光阱中微粒位置高精度检测技术

缪立军[1*],闫景涛[1],胡慧珠[1],应光耀[2],黄腾超[1],车双良[1],舒晓武[1]

(1. 浙江大学 光电科学与工程学院,浙江 杭州 310027;
2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014)

摘　要:基于光阱技术的精密传感和测量是光力效应应用由微观精确操控向物理量精确测量的创新和深化,对光阱中微粒位置信息进行高精度测量是实现精密传感和测量的核心;提出了一种采用数字图像处理和曲线拟合相结合进行光阱微粒位置检测的方法,通过数字图像相关方法获得表征微粒位置的归一化自相关函数,并对归一化自相关函数曲线采用最小二乘法进行二次曲线拟合,由此实现亚像素级的微粒位置检测。实验表明,所述方法可以有效抑制硬件量化效应,实现光阱微粒位置的快速高精度检测,相较于直接相关方法,检测精度可至少提升一个数量级,达 0.03 pixel。

关键词:光学传感;　精密测量;　光阱技术;　数字图像相关

中图分类号:O436.2　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201948.1213001

High precision detection technology of particle positions in optical trap

Miao Lijun[1*], Yan Jingtao[1], Hu Huizhu[1], Ying Guangyao[2], Huang Tengchao[1], Che Shuangliang[1], Shu Xiaowu[1]

(1. College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Precision sensing and measuring based on optical trap technology is innovation and deepening for application of optical force effect from micro-precise manipulation to precise measurement of physical quantities. Precision measurement of position information of the particle in optical trap is key technology of precise sensing and measuring. The method was put forward, which used digital image processing and curve fitting algorithm to detect particle positions in optical trap. The normalized self-correlation function of particle positions was obtained by digital image correlation, and the quadratic curve fitting was used to the normalized self-correlation function curve by least-square method to realize particle position detection of sub-pixel accuracy. Experiments show that the method described in this paper can effectively suppress the quantization effect of hardware and realize fast and high-precision detection of particle position in optical traps. Compared with the direct correlation method, the detection accuracy can be improved by at least one order of magnitude to 0.03 pixel.

Key words: optical sensing;　precision measuring;　optical trap technology;　digital image correlation

收稿日期:2019-06-05;　**修订日期**:2019-07-15

基金项目:国家重点研发计划重点专项(2017YFF0204901);浙江省自然科学基金(Y19F050039);航天科学技术基金(1809KM20190019)

作者简介:缪立军(1986-),男,助理研究员,博士,主要从事光学传感、信息信号处理方面的研究。Email:mlj000000@zju.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

0 引 言

光具有能量和动量，携带动量的光与物质相互作用时会有动量的传递，从而表现为光对物体施加一力，并由此引起物体的位置和速度的改变，称之为光的力学效应[1]。

光的力学效应是当今科学技术研究的前沿问题，对它的研究与应用已经对很多学科产生了重大而深远的影响。1970 年，Ashkin 首次利用两条会聚光束的散射力成功捕获微米量级的聚乙烯苯小球[2]，并于 1986 年提出单光束梯度力光阱[3]，单光束光阱可以像机械镊子一样将原子、分子、细胞、细菌、病毒或微粒抓住并稳定控制在一定区域，因此又被成为光镊。单光束光阱技术的发明，为物理学、化学、生物学与医学提供了用于基础研究和实际应用的精密仪器，Ashkin 因此荣获 2018 年诺贝尔物理学奖。

近 20 年来，光阱技术成了光的力学效应最活跃的研究领域之一，并已在物理、化学和生命科学等领域得到广泛应用。由于光阱技术兼有微纳米尺度粒子的捕获和皮牛顿量级力的测量功能，近年来，将光阱技术应用于精密传感和测量领域的研究引起了国内外科学家的重视。2005 年麻省理工学院提出了采用双光束光阱系统实现加速度测量的方案[4]。2015 年，内华达大学的 Ranjit 等在真空环境中搭建了一组双光束光阱系统，实现了 10^{-18} N 量级的微力测量[5]。2016 年，李统藏课题组的 T.M.Hoang 等利用线偏光悬浮非均匀的纳米钻石颗粒，测量了其扭矩变化，并提出了该结构可作为一种微型扭秤[6]，其力矩测量灵敏度可以达到 10^{-29} $(\mathrm{N\cdot m})/\sqrt{\mathrm{Hz}}$ 。2018 年，耶鲁大学 Monteiro 等设计了一种基于单光束光镊的加速度测量装置，长时间统计的平均测量精度可以达到 ng 量级[7]。2018 年，苏黎世联邦理工学院的 E.Hebestreit 也提出了一种测量重力的光阱系统[8]。在国内，浙江大学、北京航空航天大学、国防科技大学[9-11]致力于基于光阱技术的加速度计和重力仪的基础理论和实验研究，并已在光阱加速度计理论精度分析、片上光阱系统等方面取得较大进展。光阱技术已经展现出了其在精密传感和测量领域的巨大应用潜力。

将光阱技术应用于精密测量领域，其本质是通过光阱对微粒进行稳定捕获和控制，通过检测微粒的位置随待测物理量的变化得到待测物理量的值，检测精度受光功率稳定度、微粒的布朗运动、微粒位置检测精度影响，光功率稳定度和微粒布朗运动决定了微粒在光阱中的稳定性，即理论的检测极限，在物理量介入时微粒位置变化量的检测精度决定了实际的工程精度。不管是微粒稳定性的评估还是微粒位置变化量的检测，其核心是微粒位置检测，因此光阱中微粒位置高精度检测技术研究对光阱技术应用于精度传感和测量领域具有重要理论和应用价值。

1 一维光阱微粒位置检测系统

典型的一维光纤光阱系统示意图如图 1 所示，其系统结构包括功率可调激光光源、光隔离器、一维光纤光阱系统基片、CCD(charge-coupled device)显微成像系统、测试计算机。一维光纤光阱系统基片包括带凹形槽的玻璃底片、微粒及两根相对的束缚光纤。

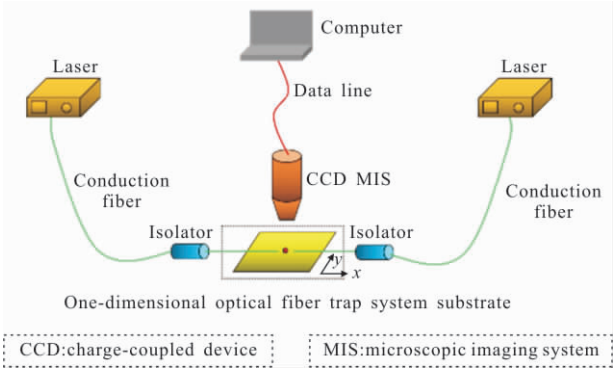

图 1 一维光纤光阱系统

Fig.1 One-dimensional optical fiber trap system

激光光源发出的激光通过传导光纤、光隔离器、束缚光纤后出射在微粒表面形成束缚光，通过调节光源的光功率可调整微粒的位置使微粒处于光阱中心区域，所用光纤均为单模光纤。显微镜将光阱中心区域成像到 CCD 上并通过输入数据线将 CCD 的实时视频信息上传到测试计算机，由测试计算机保存视频或直接进行在线实时处理。一维光纤光阱系统主要参数如表 1 所示。CCD 得到的捕获后微粒成像结果如图 2 所示。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1 一维光纤光阱系统主要参数

Tab.1 Main parameters of one-dimensional fiber optical trap system

System parameters	Value
Capture optical beam power P/mW	75
Capture optical beam wavelength λ/nm	980
Capture optical beam waist radius ω/μm	2.5
Captured microsphere material	Polystyrene(PS)
Captured microsphere radius r/μm	5
Captured microsphere gravity G/N	5.39×10^{-12}
Waist distance between two beams d/μm	200

图 2 微粒成像图

Fig.2 Particle imaging

如图 2 所示,通过调节显微物镜,使已捕获的微粒清晰地成像并位于视场中央位置,图中视场中央处黑色物体即为所捕获的微粒。对 CCD 得到的视频信息的每一帧图像中的微粒进行位置检测和统计分析,可以得到微粒的二维空间状态信息。光阱应用中最常见的微粒为球形微粒,其二维成像为圆形,对圆形物体进行检测最常用方法是进行圆拟合[12],得到圆的参数,圆心坐标即表征了圆在二维平面的位置。然而,由于光阱的束缚光照射到微粒表面时发生散射,微粒部分湮灭在散射光中,传统的基于圆检测的方法并不适用。文中提供了一种基于数字图像相关和二次曲线拟合[13]的光阱微粒位置检测技术,可实现亚像素级别的微粒位置检测,为光阱中微粒位置与运动状态分析提供了一种精密有效的方法。

2 光阱微粒位置高精度检测技术

2.1 数字图像相关检测技术

数字图像相关[14]是一种新型的全场光学测量技术,具有数据采集过程简单、工作环境要求低、测量精度高和非接触等优点,可以解决很多工程中的测量难题,已被广泛应用于光测力学、光学测量和机器视觉等领域。

由图 2 可知,虽然微粒部分淹没在了散射光中,但是视场中微粒附近区域光的灰度较为一致,因此,可以采用图像互相关技术得到微粒的位置,即将视频中每一帧图像取视场中央区域与第一帧图像的视场中央等大小区域进行互相关,互相关系数最大值处的偏移量即为该帧图像时微粒相对于第一帧图像的位置,由此可得到微粒的实时位置信息。图像视场中央用于相关处理的区域称为图像子区。

数字图像相关是评价两幅图像相似程度的常用方法,互相关函数取值越大,则两幅图像的相似性越大,否则相似性越小。将待处理帧图像进行平移,并取平移后与第一帧图像进行互相关,互相关值最大处对应的平移量即为该时刻微粒的瞬时位置。

常用的互相关函数包括直接互相关函数、归一化互相关函数和归一化协方差互相关函数等。

(1) 直接互相关函数

$$\mathrm{CO}(u,v)=\sum_{x=-m}^{m}\sum_{y=-n}^{n}f(x,y)\cdot g(x-u,y-v) \tag{1}$$

(2) 归一化互相关函数

$$\mathrm{CO}(u,v)=\frac{\sum_{x=-m}^{m}\sum_{y=-n}^{n}f(x,y)\cdot g(x-u,y-v)}{\sqrt{\sum_{x=-m}^{m}\sum_{y=-n}^{n}f^2(x,y)}\sqrt{\sum_{x=-m}^{m}\sum_{y=-n}^{n}g^2(x-u,y-v)}} \tag{2}$$

(3) 归一化协方差互相关函数

$$\mathrm{CO}(u,v)=\frac{\sum_{x=-m}^{m}\sum_{y=-n}^{n}[f(x,y)-f_0]\cdot[g(x-u,y-v)-g_0]}{\sqrt{\sum_{x=-m}^{m}\sum_{y=-n}^{n}[f(x,y)-f_0]^2}\sqrt{\sum_{x=-m}^{m}\sum_{y=-n}^{n}[g(x-u,y-v)-g_0]^2}} \tag{3}$$

式中:u,v 为待处理图像子区 x 向和 y 向偏移,单位为像素(pixel);m,n 为图像偏移的最大取值,一般为图像子区大小的一半;(x,y)为图像子区像素点坐标;$f(x,y)$为原图像子区灰度值;$g(x-u,y-v)$为待处理图像子区灰度值;f_0 为原图像子区灰度均值;g_0 为待处理图像子区灰度均值。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过求取待处理图像和第一帧图像的互相关函数，找出互相关函数中的极大值点，此时的偏移量即为此刻物体相对初始位置的位移量，由物体初始位置即可知其实时位置信息。

取实验得到的视频的第 1 帧和第 45 帧，令 $u=[-50,50]$，$v=[-50,50]$，图像偏移范围的选择应满足实际应用需求，分别利用公式(1)~(3)计算互相关函数，为便于分析，取 $v=0$ 时互相关函数结果进行对比，结果如图 3~图 5 所示。

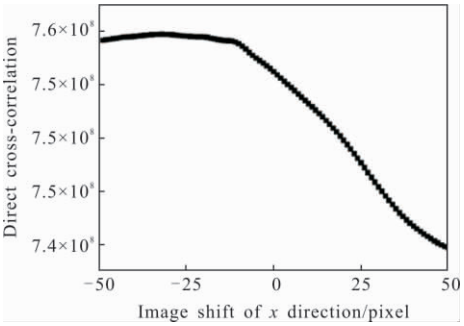

图 3 直接互相关

Fig.3 Direct cross-correlation

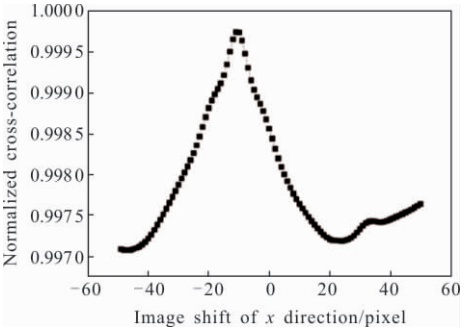

图 4 归一化互相关

Fig.4 Normalized cross-correlation

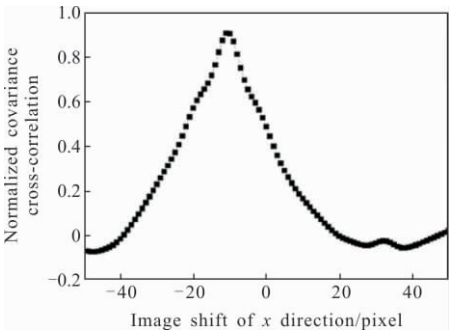

图 5 归一化协方差互相关

Fig.5 Normalized covariance cross-correlation

由图 3~图 5 可知，直接互相关函数曲线左半部分比较平坦，没有明显的峰，很难由该互相关函数结果得出微粒位置量，归一化互相关函数和归一化协方差互相关函数曲线形状类似，都存在明显的峰值，此峰值处对应横坐标即为两幅图像微粒位置量。相比于归一化互相关函数，归一化协方差互相关函数需要计算原图像子区灰度均值和待处理图像子区灰度均值，增加了程序的复杂性，降低了视频处理的效率。因此，选用归一化互相关函数计算微粒的位置量。对选取的两帧图像，进行归一化互相关计算，结果如图 6 所示。

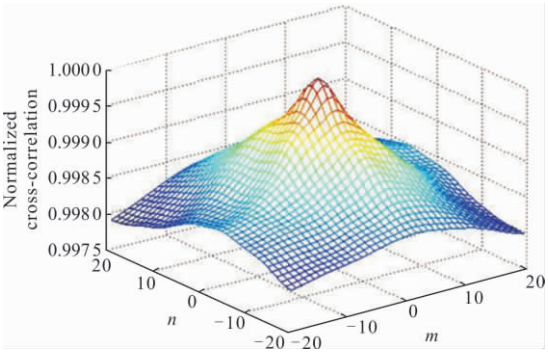

图 6 归一化互相关

Fig.6 Normalized cross-correlation

由图 6 看出，归一化互相关函数最高点为(12,2)，则两帧图像对应的微粒横向和纵向位置分别为 12 pixel 和 2 pixel，由互相关函数直接得到微粒位置的精度仅为 1 pixel，这是由于 CCD 输出只能以整数像素为单位，存在量化效应，导致采用归一化互相关函数进行检测时存在 0.5 pixel 的误差，限制了检测精度的提升。

2.2 二次曲线拟合法

利用归一化互相关函数可实现像素级精度的微粒位置检测，这对于微粒瞬时位置的确定和运动状态的描述具有重要意义。然而，对于高精度的传感和测量应用，像素级精度的位置检测很难满足应用需求。

要想提高检测精度，硬件上可以采取提高 CCD 分辨率或提高显微物镜放大倍数的方法，然而 CCD 的分辨率是有限的，且分辨率越高价格越高，显微物镜的放大倍数提高也是有限的，而随着放大倍数的提高，显微物镜视场也相应减小。可见，采用提高硬件性能的方法很难从根本上满足应用需求，可以考

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

虑采用软件处理来提高检测精度。

一种可行的方案是对图像进行插值，提高相关结果的分辨率，然而这种方案需要大量复杂的计算，工程中很少采用。另一种方案是对自相关结果进行拟合，这种方法精度高、抗噪声能力强，在实际应用中被广泛采用[12]。

由图 6 可知，在峰值附近归一化互相关函数近似为二次函数，由此通过对归一化互相关函数进行二次拟合，提高微粒位置检测精度。

直接对归一化互相关结果进行二次曲面拟合的运算复杂度非常大，运算效率不高，难以实现实时检测。通过取互相关函数峰值点附近正交方向的两条曲线进行二次曲线拟合，将二维拟合简化为两个一维拟合，可大大降低运算的复杂度，有效提高运算效率。

对给定的归一化互相关函数 y，设其关系式为 $y=ax^2+bx+c$，利用最小二乘法进行二次曲线拟合，得到二次曲线的系数 a、b、c，则归一化互相关函数实际的峰值应为 $-b/(2a)$，即为物体的位置信息，由此可以突破硬件限制实现亚像素级精度的物体位置检测，满足微粒位置高精度检测的需求。

为定量分析二次曲线拟合对微粒位置检测精度的改善效果，不妨假设一条自变量取值为整数取值范围为[−50，50]的二次曲线 $y=1-x^2/2\,500$，并在其自变量上叠加±0.5 的随机数噪声，叠加噪声后曲线及拟合结果如图 7 所示。

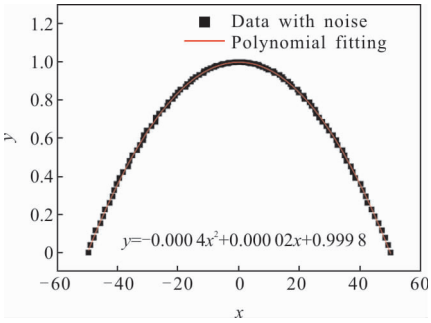

图 7 二次拟合结果

Fig.7 Result of quadratic fitting

原始二次曲线方程为 $y=1-x^2/2\,500$，其峰值位置横坐标为 0，即微粒真实位置为 0，加噪声后，直接取曲线最高点微粒位置误差为±0.5，进行二次拟合后，曲线方程为 $y=-0.000\,4x^2+0.000\,02x+0.999\,7$，其峰值位置横坐标为 0.025，即此时微粒位置误差仅为 0.025，相比于拟合前误差降低了两个数量级。重复进行 5 次仿真，统计结果如表 2 所示。

表 2 二次拟合误差仿真结果

Tab.2 Simulation results of quadratic fitting error

No.	Quadratic term	Linear term	Constant term	Position
1	0.000 4	0.000 02	0.999 7	0.025 0
2	0.000 4	0.000 03	0.999 8	0.037 5
3	0.000 4	0.000 02	0.999 9	0.025
4	0.000 4	0.000 02	1.000 2	0.025
5	0.000 4	0.000 03	1	0.037 5
Average				0.030 0
Standard deviation				0.006 8

经过多次重复仿真，检测误差的均值为 0.03，相比于直接取自相关函数峰值点的方案误差降低了一个数量级以上。

3 实验结果分析

根据上述理论分析，取某次捕获实验得到的视频进行微粒位置状态检测和分析，两个方向的位置检测结果如图 8 和图 9 所示。

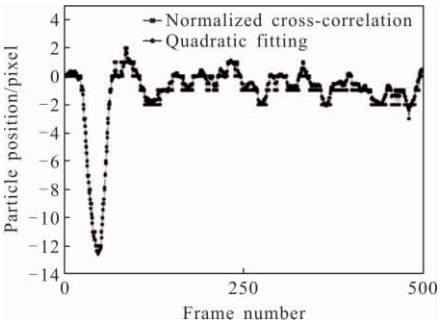

图 8 微粒位置 x 向检测结果

Fig.8 Particle position detection result of x direction

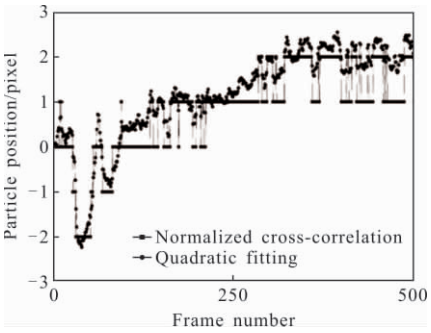

图 9 微粒位置 y 向检测结果

Fig.9 Particle position detection result of y direction

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 8 和图 9 可知，直接相关结果精度仅为 1 pixel，检测结果具有明显的量化现象，而采用二次曲线拟合后，微粒位置检测结果平滑连贯，CCD 输出的量化效应得到有效抑制。从检测结果可知，在实验初期，微粒在 x 向和 y 向都出现了较大的位置反复，这个区域对应于微粒捕获初期，微粒位置相对不稳定，而后微粒两个方向位置逐渐稳定，表明微粒已稳定捕获。检测结果与实际捕获过程很好地吻合。

为对二次拟合效果进行定量分析，不妨取微粒位置 x 向检测结果，将图 8 中两种计算方案的微粒位置 x 向检测结果做差，差分结果即可定量表征二次拟合对相关结果的提升效果，得到结果如图 10 所示。

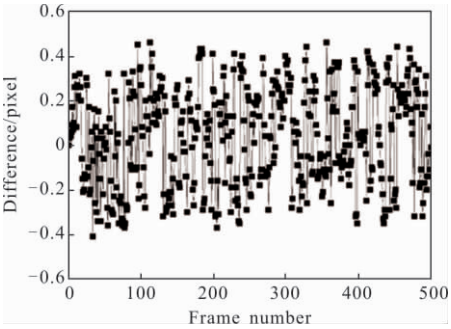

图 10 差分结果

Fig.10 Difference result

由图 10 可知，差分结果具有随机性，这与 CCD 输出量化效应的表现一致，对图 9 的差分结果进行统计分析，分析结果如表 3 所示。

表 3 差分结果统计分析(单位：像素)

Tab.3 Statistical analysis of difference results (Unit:pixel)

Average	Standard eviation	Maximum	Minimum	Peak to peak
0.042	0.218	0.460	−0.410	0.870

由表 3 可知，差分结果均值为 0.042 pixel，接近于 0，表明量化效应带来的误差近似均匀分布。差分结果的分布范围为±0.5 pixel，这与 CCD 量化效应的误差一致，标准差约为 0.218 pixel，可见直接相关方法存在较大的检测误差，采用二次拟合方法可以很好地抑制由硬件量化效应带来的检测误差，相比于直接自相关方法，检测精度可至少提高一个数量级。

4 结束语

近年来，基于光阱技术的传感和测量由于具备潜在的极高检测精度，越来越受到研究人员的追捧和青睐。但是由于光阱束缚光散射和光阱微粒尺寸等因素的影响，传统的检测方案在技术实现上存在很大的障碍。文中提出了一种基于数字图像处理的光阱微粒位置检测方法，通过 CCD 获取微粒实时视频并转换为即时图像，再采用数字图像相关和二次曲线拟合的方法，很好地解决了散射光干扰的问题，实现了亚像素级别的微粒位置检测，为基于光阱技术的高精度传感和测量技术的发展打下了坚实的基础。

参考文献：

[1] Li Yinmei. Optical tweezers-the research and application of the mechanical effect of light [J]. ***Jiangxi Science***, 2005, 23(4): 343−346. (in Chinese)
李银妹. 光镊−光的力学效应的研究及应用[J]. 江西科学, 2005, 23(4): 343−346.

[2] Ashkin A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure phys[J]. ***Rev Lett***, 1970, 24(4): 156−159.

[3] Ashkin A, Dziedic J M, Bjorkholm J E, et al. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles[J]. ***Opt Lett***, 1986, 11(5): 288−290.

[4] Kelleher William P, Smith Stephen P, Stoner Richard E. Optically rebalanced accelerometer[P]. 2001.

[5] Ranjit G, Atherton D P, Stutz J H, et al. Attonewton force detection using microspheres in a dual-beam optical trap in high cacuum[J]. ***Physical Review A***, 2015, 91(5):051805.

[6] Hoang T M, Ma Y, Ahn J, et al. Torsional optomechanics of a levitated nonspherical nanoparticle [J]. ***Physical Review Letters***, 2016, 117(12): 123604.

[7] Monteiro F, Ghosh S, Fine A G, et al. Optical levitation of 10 −ng spheres with nano −g acceleration sensitivity [J]. ***Physical Review A***, 2017, 96: 063841.

[8] Hebestreit E, Frimmer M, Reimann René, et al. Measuring gravity with optically levitated nanoparticles [J]. ***Advanced Photonics***, 2018, 12(9): 806−810.

[9] Chen Jing, Hu Huizhu, Bai Jian, et al. Acceleration measurement device using double beam optical fiber trap[P]: CN200810062996.3, 2010−01−13. (in Chinese)
陈晶, 胡慧珠, 白剑, 等. 利用双光束光纤光阱测量加速度的装置[P]: CN200810062996.3, 2010−01−13.

[10] Feng L S, Jiao H C, Yao B Y. Sensitivity analysis of light force accelerometer based on optical trapping Mie microsphere[J]. ***Optoelectronics Letters***, 2014, 10(1): 77−80.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[11] Chen X, Xiao G, Yang K, et al. Characteristics of the orbital rotation in dual-beam fiber-optic trap with transverse offset [J]. ***Optics Express***, 2016, 24(15): 16952-16960.

[12] Yang Jing, Wu Sijing, Zheng Weiwei, et al. Full-field measurement of micro strain of printed circuit board assembly using digital image correlation [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(11): 1103004. (in Chinese)
杨靖, 吴思进, 郑伟巍, 等. 数字图像相关用于印刷电路板全场微应变的测量 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(11): 1103004.

[13] Lu Zhenhua, Feng Di, Yang Dewei, et al. Accurate detection technology for polarization axis of Panda polarization-maintaining fiber[J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2014, 43(10): 3388-3393. (in Chinese)
刘振华, 冯迪, 杨德伟, 等. 型保偏光纤偏振轴检测技术 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3388-3393.

[14] Pan Bing, Xu Boqing, Chen Ding, et al. Sub-pixel registration using quadratic surface fitting in digital image correlation[J]. ***Acta Metrologica Sinica***, 2005, 26(2): 128-134. (in Chinese)
潘兵, 续伯钦, 陈丁, 等. 数字图像相关中亚像素位移测量的曲面拟合法[J]. 计量学报, 2005, 26(2): 128-134.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net