

文章编号 : 0253-2239(2001)10-1208-06

数字散斑时间序列相关三维面形测量方法*

代红军 苏显渝

(四川大学光电系, 成都 610064)

摘要: 提出了一种测量三维面形的新方法。将随机数字散斑投影到参考平面上, 深度方向等间距平移参考平面, 用 CCD 摄取时间序列散斑参考集 $R(t)$, 然后用被测物体取代参考平面, 获取物体调制散斑图像 O 。 O 中的任意子图像 $O(x, y)$ 与参考平面簇中对应位置的时间序列子图像 $R(x, y; t)$ 之间的交叉相关值曲线呈高斯分布, 其峰值位置就是被测物点的高度。该方法摆脱了以前数字散斑测量法水平相关思路, 是真正的时间序列相关方法; 且原理简单, 测量精度高, 不需要复杂的相位展开和校准过程, 特别适用于测量突变面形和空间离散面形。根据测量结果的误差特征, 提出了相关值加权邻域平均插值算法, 能得到比邻域平均算法更好的测量结果。

关键词: 三维面形测量; 数字散斑; 时间序列相关

中图分类号: TP391.41 文献标识码: A

1 引 言

光学三维传感具有非接触、高精度、高速度等特点, 已广泛用于机器视觉、实物仿形、产品质量控制等领域。已研究的方法可分为被动三维传感与主动三维传感。主动三维传感采用结构光照明, 三维面形对结构光场进行空间或时间调制, 从携带有三维面形信息的观察光场中, 通过适当的方法解调得到三维数据。主动三维传感方法已有: 飞行时间法 (TOF)^[1]、莫阿 (Moiré) 轮廓术^[2]、傅里叶变换轮廓术 (FTP)^[3,4]、相干雷达技术^[5,6]、相位测量轮廓术 (PMP)^[7-10]、调制度测量轮廓术 (MMP)^[11]、数字散斑照相术 (DSP)^[12-18] 等。其中相位测量轮廓术因为具有较高的精度而得到最充分的研究和应用。傅里叶变换轮廓术在测量过程中只需要抓取一帧图, 速度快, 常用在实时测量中。大多数基于条纹投影的三维面形测量方法, 包括相位测量轮廓术和傅里叶变换轮廓术, 都必须处理相位展开问题, 当物体表面存在较大的突变时就很难准确依靠相位展开以恢复物体的实际面形。

另一个思路是摆脱复杂相位展开的限制, 寻求新的面形测量方法。Sjödahl 和 Synnergren^[12-15] 在这方面做出了重要的工作。在三角法测量中, 随机数字散斑投影会随着高度变化而产生水平移动, 因此研究投影散斑在被物体调制前后的移动情况就可

以获得物体高度信息。Sjödahl 和 Synnergren 在最新方法中将研究的基本思路转移到测量空间上^[12], 巧妙地将计算待测物点高度的问题转化为寻找一维相关曲线最大值的位置, 但该方法仍然没有摆脱平面相关的限制。

该方法必须有复杂的校准过程^[12]。为了校准系统, 需多摄取 N 帧散斑图; 对每一个子图像, 必须计算其运动参数 $\varphi_x(x, y, z)$ 和 $\varphi_y(x, y, z)$, 以寻找相匹配的子图像。因此参考平面平移精度和系统校准精度都必须得到保证, 否则测量精度就会明显下降。另外, 该方法计算量非常大。若采集 N 帧图像, 需要 N^2 次基本交叉相关运算单元才能得到完整的相关曲线。若子图像发生了亚像素移动, 还要在频域内作亚像素平移^[15]。

本文提出了随机数字散斑时间序列相关三维面形测量法。该方法从原理上避免了复杂相位展开过程, 也不需要复杂系统校正过程。本文详细阐述了其原理, 给出了实验结果。实验证明这种方法能有效地测量突变物体的三维面形。

2 基本原理

2.1 数字散斑时间序列相关的基本概念

数字散斑时间序列相关三维面形测量原理如图 1 所示。将随机数字散斑投影到参考平面上, 在深度方向上等间距平移参考平面, 与投影方向成一定角度的观察方向上, 用 CCD 摄像机获取 N 帧散斑的时间序列图像, N 的大小可以按测量精度要求任

* 国家自然科学基金 (69827001) 资助课题。

收稿日期 2000-04-26; 收到修改稿日期 2000-10-25

意选择,把这些图形存储在计算机中作为相关运算的参考集 $R(t)$ 。用被测物体取代参考平面,获取被物体表面调制后的散斑图 O 。其子图像 $\alpha(x, y)$ 与参考集中的对应位置的子图像 $R(x, y; t)$ 之间的相关值曲线呈高斯分布特征,其最大相关值对应的参考平面的高度,就是该子图像所在区域中心的高度 $H(x, y)$ 。该方法利用了散斑随高度变化而在水平面内移动的性质,却不用关心移动的路径和距离,更不用关心平移过程中散斑发生的缩放和旋转变化,这使得测量过程大为简化。

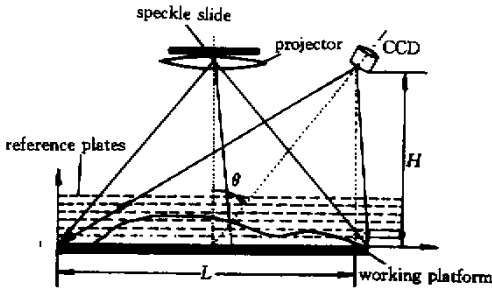


Fig. 1 Setup used to measure the object shape by digital speckle temporal sequence correlation method

2.2 相关算法及相关曲线

设由CCD拍摄到的散斑图被分为若干个 $s \times s$ 的散斑子图像,为考虑方便,可考虑散斑子图像为方阵。每个参考散斑子图像可以用 $R(x, y, p, q; t)$ 表示。其中 (x, y) 为子图像中心在散斑图像中的位置,子图像内每一像素的位置用 (p, q) 来表示, p, q 从 1 至 s ; t 从 0 至 N ,为参考平面序列号,参考平面对应于零参考面的相对高度可以表示为 $H = \Delta h \times t$ (Δh 为参考平面间距)。在被物体调制后的散斑图像中取同样大小的散斑子图像 $\alpha(x, y, p, q; H_0)$,分别计算 $\alpha(x, y, p, q; H_0)$ 与参考平面簇中对应位置的散斑子图像序列 $R(x, y, p, q; t)$ 之间的交叉相关值。

图2为参考散斑集中相关运算示意图,图中 $R(x, y; 0), R(x, y; 1), \dots, R(x, y; t), \dots, R(x, y; N-1), R(x, y; N)$ 为参考集中 (x, y) 处的散斑子图像序列,其中心连线垂直于参考平面;图2(c)为被测物体上对应点处的子图像 $\alpha(x, y; H_0)$,要计算 $\alpha(x, y; H_0)$ 处的高度 $H_0(x, y)$,先计算 $\alpha(x, y; H_0)$ 分别与参考集中对应子图像序列 $R(x, y; t)$ 间的交叉相关值,算法由下式给出^[19]:

$$\alpha(x, y; t) = \frac{\sum_s \sum_s [A - \bar{A}] [D - \bar{D}]}{\sqrt{\left\{ \sum_s \sum_s [A - \bar{A}]^2 \right\} \left\{ \sum_s \sum_s [D - \bar{D}]^2 \right\}}} \quad (1)$$

式中

$A = R(x, y, p, q; t), D = \alpha(x, y, p, q; H_0)$ $\overline{R(x, y, p, q; t)}$ 与 $\overline{\alpha(x, y, p, q; H_0)}$ 分别为 $R(x, y, p, q; t)$ 与 $\alpha(x, y, p, q; H_0)$ 的平均值。该相关算法只对子图像中灰度起伏形态敏感,具有较强的抗干扰能力。对于子图像 $\alpha(x, y)$,可以得到 $\alpha(x, y; 0), \alpha(x, y; 1), \dots, \alpha(x, y; N)$,如图2(b)所示。如果 $\alpha(x, y; H_0)$ 与 $R(x, y; t)$ 位于同样的高度,由于它们具有相同的平面坐标,因此它们代表空间同一位置的散斑分布形态,只是投影在参考平面与物体表面的差别,因此它们之间形态最相近,相关值也最大。由于 $\alpha(x, y; H_0)$ 的法线方向可能不与参考平面垂直, $\alpha(x, y; H_0)$ 相对于 $R(x, y; t_0)$ 可能存在因倾斜而产生的形变,但当 $\alpha(x, y; H_0)$ 的尺寸很小时,这些形变就可以忽略。由于三角关系,散斑图像会随着参考平面在深度方向的平移而在参考平面内产生微量平移,成像系统的离焦特性导致不同高度的散斑之间存在缩放关系,因此子图像序列中的其它子图像与 $\alpha(x, y; H_0)$ 只会部分相似,离高度 H_0 越远,相似部分越少,相关值就会越来越小,因而图2(b)中的相关曲线呈现高斯分布特征。当 $H_0 \neq \Delta h \times t$ 时,可以用曲线拟合准确求得相关曲线的峰值位置。为不失一般性,均采用拟合方法求得峰值位置。这里以重心算法为例。取相关峰值附近 $2w + 1$ 点作重心运算,则 (x, y) 处相关峰值的准确位置为^[11]

$$t(x, y) = \frac{\sum_{i=-w}^w G(t_0 + i) \times (t_0 + i)}{\sum_{i=-w}^w G(t_0 + i)} \quad (2)$$

这里 $G(t_0 + i)$ 为相关函数, t_0 为最大相关值所对应的参考平面序列号。对应的物点高度为

$$H(x, y) = t(x, y) \times \Delta h \quad (3)$$

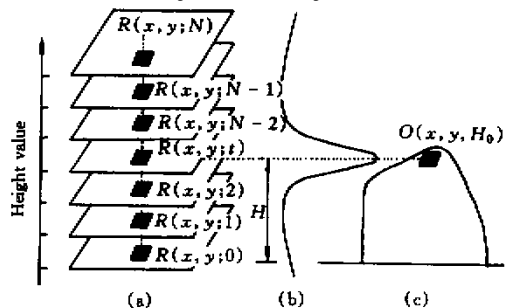


Fig. 2 The principle illustration of digital speckle temporal sequence correlation method

2.3 测量方法

实验中散斑由计算机生成。每幅散斑图由若干 3×3 像素矩阵构成,其中只有一个像素的灰度值为 255,其余像素的灰度值为 0。拍摄该散斑图制成底片,然后由投影系统投影到被测物体上,用 CCD 拍摄散斑图像。也可直接由数字投影机投影以缩短制作时间,提高散斑密度和灵活性。对于复杂物体,先将物体放在测量平台上,使得其最低高度值和最高高度值离测量下限和上限分别相差至少 $5\Delta h$ 。先调节投影机构,使得散斑在物体表面形成清晰的像;再调节拍摄机构,使得 CCD 能够拍摄到清晰的散斑图像,即尽可能避免阴影,又能使其与投影机相对于参考平面的夹角较大。调节完毕后,拍摄被测物体调制的散斑图样 O 。再拍摄参考平面集 $R(t)$ 。将参考平面移至 0 位置处,抓取第一张参考散斑图像,编号为 0,即为零参考平面,然后由精密控制机构平移测量平台到 1 mm 处,拍摄后再移至 2 mm 处,重复拍摄操作,直到最大测量范围处。实验中抓取的散斑图像尺寸为 $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$,具体计算时,只截取感兴趣的区域进行计算。在整个实验过程中,保持投影机和摄像机参数及相对位置不变。图 3 是矩形凸台调制散斑图,图 4 是鼠标调制散斑图。

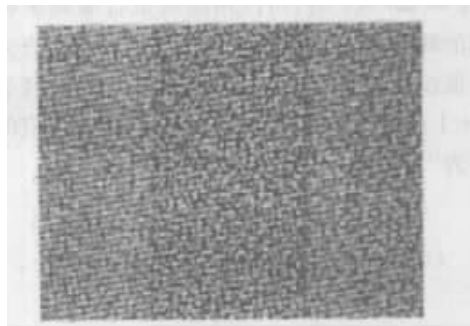


Fig. 3 The speckle image deformed by rectangle boss



Fig. 4 The speckle image deformed by mouse

3 各种因素对测量精度的影响

Sjödahl 指出相关曲线峰值位置的误差可以表

示为^[12]

$$l = \alpha \frac{\sigma^2}{B} \left(\frac{1 - \delta}{\delta} \right)^{1/2}, \quad (4)$$

其中 α 为无量纲常量, σ 为散斑平均尺寸, δ 为相关曲线峰值, B 为匹配模块大小。由此可以看出,由于相关峰值总是小于 1,相关峰值总在测量点的实际值左右波动。当 σ^2/B 很小时,误差小,即在一个子图像中包含更多的散斑结构,使子图像更能相互区别,因而具有更高的精度。从提高精度的角度出发,子图像越大越好,但过大就会因为更多的子图像横跨物体表面剧烈突变前后两个区域,由相关曲线得到的高度值实际上是该区域的平均高度值,这就无法恢复物体表面突变,不利于精确测量。

为了考察这些因素对本实验的影响,作了综合对比实验。测量参数分别为:子图像中心间距 $d = 5 \text{ pixel}$,散斑图像尺寸为 $100 \text{ pixel} \times 100 \text{ pixel}$,计算物点为 100 点,被测物平面分别位于 10.0 mm 处和 10.5 mm 处。实验数据请参见表 1。

分析表 1,可以得出如下结论:

1) 从总体趋势看,随着子图像尺寸 s 增大,误差和方差都有下降的趋势。当 s 较小时,一个子图像中包含的散斑结构不足以使散斑序列之间可靠地区分开,这时深度分辨率很低;随着 s 增大,深度分辨率增加;当 s 太大时,空间分辨率又会下降。因此在实际测量中, s 要取一个适当的值。在本实验中, $s = 7$ 为最佳。

2) 实验中取最大相关值及其附近 $2\omega + 1$ 个相关值作二次曲线拟合。随着 ω 增大,拟合结果方差增大。这说明相关曲线为非标准的二次曲线。在物体突变的地方,相关曲线仅有一个峰值,其形状与二次曲线相差很远。因此 ω 值不能取得太大,本实验中 ω 取 1 就能达到很高的精度。

3) 从总体看,位于 10.0 mm 的物平面比位于 10.5 mm 的物平面具有更高的测量精度,这说明系统对参考平面上的物点比对参考平面之间的物点测量精度高。也可以看到,该方法对位于参考平面上的物点和位于参考平面之间的物点都具有较高的测量精度。

4) 子图像间距 d 对测量精度没有影响,仅根据测量要求选用。当需要快速测量物体的大体轮廓时,选用较大的 d 值;当要获得物体表面细微结构时,选用较小 d 值。当 $d = 1$ 时,空间分辨率与 CCD 的采样率相同。

Table 1. The experiment data focusing on the influence of subimage size s , fitting points w to precision

fitting method		standard plane at 10.0 mm			standard plane at 10.5 mm	
		s	error /mm	variance /mm	error /mm	variance /mm
quadratic curve fitting	$w = 1$	5	0.0011	0.130	-0.016	0.099
		7	0.0076	0.077	-0.012	0.064
		9	-0.0046	0.045	-0.013	0.045
	$w = 2$	5	-0.0031	0.150	-0.019	0.180
		7	0.0031	0.088	-0.012	0.120
		9	-0.0026	0.062	-0.017	0.096
	$w = 3$	5	-0.0052	0.180	-0.027	0.220
		7	0.0031	0.088	-0.026	0.160
		9	-0.0026	0.072	-0.033	0.130

4 直接相关的测量结果

根据以上叙述的原理和计算方法,对一个矩形凸台和一个计算机鼠标进行了测量,采用二次曲线拟合法,结果如图 5 和图 6 所示(2.0 mm/pixel)。从结果看出,物体面形得到了很好的恢复。比较图 3 与图 5 以及图 4 与图 6 可以发现,误差主要来源并非物体表面突变而是阴影。图 5 所示矩形凸台表面虽然发生垂直突变,但在图 3 中没有产生阴影,因而得到了很好的结果,图 4 中存在严重阴影的区域,在图 6 中都导致了比较严重的误差。

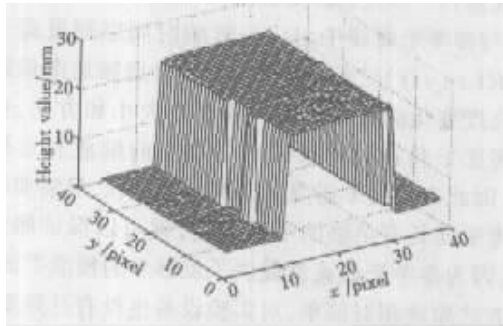


Fig. 5 The measure result of the rectangle boss shape

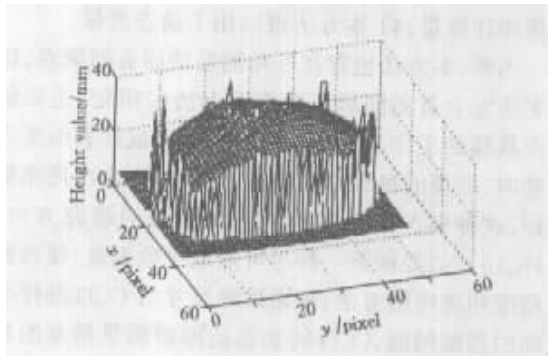


Fig. 6 The measure result of mouse shape

5 以相关值为判据的测量结果

在图 7 中,给出了鼠标测量中小于 0.4 的归一化相关值分布情况,相关值大于 0.4 的点被置为 0。这里的相关值是指每个测量点对应的相关曲线中最大相关值,下同。可以看到,测量结果中存在误差的地方,其相关值大多数小于 0.4。说明物体表面的突变使得这些地方的子图像 $O(x, y)$ 一部分位于突变前,另一部分位于突变后或者位于阴影区。根据本文算法, $O(x, y)$ 不与 $R(x, y, t)$ 中的任一个子图像具有很好的相关性。设定一个相关值为阈值,使小于该阈值的相关值分布与误差分布大致相同。若相关值小于该阈值,认为该相关值不可信,由它确定的高度值也不可信,应该剔除,该点的高度值由插值得到。这里比较两种插值算法:邻域平均法及本文提出的相关值加权邻域平均法。

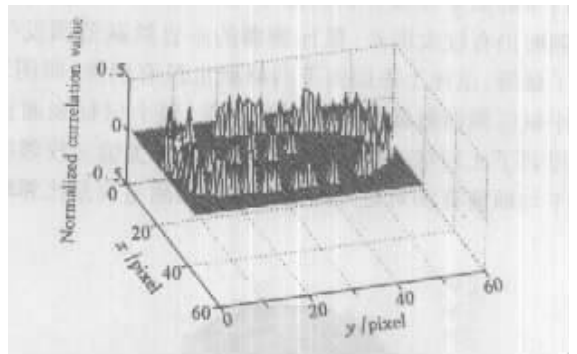


Fig. 7 The distribution of the normalized correlation value that is less than 0.4 when measuring the mouse

设相关值不可信点的坐标为 (x, y) , 在邻域平均算法中该点高度为

$$H(x, y) = \frac{1}{8} \sum_{i=-1}^{i=1} \sum_{j=-1}^{j=1} H(x+i, y+j) \quad (i, j \text{ 不同时为零}) \quad (5)$$

可以认为,相关值越大,其对应的高度值就越可

靠。如果在插值时该点贡献越多,插值结果就更可靠。不可信点不参与插值运算,这不仅保证了插值可靠性,而且避免了误差扩散。设相关值矩阵为 $\alpha(x, y)$, 阈值为 C_{th} , 对于非边界上的点 $H(x, y)$, 其相邻点中满足阈值条件的相关值总和为

$$\sum \alpha(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \alpha(x+i, y+j) \quad [\alpha(x, y) > C_{th}], \quad (6)$$

权因素 $k(i, j)$ 由(7)(8)式得出:

$$k(i, j) = \alpha(x+i, y+j) / \sum \alpha(x, y) \quad (i = -1, 0, 1, j = -1, 0, 1; \alpha(x, y) > C_{th}), \quad (7)$$

$$k(i, j) = 0, [\alpha(x+i, y+j) < C_{th}], \quad (8)$$

则插值点 $H(x, y)$ 的高度为:

$$H(x, y) = \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 H(x+i, y+j) k(i, j). \quad (9)$$

在相关值邻域平均插值算法中,如果 8 点最小邻域中没有两点相关值大于阈值,则考察 24 点邻域。若仍没有两个测量点的相关值大于阈值,则考虑 48 点邻域,若仍没有两个测量点的相关值大于阈值,放弃插值。一般测量中,不会出现这种情况。这既保证了插值过程的准确性,又保证能替换掉不可靠的测量。

用两种插值方法得到的插值结果分别如图 8 和图 9 所示,图 8 与图 9 采用相同的阈值 $C_{th} = 0.8$, 有 17% 的测量点被替换。图 8 中,插值后鼠标数据的侧面仍有较大误差,鼠标侧面的垂直跳跃范围发生了延展,鼠标上表面向下的峰刺也没有消除,而图 9 中鼠标侧面数据得到了明显改善,整个鼠标表面也得到了比较精确的恢复。实验证明相关值加权邻域平均插值算法对处理因阴影引起的测量误差比邻域

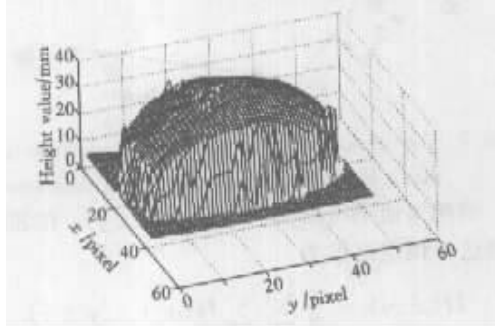


Fig. 8 The interpolation result of Fig. 7 by ordinary adjacent domain average interpolation

平均插值法更为有效。

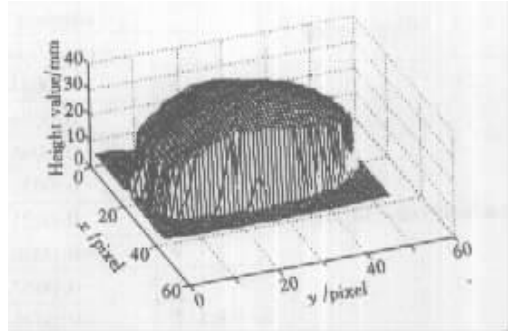


Fig. 9 The interpolation result of Fig. 7 by correlation weight adjacent average domain interpolation

结论 本文阐述了数字散斑时间序列相关三维测量方法的基本原理,给出了实验结果。从实验结果可以看出,文中提出的方法能精确地测量突变物体的三维面形。根据测量结果中误差与相关值分布之间的特征,这里提出的相关值加权邻域平均插值算法,与传统的邻域平均插值算法相比,深度分辨率损失更少,且能显著降低测量误差。

本文提出的三维面形测量方法从原理上避免了复杂的相位展开过程,能测量物体的物理间断乃至孤立表面。与平面相关算法比较,本算法还具有如下优点: 1) 相关运算是在物体调制散斑图像 $\alpha(x, y)$ 与参考平面簇中对应位置的时间序列散斑子图像 $R(x, y; t)$ 之间进行的,不用考虑散斑图像随物体高度变化而在水平面内移动的大小和方向,更不用考虑平移过程中散斑图像发生的缩放和旋转变化。因此本方法不需要复杂的校准过程,只需要保证参考平面具有足够的平移精度,就可以保证测量精度,因为参考平面簇就提供了足够多的校准平面; 2) 本方法原理相对简单,对实验设备也没有过高要求,便能达到较高的测量精度; 3) 本方法显著降低了数据量和计算量; 4) 本方法可以用于动态测量。

当然,本方法也存在三角测量法固有的缺点,比如无法完全避免阴影。要将本方法实用化,还要做许多具体的工作。比如当物体表面比鼠标表面更为复杂时,散斑的微观结构将被严重破坏,会出现离散阴影,这种情况下的精确测量将是新的研究方向。另外,还有必要探索一种尽可能减少数据量、提高测量精度和速度的方法,探索散斑尺寸与 CCD 抽样率之间的搭配问题,CCD 的动态范围对测量精度的影响等问题。

参 考 文 献

- [1] Kaisto I, Kostamovaara J, Manninen M *et al.*. Optical range finder for 1.5~10-m distance. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(20) 3258~3263
- [2] Takasaki H. Moiré topography. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6):1467~1472
- [3] Takeda M, Mutoh K. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24) 3977~3982
- [4] Su X Y, Li J, Guo L R *et al.*. An improved Fourier transform profilometry. *Proc. SPIE*, 1988, **954** 241~244
- [5] Dresel T, Hänslér G, Venzke H. Three-dimensional sensing of rough surfaces by coherence radar. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(7) 919~925
- [6] Takeda M, Yamamoto H. Fourier-transform speckle profilometry: Three-dimensional shape measurements of diffuse objects with large height steps and/ or spatially isolated surfaces. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(34) 7829~7837
- [7] Srinivasan V, Liu H C, Halioua M. Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18) 3105~3108
- [8] Su X Y, Zhou W S, Bally G V *et al.*. Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of the Rochi grating. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6) 561~573
- [9] 任守强, 方 强. 用于动态测量的双通道光学位相测量轮廓术. *光学学报*, 1997, **17**(4) 452~455
- [10] 郝煜栋, 赵 洋, 李达成. 非线形小数重合法及其在轮廓测量中的应用. *光学学报*, 1999, **19**(11):1518~1522
- [11] Su Likun, Su Xianyu, Li Wansong *et al.*. Application of modulation measurement profilometry to objects with surface holes. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(7):1153~1158
- [12] Sjö Dahl M, Synnergren P. Measurement of shape by using projected random patterns and temporal digital speckle photography. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(10):1153~1158
- [13] Sjö Dahl M. Accuracy in electronic speckle photography. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(13) 2302~2310
- [14] Synnergren P, Goldrein H T. Dynamic measurements of internal three - dimensional displacement fields with digital speckle photography and flash X rays . *Appl. Opt.*, 1999, **38**(28) 5956~5961
- [15] Sjö Dahl M. Electronic speckle photography: Increased accuracy by nonintegral pixel shifting. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(28) 6667~6673
- [16] Andersson A, Runnemalm A, Sjö Dahl M. Digital speckle-pattern interferometry: Fringe retrieval for large in-plane deformations with digital speckle photography. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(25) 5408~5412
- [17] Chen D J, Chiang F P, Tan Y S *et al.*. Digital speckle-displacement measurement using a complex spectrum method. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(11):1839~1849
- [18] Fang Qiang, Tan Yushan. Clipped speckle technique used in digital speckle photography. *Proc. SPIE*, 1990, **1230** :181~183
- [19] 芮嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用. *力学学报*, 1994, **26**(5) 599~607

Shape Measurement by Digital Speckle Temporal Sequence Correlation Method

Dai Hongjun Su Xianyu

(*Opto-Electronic Department, Sichuan University, Chengdu 610064*)

(Received 26 April 2000 ; revised 25 October 2000)

Abstract: A new method of three-dimension shape measurement is presented. The random digital speckles are projected on the reference plane, which is moved by equal distance in the direction of depth. Temporal sequence speckle images are acquired with CCD as reference set $R(t)$. Replace the reference plane by object, the speckle image O modulated by the object, is also grasped with CCD. The correlation value between any subimage $O(x, y)$ in O and the corresponding subimages $R(x, y; it)$ in R is approximately quadratic curve distribution. The position of the curve peak, is the height value of the object point. The method goes out of the limit of original horizontal correlation in previous method and is a true temporal sequence correlation method. It is a simple principle and higher measurement precision without complicated phase unwrapping and calibration procession, and can be used to measure the discontinuous and spatial isolation shape. According to the characteristic of error, a new interpolation method based on correlation weight is presented. It has better result than normal interpolation method.

Key words: three-dimension shape measurement; digital speckle; temporal sequence correlation