

基于各向异性竞争的双目滤波器

彭雄宏 周宗潭 王正志

(国防科学技术大学机电工程与自动化学院 302 教研室 长沙 410073)

摘要 鉴于立体图象对中特征的视差确定是计算机立体视觉研究的一个难点,因此在 FACADE 初级视觉理论的框架下,针对生物视觉系统对不同方向特征的不对称处理,结合细胞动力学方程实现了一种基于各向异性竞争的双目滤波器.这种改进了的基于各向异性竞争策略 FACADE 系统,由于更有利于将双目特征匹配还原为细胞活性的自组织活动,因此获得了真实场景中的视差分布.

关键词 立体视觉 双目匹配 细胞动力学 各向异性竞争 FACADE

中图法分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2001)03-0275-05

A Binocular Filter Based on Anisotropic Competition

PENG Xiong-hong, ZHOU Zong-tan, Wang Zheng-zhi

(Department of Automatic Control, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073)

Abstract In the field of computer vision, it's difficult to get the disparity of features from stereo images. In this paper, a binocular filter based on anisotropic competition which adapted from FACADE theory to find disparity of features is proposed. Binocular filter use cells activity to represent the disparity distribution of features. There is competition between cells before the disparity distribution of features is acquired. Because of the horizontal bias of "eyes" configuration in binocular vision system, features with different orientation must be processed differently. Anisotropic competition is used in order to consider features with different orientation in a uniform way. The method of anisotropic competition better the performance of FACADE model by favoring the self-organization of cell activities. This approach is much different from the traditional method of matching the elements in the two images, which provides a different view of computer vision research.

Keywords Stereo vision, Binocular match, Cell dynamics, Anisotropic competition, FACADE

0 引言

立体视觉技术是计算机视觉研究的一个重要组成部分,其难点是图象要素的双目匹配.人们知道,传统的立体视觉研究是在 Marr 理论体系主导下,着眼于将左右图象要素唯一的匹配上,可是在照明条件不完全相同的两幅含有噪声和畸变的立体图象对中确定图象要素,以及解决具有丰富细节图象的多个图象特征匹配等问题是很复杂的,这就迫使人们采用另外的思路来考虑这些问题^[1].充分借鉴生物视觉研究的最新成果来进行计算机立体视觉研究已引起人们广泛注意^[2,3].

在生物视觉研究的基础上, Grossberg 等研究人员即于 1994 年提出了 PACADE 理论^[2],并于 1997 年又

加以扩展^[3].这是一个基于生物视觉原理的双目视觉理论框架. FACADE 理论是以细胞动力学为基础,将双目视觉中的图象要素还原为许多细胞的活性状态,并通过细胞动力学中蕴含的竞争和合作机制来实现图象要素检测及双目特征匹配等功能,从而避免了像 Marr 理论体系那样引入一些与现实场景图象并不完全相符的约束^[3].同时, FACADE 理论还引发人们对于传统立体视觉理论的一些思考如 (1)传统立体视觉中的图象要素是人类对世界环境的描述单元,也是人类对知识的一种提炼,而生物系统的一切辨认(或思考)过程都归因于神经元细胞响应的活性情况(视觉过程也不例外),而将生物的视觉过程还原为神经元细胞的活性情况将有助于人们尝试构建类似于生物视觉系统那样复杂的立体视觉系统. (2)传统的双目匹配是确定图象要素的视差位置,在匹配的过程

中,为了减少待匹配的图象要素数目引入了诸如连续性等的约束,但类似连续性约束并不符合自然场景中大量不连续现象的事实,因此 FACADE 理论将双目匹配过程从“确定图象要素的视差位置(当人们用视差层来表示物体距双眼所在竖直平面的远近时,双目匹配过程即确定了图象要素在哪个视差层面上)转化为“在某个特定的视差层面上,对特征进行响应的细胞活性情况是怎样的”这个问题,由于这种转化消除了双目匹配过程中所引入的一些未必正确的约束,从而在一定程度上简化了双目匹配问题,并可能利于目标辨识。

由于 FACADE 理论针对生物视觉系统建立了一个动力学框架,因此它能对一些简单的几何线画图进行处理,但对于真实图象中存在的噪声干扰、特征呈现的多方位性和模糊性等现象进行处理时则需要改进。考虑到双眼在生物头部的水平位置的差别,在双目匹配过程中,那些具有水平对比特征的图象要素,对双目视差的确定,几乎没有任何影响,而决定双目视差的是那些至少部分含有竖直对比特征的图象要素^[3],这就要求对敏感于不同方向特征的细胞不能采用同样的处理。在 FACADE 理论中,进行双目匹配的双目滤波器是采用各向同性的邻域竞争和层间竞争来达到细胞活性的分配,并将水平对比的细胞活性与其他方向对比的细胞活性完全分离,从而忽略了非水平非竖直方向上对比的细胞活性与竖直方向上对比的细胞的活性形成的差别,但这将造成一些特征被表征在错误的视差层面上,并可能对后续的对方向分析过程造成不利的影响。为此,本文提出了一种基于各向异性竞争的双目滤波器,它是将生物视觉对不同方向特征的不对称处理,有机地集成到细胞活性的竞争与合作中,从而有利于形成正确的特征视差分布。

1 各向异性竞争的双目滤波器模型

1.1 细胞动力学方程

生物视觉系统对视觉信息的处理是通过各个阶段上大量细胞的响应来完成的,而 FACADE 系统所有细胞对输入的响应也遵循同一个动力学方程,即细胞动力学方程,它是根据生理试验数据而总结出来的。一般来说,每个神经元细胞的功能实现都可采用一个变化的电压 $V(t)$ 也称为该细胞的活性来模拟,它

的动力学方程(也称膜电位方程)由下式确定^[2]

$$C_m \frac{dV(t)}{dt} = -(V(t) - E_{LEAK})g_{LEAK} - (V(t) - E_{EXCIT})g_{EXCIT}(t) - (V(t) - E_{INHIB})g_{INHIB}(t) \quad (1)$$

这里参数 E_{LEAK} 、 E_{EXCIT} 、 E_{INHIB} 分别代表对应于泄漏、激励和抑制的反电动势, g_{LEAK} 是定常的泄漏电导,而时变的电导 $g_{EXCIT}(t)$ 和 $g_{INHIB}(t)$ 则分别是该细胞对应于激励和抑制的总输入函数。在具体计算中,可以不考虑暂态过程的状态变化,因为假定所有状态在达到稳态后,才对活性进行计算。通过重新标定时间后,电容 C_m 项可以设为 1,通过移动 $V(t)$ 的零电位定义,泄漏反电动势可以设置为 0,这样变换后,抑制性电位 E_{INHIB} 是非正的。

式(1)可以改写为

$$\frac{dV}{dt} = -\alpha V + (U - V)g_{EXCIT} - (V + L)g_{INHIB} \quad (2)$$

式中, $\alpha = g_{LEAK}$ 是定常的衰减率, $U = E_{EXCIT}$ 和 $L = |E_{INHIB}|$ 。

式(2)的细胞动力学方程是双目滤波器的基础,系统内几乎所有的方程都是以这个细胞方程为基础进行相应拓展的。在式(2)中,引入邻域的激励和抑制信号便能使方程隐含竞争作用(由近邻的相互抑制作用实现)和合作作用(由于近邻的相互抑制,从而使得不远处的细胞活性所受到的抑制得以消除,从而达到间接合作的作用)。在实现过程中,一些基于各向异性竞争的双目滤波器各个阶段存在的大量细胞,即代表相应的处理单元,虽然这些细胞的活性变化规律是一样的,但它们通过不同的连接来接受不同的激励性输入和抑制性输入,从而实现视觉处理的不同功能。

1.2 双目滤波器

整个双目滤波器系统由如下 3 个阶段组成:

①实现照明度补偿的 ON 细胞和 OFF 细胞处理阶段;②实现方向对比检测的简单细胞处理阶段;③实现视差层细胞活性分配的双目竞争合作阶段^[2,3]。

(1) ON 细胞和 OFF 细胞处理阶段

ON 细胞和 OFF 细胞处理阶段是由对应于视网膜和侧膝体的 ON 与 OFF 通道的中心-周边相互作用组成的。在系统中,“中心激励,周边抑制”的 ON 细胞和“中心抑制,周边激励”OFF 细胞补偿了左右照明不同的影响,它们敏感于每个细胞的感受野所张成的局部图象区域的相对对比度。通过对左眼图象和右眼图象的 ON 通道响应和 OFF 通道响应进行

半波整流,以产生有向简单细胞的输入.

$$C_{ij} = \sum_{mn} c_{mn} x_{i-m, j-n}, S_{ij} = \sum_{mn} s_{mn} x_{i-m, j-n} \quad (3)$$

$$\frac{dx_{ij}^+}{dt} = -\alpha x_{ij}^+ + (U - x_{ij}^+) C_{ij} - (x_{ij}^+ + L) S_{ij} \quad (4)$$

$$\frac{dx_{ij}^-}{dt} = -\alpha x_{ij}^- + (U - x_{ij}^-) S_{ij} - (x_{ij}^- + L) C_{ij}$$

$$x_{ij}^{\text{ON}} = [x_{ij}^+ - x_{ij}^-]^+, x_{ij}^{\text{OFF}} = [x_{ij}^- - x_{ij}^+]^+ \quad (5)$$

式中 x_{ij}^{ON} 和 x_{ij}^{OFF} 分别是 ON 细胞和 OFF 细胞的输出, 上述方程与细胞膜电位方程对应, 其中 x_{ij} 为输入图象; c_{mn} 和 s_{mn} 分别代表方差不同的高斯卷积核; U 代表细胞活性的上界, L 代表细胞活性的下界, 而 C_{ij} 和 S_{ij} 分别与激励和抑制的输入对应, 操作 $[\cdot]^+$ 表示半波整流. 式(3)式(5)对左右眼输入图象均起作用.

(2) 简单细胞处理阶段

简单细胞处理阶段首先是由伸长的对比检测器组成的, 它可用于完成一定方向上的局部对比度的检测, 即有向滤波. 该过程是简单细胞首先对预定的方位极性或对比度方向产生反应, 然后系统输出经过半波整流便被输入到复杂细胞级(即双目竞争合作阶段)进行处理, 而双目滤波器也是采用 Gabor 滤波器来实现有向滤波的功能. 该滤波器是由一个正弦项和一个指数项的乘积组成. 简单细胞处理阶段依对比极性的不同, 而形成正负极性的输出, 分别表示“由暗到明”和“由明到暗”的对比极性.

$$s_{pqijk} = \frac{1}{2\pi\sigma_i\sigma_v} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{(p-i)\cos\left(\frac{\pi k}{K}\right) - (q-j)\sin\left(\frac{\pi k}{K}\right)}{\sigma_h} \right)^2 + \left(\frac{(p-i)\sin\left(\frac{\pi k}{K}\right) + (q-j)\cos\left(\frac{\pi k}{K}\right)}{\sigma_v} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

$$S_{ijk}^{L/R, +/-} = \left[\sum_{l=1}^L s_{pqijk} x_{ij}^{L/R, \text{ON/OFF}} - \sum_{r=1}^R s_{pqijk} x_{ij}^{L/R, \text{OFF/ON}} \right]^+ \quad (7)$$

其中, s_{pqijk} 是有向卷积核, $S_{ijk}^{L/R, +/-}$ 分别表示对应于左右眼输入图象的简单细胞正负极性输出.

(3) 双目竞争合作阶段

双目竞争合作阶段是双目匹配中最关键的一步, 因为生物视觉系统正是通过双目竞争和合作才能从左右两幅图象形成各个深度平面上的响应.

在该阶段, 首先, 将来自简单细胞的信号以下述方式进行组合

$$M_{ijkl} = \left(\sum_{l=1}^L W_{dlk} S_{i, j+l, k}^{L/R, +} + \sum_{r=1}^R W_{drk} S_{i, j+r, k}^{L/R, +} \right) - \left(\sum_{l=1}^L W_{dlk} S_{i, j+l, k}^{L/R, -} + \sum_{r=1}^R W_{drk} S_{i, j+r, k}^{L/R, -} \right) \quad (8)$$

其中, $S_{ijk}^{L/R, +/-}$ 是方向为 k 的简单细胞的正负极性

输出; W_{dlk} 和 W_{drk} 是对应于将信号调谐到各个视差层 d 上的权函数(这可以通过对标定图象的学习或由经验来获得具体值); l, r 是下标计算的索引号. 虽然每个简单细胞只敏感于一种对比度极性, 但通过上述这种方式的组合, 复杂细胞一般也能汇合相反对比度极性的信号, 使得具有相同对比度极性边缘的双目匹配变得容易.

各向异性双目竞争阶段细胞活性的动力学方程用如下方程式表达:

$$\frac{dc_{ijkl}}{dt} = -\alpha(k) c_{ijkl} + (U - c_{ijkl}) A_{ijkl} - (c_{ijkl} + L) I_{ijkl} \quad (9)$$

其中

$$A_{ijkl} = \sum_p R_{pk} M_{(j+p), kd} \quad (10)$$

$$I_{ijkl} = \sum_p \left(\sum_e (|\cos(k)| |h(c_{i, j+p, k, e}) D_{i, j+p, k, e}| + |\sin(k)| |E_{pk} M_{(j+p), kd}|) \right) \quad (11)$$

通过与细胞动力学方程比较可以发现: A_{ijkl} 对应着激励输入, I_{ijkl} 对应着抑制输入; R_{pk} 是与方位和距离有关的系数矩阵, 信号函数 h 是具有阈值 Γ_e 的半波整流模拟信号(只有保证细胞本身活性在一定阈值之上, 才能激发对其他细胞的抑制); $D_{(j+p), k, de}$ 代表对视差 e 和视差 d 编码的细胞间的抑制连结矩阵, 其参数是通过经验来获取的, 通过抑制连接矩阵, 即可以获得竞争稳定后不同时差层面上的细胞活性的状态和分布情况; E_{pk} 是与距离有关的系数. 由式(9)式(10)和式(11)可以看出, 由于细胞活性的激励输入和抑制输入都受到与方位有关的信号控制, 我们可以通过 R_{pk} 和 E_{pk} 来控制细胞间竞争的活性大小和竞争方式, 从而达到各向异性竞争的效果.

细胞活性稳定后, c_{ijkl} 便代表在深度平面 d 上, 方位为 k 且位置在 i, j 处的细胞活性值, 它基本实现了对左右图象中重要特征的匹配.

2 实现结果和分析

本文采用拍摄的两幅图象作为测试数据(如图1), 其立体图象对见图2, 在图2的待处理图象中, 人们可以看到图象中存在噪声和由于采样精度不够或由于灰度转换等引起的边缘模糊现象. Grossberg 提出的视差竞争方法对这些噪声和模糊边缘的处理感到比较棘手, 而采用基于各向异性竞争视差竞争方法后, 则能有效地用细胞活性分布来反映立体图

象对中的视差特征.

将图 3 ON 细胞的输出图与原图比较可以看出, ON/OFF 细胞处理阶段成功地消除了照明渐变的影响.图 5 中的各个子图表示各视差层上细胞对视差响应的活跃状态,图上的颜色由黑经灰到白表示细胞活跃强度由大到小;“视差平面 0”“视差平面 3”分别表示垂直于视线方向的与“双眼”处于由远到近

的几个不同距离的竖直平面;“视差平面 0”表示左视图象和右视图象的“凝视平面”,处于“视差平面 0”上的特征在左视图象和右视图象中没有视差.由于水平特征在水平偏置的两个摄像机所成图象中具有视差不定性,故而在这 4 个视差平面上的水平特征几乎是一样的.图中可以看出:“视差平面 0”图象基本上反映了处于“视差平面 0”的视差距离

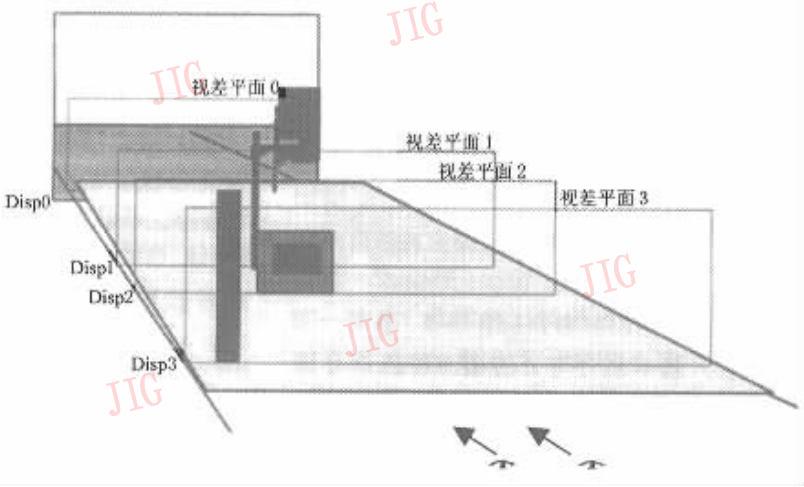
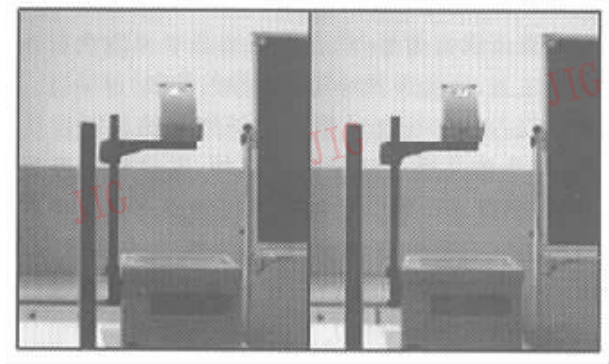


图 1 测试场景图像获取示意图



左视图像 右视图像
图 2 立体图像对

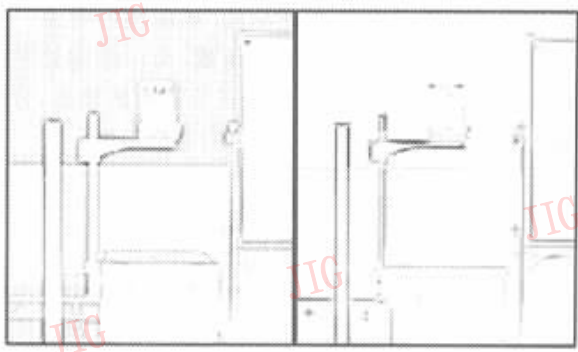


图 3 ON 细胞的输出
(右图象)

图 4 简单细胞的输出
(右图象)

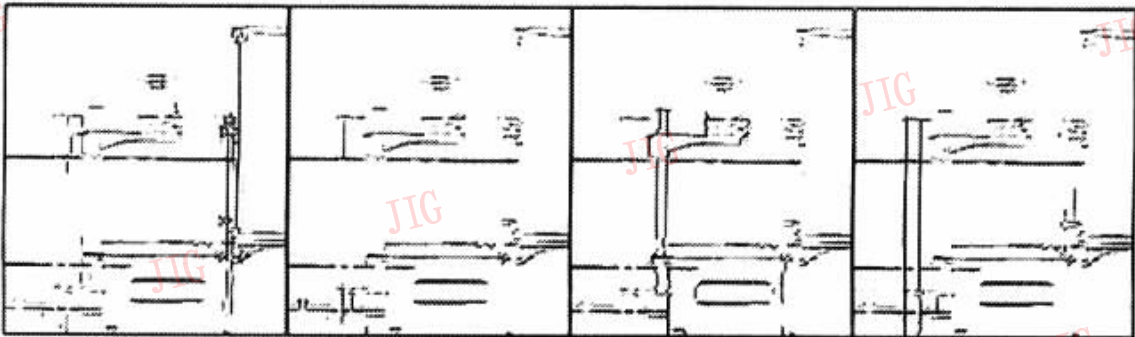


图 5 各向异性竞争后各视差层上细胞活性的分布

上的黑板轮廓;视差平面2'图象反映了处于“视差平面2”的视差距离上的投影仪轮廓;视差平面3”反映了处于“视差平面3”的视差距离上的黑色条棒轮廓.这样,图5中各视差层上的细胞活性分布即基本反映了立体图象对中特征的视差位置.

由于噪声和模糊轮廓等因素的影响,细胞活性所反映出的视差分布还存在一些“虚边”、特征不连续和斑点等现象,而且,由于反映水平特征的细胞活性在各个视差层上基本上是一样的,因而需要对这些水平特征的视差分布进行确定,为此,双目生理视觉系统的后续步骤将实现虚活性(即由于受噪声干扰而发生错误匹配所引起的活跃活性)的消除、水平对比活性的选取以及各方向上边界的优化,从而达到消除误匹配和将水平活性正确分配到对应的视差层上以及修正偏移边界的目的.

3 结 论

从以上结果可以看出,基于各向异性竞争的双目滤波器,首先以一种完全不同于传统双目视觉的方法,初步实现了将立体图象对中的那些特征映射成不同视差层上细胞的活性分布,然后用各向异性竞争的细胞动力学方法实现了生物视觉系统 FACADE 理论中重要的一个过程,并在 FACADE 生物视觉理论的指导下,将图象中构成物体的各种特征还原为一群细胞的活性分布情况,这符合“人的一切思维活动都是由一群神经元的活动情况来反映的”这一生理学认识,也更有利于充分结合当今神经生理学、生物解剖学等学科的最新研究成果即以各种高层反馈和优化的方式来引导这些神经活性的分布.特别是在目标辨识过程中可利用高层细胞活性与理想活性之间的差别来激励和抑制各层细胞的活性,进而逐步调整细胞活性以正确反映物体深度分布.在 FACADE 理论框架下,经过对系统的适当改进,还可以用它来部分解决一些传统立体视觉方法所面临的难题(如单目信息处理),但在将 FACADE 系统逐步改进,以便有效地处理真实复杂场景图象的过程中,还有不少的难题有待解决,需要做进一步的研究.

参 考 文 献

- 1 游素亚,徐光祐.立体视觉研究的现状与进展.中国图象图形学报,1997,2(1):1723.
- 2 Grossberg S. 3-D vision and figure-ground separation by visual cortex. Perception & Psychophysics, 1994, 55(1):48120.
- 3 Grossberg S, McLoughlin N P. Cortical dynamics of three-dimensional surface perception: Binocular and half-occluded scenic images. Neural Networks, 1997, 10(9):15831605.
- 4 Grunewald A et al. Self-organization of binocular disparity tuning by reciprocal corticogeniculate interactions. Tech Report CAS/CNS-TR-96-027. Boston, MA: Boston University.
- 5 Harris J, Parker A. Independent neural mechanisms for bright and dark information in binocular stereopsis. Nature, 374: 808811.
- 6 吴立德. 计算机视觉需要更扎实更艰苦的工作. 模式识别与人工智能, 1992, 5(4): 261265.

彭雄宏 1995 年获国防科学技术大学自动控制系统学士学位,现为国防科学技术大学智能控制专业博士研究生,研究兴趣为生理视觉、模式识别.

周宗潭 1998 年获国防科学技术大学自动控制系统控制理论与应用专业博士学位,现在国防科学技术大学自动控制系统工作,研究兴趣是神经网络、心理组织和模式识别,发表论文近 20 篇.

王正志 1984 年获美国 Rice 大学博士学位,现为国防科学技术大学自动控制系统教授、博士生导师,《自动化学报》和《宇航学报》编委,目前研究领域包括遥感信息处理、智能控制、 H_∞ 控制、自适应控制、神经网络、模式识别及机器学习.