

文章编号: 0253-2239(2008)02-0259-09

一种新的快速解相位方法

盖绍彦 达飞鹏

(东南大学自动化研究所, 复杂工程系统测量与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要 提出了一种快速可靠的 4 步相移编码-解相位算法。通过对中心条纹的光强进行摄动, 将编码信息加入到基本相移光栅中, 使 4 幅基本相移图不但包含了相位场主值信息, 还包含了解相位所需的编码信息。建立了摄动度函数描述相移图的摄动信息进而得到编码信息, 解出完整的相位值。对摄动度函数的误差和噪声进行分析, 提出方向滤波方法来消除噪声, 极大地减少了编码信息的误判情况。仿真和实验证实了本算法的可行性。与传统相移法相比, 解相位的速度和可靠性得到明显的提高。

关键词 光学测量; 解相位; 摄动; 方向滤波

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

A New Fast Phase Unwrapping Method

Gai Shaoyan Da Feipeng

(Key Laboratory of Measurement and Control for Complex System of Ministry of Education,
Research Institute of Automation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract A new fast and robust phase-codeing-unwrapping algorithm is proposed. By alternating the center area of fringes, the code information is added to the phase-shifting fringes, which include not only the primary phase information but also the code information for phase unwrapping. An alteration function is constructed to catch the code information and then give the unwrapped phase. The error and noise of the alteration function is discussed, then a new filter method called directional filtering is proposed to remove the noise, and the mistakes of phase unwrapping are depressed by this method. The simulation and experimental results show the feasibility of the new algorithm. The speed and dependability of the new algorithm are much better than those of the traditional method.

Key words optical measurement; phase unwrapping; alteration; directional filtering

1 引 言

光学式三维物体轮廓测量技术通过分析图像, 得到被测物体表面形状的三维信息, 在 CAD/CAM、机器人视觉、质量控制、逆向工程以及医疗诊断等诸多领域有着广阔的应用前景^[1~3]。基于光栅投影的相位法轮廓测量技术对物体的表面反射率的变化不敏感, 具有较高的测量精度, 易实现自动测量。在测量过程中, 精确地获取条纹图的相位是相位法的关键问题之一^[1]。相位法中获得相位的过程分为两步, 第一步是通过相移法^[4,5]获得条纹图锯齿形的相位场主值, 值域位于 $(0, 2\pi)$ 区间。第二步

是将主值相位场恢复为全场完整的相位场, 称为解相位或解包裹。解相位主要有空域和时域两种方法。前者仅通过由移相法得到的相位主值图, 根据主值图的连续性、 2π 跳跃等特性进行解包, 如枝切法^[6]、基于统计滤波的解包法^[7]等。这类方法仅依赖于相位主值图而不需别的附加信息, 所以对光栅投影设备没有过多的要求, 只需要投影出基本相移光栅即可, 但是由于没有额外的相位信息, 在对表面形状较复杂的物体进行测量时, 常出现“拉线”、“丢包”等问题。而时域解相位法^[8], 如灰阶码法^[9]、时间相位重建(H-S)法^[10,11]、复合编码法^[12]、双频投

收稿日期: 2007-03-27; 收到修改稿日期: 2007-09-24

基金项目: 国家自然科学基金(60775025)、新世纪优秀人才支持计划和江苏省自然科学基金(BK2007116)资助课题。

作者简介: 盖绍彦(1979-), 山东人, 博士研究生, 主要从事研究方向为三维重构、图像处理等方面的研究。

E-mail: qxxymm@163.com

导师简介: 达飞鹏(1968-), 江苏人, 教授, 博士生导师, 主要从事三维重构、智能控制、计算可视化等方面的研究。

E-mail: dafp@seu.deu.cn

影相位解包法^[13]等,其基本思想是按时间序列,投影足够多的不同频率的条纹图,这样就有了充足的编码信息,来确定整个相位场中各像素所处的条纹级次,解出全场的相位。这类方法的适用性广泛,对复杂表面的解相位效果较好,但是需要在基本相移光栅条纹之外,投影更多的条纹图,增加了投影光栅的数量,对设备的要求较高,测量的速度也相应受到影响。因此,如何能够既快速的解相位又有足够的编码信息,以提供可靠的解相位结果,是提高相位法测量系统性能的关键问题之一^[14]。

本文提出了一种新的编码-解相位方法,即在相移法的基本相移光栅中直接加入附加的相位编码信息,不需要辅助的光栅条纹,只用4幅基本相移图就可以得到相位场主值,又可以获得相关的编码信息,进行解相位工作。新方法通过对相移光栅的中心条纹进行摄动,使位于中心条纹的点包含有不同于其他点的编码信息。在测量时,建立摄动度函数编码信息,最终得到完整的相位值。与传统相移法相比,在不增加投影光栅数量的基础上,中心条纹摄动的加入,使解相位的速度和可靠性有明显提高。

2 相移法

在投影光栅法中,通过给待求相位场加上已知或未知的常相位,可以得到新的条纹图,增加求解条件。这种通过对条纹图相位场进行移相来增加若干常量相位而得到多幅条纹图以求解相位场的方法,称为相移法^[3]。由于多幅相移图比单幅图提供了更多的信息,相移法可提供比其他方法更高精度的结果,具有很好的实用性。

本文采用带 90° 相移的4步相移法,是最常用的相移法之一,精度高,实现较方便,采集4幅带有 $\pi/2$ 相移的光栅图像,4幅图的相移分别是 $\alpha_1=0, \alpha_2=\pi/2, \alpha_3=\pi, \alpha_4=3\pi/2$,其灰度值可分别为

$$I_1(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y)], \quad (1)$$

$$I_2(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + \pi/2], \quad (2)$$

$$I_3(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + \pi], \quad (3)$$

$$I_4(x, y) = I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + 3\pi/2], \quad (4)$$

式中 $I_i(x, y)$ 为第 i 幅图的灰度值, $I'(x, y)$ 为条纹光强的背景值, $I''(x, y)$ 为调制强度, $\theta(x, y)$ 为待求相位场。由(1)式~(4)式得

$$\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} = \frac{\sin \theta(x, y)}{\sin[\theta(x, y) + \pi/2]} = \tan \theta(x, y), \quad (5)$$

对(5)式取反正切函数,可得相位主值

$$\varphi(x, y) = \arctan \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right]. \quad (6)$$

(6)式是4步相移法的基本公式。由(6)式解出的 $\varphi(x, y)$ 的值域位于 $(0, 2\pi)$ 区间[有的文献中解到 $(-\pi, \pi)$ 区间,本文为计算方便,统一解到 $(0, 2\pi)$ 区间,由三角函数的周期性,两者并无本质的区别]。考虑到三角函数的周期为 2π ,完整的相位值 $\theta(x, y)$ 应为

$$\theta(x, y) = \varphi(x, y) + 2k(x, y)\pi, \quad (7)$$

(7)式中 $k(x, y)$ 为整数,表示 (x, y) 点对应的 2π 整数倍,也就是 (x, y) 点所处的光栅条纹的周期次数。

在由相移法得到相位主值 $\varphi(x, y)$ 后,由主值求取相位值 $\theta(x, y)$ 的过程,就是解相位,又叫相位展开、相位解包裹,其中关键就是得到 $k(x, y)$ 。

3 解相位

在实际应用中,利用辅助条纹图实现相位展开的时域解相位方法被广泛应用,如灰阶码法^[7]等。其原理是在用于相移的4幅光栅条纹之外,再投影若干幅不同周期的辅助条纹,利用辅助条纹图的编码信息,得到相位图上各点的 $k(x, y)$ 值。图1为灰阶码法的一个例子,辅助光栅是一系列不同周期、按一定规则分布的黑白相间的条纹,利用4幅辅助光栅图像的编码信息来确定相移条纹图上各点所在条纹的周期次数,以解出相位值。

用这种方法解得的相位,准确、方便、算法简洁,

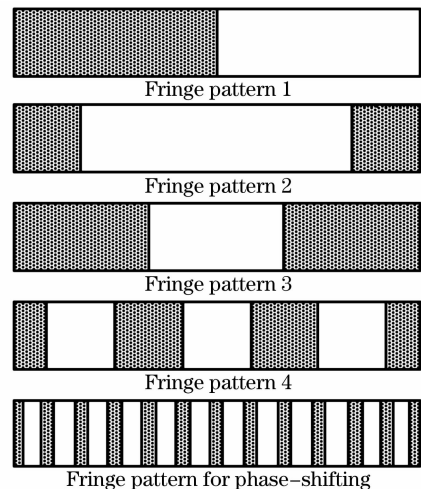


图1 灰阶码示意图

Fig. 1 Sketch map of gray coding

但是需要另外增加若干幅辅助光栅条纹,这样测量时的速度较慢,提高了对光栅设备的要求,增加了系统的硬件成本和时间成本。

针对这种情况,本文提出改变相移光栅的中心条纹的亮度来解出 $k(x, y)$,在不增加辅助光栅的情况下,快速地确定相位图上的相位值。

4 中心摄动移相法

中心摄动法的基本思想是在投影光栅时,在最后一幅移相光栅中,将位于中心的条纹亮度进行摄

动,其余都不变。解相位时,利用这种相位场的异常特征,可以确定出中心条纹的位置,进而求解出全场的 $k(x, y)$ 值,解出相位值 $\theta(x, y)$ 。这种加在中心条纹上的摄动,就是解相位所需的编码信息。

4.1 中心条纹摄动

设位于移相光栅中心的条纹为第 Q 条条纹,也就是说位于此条纹上的点,其 $k(x, y) = Q$,对应的相位场 $\theta(x, y)$ 位于 $[(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi]$ 。为方便起见,称这条摄动的条纹为 Q 条纹。调整投影装置,使第 4 幅移相图中的 I_4 变为

$$\tilde{T}_4(x, y) = \begin{cases} I'(x, y) + \lambda I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + 3\pi/2] & \forall \theta(x, y) \in [(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi], \\ I'(x, y) + I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + 3\pi/2] & \forall \theta(x, y) \notin [(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi], \end{cases} \quad (8)$$

式中 λ 为摄动参量,是描述摄动程度的常量,取值范围在 $(0, 1)$ 之间。新的移相光栅灰度 \tilde{T}_4 与原光栅灰度 I_4 仅在 Q 条纹部分不同。如图 2 所示,图中虚线为 \tilde{T}_4 摄动的部分。图 2 中各图的横轴均代表 $\theta(x, y)$,光栅参量设为 $I'(x, y) = 1, I''(x, y) = 1$ 。

应用新的移相光栅灰度 I_1, I_2, I_3 和 \tilde{T}_4 ,由(1)式~(3)式和(8)式,得新的相位主值公式为

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \arctan \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right] & \forall \theta(x, y) \notin [(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi], \\ \arctan \frac{2[I_4(x, y) - I_2(x, y)]}{(\lambda + 1)[I_1(x, y) - I_3(x, y)]} & \forall \theta(x, y) \in [(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi], \end{cases} \quad (9)$$

(9)式与(6)式相比较可以发现,(6)式仅利用 4 幅相移图即可得到相位主值 $\varphi(x, y)$,而(9)式的求解需要有关解相位后的 $\theta(x, y)$ 有关信息。

4.2 Q 条纹解相

为了解出包含在 4 幅相移图中的编码信息,建立了摄动度函数 $\beta(x, y)$ 来描述相位场中各点的摄动情况,并通过 $\beta(x, y)$ 的进一步处理来判断点是否位于摄动区域。

摄动度函数是根据摄动相移图灰度 \tilde{T}_4 的表达式,即(8)式,可以看出其上、下两部分仅是 $I''(x, y)$ 前面的系数不同,可以将(8)式写为

$$\tilde{T}_4(x, y) = I'(x, y) + \beta(x, y) I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + 3\pi/2], \quad (10)$$

式中

$$\beta(x, y) = \begin{cases} \lambda & \forall \theta(x, y) \in [(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi], \\ 1 & \forall \theta(x, y) \notin [(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi], \end{cases} \quad (11)$$

从(11)式可以看出,摄动度函数的物理意义其实就是对摄动部分、非摄动部分进行区分, $\beta(x, y) = \lambda$, 表示 (x, y) 属于摄动部分,而 $\beta(x, y) = 1$, 表示 (x, y) 不属于摄动部分。

由 I_1, I_2, I_3 和 \tilde{T}_4 的表达式,可得 $\beta(x, y)$ 的求解公式,

$$\beta(x, y) = \frac{-I_1(x, y)/2 - I_3(x, y)/2 + \tilde{T}_4(x, y)}{I_1(x, y)/2 - I_2(x, y) + I_3(x, y)/2}, \quad (12)$$

根据(12)式,可以由条纹图像求出 $\beta(x, y)$,进而可以判断 (x, y) 点是否位于摄动区域,即 Q 条纹上。

因为 $\theta(x, y) = \varphi(x, y) + 2k(x, y)\pi, \varphi(x, y) \in (-\pi, \pi)$,得

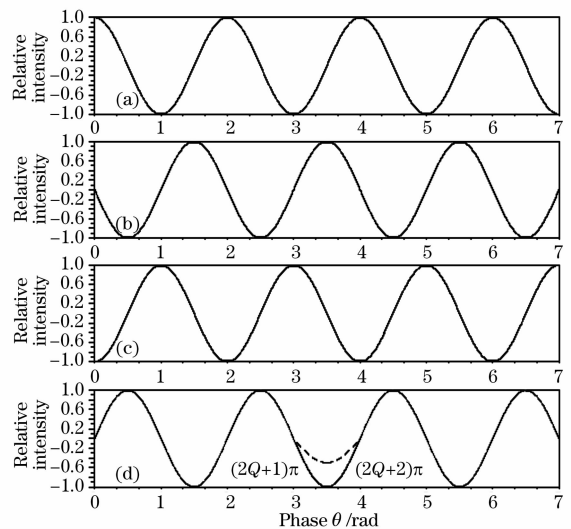


图 2 摄动相位图

Fig. 2 The perturbation phase map

$$\theta(x, y) \in [(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi] \Rightarrow k(x, y) = Q, \quad (13)$$

由(11)式、(13)式,可以得到判别法则:

$$\beta(x, y) = \lambda \Rightarrow k(x, y) = Q, \quad (14)$$

即 Q 条纹解相的基本法则。在解相时,先由 4 幅相移图,代入(12)式得到 $\beta(x, y)$,然后由(14)式,若 $\beta(x, y) = \lambda$,则此点位于中心条纹摄动的区域, $k(x, y) = Q$ 。这样完成了摄动法解相的第一步,即通过摄动度函数 $\beta(x, y)$ 解出了 Q 条纹处点的 $k(x, y)$ 值。

另外,(11)式也给出了求解相位主值 $\varphi(x, y)$,即(9)式所需的相关信息。由(9),(11)式,可得

$$\varphi(x, y) = \begin{cases} \arctan \left[\frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \right], \\ \beta(x, y) = \lambda \\ \arctan \left\{ \frac{2[I_2(x, y) - I_4(x, y)]}{(\lambda + 1)[I_1(x, y) - I_3(x, y)]} \right\}, \\ \beta(x, y) = 1 \end{cases}, \quad (15)$$

(15)式即调整后的移相法公式,可以由 4 幅相移图直接得到相位主值 $\varphi(x, y)$ 。

4.3 其他条纹解相

由相位主值 $\varphi(x, y)$ 的分布可以看出,在条纹周期数 $k(x, y)$ 跳变的地方,即 $k(x, y)$ 增加 1 的地方, $\varphi(x, y)$ 会由 π 跳变到 $-\pi$,即相位主值有 2π 的跳跃。由此,解出位于 Q 条纹上点的 $k(x, y)$ 值之后,逐行遍历条纹图,进而解出其他区域点的相位值。

假设 (x_0, y_0) 点的 $k(x_0, y_0) = Q$,

令

$$\Delta\varphi(x_0 - 1, y_0) = \varphi(x_0 - 1, y_0) - \varphi(x_0, y_0),$$

则

$$k(x_0 - 1, y_0) = \begin{cases} k(x_0, y_0) - 1, \\ \Delta\varphi(x_0 - 1, y_0) > \pi \\ k(x_0, y_0), \\ \Delta\varphi(x_0 - 1, y_0) < \pi \end{cases} \quad (16)$$

由(16)式可以得到 $k(x_0 - 1, y_0)$ 的值,依此向左逐点地解相位,可以解出 (x_0, y_0) 左侧的点的相位。对于 (x_0, y_0) 右侧的点,令

$$\Delta\varphi(x_0 + 1, y_0) = \varphi(x_0, y_0) - \varphi(x_0 + 1, y_0),$$

则

$$k(x_0 + 1, y_0) = \begin{cases} k(x_0, y_0) + 1, \\ \Delta\varphi(x_0 + 1, y_0) > \pi \\ k(x_0, y_0), \\ \Delta\varphi(x_0 + 1, y_0) < \pi \end{cases} \quad (17)$$

按(17)式向右逐点地解相位,可以解出 (x_0, y_0) 右侧的点的相位。

按上面的方法逐行解相位,即可获得全场的相位值。

5 误判分析与仿真

从分析可以看出,本法的关键在于通过摄动度 β 对中心条纹进行判别。在实际系统中,由于噪声的存在,由(12)式求出的 β 不可能精确等于 1 或者 λ ,这就需要通过误判处理将 β 值确定为 1 或 λ 。

由 $\beta(x, y)$ 的定义,即(12)式可得

$$\frac{d\beta(x, y)}{d\tilde{T}_4(x, y)} = \frac{1}{I_1(x, y)/2 - I_2(x, y) + I_3(x, y)/2} = \frac{1}{I''(x, y) \sin \theta(x, y)}, \quad (18)$$

而 \tilde{T}_4 的表达式,即(8)式可以写作

$$\tilde{T}_4(x, y) = I'(x, y) + \bar{\lambda}(x, y) I''(x, y) \cos[\theta(x, y) + 3\pi/2], \quad (19)$$

$$\text{式中 } \bar{\lambda}(x, y) = \begin{cases} \lambda & \forall \theta(x, y) \in [(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi], \\ 1 & \forall \theta(x, y) \notin [(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi]. \end{cases}$$

由(19)式,可得 \tilde{T}_4 的全微分为

$$d\tilde{T}_4(x, y) = dI'(x, y) + \bar{\lambda}(x, y) I''(x, y) \cos \theta(x, y) d\theta(x, y) + \bar{\lambda}(x, y) \sin \theta(x, y) dI''(x, y) + I''(x, y) \sin \theta(x, y) d\bar{\lambda}(x, y), \quad (20)$$

将(20)式代入(18)式得

$$d\beta(x, y) = \frac{1}{I''(x, y) \sin \theta(x, y)} d\tilde{T}_4(x, y) = \frac{1}{I''(x, y)} \arcsin \theta(x, y) dI'(x, y) + \bar{\lambda}(x, y) \arctan \theta(x, y) d\theta(x, y) + \frac{\bar{\lambda}(x, y)}{I''(x, y)} dI''(x, y) + d\bar{\lambda}(x, y), \quad (21)$$

(21)式中, $I'(x,y), I''(x,y), \theta(x,y)$ 一般情况下是随 (x,y) 平缓变化的, 所以 $dI'(x,y), d\theta(x,y)$ 以及 $dI''(x,y)$ 本身不会导致较大的误差, 但 $dI'(x,y)$ 和 $d\theta(x,y)$ 的系数 $\arcsin \theta(x,y)$ 和 $\arctan \theta(x,y)$ 在 $\theta(x,y) = k\pi$ 处趋于无穷大 ($k = 1, 2, 3, \dots$), 这将导致 $\beta(x,y)$ 的跳变。对于 $d\bar{\lambda}(x,y)$, 由(19)式, 得

$$d\bar{\lambda}(x,y) = (\lambda - 1)\delta(x_0, y_0)dx + (1 - \lambda)\delta(x_1, y_1)dy, \quad (22)$$

式中 $\delta(x,y)$ 为冲激函数, (x_0, y_0) 和 (x_1, y_1) 分别位于 $\theta(x_0, y_0) = (2Q+1)\pi, \theta(x_1, y_1) = (2Q+2)\pi$ 处, 在这两个位置 $\delta(x,y)$ 趋于无穷大, 导致 $\beta(x,y)$ 的跳变。

综合(21)式、(22)式, 由(12)式求出的 $\beta(x,y)$, 在 $\theta(x,y) = k\pi, k = 1, 2, 3 \dots$ 处容易产生跳变, 导致较大的误差。

对此, 本文进行了仿真实验。令移相光栅灰度 I_1, I_2, I_3 和 \tilde{T}_4 的参量 $I'(x,y) = 1, I''(x,y) = 1, \tilde{T}_4$ 的摄动参量 $\lambda = 0.5, Q = 1$, 即摄动部分位于 $\theta(x,y)$ 的区间 $[3\pi, 4\pi]$ 。仿真中采样频率定为 $100/\pi$, 即 $\theta(x,y)$ 的每个长度为 π 的区间内取 100 点。将原始信号 I_1, I_2, I_3 和 \tilde{T}_4 分别加入均值为 0,

标准差为 0.05 的高斯噪声, 代入(12)式求出 $\beta(x,y)$ 。得到的 \tilde{T}_4 和 $\beta(x,y)$ 分别如图 3 中(a)、图 3(b)所示, 可以看出在 $k\pi$ 处 $\beta(x,y)$ 有较大的扰动。对此, 作了限幅和滤波处理。

理想的 $\beta(x,y) \in \{\lambda, 1\}, \lambda > 0$ 。故设定一个上限 λ_1 和一个下限 λ_2 , 当 $\beta > \lambda_1$ 时, 令 $\beta = \lambda_1$, 当 $\beta < \lambda_2$ 时, 令 $\beta = \lambda_2$ 。实际应用中取 $\lambda_1 = 2.0, \lambda_2 = -0.5$ 。图 3 中(c)为限幅处理后的 $\beta(x,y)$ 。

从图 3(b)、图 3(c)可以看出, $\beta(x,y)$ 在 $k\pi$ 处有较大的扰动, 需要做进一步的滤波处理。理想的 $\beta(x,y)$ 在 $(2Q+1)\pi$ 和 $(2Q+2)\pi$ 处存在阶跃, 所以一般的均值滤波或中值滤波均会在这两个阶跃附近产生较大的平滑作用, 结果不够理想。故此, 提出了方向滤波的方法。

因为 $\beta(x,y)$ 摄动的部分位于 $[(2Q+1)\pi, (2Q+2)\pi]$, 而 Q 为整数, 所以对于点 (x,y) ,

1) 若 $\theta(x,y) \in (k\pi, k\pi + \pi/2), k$ 为整数, 则进行向右滤波, 即选取 (x,y) 右邻域的 w_0 个 β 值位于 (λ_1, λ_2) 区间内的点进行均值滤波或中值滤波, w_0 为滤波窗口大小。

2) 若 $\theta(x,y) \in [k\pi + \pi/2, (k+1)\pi], k$ 为整数, 则进行向左滤波, 即选取 (x,y) 左邻域的 w_0 个 β 值位于 (λ_1, λ_2) 区间内的点进行均值滤波或中值滤波。

按照 1)、2) 的法则进行方向滤波, 可以避免阶跃处 $(2Q+1)\pi$ 和 $(2Q+2)\pi$ 落在滤波窗口内, 同时, 对于其他位于 $k\pi$ 附近的点, 由于只取一个方向的窗口进行滤波, 也减少了扰动信号。滤波的方向如图 3(c)下方所示。

那么, 在进行方向滤波时, 如何判断点 (x,y) 位于 1) 的区域还是 2) 的区域呢? 由(23)式可得, 无论 (x,y) 位于摄动区间还是非摄动区间, 均有

$$[I_4(x,y) - I_2(x,y)][I_1(x,y) - I_3(x,y)] > 0 \Leftrightarrow \varphi(x,y) \in (0, \pi/2) \Leftrightarrow \tan \varphi(x,y) > 0 \Leftrightarrow \theta(x,y) \in (k\pi, k\pi + \pi/2), \quad (23)$$

$$[I_4(x,y) - I_2(x,y)][I_1(x,y) - I_3(x,y)] \leq 0 \Leftrightarrow \varphi(x,y) \in [-\pi/2, 0] \Leftrightarrow \tan \varphi(x,y) \leq 0 \Leftrightarrow \theta(x,y) \in [k\pi + \pi/2, (k+1)\pi], \quad (24)$$

将(23)式、(24)式和 1)、2) 结合起来, 构成了完整的方向滤波算法, 即先计算 $[I_4(x,y) - I_2(x,y)][I_1(x,y) - I_3(x,y)]$ 的值, 若大于 0, 根据 1)、(23)式, 对点 (x,y) 进行向右滤波; 若不大于 0, 根据 2)、(24)式, 对点 (x,y) 进行向左滤波。

图 3(d)即为方向滤波的结果, 算法中取滤波窗口 $w_0 = 10$ 。

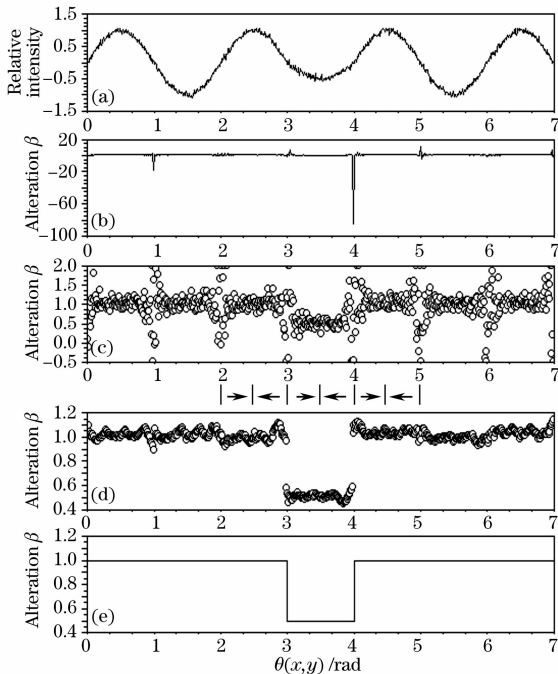


图 3 仿真示意图。(a)加入高斯噪声的 \tilde{T}_4 , (b)初始 $\beta(x,y)$, (c)限幅处理后的 $\beta(x,y)$, (d)滤波处理后的 $\beta(x,y)$, (e)最终的 $\beta(x,y)$

Fig. 3 Simulated image. (a) with Gauss noise, (b) primary $\beta(x,y)$ by Eq. (12), (c) $\beta(x,y)$ after amplitude limiting, (d) $\beta(x,y)$ after filtering, (e) final $\beta(x,y)$

最后,对滤波后的 $\beta(x, y)$ 做大小判断,若小于 $(1+\lambda)/2$,即认为此点位于摄动区间,令 $\beta(x, y) = \lambda$,否则,令 $\beta(x, y) = 1$ 。最终得到的结果如图 3(e) 所示。

6 实 验

为验证算法的可靠性,构建了一个光栅投影系统进行实验,如图 4 所示,系统由 CCD 相机(UNIQ 公司 UP1800),投影仪(Optoma 公司 EP737),图像采集卡(加拿大 Matrox 公司 Matrox Meteor II)和计算机组成。摄像机和投影仪之间相距约 25 cm,被测物体放置于投影仪前方 80 cm 处,投影范围约为 $40\text{ cm} \times 30\text{ cm}$ 。实验时,由计算机控制光栅在投影仪中的灰度分布,投影仪将光栅条纹投影到被测物体上,条纹图像由摄像机获得,经图像采集卡输入到计算机中,根据本文的算法进行处理。

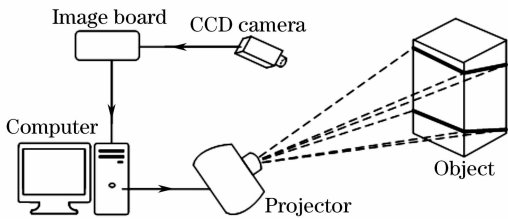


图 4 光栅投影系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of projected fringe measurement system

实验分为两部分,分别检验本文算法对相位主值的影响以及在解相位方面的实用性。

6.1 相位主值检验

被测物体为一平面白板,将普通 4 步相移光栅和中心条纹摄动光栅投影到白板上,分别按(6)式和(9)式计算出相位主值,以检验摄动法对相位主值的影响。

如图 5 所示,为采集到的光栅图像,其中图 5(a)~图 5(d)为普通 4 步相移法的图像,图 5(e)~图 5(h)为摄动相移法的图像,图 5(h)中红色圆圈标出的部分即摄动的光栅条纹。两种投影条纹的周期、相移一致,在投影仪上的投影模式均是按照周期为 96 pixel,相移 24 pixel(即 $\pi/2$ 相移)的正弦光栅,两组光栅的不同之处在于后一组光栅中心条纹进行摄动,摄动参量 $\lambda=0.4, Q=5$ 。分别计算出两种相移法的相位主值,如图 6 所示。

图 6 所示为光栅图像第 420 行的灰度及相位主值,图中横坐标表示该行的像素坐标。图 6(a)为摄动条纹图像 \tilde{T}_4 ,即图 5(h)在该行的灰度分布;图 6(b)

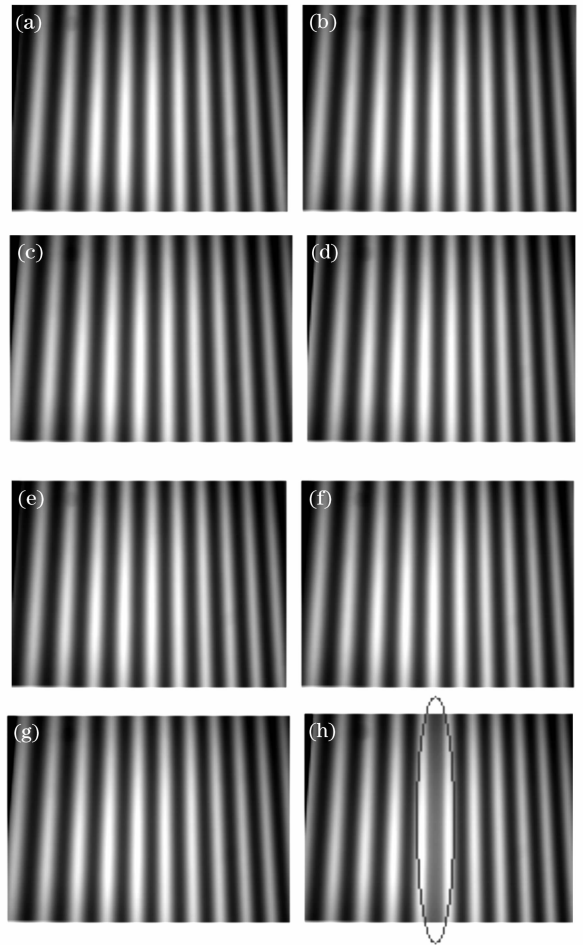


图 5 光栅相移图。(a)~(d)普通 4 步相移法, (e)~(h)摄动相移法

Fig. 5 Phase-shifting images. (a)~(d) General 4-step phase-shift method, (e)~(h) perturbation phase-shift method

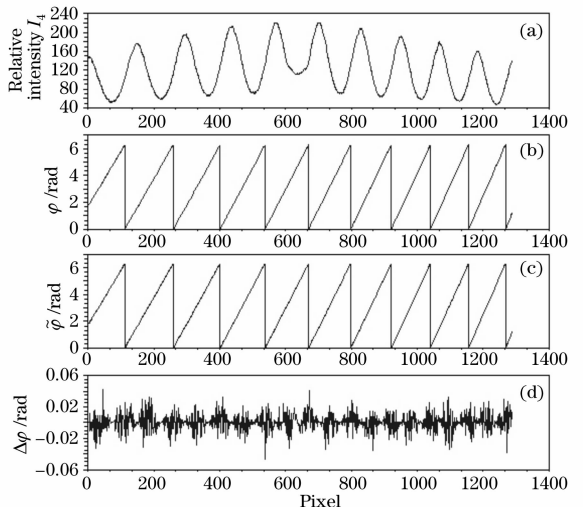


图 6 相位主值检验

Fig. 6 Test of primary phase value

和图 6(c)分别是由普通相移法和摄动相移法得到

的相位主值 φ 和 $\tilde{\varphi}$; 图 6(d) 是两者的差值 $\Delta\varphi$, 即 $\Delta\varphi = \tilde{\varphi} - \varphi$. $\Delta\varphi$ 即可以认为是摄动法带来的相位主值误差. 对图中的主值误差进行统计, 得 $\Delta\varphi$ 的均值为 4.72×10^{-5} , 方差为 1.07×10^{-4} . 可以看出, 与相位主值 φ 相比, 误差 $\Delta\varphi$ 是很小的, 对相位主值以及后面解相位工作的影响很小.

6.2 解相位检验

为了验证摄动法在解相位方面的作用, 测量了一个摩托车护板, 如图 7 所示. 其中图 7(a) 为护板图像, 图 7(b) 为投影了摄动光栅的图像. 实验中摄动光栅的设置与相位主值检验时的相同.

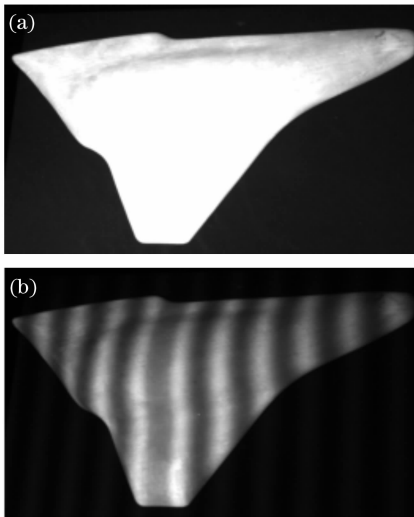


图 7 摩托车护板. (a) 原始图像, (b) 投影了摄动光栅的图像

Fig. 7 The guard plate of motorcycle. (a) Primary image of plate, (b) image with alternating fringe

图 8 为条纹图像第 800 行的解相位过程, 图中横坐标表示该行的像素坐标. 图中, 摄动光栅条纹的图像, 即 \tilde{T}_4 如图 8(a) 所示. 先由 (12) 式求出初始 β , 如图 8(b) 所示. 对 β 进行限幅、滤波处理, 结果分别如图 8(c)、图 8(d) 所示. 得到最终的 β 之后, 由 (15) 式得到相位主值 φ , 如图 8(e) 所示. 然后, 按照解相位方法得到条纹周期数 k , 如图 8(f) 所示. 最终, 将图 8(e) 和图 (f) 的结果代入 (7) 式, 得到完整的相位值 θ , 如图 8(g) 所示. 至此, 本行图像的解相位工作顺利地完成. 由图 8(a)~图 8(d) 可以看出, 本算法对条纹摄动部分的识别是准确的; 由图 8(d)~图 8(g) 可以看出, 整行图像的解相位工作是正确的.

对整个图像进行解相位, 结果如图 9 所示. 图 9(a) 为相位主值, 图 9(b) 为解相位后完整的相位值.

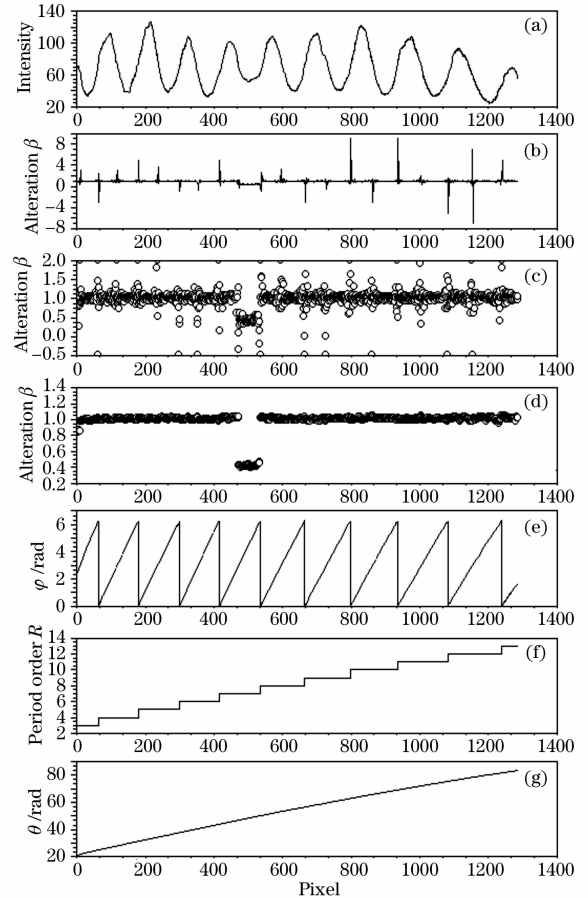


图 8 护板解相位. (a) \tilde{T}_4 , (b) 初始 $\beta(x, y)$, (c) 限幅后的 $\beta(x, y)$, (d) 滤波后的 $\beta(x, y)$, (e) φ , (f) k , (g) q

Fig. 8 Phase unwrapping of the guard plate. (a) \tilde{T}_4 , (b) primary $\beta(x, y)$, (c) $\beta(x, y)$ after amplitude limiting, (d) $\beta(x, y)$ after filtering, (e) φ , (f) k , (g) θ

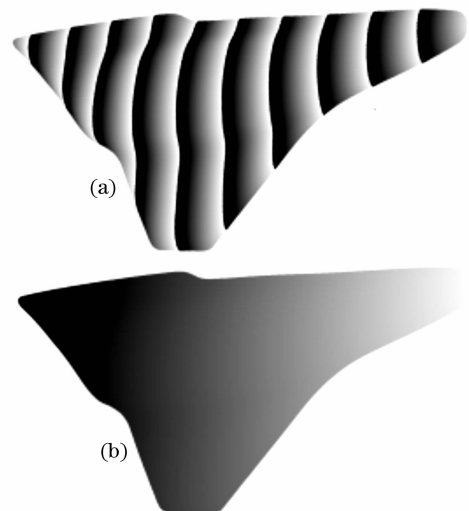


图 9 护板相位图. (a) 原始相位主值, (b) 完整的相位
Fig. 9 Principal value of phase image of the guard plate. (a) Principal value of primary phase, (b) absolute phase

为了进一步检验摄动法解相位的适用性,又对一个模特头像进行了实验,结果如图 10 所示。其中图 10(e)是三维测量的点云结果图。

通过两个实验可以看出,本文提出的算法可以

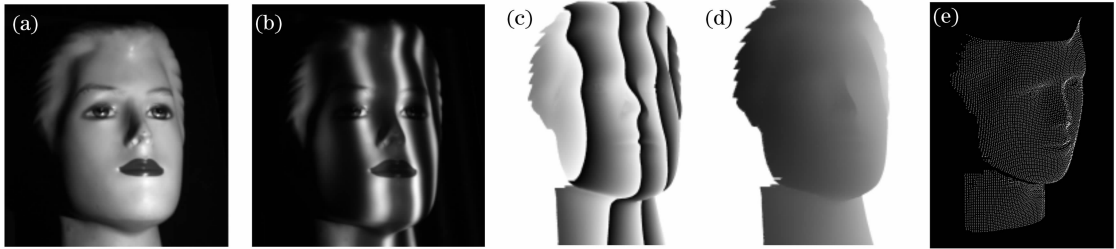


图 10 头像检验。(a) 头像,(b) 摄动光栅图,(c) 原始相位主值图,(d) 完整的相位图,(e) 三维点云图

ig. 10 Test of head portrait. (a) Image of portrait, (b) image with alternating fringes, (c) principal value image of primary phase, (d) principal value image of absolute phase, (e) three-dimensional point cloud

7 结 论

在 4 步相移法的基础上,通过对第 4 幅相移光栅的中心条纹进行摄动,实现了快速、高效的解相位工作。实验结果证明了本方法的可行性。与其他方法相比,本方法有如下特点:

1) 编码信息直接加入到基本相移光栅中,通过对 4 幅基本相移图的处理可以同时得到相位场主值和相关编码信息,不仅明显减少了投影光栅数量,提高了测量速度,而且也增加了解相位的可靠性。

2) 由于编码信息的加入,相位主值的求取是和编码信息联系在一起的,而在传统相移法中,相位主值的获得是独立于后者的。这样在新方法中,编码信息的准确性和相位主值的准确性是紧密联系在一起的。通过对摄动函数的限幅、方向滤波等处理,可以有效地保证编码信息获取的准确性。

3) 新方法中的编码信息,仅限于中央条纹,在获得中央条纹上点的准确相位后,对其他点的准确解相位,是另一个比较关键的问题。在这一点上,可以借鉴空域解相位的方法,进一步提高算法的可靠性。

在各种编码-解相位方法中,都存在着效率-可靠性这对矛盾,即时域上不同频率的光栅条纹图越多,可以用来进行解相位的编码信息就越丰富,解相位的可靠性就越高,但同时光栅数量的增加,不可避免会降低测量速度,带来效率的下降。而如果减少光栅数量,测量速度变快,系统效率上升,同时出现误判的可能性也会相应地增加,可靠性下降。如何使编码-解相位算法在效率和可靠性两方面都有较大的提高,是今后应当继续研究的关键问题之一。

准确地识别光栅条纹的摄动部分(如图 8 所示),进而得到整幅图像完整的相位值(如图 9、图 10 所示),在测量过程中不需要更多的辅助光栅条纹,实现了快速、准确的解相位,有很强的实用性。

参 考 文 献

- 1 F. Chen, G. M. Brown, M. Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 10~22
- 2 Ding Wanshan, Liu Yan. Optical measurement of object's surface three-dimensional shape in water[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 58~62
丁万山,刘艳. 水中物体的光学三维形貌测量的研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 58~62
- 3 Ding Yabin, Peng Xiang, Tian Jindong *et al.*. Pose estimation of multiple viewpoints for three-dimensional digital imaging system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 451~456
丁雅斌,彭翔,田劲东等. 一种三维数字成像系统的多视点姿态估计方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 451~456
- 4 Pan Wei, Zhao Yi, Ruan Xueyu. A new method for getting high precision phase in structural light measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(5): 687~691
潘伟,赵毅,阮雪榆. 结构光测量中获取高精度相位的新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(5): 687~691
- 5 Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. *Precision Measurement and Movement Measurement Based on Image* [M]. Beijing: Science Press, 2002. 56~60
于起峰,陆宏伟,刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 56~60
- 6 C. W. Chen, H. A. Zebker. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2000, **17**(3): 401~414
- 7 Yang Fujun, Yun Dazhen. Phase recovery from a single speckle fringe pattern based on statistical filtering [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 952~956
杨福俊,云大真. 基于统计滤波的单幅散斑条纹图的相位恢复技术[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 952~956
- 8 Yue Huimin, Su Xianyu. Temporal phase unwrapping progress [J]. *Laser J.*, 2004, **25**(3): 9~12
岳慧敏,苏显渝. 时间位相展开方法研究进展[J]. *激光杂志*, 2004, **25**(3): 9~12
- 9 G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella. 3D vision based on the combination of Gray code and phase shift light projection[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(31): 6565~6573
- 10 J. M. Huntley, H. Saldner. Temporal phase-unwrapping algorithm for automated interferogram analysis[J]. *Appl. Opt.*,

- 1993, **32**(17): 3047~3052
- 11 Peng Xiang, Yang Zhaoliang, Niu Hanben. An enhanced temporal phase unwrapping algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(7): 880~883
- 彭翔, 杨昭亮, 牛憨笨. 时间维相位重建的改进算法[J]. *光子学报*, 2004, **33**(7): 880~883
- 12 Tian Jindong, Peng Xiang. Approach for three-dimensional imaging based on hybrid encoding[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(2): 161~165
- 田劲东, 彭翔. 一种复合编码的三维数字成像方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2): 161~165
- 13 Lei Zhihui, Li Jianbing. Full automatic phase unwrapping method based on projected double spatial frequency fringes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 39~42
- 雷志辉, 李健兵. 基于双频投影条纹的全自动相位解包裹方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 39~42
- 14 Song Zhang, Shing-Tung Yau. High-resolution, real-time 3D absolute coordinate measurement based on a phase-shifting method[J]. *Opt. Exp.*, 2006, **14**(7): 2644~2649

慕尼黑上海电子展、激光光电展 3 月再创新高

继 2007 年 3 月成功闭幕后, 时隔 1 年, 2008 年 3 月 18~20 日, 由慕尼黑国际博览集团主办的第 3 届慕尼黑上海激光、光电展 LASER · World of Photonics China 2008 和第 7 届慕尼黑上海电子展 electronica & ProductronicaChina 2008 将在上海新国际博览中心再度举办。

经过主办方多年的精心培育与业界的鼎力支持, 慕尼黑上海电子展和激光、光电展的展出面积双双创出新高, 电子展比上一届激增 30%, 而激光、光电展则惊人的将面积整体翻了一番。值得关注的是, 由德国联邦经济与技术部和慕尼黑国际博览集团共同主办的“德国激光与光电特别展”将首次登陆上海, 形成独一无二的特色展中展, 介绍德国领先企业在光学技术方面的最新进展与成就, 展示前沿技术与产品。此外, 沿袭同期举办多场高品质会议的优良传统, 2008 年将有 7 场高端技术研讨会和高峰论坛轮番登场, 探索行业发展新路。

品牌展会平台, 明星企业云集, 展示面积再创新高

高速增长中的中国市场, 对于工业激光及光学系统的需求量持续增长, 这使得光电产业呈现出前所未有的巨大潜力。随着前两届慕尼黑上海激光、光电展的成功举办, 此次展会已经成为国内外激光企业在中国推广最新产品技术、宣传品牌形象的首选。3 月份在上海, 观众们将会看到汇聚一堂的知名企业, 如德国的通快集团、德商罗芬, 肖特集团; 美国的相干、理波、恩耐; 英国的 GSI; 全球领先的光电半导体制造商 OSRAM, 激光打标与机械打标的高科技公司镭射沃和 Telesis; 作为民族激光企业代表的大族激光、楚天激光、华工激光、华北光电、大陆激光也都悉数参加; 还有众多新展商的积极加盟, 包括韩国伊欧、欧瑞康、IPG、海洋光学等。慕尼黑激光、光电展的规模也由此创下历史新高, 相比上届面积翻番, 达到 12000 平方米。

“德国激光与光电特别展”——与“德国制造”零距离接触

由德国联邦经济与技术部、德国展览业协会和慕尼黑国际博览集团共同带来的“德国激光与光电特别展”将作为 2008 慕尼黑上海激光、光电展的重要组成部分首次登陆上海, 以近年来德国激光、光电企业在中国的最大规模的集中亮相, 全面展示在光电子技术领域的技术实力和创新能力。

该特别展的另一重点将是将德国的先进太阳能技术引入中国, 契合国内最火热的节能话题, 这必将吸引更多专业观众的目光。整个展区座落于 E6 馆的醒目位置, 展区包括产品展示, 工业论坛, 德国企业介绍等, 参展的企业包括 SCHOTT, PI, SCANLAB, OWIS, IPG, LINOS, OSRAM 和 JENOPTIK 等 30 多家, 并由德国光学工业界德高望重的 SCHOTT 公司的 Johannes Hain 博士担任展商主席。

同期会议深入洞悉行业现状, 探索发展新路

展会期间, 除了丰富的产品展示外, 同期举办的七场会议也是精彩纷呈。如在慕尼黑上海激光、光电展期间, 两场围绕激光技术的研讨会将同期举行, 分别是“第三届国际应用激光技术中国研讨会 (LPC 2008)”以及“光学前沿——2008'激光技术论坛”, 将分别集中讨论激光加工技术、光学元件以及激光技术目前的发展与未来的趋势, 以及关于当前激光器技术的前沿进展与面临的挑战, 并由国内外知名激光器公司的资深研发专家展示最先进的激光器件。