

基于快速搜索粒子群算法的点衍射干涉 绝对位移测量方法

王道档¹ 徐杨波¹ 陈茜茜¹ 郭天太¹ 孔 明¹ 赵 军¹ 朱保华^{2,3}

¹中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018

²桂林电子科技大学广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004

³桂林电子科技大学广西高校光电信息处理重点实验室, 广西 桂林 541004

摘要 为了解决目前点衍射绝对位移测量系统中位移重构算法存在的收敛率低问题,并针对实际测量中时效性和高精度要求,提出了基于快速搜索粒子群算法的点衍射干涉绝对位移测量方法。点衍射干涉绝对位移测量系统根据点衍射干涉场相位差的分布重构出点衍射探头的三维绝对位移。所提出的快速搜索粒子群算法针对测量中大量像素点数据的高效处理需要,在三维绝对位移迭代重构过程中采取非线性增加样本点数量的搜索方法,进而在保证测量精度的同时极大提高了测量效率。分别进行了仿真分析、测量实验以及三坐标机测量比对以检验所提出测量方法的可行性与稳定性。结果表明,该方法可实现三维绝对位移的快速检测,其收敛率可达90%,且在200 mm×200 mm×300 mm的测量区域中达到优于微米量级测量精度。所提出的三维绝对位移测量方法具有较高的测量效率和精度,且具备高抗噪能力和可靠性,对其在微加工技术和高精度测量中的应用具有重要意义。

关键词 测量; 绝对位移; 点衍射干涉; 快速搜索粒子群算法

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0112001

Absolute Displacement Measurement with Point-Diffraction Interferometer Based on Quick Searching Particle Swarm Optimization Algorithm

Wang Daodang¹ Xu Yangbo¹ Chen Xixi¹ Guo Tiantai¹

Kong Ming¹ Zhao Jun¹ Zhu Baohua^{2,3}

¹College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²Guangxi Key Laboratory of Automatic Detecting Technology and Instruments, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

³Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract To enhance the convergence ratio, timeliness and accuracy of current iterative algorithm in the measurement of three dimensional absolute displacements with point-diffraction interferometer (PDI), the method based on quick searching particle swarm optimization (QS-PSO) algorithm is proposed for the reconstruction of absolute displacements. The three dimensional absolute displacement of the probe is determined from the distribution of the phase difference in the interference field. To realize the efficient procession of a large number of sampling pixel points, the sampling points are nonlinearly increased in the process of iteration in the proposed QS-PSO method, by which both the high-efficiency and high-precision measurement are achieved. Both the

收稿日期: 2015-05-04; 收到修改稿日期: 2015-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(11404312, 51375467)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ03011208)、浙江省自然科学基金(LQ13F050002)、浙江省“仪器科学与技术”重中之重学科开放基金(JL150508)、广西高校光电信息处理重点实验开放基金(KFJJ2014-03)、广西自动检测技术与仪器重点实验开放基金(YQ15204)、广西自然科学基金(2013GXNSFDA019002, 2014GXNSFGA118003)

作者简介: 王道档(1986—),男,博士,讲师,主要从事光电精密检测、点衍射干涉技术方面的研究。

E-mail: wangdaodang@sina.com

computer simulation and experimental measurements are carried out to verify the feasibility of the measurement. According to the analyzing results, the convergence rate and measurement precision of the proposed measurement method can reach 90% and better than the order of microns within a 200 mm×200 mm×300 mm working volume, respectively. The proposed absolute displacement measurement method is of high efficiency, measurement precision, anti-noise ability and reliability, and also of great significance for the application of micro-processing and high precision measurement.

Key words measurement; absolute displacement measurement; point-diffraction interferometry; quick searching particle swarm optimization algorithm

OCIS codes 120.3180; 120.4640; 120.2650

1 引 言

点衍射干涉技术利用点衍射方法获取高精度球面波前作为测量基准,突破了传统干涉仪中标准件加工精度的限制,并可达到衍射极限性能的分辨率,同时具有较好的精度再现性。随着微加工技术的不断发展,目前制作得到的光纤点衍射源以及针孔点衍射源可以获得球面精度优于 0.6 nm 的理想球面波前^[1-4]。由于其良好的应用前景,点衍射干涉仪(PDI)在面形误差^[5-6]、曲率半径^[7]、透镜焦距^[8]和模拟三维温度场^[9]等测量中得到较好的应用。目前正在研究一种基于光纤点衍射干涉技术的三位坐标定位及绝对位移测量系统^[10-12],其中包括前端光路、点衍射探头以及探测器等部分。点衍射探头包含了两个点衍射源,利用该点衍射探头所产生的两路参考球面波前形成干涉场,利用探测器采集获得对应位置处的相位差矩阵,并根据数值迭代算法即可重构得到三维绝对位移量。相较于目前常用的三坐标测量机、多路激光跟踪干涉测量装置^[13]、双经纬仪^[14]以及计算机视觉系统^[15]等,点衍射干涉绝对位移测量系统具有成本相对较低、系统布局方便、制作容易且可达到优于微米量级的测量精度等诸多优点,尤其适用于一些便携快速的现场测量需求。

点衍射干涉绝对位移测量方法处理获取到相位差矩阵时,需要根据建立的位置方程组,利用数值迭代算法重构出三维绝对位移量。因此,数值迭代算法的性能决定测量系统的速度、精度和可靠性等性能要求。当前的迭代算法多采用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法^[16]和拟牛顿算法^[17]等,由于这些算法在每步迭代过程中需要通过目标函数求导数乃至偏导数以得到目标函数的梯度,要求选取探测器中的像素量不能过多(一般不多于 50 个),否则会使得方程组数量过多导致迭代时间过长,进而无法满足应用要求。实际测量中由于受到振动、空气扰动以及电磁干扰等影响,只采用少量数据点进行分析会导致这些噪声极大地影响测量精度以及测量数据的运算收敛率。

针对上述问题,本文提出了基于快速搜索粒子群智能算法(QS-PSO)的光纤点衍射干涉绝对位移测量方法,并针对实际测量中的高效、高可靠性和高精度等要求,对传统粒子群算法(PSO)进行了搜索能力以及迭代速度上的优化。为满足测量系统对大量像素点数据的高效处理需要,在三维绝对位移重构算法迭代运算初期选取少量数据点进行处理的基础上,在迭代过程中采取了分步以非线性方式增加样本点数量的数据处理方法,直到迭代算法求解出目标值。快速搜索粒子群算法在有效降低噪声所引入误差的同时,还极大地提高了算法运算效率。为了验证所提出的绝对位移测量方法的可行性与可靠性,分别采用了计算机数值仿真及实验测量,并进行不同测量方法之间的对比实验。

2 系统原理与三维绝对位移重构方法

基于快速搜索粒子群算法的点衍射干涉绝对位移测量系统光路如图 1 所示,其中单纵模偏振激光器出射的激光束通过一个 1/2 波片(HWP1)调节得到某一偏振方向的线偏振光,经偏振分光棱镜(PBS)被分为 p 光和 s 光:p 分量透射光经过另一个 1/2 波片(HWP2)后被光纤耦合器耦合进入单模光纤;s 分量反射光经安装于压电叠堆(PZT)上的反射镜反射前后共两次经过一个 1/4 波片(QWP,其快轴方向与水平方向交角为 45°),并通过偏振分光棱镜透射后经另一个 coupler 耦合进入另一条单模光纤。这两条单模光纤的另一端被安装在一个点衍射探头(可安装于被测目标之上)之中,且这两条光纤出射端所得到的点衍射波前 W1、W2 会叠加形成点衍射干涉场。在干涉场任意位置放入一个 CCD,即可得到此位置处对应的干涉条纹。通过 PZT 对安装于其上的反射镜进行微位移,即可通过多步移相算法重构出 CCD 平面上对应干涉场的相位差分布矩阵。最

后,根据此相位分布矩阵建立数学模型,并采用迭代算法求解此数学模型,即可得到点衍射探头的三维绝对位移量 x 。

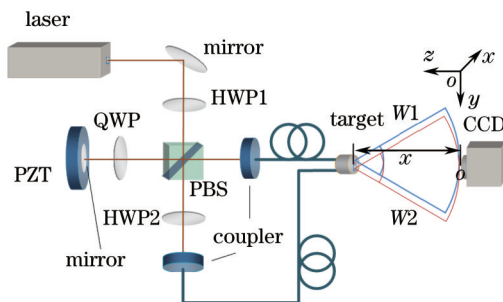


图1 点衍射干涉绝对位移测量系统

Fig.1 Schematic for absolute displacement measurement system with PDI

2.1 点衍射干涉绝对位移测量模型

在点衍射干涉三维绝对位移测量系统中,来自于点衍射源的两个点衍射波面所产生的干涉场中每一位置处的相位差取决于点衍射源的空间坐标,如图2所示,其中 CCD 平面的中心点 O 定义为直角坐标系 (x, y, z) 的原点。

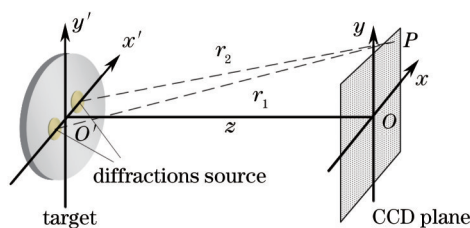


图2 点衍射干涉绝对位移测量模型

Fig.2 Model for coordinate reconstruction based on point-diffraction

以 CCD 平面上的任一点 P 点为例,其对应相位差 ϕ 为

$$\phi_p(x, y, z) = \frac{2\pi}{\lambda} [r_1(x, y, z) - r_2(x, y, z)] = k \left[\sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} - \sqrt{(x-x_2)^2 + (y-y_2)^2 + (z-z_2)^2} \right], \quad (1)$$

式中 k 为波数, (x, y, z) 为 CCD 平面上对应 P 点的坐标值,而 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) 分别为对应两个点衍射源相对于 CCD 平面的三维绝对位移量, r_1 和 r_2 分别为 P 点到两根光纤出射端面的距离。点衍射源的三维绝对位移量与 CCD 平面上对应干涉场的相位差值分布存在一一对应关系。由于(1)式中包含了两个点衍射源三维坐标值中的 6 个未知参量 (x_1, y_1, z_1) 和 (x_2, y_2, z_2) , 因而至少需采用 6 个 CCD 像素点数据,以建立对应的 6 个方程来求解待测未知量。

为了重构点衍射探头的三维绝对位移,定义函数 $f(x)$ 为

$$f(x) = [\phi_p(x, y, z) - \phi_0] - [\phi_{\text{CCD}}(x, y, z) - \zeta], \quad (2)$$

式中 $x = (x_1, y_1, z_1; x_2, y_2, z_2)$ 为点衍射探头中两点衍射源的三维绝对位移量, ϕ_0 为通过式得到的坐标原点的相位差值, $\phi_{\text{CCD}}(x, y, z)$ 为实际测得 CCD 平面上的相位差值, ζ 为实际测得坐标原点的相位差值。为了提高测量精度和抗干扰能力,可通过选取大量的像素点(像素数 $m \geq 6$)的坐标值 $[x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}] (i = 1, 2, \dots, m)$ 以及 CCD 采集到的相位差值 $\phi_{\text{CCD}}[x^{(i)}, y^{(i)}, z^{(i)}]$ 以构建超定非线性方程组来重构点衍射探头的三维绝对位移量 x , 得到方程组 $F(x)$ 为

$$F(x) = \begin{cases} \left\{ \phi_p[x^{(1)}, y^{(1)}, z^{(1)}] - \phi_0 \right\} - \left\{ \phi_{\text{CCD}}[x^{(1)}, y^{(1)}, z^{(1)}] - \zeta \right\} \\ \left\{ \phi_p[x^{(2)}, y^{(2)}, z^{(2)}] - \phi_0 \right\} - \left\{ \phi_{\text{CCD}}[x^{(2)}, y^{(2)}, z^{(2)}] - \zeta \right\} \\ \vdots \\ \left\{ \phi_p[x^{(m)}, y^{(m)}, z^{(m)}] - \phi_0 \right\} - \left\{ \phi_{\text{CCD}}[x^{(m)}, y^{(m)}, z^{(m)}] - \zeta \right\} \end{cases}. \quad (3)$$

将式转化为二次范函数形式,进而得到评价函数 $\psi(x)$ 为

$$\psi(x) = \frac{1}{2} F(x)^T F(x) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m f_i^2(x), \quad (4)$$

当存在极小值点 x_0 使得 $\psi(x) < \varepsilon$ (ε 为误差限) 且 $\varepsilon \rightarrow 0$ 时,此极小值点 x_0 即为所测得的探头点衍射源的三维绝对位移,可通过非线性最小二乘方法求解。实际测量中通常需要选取大量像素点数据进行处理,以提高测量系统的抗干扰能力以及测量精度,对三维绝对位移的迭代重构算法的运行效率和收敛性等提出了很高的要求,为此本文提出了一种基于快速搜索粒子群智能算法的光纤点衍射干涉绝对位移测量方法,以满足实际测量中的高效、高可靠性和高精度等要求。

2.2 快速搜索粒子群算法原理

粒子群算法是一种模拟鸟群觅食行为的智能算法^[18-19],通过模拟鸟群觅食过程中不同个体具有不同的运动状态,整个群体则“信息共享,协作觅食”的机制编写的算法。算法运行中,每一个粒子根据自身最佳计算经验以及全体粒子最佳计算经验,在问题空间中搜索最优解。评价函数 $\psi(x)$ 对应的问题空间为6维,设迭代过程中 PSO 的总粒子数为 n ,第 i 个粒子位置表示为 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i6})$,历史最优位置表示为 $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{i6})$,位置变化率表示为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{i6})$,整个粒子群历史最优解表示为 $G = (G_1, G_2, \dots, G_6)$ 。第 d 个维度的参数每一次的迭代方向将更新为

$$v_{id}^{(k+1)} = v_{id}^{(k)} + c_1 \cdot b_1 \cdot [P_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}] + c_2 \cdot b_2 \cdot [G_d^{(k)} - x_{id}^{(k)}], \quad (5)$$

式中 c_1 、 c_2 称为加速因子(取正常数), b_1 、 b_2 为 $[0, 1]$ 区间内的随机数。在第 $k+1$ 次搜索时,第 i 个“粒子”的位置更新为

$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^{(k)} + v_{id}^{(k+1)}. \quad (6)$$

在点衍射干涉绝对位移测量中,由于 CCD 所采集的干涉场相位差数据可达百万以上像素,为了能充分利用这些大量数据信息,提出了一种改进的粒子群算法,以保证测量精度的同时极大地提高测量效率。在所提出的基于快速搜索粒子群算法的三维绝对位移迭代重构中,算法运行初期仅取少量像素数据点进行迭代,并使得所有“粒子”具有一定的趋势;而在后续的迭代过程中,不断增加样本点数量,构建更为庞大的方程组进行计算,直到运行结果达到要求。

设定迭代次数上限 t_{\max} 以及误差限 ε ,并令选取点的递增函数 $k(t)$ 和搜索像素范围 T 为 $k(t_{\max}) < T$ 。以在 CCD 像素面上的等间距取样方式为例,以 CCD 中心像素为中心的正方形像素区域边长为 l ,如图 3 所示,作为总样本区域,每次进行样本点更新的迭代次数为 t_{sep} ,则可将迭代过程分为 $c = t_{\max}/t_{\text{sep}}$ 个阶段。算法起始阶段的像素样本点数量为 $(l/c)^2$ 个,则在第 n 个迭代阶段所对应选取的像素样本量为 $(nl/c)^2$,并且满足 $k(t_{\max}) = T$,即在迭代过程完成时所选的样本点区域覆盖了整个总样本区域。

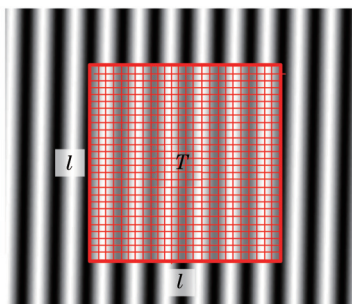


图3 快速搜索粒子群算法样本区域示意图

Fig.3 Model of QS-PSO algorithm

在快速搜索粒子群算法中,采用了所选取的 CCD 样本点数量在迭代过程中以非线性方式增加的方法,使得在位移重构算法运行初期“粒子”可以快速地获得相同趋势,并保证了整个迭代过程所采用的像素样本数量足以有效抑制测量噪声所引入的误差,从而在保证测量精度的同时极大地提高测量效率。基于快速搜索粒子群算法的三维绝对位移重构方法流程图如图 4 所示。

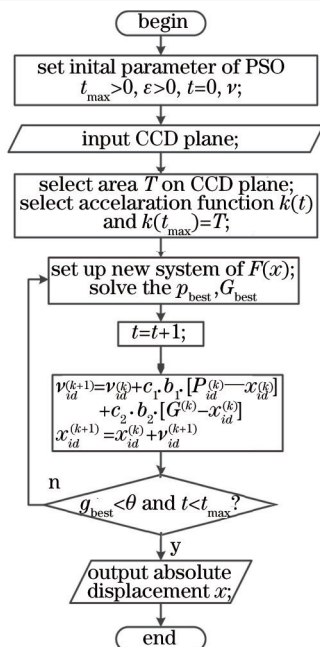


图 4 快速搜索粒子群算法流程图

Fig.4 Procedure for quick searching PSO algorithm

3 数值仿真

仿真中将 CCD 探测器的像素数设置为 1280 pixel×1024 pixel, 像元尺寸为 5.50 μm×5.50 μm, 探头中两点衍射源的空间位置分别取为(0.0625, 5, 150)和(-0.0625, 5, 150)(单位:mm), 并令两点衍射中点(0, 5, 150)(单位:mm)作为整个点衍射探头的空间坐标, 得到如图 3 所示的干涉图。利用步长为 π/2 的五步移相算法可重构出 CCD 平面处干涉场各点的相位分布。其中移相算法所引入的相位解调误差均方根(RMS)经测试小于 2×10⁻¹¹λ, 其对迭代算法的求解精度影响可以忽略不计^[6]。仿真中设置迭代次数上限 t_{max} = 100, 更新间隔 t_{sep} = 20, 迭代过程样本量更新被分为 c = t_{max}/t_{sep} 共 5 个阶段, 第 n 个迭代阶段的取点数量为 (nl/5)²。在不考虑任何噪声影响时, 得到对应的三维绝对位移重构误差为 (0.91, 0.80, 2.33)(单位: nm)。

在迭代重构过程中, 使用大量样本点数据可以有效抑制噪声以减小其引入的测量误差。为了分析搜索的像素样本范围 T 对于重构精度的影响, 仿真加入了均值为 5 nm 的随机噪声, 在其他条件不改变的前提下进行了分析。取总样本区域的边长 l 以 100 pixel 为步长进行变化, 自 100 pixel 到 800 pixel 共做 8 组仿真, 得到对应 xyz 三个方向的重构误差如图 5 所示。由图 5 可知, 绝对位移重构误差随着像素数据量增加而显著减小, 且当像素样本量大于 500 pixel×500 pixel 时, 重构误差趋于稳定, 达到了 0.1 μm 量级。因此, 可将搜索的总样本区域取为 500 pixel×500 pixel 进行迭代重构计算。

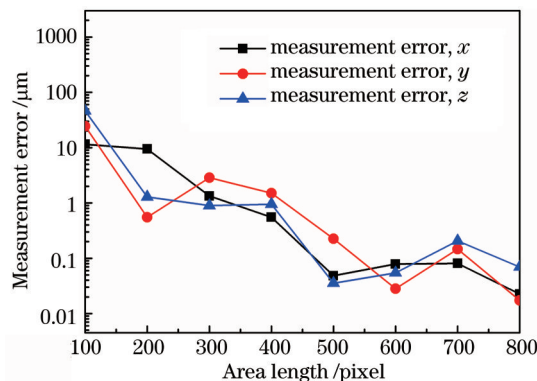


图 5 搜索面积对三坐标测量误差的影响

Fig.5 Influence of search area on three-coordinate errors in simulate

为了分析所提出的绝对位移测量方法在不同位置处的测量精度,取探头在偏离空间原点 O 的 x 方向 $(0, 5, 150)-(100, 5, 150)$ (单位: mm)范围和 z 轴方向 $(0, 5, 20)-(0, 5, 320)$ (单位: mm)各等间隔取 11 个点。由于 x 轴与 y 轴对称,这里省略了 y 轴的数据。分别对这 22 个点进行仿真测量,获得仿真误差并得到图 6。图 6(a)为测头在 x 轴上移动时 xyz 三个方向的仿真误差,图 6(b)为测头 z 轴上移动时 xyz 三个方向的仿真误差。

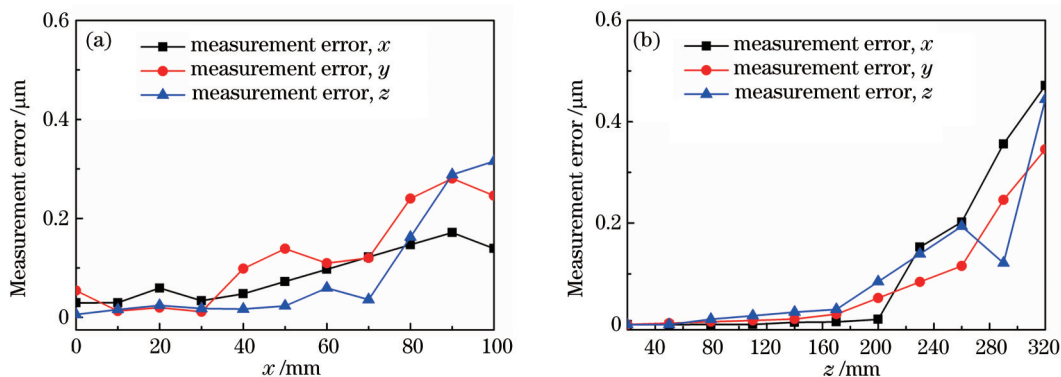


图 6 仿真各点 xyz 三轴的仿真误差。(a) x 轴; (b) z 轴

Fig.6 Three-coordinate measurement errors in simulation. (a) x axis; (b) z axis

由图 6 可知, x 轴移动时,最大误差为 $0.31 \mu\text{m}$, z 轴移动时,最大误差为 $0.46 \mu\text{m}$,且当探头偏离原点距离越远,测量误差将会越大。其原因在于,当探头远离 CCD 后,CCD 上能够采集到的条纹变宽,这将导致 CCD 能够采集到的相位差矩阵变化平坦,引起位置特征在矩阵中表征不够明显,使得计算过程更容易受到误差影响。

在仅考虑五步移相算法带来的误差以及迭代算法本身精度的前提下,所提出的方法计算误差可达纳米量级,而在加入了均值为 5 nm 的随机噪声后,其测量误差仍处于亚微米量级。由以上仿真结果可以得出,所提出的基于快速搜索粒子群算法的点衍射绝对位移测量方法能够实现亚微米乃至纳米量级的测量精度,满足精密位移测量的要求。

4 实验测量结果

为了验证所提出的算法及其点衍射绝对位移测量系统能够满足高精度测量要求,搭建了所示的实验系统,并对整个系统的测量稳定性以及准确性进行了检验,并与 LM 算法进行对比。

4.1 测量重复性与稳定性分析

为证明系统的测量重复性,在实验中控制设备保持测量点的位置与环境状态不变,对同一测量点进行了 20 次测量,检验在测量过程中系统的稳定性,每一次测量中的 x 轴测量值与测量均值的残余误差如图 7 所示。

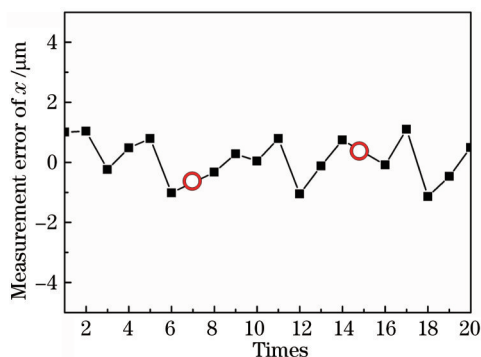


图 7 坐标测量稳定性实验结果

Fig.7 Repeatability of coordinate measurement

如图 7 所示,算法重复性试验过程中,第 7 次测量与第 15 次测量收敛失败,其他均得出测量值,且目标值的残差绝对值小于 $1.33 \mu\text{m}$,因此估算测量的收敛概率约为 90%,由于系统在测量过程中会受到振动、空气流动以及电磁等的干扰,这些干扰都是随机且不能被完全屏蔽的,当这些干扰对测量过程的影响较大时,算

法就会失效。快速搜索粒子群算法中采用了大量样本带入迭代的方法,平均了噪声点带来的误差对于测量结果的影响,具有较好的抗干扰能力。

4.2 绝对位移测量比对

为分析所提出方法的可行性和测量精度,将本系统与海克斯康 Global Classical 三坐标测量机(其精度可达 $1.90\ \mu\text{m}$)进行测量比对,比对取点与第3节所述完全相同,分别在 x 轴与 z 轴上各取 11 个点共 20 段位移进行测量,并将两套系统的测量值作比较,得到图 8。

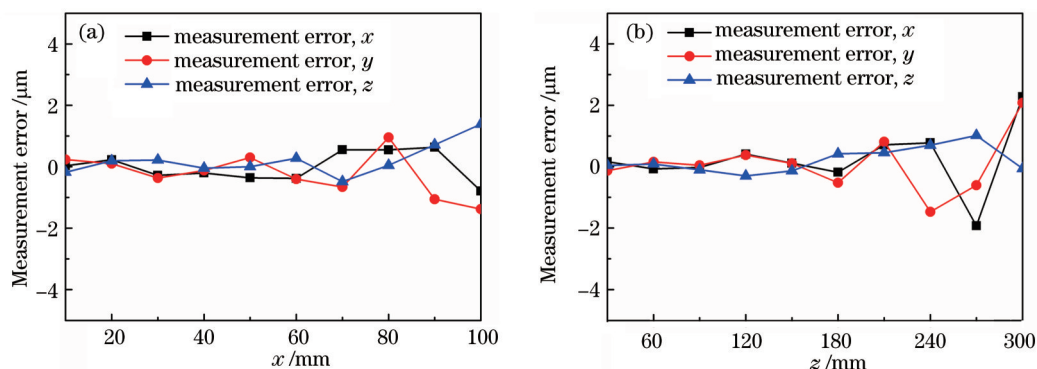


图 8 点衍射绝对位移测量系统比对误差。(a) x 轴; (b) z 轴

Fig.8 Absolute displacement measurement errors in experimental validation. (a) x axis; (b) z axis

图 8(a)、(b)显示了 x 轴方向与 z 轴方向中,所提出的系统与三坐标测量机的比对偏差,对应的 RMS 值分别为 $0.75\ \mu\text{m}$ 和 $0.79\ \mu\text{m}$,证明该系统具有较高的测量精度。在不考虑测量原理算法本身以及干涉信号数值量化等因素引入误差的情况下,当探头距离探测器越远,空气扰动以及振动等外界环境干扰越大,进而导致测量误差随之增大。由于探头衍射光斑孔径角的限制, x 轴方向的测量范围无法取得过大。因此,选定以 CCD 中点为原点,测量区域可取到 $200\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$ 范围。

4.3 绝对位移重构算法比较

LM 算法是一种牛顿法的变形,计算过程中需要对每一个待测参数做偏导数,相比其他梯度算法,LM 算法拥有相当好的收敛速度以及求解能力。现将 LM 算法^[16]与本文提出的快速搜索粒子群算法在光纤点衍射三维坐标重构中的求解能力进行比较,得到表 1 所示数据。

表 1 快速搜索粒子群算法与 LM 算法对比表

Table 1 Comparison of PSO algorithm and LM algorithm

Algorithm	Rate of convergence	Measurement error / μm	Time /s
LM	25%	0.75	2.57
QS-PSO	90%	0.79	1.61

由表 1 可知,在实际测量中,由于空气流动,振动动干扰以及电子噪声等的大量随机噪声的存在,LM 算法取点较少,受到这些误差的干扰而极易出现测量失败的情况,其收敛率仅能达到 25%;而快速搜索粒子群算法则在实际测量中表现出极好的稳定性和测量效率,其测量收敛率可达 90%,同时耗时相对 LM 算法有了较大缩短。另外,基于快速搜索粒子群算法点衍射绝对位移测量系统的测量精度为 $0.79\ \mu\text{m}$,迭代时间为 1.61 s,证明本方法满足高精度快速测量的需要。

5 结 论

针对目前点衍射绝对位移测量系统中,迭代算法在实际测量中收敛率低的问题,提出了将粒子群智能算法应用在点衍射绝对位移测量问题上,并根据测量系统的高效性要求,提出了一种快速搜索的粒子群算法以提高系统的执行效率,缩短测量耗时。快速搜索粒子群算法在面对具有大量样本点的问题时,选取总体中的少量样本带入迭代,并随着迭代的进行不断地增加样本数量,直到迭代结束。大量的样本点可以平均误差对算法所带来的影响,达到高精度计算并保证测量效率的目的。对所提出的测量方法分别进行了数值仿真和实验验证。实验表明,在 $200\ \text{mm}\times 200\ \text{mm}\times 300\ \text{mm}$ 测量区域中的测量收敛率可达 90%,精度达到

0.79 μm , 迭代时间为 1.61 s, 证明其具有较好的测量效率和可靠性。该方法可以满足微米乃至更高量级精度测量的需要, 对目前微加工技术和高精度测量的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 Zhang Yu, Jin Chunshui, Ma Dongmei, *et al.*. Study of calibrating algorithm for wavefront reference source of point diffraction interferometer [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0308001.
张宇, 金春水, 马冬梅, 等. 点衍射干涉仪波前参考源标定算法的研究[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0308001.
- 2 Xu Jiajun, Xing Tingwen, Xu Fuchao. Calibration of the system errors in pinhole diffracted interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0712003.
许嘉俊, 邢廷文, 徐富超. 点衍射干涉仪系统误差标定[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712003.
- 3 Wang Daodang, Wang Fuming, Zou Hui, *et al.*. Analysis of diffraction wavefront in visible-light point-diffraction interferometer[J]. Appl Opt, 2013, 52(31): 7602-7608.
- 4 Wang Daodang, Yang Yongying, Chen Chen, *et al.*. Calibration of oblique-reflection aberration in point-diffraction interferometer for high-precision spherical surface testing[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0612003.
王道档, 杨甬英, 陈琛, 等. 点衍射球面检测中的斜反射波前像差校正[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0612003.
- 5 Chen Lingfeng, Ren Yaqing, Li Jie. Flat surface measurements on fiber point diffraction interferometer[J]. Opt Eng, 2010, 49(5): 050503.
- 6 Wang Daodang, Yang Yongying, Chen Cheng, *et al.*. Point diffraction interferometer with adjustable fringe contrast for testing spherical surfaces[J]. Appl Opt, 2011, 50(16): 2342-2348.
- 7 Yang Z M, Gao Z S, Yuan Q, *et al.*. Radius of curvature measurement based on wavefront difference method by the point diffraction interferometer[J]. Opt& Lasers in Eng, 2014, 56: 35-40.
- 8 Chen L F, Guo X F, Hao J J. Refractive index measurement by fiber point diffraction longitudinal shearing interferometry[J]. Appl Opt, 2013, 52(16): 3655-3661.
- 9 Aguilar J C, Berriel-Valdos L R, Aguilar J F. Measuring of temperatures of a candle flame using four multidirectional point-diffraction interferometers[J]. Opt Eng, 2013, 52(10): 104103.
- 10 J Chu, S W Kim. Absolute distance measurement by lateral shearing interferometry of point-diffracted spherical waves[J]. Opt Express, 2006, 14(13): 5961-9567.
- 11 J Chu, S W Kim. Absolute distance measurements using point-diffracted spherical waves[C]. SPIE, 2006, 6293: 62930P.
- 12 Wang Daodang, Chen Xixi, Xu Yangbo, *et al.*. High-NA fiber point-diffraction interferometer for three-dimensional coordinate measurement[J]. Opt Express, 2014, 22(21): 25550-25559.
- 13 Zhang Guoxiong, Lin Yongbing, Li Xinghua, *et al.*. Four-beam laser tracking interferometer system for three-dimensional coordinate measurement[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(9): 1030-1036.
张国雄, 林永兵, 李杏华, 等. 四路激光跟踪干涉三维坐标测量系统[J]. 光学学报, 2003, 23(9): 1030-1036.
- 14 Zhou Fuqiang, Zhang Guangjun, Jiang Jie, *et al.*. Three-dimensional coordinate measuring system with bino-theodolites on site[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(1): 165-169.
周富强, 张广军, 江洁, 等. 现场双经纬仪三维坐标测量系统[J]. 机械工程学报, 2004, 40(1): 165-169.
- 15 Huang Fengshan, Qian Huifen. Single camera 3D coordinate vision measuring system using a light pen[J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(4): 69-72.
黄凤山, 钱惠芬. 光笔式单摄像机三维坐标视觉测量系统[J]. 光电工程, 2007, 34(4): 69-72.
- 16 Wang Daodang, Wang Fumin, Chen Xixi, *et al.*. Three-dimensional coordinate measurement with point-diffraction interferometer based-on Levenbery-Marquardt algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 32(8): 0812001.
王道档, 王福民, 陈茜茜, 等. 基于 Levenbery-Marquardt 算法的点衍射三维坐标测量方法[J]. 光学学报, 2014, 32(8): 0812001.
- 17 H G Rhee, J Chu, Y W Lee. Absolute three-dimensional coordinate measurement by the two-point diffraction interferometry[J]. Opt Express, 2007, 15(8): 4435-4444.
- 18 Zhang Jianke, Wang Xiaozhi, Liu Sanyang, *et al.*. Particle swarm optimization for solving nonlinear equation and system[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2006, 42(7): 56-58.
张建科, 王晓智, 刘三阳, 等. 求解非线性方程及方程组的粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(7): 56-58.
- 19 Liu Jinping, Yu Jinxiang. Parameter estimation of multiple linear regression models based on the improved particle swarm optimization algorithm[J]. Computer Engineering & Science, 2010, 32(4): 101-105.
刘锦萍, 郁金祥. 基于改进的粒子群算法的多元线性回归模型参数估计[J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(4): 101-105.

栏目编辑: 何卓铭