

# 印刷電路板無光罩數位成像資料處理技術

## Data Handler of Maskless Digital Lithography for Printed Circuit Board Manufacturing

邱鈺傑

林俊隆

Yu-Chieh Chiu, Chun-Lung Lin

### 中文摘要

現今印刷電路板製造無光罩光刻技術及其資料處理系統，在進入高精度領域時，同時面臨到多項問題亟待克服，即：(1)影像點陣化處理工作站運算負載(2)高解析度即時幾何縮放旋轉修正(3)龐大資料傳輸儲存等問題。本篇論文將介紹我們所設計之超高精度之無光罩數位成像資料處理架構，此架構適用於最小線寬1um製程，其基本概念是以多邊形資料格式取代像素的圖像格式執行必要的前處理，如漲縮與失真修正。依此概念，資料量將大幅減少，也因此將即時縮放/旋轉修正變為可能，進而可以實現更高解析度與精度的修正。此外，本文也將介紹新架構裡關鍵部分的兩個設計覆蓋演算法。

### Abstract

At the time of entering the era of high-precision, current maskless lithography techniques (MLT) for printed circuit board (PCB) manufacturing, and the data preprocessing system thereof, are facing a number of challenges that need to be overcome, namely: (1) RIP workstation computing load, (2) high-resolution real-time geometric scaling/rotation correction, and (3) storage and transmission of enormous pattern data and other issues. In this paper, we will present a developed framework of data processing for ultra-high precision MLT, such as 1 um minimum line/space. The underlying idea of the framework is to perform necessary preprocessing, such as scale and distortion correction, on polygon-based data format instead of pixel-based image format. In this way, the total amount of data could be greatly reduced. Furthermore, the on-the-fly scaling/rotation correction thus become possible, and therefore, higher resolution and precision correction can be achieved. In addition, this article will also present two designed de-overlapped algorithms which are the key components of the framework.

### 關鍵詞(Key Words)

無光罩光刻 (Maskless Lithography ; ML2)

雷射直接成像 (Laser Direct Imaging ; LDI)

印刷電路板 (Printed Circuit Board ; PCB)

### 1 · 前言

無光罩光刻(Maskless Lithography ; ML2)是不使用傳統光罩而採取直接寫入數位成像(Direct Imaging ; DI)的技術，可應用在IC、TFT

LCD與PCB製造上，目前在少量多樣及細線寬的需求下具有成本低、上市時間短的優點。隨著智慧手機、平板電腦等多項熱門消費性電子產品的推動，以及近年穿戴式裝置至於物聯網(Internet of Things ; IoT)的興起，整體PCB產業

趨勢朝向細線距、多層數與可撓式等技術持續發展，使得IC基板L/S 5um 的需求被提出。由於步進器成本高，在成像品質夠好的要求下，破壞性創新技術例如雷射直接成像(Laser Direct Imaging ; LDI)、雷射切削(Laser Ablation ; LA)與奈米轉印(NanoImprint Lithography ; NIL)也被引進去解決上述問題。

目前在印刷電路板(Printed Circuit Board ; PCB)領域，IC基板、軟式電路板等精密產品已大量使用LDI裝置取代曝光機。由於智慧手機與平板電腦採用扇外型晶圓級封裝(Fan-Out WLP ; FOWLP)，PCB產業與先進封裝不斷面對薄型化所帶來的挑戰性問題如die shift、翹曲變形(warpage)的處理等，因此新一代LDI技術必需同時解決更細微的圖案與結構、利用標記得到良好的對位與高產能的問題。LDI最大供應商Orbotech已宣稱預計1~2年內進入此市場，其最小線寬需求為2um。

PCB曝光製程捨棄底片曝光而走向直接成像為必然的趨勢，唯現今無光罩曝光機的資料處理流程均使用影像檔資料為基礎格式，在進入高精度領域時，解析度提高10倍則影像將膨脹100倍，將同時面臨到多項問題亟待克服，包括：(1)影像點陣化處理工作站運算負載、(2)高解析度即時幾何縮放旋轉修正、與(3)龐大資料傳輸儲存等問題。本文針對1um線寬線距之數位直接成像曝光系統，提出新的解決方案。

我們觀察發現，線路圖的資料量在點陣化之後會膨脹300~500倍，而高精度的點陣資料量又變得更龐大，將遭遇到資料運算、儲存、傳輸等等的問題。若能將點陣化的工作移到資料處理流程最後的曝光頭端之前，則可達到資料減量，解決上述問題。

本文安排如下：第二節介紹PCB製造流程與PCB無光罩曝光機設備發展狀況；第三節呈現一新的資料處理系統架構，解決現有PCB無光罩曝光機進入高解析度的屏障；第四節與第五節則針對PCB製造常見的兩個關鍵議題：漲縮/失真與合併/覆蓋問題，提出更詳細的解決方案；第六節為結論。

## 2 · PCB製造與無光罩曝光機

ML2技術依寫入光源不同，可以分為電子束、離子束、X-光、一般光源及雷射光，而目前已有大板面的直接成像為雷射掃描成像、雷射燒灼成像、以及德州儀器生產的數位微鏡裝置(Digital Micromirror Device ; DMD)做為空間調變器(Spatial Light Modulator ; SLM)方式。由於ML2的應用較廣，本文限制討論範圍以應用印刷電路板製造為主。

### 2.1 印刷電路板製造

印刷電路板顧名思義是在將設計好的電路圖利用印刷的方式轉移到基板上，以承載基板上的電子零件電路訊號連接並有支撐、拆裝與保護的功能。最常見的基礎材料是銅箔基板(Copper Clad Laminate ; CCL)，由銅箔覆蓋在絕緣材料上，再經蝕刻過程去掉不要的地方，留下線路作為導線與接點。微導孔技術又稱高密度互連技術(High Density Interconnection ; HDI)，其定義是直徑小於150um以下的微孔結構製成的電路板，可提高組裝與空間利用。IC載板的需求則隨著IC製程不斷縮小而增加，目前其最小線寬製作能力最小可達5um到8um。

在印刷電路板製造廠，所有的影像轉移是利用曝光機設備完成。隨著時代進步，可以光刻技術來加速量產，先要製作一層光罩，俗稱底片(artwork)或是菲林(film)，常用的材質為透明的聚酯樹脂膜(Polyester ; PET)，可用印表機印上圖案，或在溫濕度環境控制下使用雷射底片繪圖機來繪製高階電路板。做好底片之後就是貼在塗佈光阻(photoresist)的銅箔基板上進行曝光，再利用顯影、蝕刻之後將線路圖轉移到銅層上(見圖1)。

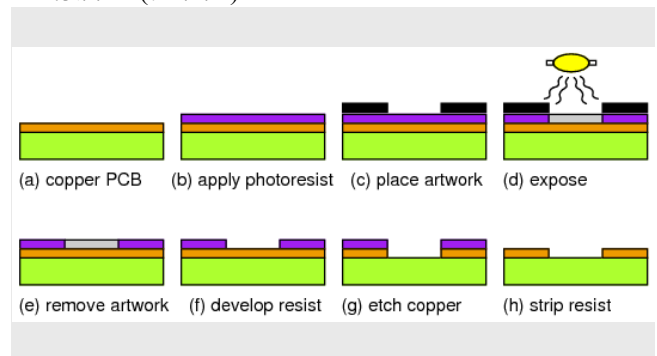


圖 1 PCB影像轉移過程

隨著電路板上的元件越來越多，線路越來越錯綜複雜，雙面板只能提供有限的交錯(crossing)，多層板就應運而生了。多層板是由超過2層的電路疊加而成，一般皆為偶數層。在1970年代流行的原因是美國政府頒佈法令規定要屏蔽訊號以減少對其他元件造成的影響，大多數的綠色PCB為多層板，PC主機板大約為4~8層板，手機的電路板屬於軟性材質，但也可做到20幾層。不同層的電路要透過鑽孔之後在孔壁上鍍銅來連通，這些小圓孔叫導孔(via)，電鍍銅之後可作為線路層間傳導訊號的電路，週圍會有一圈孔環，而不同層之間的孔環之間需要彼此對準，至少鑽孔時沒有歪掉造成孔破，導致斷路、短路等不良品問題。

在線路越細小時，製做底片越耗時，做出來的內層曝光底片只要在微小尺度上稍微有形變，將會造成接下來外層曝光時無法同時對準所有微孔的問題。漲縮為PCB製程常出現的現象。因為PCB跟IC製造很大的不一樣之處在於基底的的不同，PCB的基材是膠片(Prepreg; PP)，利用軟黏的塑膠材料，包覆在玻璃纖維形成的骨架上，而貼覆在兩面薄薄的銅層有延展性，所以整片PCB在製造過程中會時而漲大縮小。這些雖然是百萬分之一級的形變用漲縮值來量測。以多層硬板而言，由於總和的結果是縮小且可預期，一般會在內層站曝光或鑽孔時先進行預放大補償，也就是把底片做的稍微大一些，之後縮小的完成品就會跟設計值大小一樣。

然而漲縮並非用簡單的模型就能夠控制的，可能因為製程溫度、濕度或是材料不同而出現整批的漲縮值不同，為了不讓半成品整批報廢，出現了漲縮分類機，以人工或機器將半成品做分類，再依漲縮值選擇對應的一套外層底片，並儘可能的保持生產環境穩定。但當規格越來越高，線路越來越密，元件也越來越小的時候，會發現不只是基板有漲縮，PET底片形變更加嚴重，因此在底片的保存與拾取上也要小心。而若選用塗佈銻的石英光罩，雖然耐用但成本將會大為提高，所以PCB製造廠商希望在曝光時不使用底片直接成像，減少等待底片製作的時間與成本，不但能用數位影像即時修正又能維持產能，也就促使了PCB無光罩曝

光機的誕生。

## 2.2 PCB無光罩曝光機介紹

ML2技術主要源自製作光罩的光繪機的DI技術。但是傳統的直接成像的最大問題就是要完成曝光需要較多的能量導致速度太慢。所處理的數位影像是由像素組成，輸入原始電路圖在轉成影像之後，配合光學鏡頭與精密量測做線性幾何修正之後，可針對每片PCB做修正。

無光罩曝光機的歷史不短，距離第一台雷射直接成像系統Polyscan PDI-2000上市已經25年。國際上開發的廠商可分為兩派，歐洲派發展旋轉鏡裝置，而美國與日本則是另一派使用數位微鏡裝置。1990年末期，從自動光學檢測(Automated Optical Inspection; AOI)起家的Orbotech買下Jenoptik公司的DI技術，研發出大鏡面光學掃描技術進軍無光罩曝光機，其最新產品Nuvogo 1000，特色之一是針對防焊曝光製程的高能量多波長雷射成像，同時能將多個作業平台自動連線整合。日本Dainippon Screen、美國MLI(Maskless Lithography Inc.)分別利用GLV(Grating Light Valve)與DMD技術做出了紫外光源與一般光源曝光的無光罩曝光機[3,7]。

國內也有幾家廠商想跨足數位直接成像設備。川寶科技致力於PCB黃光製程，於前年底買下美國MLI的DMD技術，生產全自動數位直接成像曝光機，在2015台灣電路板產業國際展覽會展出CBT MLI 5880機台，前方玻璃窗可看進去內部，機器手臂將PCB板自左邊拾取到載物台，推進去後方兩次之後再由右邊出去，整個曝光流程十幾秒就完成。第一次到後方是計算對位，第二次進去就是曝光，同時曝光的範圍是六或七個矩形。亞智科技的母公司Manz集團收購德國KLEO公司的旋轉多面稜鏡曝光裝置技術，使用288個雷射二極體分為9組曝光頭，利用獨特的氣懸軸承能保護高速旋轉50000rpm下維持精度，以及利用雙檯面系統連續有效曝光提升產量。旭東機械則是跟荷蘭LDI Systems合作開發，曝光頭是採用荷蘭TNO研發的穿透式掃描鏡曝光頭，目標是低功率曝光，製造能降低生產成本的無光罩曝光機。各家廠商目前的製程能力與最小線寬距參見表1。

表 1 直接成像技術廠商發展現況

廠商	設備	最小線寬/ 線距(um)	對位精 度(±um)	產能 (p/hr)
Orbotech	Nuvogo	10/15	7.5	240
Screen	Ledia	12	7	187
ORC	FDI	5/5	3.5	80
ADTEC	IP	15/15	7	264
Via Mech.	DE	8/8	7	90
Fuji Film	Inprex	15/15	10	160
新諾科技	ALDI	28/28	10	220
天津芯碩	Saturn	25	10	145
大族數控	LDI8000	25/25	10	240
川寶科技	Raptor	30/30	10	140
亞智科技	SpeedLight	15/15	10	180

目前各家廠商生產的無光罩曝光設備都有其特殊性，但是無論是那一種ML2技術，一般來說都需要有五大系統互相配合：

- 資料處理系統：負責影像圖案的傳送與控制；
- 光源系統：產生曝光所需的能量；
- 光學系統：由光學透鏡組成，傳遞能量；
- 機械系統：包含精密機台、滑軌、機械手臂；
- 對位系統：以照相方式進一步對位/校準。

目前無光罩曝光機在推廣上遇到的困難為建置機台的成本較光罩式曝光機還高1.5倍，而其資料處理流程在進入高精度領域時將會面臨到傳送高達數十GB的精密數位影像資料花費較長時間。而雖然減少了底片漲縮/失真修正的問題，但板子本身是軟性材料，所以仍有必要即時地對線路影像做計算幾何縮放與旋轉修正。另外，為了增加曝光能量而採用的多頭式曝光一般還有接縫(stitching)的問題，如同排球運動在攔網時手型沒擺好可能會有中洞，各個曝光頭負責曝出一條條圖案之間，也需要調整才不會有縫隙，或是因相鄰照射光能量不均勻產生粗細不同的線路。

### 3 · ML2資料流程架構

數位直接成像設備，主要元件有高精度機台、先進光學系統、高速控制模組等組成，目前國內尚無此技術，雖然台灣已有組裝數位直

接成像機台的能力，但關鍵技術掌握在歐日美。在開發5um以下線寬線距之數位直接成像曝光系統時，在高精度機台方面必須解決次微米等級的解析度的問題，在先進光學系統方面必須面對如何產生次微米光點的問題，而在高速控制模組方面，則必須面對資料量傳輸問題、即時補償、縫合的問題。

我們的團隊目的是開發國內自主的超細線路無光罩曝光機，從高速控制模組的資料前處理系統著手，目標最小線寬達1um等級，像素大小0.1um，成像面積為610mm x 813mm。與現有資料流程的不同之處在於內部格式以多邊形為基礎，可達到至少100:1的資料減量，轉成中間格式額外所需耗費時間將在離線處理，而硬體光柵器每個cycle能產生>100個像素，總處理時間約在數毫秒內可完成，既能降低了資料量又不需額外花費較多的資料處理時間導致單位時間產能下降。整體流程參見圖2。

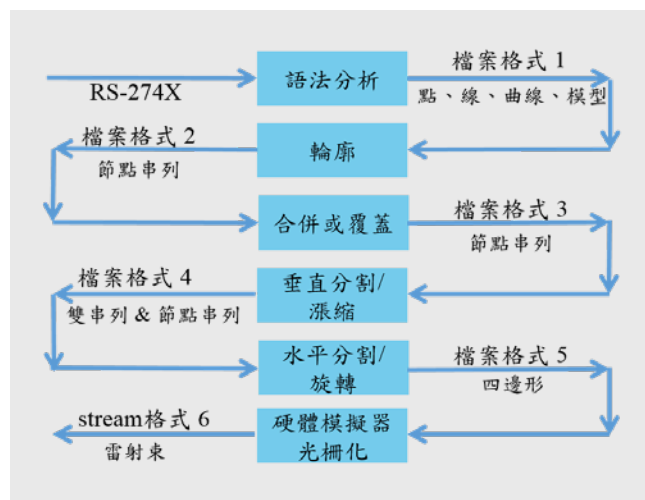


圖 2 資料處理流程圖

#### 3.1 多邊形影像格式

電路圖是二值影像(binary images)，常見的兩種描述方式：向量基礎(vector-based)與像素基礎(pixels-based)。在傳統無光罩資料處理流程一般都是將向量基礎的格博檔(Gerber files)先經過光柵圖像處理器(Raster Image Processor; RIP)轉像素基礎的點陣影像，我們採用的是先轉成中間格式，以多邊形基礎(polygon-based)描述，期能解決大檔案傳輸的問題。此格式與一般多邊形亦有不同，可以容



許電路圖中各種光筆(apertures)形狀常有的圓弧邊。為了能夠加快後面利用硬體做即時光柵化的速度，軟體至少要能解決這些資料前處理的工作：

- 扁平化(flattening)：或稱平面化，指從3維變成2維。格博檔本身座標是2維含輸入順序，因為排序會改變順序，所以要先做扁平化再排序。
- 合併(merge)與覆蓋(deoverlap)：合併相鄰多邊形，有時候會遇到用paint/stroke的方式產生鋪銅層(圖3)，這時候先合併的好處就是大量減少多邊形的數目。覆蓋則是去掉多邊形之間有交集的部份，也就是減少重疊區域重複畫兩次以上的。
- 原形切割(primitive partition)：將多邊形切割成一些硬體認識的原始圖形(primitives)，一般是能簡單定義的形狀如三角形或梯形(trapezoids)，在兩條平行於x軸的平行線之間，只用一對邊(edge pair)描述，左右各一條可以是直線段或是圓弧邊，彼此不能相交。
- 幾何排序(geological sorting)：依照物件(objects)所在的位置排序，目的是使幾何位置上鄰近的物件，在輸出檔案中的位置也相近。物件也就是多邊形，而依照最後傳送到緩衝器的順序輸出，先照上到下排，再自左而右排。

### 3.2 流程中各模組概述

- 語法分析(parser)與輪廓(contouring)：讀入原始格博檔等電腦輔助設計(Computer-Aided Design; CAD)資料，轉換為多邊形資料，此一中間格式只包含多邊形的端點訊息，因此資料大小只有完整點陣資料的1%以下。格博檔是PCB製造業界的共通語言，含有Flash、Draw與Region三種幾何物件，本身就有一套描述邊界的方式。輪廓定義是沒有自相交的封閉點邊串列(closed vertex linked list)，邊是由直線段、順時鐘圓弧或逆時鐘圓弧三種型式，由於在描述圓弧的時候不一定能準確落在格點上，格博檔規範如何解釋圓弧是製造端的權利，而設計端有義務提高解析度以減少輸入誤

差。

- 合併或覆蓋(merge/deoverlap)：合併或覆蓋的定義如前一小節所述，基本上是能夠摘取多邊形的外圍輪廓，去除重疊的面積、合併相鄰多邊形，達到精簡的圖形描述方式。利用多邊形的布爾運算，例如聯集、交集、差集，可以達到所要的效果，見圖4。
- 垂直分割/漲縮(vertical partition/scaling/distortion compensation)：PCB在製做過程中有扭曲、偏離的特性，需設計若干標靶來對位，使用機台上的照相機(Charge-Coupled Device; CCD)自動對位偵測靶位，分析靶距後計算出的靶環與孔偏位置與調整X,Y漲縮補償值之後即時修正影像。基本修正要含有對位(平移)與線性補償(旋轉,放大)參數則至少要三個定位點。漲縮修正後得到的漲縮線路圖會被切成長條狀(Strip)，每一長條對應到一個曝光頭掃描範圍，例如雷射二極體。
- 水平分割/傾斜(primitive partition/tilting)：水平分割的目的就是為了將複雜多邊形切小，改成以原形多邊形網格表示[8]。傾斜的應用在於，LDI機台會將全部面積切成一條條的子區域之後，傳送資料給各別的雷射二極體，多面鏡的直徑有數公分寬，為了多個相鄰的雷射二極體共用所以設計為斜擺，因此掃描範圍會有推移。類似的以DMD曝光的機台也有利用稍微旋轉曝光頭配合光學鄰近修正達到增加水平解析度的技術[4]。若從資料準備的角度來看，為了配合機台進給方向與曝光頭掃描方向不垂直，在餵送資料前需分別對每個長條中的多邊形做旋轉(rotation)或推移(shearing)。
- 光柵化(rasterization)：又稱點陣化，將多邊形格式轉成點陣圖影像格式。為達到高速之灰階(來自解析度強化運算)多邊形點陣化，我們採用平行的硬體點陣架構：擴張點陣器(spanning rasterizer)進行運算，以達更高的pixels-per-cycle能力，並解決「空間-灰階轉換」運算。

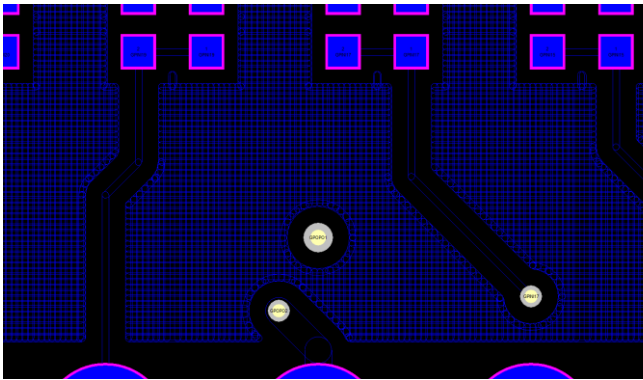


圖 3 利用光筆paint/stroke產生大面積銅層

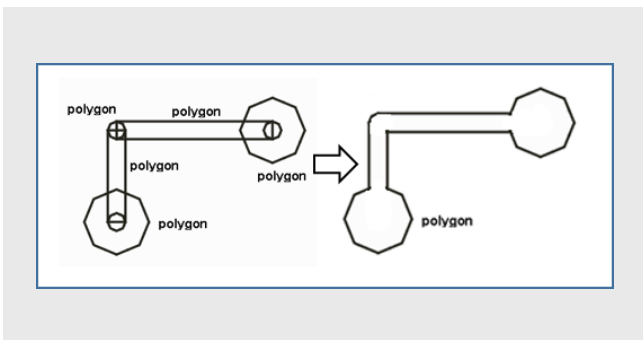


圖 4 多邊形輪廓的聯集示意

## 4 · ML2漲縮修正模組

設計ML2流程時一定要考慮的就是如何解決漲縮(*scaling*)問題，因為PCB跟IC的基材不一樣，PCB是軟的所以會形變比較嚴重。漲縮就是漲跟縮(*expansion and contraction*)，也就是形狀以一個不動點為中心保持位置不變，而其他點向外擴張或聚合，造成一維漲大或縮小概念，進一步地可以解釋成區分為兩軸方向上各有不同的大小變化(*X,Y independent scaling*)，更能符合PCB基板核心(*core*)玻璃纖維布在巨觀上的經緯方向不同地變化。而更有甚者，漲縮問題可以包含基板上圖形與原始設計圖形之間的非線性形變。

### 4.1 漲縮修正方式

簡單的漲縮，例如位移跟旋轉，在機台上都可以用移動載物平台(*carrier*)來粗略地完成實體修正。這類的機台至少要三軸，一般就是在 X,Y 方向可以做移動再加一個 $\theta_z$ 做水平旋轉，或是XXY精密對位平台亦可。光靠移動載物台是沒有辦法達到較複雜的放大縮小功能，

以常用於IC曝光的步進機而言在曝光時是有縮小功能的，像是1:4或1:5，尚可用光學鏡頭組來控制調變光做大小微調，但是較低階PCB的曝光機，是先將電路圖印在價格相對來說較便宜的底片，貼著CCL曝光，那比例當然就是1:1，所以不會有放大縮小功能。由於底片成本相對因為便宜，可以分組之後，預先放大縮小，製作出數套大小不同的底片來用，以增加精度與產能，漸漸地漲縮就是變成PCB一定要額外做的修正技術。

無光罩曝光機自1990年代出現時，ML2的技術是本來用光罩的光刻術中把光罩去掉。由於沒有底片，就採用製做底片時的數位影像修正來取代原本在底片上實體修正，先利用兩個影像上的標記位置差異，建立轉換模型(*transform model*)，再把所要修正的影像逐個像素做座標轉換。一個問題是新的座標一般來說不見得會落在有值的格子點上，就要使用插值的方式求出新座標的值。

### 4.2 漲縮變換模型

求取座標轉換模型的可用下面情形簡單說明，給n個已知函數點，則存在唯一一個度為n-1的單變多項式函數f，若是能求出n個多項式係數，就能決定函數f。類似的原理，幾何變換是二維平面上的一個點到點的座標轉換函數( $u,v=f(x,y)$ )，基本上幾何變換都能夠用一些矩陣乘法表示，可利用在3D電腦圖學領域硬體加速的渲染方式。PCB不論有光罩、無光罩，都會放對位用的標記(*fiducial marks*)在線路圖案上，可透過量測這些函數點位移量來建立轉換模型。以下介紹常用的標記和搭配修正模型：

- 兩點式·影像上有兩個點的偏移量，除了能計算所要的平移向量( $\Delta x, \Delta y$ )之外，亦可配合模式求出漲縮值S，與旋轉角度 $\theta$ ，這樣的修正就是普洛克路斯忒斯變換(*Procrustes transformation*)。另外2x2線性矩陣變換也是四個未知數，但是它不含位移，且一定會有不動的參考點所以實用性不高。

- 三點式·三點形成三角形，任兩個平面三角形都可以定義一個6個未知數的仿射變換(*affine transformation*)，當六個頂點要成對互相對準，則形狀也會跟著變動。仿射幾何保持平行、共

線、長度的比例，可以用增廣到三維的矩陣來表示，配合齊次座標表示 $(x,y,1)$ 是點， $(a,b,0)$ 是向量。可知兩點相減會得一向量，而兩向量相加仍然是向量等操作性質。

■四點式，常見的有兩種，一個是透視變換(perspective transformation)，來自是藝術家在平面上表現出立體感的透視畫法，描繪人眼鎖定的畫面，依消失點個數分類，不是多項式變換，也較不適合用在平面物體形變。另一個是雙線性變換(bilinear transformation)，雙線性指的是各別對 $x,y$ 兩個變數來說都是線性，其實含有二次項 $xy$ 得到8個自由度。

雙線性變換是目前最常見的漲縮變換模型，一般來說建立模型的速度要快，且定位點固定打在PCB四角不影響設計。更高自由度的非線性變換則需要更多定位點，像是相機校準要6個點解12個未知係數，雙二次變換就是 $x$ 跟 $y$ 都各自可以達到2次項，預期能應用於非線性失真或輕度板彎翹的影像疊對。

### 4.3 內插法

內插法(interpolation)是找一個函數使得它完全通過已知的點，簡單的情形是在不知道單變函數 $f$ 的情況下透過給定一些已知的函數點 $(x,f(x))$ ，在相鄰的函數點之間，插滿新的函數點，所以叫內插。應用到未知的二維函數的內插時最快速的調整方式為最近鄰居內插法(nearest neighbor interpolation)，或是可用要花較長的時間的雙線性內插法(bilinear interpolation)、雙三次內插法(bicubic interpolation)，拿時間換精度，在小量多樣生產是可以接受的。但是要快速生產又要實時逐板修正，尤其細線路曝光圖案需要採用解析度更高的影像時，使用多邊形頂點修正將比逐點修正快上百倍，可搭配非線性模組提高精度。

## 5 · ML2合併或覆蓋模組

一般建立於像素基礎影像上ML2技術是用畫家算法(painter's algorithm)去掉重疊的部份，其方法就是像油漆刷一般，後來的筆畫將會覆蓋掉原先的圖案。但是在向量基礎或多邊形基礎的影像上就不同了，必須先做許多線段

相交測試，因為雖然人眼能夠很容易的分辨出平面上兩個多邊形是否有重疊，但是電腦可沒這麼聰明，所以要利用線段求交集測試才能判斷出兩個多邊形輪廓有相交，當遇到大多邊形包著小多邊形時還需要做「點在多邊形(point in polygon)」測試才能給出判斷。

本小節將介紹兩種不同的多邊形合併方法，shape by shape是較直覺的方式，以多邊形做布爾運算為主，時間複雜度為 $O(n^2)$ ，sweep-line則是將多邊形先切成可排序物件之後先排序，在交點數小於等於線段數的情況下大幅降少計算量，時間複雜度可望降為 $O(n \log n)$ 。

### 5.1 Shape by shape

假設平面上有 $n$ 個物件要做交集測試，且任兩個物件做交集測試只要花費常數時間，一般而言需要花 $O(n^2)$ 時間才能完成所有物件兩兩之間的交集測試。由於PCB板面積大，上有動輒數萬個多邊形兩兩之間要做重疊測試，但PCB板上的元件是分散而非集中，每條電路也是連接有限個元件，所以可利用區域性減少不必要的交集測試。覆蓋可以對任意兩個多邊形都做一次聯集、交集或差集，合併則可以用聯集操作達成，所花時間皆為 $O(n^2)$ 。利用每個多邊形的上下左右極值所形成bounding box，幫助判斷兩多邊形是否有交點，但其最糟情形的時間複雜度仍是 $O(n^2)$ 。

### 5.2 Sweep-line Based Algorithms

掃描線法是在計算幾何學一個常見的手法，以掃描線演算法求線段交點與X-結構、Y-結構及相關術語可參見[1]。由於機台進給方向為Y方向，以下規定掃描線是由上至下掃，所以先將多邊形切成Y-單調(Y-monotone)線段之後，再做端點的字典排序，用X-結構記錄與掃描線相交的segments。本小節將簡述如何利用掃描線法完成聯集、水平分割與垂直分割。

●聯集(union)：定義事件為插入線段起點、刪除線段終點、還有兩條線段有交點。每當事件發生時，就水平切一刀，輸出原形，就是在這個時候，做判斷線段相交的工作。若是將原始影像想成立體的，此時水



平一刀切開來看得到數層(layers)的剖面，找出最上層，看它的顏色，如果在一條邊的左右顏色有變則必須輸出這條邊。一種做法是從左到右掃過一次平衡二元搜尋樹(Balanced Binary Search Tree; BBST)，先創造一個堆積(heap)Q，記錄「層的on-off」，由左到右trace BBST，尋找水平線與線段的交點，而覆蓋與合併的工作只要將多餘的邊註記掉就可以了。每次碰到一個邊，就去Q中找對應的高度，如果不在Q中就將這個邊放到Q裡，如果已經在Q中就將這個邊刪除，然後看Q中最高顏色有沒有變，如果沒變就不輸出，如果有變才輸出此邊。基本上是從左到右數奇偶性，如果是奇數的話才是由邊所定義的有限面積區域(Finite Area Region; FAR)。遇到垂直切割時，如果是Q中最高顏色是黑則新增兩條邊表示開始與結束，否則就沒有輸出。可能會遇到的退化情形有以下兩種：

- 三線共點：如果有兩條線段在非端點有相交，經過交點後Y-結構內改變順序的方式也只需要做交換(swap)，所以是簡單的，但如果是一般二次曲線發生多線共點時再排序較複雜，見[2]。但是目前我們只考慮線段跟圓弧的交叉，基本上只要不是兩圓弧相切，邊就會交換。可以採用重新計算交點後新開始的邊的順序，也就是兩條邊以上共交點之後，重新計算掃描線往下的斜率與曲率，所有新的關係就算一次相交。
- 遇到水平邊：水平邊也就是退化邊的一種，水平邊可能會造成原始的y-單調不連續。一般會遇到水平邊，不外乎是有新的多邊形進來、舊的多邊形出去，或是現有的多邊形轉折處，這些都是事件發生，也就是會做水平分割，則交點一定會算，也就不必擔心水平邊與其他多邊形的交點要不要算。

掃描線法強大之處在於能夠掃過一次做完

合併、覆蓋與分割，若是依上到下再左到右的順序輸出，還能完成了幾何排序。水平方向切割與垂直方向切割是不同的方式，介紹如下：

- 水平切割(horizontal cuts): 沒有事件發生的水平切割就像切仙草，直切幾刀之後，再橫的切，仙草就一塊塊的滑落到鍋中，切的動作之前之後，在X-結構上的線段並不會改變左右順序。最簡單的做法就是輸出邊對到檔案並刪除原來的邊，在用圖表示的時候，是將一個邊對用虛線連起來表示輸出當做一個原形(若是不馬上輸出，可由結構上用指標從一條邊指向右方的下一條邊即可，到了要輸出的時候再依指標將邊對輸出)。
- 垂直切割(vertical cuts): 遇到需要切直條的地方，例如切長條或是切小塊時，在上述水平切割的動作之內完成。垂直線將一直存在X-結構，X-結構插入/刪除線段時都要計算相鄰，此時也會計算是否穿過垂直線。在水平切割的配對的時候，若是有色部份穿過垂直線，則會有交點插入(此交點是不用計算即可得到)。

## 6. 結論

無光罩技術已應用於PCB直接成像設備，但在未來線路不斷微縮時預期將會遇到資料處理三個瓶頸，我們觀察發現，線路圖的資料量在點陣化之後會膨脹數百倍，而高精度的點陣資料又更龐大。我們提出一個新的架構，將點陣化的工作移到曝光頭端，利用多邊形中間格式的新資料處理流程，有效解決(3)龐大資料傳輸儲存問題，以其所採用平行硬體擴張點陣器進行運算來克服(1)影像點陣化處理工作站運算負載問題，並針對流程中重要的兩個模組給出較詳細的說明，一方面採用多邊形格式能減低漲縮模組的計算量，另一方面是利用掃描線法可以有效解決合併或覆蓋問題，以對付(2)高解析度即時幾何縮放旋轉修正問題。

目前在驗證多邊形中間格式的可行性已有初步結果，但目前市面上LDI曝光頭具有能力僅為達到數微米大小的光點與數微米位移能力，未來將建立精密機台實際實作可行性的同時，



亦可能需要引入解析度增強技術(Resolution Enhancement Technology ; RET)。已知可利用光罩製作時的光學鄰近修正技術以及蝕刻偏差模型補償技術[5,6]，改進效率達到實時修正，與無光罩機台曝光頭、光路設計的結合，期望能達到0.1um目標大小的微小光點。

## 參考文獻

- [1] J. Bentley and T. Ottmann, “Algorithms for reporting and counting geometric intersections,” *IEEE Trans. On Computers*, vol. c-28, no. 9, Sep. 1979.
- [2] E. Berberich and L. Kettner, “Linear-time reordering in a sweep-line algorithm for algebraic curves intersecting in a common point,” in *Proc. of 9th annual ACM-SIAM symposium on Discrete Algorithms*, pp. 122-131, 2008.
- [3] E. Hansotte, E. Carignan and W. Meisburger, “High speed maskless lithography of printed circuit boards using digital micromirrors,” in *Proc. of SPIE on MOEMS-MEMS*, vol. 7932, paper no. 793207, 2011.
- [4] J. Hur and M. Seo, “Optical proximity corrections for digital micromirror device-based maskless lithography,” *Journal of the Optical Society of Korea*, vol.16, no.3, pp. 221-227, Sep. 2012.
- [5] P. Ng, K. Tsai and L. Melvin III, “Study of etching bias modeling and correction strategies for compensation of patterning process effects,” *Microelectronic Engineering*, vol. 110, pp. 147-151, 2013.
- [6] A. Rosenbusch, J. Unruh, H. Kirsch and D. Chan, “Incorporation of laser proximity correction into mask production,” in *Proc. 19th Annual Symposium on Photomask Technology*, 1999, SPIE vol. 3873, P.513
- [7] H. Shirota and A. Kuwabara, “Pattern writing apparatus and pattern writing method,” U.S. Patent 6 903 798, Jun. 7, 2005.
- [8] J. Wang, C. Cui and J Gao, “An efficient

algorithm for clipping operation based on trapezoidal meshes and sweep-line technique,” *Advances in Engineering Software*, vol. 47, pp. 72-79, 2012.

## 作者簡介

邱鈺傑



國立交通大學應用數學所畢業。現任工研院視訊多媒體通訊技術組視訊編碼核心技術部工程師。專長為電腦圖學、演算法開發。

E-mail:  
[wellycchiu@itri.org.tw](mailto:wellycchiu@itri.org.tw)

林俊隆



國立清華大學資訊工程系博士。現任工研院資通所視訊多媒體通訊技術組視訊編碼核心技術部副經理。專長為多媒體視訊傳輸與編碼、影像處理、圖形辨識、無線感知器網路等。

E-mail: [Chunlung@itri.org.tw](mailto:Chunlung@itri.org.tw)