

應用數位影像疊加法改進入射於屏幕上之光照度分佈解析精度之初步探討

A Preliminary Study upon the Improvement of Light Intensity Distribution on a Screen via Several Frames Taken by Commercial Digital Camera

鄭育能¹、蔡維文²、鄭又齊³

¹ 國立成大學航太學系教授

² 國立成功大學航太系研究生

³ 國立台灣大學電機系畢業生

國科會計畫編號：NSC-93-2212-E-006-037

摘 要

本文改變光源之供應電壓提供不同光源強度，經由數位相機取得數張影像，轉為灰階分佈。再應用光二極體和數位相機，量測實際光源和灰階的換算函數，配合最小平方誤差法，將適用的像素上的資料，彙整成單一影像。初步實驗證明此種技術有四個限制需要克服。本文初步證明可以解決這些限制，並得到合理可用的光照分佈，適合工業應用。

關鍵字：數位影像，影像疊加，光照度分佈

1. 前 言

入射或反射光投射到某一屏幕和平面之光照度分佈，在許多工業應用場合，極為重要。截至目前為止，攫取此類照度分佈得工具，絕大多數都依賴光二極體或光電倍增管，直接量取定點上之光流明值[1]。雖然光之流明值的解析度高，但量測點位置的定位，通常需要配合昂貴的自動傳動機構，以節省量測時間。但因傳動機構之精密定位，一直是一種難以解決的問題，使得此種量測方式的精密度有諸多限制。因此，下列重要資料極為不易取得：(1)材料表面之反射、折射、吸收、和透射係數隨著入射光之角度及入射光照射時間不同而改變之資料；(2)光源在各角度的流明分佈；(3)影像邊緣線精密定位隨著照度變化之經驗公式等。影響所及，工業產品之品質提升，科學研究之精密度和可行性都大打折扣。

最近商用數位相機迅速發展，便宜的品牌之像素點數，已經到達三百萬像素以上[2,3,4]。筆者深信這種可輕易取得、便宜又耐用的數位資訊，應該是填補上面所述的嚴格限制所產生的空窗的一大利器。本計劃是一種初步嘗試，期能瞭解問題，釐清應用數位相機影像資訊於攫取光照度分佈之各種主要限制。並希望能提出合理的解決方案。

2. 數據攫取之系統架構

本文應用可變焦、光圈快門之 334 萬像素 PREMIER DC-3460 數位相機，其規格為：四倍光學變焦、兩倍

數位變焦、最大解析度 2048*1536、光圈 f3.0-f3.6、快門 1/1000-4 秒、iso 感光度 100/200/400/800，影像感測採用 Interline Transfer 方式。在同一組取樣之實驗下，使用固定的光圈、快門和焦距，使其曝光和焦距為同一條件。本文使用兩種光源，一為可調電流(亮度)之桌燈，另一為 casio 膠片投影機之光源。取樣時讓光通過成一直線的兩個圓孔。在第二個孔隙採用不同的孔隙直徑，以得到不同孔隙分佈的光域分佈，便於校正光電管。屏幕使用全開白報紙，以便將光源投射於上。所用的光電管是公司 TES 出品之 1130 型，感光體為矽光質二極體，其取樣率是每秒 3 次，其解析度為 0.01Lux(流明)至 3000 Lux，精度為 ±0.01 Lux。由於光電管對光度敏感，故會造成讀取之流明值的跳動，實驗時取每格 2 秒讀取一次，將三次的讀取值平均後當做真正的讀取流明值。灰階值攫取是根據美國 NTSC 標準(National Television System Committee Standard Y=0.3r+0.59g+0.11b)將三色轉換成單色，再以 Adobe Photoshop 軟體換成 binary 數據。

量取灰階與光流明換算函數時，是將光源投射到中央挖有一孔隙之屏幕上，調整成最亮點位置大約是孔隙位置，先用光電管量出流明後，用另一張沒有孔隙之白報紙貼到屏幕上，再用數位相機拍下光跡圖，而其灰階值只讀取對應到孔隙位置之相素。經改變光源電壓以得到另一組光流明後，重複以上動作。其後之屏幕使用第二張白報紙，為使該次實驗之灰階流明換算公式不改變，需要用冷氣機維持量測環境在同一溫度與溼度。若兩次實驗時間之間格太長或者第二張白報紙變更時，都需重新量一次。

拍攝目標屏幕上之光跡時，是在改變光源電壓取得不同流明輸出後，以數位相機正面拍取光跡圖。

3. 理論分析

3.1 灰階與光流明換算之限制條件

文獻[5]企圖疊合兩張影像圖成一張，但不能成功，其中的主要原因是將一張影像圖之某一點精確地定位成另一張影像圖的那一個位置。而造成此種困難的一個因素是有限灰階解析度所造成。一般商用數位相機的灰階解析為 0-255。若要增加其解析度，就需要應用某些工具來探討可行性。此外，入射光照到一屏幕上會有以下的三種特性：(1)使太亮的入射光更亮，不會使得反射光強度呈直線式的增加；(2)太暗的光不會有反射光或者不靈敏；(3)入射光照度與數位相機所攫取之灰階的關係不是限性等。以上四種限制，是本文的量測方式所必須設法解決的主要問題。

3.1.1 有限灰階解析度之改進

為了瞭解有限灰階解析度之影響，茲考慮下式

$$y = 1.25 - \sqrt{1.25^2 - x^2}, \quad 0 \leq x \leq 1.25 \quad (1)$$

為了以圖形清楚地說明，假設只用 32 個灰階，且其上限為 $y_{\max} = 2.25$ 。因為灰階值和最大灰階值的關係，其結果見圖(1)之階梯式的實線，雖然大致上能夠顯示 y 函數的性質，不過誤差還蠻大的。第一個可以想到的改進法可用一個 [8,8.9999999] 之中的實數都是 8 來觀察。其最大誤差為 0.9999999。若使用 $8+0.5$ 來近似這些實數，則誤差為 ± 0.5 。應用這種概念，則得到圖(1)中的階梯形點線。和原來的線相比較，將 y 值加上 0.5 倍的灰階間格值，除了少數區域之外，大致上精確度得以提升。從圖中可見新的數位化之誤差的誤差大致上在，原函數值之正負方向擺動，這就可以應用平滑法來進一步強化其精確度。本文採用文獻[6, 7, 8]的疊代式濾波器法，其疊代過程如下：

1. 選擇一個具有擴散式特性的平滑濾波器
2. 檢視原始數據串，確定其頻譜圖中有空窗區 $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ ， λ_1 和 λ_2 依次是空窗段波長之下限和上限，在這區段的波之波振幅很小，或波型不重要。用下式求出平滑參數 σ 和疊代次數 m 。

$$\begin{aligned} b(\lambda_1/\sigma, m) &= 1 - [1 - \exp(-2\pi^2\sigma^2/\lambda_1^2)]^m = 0.001 \\ b(\lambda_2/\sigma, m) &= 1 - [1 - \exp(-2\pi^2\sigma^2/\lambda_2^2)]^m = 0.999 \end{aligned} \quad (2)$$

3. 用濾波器對原始數據串，去分離平滑過的長波和短波波形。
 4. 用相同的平滑方法對分離出來的短波波形再做一次平滑，來得到第二次平滑和分離的短波波形。
 5. 重複步驟(4) m 次，此時被平滑的新長波波形的振幅是可以忽略的。
 6. 所要求取的高頻波形是最後的短波波形，最後的長波波形等於原始數據減去高頻波形。
- 經採用 $\sigma = 0.2$ 及疊代 150 次，可得到圖(2)中的點線，

除了少數區域之外，大致上可以改善其精確度。由於少數極端點之關係，數位化線之 ℓ_2 誤差約為 0.0217，平滑後之點線之 ℓ_2 誤差約為 0.0247，可見 ℓ_2 誤差不能充分反應這類問題的實際誤差。

本文也將使用二維的疊代式濾波器，來消除影像上的雜訊。

3.1.2 其它三種限制的改進

本文使用第二節之實驗方法，針對第 4 種非線性灰階光流明轉換式限制，提供改進法。圖(3)是一組入射光照在屏幕上的影像，比對光電管量測值和數位相機拍舍攝之影像的灰階值所得的轉換公式。在讀取時，本文使用線性內插法取得每個灰階值對應的流明值。太暗和太亮入射光之改近，則應用下一小節所說的方法改進之。

3.2 影像疊加研究

太亮和太暗的入射光，不易在影像上產生對應的灰階之特性，可參考圖(3)。當入射光的流明小於 1000Lux，灰階值的變化誤差變大。反之，當灰階值大於 220 以上，流明值的變化誤差變大。這兩個區段就是依次分別對應到入射光太暗和太亮的限制。本文採用簡易的方式，將每張影像上灰階值大於 g_{\min} 和小於 g_{\max} 的像素點當作可用點，其它的像素點當作不堪用點。但設最亮的入射光之低灰階值為可用點，以免有空洞點存在。

針對第 n 張影像圖，每一像素點 (i, j) 之流明 L_{ij}^n 與灰階 g_{ij}^n 之關係為

$$L_{ij}^n = \alpha g_{ij}^n \quad (3)$$

其中 α 是類似圖(3)所提供的換算函數。由於無法只用一張影像得到精確的流明值，故要用疊加法將幾張影像數據疊加起來。由於本文是初步探討，先假設每張影像每一像素點的流明變化，以線性方式隨著電源電壓之增加而增大，則可望有下列的關係存在

$$k_1 L_{ij}^1 \approx k_2 L_{ij}^2 \approx \dots \approx L_{ij}^M \approx L_{ij}^{\text{reference}} \quad (4)$$

其中 k_1, k_2, \dots, k_{M-1} 是比例常數，且設 $k_M = 1$ 。再設所有的可用點形成一組集合 A ，本問題誤度量測之目標函數可定義成

$$I = \sum_{(i,j) \in A} \sum_n (L_{ij}^{\text{reference}} - k_n \alpha g_{ij}^n)^2 \quad (5)$$

這個目標函數包括兩組未知數： k_n 's 和 $(L_{ij}^{\text{reference}})$'s，若不進一步做限制會成為互依問題，本文設 $k_M = 1$ 可使最小平方誤差法所產生的方程式數目和未知數一樣多。本文方法是經使用最小平方誤差法，先求取 k_n ，再求 L_{ij}^n ，再重複疊代數次，即可以得到最後的解。由於本文做了許多假設，可能引致數值誤差。為了壓抑這種不確定性所產生的誤差，又為了能夠減低光電管量測的次數，本文針對每組影像資料，只量測最亮的那一張影像中的最亮點之流明值，並令其為

$I_{\max}^{\text{reference}}$ ，因此最小平方誤差法的最後公式依次為

$$\partial I / \partial k_n = 0, \quad n = 1, 2, \dots, M - 1 \quad (6)$$

$$\partial I / \partial L_{ij}^n = 0, \quad (i, j) \in B \quad (7)$$

式中之集合 B 指排除以下像素點的其他點：

1. 最亮入射光影像上之最亮點；和
2. 最亮入射光影像上，灰階值小於 g_{\min} 之各像素點，因為這些點上的灰階值，將直接以平滑後的灰階值換算之。

4. 結果與討論

本文的第一個例子是使用一個可調光源強弱之家用拾燈，經兩個孔隙投射到屏幕上，所量測的灰階數據。由於由數位相機擷取的像素點為 2048×1536 點，超出一般的個人電腦之處理能力，故使用梯形積分法，將數據之灰階圖直接縮小成為 512×384 點，所用的內部點加權矩陣為下式，在邊界線和四個角落點則作適度調整之。

$$\frac{1}{100} \begin{bmatrix} 1. & 2. & 2. & 2. & 2. & 1. \\ 2. & 4. & 4. & 4. & 4. & 2. \\ 2. & 4. & 4. & 4. & 4. & 2. \\ 2. & 4. & 4. & 4. & 4. & 2. \\ 2. & 4. & 4. & 4. & 4. & 2. \\ 1. & 2. & 2. & 2. & 2. & 1. \end{bmatrix} \quad (8)$$

圖(4)是其中一張原始影像圖，圖中包括變化幅度極大的雜訊。圖(5)則是經過梯形積分法直接縮小數據的結果。由於積分有平滑的效果，雜訊的變化明顯小多了。

若直接應用類似圖(5)的數據來疊合數張影像，則可能仍會含有太多雜訊成份。為了避開此一困擾，本文使用二維疊代型濾波器，配合每個像素之灰階值都加上 0.5，使成為 $0.5 \sim 255.5$ 。圖(6)是圖(5)再平滑的結果，使用的參數為 $\sigma = 6$ 疊代次數 $m = 30$ ，其平滑的結果尚可。圖(7)是用圖(6)計算出的光流明分佈圖，在其灰階值比 g_{\min} 小和比 g_{\max} 大的像素都用 $L_{ij} = 0$ 表示之。

經過本文的疊合方法，將九張不同亮度之輸出光的影像疊合，最亮點之光流明由光電管量測值提供，接近暗點之流明由最亮之影像圖的灰階直接換算。最終與各圖的比較見圖(8)和(9)，初步結果看來還不錯，各影像圖所求得的結果的差異性尚可接受。圖(10)是一個膠片投影機投射到屏幕上的光域圖，乍看之下，在中央部位的光域分佈相當均勻。經由本文方法之疊合結果見圖(11)，其光流明在中央部位的流明值明顯偏高，造成大部份區域都是過飽和現。可見此一產品的光輸出有一大部份是過亮。從節省能源的角度來看，其光路設計有極大的改善空間。

5. 結論

本文探討使用數位相機配合光電管量測投射在一屏幕的光域分佈，發現主要的限制條件，初步成功地得到解決這些條件的方法。未來將進一步改進各個

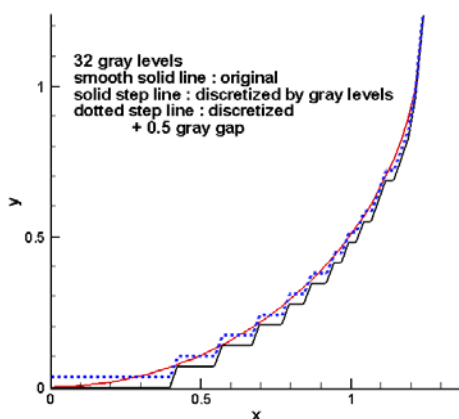
環節，使能應用到許多工業問題。

6. 誌謝

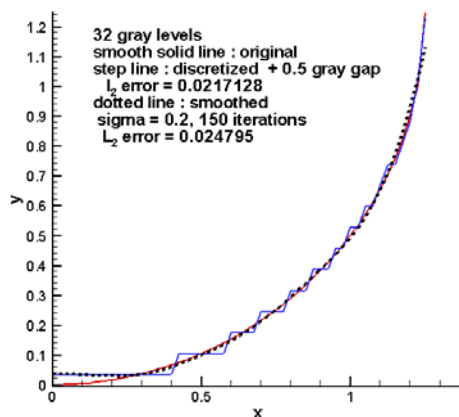
本文為國科會補助專題研究計劃成果，編號為 NSC 93-2212-E006-037。

7. 參考文獻

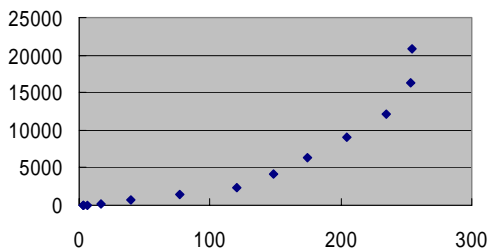
1. E. Hecht, *Optics*, 4-th Edition, Addison Wesley, 2002.
2. R. C. Gonzalez, and R. E. Woods, 1992, "Digital Image Processing" Addison-Wesley.
3. S. E. Umbaugh, 1998, "Computer Vision and Image Processing : a Practical Approach Using CVIPtools", Prentice Hall.
4. A. Adams, "The Camera " New York Graphic Society, Boston, 1980.
5. Y.N. Jeng, G. W. Lo, and Y. C. Cheng, "A Study upon Sub-Pixel Accuracy of Point Identification between Digital Images" Proc. of 21th Chinese Society of Mechanical Engineering, Paper no. D0700901, Nov. 2004.
6. Y. N. Jeng, Huang, P. G., and Chen, H., "Wave Decomposition in Physical Space Using Iterative Moving Least Squares Methods," Proceedings of 11-th National Computational Fluid Dynamics Conference, Tai-Tung, paper no. CFD11-0107, Aug. 2004.
7. Y. N. Jeng, Y. C. Cheng, and T. M. Yang, "Wave Decomposition Across Discontinuity Using Iterative Moving Least Squares Methods," Proceedings of 11-th National Computational Fluid Dynamics Conference, Tai-Tung, paper no. CFD11-0110, Aug. 2004.
8. Y. N. Jeng and P. G. Huang, "Evaluation of Derivatives from Composite Wave via Iterative Filter and A Numerical Method of Solving Partial Differential Equations," Proceedings of 11-th National Computational Fluid Dynamics Conference, Tai-Tung, paper no. CFD11-0111, Aug. 2004.



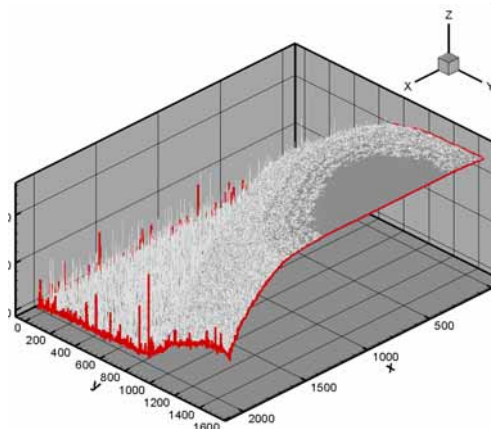
圖(1) 直接數位化函數(階梯式實線)和加上 0.5 倍的灰階間格值再數位化(階梯式點線)之比較，原圖為平滑實線。



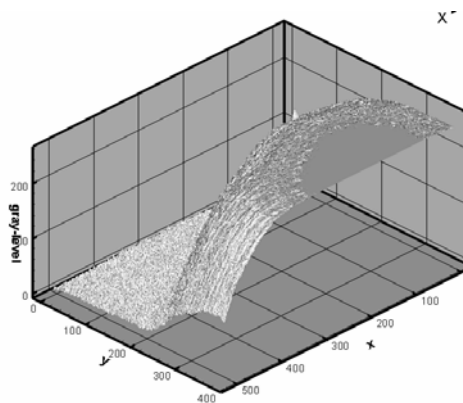
圖(1)加上 0.5 倍的灰階間格值再數位化(階梯式實線)和使用 $\sigma = 0.2, m = 150$ 平滑之的結果(平滑點線)之比較，原圖為平滑實線。



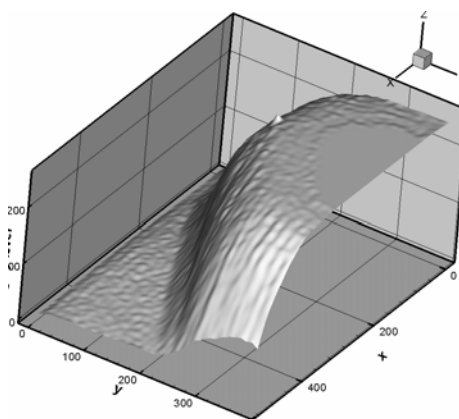
圖(3) 入射光流明值(垂直軸)與灰階值(水平軸)的量測圖。



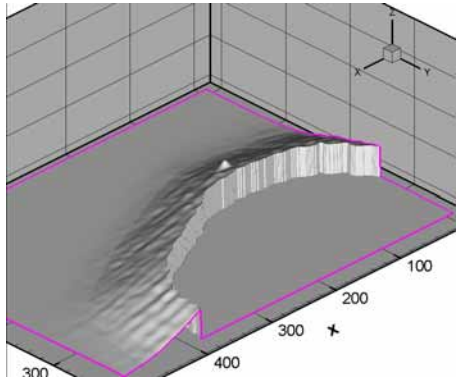
圖(4) 由數位相機所攝得的灰階值，未經前處理，故其雜訊極多。水平軸為 x -和 y -座標，而垂直之 z -軸為灰階值。



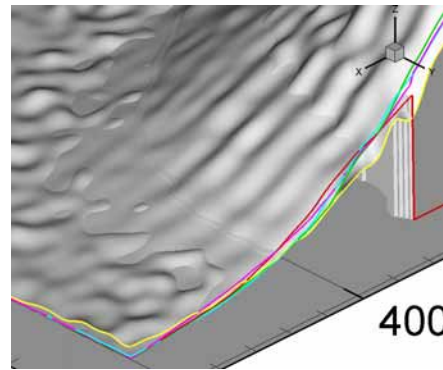
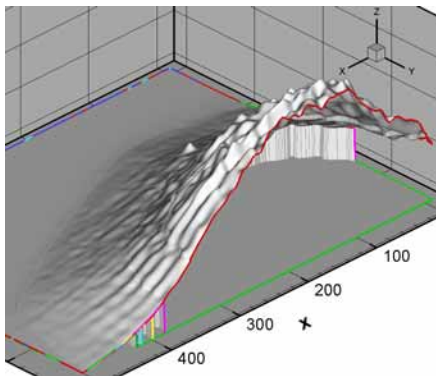
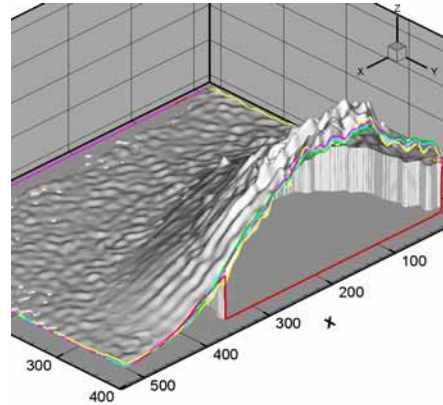
圖(5) 梯形積分法平滑後的影像圖。



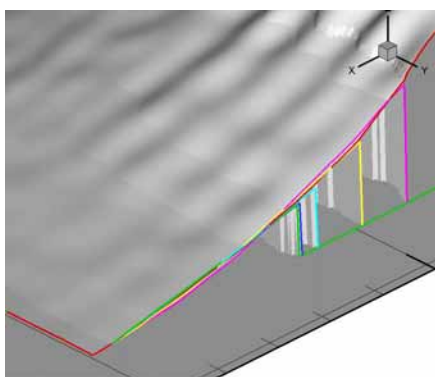
圖(6) 疊代式濾波器平滑後的影像圖



圖(7) 計算亮度分布的結果圖



圖(9) 其餘 4 張光度較低的光域圖和將九張光域度圖疊合出的光域圖之邊緣線比較；上為整張圖，下為細部圖。



圖(8) 定焦距情況下，5 張光度較高的光域圖和將九張光域度圖疊合出的光域圖之邊緣線比較；上為整張圖，下為細部圖。疊合之結果圖跨過中央部份。



圖(10)一般膠片投影機投射光在屏幕之光域圖

A Preliminary Study upon the Improvement of Light Intensity Distribution on a Screen via Several Frames Taken by Commercial Digital Camera

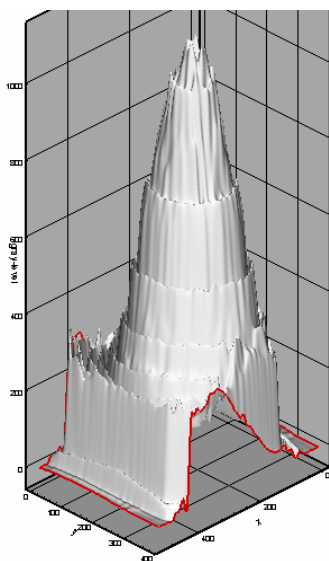
Yih-Nen Jeng¹, Wei-Wen Tsai² and You-Chi Cheng³

¹ Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng-Kung University.

² Department of Aeronautics and Astronautics, National Cheng-Kung University.

³ Department of Electrical Engineering, National Taiwan University.

NSC Project No.: NSC-93-2212-E-006-037



圖(11) 一般膠片投影機投射光之平滑後光度分佈。

Abstract

By varying the light intensity, multiple images of an incident ray projecting on a screen are taken by a digital camera and are transformed to be gray level pictures. The transformation between the light intensity and gray level at every pixel is provided by measuring the light intensity and gray level at the same point by using a photo diode system and digital camera, respectively. By excluding the insufficient and saturated pixel of all the images, the least squares method is employed to combine them into a single picture of light intensity distribution. It is found that this approach has 4 restrictions: finite digits of gray level resolution, insufficient light intensity can not induce image, saturated light intensity can not give sensitive gray level resolution, and non-linear transformation between light intensity and measured gray level. These restrictions are successively resolved and the test cases show that the present approach gives a reasonable light intensity distribution.

Keywords: digital images, image combination, light intensity distribution.