分类号： TP391.4 **文章编号：** 1001－5868(2020)06－0870－05

Fast Phase-based Stereo Matching Based on Multi-scale Analysis

CAI Chao[1,2,3], LIU Wenbo[1,2], ZHENG Xiangai[1,2],
MENG Fanchang[3], ZHANG Zili[3,4], ZHOU Weihu[3,4], LI Yajie[5]

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, CHN;
2. Non-Destructive Testing and Monitoring Technology for High-Speed Transport Facilities, Key Laboratory of the Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, Nanjing 211100, CHN; 3. Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, CHN; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN;
5. School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, CHN)

Abstract: Phase-based stereo matching (PSM) is a vital step in binocular structured light measurement, but the traditional PSM method is difficult to strike a balance between speed and accuracy due to the greatly increased storage space when processing high-resolution images. In this paper, an image pyramid model is introduced and a phase-based stereo matching algorithm based on multi-scale analysis is proposed. With a layered matching strategy, the preprocessed left and right absolute phase maps are down-sampled to generate an image pyramid and high-resolution disparity maps are predicted by up-sampling low-resolution disparity maps to narrow the disparity range. Experimental results indicate that the proposed algorithm can greatly improve the phase-based stereo matching speed while ensuring the accuracy and can achieve fast and accurate stereo matching of high-resolution images.

Key words: fringe projection profilometry; phase-based stereo matching; high resolution; multi-scale analysis; 3D reconstruction

收稿日期：2020－06－07.

基金项目：国家重点研发计划项目（2019YFB2006700，2018YFB2003304）；国家自然科学基金项目（61871218）；北京信息科技大学 2019 年度“实培计划”项目.

* **通信作者：**张滋黎 **E-mail:** zhangzili@ime.ac.cn

0　引言

随着非接触式光电测量技术的发展，光学三维形貌测量技术被广泛应用于智能制造、虚拟现实、缺陷检测、文化遗产保护等诸多领域[1]。投影光栅相位法[2]是结构光测量法的一个重要分支，其通过在被测物体表面投射编码条纹的方式添加额外的特征信息，以实现高精度三维形貌测量。当前工业上多采用双目光栅测量系统[3-4]，它不仅解决了双目视觉中特征稀疏的问题，还解决了单目光栅测量系统[5-6]需要标定投影仪带来的系统复杂问题。双目光栅测量系统通过相位解算将光栅信息转换为相位信息，左右图像中等相位点的寻找是影响其测量速度与精度的主要因素。

随着高分辨率相位立体匹配的计算量大大增加，人们对匹配的精度与速度也提出了更高的要求[7-8]。姜宏志等[9]通过对相位图执行极线校正、降低搜索维度来提高匹配速度。肖志涛等[10]在极线约束的基础上，利用拟合二次曲面求最小值的方法实现亚像素立体匹配，提高了匹配精度，但增加了时间消耗。王鹏等[11]利用条纹级次约束缩小匹配范围，提高了匹配速度。Zhang 等[12]提出固定窗口聚合的 AD-Census 算法，考虑到了周围像素的影响但匹配速度有所降低。以上方法在低分辨率的情况下匹配效果良好，但是在高分辨率下，由于绝对相位图的双精度数据类型，其计算时间与占用内存将极大增加，很难在匹配速度和精度间取得平衡。

本文提出了一种高效的立体匹配方法，利用多尺度分析实现快速高精度的相位立体匹配。首先对极线校正后的绝对相位图进行下采样以生成图像金字塔对，使左右对应点纵坐标相同。再利用低分辨率层的视差来对高分辨层进行视差预测，以此缩小各层的视差搜索范围，逐层匹配直至视差图分辨率与输入图像相等，最后进行亚像素级视差优化。相比传统方法，本文所提方法效率更高，可实现快速高精度的相位立体匹配。

1　多尺度相位立体匹配算法

1.1　双目光栅投影系统测量原理

双目光栅投影系统主要由 DLP(Digital Light Procession)投影仪和左右相机组成，其工作机制如图 1 所示。投影仪将 12 幅编码条纹图案打在待测物体表面，连续投射时同步触发左右相机的拍摄功能，将变形条纹图案记录下来。

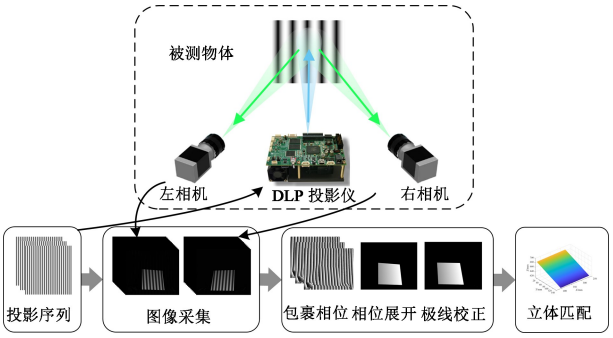


图 1　双目光栅投影系统工作机制

对于变形后的条纹图案，其光强分布情况可描述如下：

$$I(x,y)=A(x,y)+B(x,y)\cos[\theta(x,y)] \tag{1}$$

式中，$A(x,y)$为背景光强，$B(x,y)$为物体表面的反射率，$B(x,y)/A(x,y)$为条纹对比度，一般为 1，$\theta(x,y)$为光栅相位分布。

相位解算采用三频四步相移法[13]，即同一种频率的光栅需要经过四次相移，分别将每帧图像的相移量记为 I_1，I_2，I_3 和 I_4，可得图中各点的包裹相位为

$$\varphi(x,y)=\arctan\left(\frac{I_2-I_4}{I_1-I_3}\right) \tag{2}$$

式(2)中求解的包裹相位范围在$[-\pi,\pi]$，还需通过三频外差法进行展开，得到各点的唯一相位值：

$$\phi(x,y)=\varphi(x,y)+2m_0\pi \tag{3}$$

式中，m_0 为包裹相位对应的条纹级次。

绝对相位图上各点相位值唯一，通过立体匹配寻找出极线校正后[9]左右图像上相位相同的对应点即可获得各点视差值，再将相机标定参数代入计算，根据三角测量原理即可计算出各点的三维坐标。

1.2　多尺度分析原理

图像金字塔[14]属于图像多尺度分析范畴，是来源于同一张图像的不同分辨率降采样后的图像集合，其包含了图像的多尺度信息。

其中高分辨率图像尺度较大，弱纹理区域范围较大，小窗口内信息量较小，适合纹理丰富区域的精确匹配。低分辨率图像尺度较小，弱纹理区域被有效压缩，小窗口内信息量增大有利于提高弱纹理区域的匹配精度。因此，可先将图像降采样至低分辨率进行快速的匹配以获得初始视差，再对高分辨率层的视差进行预测，缩小搜索范围，获得更精细的视差图。

1.3 多尺度相位立体匹配

Scharstein 等[15]提出传统的立体匹配方法在代价计算时需要构建一个 $W\times H\times D\times F$ 的代价体(其中,$W\times H$ 表示图像分辨率,D 表示视差范围,F 表示特征通道数)。随着图像分辨率的提高以及视差的增大,匹配算法的内存需求和运行时间会呈立方速度增长。

因此,本文将多尺度金字塔模型引入相位立体匹配,利用低分辨率层的视差匹配结果对高分辨率层的视差进行预测,缩小视差搜索范围,逐层计算视差直至视差图分辨率与输入图像相等,最后执行亚像素视差优化来获得高分辨率视差图。

1.3.1 图像金字塔生成

设立体匹配的初始输入左右相位图分别为 I_{L} 和 I_{R},对其进行 N 次降采样后变换至顶层图像分辨率为 15 万像素左右,得到左右图像金字塔 G_{L} 和 G_{R},每个金字塔共 N 层,由底至顶分别为 $G_{\mathrm{L}}^{(1)}$,$G_{\mathrm{L}}^{(2)},\cdots,G_{\mathrm{L}}^{(N)}$ 和 $G_{\mathrm{R}}^{(1)},G_{\mathrm{R}}^{(2)},\cdots,G_{\mathrm{R}}^{(N)}$,即:

$$\begin{cases}G_{\mathrm{L}}^{(1)}=I_{\mathrm{L}}\\ G_{\mathrm{R}}^{(1)}=I_{\mathrm{R}}\\ G^{(l)}(i,j)=G^{(l-1)}(2i+1,2j+1)\end{cases}\tag{4}$$

式中,l 为左右金字塔的第 l 层,$1\leqslant l\leqslant N$,$0\leqslant i\leqslant r^{(l)}$,$0\leqslant j\leqslant c^{(l)}$,$r^{(l)}$ 和 $c^{(l)}$ 分别为第 l 层图像的行数和列数。

经过降采样后,设底层原始图像的高为 $H^{(1)}$,宽为 $W^{(1)}$,最小视差为 $\mathrm{MinDisp}^{(1)}$,最大视差为 $\mathrm{MaxDisp}^{(1)}$,视差范围为 $D^{(1)}$,则第 N 层图像的高为 $H^{(N)}=H^{(l)}/2^{N-1}$,宽为 $W^{(N)}=W^{(l)}/2^{N-1}$,最小视差为 $\mathrm{MinDisp}^{(N)}=\mathrm{MinDisp}^{(l)}/2^{N-1}$,最大视差为 $\mathrm{MaxDisp}^{(N)}=\mathrm{MaxDisp}^{(l)}/2^{N-1}$,视差范围为 $D^{(N)}=D^{(l)}/2^{N-1}$。

1.3.2 视差图初始化

视差初始化即选取金字塔顶层的图像 $G_{\mathrm{L}}^{(N)}$ 和 $G_{\mathrm{R}}^{(N)}$ 进行立体匹配,计算出第 N 层的视差图 $\mathrm{DispMap}_N$。以第 N 层的视差为初始参考视差,通过对其插值放大来对下一层的视差进行预测。低分辨率层的匹配结果为粗匹配,因此匹配代价可选用单点相位差的绝对值(Absolute Differences,AD),构建大小为 $W^{(N)}\times H^{(N)}\times D^{(N)}$ 的 3D 代价体 C_N,即:

$$C_N(x,y,d)=|\,G_{\mathrm{L}}^{(N)}(x,y)-G_{\mathrm{R}}^{(N)}(x-d,y)\,|\tag{5}$$

式中,$C_N(x,y,d)$ 为点 (x,y) 在视差为 d 时的匹配代价,其中 $1\leqslant x\leqslant W^{(N)}$,$1\leqslant y\leqslant H^{(N)}$,$\mathrm{MinDisp}^{(N)}\leqslant d\leqslant\mathrm{MaxDisp}^{(N)}$。

通过计算出代价体中各像素点的最小代价值位置,可得到各点的视差值索引 d,再加上起始视差 $\mathrm{MinDisp}^{(N)}$,即可得到初始视差图 $\mathrm{DispMap}_N$,即:

$$\mathrm{DispMap}_N(x,y)=\mathrm{MinDisp}^{(N)}+\underset{d}{\mathrm{argmin}}C_N(x,y,d)\tag{6}$$

1.3.3 高分辨率层视差预测

视差预测即对分辨率较低的视差图进行插值放大,获得下一层大尺度图像中各点的大致视差。考虑到视差预测只需要获得大致的视差,双线性插值法或双立方插值等方法插值的精度高,但是大大增加了计算量,最近邻插值法速度快且能满足初始视差的精度要求。因此,本文选用最近邻插值法对低分辨率层的视差图进行上采样,来实现对下一层的视差预测。

设图 2 中 D_0 点为需要插值的点,D_{00},D_{01},D_{10},D_{11} 是 D_0 点周围 4 个已知视差值的像素点,D_{00} 与 D_0 的欧氏距离最近,因此 D_0 点视差与 D_{00} 点相等。

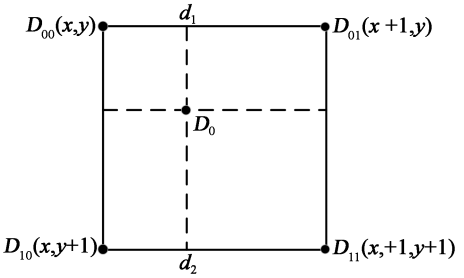


图 2 最近邻插值示意图

利用第 N 层的视差图对 $N-1$ 层进行视差预测,将图像大小扩大一倍。因为构建金字塔时降采样导致视差缩小了一倍,所以还需对预测视差的值乘 2 进行转换,得到第 $N-1$ 层的预测视差图 $\mathrm{DispMap}_{N-1}^{\mathrm{pre}}$。

1.3.4 高分辨率层立体匹配

以预测视差图为指导,缩小第 $N-1$ 层各像素点的视差搜索区间到预测值的前后十个点内,即:

$$D_{N-1}(i,j)=\{\mathrm{DispMap}_{N-1}^{\mathrm{pre}}(i,j)+k\mid -10\leqslant k\leqslant 10\}\tag{7}$$

式中,$D_{N-1}(i,j)$ 为第 $N-1$ 层上点 (i,j) 的视差搜索候选点集,$\mathrm{DispMap}_{N-1}^{\mathrm{pre}}(i,j)$ 为点 (i,j) 的预测视差值。

此时只需要构建大小为 $W^{(N-1)} \times H^{(N-1)} \times 2l$ 的 3D 代价体 C_{N-1}，由公式即可得到第 $N-1$ 层视差图 $\mathrm{DispMap}_{N-1}$。

逐层执行 1.3.3 和 1.3.4 的视差预测和计算过程，直到计算出第一层的高分辨率视差图，如图 3 所示。

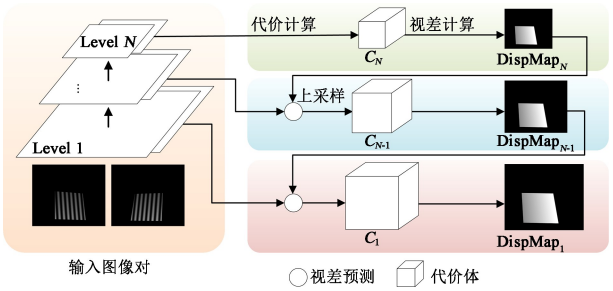


图 3　逐层匹配示意图

1.3.5　亚像素求精

经逐层立体匹配后，得到的第一层视差图为整数，而实际情况下的视差值不会以整数形式存在，因此需要对视差进行亚像素求精以提高精度。根据第一层的匹配代价体 C_1，利用整数视差前后相邻的代价值进行二次曲线拟合，将整像素的视差数据转化为亚像素的视差数据：

$$d_{\mathrm{sub}} = d_{\mathrm{int}} - \frac{C_1(x,y,d+1) - C_1(x,y,d-1)}{2(C_1(x,y,d+1) + C_1(x,y,d-1) - 2C_1(x,y,d))} \tag{8}$$

式中，d_{sub} 为亚像素视差值，d_{int} 为整像素视差值，$C_1(x,y,d)$ 为点 (x,y) 在视差 d 下的匹配代价。

1.3.6　本文算法流程图

图 4 为基于多尺度分析的相位立体匹配算法流程图。

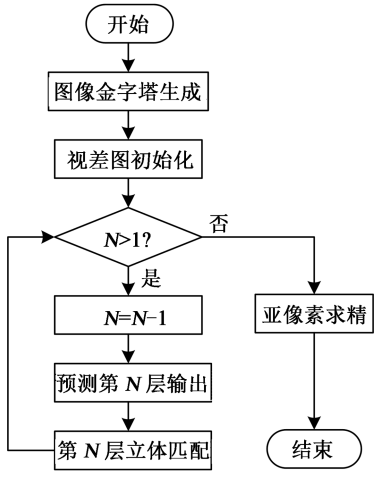


图 4　多尺度相位立体匹配算法流程图

2　实验与分析

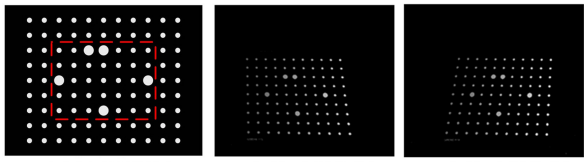
2.1　实验装置

本文所用实验装置由左右两个高分辨率相机和 DLP 投影仪组成。DLP 投影仪的分辨率为 912 pixel×1 140 pixel，两台相机的型号相同(Basler acA2440-75 μm)，分辨率均为 2 448 pixel×2 048 pixel。

实验中被测物体与实验装置的距离约为 700 mm，左右相机拍摄的公共区域约为 300 mm×300 mm。在实验过程中依序投射频率为 50，49，40 的 3 组 12 幅编码条纹图案，并分别采用传统点基元算法[9]与本文算法进行立体匹配，分析比较实验结果。在实验过程中，本文算法共构建三层金字塔，对应的图像大小分别为输入图像的 1，1/4 和 1/16 倍。

2.2　相位立体匹配精度验证

本节实验旨在比较不同算法单点相位匹配的情况，为了方便提取单点特征，选用如图 5(a)所示带有黑底白点的圆点平面靶标进行实验，其中红色虚线框内的 35 个圆点的圆心为参考点，通过比对参考点和匹配点的相位偏差可反映出各算法的匹配准确度。立体匹配过程的输入为经过极线校正预处理后的左右相位图，分别如图 5(b)和(c)所示。



(a) 圆点平面靶标　(b) 左绝对相位图　(c) 右绝对相位图

图 5　单点相位匹配实验

利用两种算法计算出的参考点在左右图像中的相位差值分布如图 6 所示，可以看出本文所提方法使用了亚像素优化后的相位偏差分布在 −0.01°～0.01°，其匹配精度要略优于传统方法。

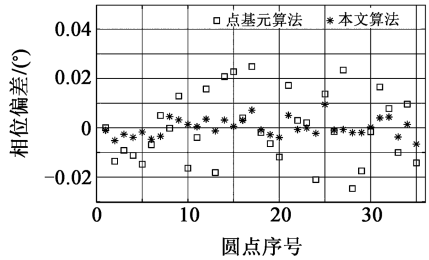
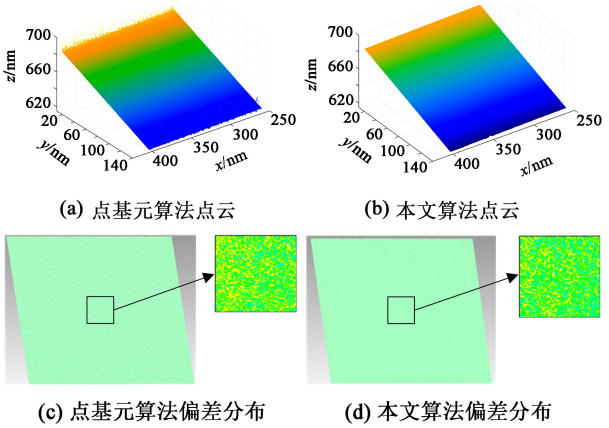


图 6　圆心点相位匹配偏差对比图

2.3　三维重建实验

选取一块面积为 150 mm×150 mm、标称偏差

为 0.001 mm 的标准平面靶标进行三维重建实验，比较不同算法的重建效果。传统点基元算法与本文所提算法得到的平面重建点云，分别如图 7(a)，(b)所示，可以看出传统方法的点云边缘处有较多的离群点。利用 Geomagic 软件分别对两组点云进行最佳平面拟合，其局部偏差分布分别如图 7(c)，(d)所示。



(a) 点基元算法点云　　(b) 本文算法点云

(c) 点基元算法偏差分布　　(d) 本文算法偏差分布

图 7　平面靶标三维重建结果

不同算法下的平面靶标重建精度对比如表 1 所示，参与拟合平面的点数为 90 万左右。从表 1 可以看出，本文所提算法相较于传统点基元算法的平面拟合误差有所降低，均方根误差(RMSE)可控制在 0.02 mm 内，满足高精度三维测量的要求。

表 1　平面靶标重建精度对比　　**单位：mm**

匹配算法	最大偏差	平均偏差	RMSE
点基元算法	+0.101 4/−0.142 2	0.000 4	0.023 5
本文算法	+0.101 1/−0.130 5	0.000 4	0.019 8

本文算法与传统相位匹配算法在时间消耗方面的对比如表 2 所示，表中运行时间指相位匹配过程耗时，代码运行平台为 matlab2017a。本文所提算法采用分层匹配的策略，可大大减小代价体的空间占用率，可在 2 s 左右完成 500 万像素图像的立体匹配，相较于传统相位匹配算法速度提升了 63.9%。

表 2　不同算法的运行时间

匹配算法	图像分辨率/pixel	运行时间/s
点基元算法	2 448×2 048	5.881
本文算法	2 448×2 048	2.125

3　结论

本文提出了一种基于多尺度分析的相位立体匹配方法。利用极线校正后的相位图构建图像金字塔，通过低分辨率层的视差对高分辨率层进行视差预测，缩小了各点视差的搜索区间，在保证精度的情况下大大提高了相位立体匹配速度。该方法较传统的点基元相位匹配方法速度更快，精度更高，对内存空间的占用率更低。实验结果表明该方法对标准平面的三维重建效果良好，在输入图像分辨率为 500 万像素的情况下，可在 2 s 左右完成立体匹配，测量精度在 0.02 mm 以内，测量速度较传统方法提升 63.9%，可以实现对物体三维形貌的快速高精度测量要求。

参考文献：

[1] 左　超，张晓磊，胡　岩，等. 3D 真的来了吗？——三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程，2020，49(3)：9-53.
Zuo Chao，Zhang Xiaolei，Hu Yan，et al. Has 3D finally come of age？——An introduction to 3D structured-light sensor[J]. Infrared and Laser Engin.，2020，49(3)：9-53.

[2] 毛翠丽，卢荣胜，董敬涛，等. 相移条纹投影三维形貌测量技术综述[J]. 计量学报，2018，39(5)：628-640.
Mao Cuili，Lu Rrongsheng，Dong Jingtao，et al. Overview of the 3D profilometry of phase shifting fringe projection[J]. Acta Metrologica Sinica，2018，39(5)：628-640.

[3] 殷永凯，张宗华，刘晓利，等. 条纹投影轮廓术系统模型与标定综述[J]. 红外与激光工程，2020，49(3)：127-144.
Yin Yongkai，Zhang Zonghua，Liu Xiaoli，et al. Review of the system model and calibration for fringe projection profilometry [J]. Infrared and Laser Engineering，2020，49(3)：127-144.

[4] Dai M，Yang F，Liu C，et al. A dual-frequency fringe projection three-dimensional shape measurement system using a DLP 3D projector[J]. Opt. Commun.，2017，382：294-301.

[5] 王建华，杨延西. 基于彩色编码光栅投影的双 N 步相移轮廓术[J]. 中国光学，2019，12(3)：616-627.
Wang Jianhua，Yang Yanxi. Double N-step phase-shifting profilometry using color-encoded grating projection[J]. Chinese Optics，2019，12(3)：616-627.

[6] 张　旭，邵双运，祝　祥，等. 光学三维扫描仪光强传递函数的测量和校正[J]. 中国光学，2018，11(1)：123-130.
Zhang Xu，Shao Shuangyun，Zhu Xiang，et al. Measurement and calibration of the intensity transform function of the optical 3D profilometry system[J]. Chinese Opt.，2018，11(1)：123-130.

[7] Zhang S. High-speed 3D shape measurement with structured light methods：A review [J]. Optics and Lasers in Engineering，2018，106：119-131.

[8] Der J S V，Dirckx J J. Real-time structured light profilometry：a review[J]. Optics and Lasers in Engin.，2016，87：18-31.

(下转第 878 页)

of 2019 Chinese Control and Decision Conf. (CCDC), 2019.

[2] Liu J, Bu F. Improved RANSAC features image-matching method based on SURF[J]. The J. of Engin., 2019(23): 9118-9122.

[3] 张见双，张红民，罗永涛，等. 一种改进的 Harris 角点检测的图像配准方法[J]. 激光与红外，2017，47(2)：230-233.
Zhang Jianshuang, Zhang Hongmin, Luo Yongtao, et al. An improved image registration method for Harris corner detection [J]. Laser and Infrared, 2017, 47(2): 230-233.

[4] 刘军泉，刘晓华，黄小仙. 改进的 Harris 算法在海洋遥感图像处理中的应用[J]. 现代电子技术，2019，42(18)：95-102.
Liu Junquan, Liu Xiaohua, Huang Xiaoxian. Application of improved Harris algorithm in ocean remote sensing image processing[J]. Modern Electronic Technol., 2019, 42(18): 95-102.

[5] Yang Zhuoqian, Liu Xinang, Yang Yang. Harris feature and coherent point drift based remote sensing image registration [C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Electronic Measurement & Instruments, 2017: 554-558.

[6] Sun L, Wang S Q, Xing J C. An improved Harris corner detection algorithm for low contrast image [C]// Proc. of IEEE The 26th Chinese Control and Decision Conf., 2014.

[7] Zou W, Li Z. Extraction of interest points by Harris interest operator for synthetic aperture radar image coregistration[J]. IET Image Proc., 2013, 7(5): 500-513.

[8] Manoranjitham R, Deepa P. Novel interest point detector using bilateral-Harris corner method [C]// Proc. of IEEE Inter. Conf. on Advanced Computing & Communication Systems, 2017: 1-4.

[9] Yao Jinjin, Zhang Pengchao, Wang Yan, et al. An adaptive uniform distribution ORB based on improved quadtree [J]. IEEE Access, 2019, PP(99): 1-1.

[10] Lowe D G. Distinctive image features from scale invariant keypoints[J]. Inter. J. of Computer Vision, 2004, 60(2): 91-110.

[11] Juranek L, Stastny J, Skorpil V. Effect of low-pass filters as a Shi-Tomasi corner detector's window functions[C]// Proc. of Inter. Conf. on Telecommun. & Signal Proc., 2018.

[12] 黄远征，尹春丽，刘 波，等. 基于改进的快速 Shi-Tomasi 特征点检测算法的图像拼接算法[J]. 机械设计与研究，2018，34(4)：70-73.
Huang Yuanzheng, Yin Chunli, Liu Bo, et al. Image mosaic algorithm based on improved fast Shi-Tomasi feature point detection algorithm [J]. Mechanical Design and Research, 2018, 34(4): 70-73.

作者简介：

蔡欣展(1997—)，男，陕西省渭南市人，硕士研究生，主要从事数字图像处理、FPGA 方面的研究；

刘艳艳(1978—)，女，博士，高级实验师，主要从事集成电路设计、数字信号处理与模式识别方面的研究。

(上接第 874 页)

[9] 姜宏志，赵慧洁，梁宵月，等. 基于极线校正的快速相位立体匹配[J]. 光学精密工程，2011，19(10)：2520-2525.
Jiang Hongzhi, Zhao Huijie, Liang Xiaoyue, et al. Phase-based stereo matching using epipolar line rectification[J]. Optics and Precision Engin., 2011, 19(10): 2520-2525.

[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 Engin., 2014, 43(S1): 225-230.

[11] 王 鹏，张宇倩，孙长库，等. 极线和级次双约束的光栅投影测量方法[J]. 红外与激光工程，2020，49(4)：144-150.
Wang Peng, Zhang Yuqian, Sun Changku, et al. Fringe projection measurement method based on polar line and fringe order double constraint[J]. Infrared and Laser Engin., 2020, 49(4): 144-150.

[12] Zhang S, Wu M, Wu Y, et al. Fixed window aggregation AD-census algorithm for phase-based stereo matching [J]. Appl. Opt., 2019, 58(32): 8950-8958.

[13] Zuo C, Feng S J, Huang L, et al. Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: A review[J]. Optics and Lasers in Engin., 2018, 109: 23-59.

[14] Thevenaz P, Ruttimann U E, Unser M. A pyramid approach to subpixel registration based on intensity[J]. IEEE Trans. on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society, 1998, 7(1): 27-41.

[15] Scharstein D, Szeliski R, Zabih R, et al. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. Inter. J. of Computer Vision, 2001, 47(1): 7-42..

作者简介：

蔡 超(1995—)，男，浙江杭州人，硕士，主要研究方向为图像处理、机器视觉；

张滋黎(1983—)，女，山西朔州人，博士，副研究员，主要研究方向为机器视觉及光电测试技术。