

文章编号: 0253-2239(2007)05-0907-6

一种新的基于子线段的立体匹配算法*

李海滨 张 强

(燕山大学 电气工程学院, 秦皇岛 066004)

摘要: 立体匹配是计算机视觉领域中最活跃的研究主题之一。为了精确并更快速的进行同名点匹配,提出了一种基于小波变换的子线段匹配方法。该方法利用样条二进小波变换系数在不同尺度下的模极大点,能提供在不同尺度下信号急速变化点的位置信息,采用由粗到细的匹配策略匹配这些特征点,并由这些特征点两两相邻的点构建子线段。采用加速方法,快速匹配子线段两端点之间的点。这种方法较好地解决了匹配精度和匹配速度之间的平衡问题。采用该方法对篦冷机内水泥熟料高度进行测量,实验表明,该方法能较精确地得出水泥熟料料层的分布状况。

关键词: 双目立体视觉; 子线段匹配; 二进小波变换; 顺序约束

中图分类号: TP75 文献标识码: A

A New Stereo Matching Algorithm Based on Sub-Line Segment

Li Haibin Zhang Qiang

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Abstract: Stereo matching is currently one of the most active research topics in domain of computer vision. A sub-line segment match method based on the wavelet transformation is presented, in order to match feature points more accurately and efficiently. It is based on that the multi-scale local maxima of wavelet transform can obtain the locations of the signal sharp variation points at different scales for transformation coefficients of a quadratic spline wavelet. A from-coarse-to-fine matching algorithm is applied to match these feature points. Sub-line segment is structured by these feature points. The points between the two endpoints of the sub-line segment are matched quickly using acceleration way. This method proposes a good solution for balance problem between match precision and match speed. The thickness of cement clinker in the cooler is measured using this method. The experiment shows this method can obtain the bed of material distributed condition of the cement clinker precisely.

Key words: binocular stereo vision; sub-line segment matching; binary wavelet transformation; ordering constraint

1 引 言

立体匹配是立体视觉系统的重要组成部分,是近年计算机视觉领域备受关注的前沿方向和研究热点。它在计算机视觉、航空测绘、军事应用、医学诊断及工业检测中有着广泛的应用前景和潜在的经济价值。这种方法模拟了人类的视觉系统,设置距离和方位确定的两台相同的摄像机,通过匹配空间中的一点在两个摄像机中的投影点实现立体视觉。对这种图像匹配问题的研究一直是立体视觉研究领域

中的核心和难点,至今没有完全解决。目前,立体视觉匹配的模型和算法很多,大致上可分为灰度相关匹配和基于特征的匹配。这些方法多少都借鉴了Marr的视觉计算理论^[1]。但是提高匹配算法的准确性和速度还需要新的探索和研究。小波分析可以准确地定位信号的瞬变特征,而通过多分辨力变换,又可对信号进行“切片式”分析^[2]。这一思想与视觉中由粗到细的多分辨力分析过程是一致的,小波变换的多分辨力分解特性更加符合人类的视觉特性。

* 国家重大技术装备创新项目(02-ZZ-11)和河北省自然科学基金(F2006000268)资助课题。

作者简介: 李海滨(1978—),男,山西怀仁人,讲师,博士,主要从事信号处理与智能控制方面的研究。

E-mail: hbli@ysu.edu.cn

收稿日期: 2006-10-08; 收到修改稿日期: 2007-02-13

根据样条二进小波多尺度变换的模极大的位置能提供多尺度下信号剧烈变换点的位置信息的特点^[3,4],提出了一种基于多尺度小波变换的子线段匹配方法。实验结果表明本文的方法具有匹配速度快和算法简单、精度高的优点。

2 同名点的识别

通过一对立体图像能恢复出现在图像中物体表面的三维坐标。其中最大的困难就是匹配左图的点和右图的点,如图 1 所示。 P 为空间上的一点,投影到两个图像上。 p_l 、 p_r 分别是点 P 投影到左、右图像上的点。通过这两点的坐标可以计算出点 P 的空间坐标。立体匹配算法的原理就是寻找右图的点 p_r 和它周围的点使之与左图的 p_l 以及它周围的点类似。虽然这种匹配问题是在二维方向上寻找,但利用几何学方法,可以只在一维方向上寻找。点 P 和左、右光学镜头的光心所组成的外极面与左、右图像的交叉就是相对应的外极线。投影到左极线上的点在右图像的投影点一定在相应的右极线上。这样,匹配问题就可以沿着对应的外极线只在一维方向上匹配。使外极线与像机扫描线平行且重合。这样,同名点出现在左、右图象的对应行上,匹配搜索问题成为一维方向的搜索问题。

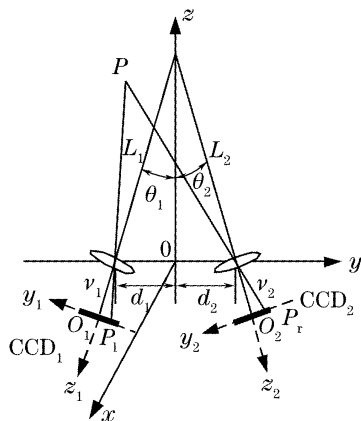


图 1 双 CCD 三维测量示意图

Fig. 1 Measure principle chart of double-CCD

2.1 选择子线段端点

小波变换的基本思想是将原始信号分解成一系列具有良好时频定位性的基元信号,利用基元信号的各种特征来表征原始信号的局部特性,达到对信号的时频域局部化分析。

信号 $f(x)$ 在任意尺度 s 和位置 x 的小波变换定义为:

$$W_s f(x) = f * \psi_s(x), \quad (1)$$

其中 $\psi_s = \frac{1}{s} \psi\left(\frac{x}{s}\right)$ 称作小波,是母小波 $\psi(x)$ 经伸缩尺度因子 s 而得到的,它要求满足允许性条件:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) dx = 0, \quad (2)$$

小波变换可看成是原始信号用一组不同尺度的带通滤波器[其冲激响应为 $\psi_s(x)$] 进行滤波,将信号分解到一系列频带上进行分析处理。这一思想在图像处理领域有着深刻的生理学背景,它与人类视觉系统早期信息处理的多通道滤波理论是一致的。

选取小波 $\psi(x)$ 为平滑函数 $\theta(x)$ 的一次导函数。 $\theta(x)$ 称作平滑函数,它的积分值为 1,并在无穷远处趋于 0,显然它是一个低通滤波算子。

$$\psi(x) = \frac{d\theta(x)}{dx}, \quad (3)$$

根据(1)式和(3)式:

$$Wf(2^j, x) = f * \psi_{2^j}(x) = f * \left[2^j \frac{d\theta_{2^j}(x)}{dx} \right] = (2^j) \frac{d}{dx} [f * \theta_{2^j}(x)], \quad (4)$$

因此, $Wf(2^j, x)$ 与 $f(x)$ 被 θ_{2^j} 平滑后的一次导数成正比, $Wf(2^j, x)$ 的模极大值表示 $f(x) * \theta_{2^j}(x)$ 的剧烈变化点。即该小波变换模极大值的位置信息就是灰度信号剧烈变化点的位置信息,也就是本文方法选择匹配的子线段端点。

2.2 子线段匹配算法

确定并匹配子线段的端点,以小波变换模极大值的位置的图像点作为匹配基元,采用由粗到细的匹配策略,包括先匹配大尺度小波变换系数的模极大值位置的图像点,记录相应左右外极线小波变换系数的模极大值的位置信息,应用到顺序约束,即物体在左右影像点的投影顺序应一致。利用上层的大尺度的相应模极大值的位置信息来控制下层的小尺度的匹配空间,然后匹配小尺度小波变换系数的模极大值位置的图像点以得到更为准确的匹配。这种由粗到细的控制策略,能较好地解决歧义匹配和搜索空间大的问题^[6,7]。但是这种方法有可能出现误差传播和错误引导问题。为此,在进行相似度比较时,采用基于区域的互相关函数的匹配准则代替单纯比较小波变换的模极大值的方法。因为它能有效的利用所选点的局部周围点的信息,这样减少误匹配。

把一幅图像中某一点为中心的窗口区域作为基准,在另一幅图像中,以互相关函数作为搜索窗口与

基准窗口间的相似性测度^[8]。设 $f_L(x, y)$ 和 $f_R(x, y)$ 分别为双目立体视觉中的左右图像, 取以 (i_1, j) 为中心的窗口区域作为模板 T , 其大小为 $(2k + 1)(2l + 1)$ 。现在 $f_R(x, y)$ 中平移窗口 T , 沿 x 轴方向平移 Δx , 它所覆盖下的 $f_R(x, y)$ 的第 k 个子图为 S_k 。设 $T(i_1, j)$ 表示左图点 (i_1, j) 的灰度,

$S_K(i_2, j)$ 表示右图点 (i_2, j) 的灰度。定义归一化协方差相关系数为

$$C = \frac{\text{cov}(i_1, i_2, j)}{\sqrt{\text{var}(i_1, j, T)\text{var}(i_2, j, S_K)}}, \quad (5)$$

其中

$$\text{cov}(i_1, i_2, j) = \sum_{m=-kn=-l}^k \sum_{n=-l}^l [T(m + i_1, n + j) - \overline{T(i_1, j)}][S_K(m + i_2, n + j) - \overline{S_K(i_2, j)}], \quad (6)$$

$$\text{var}(i_1, j, T) = \sum_{m=-kn=-l}^k \sum_{n=-l}^l [T(m + i_1, n + j) - \overline{T(i_1, j)}]^2, \quad (7)$$

$$\text{var}(i_2, j, S_K) = \sum_{m=-kn=-l}^k \sum_{n=-l}^l [S_K(m + i_2, n + j) - \overline{S_K(i_2, j)}]^2, \quad (8)$$

相关系数的快速计算

$$\text{cov}(i_1, i_2, j) = \sum_{m=-kn=-l}^k \sum_{n=-l}^l T(m + i_1, n + j)S_K(m + i_2, n + j) - (2k + 1)(2l + 1) \overline{T(i_1, j)}\overline{S_K(i_2, j)}, \quad (9)$$

$$\text{var}(i_1, j, T) = \sum_{m=-kn=-l}^k \sum_{n=-l}^l T^2(m + i_1, n + j) - (2k + 1)(2l + 1) \overline{T(i_1, j)}^2, \quad (10)$$

$$\text{var}(i_2, j, S_K) = \sum_{m=-kn=-l}^k \sum_{n=-l}^l S_K^2(m + i_2, n + j) - (2k + 1)(2l + 1) \overline{S_K(i_2, j)}^2, \quad (11)$$

在信号的各尺度小波变换中, 先匹配大尺度的 $Wf[2^j, r(x)]$ 和 $Wf[2^j, l(x)]$ 的模极大点。然后逐步减少 2^j , 用大尺度匹配的位置信息来约束小尺度匹配。如图 2(a)、图 2(b) 2^J 尺度中二进小波变换的模极大值位置的点 a 与 c 是同名点, b 与 d 是同名点。在 2^{J-1} 尺度中应用顺序约束, 即物体在左右影像点的投影顺序应一致, 也就是说与 a、b 之间的点是同名点的点在 c、d 之间。匹配小波变换的模极大点 e 只在 c、d 之间的 g、h 点应用互相关函数的匹配准则匹配即可。当匹配在最大尺度 2^J 开始时, 无法在一个约束空间范围内进行同名点匹配, 但是当最大尺度的时候, 二进小波变换的模极大点很少, 容易匹配。这种由粗到细的策略相应地减少了寻求匹

配的复杂性。此时我们准确快速的匹配了子线段的端点。

如图 3 仅在两个尺度下的小波变换为例, 图 3(a)、(b)、(c)、(d) 的说明与图 2 相同。则以匹配好的多尺度小波变换后的模极大位置为端点。两个相邻端点就构成了一条子线段, 如图 3(c)、(f) 所示。因为在线测量为实时控制服务, 应用区域匹配非特征点计算量大, 不能满足实时要求。而后续进行插值, 则降低了测量的精度。提出的基于小波变换的子线段匹配方法较好地解决了匹配精度和匹配速度之间的平衡问题。在准确匹配子线段的端点的前提下, 当相对应的子线段的像素数相差小于等于 2 个像素时, 考虑到两图像的点的顺序一致性, 应用图 4

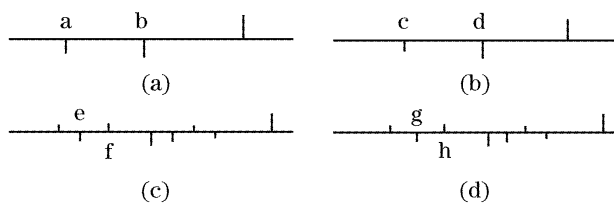


图 2 左图(a),(c)为右图(b),(d)的小波变换的模极大值图

Fig. 2 Chart of local maxima of a wavelet transformation of the row signal in left figure (a), (c) is right figure (b), (d)

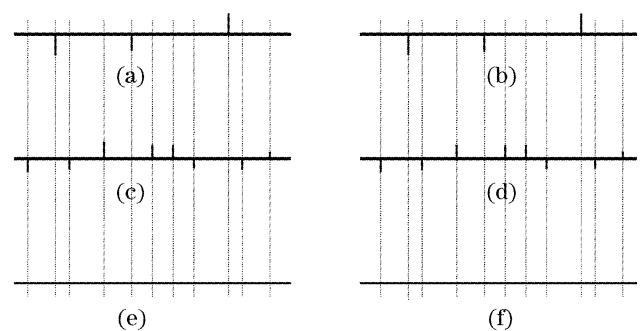


图 3 子线段的形成

Fig. 3 The structure of sub-line segment

中的匹配方法来顺序匹配子线段的各点。相对应的子线段上的像素点数不同的原因是,物体不在理想的物平面上,像也不存在理想的像平面上。左右图像上的相对应的景物尺寸上存在很小的差异,再规划到只有几个像素的子线段上,尺寸上的差异就更小了。图 4(b)假设了没有同名点的像素一定是处于中心位置,此方法虽然加速了匹配速度,但不可避免的带来了很小的匹配误差。在实验中,匹配所带来的误差,满足测量的精度。匹配误差所引起的重建点的三维坐标的误差的计算参见文献[4]。当相对应的子线段的像素数相差大于 2 个像素时,为了保证测量精度,还是应用基于区域的匹配方法。考虑到匹配速度,我们采用盒滤波技术加速。盒滤波技术是一种递归的二维均值滤波快速计算方法,如图 5 所示。其基本思想是采用一个滑动窗口,在计算窗口匹配代价时,充分利用前一个像素窗口的累计结果,从而消除冗余计算。(10)式、(11)式中 $\overline{T(i_1, j)}$ 、 $\overline{S_K(i_2, j)}$ 、 $\sum_{m=-kn}^k \sum_{n=-l}^l T^2(i_1, j)$ 、 $\sum_{m=-kn}^k \sum_{n=-l}^l S_K^2(i_2, j)$ 可采用盒滤波方法加速。

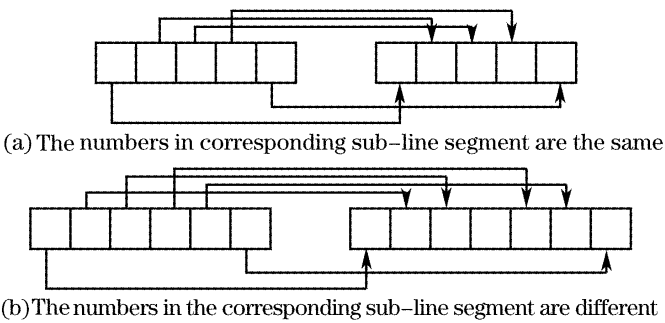


图 4 子线段上的像素点的匹配方法。对应子线段上的像素数(a)相同,(b)不同

Fig. 4 Matching method of the pixels in the sub-line segment. The pixel numbers in corresponding sub-line segment are the (a) same, (b) different

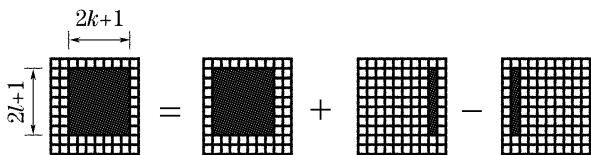


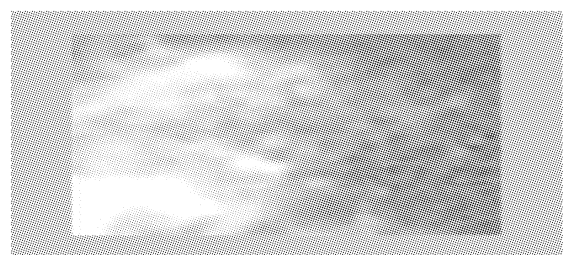
图 5 二维盒滤波加速示意图

Fig. 5 The acceleration method of box filtering

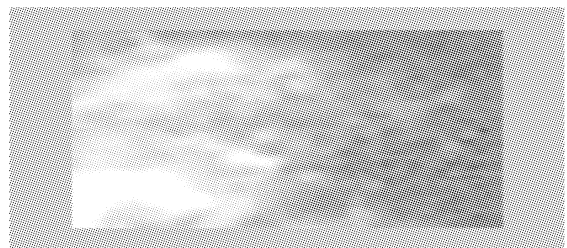
3 实 验

将上述算法应用于水泥行业中篦冷机高温熟料表面的三维重建。该系统通过双 CCD 获取篦冷机内水泥的表面图像(图 6)。不是随便一种小波的小

波变换模极大值的位置都与信号突变点的位置相对应,只有当小波可看成是某种平滑函数的一阶导数时,二者才是对应的,而且最优平滑滤波器的脉冲响应函数为三次 B 样条函数。所以选取三次样条尺度函数为平滑函数,二次样条小波就是它的一次导数,如图 7。用二次样条小波对图像的对应行信号进行多尺度变换,应用本文提出的基于小波变换的子线段匹配方法。然后利用双目立体视觉的数学模型计算并转换为以篦冷机篦板为 $Z=0$ 的空间坐标系下,重现出篦冷机水泥熟料表面的三维图(图 8)。选取图像中第一百行重建熟料的厚度,由图 9 可以看出,基于本文匹配算法获得的熟料厚度误差为 $-2 \sim +5$ mm,验证了本文匹配算法的有效性。对该文方法与原有归一化协方差相似性测度匹配方法进行仿真比较,仿真环境是奔腾 IV 2.0 GHz 的计算机,内存为 512 MB DDR,软件环境为 Matlab7.0。计算 45549 个像素,原方法的计算时间是 1518.9840s,准确率是 86%。应用盒滤波技术加速的归一化协方差相似性测度方法的计算时间是 163.4370 s。此方法并未在原理上对原方法进行改进,只是提高了原方法的匹配速度,所以该方法并没有提高匹配准确率。而应用本文提出的基于二进小波变换的子线段匹配方法后,计算时间是 106.9020 s,准确率是 94%。本文的方法与原有归一化协方差相似性测度匹配方法相比,提高了匹配速度且匹配准确率得到了提高。



(a) the left image



(b) the right image

图 6 立体像对。左图像(a),右图像(b)

Fig. 6 A pair of stereo image. The left image (a), the right image (b)

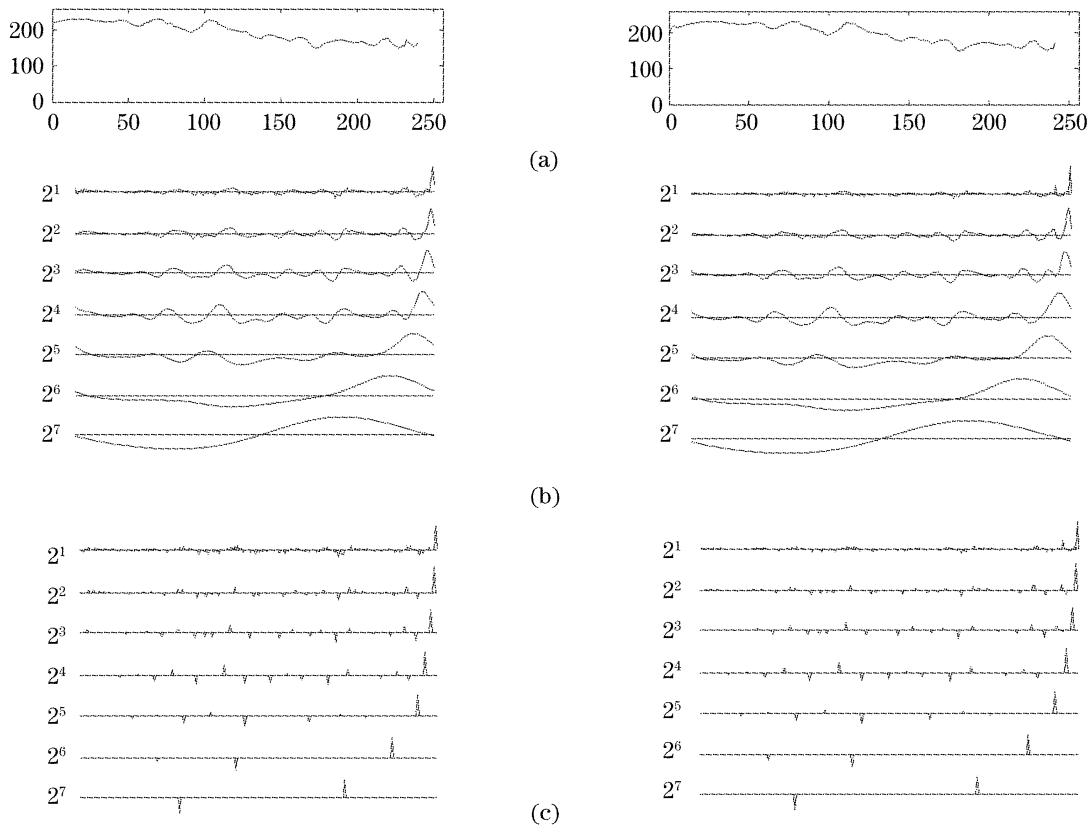


图7 左、右图的第一百行的灰度变化(a),取二次样条小波所计算得的多尺度二进小波变换(b),二进小波变换的模极大(c)
 Fig. 7 The gray of the hundredth line in the left and right images (a), multi-scale binary wavelet transformation using a quadratic spline wavelet (b), local maxima of binary wavelet transformation (c)

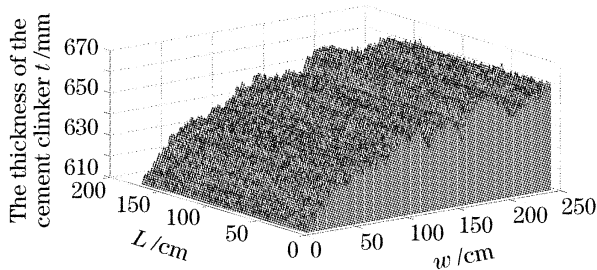


图8 篹冷机水泥图像三维重建图

Fig. 8 The three-dimensional reconstruction map of cement clinker in the cooler's picture

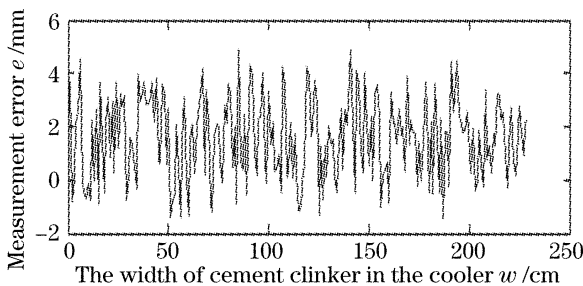


图9 篹冷机水泥图像第一百行熟料厚度误差图

Fig. 9 The thickness error of the high temperature cement clinker in the cooler of the hundredth line

值的子线段匹配方法,采用从粗到细的匹配策略匹配子线段的端点以及应用顺序一致原则快速匹配子线段上的像素点,处处说明了该方法的快速性与准确性。

在篹冷机内熟料层分布测量中实验表明,基于本文匹配算法获得的熟料厚度误差为-2~+5 mm,满足在线测量的精度要求,符合实时控制的要求,进一步证明了这种方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 Marr D. *A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information* [M]. Yao Guozeng, Liu Lei, Wang Yunjiu transl., Beijing: Science Press, 1988 (in Chinese)
 Marr D. 视觉计算理论[M]. 姚国正,刘磊,汪云九译. 北京: 科学出版社, 1988
- 2 Wang Hong, Jing zhongliang, Li Jianxun. An image fusion approach based on object region[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 351~355 (in Chinese)
 王宏,敬忠良,李建勋. 一种基于目标区域的图像融合新方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(3): 351~355
- 3 Stephane Mallat, Sifen Zhang. Characterization of signals from multiscale edges[J]. *IEEE Trans.*, 1992, **14**(7): 710~732
- 4 Zhu Juanjuan, Guo Baolong. Features tracking algorithm for video stabilization[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 516~521 (in Chinese)
 朱娟娟,郭宝龙. 电子稳像的特征点跟踪算法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 516~521

4 结 论

提出了一种基于多尺度二进小波变换的模极大

5 Li Haibin, Shan Wenjun, Liu Bin. Research of error-model on two eyes stereoscopic measurement system [J]. *Optical Technique*, 2006, **32**(1): 24~26 (in Chinese)

李海滨, 单文军, 刘 彬. 双目立体视觉测距系统误差模型的研究[J]. *光学技术*, 2006, **32**(1): 24~26

6 Stephane Mallat, Wenliang Huang. Singularity detection and processing with wavelets [J]. *IEEE Trans.*, 1992, **38**(2):

617~643

7 Stephane Mallat. Zero-crossings of a wavelet transform [J]. *IEEE Trans.*, 1991, **37**(4): 1019~1033

8 Tangfei Tao, Chongzhao Han, Yanqi Wu *et al.*. Motion estimation based on an improved block matching technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 208~210

• 新书推荐

《科学研究的途径》——一个指导老师的札记

本书是作者作为一个指导教师在近 30 年的研究生指导实践中写下的有关研究生学习和科学方法的札记。诸凡青年学人,特别是研究生在学习与科学研究过程中的科学探索,为人与治学,以及论文写作方法等,著者都以亲身的经历阐述自己的认识和体会。其中很多内容都是应青年研究生的要求撰写的,非常符合青年学人的实际需要,能帮助初涉科研的青年学人较快地熟悉科研过程及方法,及早多出成果,出好成果。本书作为有志于从事科学研究的理工科大学生、研究生、青年教师和青年科技人员的一本参考书,将对青年学人成长为学者起到辅助作用,使他们在从事科学研究时少走些弯路。同时,它也是研究生指导教师交流指导心得的一个平台。另外,本书实际上也是一本论述科学方法的科普读物。

作者简介 周立伟,电子光学和光电子成像专家。北京理工大学首席专家、教授、博士生导师;中国工程院院士,俄罗斯联邦工程科学院外籍院士。长期在宽束电子光学、光电子成像领域从事教学与科研工作,研究成果曾多次获部和国家科技进步奖励。

本书由北京理工大学出版社出版,16 开,定价:25 元。

联系人:郑京华

地 址:北京理工大学出版社人文社科事业部

邮 编:100081

手 机:13810624594

办公电话:010-68945381

电子邮件:caizhengjinghua@126.com

