摘要

相位测量轮廓术是获取物体表面三维形貌信息的最有效方法之一,但是对于被测目标物体存在不同反射率时, 传统的条纹投影技术难以使同时存在高反射率和低反射率的区域实现高精度的形貌测量。自适应条纹可以有效解决这个问题，而且这种饱和避免方法可以独立于任何相机-镜头硬件自动执行，并将允许在不受控制的环境中进行广泛的测量应用。本文提出一种基于图像融合和二次样条插值算法来预测最佳投射灰度值，在不进行递归和迭代的情况下，该算法可以使高反射率处像素获得最大但不饱和灰度值。由于相机和投影仪分辨率不同，会出现像素映射偏差以及多个相机像素的不同最佳投射灰度值映射到投影仪的同一像素处，会对三维显示结果和精度产生一定的影响。本文对像素映射方式进行了改进，并采用二次样条插值算法生成自适应条纹，达到避免饱和及提高信噪比的目的。实验表明：本文所提方法实现了局部过曝区域的相位信息的完整提取，与传统自适应条纹算法相比，本文所提方法在像素调制度方法有了更大的提升，在改善高动态范围表面的三维显示效果的同时提高了其三维形貌的测量精度。

关键词 测量；相位测量；高动态范围；自适应条纹；图像融合；二次样条插值；互补格雷码

引言

移相位条纹图案投影（PSFPP）是一种流行的全场三维表面几何测量的非接触光学技术。但是,对于表面反射率变化比较大的高动态范围 (HDR)表面，光栅条纹的调制效果会受到不同程度的影响。其中，物体表面高反射率会造成图像过度饱和，导致解码错误，是影响相位获取和最终三维重建结果的因素之一。物体表面低反射率会造成图像像素调制度和信噪比过低，导致重建精度不理想。在实际应用中,为了使传统条纹投影技术适用于 HDR表面,通常用白色粉末喷涂目标,这样的过程通常是费时费力的,这就极大地限制了高速结构光技术的应用。

国内外众多学者针对高动态范围物体提出了多种三维测量方法[1-9]。Zhang [10]介绍了一种采用不同曝光进行图像融合的高动态范围扫描技术。通过改变多次曝光时间采集图像，以图像中每个像素位置处不饱和且最大亮度的值作为最终值，利用融合图像来求取相位,得到物体的三维坐标。此方法具有一定的局限性:要想获得大部分像素的曝光灰度值,需要设置大量的曝光时间,在操作上需要耗费大量时间，不适于实时三维测量。文献[11]对zhang的方法进行了改进，通过选择在原始条纹中具有不饱和且最高条纹调制强度的像素来生成融合图像进行三维测量。并且提出了一种HDRFA参数的自动选择方法，大大提高了测量的自动化程度。通过优化HDRFA参数，合成条纹在环境光下具有较高的信噪比（SNR）。在这两种方法中，复合图像将被用来计算每个像素的相位和表面高度。虽然这些方法能够避免饱和，对于所有现成的相机硬件，曝光时间的调整可能是不可能或不实际的。Waddington[12-13]等提出了一种独立于相机的方法，在测量高反射率变化范围的表面时避免饱和，结合MIGL减少和逐像素方法，从而利用投影不同MIGL的多组条纹图案获得的不饱和像素强度创建复合图像。三维重建结果显示在反射率较大表面出现很多不光滑的区域，有很多波纹出现，且需要大量的测量时间。Feng[14]提出了一种自适应计算曝光时间的方法。其首先根据物体表面反射率建立直方图，之后选择直方图中心的曝光时间作为整组的最优曝光时间。但是这种方法在实际应用中，由于真实世界的物体直方图界限难以分割，所以其直方图分析的方法不一定准确。同时，当分组较多时，重建所需要的时间也会相应增长。为此，Rao[15]提出了一种全自动预测曝光时间的方法，其分析了相位误差与随机噪声、调制度的关系。之后建立调制度直方图，选取调制度最大的曝光值作为最终的输出。Zhang[16]提出了一种新的曝光时间预测方法，通过在低曝光下获取一张投射均匀的白色图像来预测最佳曝光时间。其思想是在预先标定相机噪声的前提下，选择最优曝光时间，使得反射区域的灰度达到最大且不饱和。该方法的实质是根据原先设定的强度间距来计算曝光时间，同时该方法对于明亮区域表现良好，但是无法有效处理低光照区域，且其实际效果取决于预先设定的阈值和相机标定精度。

Jiang等[17]针对三步相移提出，通过投影倒置条纹，即相移为π的条纹，在原始条纹中出现饱和时，将相应的倒置条纹带入不同的公式中进行计算。该方法优点是不必改变曝光时间和投影亮度，只要不是原始条纹全部出现饱和，都能较为准确地计算出相位，但是该方法的通用性较差。Li等[18]提出了一种通过最大输入灰度等级（MIGL）自适应调整投影条纹图案强度来避免物体表面测量时出现饱和的方法，通过将不同MIGL捕获的相移图像强度组合到一组合成的相移图像中，可以在保持高信噪比（SNR）的同时避免测量时出现饱和。

Wang等[19]提出一种基于递归的自适应条纹投影方法。该算法能够分析采集图像中亮度饱和及亮度不足的像素点,并根据坐标映射关系 自适应地调整投影图案的亮度,使各像素投影亮度经二分递归后趋近于最佳投影亮度,只需至少三次递归就可达到避免饱和及提高信噪比的目的。Lin等[20]该提出仅采用条纹图案投影和图像捕获的两个初步步骤，通过生成自适应的条纹图案，根据被测量表面捕获图像中的饱和像素，自适应地调整投影的条纹图案的像素级强度。对于由于高表面反射率和环境光和表面互反射的高照明而产生的明亮区域，投影强度被降低到足够低，以避免图像饱和。但是该方法需要耗费大量的时间，不适用于实时三维测量。

本文提出一种基于图像融合和二次样条插值算法来预测最佳投射灰度值，在不进行递归和迭代的情况下，可以使图像像素灰度值有较大的调制度。并对像素映射方式进行了改进，并采用二次样条插值算法生成自适应条纹，达到避免饱和及提高信噪比的目的，能够有效地提高动态表面的三维测量精度。