

## Thermal Boundary Detection Based on Normal Changes 基於法向量的改變偵測熱邊界

施純傑<sup>(1)</sup>、廖弘源<sup>(2)\*</sup>、范國清<sup>(1)</sup>

(1) 國立中央大學資訊工程研究所

(2) 中央研究院資訊科學研究所

Email: liao@iis.sinica.edu.tw

### Abstract

In this paper, we proposed a new method to detect thermal boundary based on normal changes of heat flow. We used the previously proposed method to estimate the temperature gradient and normal changes of heat flow. Then, the thermal boundary can be detected by finding the local extrema of these estimated normal changes of heat flow.

### 摘要

在此篇論文中，我們提出一種利用計算 local extrema of heat flow normal changes，去偵測 thermal boundary。我們利用先前所提出的方法 [1]，量測相鄰溫度梯度間，法向量的變化，藉以偵測不同介質間傳導率變化的情形，進而決定不同介質間的邊界。從實驗的結果，說明我們方法的可行性。

keywords: thermal image, edge detection

中文關鍵字：熱影像、邊緣偵測

### 一、緒論

在一般 thermal image processing 的論文中，絕大部份都是擷取 infrared radiation machine 所產生的 video signals，將其轉換成一般影像的形式後，然後再利用處理灰階影像的技術，解決所需要處理的問題。但此時所處理的信號已經幾乎失去物體本質的特性，因此所處理的信號也跟其物理特性幾乎無關，但卻與紅外線取像機器的特性息息相關。所以如果我們要想發展一套 general algorithms 去解決 infrared thermograph 的問題時，若能從原始偵測到的資訊中，計算其相對的溫度分佈當做輸入的信號，然後在以熱分佈的物理特性來處理這些信號，應該是比較有希望達成這個目標的。

在過去由於 IR detector 元件的製造技術並非相當成熟，因此取得的訊號，受到雜訊的干擾也就相當的嚴重；所以利用其值來反推算其相對的溫度時，其精確度誤差也就相當大。然而在近幾年來，因為

半導體的製造技術日新月異，使得 IR detector 元件的靈敏度可以被大幅度的提昇，而且體積可以被製造得更小。因此原本 IR detector 只有被設計成單一獨立元件的方式，也可以運用這些技術將許多同樣元件的 detectors 組成一個 detector array，將其製造在同一個 chip 上。這就是所謂 FPA ( Focal Plane Array ) 的技術。由於有這方面的技術配合，新設計出來的 IR 機器幾乎都採用 FPA 做為感測器；因此在訊號取樣的解析度方面，比起單一 sensor 機器的解析度高出許多。雖然在 FPA 上每個元件的特性並不一致，但由於加上修正電路來校正每一個元件，因此我們通常可以視其 FPA 在修正電路後，所有元件為 uniform。也就是說對於同一溫度面的量測時，我們得到在 FPA 上所有元件之訊號應該是相同的。所以如果同時知道儀器的校正曲線後，我們便可利用 radiation heat transfer 的理論，配合一些假設，推導出相對的溫度。由於目前工業界已經有系統可以支援這項技術，因此在本論文中我們就不再詳細討論這方面的技術問題，而直接從當取樣到的訊號已經利用 radiation heat transfer 的理論，計算出其相對的溫度結果後，開始分析如何利用溫度的分佈特性來處理邊緣偵測等相關的問題。

在傳統 heat transfer 的理論中，基本上可分為三種模式：conduction, convection 和 radiation。這些理論都是用來描述，熱能在不同情況下的傳導方式。基本上，如果已經求出所觀測景物的溫度後，我們便可以忽略 convection 和 radiation 的影響。而單從 conduction 的角度來處理這個問題。從 heat conduction transfer 的理論 [2,3] 中得知，由於傳導率的不同，因此對於 heat flow 傳輸時，所量測到的溫度梯度也不相同。根據這個理論，我們利用先前所提出的方法 [1]，量測相鄰溫度梯度間，法向量的變化，藉以偵測不同介質間傳導率變化的情形，進而決定不同介質間的邊界。

接下來本篇論文將先複習熱傳導與 infrared thermograph 的關係。接著在第三部份，則說明如何利用計算 local extrema of normal changes，去偵測 thermal boundary。然後在實驗的部份，利用一個實際的例子分析我們提出方法的可行性。最後是一些結論。

\*To whom correspondence should be sent.

## 二、Heat transfer 與 infrared thermograph 的關係

在這個 section 中，我們首先利用圖示來說明不同模式下 heat transfer 與 infrared thermograph 之間的關係。然後接著詳細說明 conduction heat transfer 相關的背景與理論。

### 2.1、Heat transfer overview

一般而言，heat transfer 可以分成三個模式：conduction, convection 和 radiation 三種。而這三種模式間的相互間的關係可利用 figure 1 中說明。當在物體中或物質間溫度會隨距離的改變而變化時，我們可以經由實驗發現從高溫區域到低溫區域間，存在有能量轉移的現象。這種藉由 conduction 的能量變化，可被定義成：

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

其中  $q$  為在單位面積的 heat-transfer rate，而  $\frac{\partial T}{\partial x}$  為在熱流方向的溫度梯度。另外  $k$  則為物質的熱傳導率 (thermal conductivity)。此式又被稱為 Fourier's law of heat conduction。至於 convection heat transfer 則是由於氣體或液體快速地經過物質的表面，產生這兩個介質間有能量的轉換，造成表面溫度與物體內部溫度有不同差異現象。所以我們對於靜態且空氣流動的速度為零之物體做觀察時，通常可以忽略 convection heat transfer 的情況。

另外一種 heat transfer mode 為 radiation heat transfer。當任何物體本身具有溫度時，便會同時放射出 radiation；而且隨著自身溫度變化的不同，其放射出 radiation 的波長或頻率也會不同。以 blackbody 為例，當其溫度上升時，其放射出 radiation 的波長會隨之變短；因此我們就可以根據此原理，利用偵測到 radiation 的訊號強度，反推算出其相對應的溫度。當然在實際的計算上，並非那麼容易，必須先有 IR detectors 在偵測 blackbody 溫度與其相對產生 responses 的特性曲線；然後假設觀察的物體皆為灰體 (greybody)，同時知道其放射率 (emissivity)；接著還必須算出大氣的傳輸率 (transmittance)；最後才能推算出其相對的溫度值。由於這部份在 implement 時，是屬於與機器比較相關的技術，因此我們在此不詳加多述。

所以從 figure 1 中，我們可以清楚的看出這三種 heat transfer 模式和 infrared thermograph 之間相對的關係。由於在此，我們並不考慮 convection heat transfer；因此計算出的溫度，我們就可以只利用 conduction heat transfer 的理論來分析這些溫度的資料。在接下來的部份，我們將較詳細的介紹一些 conduction heat transfer 的相關理論。

### 2.2、Conduction heat transfer

先前的部份，我們已經簡單的介紹一維的 Fourier law of conduction heat transfer： $q = -kA \frac{\partial T}{\partial x}$ 。在此

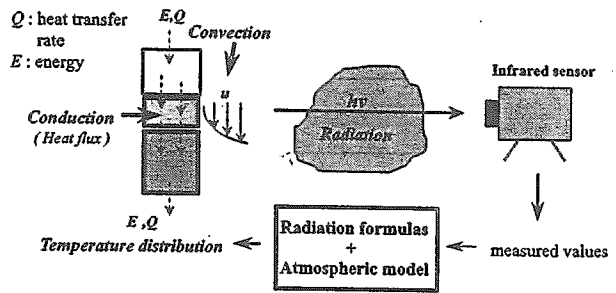


Fig. 1: Relations between heat transfer and infrared thermography.

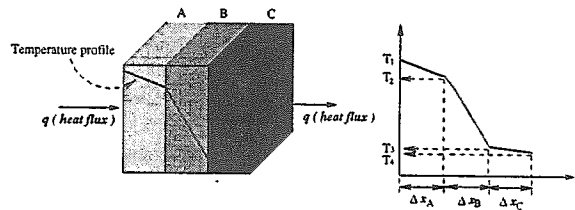


Fig. 2: 1-D heat transfer through a composite wall.

如果我們固定給與不同的物質相同的 heat transfer rate 時，我們就可以藉由觀察到不同的溫度梯度來決定這些物質的 thermal conductivity  $k$ 。通常氣體與液體的  $k$  值都遠小於固體的  $k$  值；所以當輸入同樣的 heat transfer rate 時，氣體與液體的溫度梯度遠大於固體的溫度梯度。此外對於不同的固體間，其  $k$  值也相差許多。在 figure 2 中，我們將某個固定值的 heat transfer rate  $q$  流經 A、B、C 三個不同 conductivities 的介質。在此我們可以先假設每個介質的 conductivity 為定值，不受其它因素而改變。則根據 equation(1)，heat flow 可以寫成：

$$q = -k_A \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_A} = -k_B \frac{T_3 - T_2}{\Delta x_B} = -k_C \frac{T_4 - T_3}{\Delta x_C}$$

因此這三個介質的 conductivities 之間的比率為：

$$k_A : k_B : k_C = \frac{1}{\frac{T_2 - T_1}{\Delta x_A}} : \frac{1}{\frac{T_3 - T_2}{\Delta x_B}} : \frac{1}{\frac{T_4 - T_3}{\Delta x_C}}$$

所以當這其中的任一個介質的 conductivity 為已知，則其它兩個的 conductivities 也可計算出來。

前面這個例子，是一般理想化的討論。在實際的情況中，兩個介質在接觸面的溫度分佈，會有所謂的 contact effect 存在。也就是像在 figure 3 中所看到的不連續溫度分佈。事實上，也就是因為有這種現象，所以我們才可以觀察到某些物體是否有裂縫發生。

接下來，我們將繼續分析二維 heat flow 的情形。若  $x$  和  $y$  分別為兩個 dimensions 的座標，則在  $x$  方向和  $y$  方向的 heat flow 分別可利用 Fourier equations 描述如下：

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2)$$

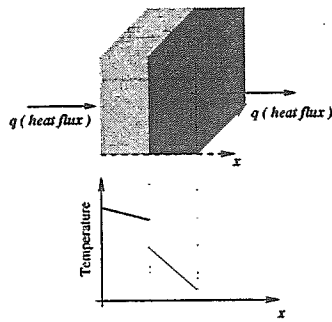


Fig. 3: Illustrations of thermal contact effect.

和

$$q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3)$$

。若以向量形式表示，則可寫成：

$$\vec{q} = q_x \hat{x} + q_y \hat{y} = \left(-k \frac{\partial T}{\partial x}\right) \hat{x} + \left(-k \frac{\partial T}{\partial y}\right) \hat{y} \quad (4)$$

。而其 magnitude 大小為

$$|\vec{q}| = k \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2} \quad (5)$$

。而其方向，正與通過這點的等溫線 (isothermo) 垂直 [2,3]。

### 三、如何利用 normal changes 來偵測 thermal boundary

在這個 section 中，我們將利用前面提到有關 heat flow 的理論，結合我們早先處理 range edges 的技術 [1]；說明如何利用計算 normal 的改變來偵測 thermal boundary。

#### 3.1、Conductivity boundary detection via normal changes

在 section 2.2 中，我們已經利用 figure 2 說明當輸入的 heat transfer rate  $q$  固定時，假設在每個物質中其傳導率不隨其它條件而改變，則不同物質間傳導率的比值與其溫度梯度間的比值成反比。因此在取得一組溫度的資料後，如果我們分析各相鄰間溫度梯度的變化，則我們就可以同時知道其相對間傳導率的變化情形。

為了更清楚的說明這個想法和如何利用計算 normal changes 來解決這個問題，我們首先以一個簡化的一維例子做說明。在 figure 4 中，(a) 為一個由三種不同傳導率介質所構成的物體。而每個介質的傳導率假設與溫度無關。當有一 heat flow 由左邊流過右邊時，我們由先前 section 2.2 中得知，會量測到如圖中所示的 temperature profile。若以一維的方向來觀察，如 figure 4(b) 所示。其中  $\vec{N}_1$ ,  $\vec{N}_2$  和  $\vec{N}_3$  分別為溫度曲線在  $x_1 - x_2$ ,  $x_2 - x_3$  和  $x_3 - x_4$  各區間的 normal vectors。我們將這些 normal vectors

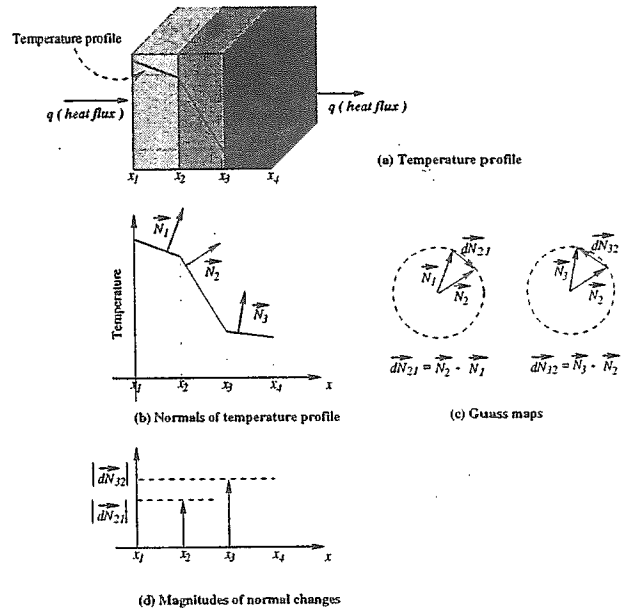


Fig. 4: Relations between heat flux planes and normal changes

分別對應到 Gauss sphere 上的相對位置，如 figure 4(c) 所示；則我們注意到在  $x_1$  和  $x_2$  的位置附近，其 normal changes 的絕對值為 local extrema。而這些區域，同時也是 conductivity 變化的區域；因此，我們就可以利用先前我們提出的方法 [1]，以 multiscale edge detection via normal changes 的方法，偵測 conductivity discontinuous points。一旦我們知道 conductivity 不連續的地方時，不同物質間的邊界，我們也就可以知道。

#### 3.2、Implementation Level

雖然在前面的部份，我們提到可以用 wavelet transform 的方法來偵測 conductivity discontinuous。但在理論上，由於溫度並不屬於  $L^2(R)$ ，因此我們不能直接利用 wavelet transform 來計算 normals，然後再去找 local extrema of normal changes。可是在一般的 IR machines 中，其 detectors 可以偵測到的訊號範圍是有限的，在這個範圍內，其訊號強度通常在大於或小於偵測範圍之訊號時，其輸出值都會呈現飽和，所以我們偵測到的溫度數值仍屬於  $L^2(R)$ 。在實際上，我們通常會先找出資料中的和最大和最小值，然後利用 linear mapping 的方式，將所有的 data 轉換到一般影像處理的空間。因此若是處理的 operators 為線性時，並不會影響到相對值之間的關係。如此一來，我們便可以直接觀察其資料內容。在此，若溫度分佈經這樣的線性轉換，到影像處理的空間時，則我們稱得的之影像為 temperature images。

### 四、實驗結果

在本實驗中，我們使用的機器為 Agema THV550，其 IR detector 為 PtSi 之 FPA；取樣

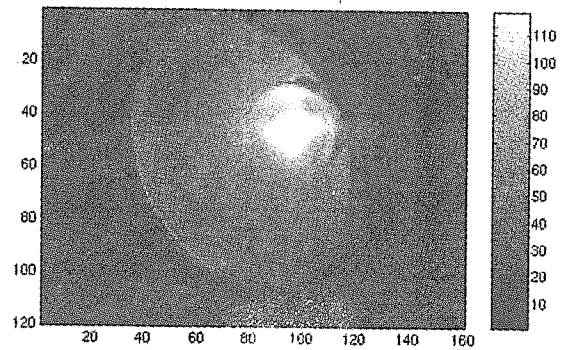
平面之長寬為  $240 \times 320$ 。其測溫範圍為  $-20 \sim 250^{\circ}\text{C}$ ，而正確性為  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  或  $\pm 2\%$ 。在 figure 5(a) 中，為一個臺燈的溫度分佈圖。其最高溫為  $168^{\circ}\text{C}$ ，最低溫為  $30^{\circ}\text{C}$ 。而 figure 5(b) 和 (c) 則是分別將溫度分佈畫成 3D 圖的形式和用灰階值表示之影像。接著我們用先前所提出的方法 [1] 來找出 normal changes of the local extrema，如同在 figure 5(d) 的結果。從這個結果中，我們可以看出利用這種方法可以找出傳導率變化的邊界。而通常這個變化的邊界也就是介質不連續的邊界。

### 五、結論

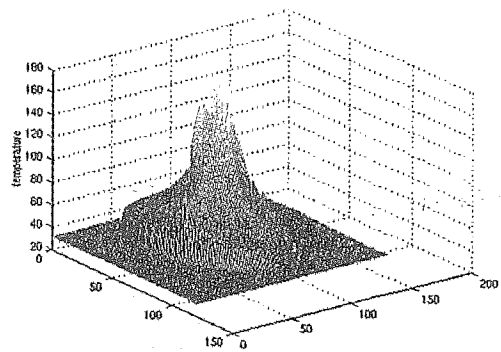
在本篇論文中，我們已經提出如何利用溫度的分佈，配合熱傳導的概念，從 thermophysic 的角度來研究 infrared thermography 的問題。不同於傳統的方式，若以溫度的分佈來做為處理的基礎時，後續處理所設計的 algorithms 就可以與機器及操作者無關。以這樣的理念，我們利用計算 local extrema of normal changes，去偵測兩個傳導率不同介質所構成的邊界。從實驗的結果，也確實說明我們提出方法的可行性。

### References

- [1] C.-J. Sze, H.-Y. Mark Liao, H.-L. Hung, K.-C. Fan, and J.-W. Hsieh, "Multiscale edge detection on range images via normal changes", *IEEE Transcation on Circuit and System II*, to appear.
- [2] J. C. Jaeger H. S. Carslaw, *CONDUCTION OF HEAT IN SOLIDS*, Oxford : Clarendon Press, 2nd edition, 1959.
- [3] J. P. Holman, *HEAT TRANSFER*, McGraw-Hill, New York, 8th edition, 1997.



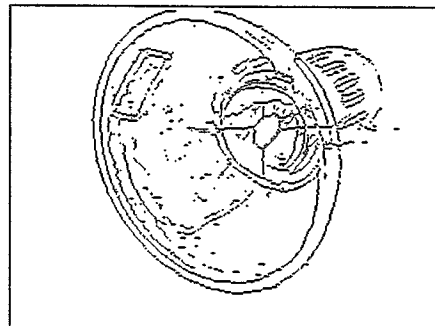
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 5: Experimental results : (a) temperature distribution (b) 3D plot diagram (c) temperature image (d) thermal boundary points