

單元六、邊緣偵測

陳慶瀚

2004-11-03

將影像切割成物件和背景是物件辨識和影像理解前的基本工作，這個工作主要的任務是找出物件的邊緣和線條。對人類視覺系統(human visual system)而言，這是一件輕而易舉的事，但在電腦視覺中，縱然是相當複雜的理論和演算法，都不容易模仿人類的這個行為能力。主要的困難來自以下問題：

- 原始影像量化的誤差和感測的雜訊。此一因素導致偵測亮度變化但並非物件邊緣的區域，同時可能漏失一些物件邊緣但是沒有明顯亮度變化的區域；
- 物件邊緣的正確位置會受到量化誤差和雜訊的影響而產生偏移；
- 物件邊緣在影像中應表現出銳利的亮度變化，這就是它的高頻特性，所以任何想要降低影像雜訊的平滑濾波都會導致邊緣區域訊號的糊化(blurring)；

絕大多數的邊緣偵測方法都是採用微分的原理，因為微分會放大高頻訊號，但也會放大雜訊，因此平滑濾波總是需要的。平滑濾波的程度是根據濾波器的大小(size)和濾波的尺度(scale)，越大的尺度越能表現出大範圍的亮度變化，但也使得所偵測出來的邊緣位置精確度越差；較小的尺度雖能找出較為正確的位置，但又容易產多許多錯誤的邊緣點。不同影像的尺度影響也不相同，想要找出一個最佳的尺度適用在一張影像的全部邊緣是很困難的，想要找出一個最佳的尺度適用在所有影像更是不可能的事。

多尺度的邊緣偵測(multiscale edge detection)方法因此提供一個到目前為止最好的邊緣偵測方法。這種方法的核心概念是應用不同 scale 的平滑濾波器(例如高斯濾波器)與原始影像作迴旋積，得到不同 scale 的濾波影像，再對每一個 scale 的濾波影像抽取其邊緣，最後疊合所有 scale 的邊緣資訊為最終的邊緣影像。

1. Scale space 濾波

尺度空間濾波是探討訊號(影像)隨尺度變化的濾波技術。

若有一維訊號 $f(x)$ 以 1-D 高斯濾波器進行迴旋積濾波：

$$G(x, \sigma) = e^{-\frac{x^2}{\sigma^2}}$$

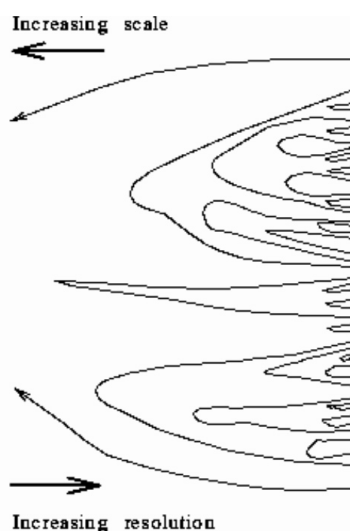
變化 σ ，訊號 $f(x)$ 在 (x, σ) 平面上形成的圖形稱為 **scale--space image**(尺度空間影像)
 $F(x, \sigma)$ ：

$$F(x, \sigma) = G(x, \sigma) * f(x)$$

對於特定 σ_0 ，曲線 $F(x, \sigma_0)$ 的反曲點(inflection point)將滿足

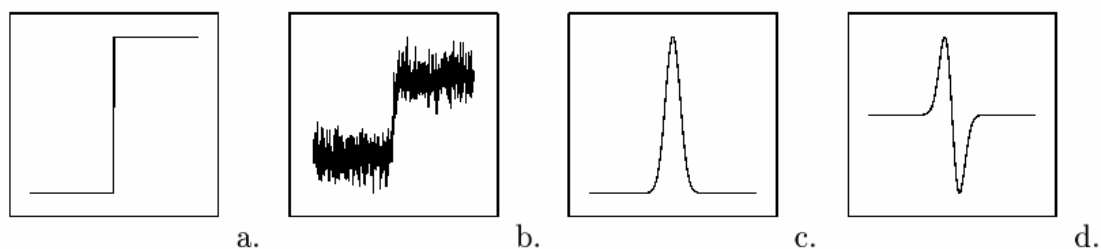
$$\frac{\partial^2 F(x, \sigma_0)}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 F(x, \sigma_0)}{\partial x^3} \neq 0$$

將所有反曲點連線可作為一組 (x, σ) 座標上的曲線，如下圖。 σ 越小的方向表示 scale 較大的反曲點。

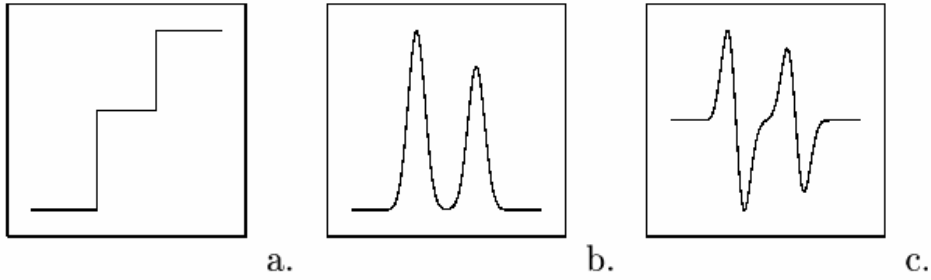


參考搜尋：IEEE Xplore 關鍵字：scale space <and> edge

2. 邊緣(Edge)的特性

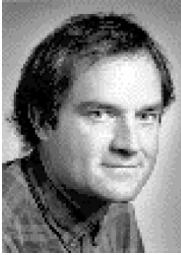


a. 階狀邊緣剖面；b. 平滑階狀邊緣剖面+white noise(a signal with a flat frequency spectrum); c.一階微分割面；d.二階微分割面；



a. 樓梯狀邊緣剖面；b.一階微分剖面呈現兩個 maximum 和一個 minimum；d.二階微分剖面呈現三個 zero-crossing；

3. Canny 邊緣偵測

	<p>Canny, J.F., A computational approach to edge detection. IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence, 8(6): 679-698, Nov 1986.</p>
--	--

Canny提出Edge Detection濾波器的評估準則：

1. 在平坦的影像區域沒有響應 => 濾波器係數和為零: $\sum_{r,c} w(r,c) = 0$
2. 等向性(Isotropy): 濾波器響應必須與edge方向無關。
3. 正確的edge偵測能力: 避免以下情形
 - 將雜訊誤判為edge，此為false positive
 - 未能找出真正edge，此為false negative
4. 好的定位(localization): 偵測的edge位置應儘可能接近真正edge位置
5. 單一響應(single response): 儘可能減少edge附近local maxima的數量。

Canny 的邊緣偵測器原理：

1. 應用高斯濾波器在灰階影像 $f(x,y)$ ，得到平滑影像 $g(x,y) = f(x,y) * w_G(x,y; \sigma)$
2. 應用微分濾波器 $\nabla g(x,y)$ 計算邊緣強度(magnitude)和方向(orientation).

The scale parameter σ is selected based on

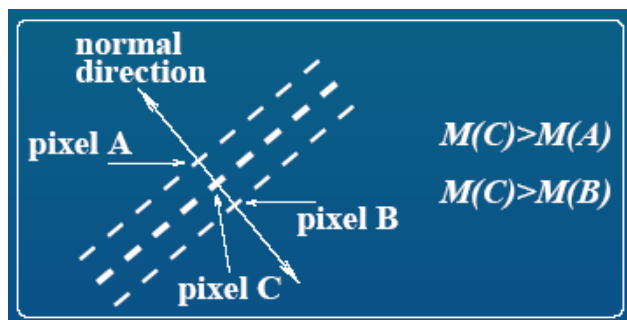
高斯濾波器參數 σ 決定邊緣偵測器的大小。決定適當 σ 應依下列需求：

- 想要得到edge的細節程度(fine edges vs global edges);
- 雜訊的多寡;
- 偵測性定位/準確度trade off

Canny 提出兩個方法來滿足邊緣偵測器單一響應和定位正確性的要求：

— Non-maxima suppression

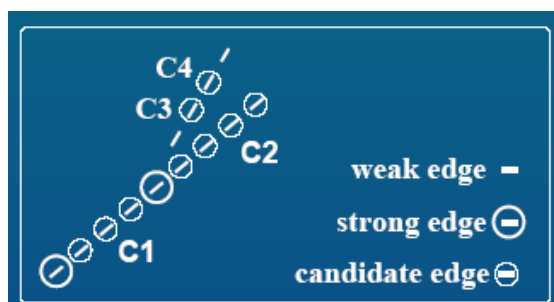
1. 對每一點 $C(x; y)$ ，選定垂直於orientation方向兩個側邊的鄰近點，記作A和B；
2. 如果 $M(A) > M(C)$ or $M(B) > M(C)$ ，則C不為edge(設定 $M(C(x,y))=0$)；
3. 輸出(edge)強度影像 $M_{NMS}(x; y)$



non-maxima suppression 輸出仍會帶有一些非 edge 的 local maxima，同時 connectivity 性質不明顯的 edge 區域。Canny 的 Hysteresis thresholding 方法提供了解決方案。

— Hysteresis thresholding

1. 定義兩個thresholds, T_{high} and T_{low} ，
像素 $(x; y)$ 如果 $M_{NMS}(x; y) > T_{high}$ ，該像素就稱為strong，
像素 $(x; y)$ 如果 $M_{NMS}(x; y) \leq T_{low}$ ，該像素就稱為weak，
所有其他的像素稱為candidate；
2. 如果像素 $(x; y)$ 是weak，則略去；如果是strong，則輸出為edge像素；
3. 如果像素 $(x; y)$ 是candidate，而且 $M_{NMS} > T_{low}$ ，則判斷是否沿著local maxima相連的edge方向有穿過 (x,y) ，若是，則輸出為edge；
4. 如果candidate像素 $(x; y)$ 與一strong像素相鄰，則輸出該candidate為edge。



- **hysteresis thresholding** 的進一步說明：
 - If any edge response is above a **high threshold**, those pixels constitute definite output of the edge detector for a particular scale.
 - Individual weak responses usually correspond to noise.
 - Such connected pixels are treated as edge pixels if their response is above a **low threshold**.
 - The low and high thresholds are set according to an estimated signal to noise ratio.
-

Canny 邊緣偵測器與 scale space

- The correct scale for the operator depends on the objects contained in the image.
 - The solution to this unknown is to use multiple scales and aggregate information from them.
 - Different scale for the Canny detector is represented by different standard deviations σ of the Gaussians.
 - There may be several scales of operators that give significant responses to edges (i.e., signal to noise ratio above the threshold); in this case the operator with the smallest scale is chosen as it gives the best localization of the edge.
-

Canny 邊緣偵測濾波演算法：

1. 變化 σ 重複步驟(2)到(6)；
2. 以 scale σ 的高斯濾波器對 image g 執行迴旋積；
3. 估測每一像素的區域邊緣的正交方向 n
$$n = \frac{\nabla G \otimes f}{|\nabla G \otimes f|}$$
4. 應用 non-maximal suppression 方法找出 edges 位置；
5. 計算 edges 強度 $M_{\text{NMS}}(x; y)$
6. 應用 hysteresis thresholding 消除 edge 毛邊，並接續 edge 斷點；
7. 累積多重 scale σ 的 edge 資訊，合成最後的 edge 影像。

邊緣偵測作為一個設計最佳化的問題，其評估函數為：

1. Maximize the signal to noise ratio to give good detection. This favours the marking of true positives.
2. Achieve good localization to accurately mark edges.
3. Minimize the number of responses to a single edge. This favours the identification of true negatives, that is, non-edges are not marked.

本週習題：

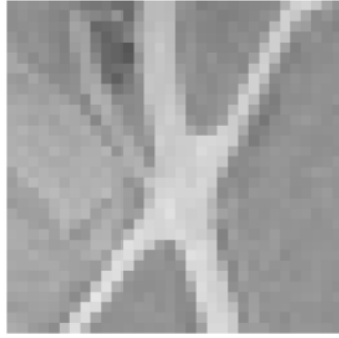
1. 使用 Canny 邊緣偵測器，選定一組適當的 T_{high} and T_{low} ，再分別以 $\sigma=0.5, 1.0, 2.0, 3.0$ ，求得 $\text{ant}(\text{gray})600 \times 400$ 影像 4 個 scale 的 edge 影像，將其合成為一張最終的 edge 影像(不一定使用重疊相加(OR)的方式)。
2. 取出原始影像的其中一條水平 profile，使用相同程式，求得如第一節所陳述的尺度空間影像。

線偵測(Line Detection)問題

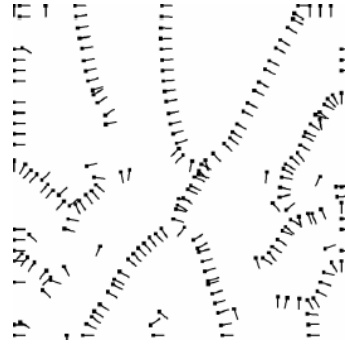
線型態(line pattern)不同於邊緣型態(edge pattern)的特徵，在影像中，線型態經常表現在一些寬度很窄的 valley/ridge 紋路樣式或是手寫文字、繪圖影像中。如果它具有某種寬度，則藉由標準邊緣偵測方法常會找出兩條平行的線條，這是因為大部分的邊緣偵測方法都建立在階狀函數(step edge)的基礎。不同於 edge 總是位於二階微分的 zero-crossing 位置，line 則於一階微分的 zero-crossing 的位置。

Steger 提出使用 Gaussian 和一次微分的濾波方法作為線偵測器(cf. C. Steger: An unbiased Detector of Curvilinear Structure, IEEE Transaction on PAMI, 20(2), 1998); Ziou(Djemel Ziou : Optimal Line detection, 2000)則採用 Canny 的邊緣偵測評估準則，提出以 IIR 濾波器來偵測線特徵。

3. 請使用第五單元的 Robinson 一階導數濾波器求出 $\text{finger}300 \times 300$ 指紋影像的 amplitude 和 orientation 影像，(A)利用 amplitude 影像找出 zero-crossing 的像素後輸出 zero-crossing 影像(黑白影像)。(B)利用 orientation 影像資訊，畫出每一個 zero-crossing 位置的方向圖如下圖(b)；



(a)



(b)

(C)應用 Canny 的 non-maximal suppression 和 hysteresis thresholding 方法作為線偵測後處理，輸出最後的 line image。