

基于傅里叶变换轮廓术方法的 复杂物体三维面形测量*

苏显渝 谭松新 向立群 李继陶 羨 涛
(四川联合大学光电科学技术系, 成都 610064)

摘 要 提出一种在数字加权滤波和调制度分析基础上形成可靠性控制模板, 并按可靠度排序进行位相展开的新方法。该法用于傅里叶变换轮廓术中, 可以兼顾所求位相精度和位相展开的可靠度, 适合复杂物体面形的测量。给出了傅里叶变换轮廓术对复杂物体面形测量的应用实例。

关键词 位相展开, 光学三维传感, 傅里叶变换轮廓术。

1 引 言

光学三维传感由于其具有非接触, 精度高, 测量速度快, 自动化程度高等特点而得到广泛应用。傅里叶变换轮廓术(FTP)是结构照明型三维传感领域中运用较为广泛的一种方法^[1-3], 它只需采样一帧条纹, 易于处理动态过程, 频谱面的带通滤波能够抑制噪声及背景光强的不均匀性等因素的影响, 具有很大的灵活性。但是在测量复杂面形时, 与位相测量轮廓术(PMP)^[4-6]相比较, 仍存在一些局限性。

傅里叶变换轮廓术方法最后要通过反正切函数计算位相值, 因而位相被截断在 $(-\pi, \pi)$ 区间上, 呈现出锯齿状不连续分布, 需要进行位相展开, 将截断位相恢复为原来连续的位相分布。尽管已经研究了很多用于位相展开的方法^[7], 但在实际处理过程中, 位相展开仍然是十分困难的问题。它极大的限制着测量精度和测量系统的自动化程度。本文通过采用汉宁滤波窗口, 实现频谱面的数字加权滤波, 给条纹质量好的部分赋予较大的权重因子, 差的部分赋予较小的权重因子, 从而实现条纹质量的分类排列, 然后结合调制度分析技术, 形成可靠性控制模板, 并按可靠度排序的方法进行位相展开。该方法可在不牺牲位相精度的情况下, 保证位相展开的可靠性, 同时还避开了复杂的极点连接工作, 节省了处理时间。实验证明该方法对复杂物体面形测量中的位相展开问题, 有较高的可靠性和实用性。

2 傅里叶变换轮廓术的基本原理

Takeda 等人 1983 年提出了基于光栅投影的三维面形测量方法——傅里叶变换轮廓术。

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1997-05-03; 收到修改稿日期: 1997-09-29

该方法首先通过投影系统将光栅像投影在参考平面上, 在 CCD 摄像系统中得到一条纹分布

$$g_0(x, y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp \{j[2\pi n f_0 x + n\mathcal{Q}(x, y)]\}. \quad (1)$$

式中 x 轴与光栅条纹方向正交, y 轴与光栅条纹方向平行, f_0 代表光栅像的基频, $\mathcal{Q}(x, y)$ 代表初始位相调制。然后将该光栅像投影到所测的漫反射物体表面, 摄像系统得到受物体高度调制的变形条纹分布

$$g(x, y) = r(x, y) \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \exp \{j[2\pi n f_0 x + n\mathcal{Q}(x, y)]\}. \quad (2)$$

式中 $r(x, y)$ 为代表物体表面反射率分布的函数, $\mathcal{Q}(x, y)$ 为由于物体表面高度变化引起的位相调制。傅里叶变换轮廓术方法对方程(2)沿 x 轴方向进行一维傅里叶变换, 得到的频谱中零频反映的是背景光强分布, 基频包含了所要求的位相信息。通过设计合适的带通滤波器, 可以将其中一个基频分量滤出来, 然后对其进行逆傅里叶变换, 得到的分布可以表示为

$$\mathcal{G}(x, y) = A_1 r(x, y) \exp \{j[2\pi f_0 x + \mathcal{Q}(x, y)]\}. \quad (3)$$

定义调制函数为

$$m(x, y) = |\mathcal{G}(x, y)| = A_1 r(x, y). \quad (4)$$

对参考平面的光强分布(1)式进行相同的滤波操作, 得到

$$\mathcal{G}_0(x, y) = A_1 \exp \{j[2\pi f_0 x + \mathcal{Q}_0(x, y)]\}. \quad (5)$$

由投影光路的简单几何关系, $\Delta\mathcal{Q}(x, y) = \mathcal{Q}(x, y) - \mathcal{Q}_0(x, y)$ 对应着物体的高度分布 $h(x, y)$, 因此只需要求出 $\Delta\mathcal{Q}(x, y)$ 即可得到物体的三维表面高度分布。从(3)式和(5)式可得到

$$W[\Delta\mathcal{Q}(x, y)] = \text{Im} \{ \log [\mathcal{G}(x, y) \times \mathcal{G}_0^*(x, y)] \}. \quad (6)$$

$\mathcal{G}_0^*(x, y)$ 表示复共轭。求出的截断位相差 $W[\Delta\mathcal{Q}(x, y)]$ 分布在区间 $(-\pi, \pi)$ 上, 呈锯齿状的不连续分布, 需要进行位相展开, 将 2π 的截断连起来, 得到连续的位相分布 $\Delta\mathcal{Q}(x, y)$ 。

3 数字加权滤波和基于可靠度排序的位相展开新方法

3.1 傅里叶变换轮廓术方法位相展开的困难

位相的自动展开一直是光学三维传感领域研究的热点问题之一, 近年来已有很多位相展开新方法的研究, 但对于复杂的截断位相分布, 位相展开工作仍然存在困难。傅里叶变换轮廓术方法中, 通过(6)式求得的位相值被截断在反三角函数的主值区间 $(-\pi, \pi)$ 上, 需要进行位相展开, 才能得到连续的位相分布。根据采样定理, 在能够正确重建的图像中, 相邻两点间的位相差不能超过 π , 位相展开无非是将所得位相图中相邻两点位相差超过 π 的, 通过加上或减去 2π 的整数倍, 消除截断, 最后得到连续的位相分布。实际处理过程中, 噪声、图像中的阴影、某些部分条纹密度过大引起欠采样, 条纹丢失造成条纹密度过低以及调制度太低等等诸多原因, 都将造成条纹图像中出现不一致的部分。这些部分的存在导致位相展开过程变得极为复杂, 展开会与路径相关, 不同的展开路径可能得到不同的结果, 当展开路径先经过了出现展开错误的区域后, 就会导致后面所有的展开工作都出现错误。

由于频谱面的带通滤波操作能够抑制高频随机噪声和低频背景噪声, 可以使位相分布更平滑, 因此选用小的滤波窗口一定程度上可以减小位相展开的复杂性。但是滤波窗口选择太小之后, 由于滤掉了有用信息, 又会导致图像的细节丢失, 甚至引起图像的畸变, 使得所求

位相不准确。可见位相测量的精度与位相展开的正确性之间存在一个折衷。要求位相测量的精度高,则位相展开越复杂;反之,要减小位相展开的复杂程度,就要抹去一些位相细节。特别是对复杂物体面形的测量,由于物体存在陡峭的起伏,基频分量向高低两个方向扩展很宽,与零频和高频会存在频谱混叠现象,滤波窗口不可能选得太小,否则会滤掉有用的信息,不能准确恢复物体的面形。因此,单纯通过减小滤波窗口平滑物体细节来减小位相展开的复杂程度是不行的,特别是在对测量精度要求较高或物体面形很复杂的情况下。

通过(4)式可以求出受物体高度调制的变形条纹的调制度,根据调制度分析的思想^[6],可以将调制度作为指导位相展开的依据。先对调制度直方图进行分析,确定一个调制度阈值,作为条纹质量的一个判据,调制度高于阈值的部分,认为条纹质量好,信噪比高,可以正确地进行位相展开;调制度低于阈值的部分,条纹质量差,位相展开经过这些地方容易出错,因而用模板覆盖它,展开时绕开这些区域。当对没有被覆盖的区域进行完位相展开工作之后,再使用插值的办法,得到模板覆盖区的近似位相值。这种方法对通过相移得到的截断位相进行展开时,可靠性较高。而对傅里叶变换轮廓术方法,由(4)式所求得得二元调制度模板并不能完全覆盖条纹质量差的区域^[8]。

3.2 数字加权滤波和按调制度排序的位相展开新方法

为克服上面所提到的一些困难,尽量做到在不影响测量精度的情况下,保证位相展开的可靠性,本文提出了一种基于数字加权滤波和按可靠度排序的位相展开新方法。

在变形条纹图中,条纹密度适中的区域对应于所测物体变化平缓的区域,这一部分通常是容易进行位相展开工作的;而条纹密度过高或过低的区域对应于物体变化陡峭的部分,这些地方可能出现采样不足或条纹丢失,位相的不一致区域通常就发生在这些地方,故而这些地方的位相展开会比较困难,易于出错。因此如果能通过合适的滤波窗口,将图像条纹密度信息按大小排列,对位相展开工作是十分有利的。条纹密度适中的区域,在频谱分布上处于基频 f_0 附近;而条纹密度过高和过低的部分,分别对应于基频分量的高频和低频扩展部分。数字加权滤波的思想是:滤波窗口对基频 f_0 赋予较大的权重,对离基频 f_0 越远的部分赋予的

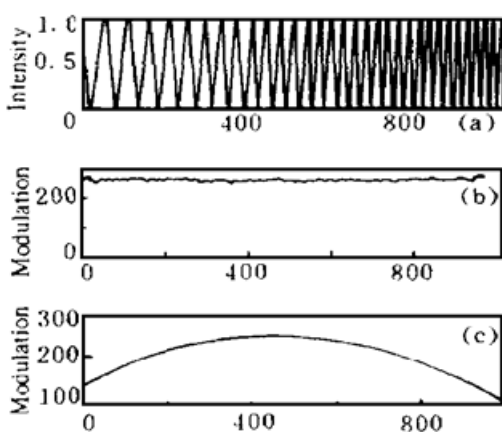


Fig. 1 Illustration of digital weighted filtering. (a) Intensity distribution with linear frequency modulation, (b) Calculated intensity modulation using unweighted filter (rectangular window), (c) Calculated intensity modulation using weighted filter (Hanning window)

权重值越小,从而将条纹密度的信息也引入(4)式定义的调制度函数中。由于汉宁窗的分布形式正好满足加权滤波的要求,因此本文采用了汉宁滤波窗口来实现数字加权滤波。该窗口保证对越靠近基频 f_0 的部分抑制越小,而对离基频越远的高频或低频扩展部分的频谱强度压得越低,其结果是使条纹密度越高和越低的部分,对应的调制度也越低。所得到的调制度中不仅包含了变形条纹本身的强度调制信息,也包含了条纹的密度信息,因此可以将该调制度作为位相展开的可靠度函数 $R(x, y)$,用于控制位相展开的进行。

图1(a)显示的是线性调频的强度分布,中间部分代表条纹密度适中的部分,越往左条纹密度越低,越往右条纹密度越高。采用矩形窗口滤波所得调制度如图1(b)所示,条纹密度信息没有有效分离出来;而采用汉宁窗口进行数字加权滤波,如图1(c)所示,条纹密度越高和越低的部分,对应的调制度越低。可以看出,由于

采用汉宁窗滤波, 对条纹密度适中的部分赋予较大的权重因子, 对条纹密度过大或过小的部分赋予较小的权重因子, 可以实现条纹质量的分类排列。

为保证位相展开的正确性, 可基本按 $R(x, y)$ 从高到低的顺序进行展开, 先展开可靠性高的点, 再展开可靠性低的点, 从而避免展开错误在整个位相图中传播开。该展开算法需要一个队列 Q 存放依次排列的未展开点的 $R(x, y)$ 值; 还需要一个二进制模板 M 用于标记已展开点, 该模板的值预先设为 0, 表示位相尚未展开, 每展开一个点, 将它在模板上的值置为 1。具体算法如下

1) 首先对所有的 $R(x, y)$ 进行排序, 从中找出一个 $R(x, y)$ 的最大值, 将这一点作为位置展开的起始点, 在二进制模板 M 上将该点标记为已展开(值为 1), 然后将与该起始点相邻的 4 个点送入队列 Q , 并按照其对应 $R(x, y)$ 的值从大到小的顺序排列。

2) 从队列 Q 中取出 $R(x, y)$ 的最大值点与起始点进行位相展开。当该点与起始点位相之差大于 π 时, 该点位相值减去 2π , 位相之差小于 $-\pi$ 时加上 2π , 直到二者位相差的绝对值小于 π 。将该点在模板 M 上标记为已展开。然后再将与该点相邻的未展开点(模板值为 0)送入队列 Q , 并对 Q 中所有点按 $R(x, y)$ 重新排序。

3) 每次总是从队列 Q 中取出最大值点, 以与它相邻的一个已展开点作为基准, 进行位相展开后, 将该点在模板 M 上标记为 1。然后在与该点相邻的 4 个点中, 找出所有未展开点, 将它们送入队列 Q 并对 Q 重新排序。

4) 当队列 Q 为空时, 表示所有点已经展开, 结束该算法。

通过采用汉宁窗作为数字加权滤波窗口, 使得对于离基频越远的高频和低频的频谱强度压得越利害, 从而抑制了条纹密度过大和过小部分的调制度的值。这种数字加权滤波的结果是: 条纹密度适中的那些部分, $R(x, y)$ 的值较大; 条纹密度越高和越低的部分, $R(x, y)$ 值越小。同时按可靠度排序进行位相展开的结果是保证了展开总是先经过那些条纹质量好, 可靠性高的区域, 最后经过那些可靠性差的区域, 将错误限制在一定的范围之内, 不让它传播到可以正确展开的区域中去。

4 实验结果

实验是对一个塑料面具进行面形测量, 实验装置图如图 2 所示。实验中采用 MDC(TM-560 型) CCD 摄像机对图像进行采样, 并通过 PCPLUS 图像板将其量化为 512×512 个像素点。变形条纹图如图 3 所示, 图中投影光场的阴影部分为物体的眼洞。可以看出, 眼洞部分没有条纹信息(即位相信息), 条纹强度在这里发生了锐截止, 因而会引入振荡误差^[9], 本文采用了 Gerchberg 迭代法^[10]在无条纹部分通过迭代人为的生成条纹, 同时又不改变原来的条纹分布。图 4 所示为迭代 20 次后得到的外插的条纹分布, 图中可以看出, 新条纹的对比度比

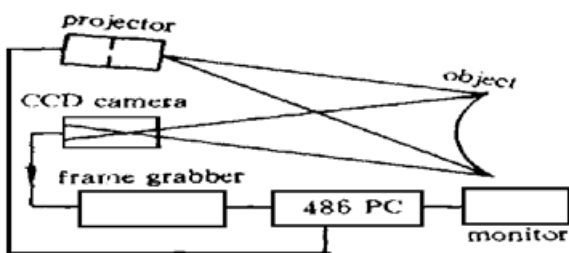


Fig. 2 Experiment setup

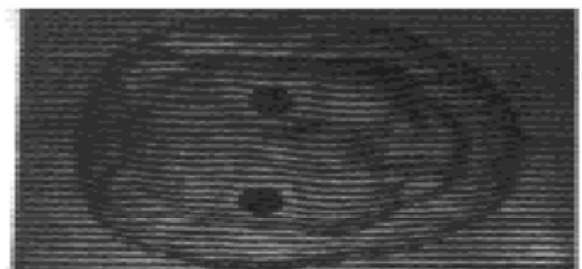


Fig. 3 Deformed fringes of projected grating with object

原来的要低。采用 Gerchberg 迭代法有两个好处，首先它减小了由于强度跳变引起的高频振荡误差，提高了所求位相精度；其次还消除了由于条纹断裂产生的极点，从而可以降低位相展开的难度。然后作者通过在 2×2 的像素区域上沿逆时针方向求截断位相差之和^[11]，得到位相图中的极点分布如图 5 所示，眼洞附近的断裂条纹由于被 Gerchberg 迭代连接起来，消除了由于条纹断裂引起的极点，从而减少了正负极点的数目。对新条纹分布沿 x 方向进行一

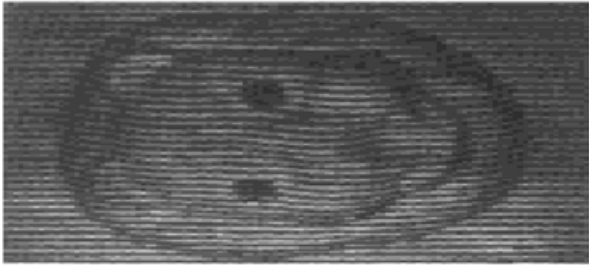


Fig. 4 Fringes after Gerchberg iteration

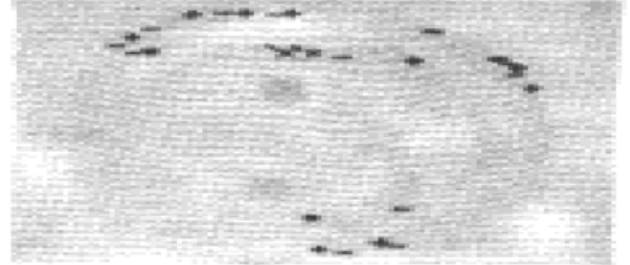


Fig. 5 Poles in the wrapped phase map. '+' represent positive poles and '-' represent negative poles

维的傅里叶变换，采用汉宁数字加权滤波窗口，得到一个位相展开可靠度函数分布，将其值归化为 0 到 255，用灰度表示如图 6 所示。以该可靠度函数为标准并按可靠度排序方法进行位相展开，得到展开的位相分布如图 7 所示，位相被正确展开了。由于采用了数字加权滤波和按可靠度排序的方法进行位相展开，基本保证了截断位相图中的不一致区域有低的可靠度，从而避免了错误的传播。采用这种方法后，复杂的正负极点连接过程变得不再必要。

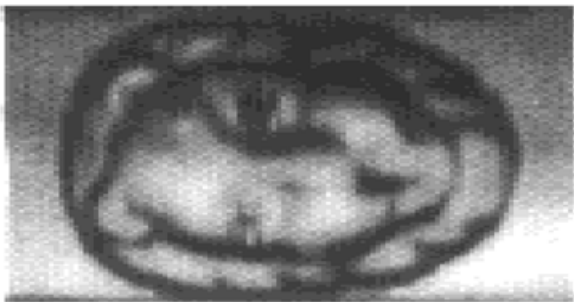


Fig. 6 Reliability function for phase unwrapping

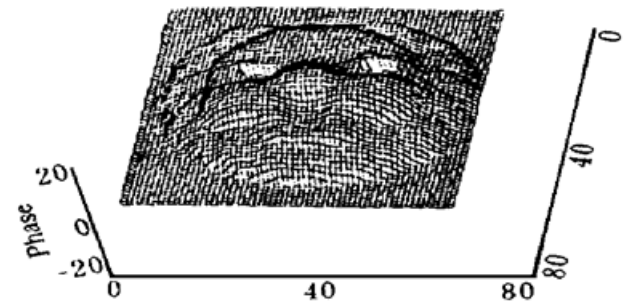


Fig. 7 Unwrapped phase using our proposed technique

如果不采用可靠度排序的方法，对截断位相直接按洪水泛滥法^[7]进行位相展开，从图 8 可以看出，由于条纹的不一致区域没有剔除，位相展开出现很大的错误。本文按原调制度分析的思想^[6]，试图用二元模板覆盖条纹的不一致区域，结果发现它不能有效覆盖条纹的不一致区域。从图 9 中可以看出，采用这种方法，由于一些点状不一致区没有被覆盖，展开位相

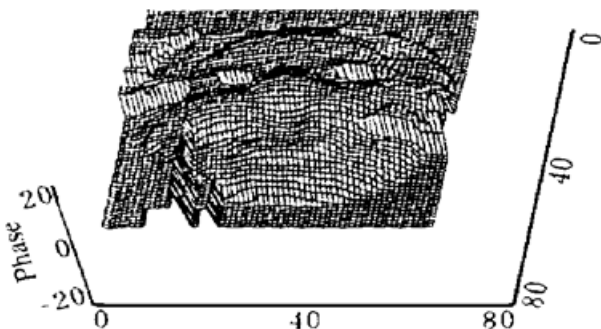


Fig. 8 Unwrapped phase using flood-fill unwrapping method

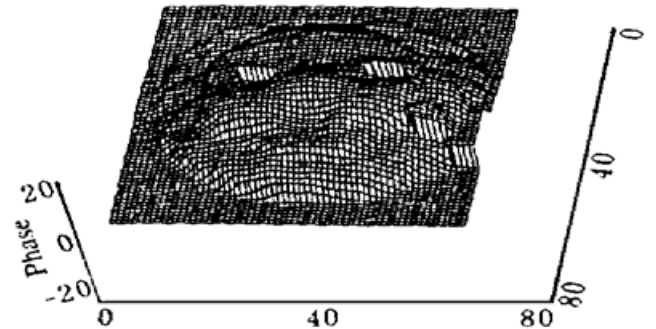


Fig. 9 Unwrapped phase after using binary mask to cover fringe inconsistencies

也有很大误差。为了更多地覆盖条纹不一致区, 可以选取更大的阈值, 但这样也会更多地覆盖那些条纹质量好的部分, 从而丢失这些部分的真实位相信息。

结 论 正如 Judge 等人的文章^[8] 指出的那样, 在傅里叶变换轮廓术方法中单纯使用调制度函数得到二元模板用于指导位相展开是不可靠的, 本文实验也表明, 由于可能存在的条纹不一致区域特别是一些点状不一致区没有被有效剔除, 不能保证位相被正确地展开。而采用了数字加权滤波结合按可靠度排序进行位相展开的新方法之后, 完成了关于条纹质量的分类排列, 条纹质量的更多信息被引入了位相展开的过程中, 从而保证了位相展开的正确性。这种方法另外的好处在于不必使用插值法, 所有点的位相值均是直接求得, 同时兼顾了位相的精度和位相展开的可靠性。结合 Gerchberg 迭代法之后, 位相展开过程可以省去原来繁复的极点连接工作, 并使得单纯采用二元控制模板无法正确展开的位相场得以正确地展开。同时该方法还有算法简单, 耗时少等优点, 特别适合于复杂物体的面形测量。本方法也可应用于干涉计量以及光弹力学分析等领域。

参 考 文 献

- [1] M. Takeda, K. Mutoh, Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24) : 3977~ 3982
- [2] J. Li, X. -Y. Su, L. -R. Guo, An improved Fourier transform profilometry for automatic measurement of 3-D object shapes. *Opt. Engng.*, 1990, **29**(24) : 1439~ 1444
- [3] J. -F. Lin, X. -Y. Su, Two-dimensional Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional object shapes. *Opt. Engng.*, 1995, **34**(11) : 3297~ 3302
- [4] V. Srinivasan, H. C. Liu, M. Halioua, Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(18) : 3105~ 3108
- [5] X. -Y. Su, W. -S. Zhou, G. Von Bally *et al.*, Automated phase-measuring profilometry using defocused projection of a Ronchi grating. *Opt. Commun.*, 1992, **94**(6) : 561~ 573
- [6] X. -Y. Su, G. Von Bally, D. Vukicevic, Phase-stepping grating profilometry: utilization of intensity modulation analysis in complex objects evaluation. *Opt. Commun.*, 1993, **98**(1/2/3) : 141~ 150
- [7] T. R. Judge, P. J. Bryanston-Cross, A review of phase unwrapping techniques in fringe analysis. *Opt. & Laser in Engng.*, 1994, **21**(4) : 199~ 239
- [8] T. R. Hudge, C. Quan, P. J. Bryanston-Cross, Holographic deformation measurements by Fourier transform technique with automatic phase unwrapping. *Opt. Engng.*, 1992, **31**(3) : 533~ 543
- [9] E. O. 布赖姆, 快速傅里叶变换. 上海, 上海科学技术出版社, 1979. 155
- [10] R. W. Gerchberg, W. O. Saxton, A practical algorithm for the determination of phase from images and diffraction plane pictures. *Optik*, 1972, **35**(2) : 237~ 246
- [11] 谭松新, 苏显渝, 细胞自动机位相展开算法用于三维传感. *光学学报*, 1997, **17**(1) : 112~ 116

Complex Object Shape Measurement Using FTP Method

Su Xianyu Tan Songxin Xiang Niquan Li Jitao Xian Tao

(*Optoelectronics Department, Sichuan Union University, Chengdu 610064*)

(Received 3 May 1997; revised 29 September 1997)

Abstract A new phase unwrapping technique in Fourier transform profilometry (FTP) is proposed. The technique is based on digital weighted filter and modulation analysis to form reliability mask. Phase unwrapping is then fulfilled in order of reliability function. This technique considers both accuracy and reliability. Experimental result of complex object shape measurement is given.

Key words phase unwrapping, optical 3-D sensing, Fourier transform profilometry.