

# 基于动态规划的相位匹配和遮挡检测

徐 奕,周 军,周源华

(上海交通大学图像通信与信息处理研究所,上海 200030)

**摘 要:** 本文摒弃相位匹配算法中通常运用的相位差-频率法以及相位相关法,直接利用局部相位结构在对应点位置上必须相等的事实,提出以两匹配点处局域窗内的相位差异来衡量匹配误差的代价函数,并结合动态规划方法搜索满足图像对之间局部结构差异全局最小的视差结果.此外,该算法在最优视差搜索过程中将相位奇点问题以及遮挡检测同时处理,而无需检测和剔除奇点或将遮挡检测后续处理.实验结果的分析表明了该算法具有较高的实用性.

**关键词:** 动态规划; 相位匹配; 遮挡检测; 相位奇点

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2004)04-0591-05

## Phase Matching and Occlusion Detection Based on Dynamic Programming

XU Yi, ZHOU Jun, ZHOU Yuan-hua

(Inst. of Image Comm. & Info. Proc., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Not using phase-difference methods or phase correlation methods which are popular to gain the disparity map in phase-based stereo, the approach presented in this paper directly uses the fact that the phase structures are equal at the correspondence locations. A cost function is defined to measure the matching error between point  $x$  in the left view and the one shifted by the assumed disparity value in the right view as the aggregation of the phase differences between their local windows. To complete a globally optimized search process, dynamic programming technique is employed to find the disparity results which minimize the differences between the local structures in two views. In addition, this approach automatically tackles the singularity problem and the occlusion detection problem in the optimal disparity search process, instead of treating them as secondary processes that are postponed until matching is completed. The experiment results demonstrate that this approach has good applicability.

**Key words:** dynamic programming; phase matching; occlusion detection; phase singularity

### 1 引言

相位匹配中,双目视差的计算可归结为求取图像对之间的位移值,在此位移下,图像对的相位结构恰好相等.本文摒弃相位匹配算法中通常运用的相位差-频率法以及相位相关法,直接利用了局部相位结构在对应点位置上必须相等的事实,提出以两匹配点处局域窗内的相位差来衡量匹配误差的代价函数,而代价值最小化过程则通过动态规划方法予以实现,即搜索出满足像对之间局部相位结构差异全局最小的视差结果.将立体像对中的两幅图像经滤波器卷积后,分别根据信号的相位进行结构重建,两重建结构的相关曲线几乎与原始像对真实结构的相关曲线一致<sup>[1]</sup>,因此算法实质是从全局意义上确定满足像对之间局部结构差异最小的匹配结果.相位奇点附近,相位信息对位置和频率的变化极为敏感,因此用这些像素所确定的相位差异来衡量匹配误差将导致极不可靠的结果.考虑到图像卷积信号在相位奇点附近的幅值输出往

往很小,本文算法提出的代价函数将以图像卷积信号的归一化输出幅度作为权重,抑制奇点对视差结果的影响,而奇点处局域窗内的邻域像素采用投票策略决定奇点处的视差值,有效地处理了相位匹配中的奇点问题.此外,通常的相位匹配算法往往忽略了遮挡检测问题,或者将其作为后续处理过程.本文算法结合视差空间图技术将遮挡模型直接内嵌在全局最优搜索过程中;同时利用特征图奇点与原图奇点基本不重合的性质以及特征匹配结果对搜索空间的全局约束作用,在整个匹配过程中引入高置信度特征匹配方法,进一步有效缓解相位奇点问题并约束匹配路径不因较高遮挡代价值的影响在真实的视差不连续处实现视差跳跃.该算法的优点在于它将视差估计、奇点处理以及遮挡检测一并归入最优匹配搜索过程中,而无需进行奇点确定和剔除或将遮挡检测作为后续处理.本文内容的安排如下:第二节将对相位匹配作简单介绍并对国内外有关算法进行详细分析.第三节针对现有算法的不足,具体提出本文的新算法,给予理论分析.第四节给出实验结果

收稿日期:2002-07-30;修回日期:2003-12-22

基金项目:国家自然科学基金(No. 69905003)

和实验分析. 第五节给予结论.

## 2 相位匹配及有关算法

通常, 相位匹配算法的理论启示是傅立叶平移定理. 此外, 利用相位结构信息进行图像匹配是因为除奇异点区域外, 相位结构在对应点位置上几乎不变. Oppenheim 等<sup>[1]</sup>的实验结果表明, 由相位信息重建的图像对结构, 其相关曲线与原始结构之间的相关曲线几乎一致, 而幅度信息却不能理想地表征结构的相关特性. 因此, 相位匹配是一类基于图像结构的匹配算法. 事实上, 许多特征匹配单元, 如零交叉、卷积峰等都对应着特定的相位值. 相位匹配结合了特征匹配和区域匹配各自的优点, 它无须特征结构的提取和定位, 亦能获得密集的视差场, 而且具有运算速度快和精度高的优点. 目前, 相位匹配算法分为两类: 相位差-频率法<sup>[2-4,7,8]</sup>和相位相关法<sup>[6,9]</sup>.

相位匹配中, 傅立叶滤波只能得到图像间的整体平移, 通常采用带通滤波器将原始信号分解成一系列具有良好时/空-频域定位性的基元信号, 根据基元信号的局部相位特性求取图像间的局部平移. 下面针对国内外有关典型算法分别进行算法特性分析.

### (1) Sanger (1988)<sup>[2]</sup>

给定带通滤波器的调制频率  $\omega$ , Sanger 根据左右图中某位置上的相位差异直接得出该位置的视差值. 算法的前提是相位线性并且视差梯度相对位置的变化保持不变. 该算法从视差初值 0 开始沿着恒定的搜索方向确定视差终值. 因此, 算法结果的准确性完全依赖于 0 视差附近处相位线性的程度.

### (2) Jenkin et al. (1991)<sup>[3]</sup>

Sanger 的方法中, 若相位在视差初值处相对于视差的线性程度发生扰动, 视差结果很可能明显偏离真实值. Jenkin 对 Sanger 的方法进行改进, 算法从视差初值 0 开始从两个恒定的搜索方向中二者择一地确定视差终值. 通过迭代, 该方法在大多数位置获得优于 Sanger 算法的视差结果. 但是, 此算法的准确性同样依赖于 0 视差附近处相位线性的程度. 如果发生严重扰动, 视差估计将无法正确收敛于真实值.

### (3) Fleet (1992)<sup>[4]</sup>

Fleet 将前述两种算法发展成更为普通的形式, 算法从视差初值 0 开始根据局部频率的变化不断变更搜索方向而最终确定视差终值. 通常, 当图像对的局部频率的变化趋势相似时, 该方法比 Sanger 的算法结果准确度高, 比 Jenkin 算法的收敛速度快. 但是, 当相位奇异点出现时, 由于图像对的局部频率的变化趋势迥异, Fleet 的算法将发生与前述两种算法相类似的错误.

### (4) Cai and Mayhew (1997)<sup>[5]</sup>

前面叙述的算法是相位差-频率法的具体形式, Cai 和 Mayhew 将这些算法归纳为不同前提条件下的牛顿迭代法, 它们均依赖于视差初值以及相位的拟线性. Fleet 依靠检测和剔除相位奇异点提高视差估计的置信度. Cai 等提出窗口内相位差异-一维积分最小化的算法形式, 不需检测和去除相位奇异点而提高了匹配结果的准确度. 该算法所求视差结果只满足局部最优(窗内), 仅在满足相位奇异点占窗口内像素总数

比例很小的条件下, 能有效解决奇点问题.

### (5) Fleet (1994)<sup>[6]</sup>

相位相关方法对图像对的带通滤波信号作归一化相关, 其傅立叶反变换结果在带通频率段内以投票方法确定出波峰位置, 即相位差最小的位置. 在高频率段, 像对间的几何畸变以及信噪比问题更为突出, 但相位相关法中所有尺度的带通信号在确定视差时具有相等的权重, 约束相位稳定的条件也未被利用, 以致算法的鲁棒性不强. Fleet 提出一种局部加权的相位相关方法, 各个尺度上的带通信号依据相关系数的大小在视差确定过程中加入相应的权重, 从而提高算法的鲁棒性.

### (6) 游素亚 (1996)<sup>[7]</sup>

此算法属于相位差-频率法, 其引入正则化方法在视差迭代估计中提高了视差修正值的准确度. 游素亚等人采用了 Hardy 函数扩展生成的小波滤波器, 与前面五种算法中采用的 Gabor 滤波器类似, 内含的傅立叶变换核增大了相位求取过程的算法复杂度; 同时其小波函数无对应的尺度函数, 而尺度函数能实现多分辨率采样匹配, 使相位的多分辨率求取过程自然地与粗-精匹配策略结合, 提高了匹配过程的效率<sup>[8]</sup>.

## 3 基于动态规划的相位匹配算法和遮挡检测

在分析前人的相位匹配算法之后, 下面将提出一种新的相位匹配算法. 该算法利用文献<sup>[10]</sup>中的 6. rb7. a5 双正交小波基进行小波相位匹配, 其对应的尺度函数能实现多分辨率采样匹配. 算法中定义的以相位差异度量匹配误差的代价方程, 将归一化带通滤波输出幅度作为权重加入相位稳定的约束条件, 有效解决了相位奇异问题. 前面列举的匹配算法中均未引入全局最优约束, 新算法将结合动态规划方法进行全局最优搜索, 同时引入高置信度的特征匹配点控制最优匹配的搜索范围. 此外, 遮挡问题在前述算法中或被忽略或被作为后续处理, 本文将引入内嵌遮挡模型的视差空间图技术, 结合高置信度的匹配控制点直接在匹配过程中实现遮挡检测. 下面对新算法的叙述均认为图像对已经过核线重整.

### 3.1 代价方程的构造

以左扫描线上任意一像素  $(x_l, n)$  为例, 假设它与对应点之间的一维视差为  $d$ , 则度量匹配误差的代价方程定义如下:

$$\text{cost}(x_l, n, d) = \frac{\sum_{i,j=-w/2}^{w/2} \rho_i(x_l+i, n+j) \rho_r(x_l+i+d, n+j) \times \Delta\phi(x_l, i, j, n, d)}{\sum_{i,j=-w/2}^{w/2} \rho_l(x_l+i, n+j) \rho_r(x_l+i+d, n+j)} \quad (1)$$

其中,

$$\Delta\phi(x_l, i, j, n, d) = |(\phi_l(x_l+i, n+j) - \phi_r(x_l+i+d, n+j))|_{2\pi} \quad (2)$$

式中,  $w \times w$  为窗模板大小,  $\rho$  和  $\phi$  分别表示幅度和相位, 下标  $l/r$  在全文中均表示左/右图,  $[\cdot]_{2\pi} \in [-\pi, \pi)$ . 基于奇点附近幅度输出接近于零的事实, 代价方程利用归一化幅度作为权重, 抑制奇点对代价值的影响; 而且幅度的归一化令方程具有统计意义, 将利于后面遮挡代价值参数的选取.

3.2 高置信度特征匹配约束

利用边缘信息可以减小相位奇点的影响,因为特征图的奇点与原始图像的奇点通常不重合<sup>[11]</sup>.此外,边缘匹配结果隐含核线间视差连续性约束,如果结合高置信度的特征匹配将对整个匹配过程有全局约束作用.后面即将叙述的遮挡检测也将在这种全局约束下得以实现.

本文算法选择具有灰度阶跃的特征点,特征匹配利用灰度相关方法而确定.假设计算方差的窗口大小为  $n \times n$ ,匹配窗大小为  $m \times m$ ,特征点  $t$  的灰度方差、信号方差、匹配误差比、匹配点之间的方差之差绝对值分别以  $\sigma, \alpha, \beta$  表示,  $t$  应满足

$$\sigma > T_\sigma \tag{3}$$

$$\alpha = \frac{\min(\sigma_l^2(t), \sigma_r^2(t+d(t)))}{\frac{1}{m \times m} \sum_{s \in t \text{ 点的 } m \times m \text{ 邻域}} (I_l(s) - I_r(s+d(s)))^2} > T_\alpha \tag{4}$$

$$\beta = |\sigma_l^2(t) - \sigma_r^2(t+d(t))| < T_\beta \tag{5}$$

其中,  $I(k)$  表示像素处的灰度值,  $d(k)$  表示左图像素处的视差值.  $T_\sigma, T_\alpha, T_\beta$  阈值的选取决定着特征匹配点的置信度.由于匹配存在有序约束,此处的特征匹配过程遵循高置信度匹配点优先产生的原则以减少迭代错误.

3.3 最优匹配搜索与遮挡检测

3.3.1 建立视差空间图 (DSI)

视差空间图实际上就是核线的匹配误差图.图 1 中,以左扫描线  $n$  上像素的位置为横坐标,视差取值为纵坐标建立视差空间图,各节点处的灰度值正比于对应位置的匹配误差值,由代价方程(1)确定.

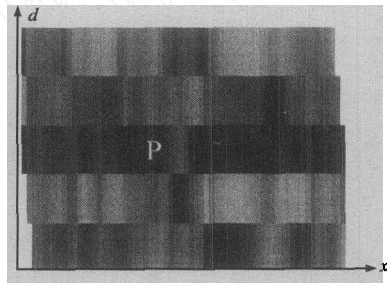


图 1 视差空间图

3.3.2 构造代价矩阵

动态规划方法的代价矩阵,采用图 2 模型确定,在对任意节点  $P$  的代价值进行计算时嵌入了视差不连续模型:

到达代价矩阵的节点  $P$ ,可能存在 5 种代价值路径:

(1)  $C \rightarrow P$ : 左扫描线像素的视差梯度为 0,属匹配步骤,代价值用  $C_M(P)$  表示;

(2)  $A \rightarrow P$ : 左扫描线的像素在右扫描线上不可见,属右遮挡步骤,代价值用  $C_{RO}(P)$  表示;

(3)  $B \rightarrow P$ : 与  $A \rightarrow P$  相反,属左遮挡步骤,代价值用  $C_{LO}(P)$  表示;

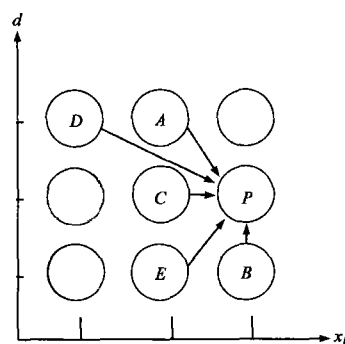


图 2 代价矩阵模型

(4)  $D \rightarrow P$ : 左扫描线的 3 像素间隔对应右扫描线 2 像素间隔,物体表面倾斜,属透视缩短情形.代价值用  $C_{RS}(P)$  表示,以线性内插的方法决定中间非整数像素位置处的代价值;

(5)  $E \rightarrow P$ : 右扫描线的 3 像素间隔对应左扫描线的 2 像素间隔,也属于透视缩短情形,代价值用  $C_{LS}(P)$  表示,同样也以线性内插决定中间非整数像素位置处的代价值.

$$C_M(P) = C(C) + \text{cost}(P);$$

$$C_{RO}(P) = C(A) + C_{\text{occlusion}};$$

$$C_{LO}(P) = C(B) + C_{\text{occlusion}};$$

$$C_{RS}(P) = C(D) + \text{cost}(P) + \frac{\text{cost}(A) + \text{cost}(C)}{2};$$

$$C_{LS}(P) = C(E) + \text{cost}(P) + \frac{\text{cost}(B) + \text{cost}(C)}{2}. \tag{6}$$

$C_{\text{occlusion}}$ : 遮挡代价值,控制视图大部分局部区域符合视差连续性约束.

节点  $P$  的代价值定义为:

$$C(P) = \min(C_M(P), C_{RO}(P), C_{LO}(P), C_{RS}(P), C_{LS}(P)) \tag{7}$$

若  $P$  是任意高置信度特征对应点  $(t, t+d(t))$  构成的节点,则匹配路径必须经过节点  $P$ ,确保在真实的视差不连续处不因遮挡代价值的影响而产生相应的视差跳跃并大大减少了最优匹配的搜索空间.代价矩阵一经建立,即可采用动态规划方法从 DSI 的第一列搜索至最后一列,获得一条最小代价的匹配路径.算法采用多分辨率采样扩大算法收敛范围,而利用粗-精的匹配策略大幅度地缩小了搜索范围并满足了带通滤波器的半波长限制.

下面给出匹配框架(见图 3)及最小代价路径形成过程的示意图(见图 4).从图 4 形成的匹配路径可以看出,由于高置信度特征匹配结果(High Confidence Feature Matching)的约束,匹配过程不因遮挡代价值的影响有效实现了遮挡检测.

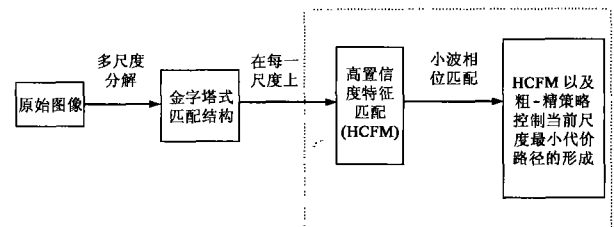


图 3 匹配框架

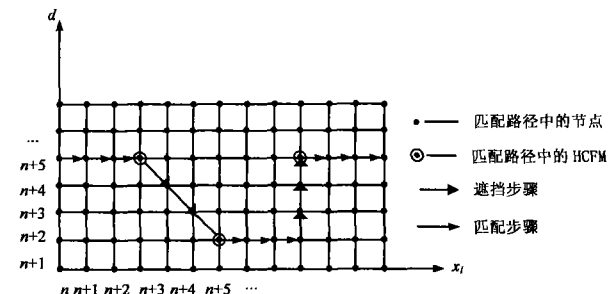


图 4 最小代价路径的形成

#### 4 实验结果

以图 5 中 pentagon 图像对为例,给出实验参数.其中,图像对的分辨率为  $512 \times 512 \times 8\text{bits}$ ,最大视差约为 10 个像素.根据视差范围确定小波分解层数为 3.由于特征匹配控制点对整个匹配过程至关重要,因此只保留置信度高的特征匹配结果.选择特征点阈值  $T_\sigma = 30$ ,  $T_\alpha = 4$ ,  $T_\beta = 80$ .用于特征匹配和方差计算的窗模板大小均为  $13 \times 13$ .

构造代价矩阵时,实验中采用的遮挡代价  $C_{occlusion} = 2\pi$ ,实验表明此值可以在较大范围内变化而保持遮挡检测结果仍然有效.计算 DSI 中各点代价值的窗参数  $w = 3$ .

为更好地评价该算法的匹配精确度以及检测遮挡的效果,图 5(e)中给出算法对 corridor 图像对的匹配结果和遮挡检测结果.其中,图像对的分辨率为  $256 \times 256 \times 8\text{bits}$ ,最大视差约为 12 个像素.根据视差范围确定小波分解层数为 3.其余参

数的选择等同于 pentagon 图像对实验中的参数选择.表 1 列出了 pentagon 以及 corridor 像对的匹配时间,并将 corridor 像对的匹配结果与 <http://www-dbv.informatik.uni-bonn.de/stereo-data> 网址处提供的 ground truth 数据作比较,给出绝对误差、均值误差和误差方差值,这些数据的计算不包括图像的左右边界部分(13 像素宽),包括遮挡部分,遮挡部分的视差值由其最邻像素的视差值近似代替.所有的匹配实验均在 Celeron633MHz 微机上完成.

表 1 像对匹配实验结果

像 对	匹配时间 (s)	绝对误差 (pixel)	均值误差 (pixel)	误差方差 (pixel)
pentagon(512 × 512)	32	—	—	—
corridor(256 × 256)	7	0.3633	0.1222	0.6555

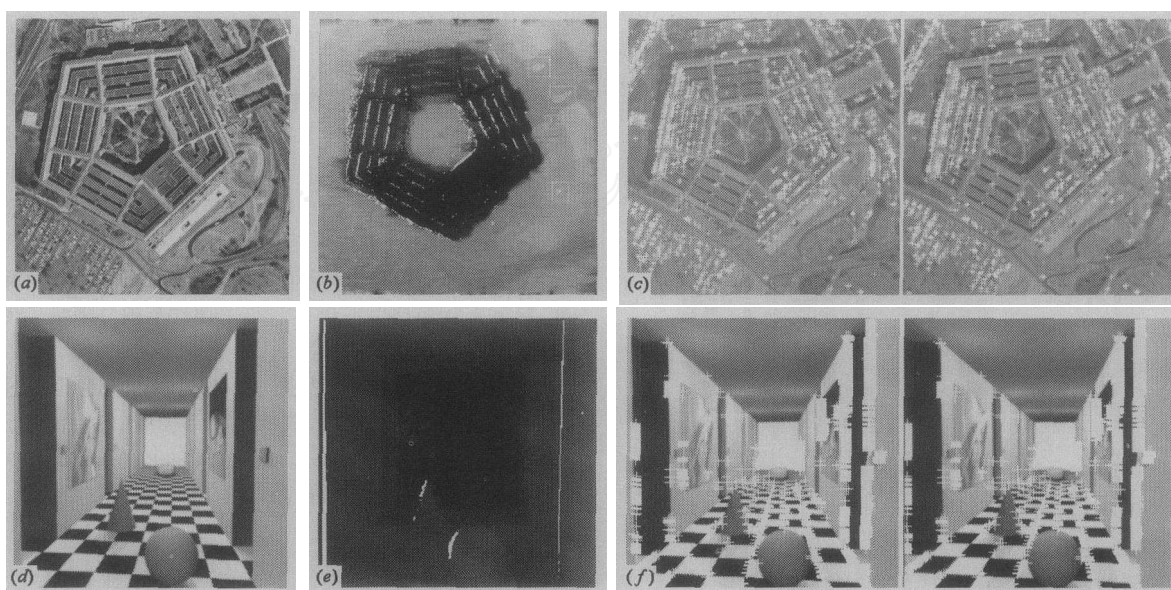


图 5 立体像对以及本文算法有关实验结果 (a)pentagon 左图;(b)以灰度值 255 标记右遮挡的视差图;(c)原图像对中计算出的高置信度特征匹配点(白色叉点标志处);(d)corridor 左图;(e)以灰度值 255 标志右遮挡的视差图;(f)原图像对中计算出的高置信度特征匹配点(白色叉点标志处)

从图 5 中 pentagon 像对的实验结果可以看出,高置信度特征匹配点的定位准确,五角大楼附近的遮挡被成功地检测,一些由斜面引起的细微视差变化也被检测出来,如图 5(b)中右上角方框标记出的立交桥斜面.此外,一些细微的遮挡也被算法检测得到,如白色框标出的大楼附近环形路的遮挡以及高速公路上汽车的遮挡.

Corridor 像对中由于匹配过程的窗口效应,处于 corridor 图像边界附近的遮挡检测以及有效的特征匹配约束无法实现.但从表 1 列出的实验数据可以看出,本文的匹配方法简单、快速且有效,绝大部分遮挡区域能被可靠地检测到,具有一定的实用性.

#### 5 结论

本文摒弃了通常所用的相位差-频率法和相位相关法,而

直接利用像对间对应点位置上相位相等的事实提出一种新的相位匹配方法,并以归一化幅度作为权重减小奇点对邻域视差确定过程的影响,同时特征匹配减缓了原图的奇点问题并约束匹配路径在视差不连续处产生相应的视差跳跃.算法还考虑了照相机与物体平面不平行的情形,即通常的透视缩短问题,并且将其与遮挡问题一并归入最优匹配的搜索框架中予以解决.算法中提出的代价方程隐含着一种投票策略,奇点处的视差估计实际是通过邻域像素投票得以解决.整个算法模型简单统一并易于并行实现.实验结果的分析表明,本文提出的相位匹配算法能够有效处理奇点匹配问题、透视缩短问题以及遮挡检测问题.该算法可用于象数字高程模型这种需要得到稠密视差并且成像条件不是很好的应用场合,也可应用于遮挡出现较多的自动导向车三维场景识别等应用领域.本文的匹配算法目前还局限于一维相位匹配,未来的工作考

虑把算法扩展,构造四元离散小波滤波器<sup>[13]</sup>得到二维相位信息,建立基于二维相位的代价方程,实现对未校准图像的二维立体匹配,这将具有重大的理论意义.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Oppenheim A V, Lim J S. The importance of phase in signals[A]. Proc. of the IEEE[C]. Gong, 1981, 69(5): 529 - 541.
- [ 2 ] Sanger T D. Stereo disparity computation using Gabor filters[J]. Biological Cybernetics, 1988, 59: 405 - 418.
- [ 3 ] Jenkin M R M, Jepson A D, Tsotsos J K. Techniques for disparity measurement[J]. CVGIP: Image Understanding, 1991, 53(1): 14 - 30.
- [ 4 ] Fleet D J, Jepson A D, Jenkin M R M. Phase-based disparity measurement[J]. CVGIP: Image Understanding, 1991, 53(2): 198 - 210.
- [ 5 ] Cai L D, Mayhew J. A Note on Some Phase Differencing Algorithms for Disparity Estimation[J]. Int Journal of Computer Vision, 1997, 22(2): 111 - 124.
- [ 6 ] Fleet D J. Disparity from Local Weighted Phase-Correlation[A]. IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics[C]. San Antonio, 1994. 48 - 56.
- [ 7 ] 游素亚,柳建,徐光佑.利用视觉相位鉴别能力求解立体视觉匹配[J].电子学报,1996,24(10):72 - 75.
- [ 8 ] Zhou J, Xu Y, Yu W R. Phase Matching with Multiresolution Wavelet Transform[A]. Proc. SPIE[C]. San Jose, 2002, 4661: 82 - 91.
- [ 9 ] Kuglin C D, Hines D C. The Phase Correlation Image Alignment Method[A]. In Proc of IEEE Int Conf. on Cybernetics and Society [C]. New York, 1975. 163 - 165.
- [ 10 ] E A B, Silva da, Ghanbari M. On the performance of linear phase

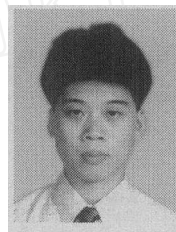
wavelet transform in low bitrate coding[J]. IEEE Trans Image Proc, 1996, 5(5): 689 - 704.

- [ 11 ] Westelius C J, Knutsson H, Wiklund J. Robust vergence control using scale-space phase information[R]. Report LITHISY-I-1363, Linkoping University, Sweden, 1992.
- [ 12 ] Bülow T. Hypercomplex spectral signal representations for the processing and analysis of images[D]. PhD. thesis, Kiel: University Christian Albrechts university of Kiel, 1999.

#### 作者简介:



徐 奕 女, 1975 年 9 月生于江西抚州市, 博士生, 主要研究图像处理、计算机视觉及小波变换理论和应用。



周 军 男, 1969 年 8 月生于江苏江市, 博士, 副教授, IEEE 会员, 主要研究视频图像压缩、图象处理、小波变换、软件中间件技术、实时视频网络传输技术等。