

多专家的 PCA 边缘检测模型

李建军¹, 韦志辉², 张正军¹

(1. 南京理工大学 理学院, 210094 南京; 2. 南京理工大学 计算机科学与技术系, 210094 南京)

摘要: 视一种边缘检测法为一个专家, 为了解决不同专家检测结果的 inconsistency 以及解决专家选择上的困难, 提出了一种基于多专家与主成分分析 (PCA) 的边缘检测模型. 首先给专家响应建立了统计模型, 通过此模型分析得出, 边缘检测模型能有效抑制专家噪声; 然后利用提出的边缘检测模型融合多个专家的检测信息得到基于多专家的综合检测结果. 实验结果表明, 边缘检测模型可获得很好的边缘检测效果.

关键词: 边缘检测; 专家; 主成分分析

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)11-0092-04

Edge detection model based on multi-expert and principal component analysis

LI Jian-jun¹, WEI Zhi-hui², ZHANG Zheng-jun¹

(1. School of Science, Nanjing University of Science and Technology, 210094 Nanjing, China;

2. Dept. of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, 210094 Nanjing, China)

Abstract: Each method of edge detection is regarded as an expert. To solve the problem of inconsistency of different expert responses and the difficulty of choosing right expert, a model of edge detection based on multi-expert and principal component analysis (PCA) is proposed. Firstly, a statistical model for expert response is established, and theoretical analysis shows that the edge detection model can effectively suppress noise coming from the expert. Then, the information of multiple detection results were combined to obtain the general detection result with the model based on multi-expert and PCA. The experimental results are very satisfactory.

Key words: edge detection; expert; principal component analysis

数字图像处理自 20 世纪 20 年代至今, 得到了很大的发展, 图像处理技术也成功地应用于医学、生物学、国防、工业等广泛的领域. 在图像处理过程中, 每个处理步骤、处理方法都是多种多样, 例如边缘检测, 有基于滤波的方法^[1-2], 也有基于模型的方法^[3-4], 等等. 这些方法各有优缺点, 每种方法的处理结果也不尽相同, 在没有一个客观标准对这些方法进行取舍的情况下, 运用适当的方法对多个处理结果进行系统、客观、定量的综合分析, 得到综合结果, 解决处理结果的不一致性,

是很有意义的工作.

1999 年, G. Hinton^[5] 将多个单一的模型以乘积的方式结合起来, 提出了专家乘积模型. 在这个模型中, 每个专家都对所研究的数据进行了描述, 但单个的专家更专注于描述数据的某个侧面特征, 专家乘积模型则从多方面描述了数据, 因此更富表现力. 2005 年, Roth^[6] 又将马尔科夫随机场模型与专家乘积模型结合起来, 提出了专家场模型^[7], 并在文献^[8]中讨论了专家场在图像去噪等方面的应用.

主成分分析^[9] 是多元统计分析中比较成熟的多元统计分析方法, 用于多维数据的降维, 以降低数据分析的复杂度, 它的应用十分广泛, 包括数据压缩、图像处理和模式识别等等. 主成分分析是通过投影的方法, 将高维数据以尽可能少的信息

收稿日期: 2011-10-30.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目 (2007AA12Z142); 国家自然科学基金资助项目 (60874118).

作者简介: 李建军 (1975—), 男, 博士研究生;

韦志辉 (1963—), 男, 教授, 博士生导师.

通信作者: 李建军, j_jli@163.com.

损失投影到低维空间^[10]. 设 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p)'$ 为 p 维列向量, 其协方差矩阵记为 \mathbf{V} , 若 \mathbf{V} 的秩为 $m (m \leq p)$, 则存在 m 个主轴 $\mathbf{w}_j, j \in \{1, 2, \dots, m\}$, 使得 $\mathbf{V}\mathbf{w}_j = \lambda_j\mathbf{w}_j$, 其中 \mathbf{w}_j 为 \mathbf{V} 的特征根 λ_j 的特征向量. 第 j 个成分定义为 $Y_j = \mathbf{w}_j'\mathbf{X}$. 记 $\mathbf{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)'$, 则 $\text{var}(\mathbf{Y})$ 是以 \mathbf{V} 的特征根 λ_j 为对角线元素的对角阵, 且 $\sum_{j=1}^m \text{var}(Y_j) = \sum_{i=1}^p \text{var}(X_i)$.

本文将专家的思想 and 主成分分析方法结合起来, 提出了基于多专家与 PCA 的边缘检测模型. 假设一种边缘检测法对应为一个专家, 因为不同专家采用的思想和方法等的差异, 会导致不同的边缘检测结果. 由于缺乏选择的客观标准, 很难确定该选择哪个专家来进行边缘检测. 对多个专家的检测结果进行主成分分析, 融合多专家的边缘检测信息, 得到基于多专家的综合检测结果. 这将解决不同专家检测结果的不一致性, 并且在给专家响应建立统计模型的基础上, 通过理论分析得出, 本文提出的边缘检测方法能有效抑制专家噪声. 实验证明, 利用本文提出的边缘检测模型得到的边缘检测效果是令人满意的.

1 基于多专家的边缘检测模型

令 \mathbf{I} 为待处理的图像, 其定义在 $N \times N$ 的格子 \mathbf{D} 上, 对 $\forall \vec{v} \in \mathbf{D}, I(\vec{v}) \in \mathbf{L}$, 这里 \mathbf{L} 为实数区间或整数集, $I(\vec{v})$ 为图像在 \vec{v} 点的灰度值.

设有 p 个专家, 每个专家是一个边缘检测器. 令 $X_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 为这 p 个专家在 \vec{v} 点的专家响应. 令 \mathbf{V} 为列向量 $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_p)'$ 的协方差阵, \mathbf{V} 的秩为 $m (m \leq p)$, 其非零特征根为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$, 且不妨令 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m$. 由矩阵分析理论知, 存在正交阵 $\mathbf{A} = (\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_m)'$, 使得 $Y_j = \mathbf{w}_j'\mathbf{X}$, 其中 \mathbf{w}_j 为 λ_j 的特征向量, Y_1, Y_2, \dots, Y_m 是不相关的, 且 $\text{var}(Y_1) \geq \text{var}(Y_2) \geq \dots \geq \text{var}(Y_m)$.

随机变量所含信息的大小, 通常用其方差来衡量. 故从信息的角度讲, 成分 $Y_j, j \in \{1, 2, \dots, m\}$, 保留了专家响应 $X_i, i \in \{1, 2, \dots, p\}$ 的信息, 因为 $\sum_{j=1}^m \text{var}(Y_j) = \sum_{i=1}^p \text{var}(X_i)$, 且 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 包含的信息是不相关的, 包含的信息量是单调不增的.

1.1 专家响应模型与分析

图像 \mathbf{I} 在 \vec{v} 点处的真实边缘状态由随机变量

E 表示, 若 \vec{v} 点处为图像边缘, 则 E 取 1, 若 \vec{v} 点处不是图像边缘, 则 E 取 0. 第 i 个专家在 \vec{v} 点的专家响应 X_i 描述为

$$X_i = E + \varepsilon_i.$$

式中 ε_i 为专家噪声, 且令 $\varepsilon_i \sim N(\mu_i, \sigma^2)$. 设 E 与 ε_i 相互独立, 且 $\varepsilon_i, (i = 1, 2, \dots, p)$ 相互独立. 因为成分 $Y_j = \mathbf{w}_j'\mathbf{X}$, 记 $\mathbf{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jp})'$, 即有

$$Y_j = \sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji} X_i.$$

则 Y_j 的方差为

$$\begin{aligned} \text{var}(Y_j) &= \text{var}\left(\sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji} X_i\right) = \text{var}\left(\sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji} E + \sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji} \varepsilon_i\right) = \\ &= \left(\sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji}\right)^2 \text{var}(E) + \sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji}^2 \sigma^2 = \\ &= \left(\sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji}\right)^2 \text{var}(E) + \sigma^2. \end{aligned}$$

式中: Y_j 的方差 $\text{var}(Y_j)$ 由两部分组成. 从信息的角度可以这样理解, $\left(\sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji}\right)^2 \text{var}(E)$ 为原图像的边缘信息, σ^2 为专家带来的噪声. 因为 $\text{var}(Y_1) \geq \text{var}(Y_2) \geq \dots \geq \text{var}(Y_m)$, 所以得到的成分 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 所包含的原图像的边缘信息 $\left(\sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji}\right)^2 \text{var}(E)$ 是递减的, 且信噪比 $\left(\sum_{i=1}^p \mathbf{w}_{ji}\right)^2 \text{var}(E) / \sigma^2$ 递减. 故在利用 Y_1, Y_2, \dots, Y_m 恢复原数据信息的过程中舍弃一些弱成分, 不但可以达到降维的目的, 也可以起到抑制专家噪声的作用.

1.2 边缘检测模型

每一个专家响应 X_i 都包含了图像 \mathbf{I} 的边缘信息, 本文希望融合这些信息得到综合的边缘检测结果.

协方差阵 \mathbf{V} 的非零特征根 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 描述了数据的信息分布, 称

$$e_j = \lambda_j / \sum_{j=1}^m \lambda_j.$$

为成分 Y_j 的贡献率, 称

$$g(q) = \sum_{j=1}^q e_j.$$

为累计贡献率, 这里 $1 \leq q \leq m$.

为了保留原数据的信息, 又要达到降维的目的, 采用累计贡献率的大小来决定 q 的值. 令

$$q^* = \arg \min_q \{g(q) \geq T\}.$$

式中: T 为给定的门限值; q^* 为选择成分的个数. 当 q^* 确定后, 称 Y_1, \dots, Y_{q^*} 为主成分, $Y_{q^*+1}, \dots,$

Y_m 为弱成分. 通常 T 取 85%, 此时利用主成分可以足够好的恢复原数据的信息, 且能起到降维与抑制专家噪声的目的. 本文给出基于多专家的综合边缘检测结果为

$$R = \sum_{j=1}^{q^*} \frac{e_j}{\sum_{k=1}^{q^*} e_k} Y_j.$$

2 实例与分析

不失一般性, 在此采用常用的 5 种边缘检测算子来检测边缘, 这 5 种算子即 5 个专家, 它们分别为 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子、LoG 算子和 Canny 算子.

2.1 实例: 基于多专家的边缘检测

图 1(a) 为 cameraman 图像原图, 图 1(b) ~ (f) 分别为上述 5 个专家检测出的边缘结果. 从图 1 中可看出, 这些专家检测出的结果类似, 但也各有特点. Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子检测出来的结果更相似, 而 Canny 算子和 LoG 算子则能检测出更多的边缘.

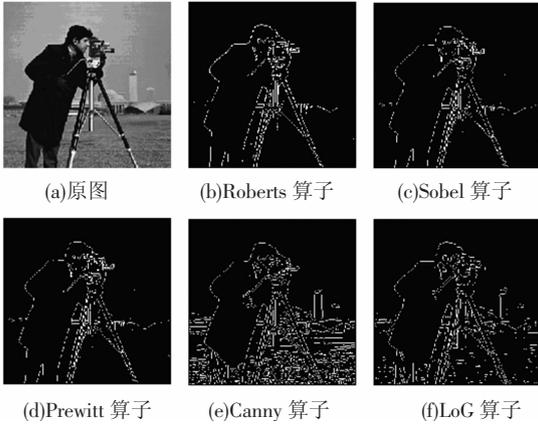


图 1 单个专家检测结果

本文利用主成分分析的方法对 5 个专家的检测结果进行主成分分析. 按贡献率从大到小得到的第 1 主成分 ~ 第 5 主成分如图 2 所示.

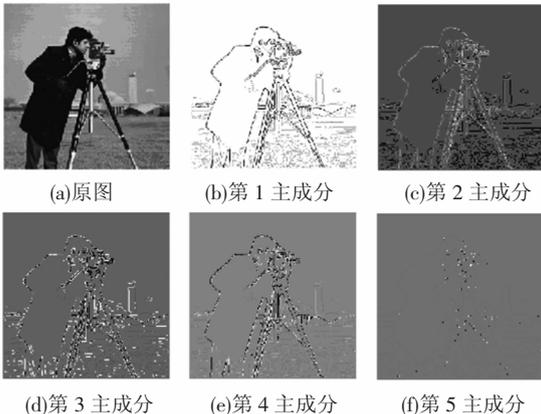


图 2 主成分分析结果

图 2(b) ~ (f) 的贡献率分别是 53.011%、20.095%、16.104%、10.015% 和 0.773 78%. 从图 2 中可看出, 图 2(b) ~ (f) 包含的图像细节越来越少, 也即包含的图像边缘信息越来越少. 取 $T = 85%$, 由式(1)融合主成分的信息得到综合的边缘检测结果, 如图 3 所示.



图 3 基于多专家的检测结果

从图 3 可看到, 由基于多专家边缘检测法检测出的边缘结合了各个专家检测的边缘信息, 相比 Roberts 算子、Sobel 算子、Prewitt 算子的检测结果, 基于多专家的检测结果有更多的边缘细节, 相比 Canny 算子和 LoG 算子的检测结果, 基于多专家的检测结果检测的边缘更细腻.

2.2 分析

通过上述实例可看出, 基于多专家与 PCA 的边缘检测法具有下列特点.

1) 它是多个专家边缘检测结果的综合.

由于不同专家采用的思想、方法等的不同, 导致了不同的边缘检测结果, 但很难确切地判断哪个专家好或是不好. 基于多专家的边缘检测方法提供了一个客观的、定量的分析方法, 将这些专家的处理结果综合起来, 得到较为理想的综合结果, 解决了处理结果的不一致性.

2) 它保留了多个专家边缘检测结果的主要信息, 同时又能有效抑制专家噪声对检测结果的影响.

每个专家在进行边缘检测任务时都有其优劣之处, 其检测的结果包含了该专家带来的噪声. 基于多专家的边缘检测法对这些结果进行了主成分分析, 然后对成分进行取舍, 既保留了图像的主要边缘信息又降低了专家噪声对检测结果的影响. 实验证明, 综合的检测结果是令人满意的.

3 结论

本文引入专家的思想, 将每个边缘检测方法视为一个专家, 在给专家响应建立了概率统计模型的基础上, 从理论上分析了提出的基于多专家

与 PCA 的边缘检测模型能有效抑制专家噪声. 此模型解决了各个专家检测结果的不一致性, 也解决了专家选择上的困难. 实验证明, 采用此模型能减小单个专家对检测结果的影响, 能得到令人满意的边缘检测效果. 本文的处理方法也可用于其他图像处理问题, 如图像分割等.

参考文献:

- [1] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital Image Processing [M]. 2nd ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 2002.
- [2] ZIOU D, TABBONE S. Edge detection techniques-an overview [J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 1998, 8(4): 537 - 559.
- [3] TARDÓN L J, BARBANCHO I, MÁRQUEZ F. A markov random field approach to edge detection [C]// Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference 2006. Piscataway: IEEE, 2006: 482 - 485.
- [4] KONISHI S, COUGHLAN J M, YUILLE A L, *et al.* Statistical edge detection: learning and evaluating edge cues [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(1): 57 - 74.
- [5] HINTON G. Product of experts [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Artificial Neural Networks 1999. Stevenage: IEEE, 1999: 1 - 6.
- [6] CROSS G, JAIN A. Markov random field texture models [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1983, 5(1): 25 - 39.
- [7] ROTH S, BLACK M. Fields of experts: a framework for learning image priors [C]//Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Los Alamitos: IEEE, 2005: 860 - 867.
- [8] ROTH S, BLACK M. Fields of experts [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 82(2): 205 - 229.
- [9] JOLLIFFE I T. Principal Component Analysis [M]. New York: Springer-Verlag, 1986.
- [10] HOTELLING H. Analysis of complex of statistical variables into principal components [J]. Journal of Educational Psychology, 1933, 24(6): 417 - 441.
- (编辑 张 红)
-
- (上接第 91 页)
- [5] JEON Ju-II, KANG Hyun-Soo. Enhanced three-dimensional discrete cosine transform based compression method for integral images by adaptive three-dimensional block construction [J]. Journal of Applied Optics, 2010, 49(30): 5728 - 5735.
- [6] ELHARAR E, STERN A, HADAR O, *et al.* A hybrid compression method for integral images using discrete wavelet transform and discrete cosine transform [J]. Journal of Display Technol, 2007, 3(3): 321 - 325.
- [7] YAN P, XIANYUAN Y. Integral image compression based on optical characteristic [J]. Journal of IET Computer Vision, 2011, 5(3): 164 - 168.
- [8] AGGOUN A, MAZRI M. Wavelet-based compression algorithm for still omnidirectional 3D integral images [J]. Journal of Signal Image and Video Process, 2008, 2(2): 141 - 153.
- [9] AGGOUN A. Compression of 3D integral images using 3D wavelet transform [J]. Journal of Display Technology, 2011, 7(11): 586 - 592.
- [10] KANG H H, SHIN D H, KIM E S. Compression scheme of sub-images using Karhunen-loeve transform in three-dimensional integral imaging [J]. Journal of Optics Communications, 2008, 281(14): 3640 - 3647.
- [11] YOO C H, KANG H H, KIM E S. Enhanced compression of integral images by combined use of residual images and MPEG - 4 algorithm in three-dimensional integral imaging [J]. Journal of Optics Communications, 2011, 284(20): 4884 - 4893.
- [12] PURI R, MAJUMDAR A, RAMCHANDRAN K. PRISM: A video coding paradigm with motion estimation at the decoder [J]. Journal of Image Processing, 2007, 16(10): 2436 - 2448.
- [13] PARK J H, KIM J, LEE B. Three-dimensional optical correlator using a sub-image array [J]. Journal of Optics Express, 2005, 13(13): 5116 - 5126.
- (编辑 杨 波)