

文章编号 1004-924X(2011)01-0168-07

高精度影像测量系统中图像的超分辨率重建

张 进,王 仲,李雅洁,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:为了提高影像测量系统的测量精度,研究了基于微位移错位的多幅图像超分辨重建技术。考虑制作成本和制作难度,提出了一种不苛求精确微位移的超分辨率重建技术。首先,获取随机微位移图像序列;然后,利用被测对象中易于实现高精度提取的特征点或采用模板衬底中的特征点计算出图像序列间的准确位移关系;最后,根据本文提出的数学模型重建出高分辨率图像并用于影像测量。实验结果显示,在图像分辨率提升至原始图像 4 倍时,对于不同大小的微位移,测量精度提升了 29%~64%,表明该方法能够有效地重建出包含被测信息的高分辨率图像,进而提升影像测量系统的精度。

关键词:图像重建;超分辨率;影像测量;序列图像

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111901.0168

Super-resolution reconstruction of image in high accuracy image measuring system

ZHANG Jin, WANG Zhong, LI Ya-jie, YE Sheng-hua

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

Abstract: To improve the measuring accuracy of an image measuring system, the super-resolution image reconstruction technology for an image sequence is researched based on the micro-displacement. As the high accurate micro-displacement is difficult to realize and very expensive, a super-resolution reconstruction method which doesn't require the high accurate micro-displacement is proposed. Firstly, the image sequence based on an arbitrary micro-displacement is obtained. Then, the accurate micro-displacement of image sequence is calculated by the feature points of a tested object or a template using a substrate. Finally, the high-resolution image is reconstructed by the mathematical model proposed in this paper for radiographic measurement. The experimental results indicate that when the image resolution is 4 times that of an original image, the measurement accuracy will promote 29% to 64% according to the different micro-displacements, which shows the method can reconstruct a high-resolution image including tested objects effectively, and can improve the accuracy of the system.

Key words: image reconstruction; super resolution; image measuring; image sequence

收稿日期:2010-06-23;修订日期:2010-08-12.

基金项目:国家高档数控机床与基础制造装备重大科技专项(No. 2009ZX04014-092)

1 引言

在影像测量技术中,测量精度与视场一直是难以调和的矛盾。为了保证测量精度,通常将单幅图像的视场收缩在很小的范围内,而这又会严重影响测量效率。随着影像测量技术凭借其非接触、高精度、智能化等优点在工业现场的广泛应用,如何在保证测量效率的前提下提高测量精度,或者在保证测量精度的前提下提高测量效率,已经成为当今诸多学者研究的热点。研究表明,采用高分辨率的图像传感器器件(CCD)和成像系统可以直接有效地提高系统的测量精度。然而,受现阶段工艺水平的限制,高分辨率的 CCD 和成像系统或无法实现或成本昂贵。而且,基于单幅图像提升图像分辨率的超分辨率技术,虽然在理论上能够实现,在工程应用中却由于没有新的信息来提高原始图像的分辨能力,大部分情况下效果并不理想^[1]。

近年来,基于多幅图像的超分辨率重建技术作为提高原始图像分辨率的有效手段得到越来越多的关注^[2-5]。由于图像序列间彼此含有类似但又不完全相同的互补信息以及一定的先验信息,因而恢复出更加真实、有效的高分辨率图像是可能的,这也是将序列图像所包含的时间分辨率转化为空间分辨率的过程^[6]。在查阅的文献中,适用于影像测量的超分辨率重建技术均是基于精确的亚像素级微位移获取图像序列^[7-9],但在实际应用中,如此精确的微位移很难实现,即使实现其付出的代价会比选购高分辨率传感器还要昂贵。如分光法、双折射晶体法和压电陶瓷法等,分光法的光路较为复杂,系统调试困难,如此高精度的 CCD 位置要求本身就难以实现,另外该系统需要采用多个 CCD 接收器件,成本昂贵;双折射晶体法中光路部分结构也比较复杂,双折射晶体的厚度和入射光的偏角都会造成亚像素微位移的偏差;压电陶瓷法中高精度的压电陶瓷体微位移装置成本昂贵,仅在实验室中获得了应用^[10]。为此,本文针对影像测量系统,提出了基于随机微位移错位的多幅图像超分辨率重建技术,旨在利用不苛求精确微位移的图像序列重建出一幅高分辨率的图像,从而避免采用难以实现的高精度微位移控制系统,使基于微位移错位的多幅图像超分

辨率重建技术能够有效地应用于影像测量系统,提高系统测量精度。

2 亚像素错位图像序列的获取

具有亚像素错位的图像序列是进行超分辨率重建的前提,由于本文提出的重建算法并不苛求精确的亚像素位移,因此可以首先利用精度相对较低的低成本二维移动台来获得互有微位移的图像序列;然后利用图像序列中相同的特征点来计算出微位移量的大小,由于在高精度的影像测量系统中该微位移通常难以保证为亚像素量级,最终需对序列图像间整像素大小的位移量进行图像平移,从而获得具有亚像素微位移的图像序列。

2.1 图像序列获取系统

本文所搭建的影像测量系统原理图如图 1 所示,计算机通过 PLC 控制系统可以使得二维工作台分别在 X 方向和 Y 方向产生移动,从而带动成像系统和载物台间产生位移,其中经过系统调节,二维工作台的移动方向与 CCD 相机图像坐标系的方向基本一致,且二维工作台导轨的直线度精度较高,误差可以忽略不计。

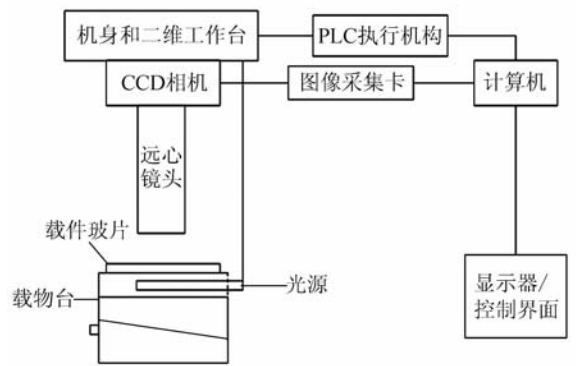


图 1 影像测量系统原理图

Fig. 1 Block diagram of image measuring system

利用该系统能够以较为低廉的成本来获得具有微位移的图像序列,图像序列中均包含完整的被测对象的信息,然后利用图像中的特征点来计算微位移的大小。其中,圆心坐标的提取精度通常优于 0.1 pixel,能够满足高精度的定位要求。当被测对象中不存在圆心等提取精度较高的几何对称中心点时,可以在工作台上加装刻有特殊图案的高精度光刻玻璃模板作为被测对象的衬底,

使得被测对象与模板图案同时成像,成像过程中被测对象与模板的相对位置保持不变,此时获得的图像序列中同时包含完整的被测对象信息和模板图案信息,从而利用提取精度相对较高的模板特征点来计算图像序列间微位移的大小。

2.2 整像素图像平移

通过对相同的特征点坐标的高精度提取,可以较为精确地得到图像序列间的微位移关系。图像序列间的微位移量若均小于一个像素,那么可以直接利用该图像序列进行超分辨率重建。而在多数情况下,随机的微位移量通常会超过一个像素,甚至达到几十个像素,因此为了得到被测对象间具有亚像素错位的图像序列,需要对图像中的被测信息进行整像素平移。

设图像序列的第一幅图像中特征点的坐标为 (x_0, y_0) , 相同特征点在另一幅图像中的坐标为 (x_1, y_1) , 则两幅图像间的微位移可以表示为:

$$\begin{cases} \Delta x = x_1 - x_0 = n_1 \lambda + n_2 \lambda \\ \Delta y = y_1 - y_0 = m_1 \lambda + m_2 \lambda \end{cases}, \quad (1)$$

其中, λ 代表整像素单位, n_1, m_1 为整数, $-1 < n_2, m_2 < 1$ 。

设图像矩阵的大小为 i (行) $\times j$ (列), 保持第一幅图像不变, 将另一幅图像矩阵的第 $1 \sim n_1$ 行分别平移至新矩阵 M 的 $(i - n_1) \sim i$ 行, 第 $(n_1 + 1) \sim i$ 行分别平移至新矩阵 M 的 $1 \sim (i - n_1 + 1)$ 行; 然后对新矩阵 M 的第 $1 \sim m_1$ 列分别平移至新矩阵 N 的 $(i - m_1) \sim i$ 列, 新矩阵 M 的第 $(m_1 + 1) \sim i$ 列分别平移至新矩阵 N 的 $1 \sim (i - m_1 + 1)$ 列, 最后得到的矩阵 N 即为完成图像平移的图像矩阵, 其中包含被测对象信息的部分与第一幅图像相比仅存在亚像素级的位移偏差 $(n_2 \lambda, m_2 \lambda)$ 。

图像序列中的其余图像均采用相同的方法以第一幅图像为基准进行平移, 最终获得了互有亚像素微位移的图像序列。

3 基于随机微位移的超分辨率重建

在得到具有亚像素位移的图像序列之后, 就可以利用该图像序列来进行超分辨率重建, 以获得一幅高分辨率图像。本文首先介绍了重建的一维模型, 其次以 4 幅图像序列为例, 推导了重建出分辨率提高至原始图像 4 倍的高分辨率图像重建算法。

3.1 一维模型

由于在影像测量中采用的 CCD 相机通常为宽像元, 忽略像元间的间距, 以两幅互有微位移的图像序列为例, 建立超分辨率重建算法的一维模型如图 2 所示。

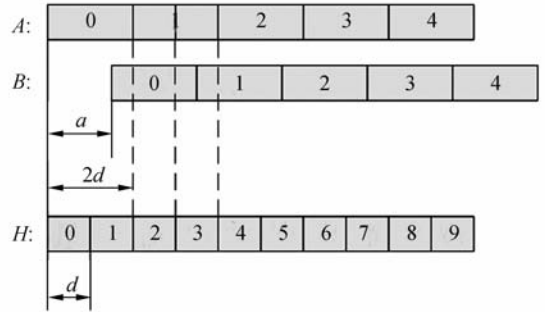


图 2 一维模型

Fig. 2 One-dimensional model

A, B 是像元大小均为 $2d$, 分辨率为 N , 亚像素微位移的大小为 a 的两幅原始图像; H 是要重建的分辨率为 $2N$ 的图像, H_i 代表 H 的灰度值。由于图像中 H_0 和 H_1 所对应的场景由于错位的关系仅在 A 中成像而未在 B 中成像, 因此在重建 H 的过程中, 可近似地使 $H_0 = H_1 = A_0$, (在实际应用中, 错位部分一般为背景信息, 不包括目标信息, 因此并不影响对被测对象信息分辨率的提升)。对于 $H_2, H_3 \dots$ 可以根据与 A, B 的对应关系以及所占的权重关系来进行重建, 经推导, 得到公式(2)和公式(3): 当 $0 < a \leq d$ 时,

$$\begin{cases} H_0 = A_0 \\ H_1 = (A_0 + B_0)/2 \\ H_2 = A_1/2 + [a \cdot B_0 + (d-a)B_1]/2d \\ H_3 = (A_1 + B_1)/2 \\ \dots\dots \\ H_{2n} = A_n/2 + [a \cdot B_{n-1} + (d-a)B_n]/2d \\ H_{2n+1} = (A_n + B_n)/2 \end{cases}, \quad (2)$$

当 $d < a < 2d$ 时,

$$\begin{cases} H_0 = H_1 = A_0 \\ H_2 = (A_1 + B_0)/2 \\ H_3 = A_1/2 + [(a-d)B_0 + (2d-a)B_1]/2d \\ \dots\dots \\ H_{2n} = (A_n + B_{n-1})/2 \\ H_{2n+1} = A_n/2 + [(a-d)B_{n-1} + (2d-a)B_n]/2d \end{cases}, \quad (3)$$

根据此公式即可计算出高分辨图像各像元的灰度值。对于利用 $N(N>2)$ 幅互有微位移的图像来重建一幅分辨率扩大 N 倍的单幅图像,也可按相同的方法进行重建。受篇幅的限制,本文不再详述。

3.2 二维图像的超分辨率重建

将 3.1 中的一维模型推广至整个二维图像,即可以实现图像序列的超分辨率重建。本文以 4 幅原始图像序列重建出一幅分辨率提高至 4 倍的高分辨率图像为例,给出了重建过程。

如图 3 所示, A, B, C, D 为 4 幅互有位移的低分辨率图像, H 为重建的高分辨率图像。以图像 A 左上角的顶点为原点,沿图像坐标系方向建立坐标系,那么 B, C, D 幅图像左上角的顶点坐标分别为 $(\Delta x, 0), (0, \Delta y), (\Delta x, \Delta y)$, 其中 Δx 和 Δy 分别为经过图像整像素平移后的互有亚像素错位的图像序列间横向和纵向的亚像素微位移大小。根据 A, B, C, D 中不同像素在相应高分辨

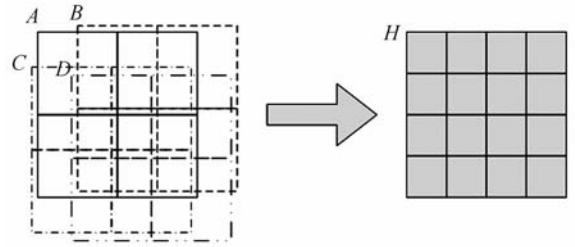


图 3 二维图像超分辨率重建示意图

Fig. 3 Framework of super-resolution image reconstruction

率的网格上所对应的面积比作为权重关系,进行网格灰度值的计算,从而得到包含目标信息的高分辨率图像 H 。由于在图像整像素的平移过程中,能够使得 $|\Delta x, \Delta y| \leq 0.5\lambda$, 其中 λ 为原始图像的像素大小,此时,对于高分辨率网格上的边缘像素(不包含被测信息的错位部分),仍用图像 A 中相应的像素代替,经推导,得到的高分辨率图像重建算法见公式(4):

$$\left\{ \begin{array}{l} H(2i-1, 1) = A(i, 1), H(1, 2j-1) = A(1, j) \\ H(2i, 1) = A(i, 1), H(1, 2j) = A(1, j) \\ H(2i, 2j) = 0.25[A(i, j) + B(i, j) + C(i, j) + D(i, j)] \\ H(2i+1, 2j) = 0.25[A(i+1, j) + B(i+1, j) + 2bC(i, j) + (1-2b)C(i+1, j) + 2bD(i, j) + (1-2b)D(i+1, j)] \\ H(2i, 2j+1) = 0.25[A(i, j+1) + C(i, j+1) + 2aB(i, j) + (1-2a)B(i, j+1) + 2aD(i, j) + (1-2a)D(i, j+1)] \\ H(2i+1, 2j+1) = 0.25[A(i+1, j+1) + 2bB(i+1, j) + (1-2b)B(i+1, j+1) + 2aC(i, j+1) + (1-2a)C(i+1, j+1) + 4abD(i, j) + 2a(1-2b)D(i, j+1) + 2b(1-2a)D(i+1, j) + (1-2a)(1-2b)D(i+1, j+1)] \end{array} \right. , (4)$$

其中, i, j 为自然数, $|a = \Delta x/\lambda, b = \Delta y/\lambda| \leq 0.5$ 。

对于 $|\Delta x| > 0.5\lambda$ 或 $|\Delta y| > 0.5\lambda$ 的情况,可用相同的方法进行超分辨率重建算法的公式推导,受篇幅限制,本文在此不再赘述。

4 测量实验与结果

本实验基于自行研制的“擒纵轮视觉检测系统”,如图 4 所示,系统采用 Adimec4000C 数字相机(分辨率为 2048×2048),自行设计的物方远心镜头,面阵 LED 背光照明系统和二维平移台。

为了验证算法的有效性,测量对象为高精度擒纵轮标准光刻模板,精度为 $0.2 \mu\text{m}$ 。由于擒纵轮

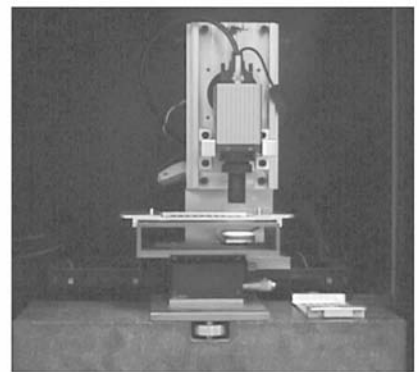


图 4 擒纵轮视觉检测系统

Fig. 4 Visual measuring system of escape wheel

的中心具有圆孔特征,且利用拟合效应能够对圆孔

的圆心实现高精度提取(优于 0.1 pixel),因此在实验中对获得的图像序列中擒纵轮图案中心圆孔的圆心坐标进行了提取,并以此来计算图像序列间的微位移。本文分别对互有 0.1,0.2,0.3,0.4,0.5 pixel 错位的图像序列进行了超分辨率重建。受篇幅限制,下面仅列出 0.5 pixel 错位的图像序列重建过程,其余的步骤相同,在此不再赘述。

首先,利用二维工作台的移动,得到 4 幅分别在二维方向上互有微位移的图像,如图 5 所示,图像分辨率均为 $2\ 048 \times 2\ 048$,利用圆心提取程序得到圆心在图像坐标系中的坐标,见表 1。

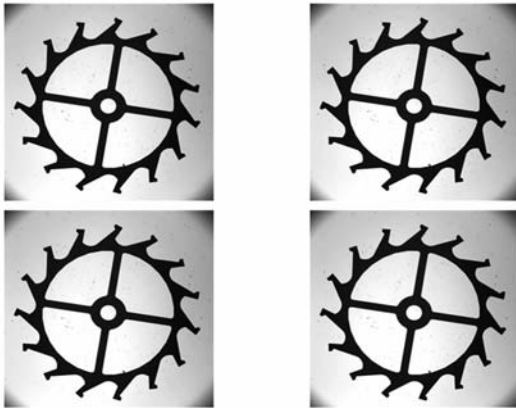


图 5 原始图像序列

Fig. 5 Original image sequence

表 1 圆心坐标

Tab. 1 Coordinate of circle center(pixel)

| 图像序号 | 1(左上) | 2(右上) | 3(左下) | 4(右下) |
|------|---------|---------|---------|---------|
| X 坐标 | 1 017.3 | 1 067.8 | 1 004.3 | 1 037.8 |
| Y 坐标 | 1 064.1 | 1 118.1 | 1 093.6 | 1 093.6 |

根据表 1 中的圆心坐标,以图像 1 为基准,对图像 2,3,4 依据 1.2 中的方法进行整像素平移,得到的亚像素错位的图像序列如图 6 所示。根据式(4)对该图像序列进行重建,得到的高分辨率的图像见图 7,图像的分辨率为 $4\ 096 \times 4\ 096$,分辨率提高至原始图像的 4 倍。

根据相同的方法又分别重建了亚像素位移分别为 0.1,0.2,0.3,0.4 pixel 的高分辨率图像,如图 8 所示。

在擒纵轮测量中,其中最为重要的参数为齿外径,即圆心到各个齿顶点的距离。分别计算重建的 0.1~0.5 pixel 错位的高分辨率图像(图 7 和图 8)和原始图像中的 15 个齿外径参数,得到

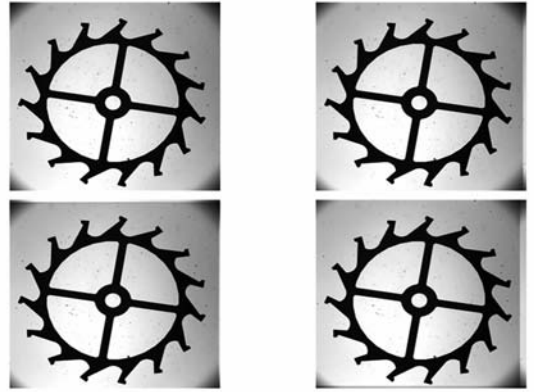


图 6 平移后的图像序列

Fig. 6 Translated image sequence



图 7 重建后的高分辨率图像

Fig. 7 Reconstructed super-resolution image



(a)0.1 pixel 错位

(a) Displacement of 0.1 pixel



(b)0.2 pixel 错位

(b) Displacement of 0.2 pixel



(c)0.3 pixel 错位

(c) Displacement of 0.3 pixel



(d)0.4 pixel 错位

(d) Displacement of 0.4 pixel

图 8 0.1~0.4 pixel 错位超分辨率图像

Fig. 8 Reconstructed super-resolution image based on displacement from 0.1 to 0.4 pixel

的数据见表 2,其中第一列为根据原始图像计算得到的测量结果,第 2~6 列分别为以 0.1~0.5 pixel 错位重建的高分辨率图像所计算得到的测量结果。

表 2 擒纵轮齿外径测量值

Tab. 2 Results of escape wheel's outer diameters

| 原图像 | (pixel) | | | | |
|--------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 |
| 920.64 | 1 841.7 | 1 841.71 | 1 841.38 | 1 841.09 | 1 841.64 |
| 920.59 | 1 841.88 | 1 841.8 | 1 841.21 | 1 841.04 | 1 841.51 |
| 920.77 | 1 841.89 | 1 841.58 | 1 841.51 | 1 841.3 | 1 841.65 |
| 920.83 | 1 841.07 | 1 840.64 | 1 841.45 | 1 841.07 | 1 841.16 |
| 921.03 | 1 841.37 | 1 840.77 | 1 841.48 | 1 841.2 | 1 841.06 |
| 921.32 | 1 841.55 | 1 840.67 | 1 841.45 | 1 841.01 | 1 840.77 |
| 921.38 | 1 841.43 | 1 840.72 | 1 841.22 | 1 840.87 | 1 840.69 |
| 921.55 | 1 841.36 | 1 840.78 | 1 841.07 | 1 840.75 | 1 840.62 |
| 921.66 | 1 841.76 | 1 841.52 | 1 841.43 | 1 841.29 | 1 841.11 |
| 921.63 | 1 842.13 | 1 842.05 | 1 841.86 | 1 841.86 | 1 841.73 |
| 921.56 | 1 842.2 | 1 841.99 | 1 842.01 | 1 841.97 | 1 841.84 |
| 921.34 | 1 842.17 | 1 842.03 | 1 841.89 | 1 841.85 | 1 841.9 |
| 921.1 | 1 841.7 | 1 841.73 | 1 841.6 | 1 841.6 | 1 841.65 |
| 920.88 | 1 841.56 | 1 841.34 | 1 841.26 | 1 841.08 | 1 841.43 |
| 920.84 | 1 841.46 | 1 841.59 | 1 841.20 | 1 841.1 | 1 841.43 |

由于光刻模板的精度较高,因此被测对象中的 15 个齿外径可以近似地认为相等,测量结果的偏差便认为是测量误差。经过标定,基于原始图像(分辨率为 $2\ 048 \times 2\ 048$)的参数测量,系统当量为 $3.148\ 97\ \mu\text{m}/\text{pixel}$,而基于超分辨率图像(分辨率为 $4\ 096 \times 4\ 096$)的参数测量,系统当量为原当量大小的 1/2,因此对标定后数据计算其标准差和均方差(保留 3 位有效数字),见表 3。

表 3 标定后数据的标准差

Tab. 3 Standard deviations of calibrated data (μm)

| 原图像 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 标准差 | 1.17 | 0.520 | 0.834 | 0.425 | 0.598 | 0.661 |
| 均方差 | 0.443 | 0.188 | 0.355 | 0.120 | 0.226 | 0.282 |

可以看出,与基于原始图像的参数测量相比,基于超分辨率图像的参数测量均对测量精度有较大的提升,以标准差为例,其精度提升最大的为基于 0.3 pixel 错位的超分辨率图像,达到 64%;精度提升最小的为基于 0.2 pixel 错位的超分辨率图像,仍达到 29%;另外,与严格的基于 0.5 pixel 错位的情况相比,其余亚像素微位移的错位对精度的提升效果并没有太大的差异。实验结果表明,在对微位移的大小没有严格要求的情况下,基于随机微位移的超分辨率重建技术仍能有效地重建出高分辨率的图像,且用于影像测量时能够提升测量精度。

5 结 论

为了提高影像测量系统的测量精度,本文从提高原始图像的有效分辨率出发,在原有成像系统的基础上,结合超分辨率重建技术,提出了一种不苛求固定微位移的超分辨率重建技术。该方法利用二维平移台获取微位移精度较低的图像序列,然后利用被测对象中易于实现高精度提取的特征点或采用模板衬底中的特征点计算出图像序列间的准确位移关系,进而根据本文提出的算法重建出高分辨率的图像并用于影像测量。实验证明,该方法能够有效地重建出包含被测信息的高分辨率图像,进而提升影像测量的精度。与基于精确像素错位的情况相比,基于随机微位移错位的重建算法对精度的提升效果并没有明显的差异,在图像分辨率提升至原图像 4 倍的情况下,对于不同的位移量,测量标准差提升了 29%~64%。

参考文献:

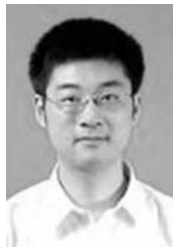
- [1] 周智浩. 基于序列图像的二维超分辨率重构技术研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2006.
ZHOU ZH H. *Research on two-dimensional super-*

resolution reconstruction technology based on image sequence [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)

- [2] HIDENORI T, TOSHIMITSU K. Image registration using subpixel-shifted images for super-resolution

- tion. [C]. *IEEE International Conference on Image Processing*, 2008:2404-2407.
- [3] LEUNG K T, TONG C S. Effective use of low resolution images for super-resolution reconstruction [C]. *1st International Congress on Image and Signal Processing*, 2008:320-325.
- [4] XIAO Q, DING X H, QIAN K, *et al.*. A new method for multi-frame super-resolution reconstruction [C]. *Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, 2009:892-895.
- [5] 章凤清, 何小海, 陈为龙, 等. 一种图像配准的超分辨率重建[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(2): 409-416.
- QIN F Q, HE X H, CHEN W L, *et al.*. Super-resolution reconstruction method of image registration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(2): 409-416. (in Chinese)
- [6] 徐正平, 翟林培, 葛文奇, 等. 亚像元的 CCD 几何超分辨方法[J]. *光学精密工程*, 2008, 16(12): 2447-2452.
- XU ZH P, QU L P, GE W Q, *et al.*. CCD geometric super-resolution method based on sub-pixel [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2447-2452. (in Chinese)
- [7] 黄战华, 蔡怀宇, 张以谟, 等. 基于半像素错位的多幅图像重建高分辨率图像技术研究[J]. *光学技术*, 2002, 28(5): 389-394.
- HUANG ZH H, CAI H Y, ZHANG Y M, *et al.*. One method of super-resolution image rebuilding using multi-images of half pixel offset [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(5): 389-394. (in Chinese)
- [8] 王凌, 张平, 冯华君, 等. 用多次移位成像提高 CCD 成像分辨力的反演解析法[J]. *光电工程*, 2003, 30(3): 62-65.
- WANG L, ZHAN G P, FENG H J, *et al.*. An inversion analysis method based on multi-shift imaging for improvement of CCD imaging resolution [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2003, 30(3): 62-65. (in Chinese)
- [9] 杜娟, 余英林, 谢胜利. 基于半像素运动信息的快速超分辨率图像重构算法 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(5): 53-58.
- DU J, YU Y L, XIE SH L. A fast algorithm based on sub-pixel motion for super-resolution reconstruction of image [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science)*, 2005, 33(5): 53-58. (in Chinese)
- [10] 曹聚亮. 图像超分辨率处理、成像及其相关技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2004.
- CAO J L. *Research on super-resolution image processing, imaging and related technology* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)

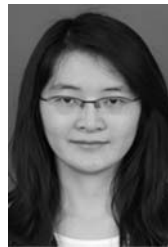
作者简介:



张进(1985—),男,安徽淮北人,博士研究生,2007年于天津大学获得硕士学位,主要从事机器视觉及图像处理方面的研究。E-mail: zhangjinhi_2005@china.com.cn



王仲(1953—),男,天津人,教授,1991年于天津大学获得硕士学位,主要从事视觉检测、精密机械等领域的研究。E-mail: wangzhong@tju.edu.cn



李雅洁(1988—),女,天津人,天津大学在读本科生,从事图像处理方向的研究。E-mail: liyajieforeverlove@qq.com



叶声华(1934—),男,湖北人,教授,博士生导师,中国工程院院士,主要从事机器视觉检测及相关领域的研究。E-mail: shhuaye@tju.edu.cn