

可見光測溫技術應用於鋼鐵業之研究與測試

The research and testing of CCD camera based temperature detecting technique for application of steel industry

陳佳鴻*、鄭儀誠

J.H Chen、Y.C Cheng

摘要

本文利用可見光攝影機做為感測裝置，以輻射測溫原理進行非接觸式溫度測量，用以檢測高溫製程系統中的二維溫度場資訊，由於應用可見光段的雙色法原理，無需輸入目標物之放射率以及不易受量測空間的介質影響，輸出之感測影像更可進行影像處理，具備機器視覺功能，能有效克服一般紅外光測溫設備，僅能單點量測或需設定放射率之問題。本技術已於一鋼胚軋製程中完成測試驗證，結果顯示此系統具有不錯的量測準確度，並能提供可靠且穩定的溫度資訊檢測，未來將作為軋製程改善操作的關鍵指標。

關鍵字：雙色法、非接觸式測溫、溫度場

Abstract

This paper uses the CCD camera as a pyrometer and follows radiation thermometry principle to construct non-contact temperature sensor in order to record the information of the two-dimensional temperature field in high-temperature processes. In accordance with the two-color principle in visible spectra, we don't need to know the emissivity of target and environment factor in detecting image process. In addition, the image also can be performed in image processing, just like Machine Vision

function. The CCD-camera-based temperature detecting technique overcome conventional infrared pyrometer's problem, which only detect temperature within a small area of object and require a specific coefficient of target's emissivity for parts of commercial products. This technique is already tested in the Steel Rolling Process. The result shows a good measurement accuracy, which provide dependable and stable temperature information, and will also be the key indicator for improving the Steel Rolling Process.

Keywords：Two-Color Method、Non-Contact Temperature Measurement、Temperature Field

前言

溫度資訊是高溫工業製程中生產效能與產品品質的關鍵指標，目前高溫工業製程之溫度監測，受限於製程作業過程及高溫環境的限制，不易以接觸式的測溫設備進行溫度量測，大多是使用非接觸式的光學測溫裝置量測溫度，並且以紅外線測溫設備為主流⁽¹⁻²⁾。

在工業燃燒爐的程序中，爐膛內燃燒火焰溫度的變化與燃燒效率、鍋爐操作安全以及NOx等空氣污染物的生成有著緊密的關聯性，如何將燃燒火焰溫度場可視化，以掌握爐膛內的燃燒狀況就成了重要的關鍵。

因此，應用可見光攝影機於溫度檢測的研究逐漸受到青睞，周懷春⁽³⁻⁴⁾等人提出基於可見光攝影機所記錄的輻射影像，進行燃燒爐內溫度分佈檢測方法的研究，並建立了爐膛空間內的二維和三維爐膛溫度場；李志宏⁽⁵⁾透過彩色攝影機在同樣的曝光設定下進行爐膛拍攝，利用分析圖像以建立爐膛內溫度分布，由於彩色 CCD 光電訊號與輻射強度呈線性關係，事先利用黑體爐進行攝影機快門與光圈的設定，並運用分光鏡取得適當的光電訊號比，基於單色、雙色測溫法理論來建構出所對應之溫度場；Huang 和 Yan⁽⁶⁾亦利用二個處理不同波長的濾光鏡、稜鏡及反光鏡組成的分光機構，同時得到二個波長下的亮度訊號，運用雙色測溫法得到開放式火焰的二維溫度場。

使用可見光攝影機進行溫度檢測，具有溫度場可視化、感測器硬體成本較低以及可見光不易受氣體分子吸收等優點，實用性亦趨成熟。市場上已有可見光攝影機的二維或三維高溫量測產品，例如德國 Powitec 公司的 PiT Indicator 及法國 HGH 公司的 Pyrometric Camera 等產品已廣泛應用在歐美、印度及中國的工業燃燒系統中，顯示基於可見光攝影機的非接觸式測溫技術已逐漸被接受與應用。

輻射測溫原理

Planck Max 在 1900 年根據量子統計理論得到絕對黑體的單色輻射強度公式(Planck's law)，此定律能適用於所有的波長，其公式如式(1)所示。

$$I_{Planck}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} (e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1)^{-1} \quad (1)$$

對於目標物自體放射之輻射能，如果量測波長範圍在 400-700nm 及溫度範圍在 800-2000K 之間，則 Planck's law 可簡化成 Wien's law 如式(2)所示。

$$I_{Wien}(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \frac{2hc^2}{\lambda^5} e^{-\frac{hc}{\lambda kT}} = \varepsilon(\lambda, T) \frac{2C_1}{\lambda^5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} \quad (2)$$

其中，若以 SI 單位表示各物理量和常數，則 $I(\lambda, T)$ 是每單位時間、每單位表面積、每單位 solid angle 和每單位波長下的釋放能量 ($\text{Js}^{-1}\text{m}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{m}^{-1}$)， λ 為波長(m)， T 為黑體的溫度 (K)， h 為 Planck 常數 ($6.62606896 \times 10^{-34}$)， c 是光速 ($2.99792458 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$)， k 為 Boltzmann 常數 ($1.3806504 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$)， e 是自然對數的基底， $C_1 = hc^2 = 0.59552138 \times 10^{-16} \quad (\text{Wm}^2)$ ， $C_2 = hc/k = 1.43877516 \times 10^{-2} \quad (\text{mK})$ 。

由於爐膛環境為非完美的黑體，因此需將材料的 emissivity 因子加入 Wien's law。emissivity 因子 $\varepsilon(\lambda, T)$ 跟物體的溫度以及輻射波長有關。

雙色法

於輻射測溫的相關研究中，多數學者採用雙色法(two color method)進行非接觸式測溫。因為在測溫過程中，一般無法得知目標物體的放射率因子，或待測目標中可能同時含多種不同材料特性的物件，為避免放射率因子的影響，根據灰體假設，放射係數 ε 在相近波長下且溫度變化範圍不大之條件下，可視為常數，因此使用雙色法可消除二相近波長下的放射率比值，僅以同一目標在二個波長的輻射強度比值，根據 Wien's law 計算目標溫度。

可見光攝影機具有低成本、響應速度快及可提供二維影像之優點，其所吸收的顏色強度或感測應答通常會線性相依於來源的輻射強度⁽⁹⁾，因此可做出線性應答的假設，以攝影機的顏色強度取代輻射強度，同時考量測量系統的光學和偵測器的效應影響，所以儀器記錄的強度 L_2 與外在來源輻射量 $I(\lambda, T)$ 的關係如式 (3)。

$$I(\lambda_i, T) = k_i \cdot L_{\lambda_i}(T), \quad i = r, g, b \quad (3)$$

將式(3)以雙色法表達，可得式(4)，並將式(2)代入式(4)中，即得雙色法測溫公式，如式(5)所示。

$$\frac{I(\lambda_1, T)}{I(\lambda_2, T)} = \frac{k_1 \cdot L_{\lambda_1}(T)}{k_2 \cdot L_{\lambda_2}(T)} = A \frac{L_{\lambda_1}(T)}{L_{\lambda_2}(T)} \quad (4)$$

$$T = \frac{C_2(\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1})}{\ln \frac{L_{\lambda_1}(T)}{L_{\lambda_2}(T)} + \ln A - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (5)$$

根據式(5)，係數 A 是唯一待決之參數，若係數 A 校正後，則式(5)就可作為溫度場計算之理論依據。因為係數 A 具有式(5)的物理模型，因此若有已知的參考點，也就是 T_{ref} 、 $L_{\lambda_1}(T_{ref})$ 、 $L_{\lambda_2}(T_{ref})$ 已知，則係數 A 可利用透過式(6)求得。

$$A = \frac{L_{\lambda_2}(T_{ref})}{L_{\lambda_1}(T_{ref})} \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 \exp(C_2(\lambda_2^{-1} - \lambda_1^{-1})/T_{ref}) \quad (6)$$

理論上在不同溫度下所計算出的校正係數 A 應該會相同⁽¹⁰⁾，因此只要單一位置的數據即可進行演算法的自我校正。

實驗室環境測試

本研究基於可見光攝影機開發出可見光溫度檢測模組，其主要設備包含數位工業攝影機、耐熱保護機構及計算機。為測試此模組量測溫度之準確性，以一高溫校正爐為測試目標，在無外在光源影響的暗房環境下，進行可見光溫模組在不同溫度下的誤差測試。



Fig.1 高溫校正爐

溫度測試範圍為 800°C 至 1200°C ，以每 20°C 為一升溫間隔，於各溫度下以可見光攝影機拍攝高溫校正爐，經由攝影機吸收輻射能所轉換的 RGB 強度訊號，根據式(5)及式(6)計算高溫校正爐之溫度，以高溫校正爐實際的觀察溫度，與雙色法計算的預測溫度比較，分析非接觸式測溫模組之相對誤差。

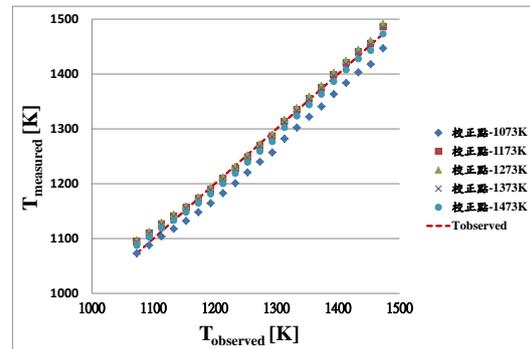


Fig.2 實驗室測試-溫度預測結果

Table 1 實驗室測試-預測誤差
(溫度值為使用的校正點)

平均相對誤差(%)				
1073K	1173K	1273K	1373K	1473K
2.00	0.52	0.66	0.49	0.74

由 Fig.2 及 Table 1 可看出各校正點的相對誤差測試結果都在 1% 以下，僅有選擇 800°C (1073K) 為校正點的平均誤差為 2%，而選擇此校正點的平均相對誤差較高的原因為，高溫校正爐溫度越高輻射出來的可見光強度越強，但

在 800°C 時的可見光強度較不足，將此款可見光攝影機的曝光量調到最大，仍無法記錄到適當強度的 RGB 資訊，因此以 800°C 的 RGB 資訊做為校正點時，依據其它溫度點 RGB 特徵來計算溫度的線性關係較差，故平均相對誤差較大。

根據可見光溫度檢測模組以高溫校正爐在實驗室環境的測試結果而論，此模組的溫度準確度相當不錯，選擇適當的校正溫度，整體相對誤差低於 1%，而此項技術可量測的溫度範圍為 800°C~1800°C。

實場測試

本文以某鋼鐵廠為研究案例，使用可見光溫度檢測模組，量測受熱鋼胚自加熱爐出料後的溫度變化，並以紅外光測溫儀做為溫度驗證之依據，同時量測鋼胚中心區域的平均溫度，見 Fig.3。由於紅外光測溫儀是單點測溫設備，其感測直徑與感測距離之比例為 1:82，於瞄準視窗中所視之鋼胚感測區域為一圓點，配合紅外光測溫儀的感測範圍，於可見光溫度檢測模組的二維溫度場中，設定與紅外光測溫儀相同的量測目標範圍。



Fig.3 測溫儀器量測位置

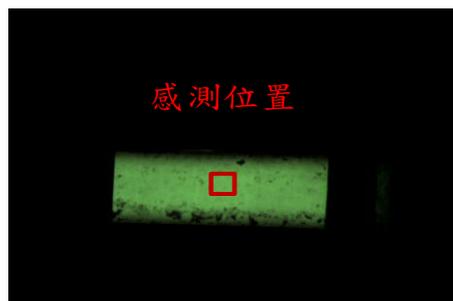


Fig.4 出料鋼胚檢測位置

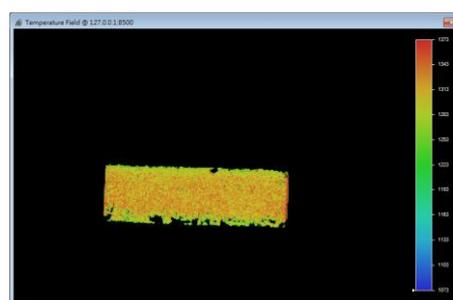


Fig.5 出料鋼胚二維溫度場

於產線穩定生產的狀態下，連續測試十根鋼胚出料之溫度，根據鋼胚表面附著的氧化層影響程度，選擇其中二根具代表性的鋼胚說明測試結果。

在測試過程中，整根出料鋼胚未受到氧化層影響的測溫結果，如 Fig.4、Fig.5 所示。Fig.6 可看出可見光攝影機與紅外線測溫儀檢測之溫度趨勢相同，但溫度值卻相差了 30°C 左右，顯示二設備沒有相同的校正源，造成有一固定的差值存在。因此以紅外線測溫儀之結果為基準，以其一點溫度來校正可見光攝影機，可得到在相同校正基準下的測溫比較 (Fig.7)，其結果顯示此二設備測得的溫度相當接近，整體的相對誤差為 0.7%。

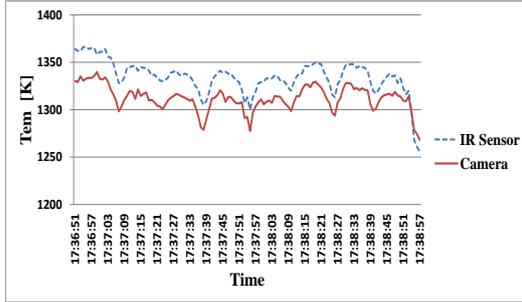


Fig.6 無氧化層-不同校正源之溫度分佈

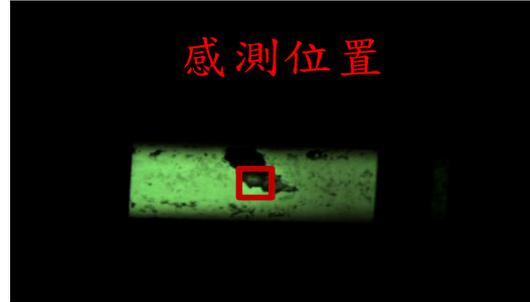


Fig.8 感測區域受氧化層影響示意

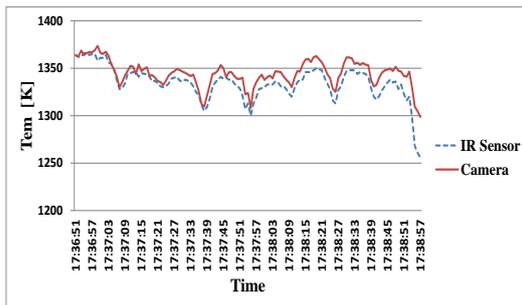


Fig.7 無氧化層-同步校正之溫度分佈

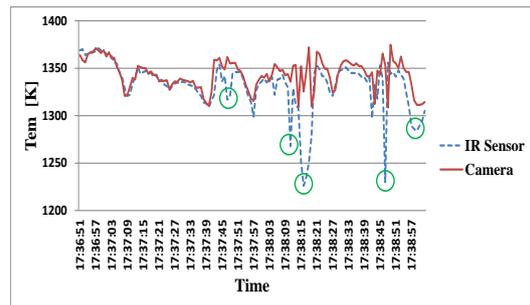


Fig.9 氧化層干擾-同步校正之溫度分佈

在有氧化層影響的鋼胚中，當氧化層附著在鋼胚上經過感測區域時(Fig.8)，因紅外線測溫儀感測面積小，大部分感測到氧化層的溫度而非鋼胚的真實溫度，測溫結果將受到明顯影響，如 Fig.9 中的虛線趨勢以及圓圈處所示，受到鏽皮影響的溫度結果易使操作人員誤判，因此這樣的溫度資訊將不具有參考價值。

而可見光測溫模組是以攝影機所拍攝的原始影像資訊進行溫度計算，因此能以機器視覺功能進行影像處理，將影響溫度計算的氧化層忽略，僅計算感測範圍內屬於鋼胚本身的像素，使溫度檢測結果不受氧化層的干擾影響。如 Fig.9 中的實線趨勢所示，可見光測溫模組可測得穩定且正確的鋼胚溫度，相較於紅外線測溫設備的單點量測，能呈現更完整的二維溫度場資訊。

紅外光測溫儀器之比較

在不同使用需求下，紅外線光學測溫設備可分為單點測溫以及熱影像二類，使用單點測溫的設備如近紅外線測溫儀，在目標會移動的製程中，不易確認量測位置以及測溫過程中是否受到干擾，而使用量測空間或目標平面溫度分佈的溫度場檢測設備如紅外線熱顯像儀，雖可檢測熱影像中任意位置的溫度，並能顯示出目標的溫度分佈，但此類設備價格昂貴，並且需要輸入目標的放射係數及環境參數等修正因子，否則將影響測量結果。另外，紅外線波段的輻射能易受氣體分子吸收，需特別注意使用的環境，選擇適當的檢測波長，以避免嚴重的量測誤差⁽¹¹⁾。

結論

1. 根據實驗室以及於鋼鐵業的實場測試結果，此測溫技術的整體相對誤差低於 1%，具有相當不錯的準確度。
2. 使用可見光影像進行測溫，具有二維溫度

場影像以及機器視覺的影像處理功能，可同時進行溫度與其它關鍵參數，如尺寸、產品缺陷等資訊的檢測。

3. 相較於現場操作人員以往依賴的紅外光測溫設備，此技術無需輸入目標物之放射係數及環境參數，其使用的方便性以及成本都較一般光學測溫設備更具競爭力。

作者誌謝

本研究作者感謝經濟部能源局的支持，謹此致謝。

參考文獻

- (1) Ch. Florin, and M. Dvorak, "Infrared Technology -non-destructive material testing and continuous quality control", proceedings of the annual SVMT-Meeting 2000, 30./31. Fribourg, Switzerland, Swiss Society of Materials Technology, (2000) 36 – 41.
- (2) JOHN MERCHANT. Infrared Temperature Measurement Theory and Application. Omega Engineering Temperature Reference Selection Guide °C EB/OL). <http://www.omega.com/techref/iredtempmeasur.html>. 2001, 2004-08-21.
- (3) 周懷春，婁新生，尹鶴齡等，單色火焰圖像處理技術在鍋爐燃燒監控中的應用研究，電力系統自動化，20(10):18-22, 1996
- (4) 周懷春，韓曙東，鄭楚光，兩種輻射溫度圖像監測方法的模擬比較分析及其適用性分析，中國電機工程學報，Vol.22, No.6, Jun.2002
- (5) 李志宏，劉石，可視化火焰測量系統的開發及應用，工程熱物理，pp.46-74, 2006.
- (6) Huang, Y. and Yan, Y. "Transient two-dimensional temperature measurement of open flames by dual-spectral image analysis", Transactions of the institute of Measurement and Control 22(5), pp.371-384, 2000
- (7) 楊友良，楊丹，基于圖像處理的蠟燭火焰溫度仿真研究，儀器儀表用戶，第3期，pp.70~71, 2010.
- (8) Gang Lu, Yong Yan, Steve Cornwell and Gerry Riley, Temperature profiling of pulverized coal flames using multicolor pyrometric and digital imaging techniques, Instrumentation and Measurement Technology Conference 2005.
- (9) C. Lou, H.C. Zhou, P.F. Yu, Z.W. Jiang, "Measurements of the flame emissivity and radiative properties of particulate medium in pulverized-coal-fired boiler furnaces by image processing of visible radiation," Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 31, pp. 2771-2778, 2007.
- (10) D. M. Rue, S. Zelepouga, "Thermal imaging control of furnaces and combustors", Final technical report under US DOE project DE-FC02-99CH10971, 2003.
- (11) 張健，楊立，劉慧開，環境高溫物體對紅外熱像儀測溫誤差的影響，紅外技術，Vol.27, No.5, 2005.