

摄影测量图像处理的高精度误差补偿法

郝继贵 邹 剑 林嘉睿 叶声华

(天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要 在高精度的摄影测量中, 图像处理精度对整体测量精度起着至关重要的作用, 但成像过程中摄像机对特征点图像的离散化采样, 会造成图像与原始信号的失真, 从而带来图像处理环节的误差。通过对图像处理过程中特征点总能量、能量分布弥散半径和图像处理窗口的特性分析, 并以特征点中心位置、提取误差大小和能量密度函数的标准差之间关系为基础, 提出一种针对离散化采样的误差补偿法。该方法仅需标定一次补偿参数, 适用于所有摄像机和算法, 可显著提升原有图像处理精度。实验证明, 对于质心法和高斯拟合法, 该补偿法可将图像提取精度提高到 0.03 pixel。

关键词 测量; 图像处理; 误差补偿; 提取精度

中图分类号 TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201232.0912004

Error-Compensation Algorithm with High-Accuracy for Photographic Image Processing

Zhu Jigui Zou Jian Lin Jiarui Ye Shenghua

(State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract In the photographic measurement with high precision, the image processing precision plays a crucial role in the overall measurement accuracy. In the process of imaging, the discrete sampling of the feature points by cameras causes a distortion between the received signal and the original image, which brings errors in image processing. By analyzing the total energy, the dispersion radius of energy distribution of the feature points and the image processing windows, and based on the relation of the feature point center position, extraction error and the standard deviation of the energy density function, an error compensation method is proposed for discrete sampling. According to the method, only once calibration of the compensation parameters is needed for any camera and algorithm, and the image processing precision can be improved significantly. The experiments show that for the centroid method and the Gaussian fitting method, the image processing precision can be increased to 0.03 pixel.

Key words measurement; image processing; error compensation; extraction accuracy

OCIS codes 120.4630; 120.4640; 120.4820; 120.6150

1 引 言

摄影测量是一种基于图像处理的测量方法, 具有非接触式、操作简单、适应性强和工作环境要求低等特点, 广泛应用于工业制造领域, 如车辆和船舶制造等方面^[1~4]。图像处理作为摄影测量的重要环节, 其精度制约整体测量精度。一般来说, 特征点提取精度代表着图像处理精度。在摄像机离散化采样成像过

程中的固有误差, 加上由杂散光、CCD 噪声和电子电路产生的随机噪声, 使得图像特征, 尤其特征点中心, 很难准确提取。另外, 随着工业制造的快速发展, 加工装配精度要求越来越高, 在摄影测量应用领域对测量精度的要求可达到 10^{-5} 量级 (0.01 mm/m), 因此必须提高图像处理精度以满足高精度摄影测量需求。

目前国内外大量图像处理研究都集中在数值计

收稿日期: 2012-03-15; 收到修改稿日期: 2012-04-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50735003) 和博士点基金 (0090032110048) 资助课题。

作者简介: 郝继贵 (1970—), 男, 博士, 教授, 主要从事视觉检测、图像处理等方面的研究。E-mail: jigui@tju.edu.cn

算层面上,分析如何更有效地利用图像灰度信息去提高特征提取精度^[5,6],如 Ares^[7]研究的算法中利用阈值设置以提高灰度信息的准确性;Yu 等^[8-10]利用线性插值的方式产生更多数据以减小离散化误差;雷鸣等^[11-14]研究新的亚像素细分算法来提高特征提取精度。然而这些方法并没有分析图像的误差来源,只对离散采样后的能量分布进行计算,没有从根本上真正消除误差,因此图像处理精度均有限,一般都在 0.05~0.10 pixel,无法进一步提高。

图像处理环节可认为是对特征点成像信号的恢复过程,选用成像能量分布均匀且稳定的特征点(如红外 LED)是高精度图像处理的前提。摄像机通过离散化采样来获得能量信息,一方面,由于摄像机像素尺寸无法一直缩小来提高采样频率,并且接收器件灵敏度有限,信号周期无法增大;另一方面为抑制噪声水平,需控制处理窗口大小,从而造成采样长度过低,致使图像处理中获取的原始图像有所失真,若仅从图像方面出发,离散化的采样必定会带来特征提取的误差,且这种误差无法像其他随机噪声可通过环境控制或累次均值的方式予以减小。

本文从图像处理误差的主要来源——离散化采

样误差出发,利用特征点图像能量密度函数近似服从二维高斯分布的特性,以质心法为例,分析了特征点总能量、能量分布弥散半径、图像处理窗口与图像处理误差之间的关系。以此为基础,结合中心位置、误差大小和能量密度函数的标准差之间的关系,提出一种误差补偿方法,通过实验证明了该补偿方法的有效性,针对不同处理算法,图像处理精度都有显著提升。

2 图像处理误差来源

2.1 离散化误差

摄像机成像是指被摄物体的图像经过镜头聚焦至 CCD 芯片上,CCD 上各个像素根据所在区域光的强弱积累相应比例的电荷,各像素积累的电荷在时序控制下,逐点外移,经滤波、放大处理后,形成图像信号输出。因此摄像机成像是将连续分布的图像能量密度函数以像素为间隔进行了离散化采样,测量对象由原始连续分布变成了离散化采样后的失真分布,这种离散化误差必然存在,尤其对覆盖范围较小的特征点,该误差成为提高提取精度的关键。离散化采样过程如图 1 所示。

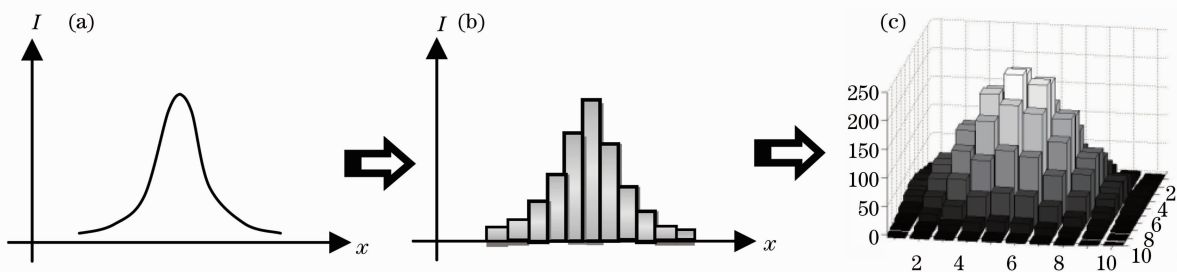


图 1 离散化采样过程。(a)一维图像能量密度函数;(b)离散化采样分布函数;(c)二维离散化采样分布
Fig. 1 Process of discrete sampling. (a) One-dimensional image energy density function; (b) discrete sampling distribution function; (c) two-dimensional discrete sampling distribution

图 1(a)表示特征点图像能量密度函数 x 方向分布函数,摄像机离散化采样是以像素为单位对密度函数进行分段积分,得到图 1(b)的灰度采样分布。而图 1(c)所示的采样分布是二维密度函数经过摄像机离散化采样得到的。

在高精度摄影测量中,常常采用红外 LED 作为稳定的特征点来源,其图像能量密度函数近似于二维高斯函数分布,为图像恢复提供了较好的前提,

$$I(x, y) = \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中 (x_0, y_0) 为真实中心坐标, σ 为高斯函数的标准

差, I_0 为总能量。

则 (x, y) 像素的密度函数采样值 I_{xy} 为

$$I_{xy} = \int_{x=0.5}^{x+0.5} \int_{y=0.5}^{y+0.5} \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right] \times \exp\left[-\frac{(y-y_0)^2}{2\sigma^2}\right] dx dy. \quad (2)$$

在图像处理算法中,质心法和高斯曲线拟合法是特征点提取的主要亚像素算法,它们都是基于特征点中心位置和灰度值的数学模型来确定特征中心。质心法是特征点在图像平面成像时,图像能量密度函数一阶空间矩和零阶空间矩的比值,由像平面的能量重心来代替真实中心,即满足

$$\begin{cases} X_Z = \frac{\iint_{A_{xy}} xI(x,y)}{\iint_{A_{xy}} I(x,y)} \\ Y_Z = \frac{\iint_{A_{xy}} yI(x,y)}{\iint_{A_{xy}} I(x,y)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 X_Z, Y_Z 是计算出来的质心, A_{xy} 为处理窗口, 它包含了特征点所有的有效像素点。但是真实图像是通过离散采样的, 只能使用像素点位置的采样值来代替连续积分, 则(3)式可写成

$$\begin{cases} X'_Z = \frac{\sum_{A_x} xI_{xy}}{\sum_{A_x} I_{xy}} \\ Y'_Z = \frac{\sum_{A_y} yI_{xy}}{\sum_{A_y} I_{xy}} \end{cases}. \quad (4)$$

计算方式由区域连续积分变成了离散点求和, X'_Z, Y'_Z 是新计算出来的质心, A_x, A_y 分别为 A_{xy} 的 x, y 方向的分布范围。由于以像素几何中心坐标代替连续积分, 质心法求解结果必然带有误差, 只有在特征点能量密度函数的平衡点恰好是像素几何中心位置时, 计算结果才相同的。

其他算法和质心法一样, 都是以离散化采样后的像素几何中心坐标来代替原有的连续积分参加计算的, 即其计算结果都是失真后的分布平衡点, 则必然和原始函数的平衡点有一定误差, 只要离散化采样后的函数与原始函数存在失真, 这种误差就一直存在, 无法消除。但由于摄像机自身像素尺寸加工受限, 无法一直缩小来提高采样频率; 接收器件超过最高限度就会饱和, 信号周期无法一直增大; 处理窗口由于要抑制噪声水平而不宜过大, 致使采样长度过低, 因此离散采样后图像与原特征点信号存在的失真不可避免, 失真所引起的误差可认为是图像处理过程中的主要误差。

离散化采样引起的误差大小可利用对一维运动的特征点进行拍摄提取来确定, x 和 y 方向在计算时具有同等的地位, 因此只对 x 方向进行分析, 图 2 为不同提取算法 x 方向的实际提取坐标和理论坐标比较。图 2 中虚线为理论坐标, 实线表示实际提取坐标, 两者之间的偏差便是图像处理误差。对于质心类或拟合类等不同算法, 误差形式基本一致, 仅大小略有不同, 误差呈现出像素的周期性变化^[15,16], 只有当真实中心恰好是像素几何中心位置时, 误差基本为零, 与之前分析一致。如果能对此误差进行分析和补偿, 便可有效提升算法精度。

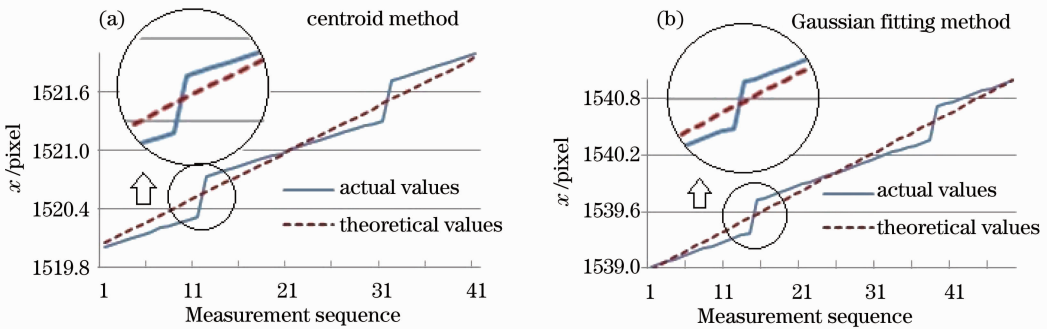


图 2 图像处理误差

Fig. 2 Errors in image processing

2.2 误差特性

特征点提取精度所反映的便是信号失真水平, 在理想状态下, 由采样定理可知: 1) 失真只与采样频率、信号频率和采样长度相关, 与信号幅值无关, 即误差与光强无关; 2) 当采样频率和采样长度不变时, 失真与信号的周期成正比, 即处理窗口一定时, 误差与能量密度函数的弥散半径成正比; 3) 当信号和采样频率不变时, 失真与采样长度成反比, 即能量密度函数一定时, 误差与处理窗口大小成反比。特

征点提取误差就是能量密度函数的平衡点和离散化采样后函数的平衡点之间的差值, 对于质心法便是(3)、(4)式的差值。下面便以质心法为例从上述三个方面对特征提取误差特性进行分析。

2.2.1 光强影响

特征点光强大小由(1)、(2)式中的 I_0 表示, (3)、(4)式的分子分母均含有 $I(x, y)$ 项或 I_{xy} 项, 其最终计算结果与 I_0 项无关, 即理论误差与光强大小无关。但实际测量时或多或少都会引入噪声影响,

图 3 表示在相同位置取实测中心灰度值在 100~255 之间的三组特征点图像进行误差比较。可得实测误差随着光强增大在逐渐减小,这是由于噪声加

入后,光强越高,信噪比就越高,对噪声的抗干扰能力越强,因此噪声带来的误差就减小。

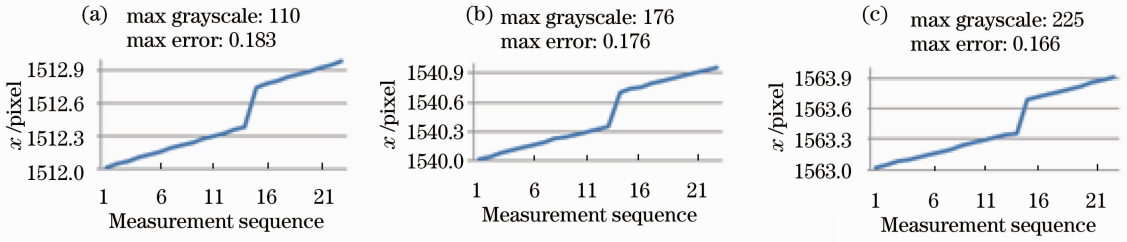


图 3 不同光强下实测误差

Fig. 3 Measured error under different light intensities

2.2.2 弥散半径影响

图像能量密度函数可近似认为是二维高斯分布,分布函数的弥散半径应该约等于 3 倍函数标准差(3σ)。由(3)式与(4)式可知,两者的处理窗口 A_{xy} 是一致的,两者计算结果差异很小,因此其差值中分子的比重较小,与分母关系较大,即误差与参与计算的函数积分大小有关,并成反比。图 4 为不同标准差下的一维高斯曲线分布,当处理窗口 A_{xy} 一定时,标准差 σ 越大函数积分越小,则误差越大,因此误差与能量密度函数的标准差 σ 成正比。实测时的噪声只对能量的幅值有影响,对整体图像能量的分布影响较小,仍然遵循此规律。

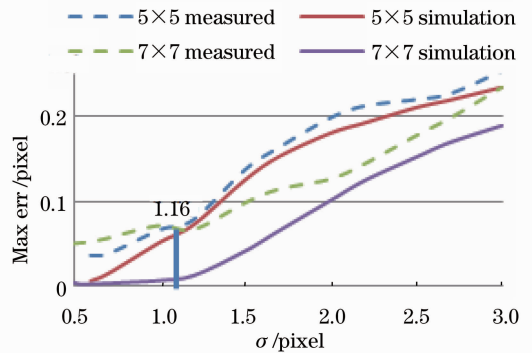


图 5 最大误差分布

Fig. 5 Distribution of maximum error

之前的分析是一致的。但对比实测和理论分布,由于噪声影响实测误差大于理论误差,当处理窗口一定时,误差与能量密度函数的标准差 σ 仍然成正比关系,但误差与处理窗口大小不再是反比关系,约以 $\sigma=1.16$ 为分界线。当 σ 小于 1.16 时,误差与处理窗口大小却成正比关系;当 σ 大于 1.16,误差与处理窗口大小才成反比关系。对于高斯分布,当 σ 小于 1.16, 7×7 处理窗口大于 6σ ,引入的噪声干扰比重较大,使整体信噪比下降,降低提取精度。因此处理窗口大小的选取应以 6σ 为基准选取,过小会损失多大量图像信息,过大则引入较多噪声。

以上分析表明,图像处理的误差与光强大小成反比,但影响较小;当处理窗口一定时,误差与能量密度函数的标准差 σ 成正比;处理窗口大小的选取应以小于 6σ 为基准,满足此条件下,在标准差 σ 一定时,误差与处理窗口大小成反比。

3 补偿方法

离散化采样使得图像处理环节必然存在误差。目前所有处理算法都是针对离散采样后的灰度信

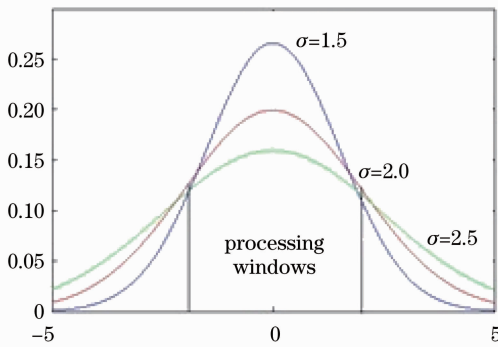


图 4 高斯曲线分布

Fig. 4 Gaussian-curve distribution

2.2.3 处理窗口影响

由上述分析可知,误差和能量密度函数积分大小有关,当标准差 σ 一定时,处理窗口 A_{xy} 越大则参与的积分区域也越大,误差就越小,因此误差与处理窗口大小成反比。根据(3)、(4)式的仿真和实测结果便可得到不同处理窗口下,不同标准差 σ 下最大误差理论与实测的分布, σ 的取值根据实测范围定为(0.5,3),如图 5 所示。

由图 5 中的理论曲线可知,误差的变化规律与

息,针对的对象都是采样之后的分布平衡点,无法真正消除误差,使提取精度都大于 0.05 pixel。倘若直接利用解析方法,通过误差模型函数求取误差,则需对不同算法分析不同误差模型,难度较大,方法也较为繁琐。本文通过仿真拟合的方式,通过特征点中心位置、提取误差大小和能量密度函数标准差 σ 之间的对应关系,利用最小二乘法进行曲线拟合,求得最佳拟合曲线,以此对误差进行补偿。

3.1 中心位置和误差关系

假设特征点中心在某个像素内部,将像素分为 100 等分,每次中心移动 0.01 pixel,仿真计算出每次移动后的中心,通过对 x 方向的分析得到如图 6 所示的不同算法提取点的分布,可见不同算法的提取点在单个像素内都是成直线分布的,结合图 2、3 的数据,得出实测中单个像素的提取点也基本呈直线分布,仅由于噪声影响使直线不够平滑。

则误差 Δx 和中心位置 x 方向的关系也是成直线分布的,理论直线中误差 Δx 为零,将其斜率定义为 1,便可得到其他算法的直线分布方程:

$$\Delta x = (k - 1)x. \quad (-0.5 < x < 0.5) \quad (5)$$

由于方程表述的是误差和中心位置的关系,与像素分割的份数和间隔大小无关,只需保证每次间隔一致即可,便可得到不同位置不同算法下直线分布相

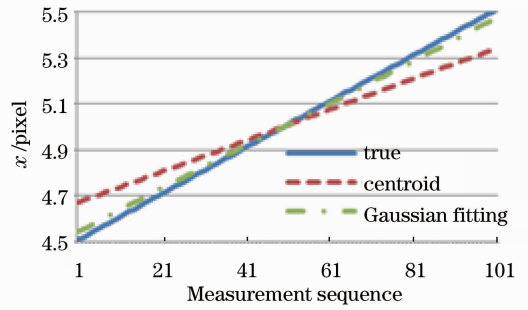


图 6 不同算法提取点直线分布

Fig. 6 Linear distribution of extraction points by different algorithms

应的斜率 k 以及误差 Δx 和中心位置 x 方向的关系。

3.2 中心位置和标准差关系

在特征点的图像能量密度函数标准差 σ 一定时,通过仿真可得到在单个像素内每次移动后高斯拟合得到的标准差分布,如图 7 所示。由于离散化采样的影响,高斯拟合出的标准差 σ 是呈 2 次曲线分布的,其极小值最接近于真值。

再对不同距离的特征点进行实际测量拟合,可得到如图 8 的单像素内标准差实际分布,得出与理论仿真一致,也由于噪声使其不够平滑。因此可得到标准差 σ 和中心位置的表达式:

$$\sigma = P_1x^2 + P_2. \quad (-0.5 < x < 0.5) \quad (6)$$

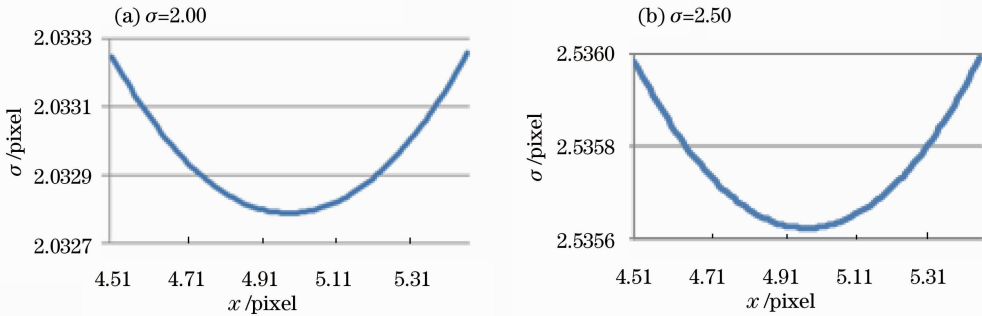


图 7 单像素内标准差仿真分布

Fig. 7 Simulated distribution of standard deviation in single pixel

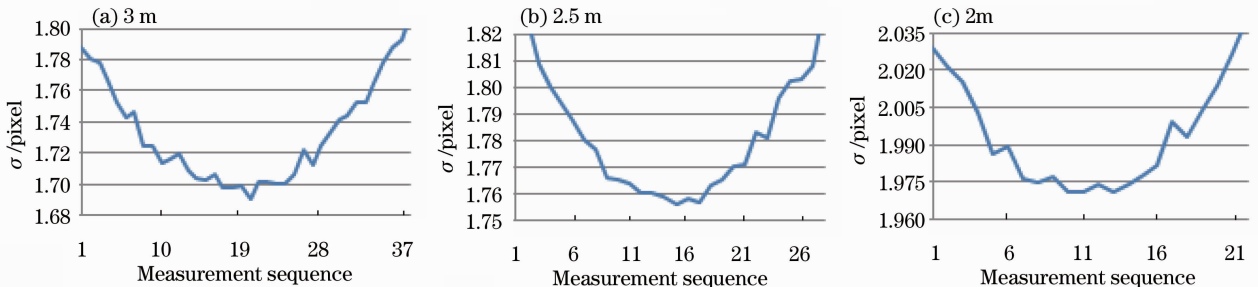


图 8 单像素内标准差实际分布。(a) 3 m; (b) 2.5 m; (c) 2 m

Fig. 8 Measured distribution of standard deviation in single pixel. (a) 3 m; (b) 2.5 m; (c) 2 m

3.3 补偿方法

根据得到的特征点中心位置、提取误差大小和能量密度函数的标准差 σ 之间的对应关系,就可对该位置的提取坐标进行补偿。若在不同位置都得到三者之间的关系,根据(5)式和(6)式,并通过最小二乘法进行曲线拟合得出两组关系: $k = f_1(P_2)$ 和 $P_2 = f_2(\sigma)$ 。保证最后的补偿精度低于 0.05 pixel,拟合的 RMS 应小于 0.05,并尽量使用低阶曲线。最后通过(5)式便可计算得到该点对应的误差,从而对初提取出的坐标进行补偿修正。

设任意提取点的坐标为 (x_i, y_i) ,拟合的标准差为 σ_i 以及 $k = f_1(P_2)$ 和 $P_2 = f_2(\sigma)$,都代入(5)式从而得出每点 X 方向的补偿值:

$$x_p = \{f_1[f_2(\sigma_i)] - 1\}x_{ix}, \quad (7)$$

式中 x_{ix} 为 x_i 的小数部分 ($-0.5 < x_{ix} < 0.5$),则得到补偿后的坐标 $(x_i + x_p, y_i + y_p)$ 。

4 实验验证

实验采用 DALSA 相机(PT-21-11M04-11E)进行验证,分辨力为 4032 pixel×2672 pixel,像素大小为 9 μm ,镜头焦距为 25 mm。特征点采用波长为 890 nm 的红外 LED。将特征点固定在一维微动平台(精度为 1 μm)上,每次移动 10 μm ,在不同位置进行拍摄,并用质心法进行中心提取,每次运动均超过一个像素并进行多次以减小其他噪声的影响。解算获得不同位置的 P_1 、 P_2 、 k 数值,如表 1 所示。

表 1 实验数据

Table 1 Experimental data

Distance /m	P_1	P_2	k
1.7	0.7495	2.187	1.720
1.8	0.6374	2.118	1.600
1.9	0.7158	2.029	1.652
2.0	0.7504	1.970	1.555
2.1	0.6784	1.917	1.480
2.2	0.7606	1.869	1.490
2.3	0.6325	1.817	1.431
2.4	0.7521	1.807	1.412
2.5	0.7561	1.786	1.411
2.6	0.7850	1.757	1.420
2.7	0.7726	1.752	1.384
2.8	0.7758	1.738	1.398
2.9	0.6253	1.685	1.345
3.0	0.7361	1.696	1.320

通过表 1 的计算数值得出图 9 所示的参数分布关系。图 9(a)中, P_1 和 P_2 无法用单一的曲线来表示关系,但 P_1 变化量仅在 0.1 左右,其引起 P_2 的变

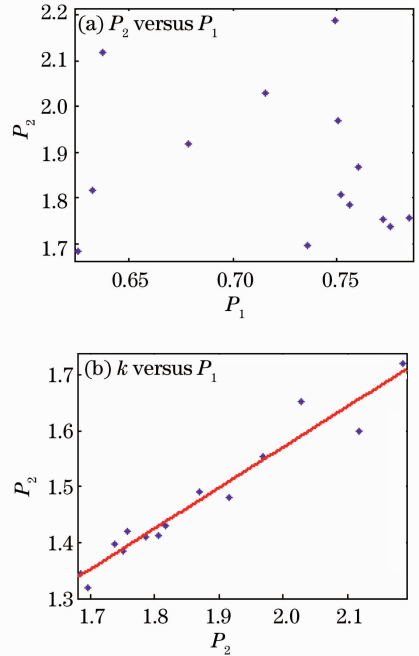


图 9 k 、 P_1 和 P_2 的关系分布

Fig. 9 Relation of k , P_1 and P_2

化不到 0.025,因此 P_1 可直接取均值 0.7214,则 $P_2 = f_2(\sigma)$ 为

$$P_2 = \sigma - 0.7214\sigma^2. \quad (8)$$

如图 9(b)所示, k 和 P_2 仅用一阶曲线便可较好拟合两者关系,RMS 仅为 0.029,得 $k = f_1(P_2)$:

$$k = 0.7295P_2 + 0.1112. \quad (9)$$

由(5)式得到 x 方向的补偿公式:

$$x_p = (0.7295\sigma_i - 0.5263x_{ix}^2 - 0.8888)x_{ix}. \quad (10)$$

任取一质心法处理后坐标 ($x = 1664.771, y = 1693.866$)及该点处标准差 $\sigma = 1.815$,通过(10)式便可以算出 x 方向的补偿量为 -0.093 ,同理计算出 y 方向补偿量为 -0.057 ,则补偿后的坐标为 (1664.678, 1693.809)。

如图 10 所示,通过质心法补偿后曲线基本和理论直线一致,误差明显减小,可有效提高图像处理的精度。表 2 是对各个距离补偿后求取的斜率值,与理论 $k = 1$ 最大偏差仅为 0.0696,图像处理最大误差不超过 0.0348 pixel。而原来质心法最大提取误差都在 0.1 pixel 以上,补偿效果非常明显。

为验证该补偿方法对不同算法的有效性,针对高斯拟合法也按照之前的步骤进行补偿,得到图 11 所示的补偿前后比较图,其补偿后的最大误差不超过 0.02835 pixel,可见该补偿方法对不同算法均有效。

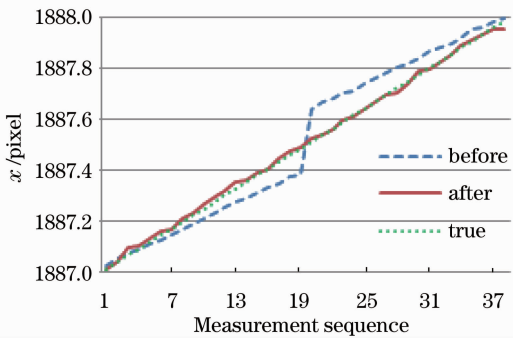


图 10 质心法补偿前后结果对比

Fig. 10 Comparison of the results by the centroid method before and after compensation

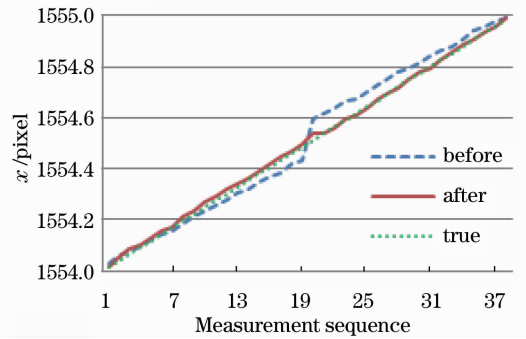


图 11 高斯拟合法补偿前后结果对比

Fig. 11 Comparison of the results by the Gaussian fitting method before and after compensation

表 2 质心法补偿后斜率值

Table 2 Slope after compensation by the centroid method

3.0 m	2.8 m	2.6 m	2.4 m	2.2 m	2.0 m	1.8 m
0.9304	0.9548	0.9592	0.9881	0.9571	0.94	1.052

表 3 高斯拟合法补偿后斜率值

Table 3 Slope after compensation by the Gaussian fitting method

3.0 m	2.8 m	2.6 m	2.4 m	2.2 m	2.0 m	1.8 m
0.9527	0.9433	0.9672	0.9867	0.9923	0.9635	1.021

5 结 论

本文主要对图像处理误差的高精度补偿方法进行的研究,针对摄像机离散化采样是图像处理的主要误差源,首先在理论和实测情况下,分析了图像处理误差和光强、能量密度函数的标准差、图像处理窗口的对应关系。以此为基础,通过曲线拟合得到特征点中心位置、提取误差大小和能量密度函数标准差 σ 之间关系,从而获得一种图像提取误差的补偿方法。实验证明该补偿方法对质心法和高斯曲线拟合法都有效,可使图像处理精度至少提高到 0.05 pixel。该方法适应性强、稳健性好,不同相机和算法在使用时只需标定补偿参数,便可使图像处理精度有显著的提升。

参 考 文 献

- Zhu Jigui, Guo Lei, Liu Changjie *et al.*. Measurement system of flexible electronic checking fixture on robot [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2011, **19**(8): 1787~1793
郝继贵,郭磊,刘常杰等.基于机器人的柔性电子检具测量系统[J].*光学精密工程*, 2011, **19**(8): 1787~1793
- Zhu Jigui, Guo Lei, Ye Shenhua. Principle and implementation method of three-dimensional precision positioning in large field working space[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1872~1876
郝继贵,郭磊,叶声华.现场条件下大空间三维精密定位原理与方法[J].*光学学报*, 2009, **29**(7): 1872~1876
- Fu Sinhua, Yu Qifen, Wang Mingzhi *et al.*. Railway geometric

- parameters measurement system based on videometrics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3203~3208
- 伏思华,于起峰,王明志等.基于摄像测量原理的轨道几何参数测量系统[J].*光学学报*, 2010, **30**(11): 3203~3208
- Gao Gui, Yang Xichen, Zhang Haiming. Study of binocular vision system calibration in laser remanufacturing robot [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1868~1872
- 高 贵,杨洗陈,张海明.激光再制造机器人双目视觉系统标定研究[J].*中国激光*, 2010, **37**(7): 1868~1872
- G. A. W. West, T. A. Clarke. A survey and examination of subpixel measurement techniques [C]. Zurich: Proceedings of Close-Range Photogrammetry Meets Machine Vision, 1990. 456~463
- Yang Yong, Wang Yanlei, Li Ming. Research of high-accuracy digital image correlation measurement system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(2): 197~201
杨 勇,王琰蕾,李 明.高精度数字图像相关测量系统及其技术研究[J].*光学学报*, 2006, **26**(2): 197~201
- J. Ares, J. Arines. Influence of thresholding on centroid statistics: full analytical description [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43**(311): 5796~5805
- Yu Zhijing, Chen Gang. Bilinear interpolation centroid algorithm using for circular optical target location [C]. *SPIE*, 2002, **4875**: 333~339
- Liu Changying, Gao Yinhan. Squared gray weighted centroid algorithm based on bi-cubic interpolation [C]. 5th International Symposium on Instrumentation Science and Technology, 2009, 7133: 71332B
- Bai Junqi, Chen Qian, Wang Xianya. An improved high-resolution reconstruction algorithm for staring infrared image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 86~90
白俊奇,陈 钱,王娴雅.一种改进的凝视红外图像高分辨率重建算法[J].*光学学报*, 2010, **30**(1): 86~90

- 11 Lei Ming, Zhang Guangjun. Image orientation algorithm with subpixel accuracy based on correlative matching method [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 108~113
雷 鸣, 张广军. 基于互相关的图像匹配亚像素定位[J]. *光电工程*, 2008, **35**(5): 108~113
- 12 Wei Zhenzhong, Gao Ming, Zhang Guangjun *et al.*. Sub-pixel extraction method for the center of light-spot image [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(4): 7~12
魏振忠, 高 明, 张广军等. 一种光斑图像中心的亚像素提取方法[J]. *光电工程*, 2009, **36**(4): 7~12
- 13 Tang Shengjin, Zhou Zhaofa. Improved iteration centroid algorithm based on linear CCD light-spot location[C]. The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009. 438~440
- 14 Guo Yubo, Yao Yu, Di Xiaoguang *et al.*. Improved sub-pixel algorithm [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(10): 137~140
郭玉波, 姚 郁, 遆晓光等. 一种改进的亚像素算法[J]. *光电工程*, 2006, **33**(10): 137~140
- 15 Chen Yunjin, Feng Ying, Wei Li'an *et al.*. Experiment research on subpixel location error of the facular centroid [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(2): 80~84
陈运锦, 冯 莹, 魏立安等. 光斑质心亚像素定位误差的实验研究[J]. *光电工程*, 2010, **37**(2): 80~84
- 16 Yang Jun, Zhang Tao, Shong Jingyan *et al.*. High accuracy error compensation algorithm for star image sub-pixel subdivision location [J]. *Optics & Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 1002~1010
杨 君, 张 涛, 宋靖雁等. 星点质心亚像素元定位的高精度误差补偿法[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(4): 1002~1010

栏目编辑: 何卓铭