

结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法

笪 健 屈惠明 陶天阳 陈 钱 左 超*

南京理工大学电子工程与光电技术学院江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 江苏 南京 210094

摘要 提出了一种结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法。该方法基于标准的三步相移法, 向正弦条纹图像中嵌入额外的随机数字散斑, 并结合左右相机之间的极限约束来确定每个像素点相位的周期数, 最终利用 3 幅条纹图像实现无歧义的相位展开。实测结果表明, 相比于传统信息嵌入法和多相机约束法, 本文方法能够大幅提高绝对相位的求解正确率; 同时, 为了提高算法的运行效率, 采用图形处理器并行计算架构对算法进行了优化; 该系统成功实现了 26 frame/s 单幅测量点数为 94,163 的实时动态三维测量。

关键词 测量; 条纹投影; 三维测量; 极线约束; 散斑相关

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1012003

Real-Time Three-Dimensional Measurement Composite of Epipolar Constraint and Speckle Correlation

Da Jian Qu Huiming Tao Tianyang Chen Qian Zuo Chao

Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging and Intelligence Sense, School of Electronics and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract A novel method combine epipolar constraint to speckle correlation for real-time three-dimensional measurement is presented. Random digital speckle is embedded in the sinusoidal fringe patterns and three-phase-shift is proposed. The period of phase in each pixel is resolved by means of epipolar constraint. Using the theoretical minimum of three images, the phase ambiguity is eliminated and the absolute phase is recovered. Experimental results indicate that the proposed method improves the accuracy of the phase unwrapping immensely compared with the traditional information-embedded and multi-camera constraint methods. In order to improve the operation efficiency of the algorithm, the graphics processing unit parallel computation based on parallel computing architecture is introduced to optimize the algorithm. And the system achieves real-time three-dimensional measurement at average speed of 26 frame/s with a resolution of 94,163 points per frame.

Key words measurement; fringe projection; three-dimensional measurement; epipolar constraint; speckle correlation

OCIS codes 120.2650; 120.6650; 110.6880; 100.5088

1 引 言

结构光实时三维测量凭借其高精度、高效率、非接触和低成本等优点在工业自动检测、生物医学工程等^[1-3]领域具有广阔的应用前景。而绝对相位的快速、准确获取是实现复杂物体三维形貌重构的关键。目前, 获取相位的方法主要有傅里叶变换轮廓术和相位测量轮廓术^[4]。尽管傅里叶变换轮廓术只需要一帧图像即可恢复物体的三维形貌, 非常适合测量动态物体三维形貌^[5], 但不适用于对精度要求较高的场合。这两

收稿日期: 2016-04-28; **收到修改稿日期:** 2016-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(61171164, 11574152, 61505081)、江苏省“六大高峰”人才项目(2015-DZXX-009)、江苏省“333 工程”科研项目(BRA2015294)、江苏省光谱成像智能感知重点实验室开放基金(3092014012200417)、南京理工大学自主科研基金(3092014012200417)、南京理工大学“紫金之星”(第一类)项目

作者简介: 笪 健(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事三维成像方面的研究。E-mail: 1285455321@qq.com

导师简介: 屈惠明(1967—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事光电探测与成像方面的研究。E-mail: huimingqu@163.com

* **通信联系人.** E-mail: zuochao@njust.edu.cn

种方法均存在一个共同的问题:得到的相位都在 $(-\pi, \pi]$ 之间,无法实现对表面梯度较大或不连续物体的测量。为了避免这种相位歧义性,还需进行去包裹处理。在现有的相位展开方法中,空域展开方法很难解决该问题,而时域展开方法需要额外附加成分。

传统的时域相位展开方法,至少需要1~2组额外的相位图像才能进行相位展开。这意味着需要额外的帧数(6~10帧)才能重构出一幅三维场景^[6-8]。为了解决该问题,可以提高投影仪的投影速度与相机的采集速度,因为数据获取的速度越快,物体运动所造成的影响就越小。采用离焦投影技术^[9-12]可以达到千赫兹以上的投影速率。然而,这对图像采集、传输与后续的数据处理提出了过高要求,致使该方法只能实现高速记录后离线重构。另一种方法是通过条纹编码优化减少绝对相位展开所需的投影帧数。2010年,刘凯等^[13]通过双频法实现了绝对相位的展开,将条纹图像幅数降低到5幅,但该方法无法用单周期一次性解出较高频率的包裹相位,限制了测量精度;2011年,王永昌等^[14]采用周期编码方法实现了相位展开,但因高频条纹周期数不宜太高而无法提高测量精度;2012年,左超等^[15]提出仅用2幅正弦条纹图和2幅斜面图实现绝对相位展开,但其对调制光强或平均光强有一定要求。这些方法属于信号嵌入式相位展开方法,通过在相移图像中嵌入附加信息求解出绝对相位,将相位展开方法所需要的条纹幅数从6帧降低到了5帧甚至4帧。为了进一步减少投影帧数,引入额外相机,通过相机之间的内在约束,无需附加的条纹便可实现相位展开。2007年,Weise等^[16]通过极限约束、光强平方差计算和置信度传播实现了立体相位展开,但该算法复杂,在遮挡区域内容易产生区域性相位求解错误。2014年,钟凯等^[17]通过预先约束轴向测量范围、极线约束和左、右相机一致性检验实现了多视约束相移相位展开,并取得了实时效果,该方法复杂且物体的求解误差仍较大,且需要预先限制较小的轴向测量范围。

因此,本文提出了一种结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法。该方法结合了信息嵌入法和多相机约束法的优点:无需额外的条纹,能够减小对运动的敏感度,提高测量效率;高频条纹的展开不受限制,从而提高测量精度;能够避免过于复杂的算法和过小的轴向测量范围限制。另外,通过图形处理器(GPU)并行架构优化,最终达到图像快速采集,实现了快速实时的动态三维测量。

2 基本原理

2.1 三步相移

相移法通过采集多帧相移图像来恢复包含被测物体三维信息的相位初值^[18],可以完全消除环境光和表面反射率的影响,且在每个像素点的相位计算是独立的。虽然尽可能多的相移步数可以提高重构的相位精度,但运动导致的帧间差异将增加实时系统对运动的敏感度。因此本文采用标准3步相移的方法对物体进行实时三维测量。由高速相机同步捕获的3幅图像可表示为

$$\begin{cases} I_{F1}(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y) - 2\pi/3] \\ I_{F2}(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y)] \\ I_{F3}(x, y) = A(x, y) + B(x, y)\cos[\phi(x, y) + 2\pi/3] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 (x, y) 为像素坐标系上的坐标, $A(x, y)$ 为平均光强, $B(x, y)$ 为调制光强, $\phi(x, y)$ 为结构光受待测物调制后的相位。通过(1)式可以求解出包裹相位、平均光强和调制光强,即

$$\phi(x, y) = \arctan\left[\frac{\sqrt{3}(I_{F1} - I_{F3})}{2I_{F2} - I_{F1} - I_{F3}}\right], \quad (2)$$

$$\begin{cases} A(x, y) = (I_{F1} + I_{F2} + I_{F3})/3 \\ B(x, y) = \sqrt{(I_{F3} - I_{F1})^2/3 + (2I_{F2} - I_{F1} - I_{F3})^2/9} \end{cases}. \quad (3)$$

(2)式得到的是相位主值,由于反正切函数的值域在 $(-\pi, \pi)$ 之间,因此,该相位包含的位置信息不是绝对的。对于一个 N 周期条纹,在空间中对应 N 个不同的位置。要得到绝对相位,还需通过合适的相位展开算法^[19]将包裹相位展开到绝对范围 $(-N\pi, N\pi)$ 内。

2.2 立体相位展开法

为了避免额外增加图像,引入一个额外的相机,通过两个相机之间的内在约束对包裹相位进行展开。双

目测量系统原理如图 1 所示,其由 1 台数字投影仪(DLP)和 2 台高速相机组成。通过 Matlab 标定工具箱分别标定出两个相机相对于 DLP 的内、外参数,然后计算出左、右相机之间的旋转、平移关系。这样不需要两个相机平行放置也能找到极线。在测量时,由 DLP 向待测物体循环投射出嵌入散斑的标准三步相移图案,并由左、右相机同步接收。对于空间上一点 p ,在两个相机上的像点分别为 p_1, p_2 ,且 p_2 必然在相对于 p_1 的极线上,这样就把右相机上待匹配范围由二维图像减少到一维极线。在系统中,由投影仪的同一个像素投射的光经待测物体同一点调制后,在左、右相机 CCD 像点上的包裹相位是相同的。这样就把候选范围缩小到极线上包裹相位与左相机待匹配点相同的点,其点数由正弦条纹周期数决定。

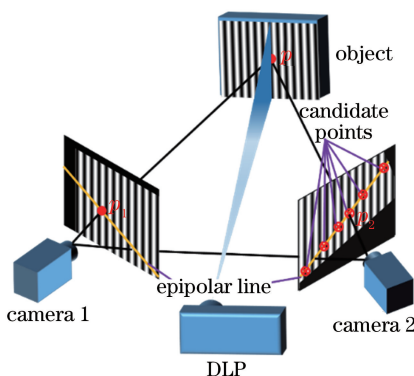


图 1 基于散斑相关解包裹的双目测量系统

Fig. 1 Binocular measurement system based on speckle correlation solution package

文献[17]提出,在双目立体视觉中,只有在 Z 轴方向一定范围之内,相机才能看作针孔模型。因此,在不影响系统测量的情况下,设定轴向测量范围为 30 cm,初步去除明显在测量范围之外的错点,以提高测量效果和实时效率。对于剩余的处于各个周期的候选点,分别计算左、右相机相移均值灰度图像对应像素点的光强平方差之和(SSD)。对于左相机上待匹配点 p_1 ,假设右相机上的点处于第 k 个周期,通过标定参数计算出右相机极线上包裹相位和该点相同的点 $r(p_1, k)$,计算它们之间的 SSD,得到

$$S_{I(p_1, k)} = \text{SSD}\{I_1(p_1) - I_r[r(p_1, k)]\} \quad (4)$$

通常认为如果左相机上的像素点和右相机上的对应点拥有相同反射率和包裹相位,那么它们处于不同周期的概率极小。然而,在实际中,标定误差、系统噪声等因素都可能增加错误匹配的概率。因此,初步选择 3 个 SSD 最小的周期候选点,保留最有可能正确的候选周期,然后用图像相关来决定最终的周期。为了提高匹配的识别度,在相移图案中嵌入合适的散斑。

2.3 散斑设计

为了提高图像的相关度,选择在相移图案中嵌入散斑,以辅助判断每个像素包裹相位的级次^[20]。散斑具有高度的空间辨别度,因此被广泛应用于数字图像相关(DIC)和干涉技术。利用 DIC 时,通常在黑色背景中随机产生一些白点。如果在条纹图像中随机产生一些散斑,会拉低信号的峰值,从而导致条纹对比度的减小,降低相移的信噪比(SNR),如图 2(a)所示。因此,按照图 2(b)所示的方法,在不影响条纹对比度的前提下向相移图案随机嵌入散斑。理论上,散斑越小意味着可以选取更小的相关窗口,即减少相关算法的时间,

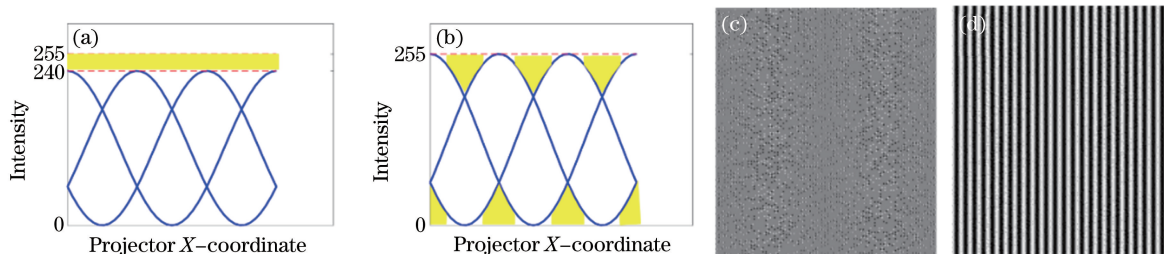


图 2 散斑和嵌入散斑的条纹图。(a)传统设计;(b)改进设计;(c)散斑图案;(d)嵌入散斑的条纹图

Fig. 2 Speckle and fringe pattern of embedded speckle. (a) Traditional strategy; (b) revised strategy; (c) speckle pattern; (d) fringe pattern of embedded speckle

但实际测量中考虑到相机和投影仪分辨率的限制,以及投影仪离焦的影响,综合实验效果最佳,选择 $6 \text{ pixel} \times 6 \text{ pixel}$ 大小的窗口。

随机嵌入散斑后,对于第 k 幅条纹图案,其图像可表示为

$$I_k(x, y) = M_s(x, y)P(x, y) + I_{Fk}(x, y), \quad (5)$$

$$M_s(x, y) = \begin{cases} 255 - M_{s \max}, & M_{s \max} + M_{s \min} < 255 \\ -M_{s \min}, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

$$M_{s \max} = \max_{k=1,2,3} [I_{Fk}(x, y)], M_{s \min} = \min_{k=1,2,3} [I_{Fk}(x, y)], \quad (7)$$

式中 $M_s(x, y)$ 为散斑光强的调制系数, $P(x, y) \in \{0, 1\}$ 判断在像素坐标系坐标 (x, y) 下散斑是否存在, I_{Fk} 为第 k 步标准相移图。这样就充分利用了标准三步相移图案中的冗余信息。图 2(c)、(d) 分别为所设计的散斑图案和嵌入散斑后的相移图案。由(2)、(3)式可以看出,嵌入的散斑图像可以看作背景光的一部分,不但没有影响标准三步相移法对包裹相位的求解,而且正弦条纹的调制度也没有受到影响。

在极线约束、 Z 方向约束和 SSD 约束的基础上,通过嵌有散斑的相移均值灰度图像的窗口相关,在 3 个候选周期中选取相关系数最高的作为最终的周期。通过(8)式求得绝对相位 $\varphi(x, y)$,并通过事先标定的相位—高度映射关系获取待测物体在世界坐标系下的坐标。

$$\varphi(x, y) = \phi(x, y) + 2k\pi, k \in N. \quad (8)$$

基于上述分析,所设计的整个算法流程如图 3 所示。

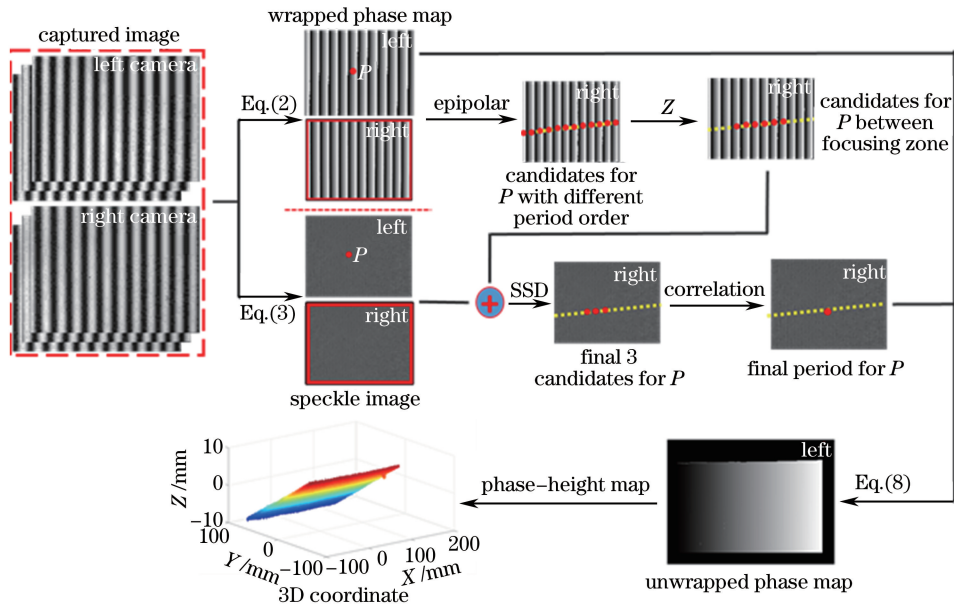


图 3 重构算法流程图

Fig. 3 Flow chart of reconstruction algorithm

2.4 GPU 加速

本文算法需要对每个像素点进行复杂运算,如果采用传统方法——仅在中央处理器(CPU)上实现,很难实现动态实时测量。目前,由于受到工艺、功耗等诸多因素的限制,CPU 的时钟频率短期内不会得到显著提高。而基于众核并行计算的 GPU,非常适合对大量的像素点进行并行计算^[21]。Nvidia 公司提出的 CUDA 架构采用了一种全新的计算体系结构来使用 GPU 提供的硬件资源,线程、线程块和网格的提出给大规模的数据处理提供了一种比 CPU 更高效的方式。为了更清晰地了解本文方法在 GPU 上的具体实施过程,图 4 展示了包括图像采集、数据具体处理过程和三维显示在内的整个流程。

在 GPU 的计算中,如过程①,先把内存中的数据拷贝到显存中,然后访问显存进行计算。在通用计算中,纹理内存更适合实现图像处理 and 查找,对大量数据的随机访问和非对齐访问也有良好的加速效果。因此,在每一次三维形貌重构开始前,由两个高速相机实时采集到的时变相移图像在纹理内存中被实时更新。在所有的数据都准备好之后,就进入了在 GPU 上并行运算的数据处理阶段。

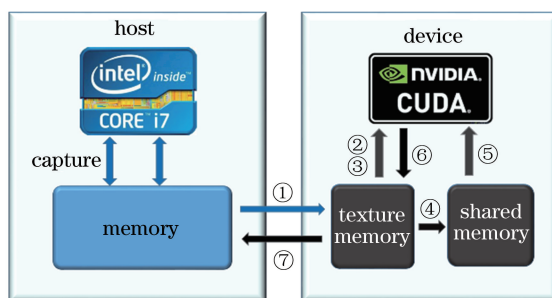


图 4 基于混合计算的数据处理流程图

Fig. 4 Flow chart of data processing based on hybrid computing

本文算法对于每个像素点的计算是独立的、互不影响的,因此每个像素点的计算都可以分配一个独立的线程。②表示 CPU 端启动第一个核函数 phase wrapping,计算出左、右相机的包裹相位,并得到嵌有散斑的相移均值灰度图像;③在极线约束和 Z 方向约束共同减小匹配范围的基础上,启动核函数 SSD,各线程初步选择对应像素点的 3 个 $S_{I(p_1,k)}$ 最小的周期,作为最终的候选周期;④⑤⑥表示启动核函数 correlation 计算嵌有散斑的相移均值灰度图像上的像素点在这 3 个周期上的相关系数,并选取最大的相关系数对应的周期 k 作为最终的周期,从而得到绝对相位,实现包裹相位的展开。其中需要注意的是:每个像素点被提取的用于作相关计算的窗口数据应该被放置在共享内存中。这是因为从 GPU 的共享内存读取数据要比全局内存快得多,可以大幅减少窗口相关计算的时间;接着,根据纹理内存中存储的相位—高度映射关系,由绝对相位计算出当前待测目标在世界坐标系下的坐标。⑦表示将待测场景在世界坐标系下由 device 端拷贝到 host 端,并通过 OpenGL 软件实时显示。

该方案与仅在 CPU 上计算相比,大幅减少了计算时间,从而实现了基于本文提出方法的实时动态三维测量。

3 实验结果与分析

结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法只采用 3 幅高频条纹图像求解相位,其高频条纹的周期数不受其他频率条纹周期数的限制,测量精度可以得到保证。因此,该方法的测量效果只与极线约束和散斑相关所确定的级次的情况有关。

3.1 包裹相位和散斑图像获取

DLP 依次循环投射 3 幅嵌有散斑的正弦条纹图像,并由左、右相机同步采集。分别计算出包裹相位和用于相关计算的散斑图像,如图 5 所示。图中,左、右相机从同样的场景中获取的散斑图像的灰度并不相同。主要是因为在实际测量过程中,虽然可以通过三步相移消除调制光的反射率影响,但是两个相机接收的环境光也存在一些差异。因此,选用归一化积相关算法(NCC)^[22]计算散斑图像窗口的相关系数。

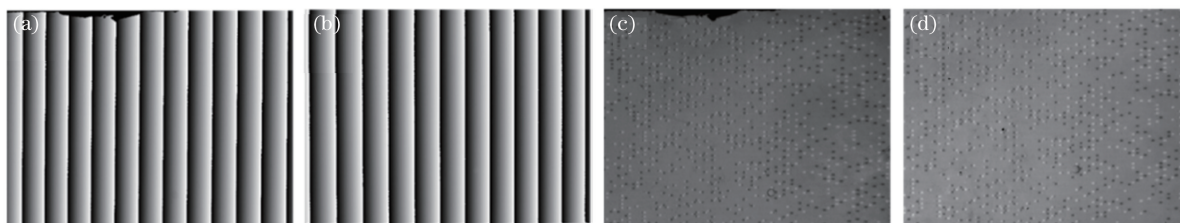


图 5 包裹相位和散斑图。(a)左相机包裹相位;(b)右相机包裹相位;(c)左相机散斑图;(d)右相机散斑图

Fig. 5 Wrapping phase and speckle patterns. (a) Wrapping phase in left camera; (b) wrapping phase in right camera; (c) speckle pattern in left camera; (d) speckle pattern in right camera

3.2 匹配方法分析

得到 2 个相机的包裹相位和散斑图像之后,采用立体匹配确定左相机每个像素点相位的级次。实验中,仅在该周期对应的 SSD 较小且相关系数较大的情况下,才认为该周期是可信的。以左相机上 2 个不同区域

的点(322,122)、(150,322)为例,可以看出满足此条件的周期一般不超过 3 个,如图 6 所示。考虑到系统的实时性,散斑相关的候选周期数设为 3 较为合适。

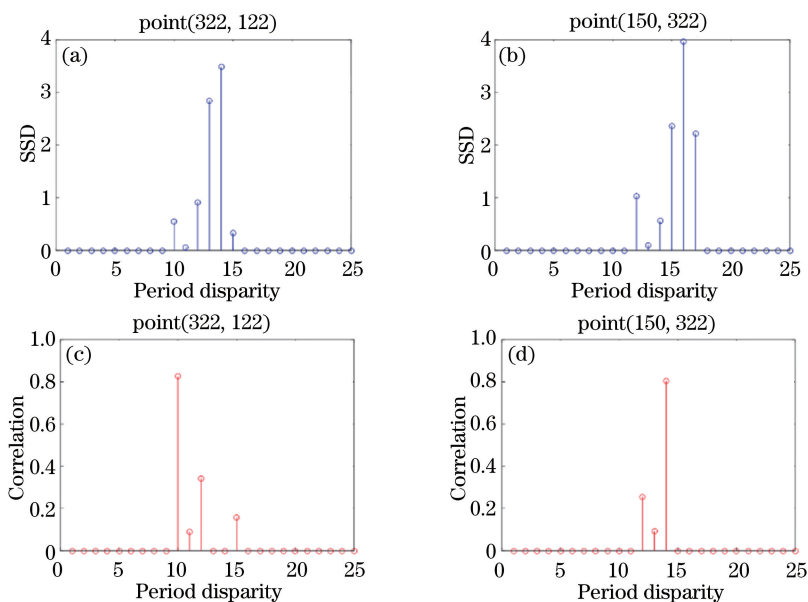


图 6 左相机上不同区域的像素点(322,122)、(150,322)的 SSD 和相关值。(a)(b)SSD;(c)(d)相关系数

Fig. 6 SSD and correlation value of pixel (322,122) and (150,322) in different areas of left camera.

(a)(b) SSD; (c)(d) correlation coefficient

为了对比 Z 方向约束、SSD 约束和散斑相关约束在实验过程中的作用。按照表 1 所示,实验用 4 种不同的立体匹配相位展开方法实现对平板的测量,得到如图 7 所示的左相机各像素对应的周期分布。为了定量地展示各种方法的效果,以相同周期数的条纹图像通过双频法^[23]求解出平板的级次图作为标准。各种方法的测量结果如表 1 所示,本文方法的相位展开结果如图 7(a)所示,级次求解错误的像素占总像素数的 0.288%,远低于缺少 Z 方向约束或散斑相关约束;缺少散斑相关约束将导致相位展开错误率提高 18 倍以上,如图 7(c)、(d)所示,效果明显变差;缺少 Z 方向约束也会增加错误率,测量效果如图 7 (b)、(d)所示。

表 1 匹配方法和结果对应表

Table 1 Table of matching method and result

Z	SSD	Correlation	Image	Error /%
✓	✓	✓	Fig.5 (a)	0.288
×	✓	✓	Fig.5 (b)	1.505
✓	✓	×	Fig.5 (c)	14.705
×	✓	×	Fig.5 (d)	27.323

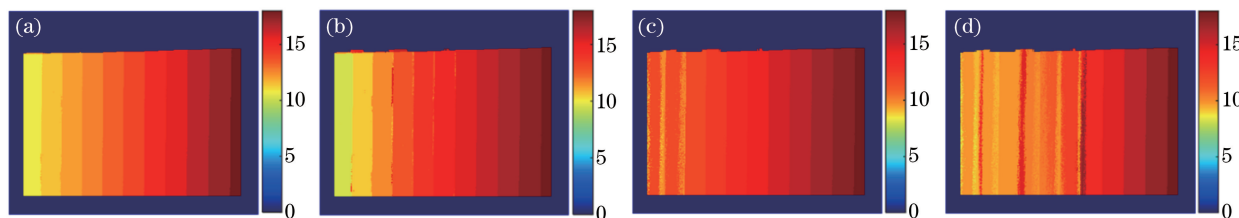


图 7 不同约束匹配方法的级次图。(a)Z、SSD 和相关;(b)SSD 和相关;(c)Z 和 SSD;(d)SSD

Fig. 7 Order maps resulting with different matching constraint methods. (a) Z, SSD and correlation;

(b) SSD and correlation; (c) Z and SSD; (d) SSD

上述结果表明,在极线上仅通过 SSD 约束匹配像素点是不可靠的。如图 8 所示,相比实际匹配点,通过 SSD 约束得到的点和待匹配点在光强上更接近。但这两个点邻域的相关系数只有 0.0031,因此它们并不是同一个区域的点。初步选择 3 个 SSD 最小的周期的候选点,保留光强最为接近的 3 个候选周期;然后用散

斑相关来确保 2 个光强接近的待匹配点属于同一区域。经散斑相关约束,两个区域的相关性大大提高,相关系数达到 0.7512,成功实现了 SSD 约束后的错点矫正。

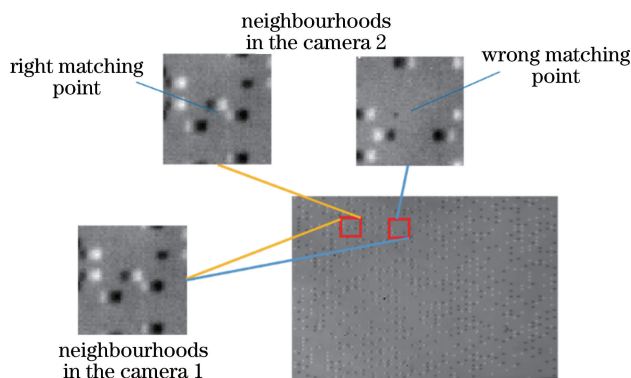


图 8 散斑相关约束

Fig. 8 Speckle correlation constraints

Z 方向约束也可以去除一些明显在测量区域之外的点,进一步避免获得同时满足 SSD 约束和散斑相关约束的错点。以左相机上像素坐标系坐标为(277,188)的像素点为例,如图 9(a)~(c)所示,如果没有经过 Z 方向约束,周期 10、11 和 15 对应的 SSD 较小,经过左、右相机 SSD 约束后,它们将进入候选周期。在进入候选周期的 3 个点 SSD 中,第 11 周期比第 15 周期小。然而,在求左、右相机相关系数确定最终周期时,第 15 周期的相关系数却比正确的第 11 周期高。由图 9(d)~(f)所示的结果可知,在不影响测量范围时,适当的 Z 方向约束可以去除一些明显在测量区域之外的点。

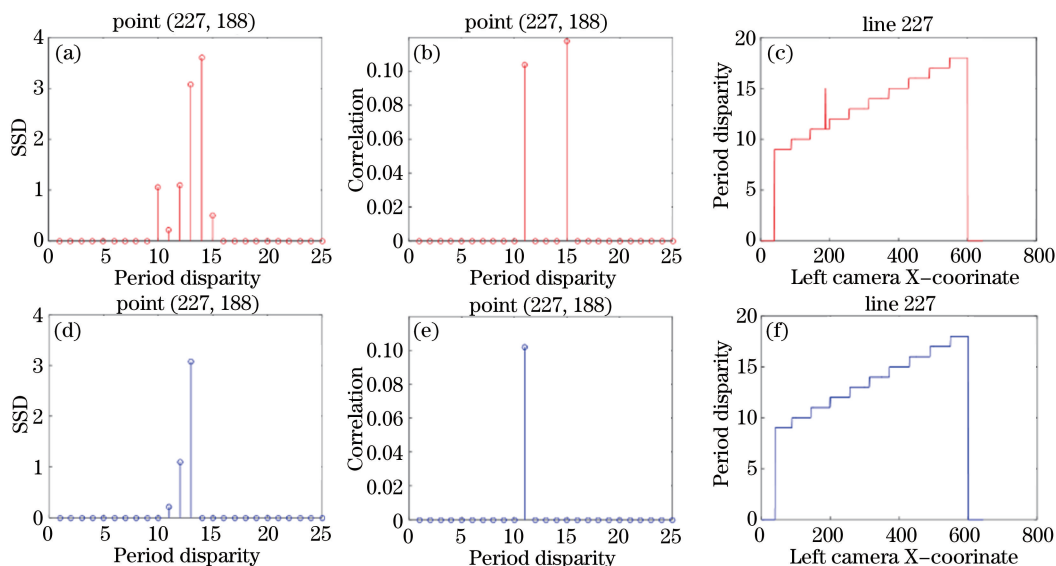


图 9 点(227,188)有无 Z 方向约束时对比。(a)无约束时 SSD;(b)无约束时相关系数;(c)无约束时周期选择;

(d)有约束时 SSD;(e)有约束时相关系数;(f)有约束时周期选择

Fig. 9 Comparison of pixel point (227,188) with and without Z constraint. (a) SSD without constraint; (b) correlation coefficient without constraint; (c) final period without constraint; (d) SSD with constraint;

(e) correlation coefficient with constraint; (f) final period with constraint

以上分析证实了 2.4 节的假设,在实际的测量过程中,噪声、镜面反射、遮挡和标定误差等因素会影响周期 k 的选择。散斑相关计算及 Z 方向约束在 SSD 约束的基础上尽可能地消除了不利因素的影响,提高了匹配正确率。

为了验证系统的精度,测量了一块长为 6 cm、宽为 5 cm,面向投影仪放置的矩形平板。图 10(a)为高频条纹图像(25 周期)通过三步相移求解的包裹相位,图 10(b)给出了由本文算法得到的级次图。重构的三维测量结果如图 10(c)所示,可以看出,平板测量出的尺寸与平板实际尺寸相符。用一次曲线拟合出待测物体

第 321 行的高度与 x 方向坐标的线性关系,并将计算出的高度作为实际测量结果的标准。拟合的一次曲线与本文方法的测量结果基本吻合,均方根误差(RMSE)为 0.1732 mm,如图 10(d)所示。实验结果证实了本文方法能够以较高的精度快速地获取物体的三维形貌。

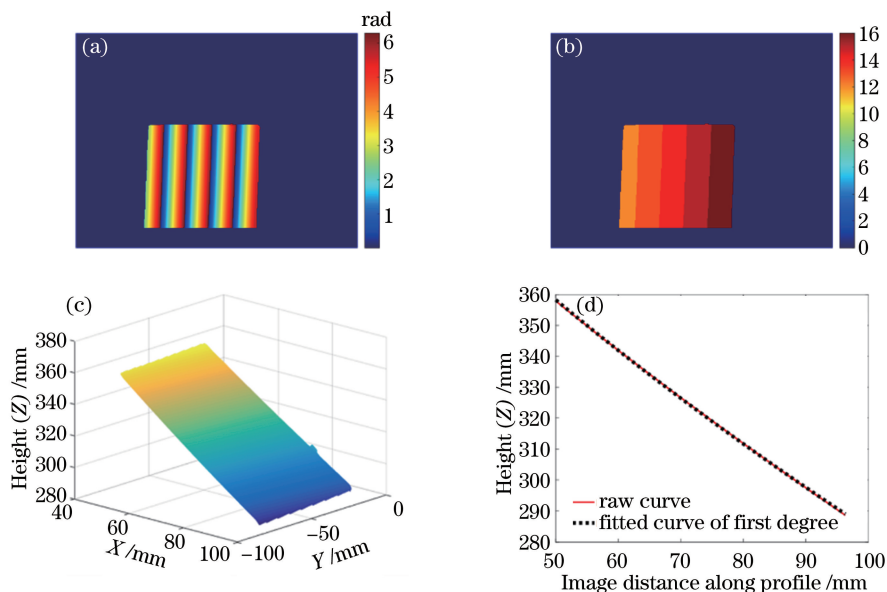


图 10 矩形平板的测量结果。(a)包裹相位图;(b)级次图;(c)三维图;(d)第 321 行高度图($Y = -53$ mm)

Fig. 10 Measurement results of the rectangle flat plate. (a) Wrapped phase map; (b) order map; (c) three-dimensional map; (d) height map of line 300th ($Y = -53$ mm)

3.3 GPU 加速效果

实验所用的 GPU 是 NVidia 公司的 GeForce GTX760 TI OEM,显存大小为 2 GB;中央处理器(CPU)是 Intel 公司的 Core(TM) i7-4790,时钟频率 3.6 GHz。表 2 列出了 GPU 和 CPU 处理不同数量有效像素点的时间。其中,对在 CPU 上运行的程序进行了优化,采用多线程流水线技术处理数据,即 CPU 所花费的时间近似等于最耗时的计算环节花费的时间,即相关计算时间。由表 2 可以看出,有效点的个数越多,GPU 相对于 CPU 的加速效果越明显。对于一般待测物,加速比在 170 倍以上。

表 2 GPU 和 CPU 计算时间对比

Table 2 Comparison of computing time of GPU and CPU

Point	CPU /ms	GPU /ms	Ratio
72424	6273	36	174
94163	9081	39	233
175989	20262	66	307
193073	22791	74	308

3.4 实时三维测量结果

实验中,DLP 的投射速率和高速相机的同步采集速率为 100 Hz,相机曝光时间为 0.95 ms。实验测量了逐渐向 Z 正方向发生形变的白纸,并由图 11 给出每隔 0.5 s 白纸的形貌及在第 300 行的高度变化图。可见白纸的 Z 坐标在增加,且顶部变化较小(靠近手拿的部分),1.5~2 s 时间内, Z 变化最大,约为 1 mm。通过对比可见,系统在较短的时间内捕捉到了信息的微小变化。在此过程中,本文算法均能够准确无误展开,实验结果没有错点。

为了进一步验证系统的实时效果,系统对运动更快的物体进行了测量。实验结果如图 12 (a)~(c)所示,测量结果基本没有区域性错点。在相同的实验条件下,采用双频法^[23]的实时测量结果如图 12(d)所示,物体表面产生了一些较为明显的波纹。

可以看出,本文方法成功重构了运动物体的三维形貌,但是由于待测物体转动速度较快(约为 0.3 m/s),在 3 帧相机曝光时间内物体在图像平面内产生了大约 4 pixel 的偏移。正是这种由物体运动导致的误差,最终在测量结果中体现为原条纹频率为 2 倍^[16]的周期性谐波误差。为了消除运动产生的纹波影响,最直接的

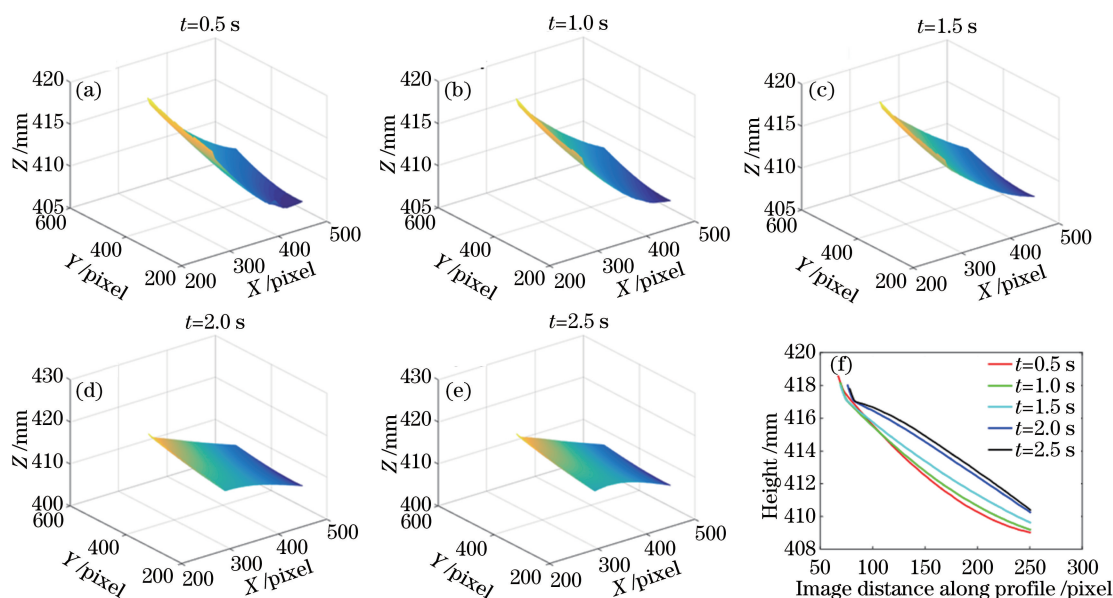


图 11 不同时刻重构的三维图和第 300 行的高度变化图。(a)0.5 s;(b)1.0 s;(c)1.5 s;(d)2.0 s;(e)2.5 s;(f)第 300 行的高度变化图

Fig. 11 Reconstructed three-dimensional maps at different time and height variation map of line 300th. (a) 0.5 s; (b) 1.0 s; (c) 1.5 s; (d) 2.0 s; (e) 2.5 s; (f) height variation map of line 300th

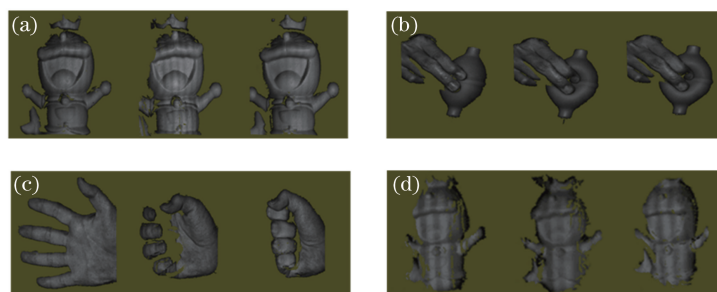


图 12 快速运动物体的测量结果。(a)转动的哆啦 A 梦;(b)被挤压的气吹嘴;(c)运动的手;(d)双频法测转动的哆啦 A 梦

Fig. 12 Measurement results of rapid moving objects. (a) Rotating Doraemon; (b) squashed air blowing nozzle; (c) moving hand; (d) rotating Doraemon by dual-frequency method

手段是提高投影仪和相机的投影与采集速率,但由于算法处理速度、硬件采集速度与系统传输速度所限,该方法在实际中仍然缺乏可操作性。另一种方法是通过后处理算法^[16]进行补偿,但实际情况下物体的运动是随机的,很难通过建立具体的运动模型补偿测量误差。在未来的工作中,课题组会在该问题上继续探索,并寻求解决运动模糊问题的方法。

4 结 论

提出了一种结合极线约束和散斑相关的实时三维测量方法。该方法采用标准三步相移算法,求解出左、右相机的包裹相位;通过极线约束将右相机上待匹配的点从二维降到一维,提高了匹配的效率和,并减小了误匹配的概率;为了消除标定误差、系统噪声等因素对立体匹配的影响,先通过光强平方差初选出最有可能正确的 3 个周期,通过散斑相关确定最终的周期,从而实现无歧义的相位展开。

相比于传统信息嵌入法和多相机约束法,该方法无需额外的相移图像,也不需要经过复杂算法或需要预先设置较小的 Z 方向测量范围,提高了匹配的正确性和系统的稳健性。分别对不同形貌的待测物体进行了实时动态三维测量。实验结果表明,在保证精度的前提下,本文方法能够大幅提高绝对相位的求解正确率。经过 GPU 并行计算架构对该算法进行优化,系统实现了速度为 26 frame/s,单幅测量点数为 94,163 的实时动态三维测量。

参 考 文 献

- 1 Wu Yingchun, Cao Yiping, Shi Shunping, *et al.* On-line three-dimensional inspection based on orthogonal two-frequency grating projection[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(5): 0508003.
武迎春, 曹益平, 史顺平, 等. 基于正交双频光栅投影的在线三维检测[J]. 中国激光, 2012, 39(5): 0508003.
- 2 Zhou Liping, Gan Jianghong, Xu Long. Corneal contour measurement based on non-diffraction grating structure light projection[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0308001.
周莉萍, 干江红, 徐 龙. 基于无衍射栅型结构光投影的角膜轮廓测量[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0308001.
- 3 Wu Meirui, Yang Xibin, Xiong Daxi, *et al.* Structured illumination fluorescence microscopy: Diffraction-Limit breaking principle and application in life science[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 010003.
吴美瑞, 杨西斌, 熊大曦, 等. 结构光照明荧光显微镜突破衍射极限的原理和在生命科学中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 010003.
- 4 Su Xianyu, Zhang Qican, Chen Wenjing. Three-dimensional imaging based on structured illumination[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209001.
苏显渝, 张启灿, 陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209001.
- 5 Su X Y, Zhang Q C. Dynamic 3D shape measurement method: A review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(2): 191-204.
- 6 Wang Y J, Zhang S. Superfast multifrequency phase-shifting technique with optimal pulse width modulation[J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5149-5155.
- 7 Wang Y J, Zhang S, Oliver J H. 3D shape measurement technique for multiple rapidly moving objects[J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8539-8545.
- 8 Zhang Q C, Su X Y, Xiang L Q, *et al.* 3-D shape measurement based on complementary gray-code light[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(4): 574-579.
- 9 Ayubi G A, Ayubi J A, Matias Di M J, *et al.* Pulse-width modulation in defocused three-dimensional fringe projection [J]. Optics Letters, 2010, 35(21): 3682-3684.
- 10 Wang Y J, Zhang S. Optimal pulse width modulation for sinusoidal fringe generation with projector defocusing[J]. Optics Letters, 2010, 35(24): 4121-4123.
- 11 Zuo C, Chen Q, Feng S J, *et al.* Optimized pulse width modulation pattern strategy for three-dimensional profilometry with projector defocusing[J]. Applied Optics, 2012, 51(19): 4477-4490.
- 12 Yang Guowei, Sun Changku, Wang Peng. Real-time stroboscopic laser Fringe-pattern projection system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1112002.
杨国威, 孙长库, 王 鹏. 频闪激光光栅条纹实时投射系统[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1112002.
- 13 Liu K, Wang Y C, Lau D L, *et al.* Dual-frequency pattern scheme for high-speed 3D shape measurement[J]. Optics Express, 2010, 18(5): 5229-5244.
- 14 Wang Y C, Liu K, Hao Q, *et al.* Period coded phase shifting strategy for real-time 3D structured light illumination[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(11): 3001-3013.
- 15 Zuo C, Chen Q, Gu G H, *et al.* High-speed three-dimensional profilometry for multiple objects with complex shapes[J]. Optics Express, 2012, 20(17): 19493-19510.
- 16 Weise T, Leibe B, Van Gool L. Fast 3D scanning with automatic motion compensation[C]. 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR 2007), 2007: 1-8.
- 17 Zhong K, Li Z W, Zhou X H, *et al.* Real-time 3D shape measurement system with full temporal resolution and spatial resolution[C]. Proceedings of the SPIE, 2014, 9013: 901309.
- 18 Malacara D. Optical shop testing[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- 19 Zuo C, Huang L, Zhang M L, *et al.* Temporal phase unwrapping algorithms for fringe projection profilometry: A comparative review[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 85: 84-103.
- 20 Zhang Y Y, Xiong Z W, Wu F. Unambiguous 3D measurement from speckle-embedded fringe[J]. Applied Optics, 2013, 52(32): 7797-7805.
- 21 Feng S J, Chen Q, Zuo C. Graphics processing unit-assisted real-time three-dimensional measurement using speckle-embedded fringe[J]. Applied Optics, 2015, 54(22): 6865-6873.
- 22 Sun Bujiao, Zhou Donghua. Fast matching method based on NCC[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2007, 26(9): 104-106.
孙卜郊, 周东华. 基于 NCC 的快速匹配算法[J]. 传感器与微系统, 2007, 26(9): 104-106.
- 23 Zuo C, Chen Q, Gu G H, *et al.* High-speed three-dimensional shape measurement for dynamic scenes using hi-frequency tripolar pulse-width-modulation fringe projection[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(8): 953-960.