

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 微觀粒子顯像測速儀研發與微管流量測 Development of Microscopic Particle Image Velocimetry and Measurements of Micro-channel Flow

計畫編號：NSC 90-2212-E-002-207

執行期限：90 年 8 月 1 日至 91 年 7 月 31 日

主持人：沈弘俊 台灣大學 應用力學研究所

### 一、中文摘要

本研究是以傳統式粒子顯像測速儀(PIV)為基礎，來發展二維微觀粒子顯像測速儀(Microscopic-PIV)，期望將其空間解析度降到一微米 ( $1\mu m$ ) 以下，之後設計微管流量測實驗，用以量測微管中二維流場速度場，並與理論推導出之數值做比較。主要以現有之粒子顯像測速結合光學顯微放大技術，放大觀察微小區域，以應用於微管流場流速的量測。相較於傳統式粒子顯像測速儀，本技術可以達到以下優點：更精密的空間解析度(微米以下)、便於生物醫學之應用、與其他工程上微管流場量測。因此，此項計畫之研究成果可提供未來微流體研究更進一步定量觀察的重要方法。預期將可對未來微機電(MEMS)、生醫檢測與微流體基礎科學研究等提供重要之研究方法以及實驗數據。並可以此套系統進行改良，以適用於各微觀流場之量測，而使微觀流場之性質，不再停留於數值計算、以巨觀之觀點觀測之、或只為平均流體性質，而是可以直接量測空間與時間之流場性質，將對微觀流場領域之研究有實質貢獻。

**關鍵詞：**粒子顯像測速儀(PIV)、微觀粒子顯像測速儀(Microscopic-PIV)、微流體(Micro-Fluid)、微管流(Micro-Channel)

### Abstract

The objectives of this proposed study are to develop a microscopic-PIV system and to apply it to the measurements of micro-channel flows. Based on the traditional PIV technique, new optical system and signal processing technique were developed for the new measurement system.

The spatial resolution for this system was estimated to be within  $1\mu m$  or smaller in later development. This new system can be applied to the measurements of two-dimensional flow field of micro-channels or other MEMS devices. Since the length scales for the MEMS microfluidic devices are in the order of  $1-100\mu m$ , the traditional flow diagnostic tools could not be used for the flow measurements. The experimental measurements for the microfluidic devices have been limited to obtain only the bulk properties of the flow, such as the wall pressure, the mean temperature and the bulk velocity. The new microscopic-PIV system can be used to measure the whole-field instantaneous flow velocities of the micron-scale fluidic devices. The results of this study can be further applied for the measurements of other MEMS and bio-devices.

**Keywords：**Particle Image Velocimetry (PIV), Microscopic-PIV, Micro-Fluid, Micro-Channel.

### 二、緣由與目的

在微流體的研究領域中，因實驗設備之限制，無法準確得到流場中空間與時間的精微量測資料，故發展一套可靠的流體微觀量測系統一直是各界努力的目標。而巨觀世界以雷射為主的流速量測系統中，由於精確性、高靈敏度與不需接觸量測物體的特性，使其相關應用扮演著愈來愈重要的角色，其中以雷射都卜勒測速儀(Laser Doppler Anemometry, LDA)及粒子顯像測速儀(Particle Image Velocimetry, PIV)最為廣泛應用。本實驗室將傳統之巨觀以雷射為量測工具之測速方法發展成微觀量測系統。回顧過去微觀流速量測之相關研究，在微觀都卜勒測速儀中有：Michian (1976)

等人提出，用以量測管徑約  $70\mu\text{m}$  之青蛙活體微血管血流分佈，而 Dopheide (1990) 等人提出以脈衝雷射做多維量測。而國內則有學者發展出一維微觀都卜勒測速儀，但此系統光路複雜且不易校正並無法呈現即時速度；而在微觀粒子顯像測速儀中有：Santiago *et al.* (1998) 以汞燈為連續光源，輔以機械式遮斷器使其有如脈衝雷射一般，用數位相機擷取影像並以軟體做定量分析；Koutsiaris *et al.* (1999) 將微觀粒子顯像測速儀應用至充滿甘油之微毛細管中，以懸浮物當追蹤粒子模擬人體血管內紅血球之運動；Meinhart *et al.* (1999 & 2000) 更進一步使用雙脈衝雷射為光源，而使得可量測之流場流速更進一步發展至高流速流場，也進一步發展出一套新的相關函數統計方法分析所得之結果與實驗值比較。

綜觀國內發展微管流內流體之分析，大多屬數值計算或理論分析，少數之實驗量測則大多屬平均流體流速及微管流內之壁面壓力，並無法直接得知瞬時流速及流場分佈情形。以光學系統量測微粒子在微流體內之流速，主要有一維顯微式都卜勒測速儀以及微觀粒子顯像測速儀，將兩者做一比較可發現，後者不需在微小的儀器中校正雷射光源、沒有複雜的光學架構，且可取得即時的二維瞬時速度場，亦可快速的處理為平均流速場。而前者受限於光路過於複雜、雷射光在顯微鏡內校正之困難、且只為一維單點之量測，故本實驗室選擇以粒子顯像測速儀為基礎，發展一套新的微觀二維量測技術，使其適合微米級甚至次微米樣本的流場研究。而微粒子顯像測速儀未來將可進一步應用至微血管內流場之模擬量測、散熱之微管流、微小幫浦、噴墨頭...等流場。預期此研究成果將對 MEMS 中的微流場、生醫檢測以及微流體基礎發展有重要與實質的貢獻。

### 三、結果與討論

#### 3.1 微粒子顯像測速儀放大倍率之量測

在微觀粒子顯像測速儀中，放大倍率是一相當重要之參數，因為軟體所計算出之

流速為每單位時間內粒子在影像上所移動之像素數，因此在實際速度換算時放大倍率對實驗結果有著莫大之影響，故需清楚的知道，各種條件下所對應之放大倍率。影響放大倍率之因素除了顯微物鏡鏡頭之外，數位相機之鏡頭也有重要影響，而兩個倍率所疊加之倍率，才是整組系統之總放大倍率。為了將像素換算為實際流速更為方便，在此將放大倍率定義為：每單位像素所代表之實際尺寸為放大倍率 ( $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )，只要將軟體所計算出之流場之值乘上放大倍率便可得知實際流速。圖一中畫面為  $1024 \times 1024$  像素，而圖中之尺標，為一總長為  $1\text{mm}$  之尺規，尺規上有 10 格大刻度，每格大刻度中又有 10 格小刻度，所以每一刻度為  $0.01\text{mm}$ ，亦即為  $10\mu\text{m}$ ，而(a)~(c)為焦距為  $50\text{mm}$  之數位相機鏡頭，分別搭配微顯微鏡物鏡鏡頭之倍率為 10X、30X、60X 的結果。圖二為微鏡物鏡鏡頭 10X、30X、60X 搭配  $200\text{mm}$  數位相機鏡頭放大之結果。由實驗可知，將不同之數位相機鏡頭配合不同倍率之微顯微鏡物鏡，其搭配之放大倍率介於 1.67 至 0.08 間，而其可觀測的範圍則介於  $1.67\text{mm}$  至  $80\mu\text{m}$  間，故吾人可得到之觀測範圍可由巨觀尺度至微小尺度相當有彈性。

#### 3.2 微粒子顯像測速儀景深長度之量測

由於在微粒子顯像測速儀中採用全域照亮法，其量測厚度將取決於景深長度。圖三(a)為焦距為  $200\text{mm}$  之鏡頭搭配 10X 之顯微物鏡，而其中之(3)皆為粒子正好落於焦距之中，而(2)、(4)則為粒子落於焦距與失焦之界線中，而(1)、(5)則為完全失焦之情形，所以(2)~(4)之距離即為景深之長度，而亦即為量測面之厚度。圖三(b)為所量測之景深長度與利用光學原理所求得之景深長度做一比較，由理論中可知，放大倍率愈大之鏡組，其景深長度愈短，故可選擇之景深長度由  $20\mu\text{m}$  至  $1\mu\text{m}$ ，足可應付各種微流道之觀察。

#### 3.3 微粒子顯像測速儀穩定度之量測

在微觀之領域之中，因選擇之粒子之直

徑為微米等級，故將造成不可避免之布朗運動，其公式為：

$$\langle s^2 \rangle = 2D\Delta t$$

$$D = \frac{\kappa T}{3\pi\mu d_p}$$

其中： $s$  為粒子在介質中之自由擴散路徑

$D$  為粒子擴散系數

$\kappa$  為波茲曼常數

而將其換算為誤差百分比：

$$\Delta x = u\Delta t$$

$$\varepsilon_B = \frac{\langle s^2 \rangle^{1/2}}{\Delta x} = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}}$$

而將本次實驗之常數代入，誤差將近 15%，故如何將誤差減小，便成為一極大之問題，由於布朗運動是一種隨機、不可避免之運動，但在微流體中大多屬均勻流，故可以利用多次平均的方法、或將分析的格點加大，將誤差之值有效的減小。圖四是將兩道雷射的時間間距設定為 5ms，(a)~(c) 分析區域分別為  $32 \times 32$ 、 $64 \times 64$ 、 $128 \times 128$  像素，可以清楚的看出，當分析的區域愈小，則布朗運動的影響也愈顯著。由於流體之流況為穩定且有一致性，故定義一均方根誤差來估計其準確性：

$$Er_v = \frac{\sqrt{\langle V^2 \rangle}}{\bar{V}} \quad Er_U = \frac{\sqrt{\langle U^2 \rangle}}{\bar{U}}$$

由實驗結果可得知，當分析區域愈大，均方根值愈小，則布朗運動之效應將顯著的降低；而根據空間解析度的定義可知分析區域所代表之實際大小即為解析度，由此可知，當分析區域加大，將降低其空間解析度，但若欲有效的將布朗運動的影響減小，則又必需將分析區域加大，如此則成為一無法兩全之結果，故在此採取  $64 \times 64$  像素之分析區域。

#### 四、結論

本次之結果，可歸納為下列幾點：

- (1) 微粒子顯像測速儀觀測平面之厚度由實驗結果證實最少可至  $20 \mu m$ ，足以量測厚度至 0.1mm 之微流道。

- (2) 在有效的控制分析時間後，將實驗數值取平均，並將分析區域放大至  $64 \times 64$  像素，可將布朗運動所造成的誤差有效的降低。

- (3) 運用微觀粒子顯像測速儀於微流道可以發現：在三角形擋體、漸縮管以及轉角之實驗中，其流況與巨觀世界之理論、數值分析以及實驗結果皆相當之吻合，在極低雷諾數時流體流經擋體依然會發生停滯點以及因擋體外形而改變其流向，但不會發生高雷諾數所會發生之分離現象。

- (4) 在流經轉角之實驗中可知，流體在低雷諾數時，並不會發生由於壓力梯度的影響將大於慣性力，而使得在此壁面附近產生逆流區之情形，但角度略大時，即使流體為低雷諾數，也有可能發生逆流之情形。

#### 五、參考文獻

- Adrian, R.J., "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp. 261-304, 1991.
- Born, M., and Wolf, E., "Principles of optics", Pergamon Press, Oxford, 1980.
- Hammad, K. J., Otugen, M.V., and Arik, E.B., "A PIV study of laminar axisymmetric sudden expansion flow", Exp. Fluids, Vol. 26, pp. 266-272, 1999.
- Keane, R.D., and Adrian, R.J., "Optimization of particle image velocimeters Part I: Double pulsed systems", Meas. Sci. Tech. 1, pp. 1202-1215, 1990.
- Keane, R.D., Adrian, R.J., and Zhang, Y., "Super resolution particle imaging velocimetry", Meas. Sci. Tech., Vol. 6, pp. 754-768, 1995.
- Koutsiaris, A.G., Mathioulakis, D.S., and Tsangaris, S., "Microscope PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glasee capillaries", Meas. Sci. Technol., Vol. 10, pp. 1037-1046, 1999.
- Kuo, T.C., and Gui, L., "An evaluation on the sub-pixel analysis of particle image velocimetry", Nuclear science journal, Vol. 33, pp. 386-386, 1996.
- Meinhart, C.D., Wereley, S.T., and Santiago, J.G., "PIV measurements of a

micro-channel flow”, Exp. Fluid, Vol. 27, pp. 414-419, 1999.

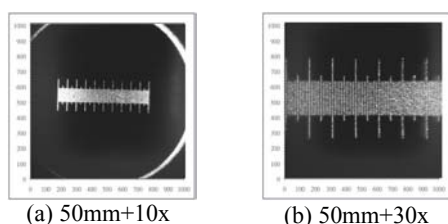
Meinhart, C.D., Wereley, S.T., and Santiago, J.G., “A PIV Algorithm for estimating time-averaged velocity fields”, J. of Fluids Eng., Vol. 122, pp. 285-289, 2000.

Meinhart, C.D., and Zhang, H., “The flow structure inside a micro-fabricated inkjet print-head”, J. of Micro-electromechanical Systems, Vol. 9, pp. 67-75, 2000..

Prasad, A.K., Adrian, R.J., and Offutt, P.W., “Effect of resolution on the speed and accuracy of particle image velocimetry interrogation”, Exp. Fluids, Vol. 13, pp. 105-116, 1992.

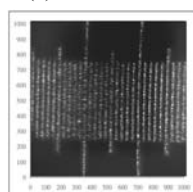
Santiago, J. G., Wereley, S. T., Meinhart, C.D., Beebe, D. J., and Adrian, R.J., “A micro particle image velocimetry system”, Exp. Fluids, Vol. 25, pp. 316-319, 1998.

## 六、附圖



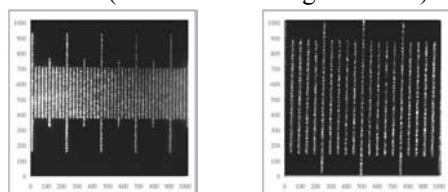
(a) 50mm+10x

(b) 50mm+30x



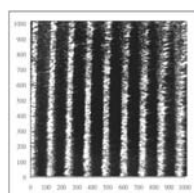
(c) 50mm+60x

圖一 微觀粒子顯像測速儀放大倍率  
(f-mount focal length=50mm)



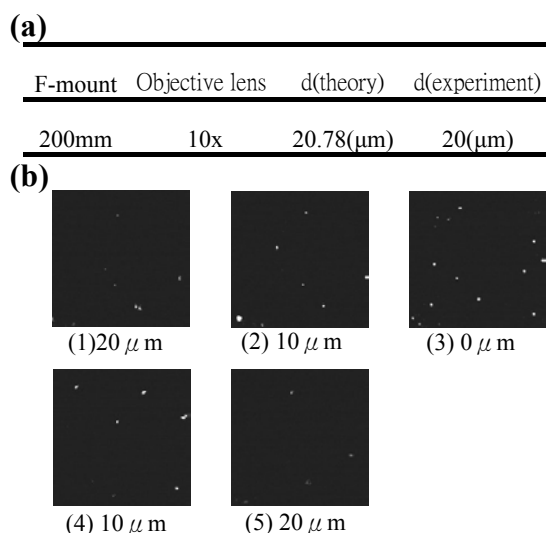
(a) 50mm+10x

(b) 50mm+30x

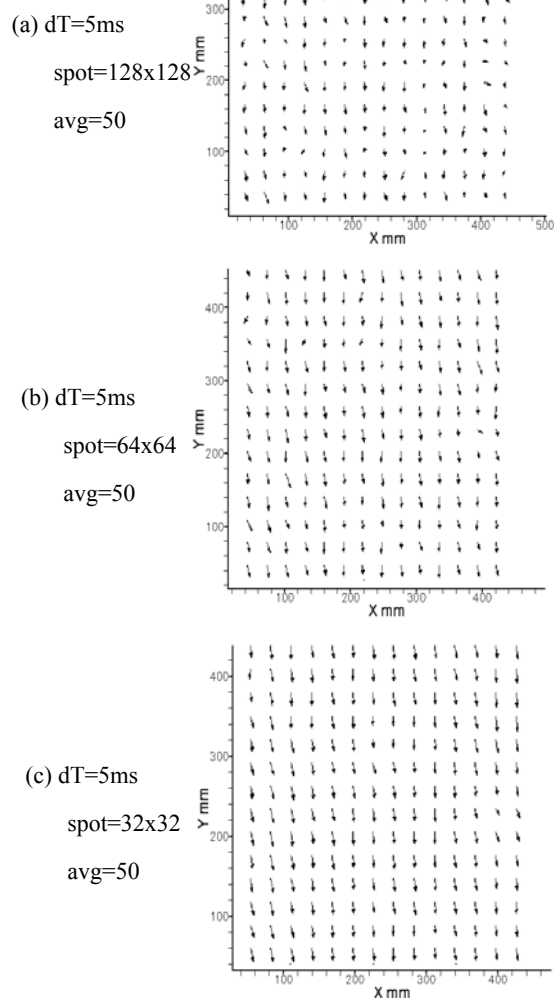


(c) 50mm+60x

圖二 微觀粒子顯像測速儀放大倍率  
(f-mount focal length=200mm)



圖三 全域照亮法下景深厚度



圖四分析區域大小不同之結果