**外文文献翻译**

**应用物理15-1班 张凡**

**基于数字摩尔的光学3D测量：像素级别校准，去除格状噪声，和时间相位展开**

第五章：二图片和三图片时间相位展开

在这一章，二图片和三图片数字摩尔时间相位展开被提出分别计算一个精确的使用2个或者3个不同频率的条纹投影产生的连续相位映射。这一方法需要将一个单独二值条纹的投影，然后为每一个条纹频率捕捉图片来计算折叠的相位，但是相位移动出现在捕捉图片后的过程。相位移动分析能得出不同摩尔波长的相位映射。计算每个相位的摩尔波长需要在系统校准中使用有噪声的相位映射作为参考来展开较短波长的相位映射。这使得使用较条纹投影方法少的图片完成精确连续位相的计算。

5.1 数字相位移动摩尔

这一使用多波长数字相位移动摩尔的时间相位展开方法需要将多个不同频率的投影到物体表面，然后对于每一个（不同摩尔频率）的捕捉到的图片，一个合成的（由计算机生成的）相同频率重合在捕捉到的图片上，然后数字移动，生成多个相位移动的摩尔条纹。第三章详细提到此方法。

生成的相位移动的摩尔条纹包含这摩尔等高线和不需要的高频条纹图样。接下来条纹去除方法用来去除纯条纹。第四章详细提到此方法。在去除条纹后，相位移动摩尔图样的强度分布有以下公式描述：

, (5.1)

其中和分别是背景和调制强度，是图像像素坐标。是相位对应物体高度信息的映射，是图像之间的相位移动。为了计算相位映射，至少需要三张图片的相位摩尔图样:

。 (5.2)

由于在公式5.2里反三角函数，计算所得的相位是折叠在, 并且由于一个二维的相位展开方法需要来去计算连续的相位映射. 这一过程根据条纹的级数去除折叠相位的的不确定性。

。 (5.3)

展开相位和物体高度之间的关系取决于系统几何参数，这一关系有以下公式描述：

。 (5.4)

系数K是关于条纹波长的函数：

。 (5.5)

公式5.4可以被写成：

(5.6)

5.2 系统校准

5.2.1 摩尔波长的计算

计算每个相位映射可以使用系统校准的过程（第三章有详细介绍）。一个平面薄板安装在平移台上，朝着计算机-投影仪面移动到已知位置（深度或者高度已知）。在每一个位置，和测量物体测量相同的条纹投影到薄板上。之后，计算机镜头捕捉一副图片。对于每一个平板的位置，一个和所捕捉到的图片频率相同的电脑合成的条纹在电脑处理后端叠加到所捕捉到的图片上形成摩尔图样。（所有位置）生成的摩尔图样通过过滤去除高频条纹并提取纯摩尔图样。在同一像素点的强度根据所有平板位置（深度）记录。对于每一个像素点，摩尔条纹的强度随着薄板的移动，遵循一个近似正弦函数的变化。摩尔波长可以通过可以有两个连续的极大（亮条纹）和两个连续的极小值（暗条纹）分别得到。一般认为在两个连续的摩尔条纹中是常数；但是摩尔波长随着校对深度的增加而递减。为了确定摩尔波长是高度的函数，摩尔波长首先通过在不同薄板位置的每一对连续的波峰的记录下的强度计算。然后对所有像素平均得出不同薄板位置（高度）的不同波峰对平均摩尔波长。最后，摩尔波长作为高度的函数可以通过不同波峰对的所有平均摩尔波长线性拟合得到。多次捕捉图片仅仅只在系统校准阶段使用需要，在物体测量是不需要。为了计算外差法的时间相位展开，需要多个相位映射，根据之前的测量深度的对应的波长可以用来计算每一个相位映射。

5.2.2 X-Y平面的校准

为了实现X-Y平面的校准，由像素坐标到真实世界的坐标的对应使用类似于第三章的方法计算。但一个改进后的方法可以用来在每一个高度（深度，Z轴）精调比例参数：

， (5.7)

其中和是对应真正宽度和真正长度已知几何参数物体的像素个数，和分别是在不同深度调整后的比例参数。参考薄板的和可以通过使用在不同高度（深度）位置在摩尔波长系统校准过程得到的同一张图片确定。

5.3 数字摩尔时间相位展开

5.3.1 双波长相位展开

对于双波长的数字摩尔时间相位展开，两个不同频率的条纹投影到物体表面，每一次投影抓拍一个图片。通过数字相位移动，一个电脑合成的条纹和所抓拍图片叠加，产生相位移动的摩尔图样，之后经历第四章描述的条纹去除。然后，相位移动分析计算出两个不同的摩尔波长和的折叠相位，。在条纹投影测量法（Fringe Projection Profilometry）中，至少需要捕捉六张图片来展开时间相位展开，但是在本研究中，只需要捕捉两张图片。每一各摩尔图样的波长, 按照第三章介绍，在校准阶段计算。

从相位映射和，一个展开的连续的相位和展开的波长, 其中，展开相位是

(5.9)

在这里，拍频波长足够大能覆盖被测物体的高度的值域。（例如，连续的灰度梯度，在中没有出现相位不确定）。为了最小化噪声引起的相位错误，作为参考展开相位映射, 有更小的波长，如下：

， (5.9)

其中是展开相位，函数计算括号内小数最接近整数。如此，一个好信噪比的展开相位映射可以用来在测量中计算物体高度：

(5.10)

5.3.2 三波长相位展开

一个波长较大的折叠的相位映射有少数的相位阶跃但是噪声比较大，但是一个小波长的相位映射会有更多的相位阶跃但是更高的信噪比。在双波长的相位展开，最好的波长可能不能足以符号被测物体深度，留下相位不确定。增大投影条纹的频率能增大波长和，能帮助拍频波长覆盖整个被测物体深度，但是这会在展开确定的相位映射牺牲信噪比，会使相位展开过程不可靠。

三波长或者多波长外差法，相位展开能进一步增加拍频波长，并不在展开相位部分牺牲信噪比。在三波长数字摩尔时间相位展开中，三个不同频率的条纹投影到被测物体上，每一个投影条纹拍摄一张图像。对应三个波长()三个折叠的相位可以从三个捕捉的图像计算出来。可以从三个拍频波长，，计算出的三个比例因子用来展开相位，使展开相位覆盖被测物体深度范围。展开相位和展开波长从相位映射得出，如下：

, (5.11)

为了减小的噪声，用来作为展开对应波长的相位映射的参考，这会使得比有更高的信噪比：

(5.12)

对应波长展开的相位使用和计算一样的方法，由相位映射和计算得出：

(5.13)

然后为了再一次减小噪声，有比之前计算的更高的信噪比

(5.14)

对应能覆盖整个物体深度范围的展开波长的相位映射（例如，在中没有相位不确定）通过相位映射比和计算得出：

(5.15)

最后，的相位展开通过之前的展开连续相位映射计算出来，如下

) (5.16)

这个高信噪比的相位映射可以用来测量物体高度：

。 (5.17)

5.4 实验和结果

5.4.1 实验装置

为了展示数字摩尔多波长的时间相位展开，我们通过一系列光学装置进行了实验，装置包括LCD投影仪（Panasonic PT-AE7000U）和2048x2048分辨率的单色CCD照相机。照相机和投影仪之间的夹角大约为11度，照相机-投影仪面里物体距离2.5m。

5.4.2 系统校准

为了计算摩尔条纹的波长，系统校准使用了安装在平移台上的平薄板。平薄板采取了200个位置，在250mm的校准深度和0.007mm的平移精度采用了1.25mm间隔。10， 12， 14像素周期的二值条纹投影到平薄板上，在不同的已知位置找到捕捉三个不同条纹频率的条纹。但是在测量被测物体时无需在不同位置采集不同频率的图像。这一过程仅仅在系统校准过程中需要，来计算摩尔波长。相位移动的摩尔条纹通过数字化的在捕捉到的图片上相移，之后经过在5.1节里提到的条纹去除。最后，摩尔波长的计算步骤通过5.2.1里提到的方法进行。最后得到的波长是分别对应10，12，和14像素周期的图片。

5.4.3 测量

物体测量通过将一个在校准过程中使用过的条纹周期的图样投影到物体上，然后每个图样捕捉一张图片。相位移动的摩尔图样通过数字的在捕捉到的图片上重叠并相位移动上一个和捕捉图片一样条纹频率的条纹图样，之后经过条纹去除。相位移动的分析用来提取每一个对应条纹频率的折叠相位映射 的折叠相位。之后数字摩尔时间条纹相位展开在一个表面不连续的面具上实现，两个看空间上分离的物品（一个表面不连续的面具，一个侏儒头）和一个双半球物品。

双波长时间相位展开方法，通过投影两个不同的但用在校准过程中的条纹频率的条纹图样和为每一个条纹频率捕捉一张图像，在表面不连续的面具上进行。对于每个条纹频率，一个高频摩尔图样通过数字相位移动得到。纯摩尔图样有条纹去除方法提取。两个折叠的相位映射可以用摩尔波长得到（5.4.2节）。展开的连续相位映射和可以覆盖整个待测物体深度的拍频波长=135.567mm，可以从折叠的相位映射计算得到（图5.1-d ，5.2-d）。

图5.1 折叠相位计算：a）投影上10像素宽度的二值条纹的面具，b）由高频条纹图样和摩尔图样形成的图样，c）经过条纹去除的摩尔条纹，和d）折叠相位。

图5.2 折叠相位计算：a）投影上12像素宽度的二值条纹的面具，b）由高频条纹图样和摩尔图样形成的图样，c）经过条纹去除的摩尔条纹，和d）折叠相位。

图5.3 a）有展开拍频率展开图样相位映射，b）展开的相位，和c）测量得到的面具的点云可视化

为了由最小化里的相位错误，没有相位不确定的用来作为展开对应更小波长相位映射的参考，从而得到展开相位。结果展现了仅仅捕捉两张图片能够精准3D测量（图 5.3c）来获得高信噪比相位映射的能力。

三波长时间相位展开用在两个空间分离的物体上：表面不连续的面具和一个侏儒头。为了适用于侏儒头比面具更大的被测物体深度，通过投射另一个格子线频率更大的条纹图样，可以在不牺牲信噪比的情况下，可以显著增大拍频的波长。因此，三个不同频率的条纹图样投射到物体上，每一条纹图样（10-，12-，14-像素周期），分别捕捉一张图样（图 5.4a,5.5a,5.6a）。对于每一张条纹频率，带高频条纹的摩尔图样通过数字相移得到，然后通过条纹去除得到纯摩尔条纹（图 5.4c， 5.5c, 5.6c）。

图 5.4 生成摩尔图样：a）10像素周期的二值条纹不着的原始捕捉图像， b）带高频条纹的摩尔图样，和c）条纹去除的摩尔图样

图 5.5 生成摩尔图样：a）12像素周期的二值条纹不着的原始捕捉图像， b）带高频条纹的摩尔图样，和c）条纹去除的摩尔图样

图 5.6 生成摩尔图样：a）14像素周期的二值条纹不着的原始捕捉图像， b）带高频条纹的摩尔图样，和c）条纹去除的摩尔图样

三个折叠的相位，，和（图5.7a, 5.7b和，5.7c）使用不同的摩尔波长，，和计算得出（5.4.2节）。对应展开拍频波长的展开相位映射可以使用相位映射和计算得出。为了减小由中的噪声所造成的相位误差，可以用来作为展开更小摩尔波长的相位映射，从而得到更高信噪比的相位映射（图 5.8b）。

图5.7 折叠相位映射 a) ，b) ，和c)

第二张展开相位映射（图5.9a），对应展开拍频波长，可以通过相位映射和计算得出。为了减小由中的噪声所造成的相位误差，可以用来作为展开更小摩尔波长的相位映射，从而得到更高信噪比的相位映射（图 5.9b）。用[54]中的方法，是从相位映射（图 5.8a）和（图5.9a）中计算出覆盖了全部被测物体深度的展开的连续相位映射（图 5.10a），最后得出一个含有噪声的相位映射（图5.10a）。但本篇论文使用了高质量的相位映射（图 5.9b）和（图5.10b）计算出对应展开拍频波长的具有高信噪比的连续展开相位映射。最后为了计算出一个更高信噪比的精确展开相位映射，用来作为参考展开具有较小摩尔波长的，来得到具有更高信噪比的展开相位（图 5.10c）。这一高信噪比的展开相位映射的方法使得只用捕捉三张图片就可以精准3D测量不连续和多个空间上隔离的物体（图 5.11）。

图 5.8. 展开相位：a）对应展开拍频波长的，和b）具有更高信噪比的

图 5.9. 展开相位：a）对应展开拍频波长的，和b）具有更高信噪比的

图 5.10. 展开连续的相位映射：a）基于[54]方法由和计算得到连续展开相位，和b）由和计算的，具有更高信噪比对应展开拍频波长的，和c)展开相位

图 5.11. 测得空间隔离物体面具和侏儒头的点云可视化

为了展示双图片数字摩尔时间相位展开方法的准确性，一个已知半球直径（真实半径 50.80mm）双半球物体和已知球心之间距离（120mm）被测量。为了增大测量的精度和准确性，校准时，采用了比其他物体更小条纹周期的二值条纹投影（在捕捉图像中8-和10-像素条纹）。然后计算出对应8-和10-像素周期的图片的摩尔波长是, 。之后在半球物体上采用双波长相位展开，投射两个和校准过程中频率相同的二值条纹图样，每一个图样（8-和10-像素周期条纹）捕捉一张照片。最后使用条纹去除提取摩尔条纹。

图片 5.12. 生产摩尔条纹：a）由8-像素周期二值条纹投影得到的原始双半球物体照片，b）由摩尔条纹和高频条纹重合生成的图像，和c）在条纹去除之后得到的摩尔条纹

图片 5.12. 生产摩尔条纹：a）由10-像素周期二值条纹投影得到的原始双半球物体照片，b）由摩尔条纹和高频条纹重合生成的图像，和c）在条纹去除之后得到的摩尔条纹

两个折叠的相位和（图 5.14a，5.14b）通过摩尔波长和计算得出。展开的连续相位映射（图 5.15a）和能覆盖物体全部深度范围的拍频波长=87.720mm能从折叠相位和（图 5.14a 和图5.14b）。为了减小由里噪声产生的相位误差，没有相位不确定的用来展开相位参考展开有着更小摩尔波长相位映射得到展开的相位映射（图 5.15b）。利用公式（5.10）进行高度测量，之后最小二乘法球拟合，得到测量的3D点云数据。（图 5.15c）。最后测得直径为50.833mm，和50.738mm，因此0.33mm和0.062mm的误差。（球拟合的标准差为0.146mm和0.142mm）。两半球之间的球心距离为119.812mm，具有0.188mm的误差。

图5.14 折叠相位映射：a），b）。

图 5.15 a）展开拍频波长的相位映射，b）展开的相位，和c）双半球物体的点云可视化

一个真实半球的截面测量点的采样在图5.16中可见。测量点在大多数地方很接近真实值。但是，在靠近表面边缘的存在较大误差，这个时候镜头和投影仪的光轴平行于表面。

图 5.16 真实半球和双半球截面测量点采样

5.5讨论

为了实现数字摩尔的本章讨论了双图片和三图片时间相位展开方法，产生了一个高信噪比的相位映射，因此对于之前的数字摩尔时间相位展开方法是一个改善。在系统校准中计算摩尔波长也使得可以使用有噪声的相位映射作为参考展开更短波长的相位映射。所以，最终能获得一个噪声少，连续精准的相位映射。对于每一个波长，本方法只需要投影一次条纹图样，开展一次时间相位展开。这一新方法所需要捕捉图片的数量较少有助于测量动态的被测物体，无论是移动的还是变形的。

参考文献

**附录**