

# 國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

$\mu$ -PIV 技術的發展及其在微流體研究上的應用

Development of a Micro Particle Image Velocimeter and Its  
Applications in Micro Fluidics

研究生：吳志輝

指導教授：吳宗信 博士

中華民國九十三年七月

μ-PIV 技術的發展及其在微流體研究上的應用

Development of a Micro Particle Image Velocimeter and Its  
Applications in Micro Fluidics

研究生：吳志輝

Student : Zhi-Hui Wu

指導教授：吳宗信 博士

Advisor : Dr. Jong-Shinn Wu

國立交通大學  
機械工程學系  
碩士論文



A Thesis

Submitted to Institute Department of Mechanical Engineering College of Engineering

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of science

In

Mechanical Engineering

July 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年七月

# $\mu$ -PIV 技術的發展及其在微流體研究上的應用

學生：吳志輝

指導教授：吳宗信 博士

國立交通大學機械工程研究所

## 摘要

本研究之主要目的便是發展一套可量測微流道內全域之瞬時流場的量測設備：微粒子顯像測速儀 (**Micro Particle Image Velocimeter**)。研究主要分兩階段，第一階段是將基礎粒子顯像測速儀(PIV)的功能延伸至微觀領域之中，建立一套微粒子顯像測速儀系統(Micro-PIV)，以量測微觀流場之瞬時流速、流場及其要之性質，第二階段在比較、驗證實驗設備量測之準確性，並應用於微流場的觀察與量測。研究的實驗方法，是利用粒子顯像測速儀加上顯微鏡物鏡鏡頭組(objective lens)，配合全域照亮法(volume illumination)將欲觀測之微流道全域照亮後，由顯微鏡物鏡鏡頭之景深長度(depth of focal length)控制觀測面之厚度(depth of measuring plane)，最後再利用軟體計算分析出其流場的狀況。

研究主要的討論可分為兩大部分，第一部分先討論所建立之微粒子顯像測速儀，其中包括：(1)量測加上顯微物鏡物鏡鏡頭後所得到的放大倍率及景深長度；(2)以微粒子顯像測速儀量測微觀流場、最佳化量測參數，並討論誤差之影響，驗證微粒子顯像測速儀之準確性。而第二部分本研究將針對各種微小流場進行觀察與量測，討論所得的結果，期望可以建立出 micro-PIV 量測之分析方法與步驟，並可以分析任何微小流場流體的速度向量分布，未來更希望能將 micro-PIV 量測系統應用在更多微流體流場的觀察與量測。

文章的內容主要分成四個章節，第一章除了介紹微粒子顯像測速儀的發展和相關研究外也說明了本研究的動機及目的。第二章則是細說本研究所使用的實驗方法及原理。第三章的內容是針對研究所得的結果做了一些討論，並在最後一個章節條列說明此研究未來的展望。

## 誌謝

在碩士求學的過程和做研究的期間，感謝吳宗信老師的指導和訓練，使學生了解要作一項研究必須要有多方面的事前準備、評估以及考量，並且要做多方向的思考、參考文獻資料、利用學術資源，才不會浪費太多時間在嘗試錯誤上。感謝吳老師竭盡心力的為學生籌措實驗研究上所需要的經費，並且讓學生可以接觸到 $\mu$ -PIV、高速攝影機、數位單眼相機等好的實驗設備，在研究進行上有好的設備使學生可以做出好的研究、準確的實驗以及洞察到實驗結果的許多現象。老師在研究中給了學生很多的啟發，討論時提供給學生許多的觀念和想法，當學生在遇到困難時候，引導了學生走向解決問題的正確方向，能夠成就這份研究成果，幕後的最大功臣非吳老師莫屬了。

感謝台大應力所沈弘俊老師和施兆瑄學長在建立實驗設備的初期能夠給予協助。感謝邵雲龍學長在微機電製程技術上全力的支援以及 Fortran 程式上的指導，多虧雲龍學長的幫忙，讓研究的進行能夠更加順利和快速。也要感謝俊賢、家棟、佳鴻等各位熱流組的同學們，在修課期間能夠一起討論課業，在課餘時間可以一起分享心情，也感謝實驗室裡所有的學長學姊學弟學妹們，能夠在不同的領域的學習與研究中互相交流，使我吸收到更多的知識和增廣見聞。最後要感謝家人和女友在碩士求學期間全力的支持，特別感謝父母讓我在生活上沒有後顧之憂，可以安心的求學。我想把這份榮耀獻給我敬愛的父母。

求學的階段要暫時告一段落了，很懷念這兩年的生活，感謝交大所給我的一切，在交大生活的點點滴滴會永遠烙印在我的心裡。在這裡我要獻上最真誠、最誠心的祝福，給在交大裡所有認識的學長姐、學弟妹、同學、朋友們：雲龍、祐霖、坤樟、又永、國賢、明諭、允民、欣芸、哲綱、俊賢、永彬、淵文、立軒、柏誠、東霖、妹吟、雅惠、梨暖、家棟、偉建、家鴻、好琪、佳鴻、慧真、柏霖、元祥、英銘、淵任、明煌……等。祝福大家在未來都能夠有美好的未來，有好的際遇和好的發展。並且能夠擁有自己喜歡的、自己想要的、幸福、快樂的生活！感謝大家，祝福你們，謝謝你們！

吳志輝 謹誌

九三年七月于交大

# 目錄

摘要 .....	II
誌謝 .....	III
表目錄 .....	VII
圖目錄 .....	VIII
符號說明 .....	XI
一、序論 .....	1
1.1 動機 .....	1
1.2 背景 .....	1
1.3 文獻回顧 .....	2
1.3.1 微流場數值分析 .....	2
1.3.2 $\mu$ -LDV .....	2
1.3.3 微流道顯影研究 .....	3
1.3.4 PIV .....	3
1.3.5 $\mu$ -PIV 的發展過程 .....	3
1.3.6 $\mu$ -LDV 和 $\mu$ -PIV 的比較 .....	4
1.3.7 $\mu$ -PIV 系統 .....	5
1.4 研究目的 .....	6
二、實驗方法 .....	7
2.1 實驗設備 .....	7
2.1.1 光學桌 .....	7
2.1.2 銑床位移平台 .....	7
2.1.3 x-y-z 位移平台 .....	7
2.1.4 注射幫浦 .....	7
2.1.5 固定微調雷射、電子耦合攝影機及雷射反射鏡的機構系統 .....	7
2.1.6 轉接環 .....	7
2.2 實驗儀器 .....	9
2.2.1 粒子顯像測速儀 .....	9
2.2.1.1 脈衝雷射 .....	9
2.2.1.2 電子耦合攝影機 .....	9

2.2.1.3	同步器 .....	9
2.2.1.4	高傳輸效率介面卡 .....	10
2.2.1.5	質點影像測速分析軟體 .....	10
2.2.1.6	個人電腦 .....	10
2.2.2	微粒子顯像測速儀 .....	10
2.2.3	顯微物鏡組 .....	10
2.2.3.1	數值光圈 .....	10
2.2.3.2	景深 .....	11
2.2.3.3	總景深 .....	12
2.2.3.4	繞射限制 .....	12
2.3	$\mu$ -PIV 系統的架構 .....	14
2.4	量測原理 .....	17
2.4.1	Auto-correlation .....	18
2.4.2	Cross-correlation .....	20
2.4.3	Hart Correlation .....	22
2.5	螢光粒子的選擇 .....	23
2.5.1	顯微物鏡的最小解析空間 .....	23
2.5.2	粒子的窒礙性 .....	23
2.5.3	粒子的終端速度 .....	23
2.5.4	布朗運動相對誤差 .....	24
2.6	流道分析 .....	25
<b>三、實驗結果及討論</b>	.....	<b>27</b>
3.1	量測參數 .....	27
3.2	鏡頭放大倍率及全域照亮法下景深之量測 .....	27
3.3	實驗設備的驗證 .....	37
3.4	微粒子顯像測速儀初步量測分析結果 .....	50
3.5	微粒子顯像測速儀應用於微流場量測分析 .....	54
3.5.1	蛇狀流道出口端的流場速度向量分佈 .....	55
3.5.2	V 型流道出口端的流場速度向量分佈 .....	59
3.5.3	4×4 圓柱矩陣流道的流場速度向量分佈 .....	62
3.5.4	噴嘴流道的流場速度向量分佈 .....	64
3.5.5	直流電場下陽離子交換樹脂附近的微小渦流 .....	68

四、未來展望.....	72
參考文獻.....	73



## 表目錄

表一 質點定位資料表.....	19
表二 質點相對位置資料表.....	20
表三 位移次數統計表.....	20



## 圖目錄

圖一 改良自螢光顯微鏡的 $\mu$ -PIV系統.....	5
圖二 實驗設置簡圖.....	14
圖三 電子耦合攝影機微調機構.....	15
圖四 顯微鏡頭與量測平面（未接觸）.....	15
圖五 顯微鏡頭與量測平面（接觸）.....	16
圖六 實驗設置實體圖.....	16
圖七 Auto-correlation 示意圖.....	19
圖八 質點定位.....	19
圖九 Hele-Shaw flow 在 XZ 平面上的解析解示意圖.....	26
圖十 Hele-Shaw flow 在 XY 平面上的解析解示意圖.....	26
圖十一 沒有螢光粒子時的 256 色灰階值.....	28
圖十二 景深平面位置在螢光粒子下 $15\ \mu\text{m}$ .....	28
圖十三 景深平面位置在螢光粒子下 $14\ \mu\text{m}$ .....	28
圖十四 景深平面位置在螢光粒子下 $13\ \mu\text{m}$ .....	29
圖十五 景深平面位置在螢光粒子下 $12\ \mu\text{m}$ .....	29
圖十六 景深平面位置在螢光粒子下 $11\ \mu\text{m}$ .....	29
圖十七 景深平面位置在螢光粒子下 $10\ \mu\text{m}$ .....	30
圖十八 景深平面位置在螢光粒子下 $9\ \mu\text{m}$ .....	30
圖十九 景深平面位置在螢光粒子下 $8\ \mu\text{m}$ .....	30
圖二十 景深平面位置在螢光粒子下 $7\ \mu\text{m}$ .....	31
圖二十一 景深平面位置在螢光粒子下 $6\ \mu\text{m}$ .....	31
圖二十二 景深平面位置在螢光粒子下 $5\ \mu\text{m}$ .....	31
圖二十三 景深平面位置在螢光粒子下 $4\ \mu\text{m}$ .....	32
圖二十四 景深平面位置在螢光粒子下 $3\ \mu\text{m}$ .....	32
圖二十五 景深平面位置在螢光粒子下 $2\ \mu\text{m}$ .....	32
圖二十六 景深平面位置在螢光粒子下 $1\ \mu\text{m}$ .....	33
圖二十七 螢光粒子位置在景深平面上.....	33
圖二十八 景深平面位置在螢光粒子上 $1\ \mu\text{m}$ .....	33
圖二十九 景深平面位置在螢光粒子上 $2\ \mu\text{m}$ .....	34
圖三十 景深平面位置在螢光粒子上 $3\ \mu\text{m}$ .....	34

圖三十一	景深平面位置在螢光粒子上 $4\mu\text{m}$ .....	34
圖三十二	景深平面位置在螢光粒子上 $5\mu\text{m}$ .....	35
圖三十三	景深平面位置在螢光粒子上 $6\mu\text{m}$ .....	35
圖三十四	景深平面位置在螢光粒子上 $7\mu\text{m}$ .....	35
圖三十五	景深平面位置在螢光粒子上 $8\mu\text{m}$ .....	36
圖三十六	景深平面位置在螢光粒子上 $9\mu\text{m}$ .....	36
圖三十七	景深平面位置在螢光粒子上 $10\mu\text{m}$ .....	36
圖三十八	Re=0.1694 時 Interrogation spot size 為 $64\times 64$ 的分析結果.....	38
圖三十九	Re=0.1694 時 Interrogation spot size 為 $32\times 32$ 的分析結果.....	38
圖四十	Re=0.1694 時 Interrogation spot size 為 $16\times 16$ 的分析結果.....	39
圖四十一	Re=0.1694 時的綜整分析結果.....	39
圖四十二	Re=0.3387 時 Interrogation spot size 為 $64\times 64$ 的分析結果.....	40
圖四十三	Re=0.3387 時 Interrogation spot size 為 $32\times 32$ 的分析結果.....	40
圖四十四	Re=0.3387 時 Interrogation spot size 為 $16\times 16$ 的分析結果.....	41
圖四十五	Re=0.3387 時的綜整分析結果.....	41
圖四十六	Re=0.6774 時 Interrogation spot size 為 $64\times 64$ 的分析結果.....	42
圖四十七	Re=0.6774 時 Interrogation spot size 為 $32\times 32$ 的分析結果.....	42
圖四十八	Re=0.6774 時 Interrogation spot size 為 $16\times 16$ 的分析結果.....	43
圖四十九	Re=0.6774 時的綜整分析結果.....	43
圖五十	Re=0.0932 時 Interrogation spot size 為 $32\times 32$ 的分析結果.....	44
圖五十一	Re=0.0932 時 Interrogation spot size 為 $16\times 16$ 的分析結果.....	44
圖五十二	GLASS-PDMS 流道不同深度下的速度向量分布情形(XZ 平面).....	45
圖五十三	GLASS-PDMS 流道不同深度下的速度分布情形(XY 平面).....	45
圖五十四	(a)親水性及(b)厭水性表面速度向量分布情形.....	46
圖五十五	PDMS-PDMS 流道不同深度下的速度分布情形(XZ 平面).....	48
圖五十六	PDMS-PDMS 流道不同深度下的速度分布情形(XY 平面).....	48
圖五十七	$\mu$ -PIV 系統 CCD 受損後所拍攝的影像.....	49
圖五十八	簡易流道 (受氣泡阻塞) .....	51
圖五十九	簡易流道 (受氣泡阻塞) 速度向量分佈圖.....	51
圖六十	簡易流道 (未受氣泡阻塞) .....	52
圖六十一	簡易流道 (未受氣泡阻塞) 速度向量分佈圖.....	52
圖六十二	噴嘴流道.....	53

圖六十三 噴嘴流道速度向量分布圖.....	53
圖六十四 蛇狀流道的示意圖.....	55
圖六十五 蛇狀流道出口端的 $\mu$ -PIV 影像圖.....	56
圖六十六 蛇狀流道出口端的 $\mu$ -PIV 分析結果.....	56
圖六十七 提高解析度後蛇狀流道出口端的 $\mu$ -PIV 分析結果.....	57
圖六十八 蛇狀流道出口端的流線圖.....	58
圖六十九 蛇狀流道出口端的渦度圖.....	58
圖七十 V 型流道的示意圖.....	59
圖七十一 V 型流道出口端的 $\mu$ -PIV 影像圖.....	60
圖七十二 V 型流道出口端的 $\mu$ -PIV 分析結果.....	60
圖七十三 提高解析度後 V 型流道出口端的 $\mu$ -PIV 分析結果.....	61
圖七十四 4x4 圓柱矩陣流道的 $\mu$ -PIV 影像圖.....	62
圖七十五 4x4 圓柱矩陣流道的 $\mu$ -PIV 分析結果.....	63
圖七十六 噴嘴流道的 $\mu$ -PIV 影像圖.....	64
圖七十七 噴嘴流道的 $\mu$ -PIV 分析結果.....	65
圖七十八 提高解析度後噴嘴流道的 $\mu$ -PIV 分析結果.....	66
圖七十九 噴嘴流道速度向量分佈情形.....	67
圖八十 噴嘴流道在 X 方向上 U 分量的速度向量分佈情形.....	67
圖八十一 流道上視圖及陽離子交換樹脂的擺放位置.....	68
圖八十二 流道的立體圖及陽離子交換樹脂的擺放位置.....	69
圖八十三 陽離子交換樹脂周圍的微小渦流.....	69
圖八十四 陽離子交換樹脂周圍的 $\mu$ -PIV 影像圖.....	70
圖八十五 陽離子交換樹脂周圍微小渦流的 $\mu$ -PIV 分析結果.....	71

## 符號說明

- $n$  觀測物與顯微物鏡間介值的折射率 (空氣中  $n=1$ )
- $\lambda$  成像光線的波長
- N.A. 數值光圈
- M 放大倍率
- $e$  可解析的最小位移
- $\delta_z$  量測平面厚度 (景深)
- $\delta z_m$  總景深
- $\theta$  顯微物鏡鏡頭對光線收集角錐之角度半徑(angular radius)
- $d_p$  粒子直徑
- $ds$  散射半徑函數(diameter of the point spread function)
- $d_e$  粒子半徑之影響(effective particle diameter)
- $\delta x$  量測之不確定距離



# 一、序論

## 1.1 動機

在過去幾年中，微機電技術（Microelectro-mechanical technology）發展迅速，其製程技術大幅的進步與發展，使人類幾乎可以任憑想像製造出所需要的微小結構。將結構微小化後，許多微觀下的物理特性將和以往所認知的有所不同，如高散熱之效率(high dissipation rate)、降低體積與面積之比(Volume-to-surface arearatio)、表面張力(surface tension)效應等。也因為微機電系統 (MEMS, Micro-Electro-Mechanical-Systems)所發展出來的微細精密製造方法，使得微流體元件的製造可以輕鬆達到微米甚至次微米的尺度。隨著此項技術的發展，現在利用利用光蝕刻微影（Photo-lithography）、X光深刻模造（LIGA）、微放電加工和離子束加工（Focused Ion Beam）等方法均可以製造出我們所想要的微型結構，如：微型感測器(Micro-sencer)、微小閥門(Micro-valves)、微動力裝置(Micro-propulsion system)、微幫浦(Micro pump)等，來構成具有一定功能的微流體系統（micro fluidics），並可以應用於生物醫學、電子工業、機械工業、航太工業、民生工業與國防工業等領域。微機電系統是一個跨領域的技術整合系統，因此必須結合機械、電子、材料、控制、物理、生醫、化學、光學等多重技術整合的研發領域，其特色為兼具微小化、可量產之新製造技術，不僅可有效協助製造業改善製程，使產品提高品質、性能與可靠度，進而提高附加價值，同時可降低製造成本及能源消耗；因而成為目前科技界人士公認為最具未來發展潛力及前瞻性的研究領域。而微流體系統也為其中重要的一環。但由於在微小流場下，流體特性不易量測，因此微流體系統發展十餘年至今仍有許多的研究發展空間。在微流體系統中，許多的流體物理特性和機械性質也與巨觀的世界不同，例如：在微小尺寸下的流體，表面張力及黏滯力的作用遠大於重力效應（body force）；此外，尺寸效應（Scaling Effects）對於微觀下流體運動的影響尤其顯著。由於微小化的特性帶來了許多已知與未知的優點，所以預期微流體系統在未來也將不斷的成長與進步，最終的目標將是整合所有功能於一的實驗室晶片（lab on a chip, LOC）或微全分析系統（micro total analysis system,  $\mu$ TAS）。而在這之前，必定需要能將微流場做一分析探討，以掌握在微小流域中流體的特性，因此本研究將決定以微流體作為研究重點，以微粒子顯像測速儀作為流場觀察量測的首選工具。

## 1.2 背景

在微流道研究微流體現象的研究中，一般而言流道的寬度大約在  $200\mu\text{m}$  上下，深度約  $45\mu\text{m}$ ，流速約在  $10\text{mm/s}$  的範圍左右，所使用的流體多半為水，將這些參數帶入諾

數的公式做計算，所對應到的雷諾數約為 0.7316。

$$\text{Re} = \frac{\rho VD}{\mu} \quad (1-1)$$

也就是說在微系統中，因為流速很慢，尺寸小，導致雷諾數很小的情形下，流體會以層流的方式流動。而在微小尺寸下的流體，表面張力及黏滯力的作用遠大於重力效應 (body force)。而影響表面張力最主要的物體表面特性為親水性或疏水性。親水性或疏水性的區分主要在於流體與固體表面的接觸角。當接觸角  $< 90^\circ$  時稱為親水性，當接觸角  $> 90^\circ$  時則稱為疏水性。而親水性或疏水性材料的流道，在流體靠近流道表面的部分將會有不同的特性產生。整體來說，尺寸效應 (Scaling Effects) 對於微觀下流體運動的影響最為顯著，這也是造成微觀與巨觀流場差異的主要原因。本研究的重點主要在於微觀流場，而尺寸效應的影響還不至於使研究的流場悖離傳統的 N-S 方程式，因此 N-S 方程式將為研究進行中的參考依據。

### 1.3 文獻回顧

在開始本論文主題前，先針對前人對微流道之研究與量測的文獻做些回顧，包括過去對微流道系統所做的實驗或數值分析，雷射都卜勒測速儀、粒子顯像測速儀的介紹，以及前人所發展出用來量測微流道流場的方法和微觀粒子顯像測速儀的發展過程來加以討論。

#### 1.3.1 微流場數值分析

目前在微流體之研究中，大部分屬數值計算方面之研究，與實驗量測有關的研究仍占少數，美國的 Phahler et al.(1990)曾利用壓降的方式量測微管流，以理論預測尺寸小於  $0.8 \mu\text{m}$  以下時，流體的性質將會悖離傳統 N-S 方程式；Flockhart et al.在 1996 年，以理論與數值分析方式做過微流體流速外型的研究。除此之外，在微管流方面的研究大多數仍屬單點方面的研究，也就是至今微管場之研究並沒有建立一系列的尺寸數據以供趨勢分析。

#### 1.3.2 $\mu$ -LDV

至於量測流速方面，首先介紹雷射都卜勒測速儀(Laser-Doppler Velocimetry, LDV)，其量測原理是將兩道雷射光導入帶有粒子之流場，兩道雷射相交產生干涉條紋成為一

橢圓球狀的量測體積(Measuring volume)，當流場中之粒子通過此一量測體積時，散射出來的雷射光將產生都卜勒偏移(Doppler shift)，粒子速度不同時，散射光頻率將發生變化，其變化與粒子速度成一函數相關，藉由收集微粒散射光所產生之訊號，進而求出粒子移動的速度及方向。當粒子對流場的跟隨性良好時，即代表流體流動之速度，進而量得瞬時流速。於微觀都卜勒測速儀的研究有：Michian 在 1976 年，用來量測管徑約 70  $\mu\text{m}$  之青蛙活體微血管血流分佈，而 Dopheide 等人在 1990 年提出，以脈衝雷射做多維量測。在國內則有莊漢聲和羅裕龍在 1999 年發展出一維微觀都卜勒測速儀，不過此系統光路複雜且不易校正及無法呈現即時速度。所以本研究利用基礎粒子顯像測速儀，改善上述之缺點，進而發展出一套更簡便且準確度更高之微粒子顯像測速儀。

### 1.3.3 微流道顯影研究

在微流道顯影研究方面，Brody et al.於 1996 年在  $11\times 72(\mu\text{m})$ 微管流內放置追蹤粒子，利用數位相機連續曝光，使追蹤粒子的影像如同煙線般被攝影下來，但此方法由於間隔時間上的難以確定，以及粒子移動路徑過大，無法精確的得知其位移量，故只知道流場之大致情況，還是難以做定量分析。Lanzilloto et al.在 1997 年，使用 1-20  $\mu\text{m}$  感光乳劑，以 X 光使 500~1000  $\mu\text{m}$  微毛細管顯像，來計算微毛細管內之平均流速，這個方法的優點為不需外加鏡組，但由於感光乳劑尺寸相對於微毛細管而言太過於龐大，而且感光乳劑在流場中會變形與擴散，故是否會真實的反應流場之情況則難以確定，所得到的結果亦只是平均流速，並無法做有效的細部定量之分析。

### 1.3.4 PIV

粒子顯像測速儀 (PIV) 在巨觀流場中定量分析的準確性及穩定度亦皆已為眾實驗人員所肯定，近年因雷射發展的進步，更進一步使用雙脈衝 (double pulse) 雷射為粒子顯像測速儀的光源，其量測方法是在流場中放入追蹤粒子，使兩道雷射光源在設定的時間間隔先後射出，並分別在兩張底片上顯影，再將此組相片分割成數個分析區域 (interrogation spot)，對各個分析區域中的粒子以相關函數 (cross-correlation function) 之統計方法，分析其粒子之位移量，再除以兩脈衝雷射之間的已知間隔時間及換算鏡組之放大倍率，即可得到流場之流速 (Meinhart et al., 1993)。

### 1.3.5 $\mu$ -PIV 的發展過程

在微觀粒子顯像測速儀的發展過程中：Santiago et al.在 1998 年以汞燈之連續光源，輔以機械式遮斷器，使其有如脈衝雷射一般，縮短單張顯像影片之曝光時間，使其取像

時間更趨近瞬時影像，並植入  $0.1\sim 0.3\ \mu\text{m}$  之螢光粒子，將微管流利用顯微鏡鏡頭放大，再使用數位相機顯像，使用軟體以交錯相關函數法做定量分析，佐以分析簡單之微流場現象，來證實微觀粒子顯像測速儀的實用性。Koutsiaris et al. 在 1999 年將微觀粒子顯像測速儀應用在充滿甘油的微毛細管中，放入懸浮物當追蹤粒子，來模擬人體血管內紅血球之運動，並預期微觀粒子顯像測速儀在生醫檢測方面之發展潛力。Meinhart et al. 分別在 1999 年及 2000 年，更進一步使用雙脈衝雷射為光源，因為每道雷射的脈衝時間區段(Pulse Duration Time)極短，只有數個奈秒，且兩道雷射觸發之時間差(Pulse Separation Time)可以精準的掌控，其時間差可以小到微秒以下，這個方法可用來量測較高流速的流場，並以全域照亮的方法，利用其景深來控制二維量測，並與實驗值相比較，進一步發展出一套新的相關函數統計方法，應用於量測噴墨頭噴墨過程中之流速，分析其流場分佈之情形。

### 1.3.6 $\mu$ -LDV 和 $\mu$ -PIV 的比較

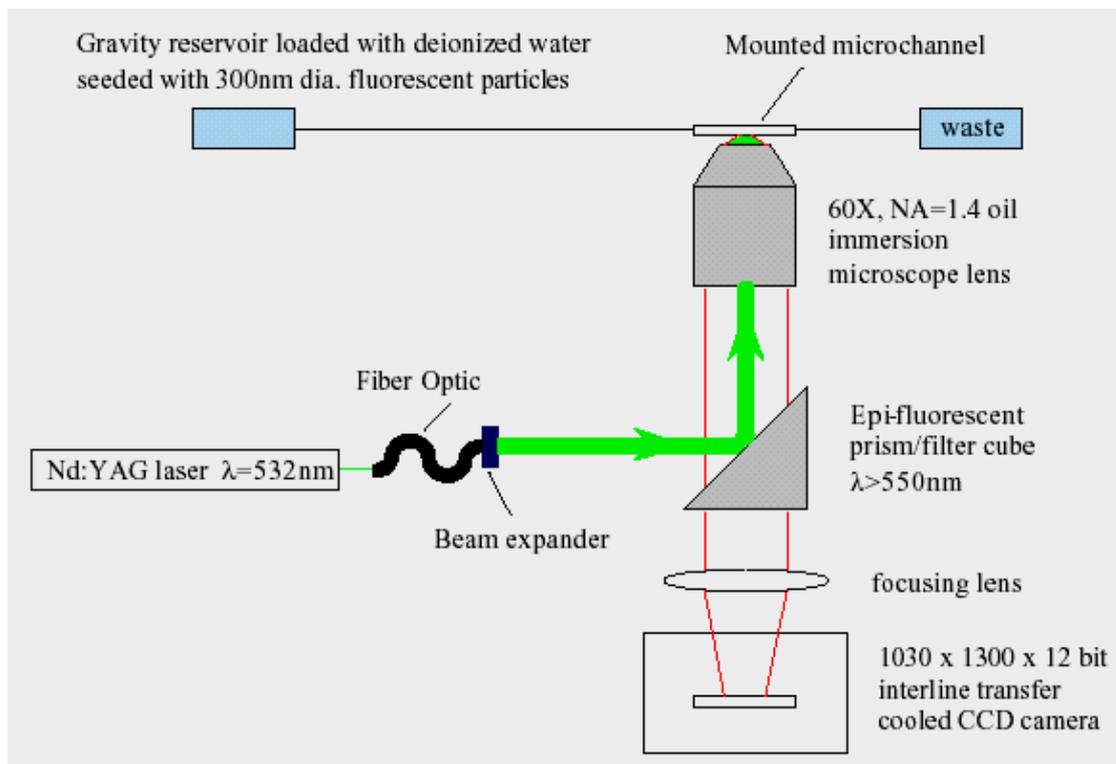
以雷射為主的光學量測系統中，以都卜勒測速儀(Laser Doppler Velocimetry, LDV)及粒子顯像測速儀(Particle Image Velocimetry, PIV)最為廣泛應用，也有最完善的理論及實驗結果。由於它具有高精確性和高靈敏度，且不需接觸量測物體的特性，長時間的發展中，量測方法經不斷的實驗以及改良，在傳統巨觀流場的應用上已趨近完善，發展也趨近成熟。不過只在於巨觀流場，於微觀世界中，尚未有一套完善的系統，可用於量測微流場流體的各種性質，故相信在此之中還有相當大的發展空間。近年來為因應微機電系統的發展及研究，更進一步將傳統的雷射量測方法發展至微觀系統。改良基礎雷射都卜勒測速儀(Laser Doppler Velocimetry, LDV)及粒子顯像測速儀後，量測微粒子在微流體內之流速的量測系統則有一維顯微式都卜勒測速儀以及微粒子顯像測速儀兩種，將一維顯微式都卜勒測速儀與微粒子顯像測速儀做一比較可發現，微粒子顯像測速儀具有以下優點：

- (1) 沒有複雜的光學架構。
- (2) 不需在微小的儀器中校正雷射光源。
- (3) 本身即是二維系統，不需掃描整個平面。
- (4) 所得的速度即是即時速度，亦可處理為平均流速。

一維顯微式都卜勒測速儀受限於光路過於複雜、雷射光在顯微鏡內校正之困難、且一維量測及只為一點之量測等問題，故本研究選擇以傳統粒子顯像測速儀來發展成為微粒子顯像測速儀。

### 1.3.7 $\mu$ -PIV 系統

整套  $\mu$ -PIV 系統發展至今可以說是相當的完備，而現在的  $\mu$ -PIV 系統大體上還可以區分成兩大類。其中一類是根據螢光顯微鏡系統所架構起來，直接將原本顯微鏡的光源改成脈衝雷射，原本的 CCD 換裝成  $\mu$ -PIV 系統所使用的 CCD，成為  $\mu$ -PIV 系統，這種  $\mu$ -PIV 系統的設置圖如下頁圖一所示。



圖一 改良自螢光顯微鏡的  $\mu$ -PIV 系統

而另一種系統則是改良基礎 PIV 系統而成的  $\mu$ -PIV 系統，比起前一套系統，自基礎 PIV 改來而來的  $\mu$ -PIV 系統，在價位上比較低些，在裝置上只需將鏡頭換裝成顯為物鏡，而且光源不需通過顯為物鏡，不用擔心高能量的雷射會將鏡頭打壞。因此在鏡頭選擇上有較大的空間，不必選擇價格高昂的雷射專用顯微鏡頭。另外，系統的架設完全可以所需的功能或拍攝的方式自行設計架設，在應用上具有較大的彈性和空間。基於上述的考量，本研究決定以 PIV 系統為基礎，在其架構之上，發展一套  $\mu$ -PIV 系統，用以作為微流場的觀察與量測。

#### 1.4 研究目的

本研究的研究初期在利用本實驗室已購置之 PIV 系統，擴充建立一套具高解析度的 micro-PIV 量測系統，並測試所有量測參數（包括：雷射光強度、螢光粒子的大小、濃度、適當的放大倍率、景深厚度等。）使量測結果可以達到最好。接著在簡單微通道 (microchannel) 上進行量測，結果將與 Hele-Shaw flow 的解析解做比較，以驗證 micro-PIV 系統量測的正確性。待成功的建立 micro-PIV 量測系統後，再將 micro-PIV 量測系統應用至蛇狀流道出口端、V 型流道出口端、4x4 圓柱矩陣流道、微小噴嘴流道以及直流電場下陽離子交換樹脂附近的微小渦流流場，進行速度向量分佈情形的分析與量測，最後期望可以建立出 micro-PIV 量測之步驟與分析方法，未來更希望能將 micro-PIV 量測系統應用至其他微流體流場的觀察與量測。期待可以成功的量測及分析各種不同狀況下，微流體流場的速度向量分佈情形。



## 二、實驗方法

### 2.1 實驗設備

#### 2.1.1 光學桌

本研究所有實驗設備均架設在 6 英尺x2 英尺的光學桌上，其上的陣列螺絲孔，孔與孔之間的距離皆為一英寸。

#### 2.1.2 銑床位移平台

利用銑床之 x-y-z 位移平台，來作為整個系統的基座，雖然無須使用其具有 x-y-z 微調位移的功能，不過此位移平台具有 300kg~400kg 的重量，可以抑制自外界而來的震動，使系統不易受外界震動所影響。

#### 2.1.3 x-y-z 位移平台

自行加工製作一平台於 x,y,z 位移平台上，並以千分表（精度可至 1 $\mu$ m）校正平台與位移軸的水平度。此位移平台之 x、y、z 方向總位移皆為 15mm，而其最小刻度值在 x 與 y 軸都是 10 $\mu$ m，z 軸經換裝較高精度之分厘卡頭後其最高精度可以達到 0.5 $\mu$ m，如此便可以利用此位移平台來改變微流道之位置，量測分析平面的景深厚度，進而改變觀測區域以及觀測之平面位置，以達到實驗之需求。

#### 2.1.4 注射幫浦（KDS250）

微流場的壓力來源，用以驅動流體前進。其推進之最小流量為 0.001  $\mu$ l/hr；最大流量為 21 ml/min；可固定注射筒尺寸 10  $\mu$ l-10 ml，可以配合實驗做適當流量的調整。

#### 2.1.5 固定微調雷射、電子耦合攝影機及雷射反射鏡的機構系統

在計算過光路位置後，自行設計製作一套機構來固定雷射、電子耦合攝影機及雷射反射鏡，此機構可以微調雷射光路，使其可以正確將兩道雷射光束引入在所要分析的微流道進行全域照亮，並可將電子耦合攝影機以兩個自由度的旋轉，微調連接於其上的顯微鏡頭，使顯微鏡頭的平面與變觀測區域平面兩者間有良好的平行度。

#### 2.1.6 轉接環

為了將顯微物鏡與電子耦合攝影機之間做一連接，因此自行設計製造一轉接環來連接顯微物鏡與電子耦合攝影機，而由幾何光學可知：

$$\frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} = \frac{1}{f} \quad (2-1)$$

$$M = \frac{f_2}{f_1} \quad (2-2)$$

公式 (2-1) 及 (2-2) 中  $f$  為鏡頭焦距， $f_1$  代表物距  $f_2$  代表像距， $M$  則為鏡頭的放大倍率。而物距的部分可藉由  $x,y,z$  位移平台的  $z$  軸來調整至適當位置，所以在設計轉接環時，特別加入可以調整像距的功能，因此整個系統的放大倍率也可以做調整。此設計的用意在於可依流場形式來調整放大倍率，而且稍後會提到，提高  $M$  值將有助於縮小景深，使分析區域更趨近於二維流場。



## 2.2 實驗儀器

### 2.2.1 粒子顯像測速儀 (PIV)

本實驗之粒子顯像測速儀為 TSI 公司所出產，基礎粒子顯像測速儀主要包括：一具雙脈衝雷射、CCD Camera、同步器、電腦和分析軟體等，以下將針對各個部分做一簡單介紹：

#### 2.2.1.1 脈衝雷射 (MINI DUAL Nd-YAG LASER / Y50-15)

此雙脈衝式 Nd (NEODYMIUM) -YAG 雷射為基礎 PIV 設備所擁有，雷射的波長為 532nm (綠光)，雷射最高脈衝頻率為 15Hz，兩管脈衝雷射 YAG1 及 YAG2 搭配上 Q-Switch 可將雷射功率累積至 YAG1 最大 0.79 Watts；YAG2 最大 0.8 Watts (雷射頻率=15Hz 所做之測試)，最大功率產生時 Q-Switch 的延遲時間為 190 $\mu$ s。將最大功率除以雷射頻率後，YAG1 及 YAG2 每個脈衝的最大能量分別為 52.67mJ 及 53.33mJ。另外也因為 Q-Switch 的技術，使得經過 Q-Switch 後，雷射的作用時間可以短至 5-7ns，如此短的作用時間使拍攝到的影像更趨近於靜止影像。而雷射光的光束直徑約 3.75mm，只要將光路稍加對準後，用以作為照亮幾百微米的微小流場可使說是綽綽有餘。

#### 2.2.1.2 電子耦合攝影機 (CCD Camera / PIVCAM 10-30)

一樣為基礎粒子顯像測速儀所擁有的設備，CCD 可感光的 pixels 數為 1008 (H)  $\times$  1018 (V)，實際尺寸約為 9.07mm $\times$ 9.16mm。每秒最多可擷取 15 對影像，每對影像的最小間格可小至 0.3 $\mu$ s，如此短的時間間隔甚至可應用於超音速流場。相對於微觀流場，雖然顯微物鏡會放大粒子在 interrogation spot 的位移，不過一般微流場的速度場大約都在 10mm/s 的範圍左右，所以這樣短的時間間隔用於微流場的量測可以說是過之而無不及。

#### 2.2.1.3 同步器(synchronizer)

基礎 PIV 系統中，同步控制裝置(synchronizer)的功能為同步觸發(trigger)雷射與數位相機(CCD Camera)的快門，並控制數位相機快門的曝光時間、脈衝雷射之頻率及影像的擷取處理與傳輸技術，使各項儀器能夠達到同步控制的效果。使其能達到將雷射光在指定的時間差上，照射在電子耦合攝影機的兩張影像上，並將流場的影像以數位化輸出，經由影像擷取卡將資料存入電腦之中。

#### 2.2.1.4 高傳輸效率介面卡

基礎 PIV 系統中，用以將數位相機所擷取的數位化影像畫面，傳輸至電腦中進行分析與儲存。其傳輸速度最高可達 90MBytes/sec。

#### 2.2.1.5 質點影像測速分析軟體

為 TSI 公司所發展的 Insight Version V3.26 視窗軟體，可控制硬體設備及分析所得到之影像資料。於硬體設備控制方面可以設定脈衝雷射光之 Q-Switch 的延遲時間、電子耦合攝影機快門的曝光時間及兩道雷射的時間間隔，然後透過同步器發送訊號以進行系統運作及影像擷取。在軟體分析上對於所擷取之影像質點以互相關函數(cross-correlation function)，計算流場中每個 interrogation spot 的速度向量。

#### 2.2.1.6 個人電腦

為處理 PIV 系統所產生的大量影像資料，連接至 PIV 系統的電腦中央處理器為 Pentium4 1.8G，具有 1G 的記憶體容量。除了可以快速的運算處理資料外，其優異的性能更可即時分析影像資料於系統之中，可以一邊拍攝流場的同時，馬上看到速度向量的分析結果及整個流場的速度向量分佈情形。

#### 2.2.2 微粒子顯像測速儀 ( $\mu$ -PIV)

本實驗之微粒子顯像測速儀是從 TSI 公司所出產的基礎粒子顯像測速儀所延伸而來，為了使其可以應用到微流場量測，便以粒子顯像測速儀為基礎，在電子耦合攝影機前加上一組顯微物鏡鏡頭，組成微粒子顯像測速儀。而本研究的初期，就是整合基礎的粒子顯像測速儀系統，設計、製造及架設所有細節，建立微粒子顯像測速儀。

#### 2.2.3 顯微物鏡組 (Mitutoyo M PLANE APO SL 100X)

在本實驗主要是將粒子顯像測速儀應用至微流道，故其最基本之想法，即是將傳統之粒子顯像測速儀加上顯微物鏡鏡頭，而形成微粒子顯像測速儀，故顯微物鏡鏡組之影響相當大；而對顯微鏡物鏡而言，大致上有幾個重要之參數：數值光圈(Numerical Aperture, N.A.)、放大倍率 M、景深、總景深以及繞射限制，以下將對這些參數做一簡單介紹。

##### 2.2.3.1 數值光圈 (N.A.)

對傳統之粒子顯像測速儀而言，最常用的重要參數為 f-number，其定義為焦距光圈

比，可寫成下列公式：

$$\text{光圈值 (f-number)} = \text{鏡頭焦距} / \text{光圈口徑} \quad (2-3)$$

以一支 50mm 的鏡頭為例，若它的最大光圈口徑是 36mm，鏡頭的最大光圈值 (f-number) 便等於  $50 / 36 = 1.4$ ，一般表示為 f/1.4 (代表 f-number=1.4)。光圈值是以 f-number 來表示，f-number 愈小光圈口徑便愈大，反之亦然。不過，在顯微鏡學中，物體之距離和光圈之大小大約為同一個等級(order)，所以定義顯微鏡物鏡之重要參數為數值光圈 (N.A.)

$$N.A. \equiv n \sin \theta \quad (2-4)$$

其中：n 為物體和顯微物鏡鏡頭間介質之折射率， $\theta$  為顯微物鏡鏡頭對光線收集角錐之角度半徑(angular radius)。如果對介質是空氣(n=1)來說，則鏡頭與物體之距離將遠大於顯微物鏡之光圈半徑，而  $\sin \theta$  也將趨近於  $\tan \theta$ 。如此，可以將 N.A. 用 f-number 表示為：


$$N.A. = (2 \cdot \text{f-number})^{-1} \quad (2-5)$$

這重要參數將影響微粒子顯像測速儀之景深(depth of field)以及微粒子顯像測速儀之繞射限制(diffraction-limited)等，故在開始量測之前，需將這些參數記錄下來。

### 2.2.3.2 景深(depth of field)

根據 Inoue and Spring (1997)，在標準之顯微物鏡之下，景深公式為：

$$\delta z = \frac{n\lambda}{(N.A.)^2} + \frac{ne}{(N.A.) \cdot M} \quad (2-6)$$

(2-6) 中 e 為可解析的最小位移，在本實驗中，電子耦合攝影機的 CCD 的尺寸大小約為 9mm×9mm，而其 pixels 數為 1008 (H) ×1018 (V)，若鏡頭放大倍率為 M，則可解析的最小位移 e 約為：

$$e = \frac{P_s}{M} \quad (2-7)$$

(2-7) 中  $P_s$  代表 CCD 中一個 pixel 的大小，將上式帶回 (2-6)，則 (2-6) 可改寫為：

$$\delta z = \frac{n\lambda}{(N.A.)^2} + \frac{nP_s}{(N.A.) \cdot M^2} \quad (2-8)$$

根據 (2-8)， $N.A.$  與  $M$  將對量測平面之厚度將有著顯著之影響，亦即如果提高  $N.A.$  或是  $M$ ，將可以縮小景深，使量測之平面更接近二維流場。

### 2.2.3.3 總景深

在計算量測平面的景深厚度時，除了上下景深外，必須加入粒子直徑的影響，這樣計算出來的景深才為整個量測平面的總景深。C D Meinhart, S T Wereley and M H B Gray (2000) 整理出一套計算總景深的公式：



$$\delta z_m = \frac{3n\lambda}{N.A.^2} + \frac{2.16d_p}{\tan \theta} + d_p \quad (2-9)$$

已經知道景深公式 (2-8) 中，提高  $N.A.$  或是  $M$ ，將使得景深減小。再進一步由總景深公式 (2-9) 可知，較小的粒子直徑和較大的  $\theta$  也對景深的縮小有所幫助。

### 2.2.3.4 繞射限制(diffraction-limited)

所有的光學分析都將有著一基本限制：繞射限制。對放大倍率大於 1，亦即此系統為放大系統，根據 Born and Wolf(1997)其繞射限制為：

$$d_s = 2.44M \frac{\lambda}{2N.A.} \quad (2-10)$$

其中： $d_s$  為繞射限制之散射半徑函數(diameter of the point spread function)。

根據 Adrian(1991)，若繞射限制圖形為一高斯函數分佈，則：

$$d_e = \left[ M^2 d_p^2 + d_s^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-11)$$

且

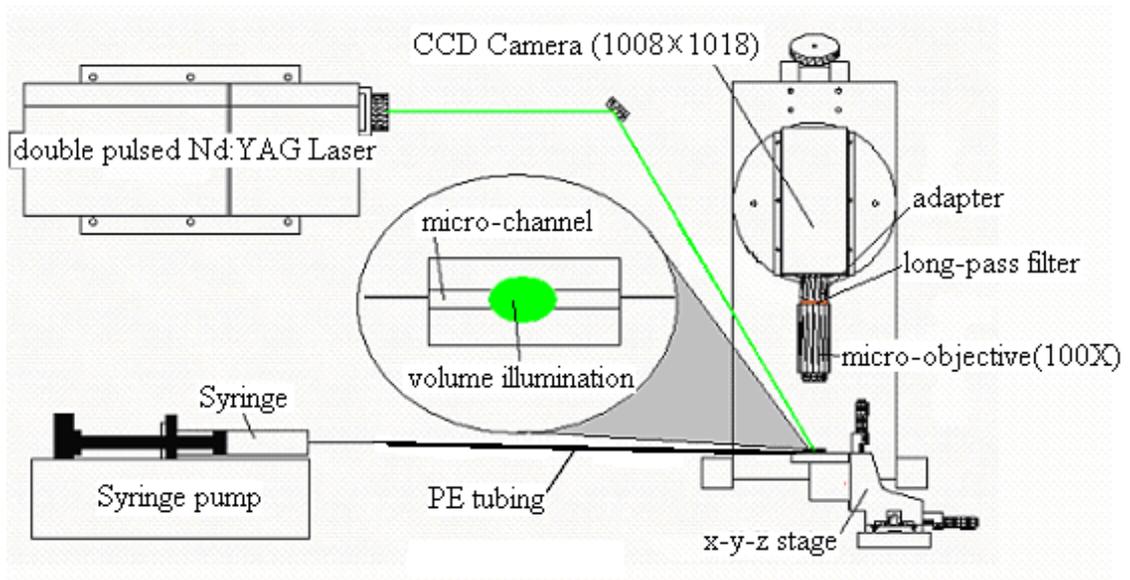
$$\delta x \approx \frac{d_e}{10M} \quad (2-12)$$

在本次實驗之中，採用放大倍率為 100x、N.A. 為 0.55，粒子直徑為  $1\mu\text{m}$ ，則可以算出不確定之距離為  $166.47\text{nm}$  ( $0.16647\mu\text{m}$ )，雖在本次實驗裡不到一個像素（本實驗的觀測區域約  $605\mu\text{m} \times 620\mu\text{m}$ ，垂直畫素為  $1008 \times 1018$ ，所以一個畫素距離約為  $0.61\mu\text{m}$ ），但粒子位移還是儘量不可以低於一個像素，以免造成不正確之分析，而由 (2-10) 也可以看出，提高 N.A. 將有效的將量測中不確定之距離降低，因而提高實驗之準確性。



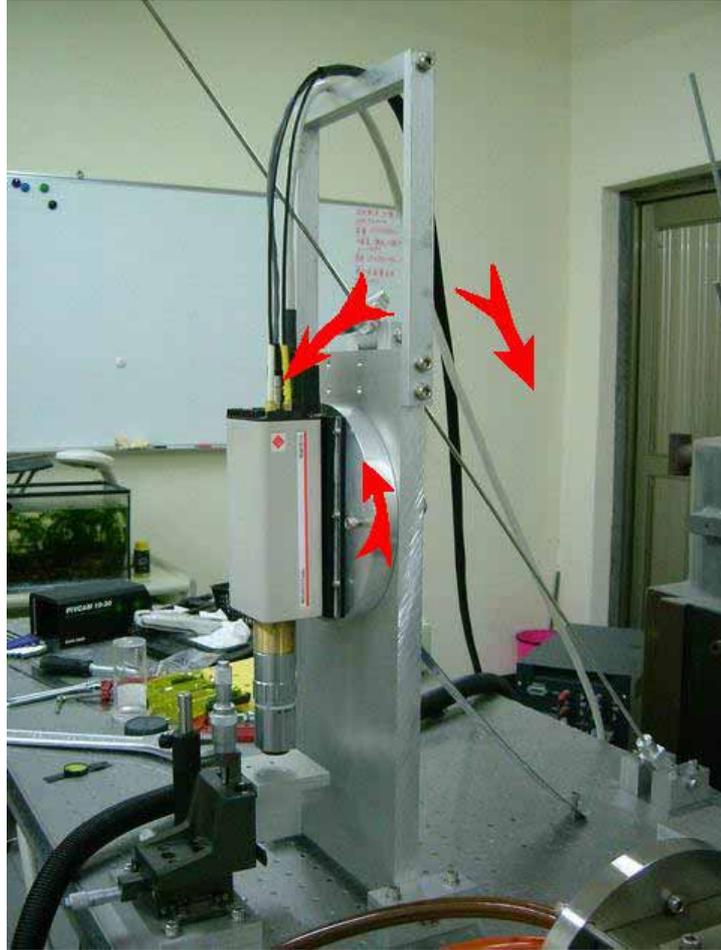
### 2.3 $\mu$ -PIV 系統的架構

為了將基礎 PIV 系統改裝為  $\mu$ -PIV 系統，因此設計製作了一套架設機構，來安裝及微調各項設備，整套機構可分為架設微調雷射的支持座，置放微調雷射反射鏡的支持座（此部份為組裝現有品）、架設微調電子耦合攝影機的支持座、連接顯微鏡頭與電子耦合攝影機的轉接環以及 x-y-z 移動平台。另外以注射幫浦作為驅動流場的動力來源。實驗架構的設置簡圖如下圖所示：



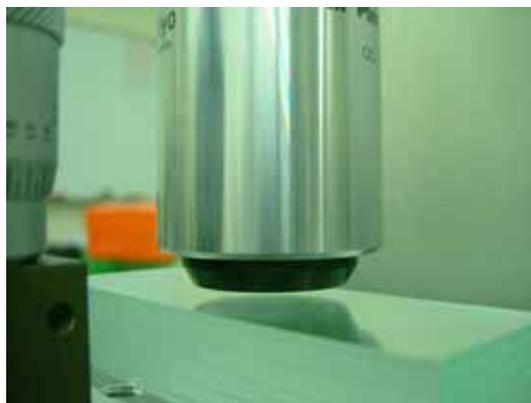
圖二 實驗設置簡圖

而為了微調顯微鏡頭與流道的平行度，因此在電子耦合攝影機的支持座上加了兩個自由度的旋轉，利用載玻片輔助，將顯微鏡頭調整至與流道平面平行。微調機構如下頁圖三所示：



圖三 電子耦合攝影機微調機構

藉由兩個自由度的微調，可以讓顯微鏡頭與量測平面有相當好平行度。如圖四、圖五所示：

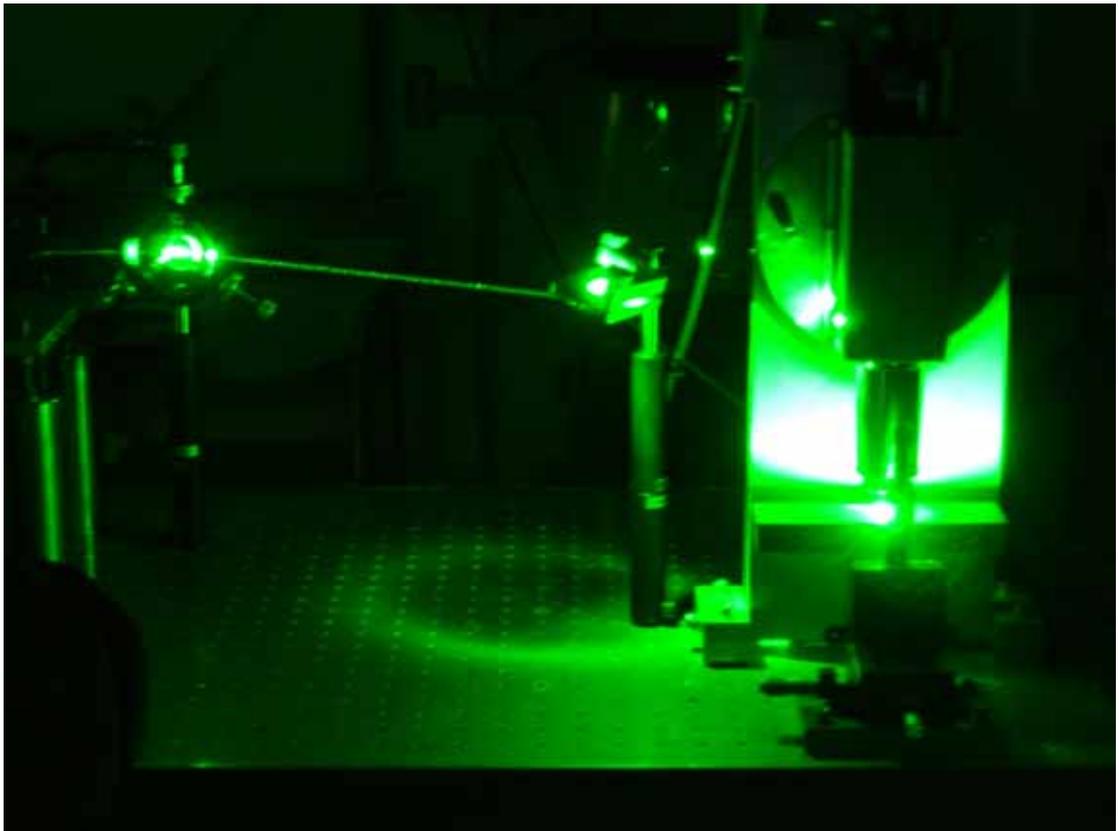


圖四 顯微鏡頭與量測平面（未接觸）



圖五 顯微鏡頭與量測平面（接觸）

實驗架構實體圖如下六圖所示：



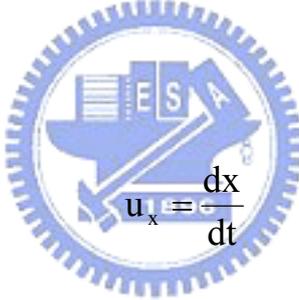
圖六 實驗設置實體圖

## 2.4 量測原理

微粒子顯像測速儀是一種量測二維之瞬時速度所發展出之系統，其基本實驗順序為：

- (1) 將螢光粒子植入待測之流場內；
- (2) 以電腦趨動同步器，使雷射以及數位相機同步運作；
- (3) 使用反射鏡將雷射光導入欲量測之微流道，將待測區域全域照亮。
- (4) 螢光粒子吸收雷射光之波長散射出螢光，使用濾鏡將雷射光過濾，只讓螢光通過。
- (5) 利用數位相機擷取螢光粒子之散射光。
- (6) 將擷取之影像傳輸至電腦儲存。
- (7) 利用軟體消去影像之背景雜訊後分析。(經由縮小景深抑制雜訊後可跳過此步驟)
- (8) 最後以軟體分析流場情形；

從最基本之速度定義知：


$$\mathbf{u}_x = \frac{dx}{dt} \quad (2-13)$$

以量測儀器而言，由於不可能將時間之差距縮短到無限小，所以必有一極小之量測時間：

$$\mathbf{u}_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2-14)$$

就雷射粒子顯像測速儀而言， $\Delta x$  表示在空間中兩粒子之位移， $\Delta t$  表示兩道脈衝雷射中已知之間隔時間；在本實驗中，有一放大之鏡組，則在影像平面之位置函數為：

$$(\vec{x}_i + \vec{y}_j) = M(\vec{X}_I + \vec{Y}_J) \quad (2-15)$$

其中  $(\vec{x}_i + \vec{y}_j)$  是粒子在影像平面(Image plane)上的位置，而  $(\vec{X}_I + \vec{Y}_J)$  則是粒子在量測平面(Measure plane)上的位置，M 是鏡組之放大倍率。再對其做微分，可得：

$$d(\vec{x}_i + \vec{y}_j) = M(d\vec{X}_i + d\vec{Y}_j) \quad (2-16)$$

所以：

$$u_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{M\Delta t} \quad (2-17)$$

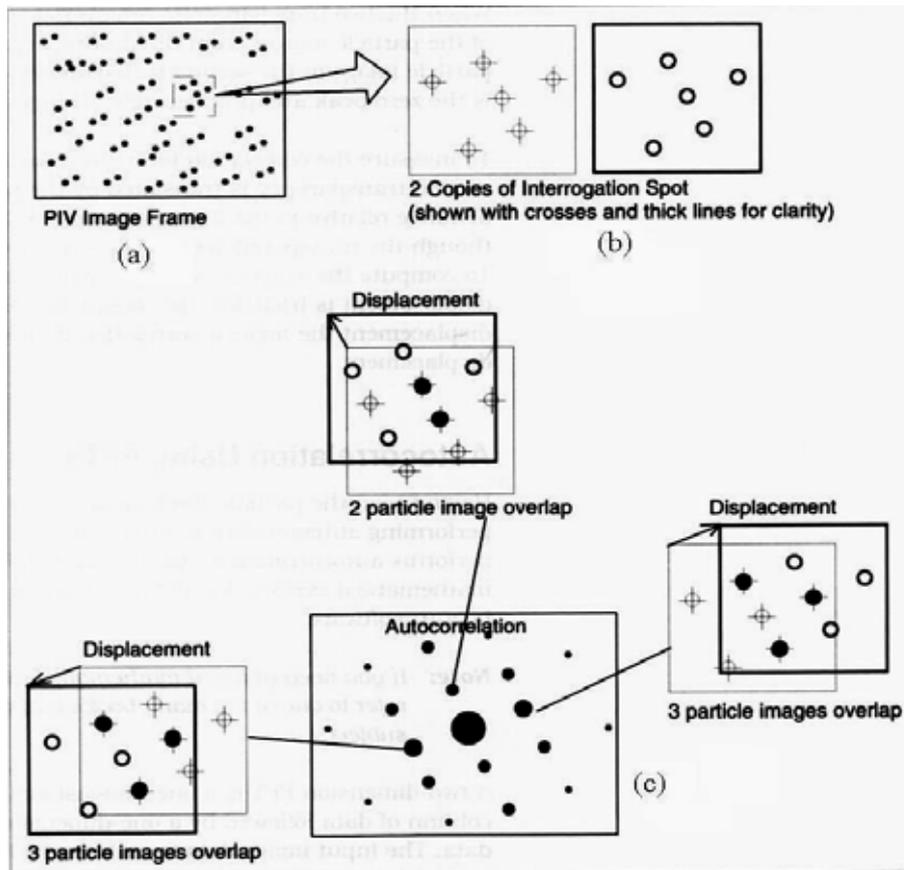
當將顯影之數位像片傳送至電腦之後，其分析的方法為將照片分為許多小區域 (Interrogation Spot) 後再對小區域內之成像粒子做統計分析，而分析的方法為交錯相關函數(Cross-correlation function)分析法。在 Cross-correlation function 分析法之前，先介紹 Auto-correlation 分析法以助於了解 Cross-correlation function 分析法的原理。

#### 2.4.1 Auto-correlation

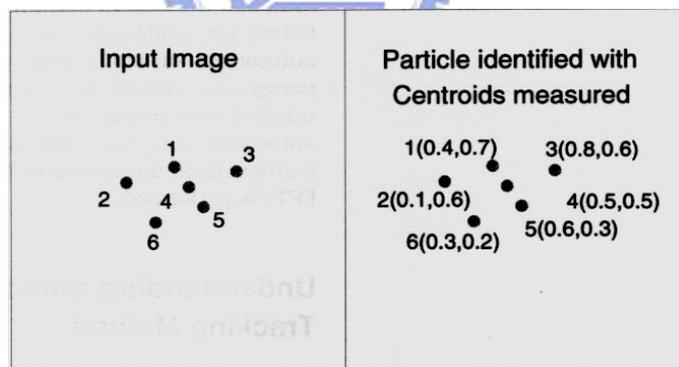
Auto-correlation 分析法為在同一張影像上做重複曝光的動作，然後再對所得到的質點影像進行相關性分析。其分析示意圖如下頁圖七所示。並於下條列分析步驟如下：

- (1) 將流場影像細分為許多小區域一稱之為「Interrogation Spot」，如圖七 (a)。
- (2) 接著複製所選取的 Interrogation Spot，如圖七 (b)。
- (3) 對 Interrogation Spot 上的質點進行定位，如圖八所示，定位後將資料整理如表一。
- (4) 比對兩張影像 Interrogation Spot 上的質點位置 (如表二)，重疊質點最多 (如表三) 之影像位移，便是該 Interrogation Spot 中所有質點的位移，如圖七 (c) 所示。

表三為步驟 (4) 所統計的結果，表中可以看出 (0,0) 位移出現次數最多 (6 次)，這個結果顯示質點自己的 Correlation 最為密切，表示質點並無位移。但這並非我們所求，通常下一個峰值 (3 次) 才是我們所求的位移量，由此便可決定此 Interrogation Spot 中質點的位移量。最後在除上重複曝光的間格時間，便可求得速度大小，不過卻無法知道速度方向，因為發生 3 次峰值的位移會出現兩個，它們大小相同方向正好相反，所以必須在系統中加入 Image shifting 來產生一個移動的位移，以分辨出速度的方向。



圖七 Auto-correlation 示意圖



圖八 質點定位

List of Particle Centroid Locations

Particle Number	X Centroid	Y Centroid
1	0.4	0.7
2	0.1	0.6
3	0.8	0.6
4	0.5	0.5
5	0.6	0.3
6	0.3	0.2

表一 質點定位資料表

Table of Particle Pairings

	First Image: Particle Number (Position)					
	#1(.4,.7)	#2 (.1,.6)	#3 (.8,.6)	#4 (.5,.5)	#5 (.6,.3)	#6 (.3,.2)
Second Image Particle Number (Position)						
1(.4,.7)	(.0, .0)	(.3, .1)	(-.4, .1)	(-.1, .2)	(-.2, .4)	(.1, .5)
2(.1,.6)	(-.3, -.1)	(.0, .0)	(-.7, .0)	(-.4, .1)	(-.5, .3)	(-.2, .4)
3(.8,.6)	(.4, -.1)	(.7, .0)	(.0, .0)	(.3, .1)	(.2, .4)	(.5, .4)
4(.5,.5)	(.1, -.2)	(.4, -.1)	(-.3, -.1)	(.0, .0)	(-.1, .2)	(.2, .3)
5(.6,.3)	(.2, -.4)	(.5, -.3)	(-.2, -.4)	(.1, -.2)	(.0, .0)	(.3, .1)
6(.3,.2)	(-.1, -.5)	(.2, -.4)	(-.5, -.4)	(-.2, -.3)	(-.3, -.1)	(.0, .0)

表二 質點相對位置資料表

Table of Frequency of Particle Image Displacements

$\Delta X$	$\Delta Y$	Number of Counts
-0.7	0.0	1
-0.5	-0.4	1
-0.5	.3	1
-0.4	.1	2
-0.3	-.1	3
-0.2	-.3	1
-0.2	-.4	1
-0.2	.4	2
-0.1	-.5	1
-0.1	0.2	2
0.0	0.0	6
.1	-.2	2
.1	.5	1
.2	-.4	2
.2	.4	1
.2	.3	1
.3	.1	3
.4	-.1	2
.5	-.3	1
.5	.4	1
.7	0.0	1
	Total Count	36

表三 位移次數統計表

## 2.4.2 Cross-correlation

Cross-correlation 分析法其基本原理類似 Auto-correlation，不同的地方在於 Cross-correlation 是將兩次曝光分別顯像在兩張不同的影像上，而兩張影像及可區分出質點的先後順序，因此位移除上兩張影像的時間間隔後即可直接確定速度的大小及方向。本實驗所使用之分析方法即為 Cross-correlation，而就 Cross-correlation 而言：

$$R(m,n) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy [f_1(x,y)f_2(x+m,y+n)]}{\left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy [f_1(x,y)] \right\} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy [f_2(x,y)] \right\}} \quad (2-18)$$

其中  $R(m,n)$  為相關函數(correlation function)在照片中位置在位移向量  $(m,n)$  上的函數值， $m$  和  $n$  分別代表橫向和縱向位移的參數，而且是整數的型式； $f_1(x,y)$  和  $f_2(x,y)$  分別為兩張相鄰時間內所拍攝照片在  $(x,y)$  位置時的灰階值。當  $R(m,n)$  有極大值產生時，發生極大值時的坐標  $(m,n)$  就是該分析區域的平均位移。

由於相關函數法之粒子位移大小的數量是以像素為單位來表示，意即整數倍的像素數，因而在分析時，將會採取一種稱之為次像素分析(sub-analysis)的方法，次像素分析可利用非整數像素數的型式來表示粒子位移的大小。二維次像素分析的原理，是利用最大位移像素位置，和其周圍八個像素等九個像素的函數值，對選定的一個連續函數，透過這九個像素位置的相關函數值來決定這個曲面函數的係數，並且在此連續函數發生極大值的位置，就是次像素分析所得到的粒子位移量，而次像素函數分析的函數有二次函數、高斯函數或稱指數函數、以及重心函數。

#### 二次函數法：

$$\bar{R}(p,q) = a_1 p^2 + a_2 pq + a_3 q^2 + a_4 p + a_5 q + a_6 \quad (2-19)$$

其中  $\bar{R}(p,q)$  為一個連續的二次函數； $(p,q)$  為坐標的示量，不一定要是整數的型式； $a_1$  到  $a_6$  為此二次函數的係數，可以由上述九個像素位置的相關函數值決定。

#### 指數函數法：

$$\bar{R}(p,q) = A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (2-20)$$

其中  $x_0$  和  $y_0$  即為次像素分析產生極大值時的橫向與縱向坐標；係數  $A$ 、 $\sigma_x$  和  $\sigma_y$  也可由相鄰像素的相關值函數決定。

重心函數法：

$$\vec{S}(m, n) = \frac{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 \bar{x}(m+i, n+j) H(m+i, n+j)}{\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 H(m+i, n+j)} \quad (2-21)$$

其中  $\bar{x}(m, n)$  是產生最大相關函數值的像素的像素位置； $\vec{S}(m, n)$  次像素分析的位移量； $H(k, l)$  為在整數像素位置  $(k, l)$  時對位移修正量的加權函數。

在分析時，再利用快速傅利葉轉換(fast Fourier transforms)做函數之分析以加快函數之計算，其方法為將二組顯像平面分割為許多之分析區域(Interrogation spot)，求得二組顯像平面中各分析區域的亮度函數(Intensity function)，後再依各個位置依次相乘，而後再利用快速傅利葉之逆轉換(fast-Fourier transform inverse)，求得其分析區域內的平均交錯相關函數之值，而換算成位移，最後再除以兩道雷射的分離時間，以換得分析區域內之平均速度。

### 2.4.3 Hart Correlation

Hart Correlation 的基本原理為在每個 Interrogation Spot 影像中，以起點作為基礎，依使用者所定義的壓縮比將影像做第一次的壓縮，壓縮影像的強度訊號接著便被譯為電碼的形式，而 Correlation 函數便依這個電碼資訊所完成。然後再依使用者定義第二個 Interrogation spot 的大小，將第一次壓縮的 Interrogation spot 影像與第二次定義的 Interrogation spot 影像做 Cross-correlation 分析。而第二個定義的 Interrogation Spot 大小即代表速度向量的空間解析度。Hart Correlation 通常用以作為縮小 Interrogation spot size 來提高空間解析度的方法，雙重的 Correlation 技術對 Correlation 函數來說也用於增強訊號成為雜訊的比例，所以利用 Hart Correlation 將可達到更高的空間解析度及更正確的速度量測。

## 2.5 螢光粒子的選擇

本實驗所使用的脈衝雷射波長為 532nm，故螢光粒子必須要能吸收此一波長的雷射光，因此選擇由 Duke 公司所生產的螢光粒子，其特性為可吸收 542nm 波長的雷射光，並散射出 612nm 波長的螢光，螢光粒子的密度為  $1.05\text{g/cm}^3$ ，可懸浮於密度在  $1.0\text{g/cm}^3 \sim 1.05\text{g/cm}^3$  之間的液體之中，並且粒子具有帶負電的電性，以防止螢光粒子彼此間聚集、吸附在一起。另外，選用的濾光片可以濾掉波長在 570nm 以下的光線，用以濾掉雷射光，使螢光粒子所散射的螢光影像可以通過濾光片被 CCD 所擷取。除此之外，在流場分析之前，還要考慮粒子的直徑，判斷粒子是否會跟隨流場，以及粒子是否會阻塞流場，確定這些特性後，則粒子的運動才能代表流場之行為。故在分析流場之前，必須考慮粒子的大小及其跟隨效應和窒礙性。

### 2.5.1 顯微物鏡的最小解析空間

根據顯微物鏡可以解析的最小空間公式：

$$R = \frac{\lambda}{2(N.A.)} \quad (2-22)$$

公式中 R 為根據顯微物鏡可以解析的最小空間， $\lambda$  為成像光線的波長，在此約為 600nm， $N.A.=0.55$ 。經計算後可知道顯微物鏡可以解析的最小空間為  $0.545\mu\text{m}$ ，所以在選擇粒子大小時，粒子經吸收雷射光散射後，其光點大小至少要大於  $0.545\mu\text{m}$ 。

### 2.5.2 粒子的窒礙性

$$\frac{1}{d} = \frac{1\mu\text{m}}{20\mu\text{m}} = 0.05 \quad (2-23)$$

因此，粒子之半徑遠小於實驗中最小的長度尺度，故其並不會對微流道產生窒礙性。

### 2.5.3 粒子的終端速度

由於粒子受重力影響，因此在追隨流體的同時也會產生下墜沉澱的速度，為了防止在低流速時，粒子下墜速度造成過大的垂直位移，因此簡略估算粒子的終端速度來防止此一現象的發生。由阻力的公式可知：

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho_l V^2 A} \quad (2-24)$$

根據 When terminal speed  $\rightarrow$  drag force = gravity

$$C_D \frac{1}{2} \rho_l V^2 A = F_D = mg \quad (2-25)$$

$$C_D \frac{1}{2} \rho_l V^2 A = F_D = mg = C_D \rho_l V^2 \frac{d^2}{8} \pi \quad (2-26)$$

if  $Re < 1$  則  $C_D = \frac{24}{Re} \quad (2-27)$

$$Re = \frac{\rho_l V d}{\mu} \quad (2-28)$$

所以  $C_D = \frac{24\mu}{\rho_l V d} \quad (2-29)$

將 (2-29) 帶回 (2-26)

則  $V = \frac{\rho_p d^2 g}{18\mu} \quad (2-30)$

最終式 (2-30) 中  $\rho_p$  為粒子密度 = 1.05 g/cc,  $d$  為粒子直徑 = 1  $\mu\text{m}$ ,  $\mu$  為水的動力黏滯係數, 在 20°C 時為  $1.0042 \times 10^{-3} \text{N}\cdot\text{S}/\text{m}^2$ , 所以可計算出粒子的終端速度約為 0.5693  $\mu\text{m}/\text{s}$  ( $Re = 5.669 \times 10^{-7} \ll 1$ ), 所以即使流速低至 1 mm/s 也不至於影響二維流場的量測。

#### 2.5.4 布朗運動相對誤差

在巨觀流場之中, 若在流體之內置入追蹤粒子, 布朗運動對流場分析之影響相當的小, 可說粒子將跟隨流體而運動, 但在微流體的討論中, 由於尺度微小, 布朗運動之影響將會變的重要, 因此我們將利用物布朗運動相對誤差的計算公式[10]來估算布朗運動對量測造成的相對誤差。布朗運動相對誤差為  $\varepsilon_B$ , 如 (2-31) 式所示:

$$\varepsilon_B = \frac{1}{u} \sqrt{\frac{2D}{\Delta t}} \quad (2-31)$$

(2-31) 式中,  $u$  = 粒子運動的特徵速度,  $\Delta t$  = 兩個雷射 Pulse 的間隔時間,  $D$  = 擴散係數。而擴散係數的公式[10]如 (2-32) 式所示:

$$D = \frac{\kappa T}{3\pi\mu d_p} \quad (2-32)$$

(2-32)式中， $\kappa$ =波次曼常數( $1.38 \times 10^{-23}$  J / K)， $T$ =絕對溫度(K)， $\pi = 3.141592654$ ， $d_p$ =螢光粒子的粒徑。

根據上列的公式，若要達到最大的布朗運動誤差，則粒子運動的特徵速度 ( $u$ ) 以及兩個雷射 Pulse 的間隔時間 ( $\Delta t$ ) 均要越小則其誤差越大。而以本實驗一般的 Case 來說，螢光粒子的粒徑為  $1\mu\text{m}$  或更小 ( $0.7\mu\text{m}$ )。若以螢光粒子粒徑為  $1\mu\text{m}$  帶入 (2-32) 及 (2-31) 中， $\Delta t$  大約在  $200\mu\text{s}$ ，流速大約為  $10\text{mm/s}$  時，經過計算後，在此條件下的布朗運動相對誤差為 1%。

縱觀以上各點之描述，選用  $1\mu\text{m}$  粒徑大小的粒子，將可以被顯微物鏡解析、有效的跟隨流場、不會對流體造成窒礙以及不影響二維流場的量測、布朗運動相對誤差約為 1%，且粒子可以發出足夠強之螢光以供數位相機拍攝，故可以以粒子之行為來描述流體之行為。



## 2.6 流道分析

美國的 Phahler et al.(1990)曾利用壓降的方式量測微管流，以理論預測尺寸小於  $0.8\mu\text{m}$  以下時，流體的性質將會悖離傳統 N-S 方程式；而本研究所討論的微流道流場，其最小流道尺寸均大於  $0.8\mu\text{m}$  的尺度，而且 Knudsen number，值皆遠小於 1，因此仍然可以利用 N-S 方程式來驗證實驗的準確性。

Navior-Stokes 方程式中以針對不可壓縮(imcompressible)具黏滯力(Viscous)之完全發展穩流(Fully Developed Laminar Flow)所推導出來的公式為基礎，比較實驗中所量測出來的截面速度外型(Velocity Profile)。根據 Hele-Shaw flow 上所提到的，如果  $x$ 、 $y$  方向上之尺度遠大於  $z$  方向之尺度，則，對  $x$ 、 $y$  方向而言可以視為一二維之流場。故本實驗進行前，將設計一簡單流道，對其進行量測，所得之數據可與 Hele-Shaw flow 的理論值做一比較，來驗證實驗設備的誤差。Hele Show Flow 的解析解如下頁 (2-33) 式[12]：

$$u(y, z) = \frac{Ge^2}{8\mu} \left\{ 1 - \left(\frac{2y}{e}\right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \frac{32}{(2n-1)^3 \pi^3} \times \frac{\cosh\left[(2n-1)\pi\left(\frac{z}{e}\right)\right]}{\cosh\left[\frac{(2n-1)\pi\left(\frac{h}{e}\right)}{2}\right]} \cos\left[(2n-1)\pi\left(\frac{y}{e}\right)\right] \right\}$$

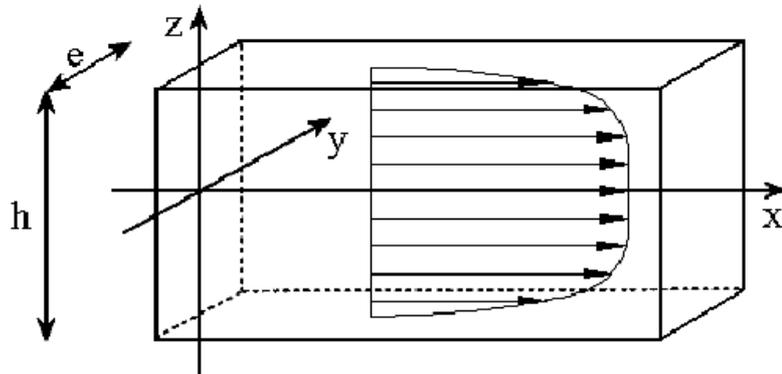
(2-33)

(2-33) 式中， $\pi = 3.141592654$  (圓周率)

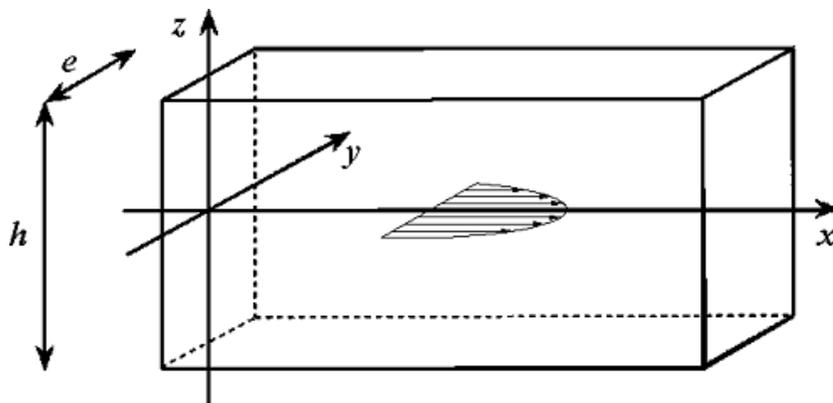
$$G = \frac{Q \cdot 12\mu}{e^3 \cdot h} \quad (2-34)$$

(2-34) 式中， $Q$  為體積流率。

利用 Fortran 程式，將 Hele-Shaw flow 的解析解寫成一個簡單的程式，作為實驗中比對用之理論值。其座標定義方式如圖九、圖十所示。圖九為 Hele-Shaw flow 在 XZ 平面上的解析解示意圖，圖十為 Hele-Shaw flow 在 XY 平面上的解析解示意圖。



圖九 Hele-Shaw flow 在 XZ 平面上的解析解示意圖



圖十 Hele-Shaw flow 在 XY 平面上的解析解示意圖

### 三、實驗結果及討論

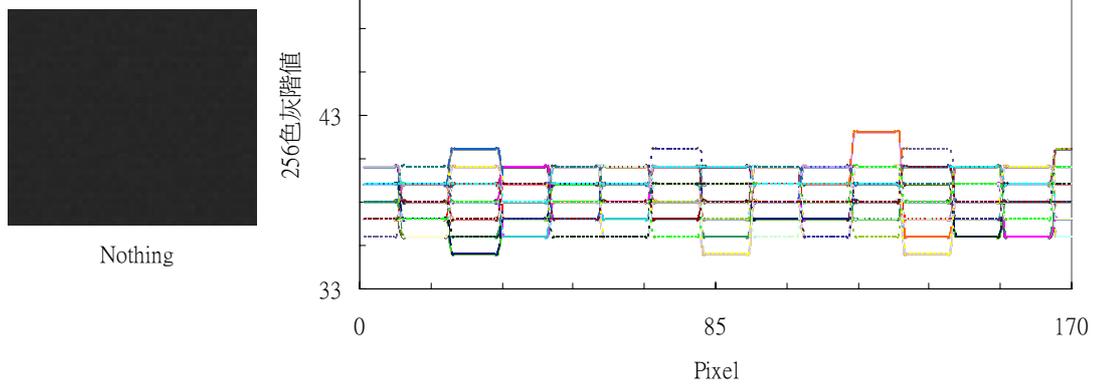
#### 3.1 量測參數

微粒子顯像測速儀在量測時必須放入流體追蹤粒子，因此放入粒子的濃度、大小以及低流速時是否會造成粒子的沉積、雷射的功率是否足夠讓螢光粒子放出足夠強度的螢光訊號、景深厚度是否適合而不至於產生太大的背景雜訊等，這些因素都會影響到量測的品質，以及量測數據的準確性。實驗初步測試結果，已經可以得到不錯的速度向量，了解流體的速度場分布。為了更準確的量化流場的速度場，所以必須控制上列參數，將量測狀況最佳化，以其達到誤差最小的最佳量測結果。而經過了一連串的測試與量測後，根據量測分析上的經驗，歸納出將量測參數最佳化的調整順序：

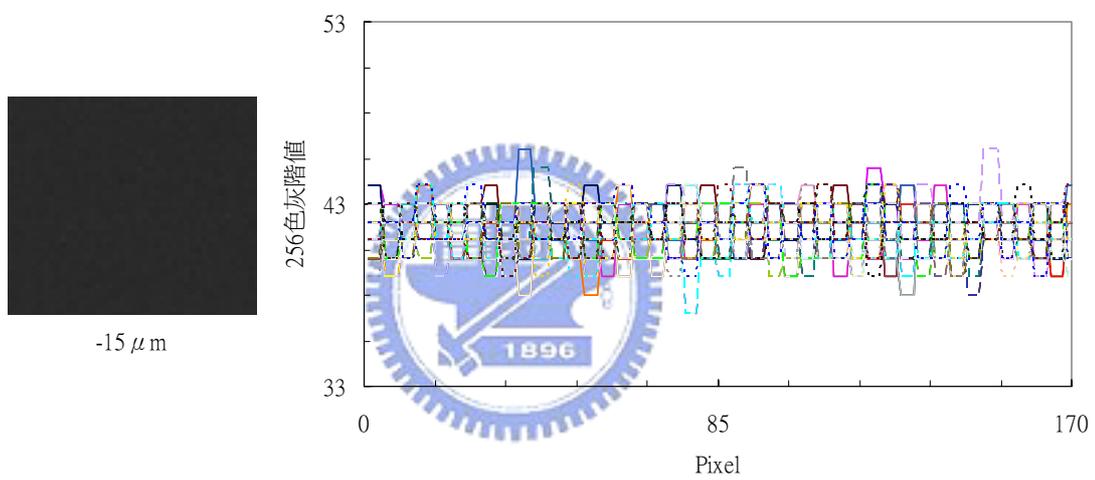
- (a) 根據不同的 Case 挑選不同的物鏡，並調整適合的放大倍率。(※注意：使用較低倍率的顯微物鏡時，必須光量的控制。若物鏡倍率低於 50X 時，調整光量的強弱需由最弱的光量強度開始漸增至適當強度，以免過強的光量損壞 CCD。)
- (b) 根據選定的 Case，挑選適合的流場追蹤粒子大小。
- (c) 選定粒子大小後，調整適合的雷射光強度。(※由最弱的雷射光強度開始漸增，以免過強的光量損壞 CCD。)
- (d) 根據所擷取的瞬時影像來判斷追蹤粒子的濃度是否足夠。
- (e) 依照即時分析的結果調整兩張影像的時間差 ( $\Delta t$ ) 及分析向量的放大係數 (放大至適合觀察)，以及 Interrogation Spot 的大小。
- (f) 上述各項均調整完畢後即可在即時分析時獲得良好的速度向量分布圖，此時便可設定欲拍攝的影像數目，並開始進行流場影像拍攝及擷取。
- (g) 最後對所得到的影像數據作後處理，透過對所有實驗數據作平均，即可得到較佳的流場速度向量分布圖。

#### 3.2 鏡頭放大倍率及全域照亮法下景深之量測

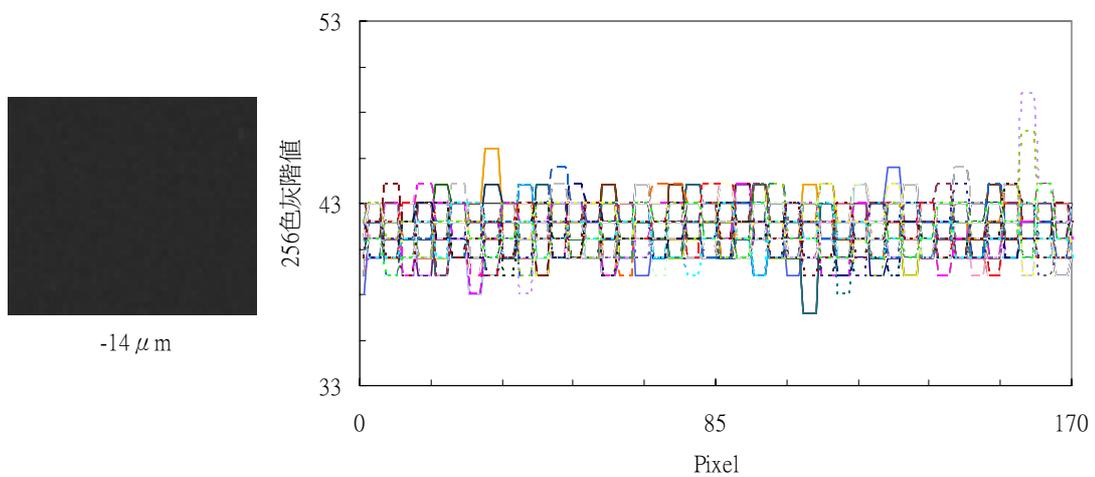
由於本實驗的系統設計上可以調整影像的放大倍率，所以實驗時可以依照不同的 Case 來調整合適的放大倍率。待放大倍率調整完成後，將載玻片及蓋玻片中間置入選定的流場追蹤粒子 (此 Case 選定粒徑  $1\mu\text{m}$  的螢光粒子)，並置於鏡頭下方。接著利用調整不同的雷射強度來控制追蹤粒子的螢光強度，以獲得不同的景深。為了量化粒子的螢光強度，利用 Fortran 程式將拍攝照片的每個 Pixel 轉成 256 色灰階值，並使用位移平台將粒子在景深平面上下做不同位置的調整，讓粒子的影像從最清晰一直到模糊不可見為止。實驗所得的影像及 256 色灰階值得分析結果如下：



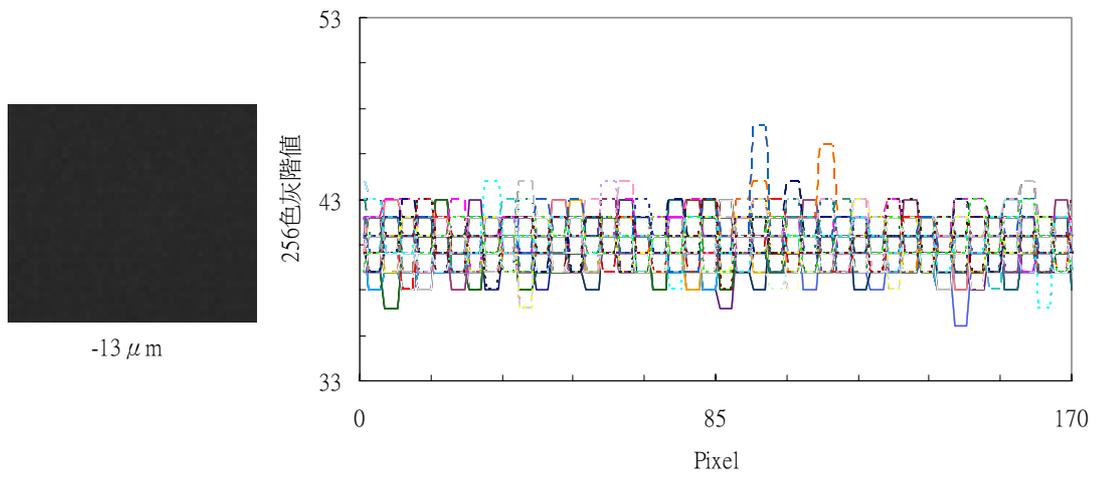
圖十一 沒有螢光粒子時的 256 色灰階值



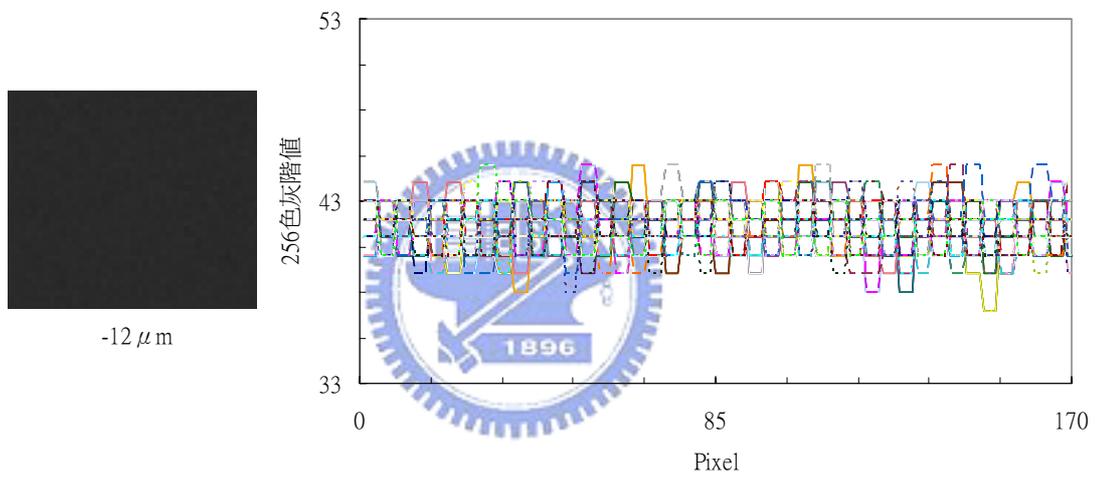
圖十二 景深平面位置在螢光粒子下 15μm



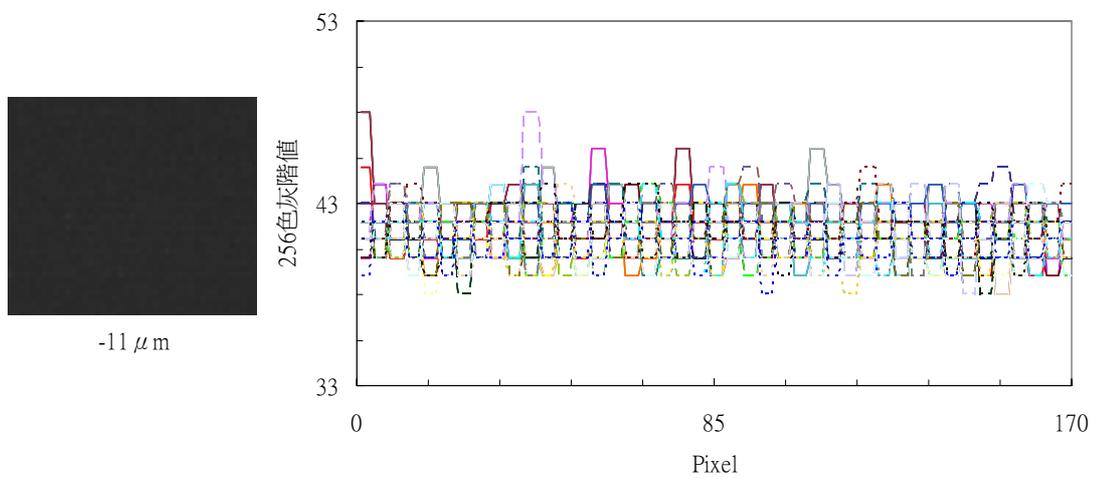
圖十三 景深平面位置在螢光粒子下 14μm



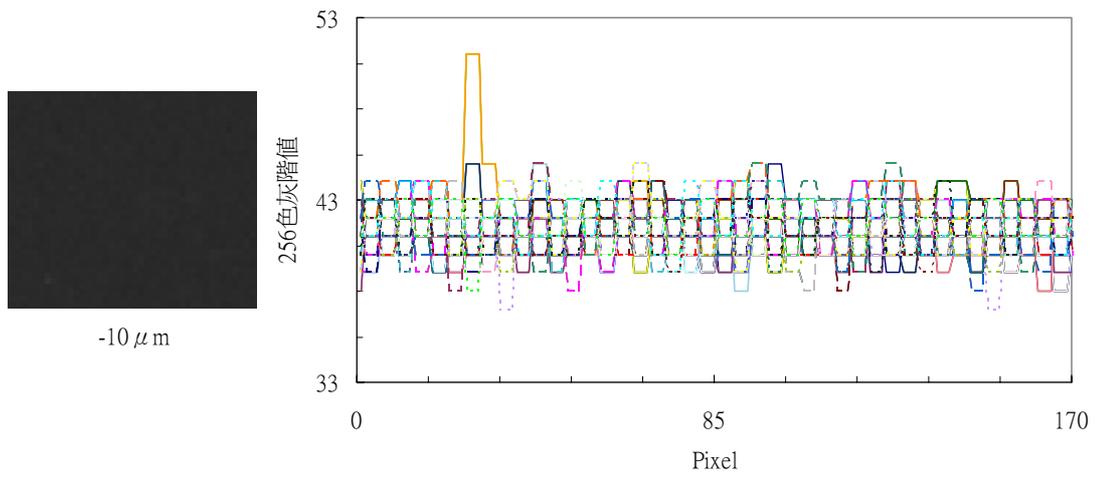
圖十四 景深平面位置在螢光粒子下  $13 \mu\text{m}$



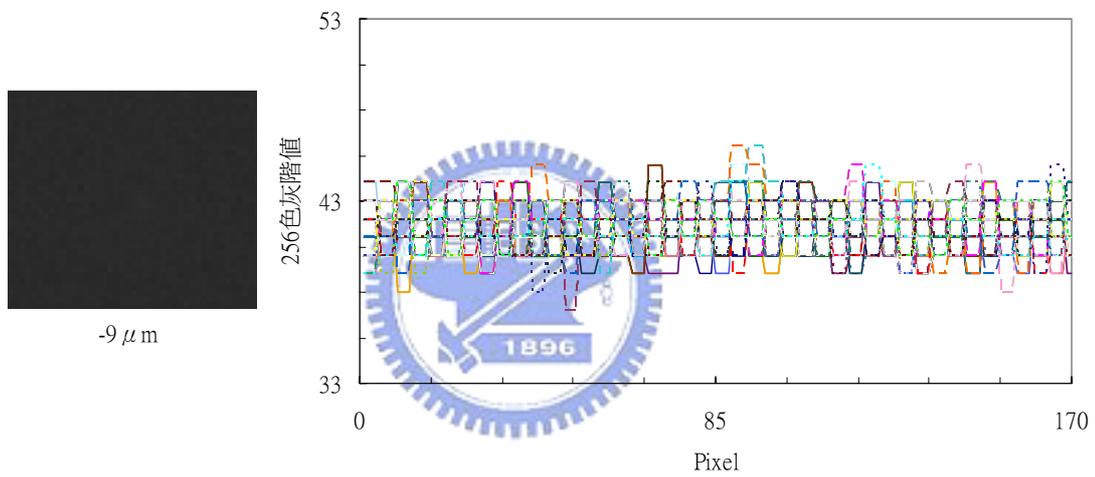
圖十五 景深平面位置在螢光粒子下  $12 \mu\text{m}$



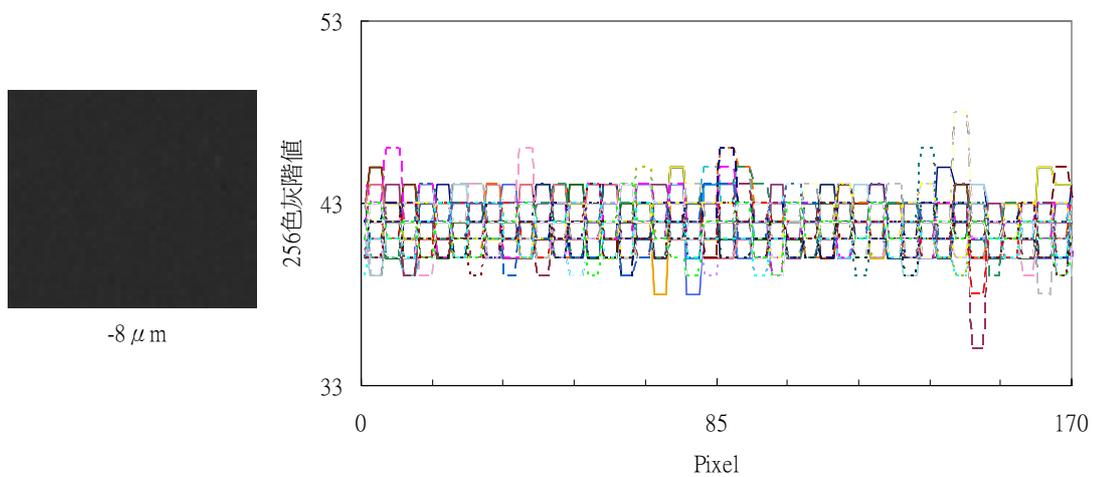
圖十六 景深平面位置在螢光粒子下  $11 \mu\text{m}$



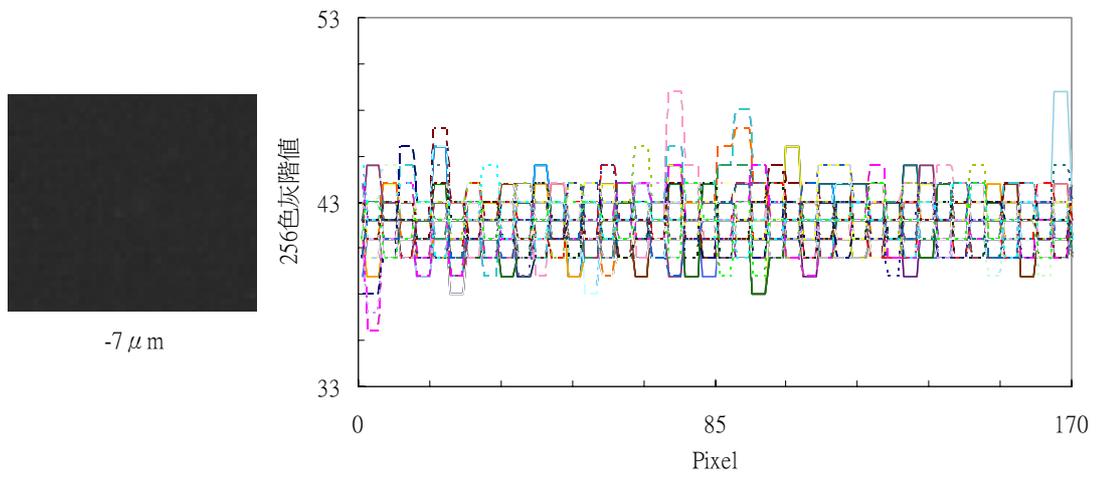
圖十七 景深平面位置在螢光粒子下  $10\ \mu\text{m}$



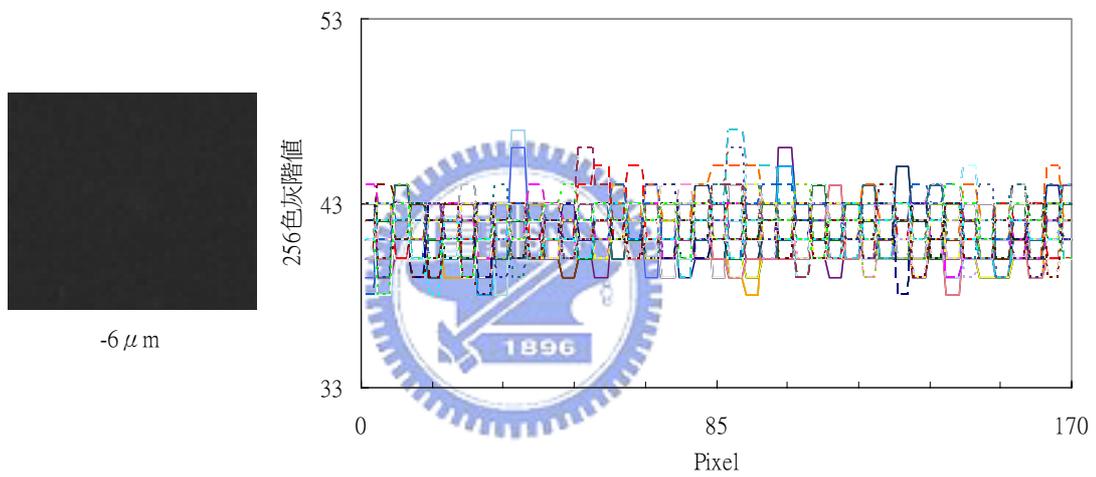
圖十八 景深平面位置在螢光粒子下  $9\ \mu\text{m}$



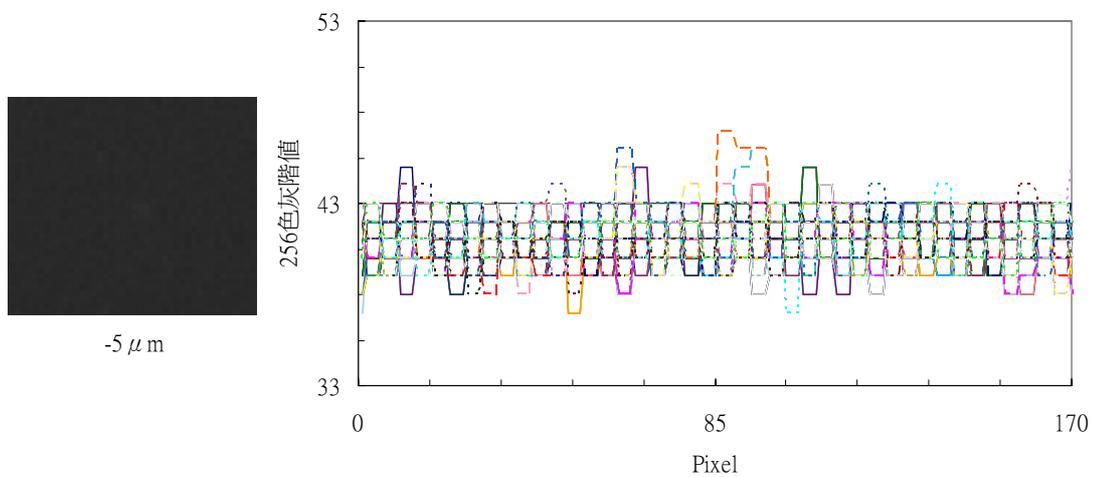
圖十九 景深平面位置在螢光粒子下  $8\ \mu\text{m}$



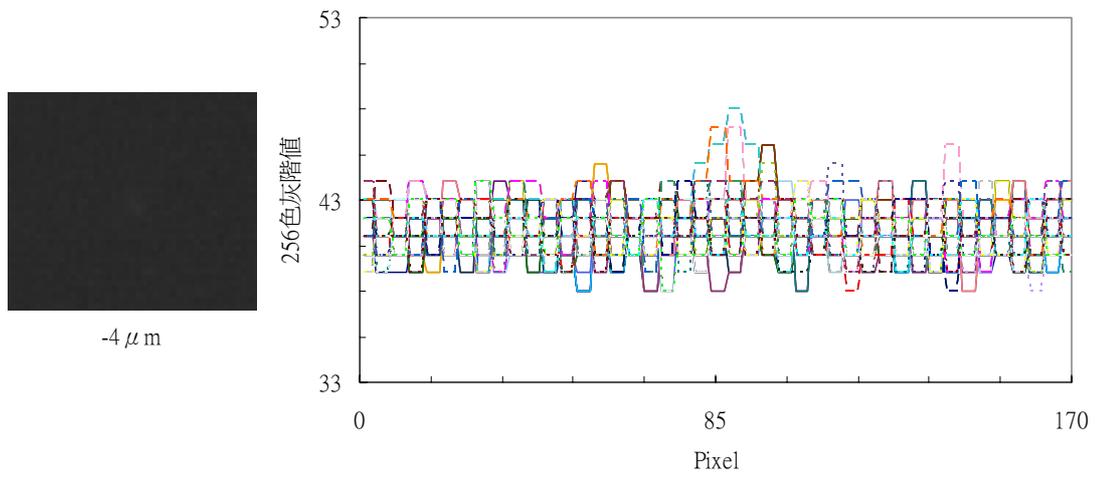
圖二十 景深平面位置在螢光粒子下  $7\mu\text{m}$



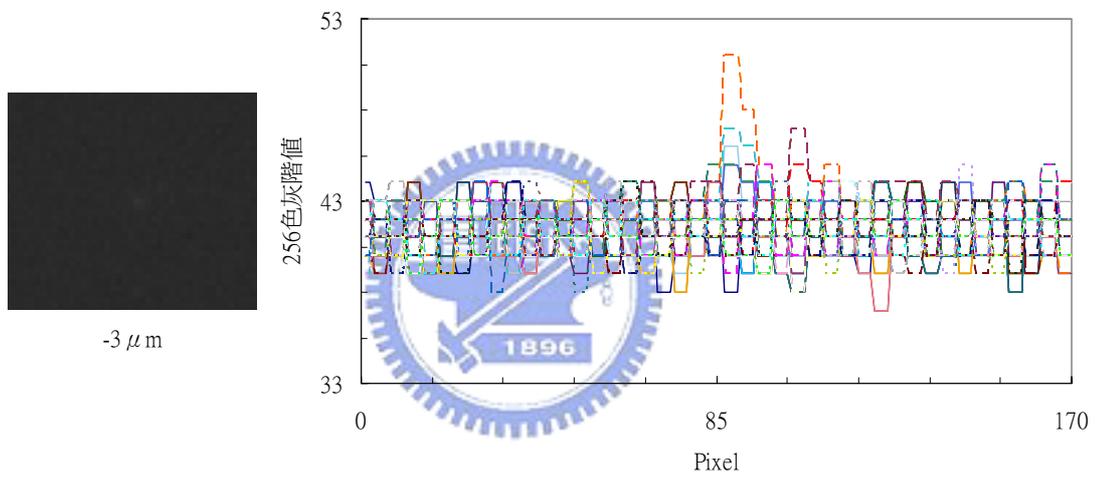
圖二十一 景深平面位置在螢光粒子下  $6\mu\text{m}$



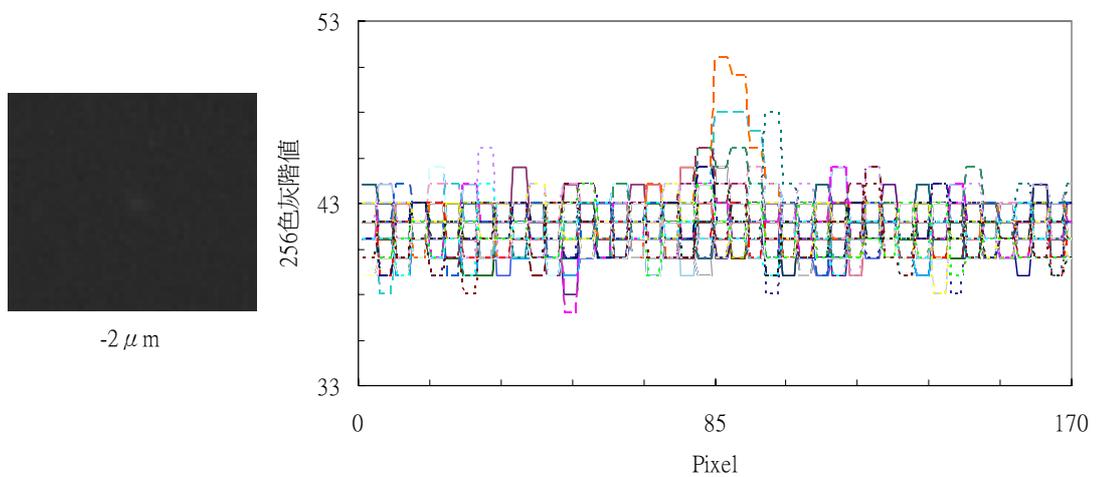
圖二十二 景深平面位置在螢光粒子下  $5\mu\text{m}$



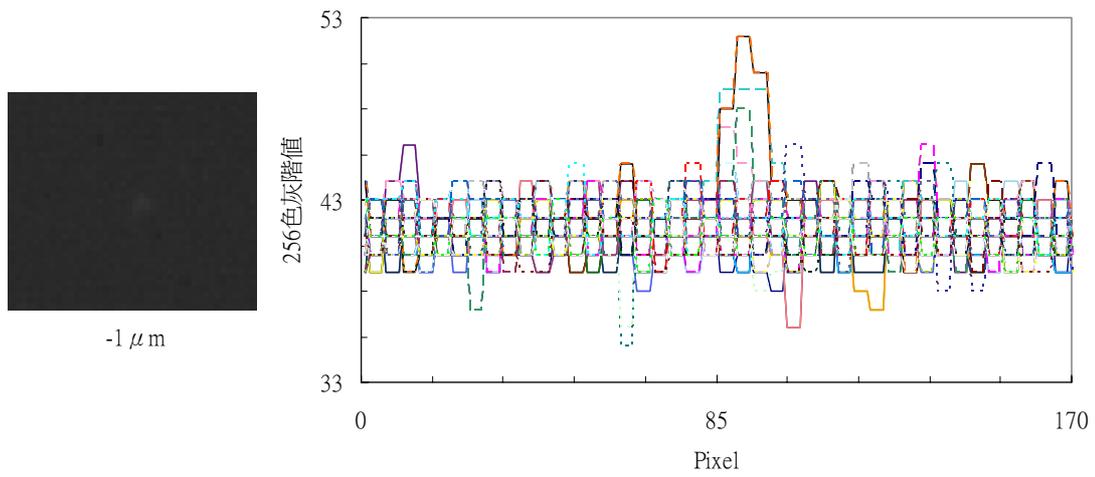
圖二十三 景深平面位置在螢光粒子下  $4\mu\text{m}$



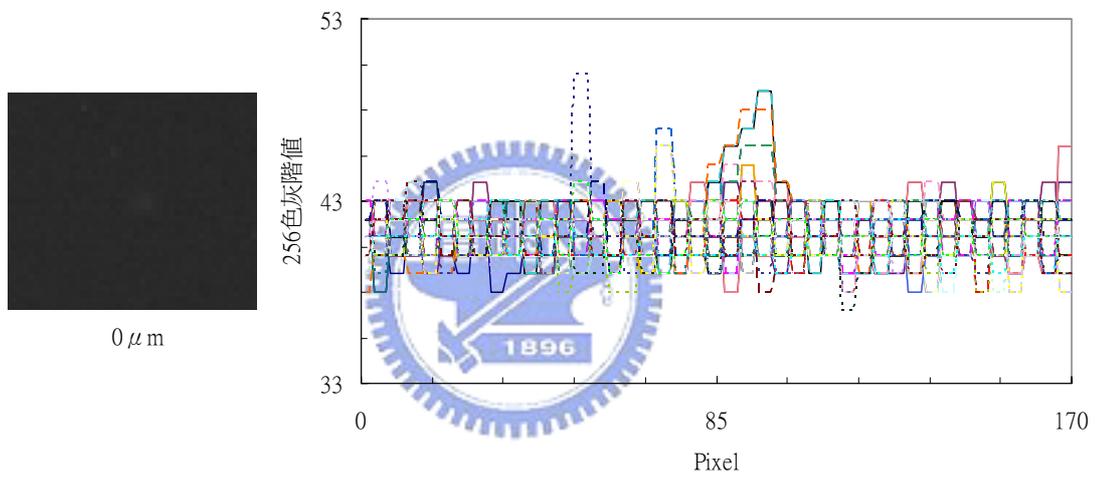
圖二十四 景深平面位置在螢光粒子下  $3\mu\text{m}$



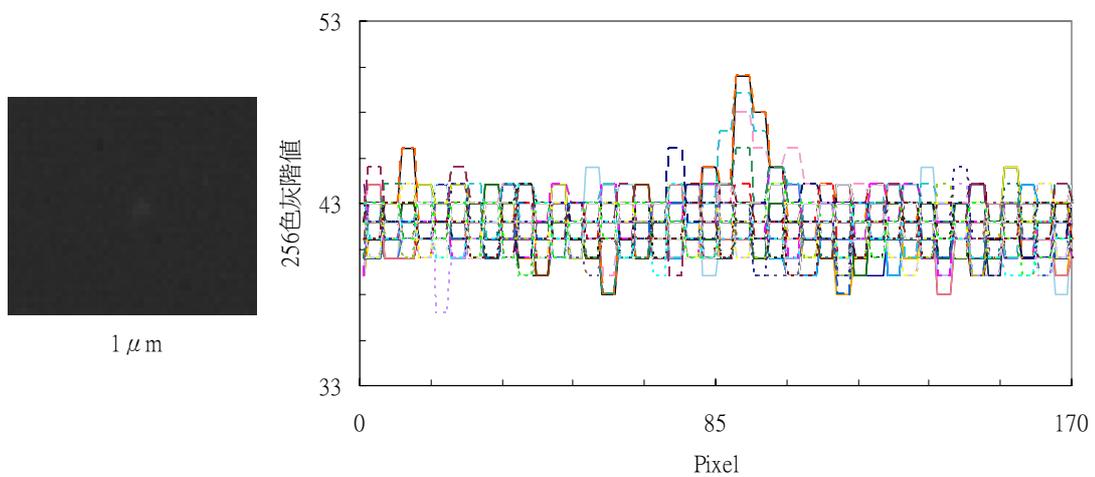
圖二十五 景深平面位置在螢光粒子下  $2\mu\text{m}$



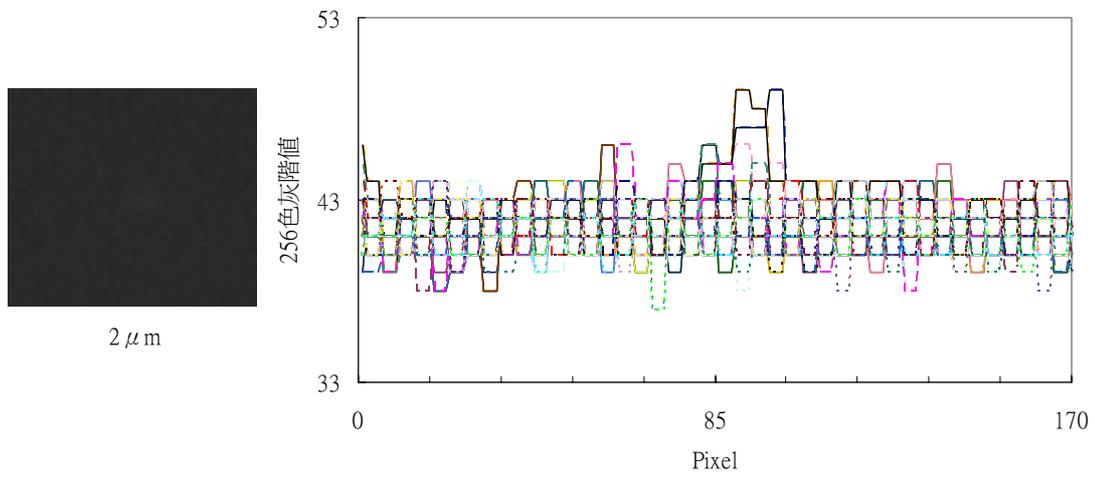
圖二十六 景深平面位置在螢光粒子下  $1\mu\text{m}$



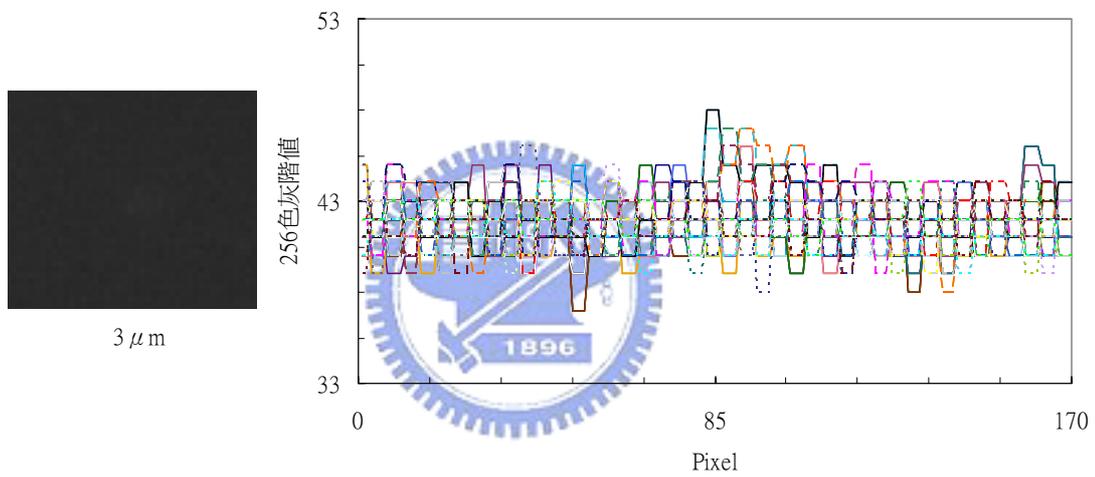
圖二十七 螢光粒子位置在景深平面上



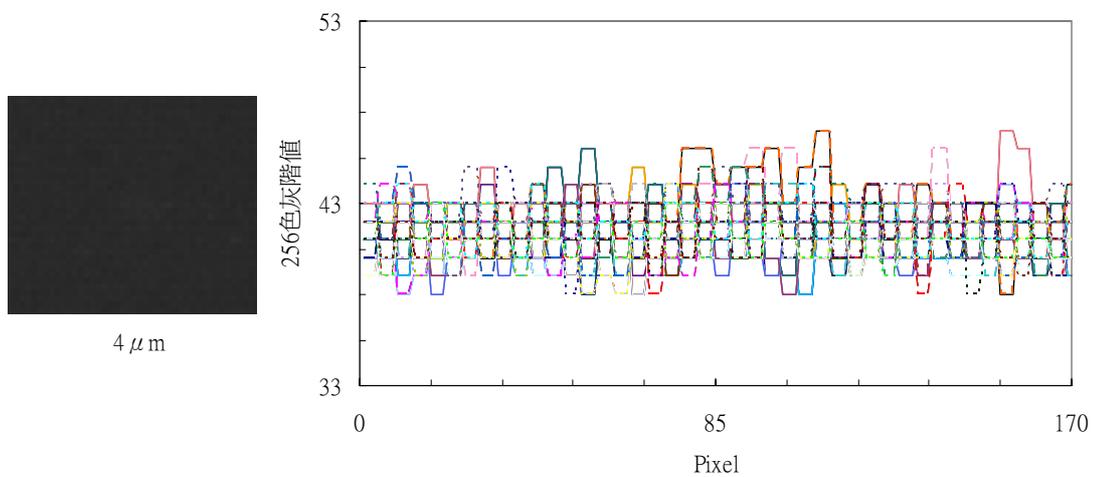
圖二十八 景深平面位置在螢光粒子上  $1\mu\text{m}$



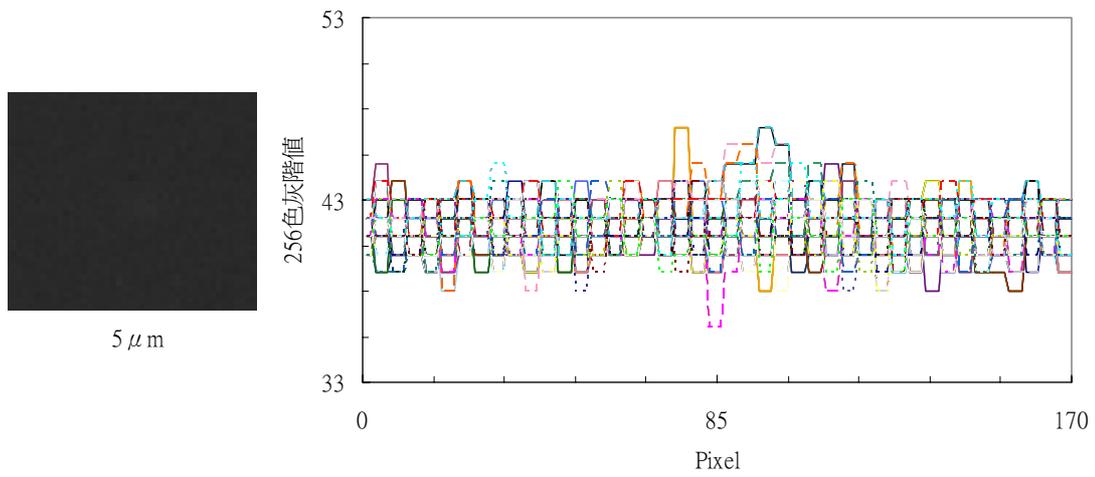
圖二十九 景深平面位置在螢光粒子上 2 $\mu$ m



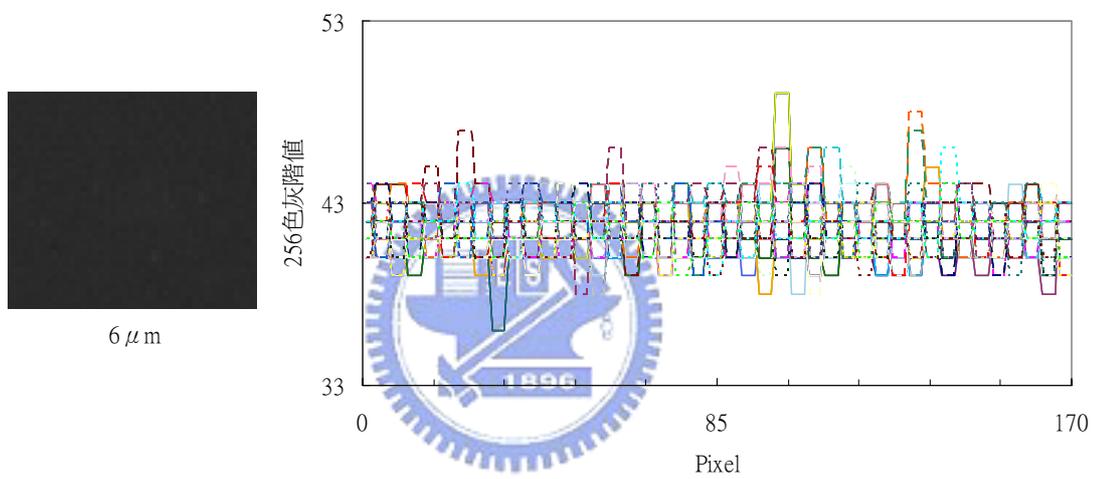
圖三十 景深平面位置在螢光粒子上 3 $\mu$ m



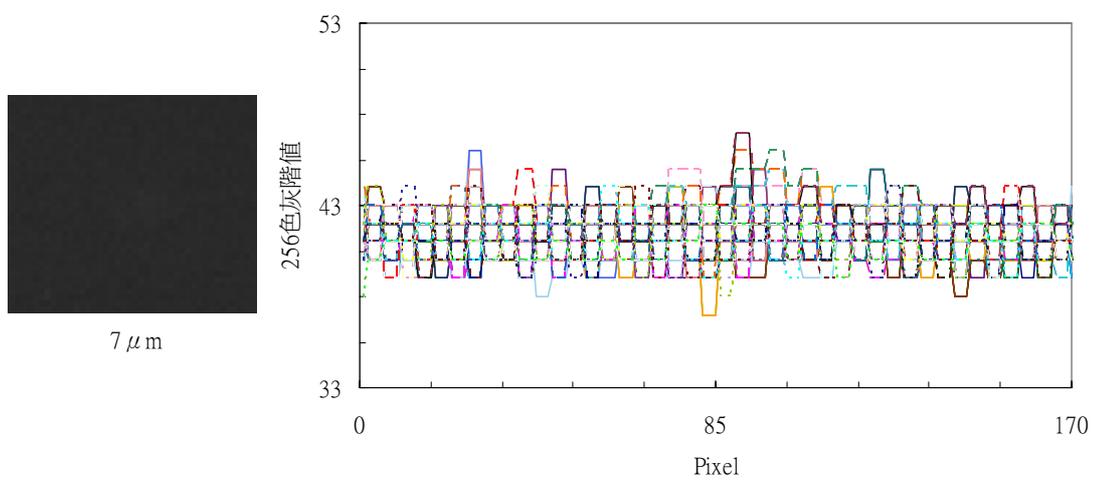
圖三十一 景深平面位置在螢光粒子上 4 $\mu$ m



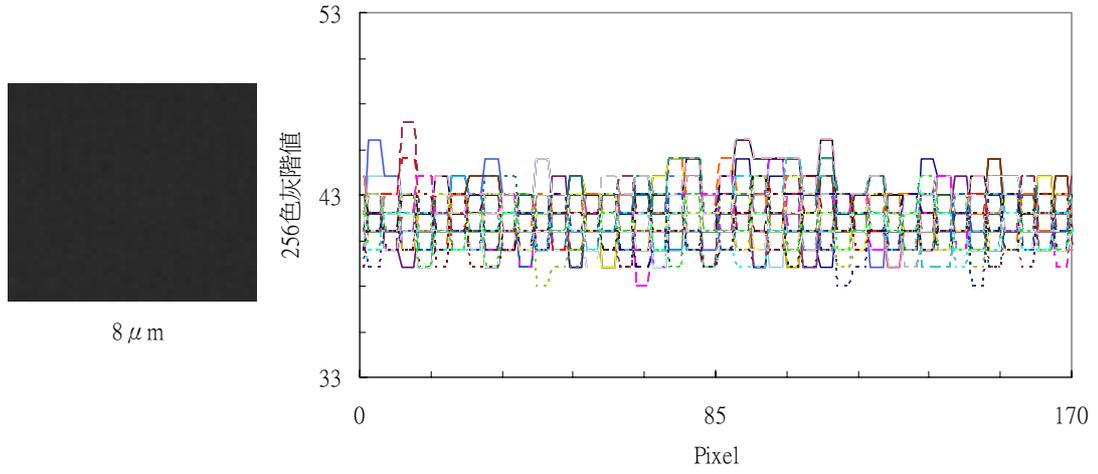
圖三十二 景深平面位置在螢光粒子上 5 $\mu\text{m}$



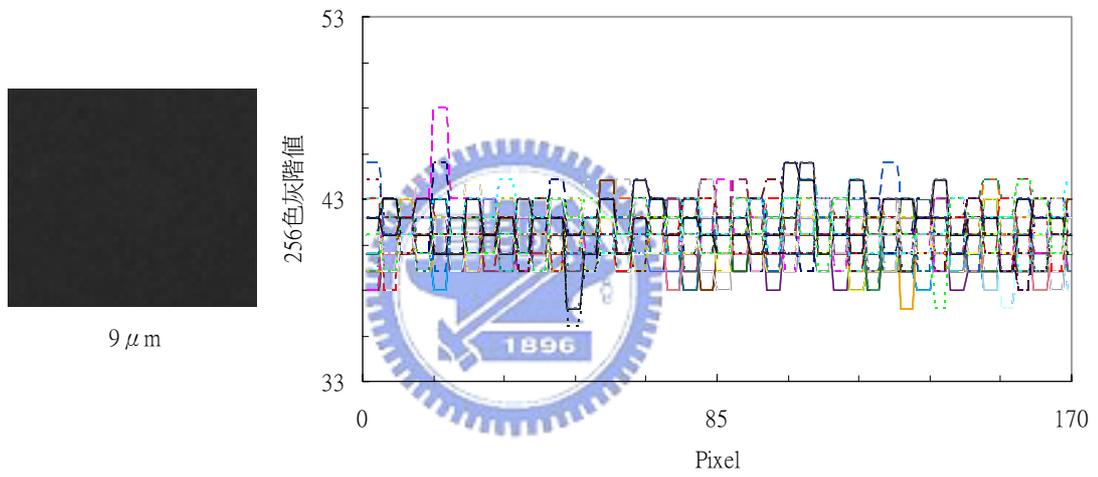
圖三十三 景深平面位置在螢光粒子上 6 $\mu\text{m}$



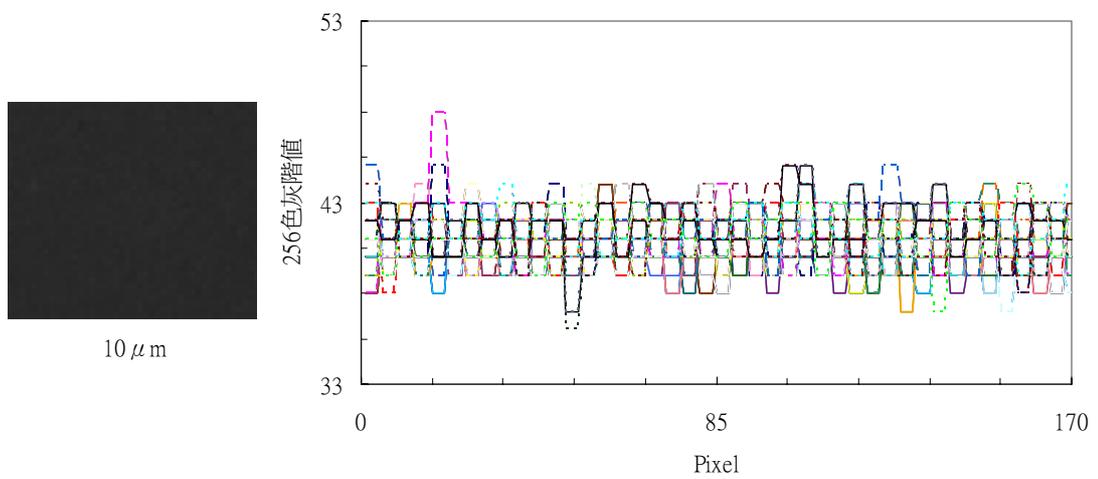
圖三十四 景深平面位置在螢光粒子上 7 $\mu\text{m}$



圖三十五 景深平面位置在螢光粒子上  $8\ \mu\text{m}$



圖三十六 景深平面位置在螢光粒子上  $9\ \mu\text{m}$



圖三十七 景深平面位置在螢光粒子上  $10\ \mu\text{m}$

圖十一為在顯微鏡視野的景深平面，導入雷射光但沒有放置任何螢光粒子時所拍攝的圖片，經由程式分析其 256 色灰階值的結果。可以發現即使沒有螢光粒子的情況下，分析結果仍有一定程度灰階值。這個結果來自於 CCD 所擷取的圖片本身即有一定程度的雜訊訊號，256 色灰階值不會完全為 0。(256 色灰階值，程式定義最低為 0，最高為 255。) 圖二十七為將螢光粒子利用 x,y,z 三軸移動平台調整至景深平面內，三軸移動平台在 z 軸方向的最小精度為 0.5 $\mu\text{m}$ ，實驗進行時每次位移為 1 $\mu\text{m}$ 。當螢光粒子的位置正好在景深平面時，可以看到最清晰的影像，如圖二十七所示。接著定義此位置為零點，每次位移 1 $\mu\text{m}$ ，上下移動螢光粒子的位置至影像模糊不清為止。圖十二至圖二十六為自零點往下移動到達 15 $\mu\text{m}$  時影像及模糊不清。圖二十八到圖三十七為自零點往上移動到 10 $\mu\text{m}$  時影像即模糊不清。利用程式輔助分析圖片可以發現，將螢光粒子自零點往上移動 7 $\mu\text{m}$ ，往下亦移動 7 $\mu\text{m}$  時，其噪訊比即明顯下降，上下移動超過 7 $\mu\text{m}$  時，其螢光粒子的訊號強度即減弱到與雜訊強度接近。因此我們估計其景深平面的厚度約為 14 $\mu\text{m}$ 。而實際使用 Insight 軟體分析時，在螢光粒子移動到零點上下各約 7 $\mu\text{m}$  以外時，即無法得到整齊而正確的速度向量。所得到的結果與經由程式分析圖片的結果接近，因此若要定義景深平面的厚度，可直接使用 Insight 軟體分析，並佐以程式的分析結果，來得到一個量化的景深厚度。

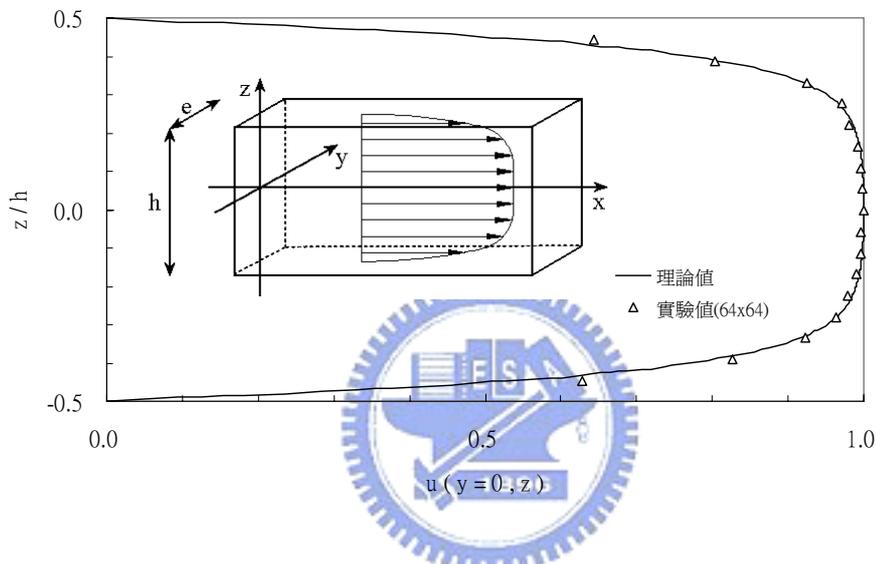


### 3.3 實驗設備的驗證

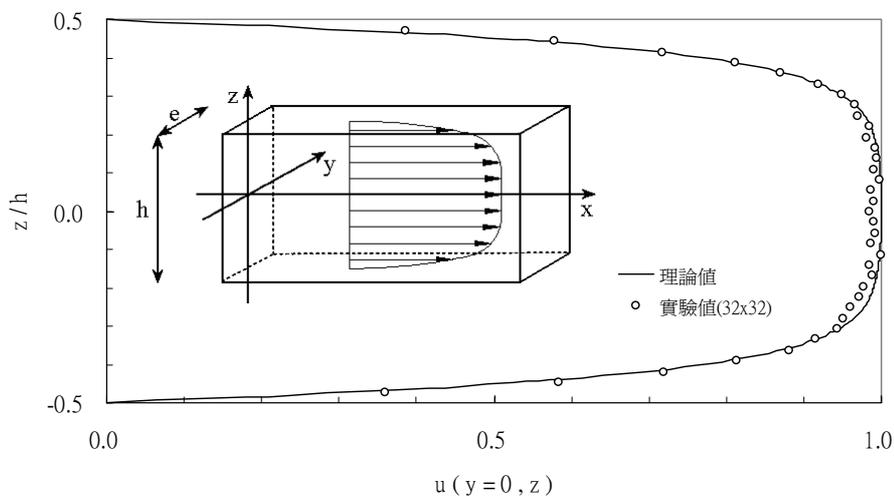
為了驗證實驗的誤差，本實驗設計製作一個簡單的流道，利用注射幫浦設定流場的體積流率，然後以 Hele-Shaw flow 的解析解與實驗數據結果的截面速度外型(Velocity Profile)做一比較，來驗證微粒子顯像測速儀準確性。驗證後所得到的結果如下：

本流道是利用半導體製程製作完成，流道的材質是 PDMS，並以一般的載玻片清洗後和其 Bonding 在一起。流道的寬度為 200 $\mu\text{m}$ ，深度 45 $\mu\text{m}$ ，並以注射幫浦設定 1.25 $\mu\text{l}/\text{min}$  的流量，以水力直徑為特徵長度計算後，其  $Re=0.1694$ ，並將景深平面的位置控制在流道深度的中間，以粒徑 1 $\mu\text{m}$  的螢光粒子作為流場追蹤粒子。圖三十八~圖四十九為  $\mu$ -PIV 拍攝後經過分析所得到的結果，圖三十八~圖四十，圖四十二~圖四十四以及圖四十六~圖四十八分別是不同的  $Re$  狀況下，利用不同大小的 Interrogation spot 來觀察其分析結果。我們可以發現 Interrogation spot size 到達 16 $\times$ 16 的時候，由於粒徑 1 $\mu\text{m}$  的螢光粒子就占了 7pixel，而 Interrogation spot size 16 $\times$ 16 代表每個分析格子的大小為 16pixel $\times$ 16pixel，所以為了解析靠近流道邊壁的低速流場，則流道中間流場速度較快的部分會因為螢光粒子的移動距離超出了 Interrogation spot，而造成分析的不準確。圖四十一則是將

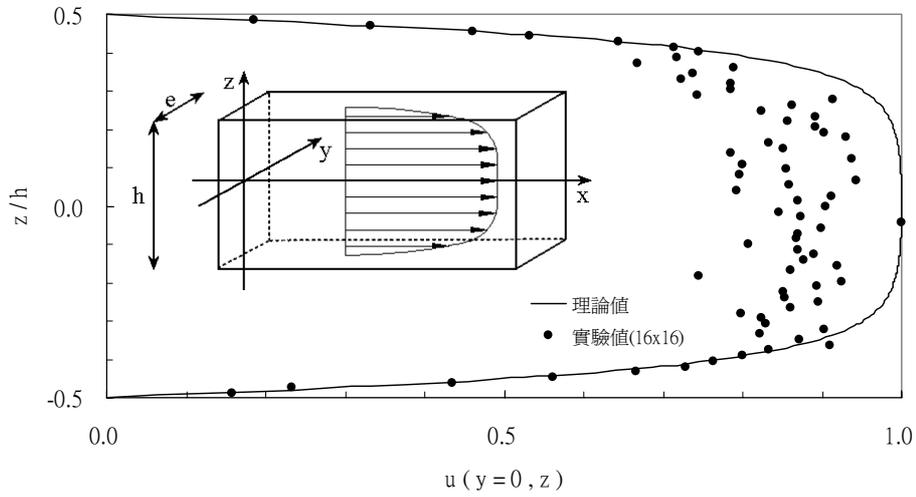
Interrogation spot  $16 \times 16$  不準確的資料去除，加上 Interrogation spot  $32 \times 32$  及  $64 \times 64$  的部份資料所綜整而成的流速分布圖。利用相同的方法圖四十五和圖四十九分別為  $Re=0.3387$  和  $Re=0.6774$  的綜整分析結果。與 Hele-Shaw flow 的解析解比較後發現，除了 Interrogation spot  $16 \times 16$  時流道中間的流速分析會偏離理論值，而當 Interrogation spot 為  $32 \times 32$  及  $64 \times 64$  時其分析結果均與理論值十分接近。為了解決 Interrogation spot size 在  $16 \times 16$  時分析結果的不準確，接下來的實驗將會以改變放大倍率及使用較小粒徑的螢光粒子來做測試，希望能將 Interrogation spot size 在  $16 \times 16$  時的準確性提高。



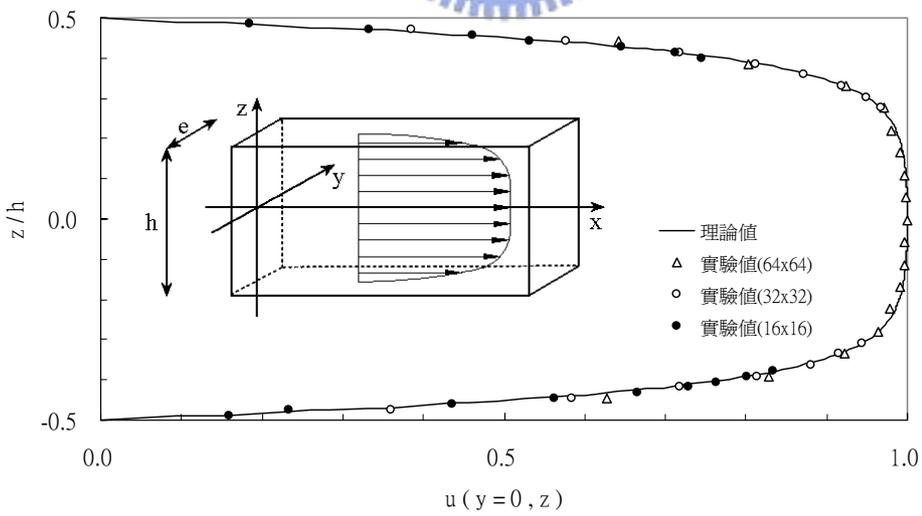
圖三十八  $Re=0.1694$  時 Interrogation spot size 為  $64 \times 64$  的分析結果



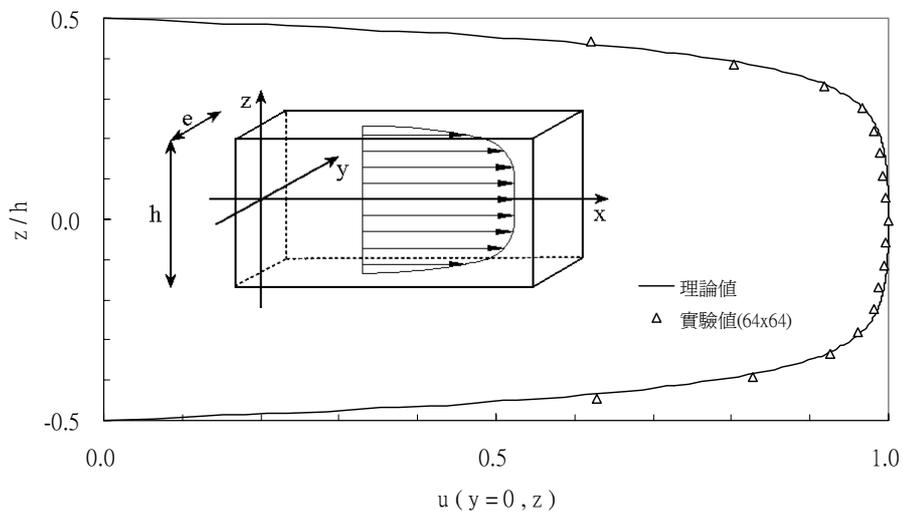
圖三十九  $Re=0.1694$  時 Interrogation spot size 為  $32 \times 32$  的分析結果



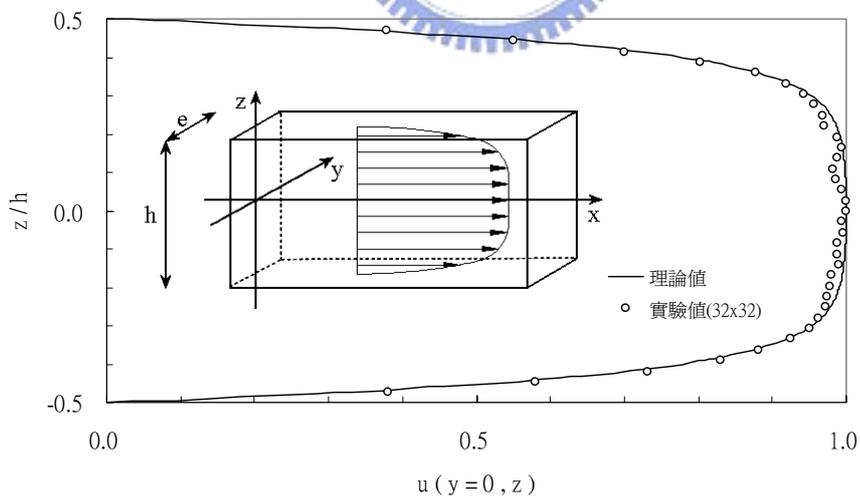
圖四十  $Re=0.1694$  時 Interrogation spot size 為  $16 \times 16$  的分析結果



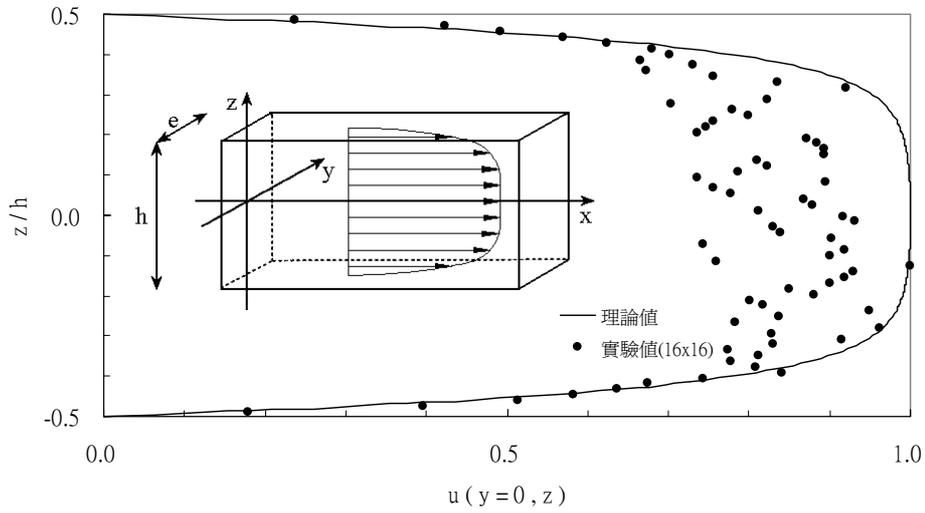
圖四十一  $Re=0.1694$  時的綜整分析結果



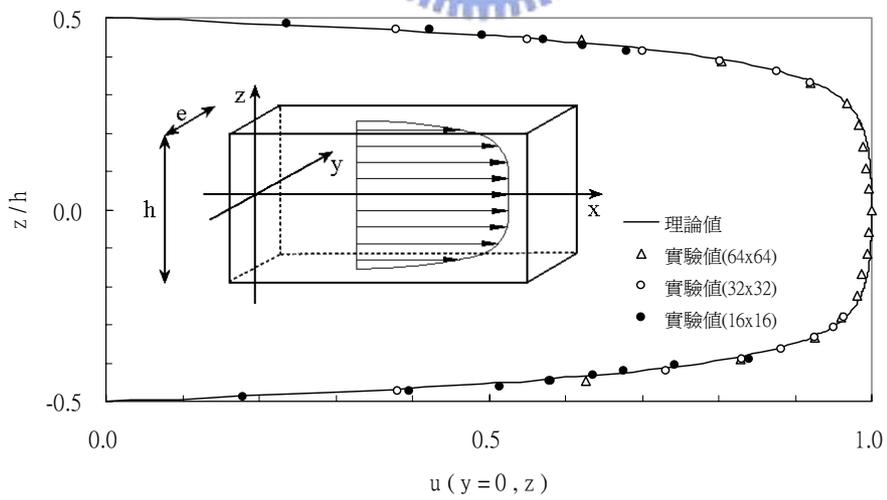
圖四十二  $Re=0.3387$  時 Interrogation spot size 為  $64 \times 64$  的分析結果



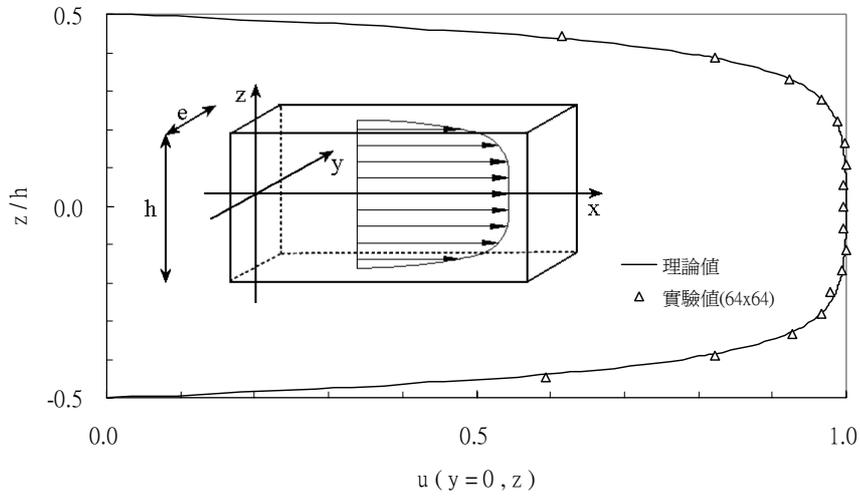
圖四十三  $Re=0.3387$  時 Interrogation spot size 為  $32 \times 32$  的分析結果



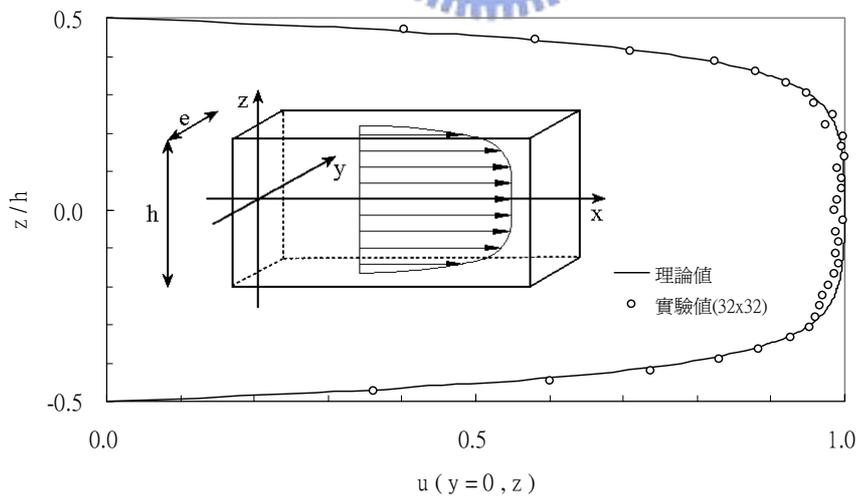
圖四十四  $Re=0.3387$  時 Interrogation spot size 為  $16 \times 16$  的分析結果



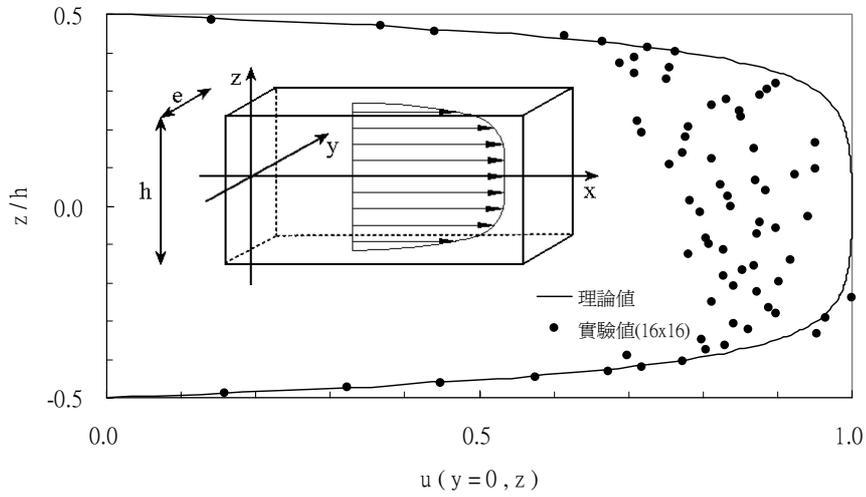
圖四十五  $Re=0.3387$  時的綜整分析結果



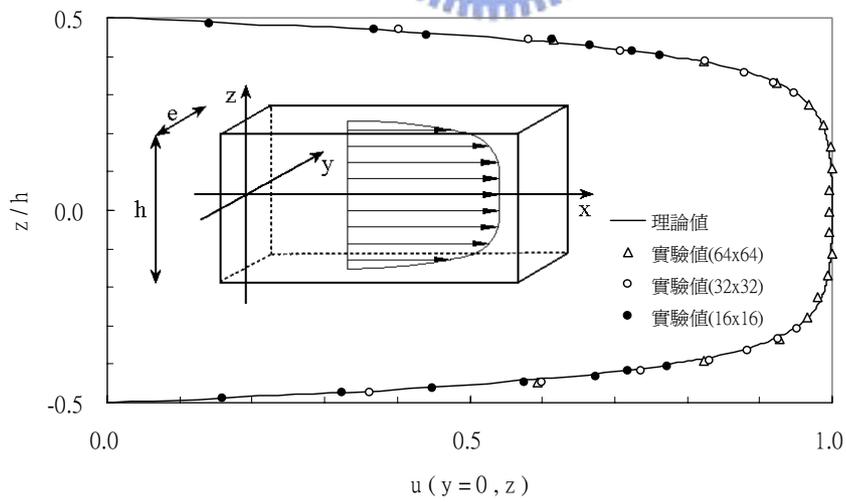
圖四十六  $Re=0.6774$  時 Interrogation spot size 為  $64 \times 64$  的分析結果



圖四十七  $Re=0.6774$  時 Interrogation spot size 為  $32 \times 32$  的分析結果

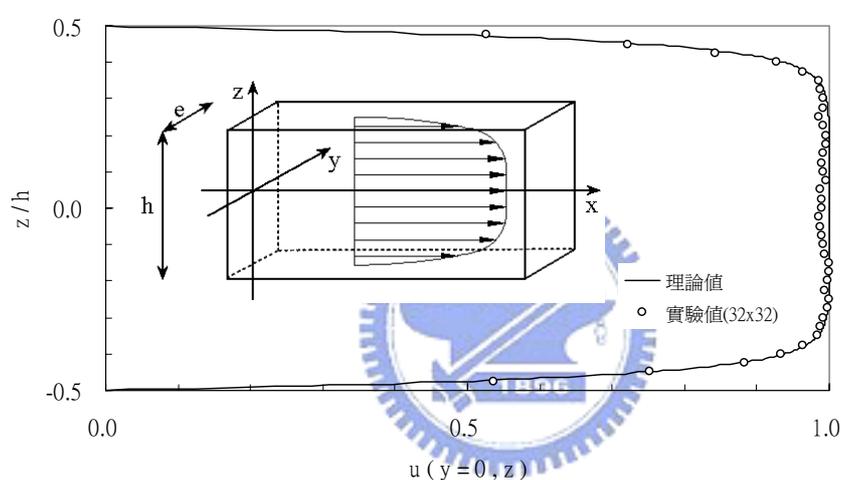


圖四十八  $Re=0.6774$  時 Interrogation spot size 為  $16 \times 16$  的分析結果

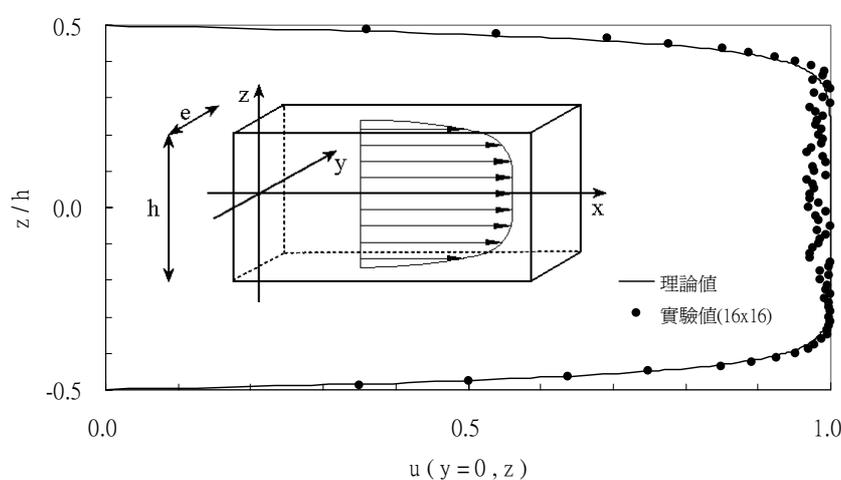


圖四十九  $Re=0.6774$  時的綜整分析結果

為了提高  $\mu$ -PIV 系統在 Interrogation spot size 為  $16 \times 16$  時分析結果的準確性，我們降低放大倍率及螢光粒子的粒徑，希望螢光粒子的大小可以占較少的 Pixel 數。實驗用的流道寬度為  $400 \mu\text{m}$ ，流道深度為  $45 \mu\text{m}$ ，流量控制在  $1.25 \mu\text{l}/\text{min}$  此時  $Re: 0.0932$ 。當流道寬度變為  $400 \mu\text{m}$ ，放大倍率也跟著降低，並將螢光粒子的粒徑改為  $0.7 \mu\text{m}$  時，螢光粒子的大小只占了 1 至 2 個 Pixel 之間，比較圖五十與圖三十九、圖四十三、圖四十七可以發現，讓螢光粒子占的 Pixel 數降低（圖五十），可以得到更好的分析結果。而做了這樣的調整後，Interrogation spot size 為  $16 \times 16$  時（圖五十一），其分析結果的準確性也大為提高。（與圖四十、圖四十四、圖四十八比較）

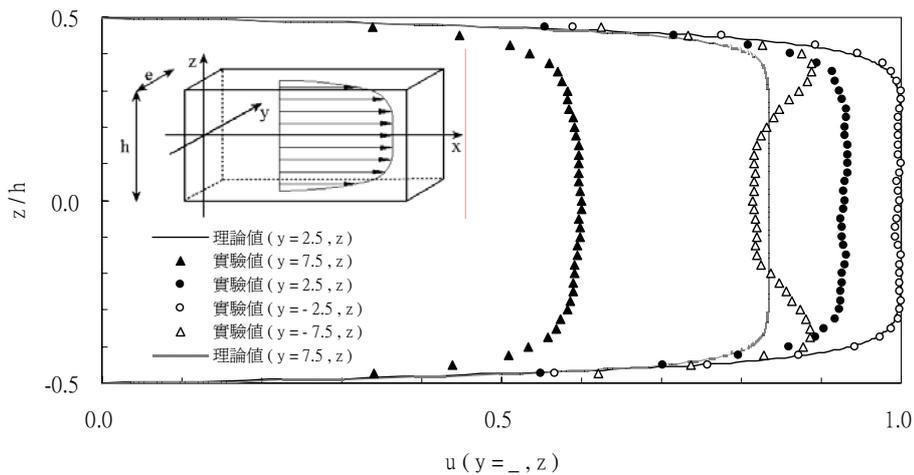


圖五十  $Re=0.0932$  時 Interrogation spot size 為  $32 \times 32$  的分析結果

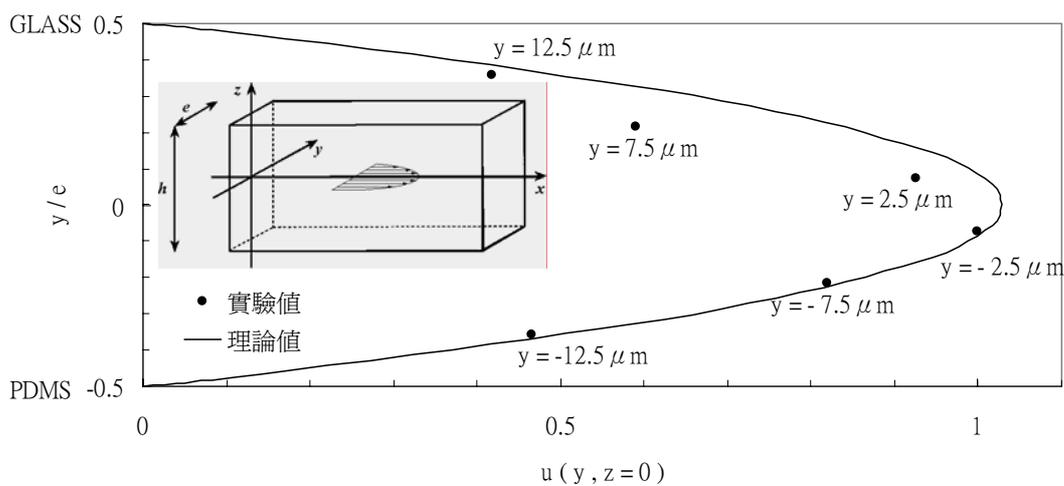


圖五十一  $Re=0.0932$  時 Interrogation spot size 為  $16 \times 16$  的分析結果

當我們選用  $0.7\mu\text{m}$  粒徑的螢光粒子時，同樣利用控制雷射光的強度來調整景深的厚度。因為這時候螢光粒子的粒徑更小了，所放出的螢光強度也跟著降低，所以在配合調整雷射光的強度後，可以獲得更小的景深厚度。經過分析和量測，可以將景深厚度縮小至約  $10\mu\text{m}$ 。利用  $10\mu\text{m}$  的景深量測不同深度下的流速截面則可以分析流道不同深度下的速度場分布情形。如圖五十二與圖五十三所示。

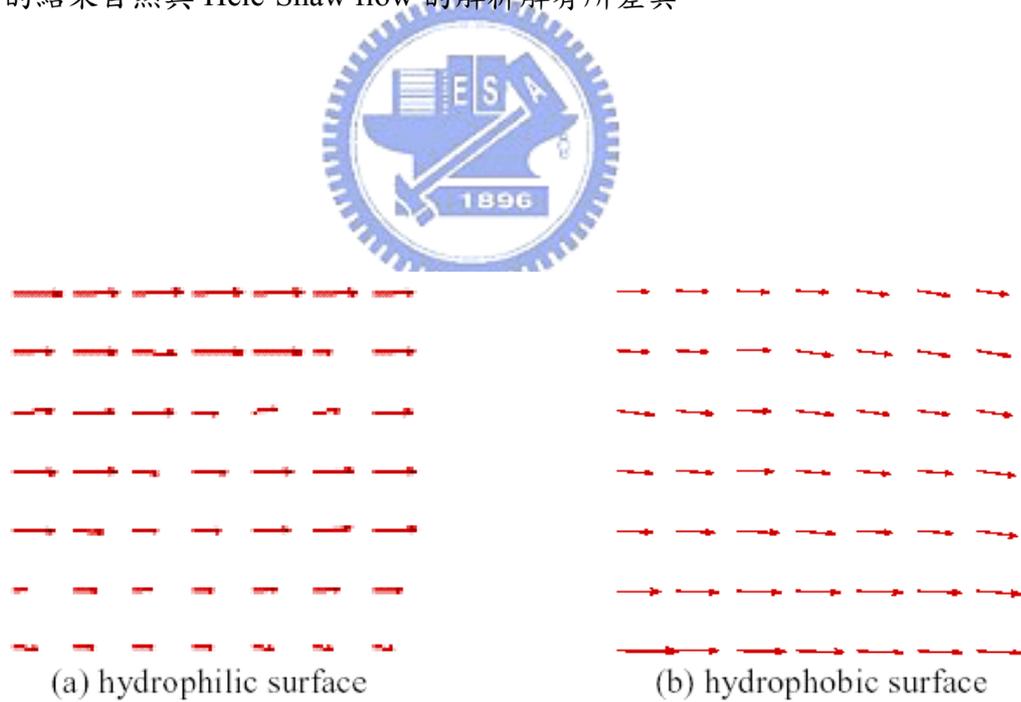


圖五十二 GLASS-PDMS 流道不同深度下的速度向量分布情形 (XZ 平面)



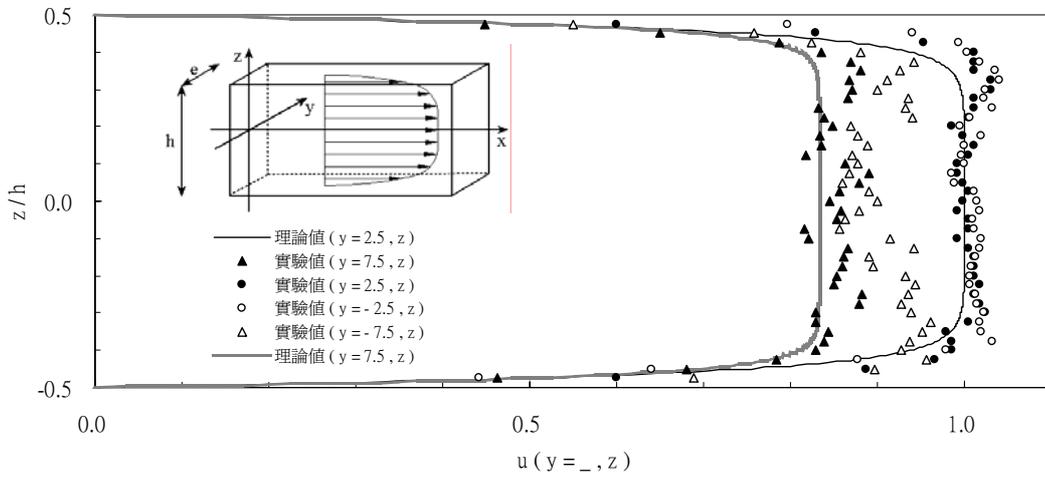
圖五十三 GLASS-PDMS 流道不同深度下的速度分布情形 (XY 平面)

從圖五十二與圖五十三中發現，在 XY 平面的分析結果與 Hele-Shaw flow 的解析解有所出入。會造成這樣結果的原因可參考 S. Kim, H. J. Lee 和 J. Y. Yoo 在 2003 年韓國 PIV 年會的發表的文章 **Micro-PIV measurement of the fluid motion near the meniscus in the hydrophilic and hydrophobic capillaries**[14]。文章內容最主要是敘述他們利用  $\mu$ -PIV 系統拍攝到親水性和厭水性流道邊壁的速度向量分布情形，如圖五十四所示。由圖中可以看出，親水性表面的流體流速狀況與不滑動邊界條件下的狀況類似，厭水性表面流體的流速狀況與滑動邊界條件下的情形相近。由此可知在親水性表面的流體會因為不滑動邊界條件的影響而減速，厭水性表面的流體則為滑動邊界條件，不會減速。因為本實驗所使用的流道上層為玻璃，下層及兩邊側壁為經過氧電漿處理的 PDMS，玻璃為親水性表面，PDMS 經過氧電將處理後為較親水性，但親水程度不如玻璃表面。所以在圖五十一中可以發現，靠近 PDMS 表面的流體有較大的速度向量，靠近玻璃表面流體的速度向量則較小。因為實驗中流道本身的邊界條件和 Hele-Shaw flow 的解析解不同（Hele-Shaw flow 解析解的邊界條件為假設流道四周皆為不滑動邊界），所以  $\mu$ -PIV 量測所得到的結果自然與 Hele-Shaw flow 的解析解有所差異。

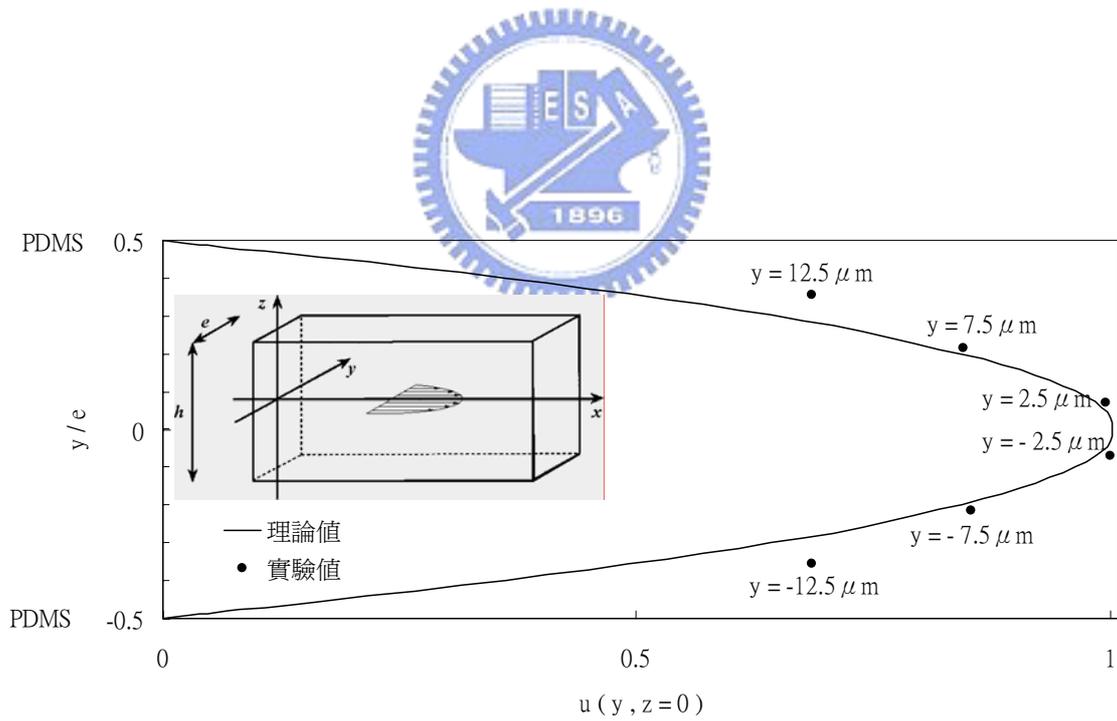


圖五十四 (a) 親水性及 (b) 厭水性表面速度向量分布情形[14]

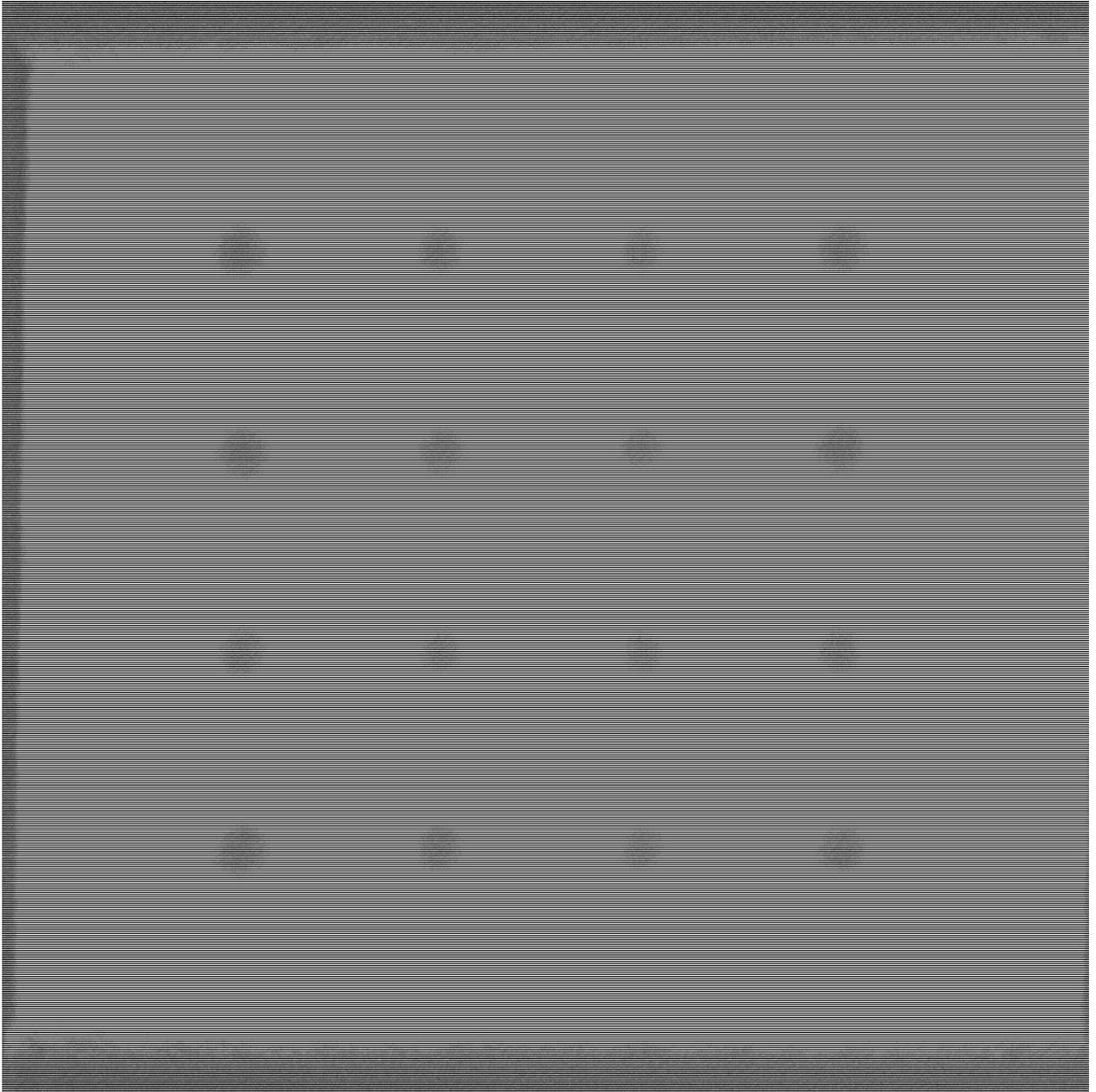
為了驗證利用較薄的景深厚度來量測流體在深度方向（XY 方向）的流速分部情形是否準確，因次在流道製作上特別將流道的四周邊壁皆使用 PDMS 製作，使得流道四周的邊界條件均相同，而礙於製程上能力的不足，因此本實驗室暫時無法製作四邊皆為玻璃表面的流道，原因是因為無法處理玻璃與玻璃之間的 Bonding，不過這個困難已逐漸在克服當中，本論文暫時先不討論是否四周皆為親水性表面（玻璃表面）流道，在深度上的速度向量分布，利用較薄的景深（ $10\mu\text{m}$ ）來量測的準確性。而先就較親水性表面（經過氧電將處理的 PDMS 表面）做一討論。由圖五十六可以看出， $10\mu\text{m}$  景深厚度下所量測出來的速度向量分布情形，在流道的深度的中間部分較接近 Hele-Shaw flow 的解析解。不過靠近邊壁的流體流速則大於解析解。初步揣測造成此結果的原因是因為氧電將處理過後的 PDMS 表面，其親水程度並不及玻璃，更沒有解析解中所假設的不滑動邊界。所以這可能是邊界的流體速度大於解析解的原因。另外， $10\mu\text{m}$  景深厚度要解析  $35\mu\text{m}$  深的流道尚嫌不足。而流體靠近邊壁的速度變化較大，所以  $10\mu\text{m}$  的景深厚度所量到的平均流速並不能代表解析解上單點位置的流速。以上兩個原因皆有可能造成如圖五十六的結果。若是玻璃邊界的流道在製程上可以製作，以及可以將景深厚度再縮小，則日後可再對此一問題做更深入的研究及探討。圖五十五可以看到分析所得到的結果誤差較大，這是因為在拍攝陽離子交換樹脂在直流電場下的微小渦流流場時，過亮的螢光強度使  $\mu\text{-PIV}$  影像擷取系統的 CCD 受損，CCD 受過強度光線的照射後失去一半的畫素。在水平方向每間隔一個 Pixel 的單位感光元件均失去作用，所以量測所得到的結果也跟著較不準確。CCD 受損後所拍攝的影像如圖五十七所示。



圖五十五 PDMS-PDMS 流道不同深度下的速度分布情形 (XZ 平面)



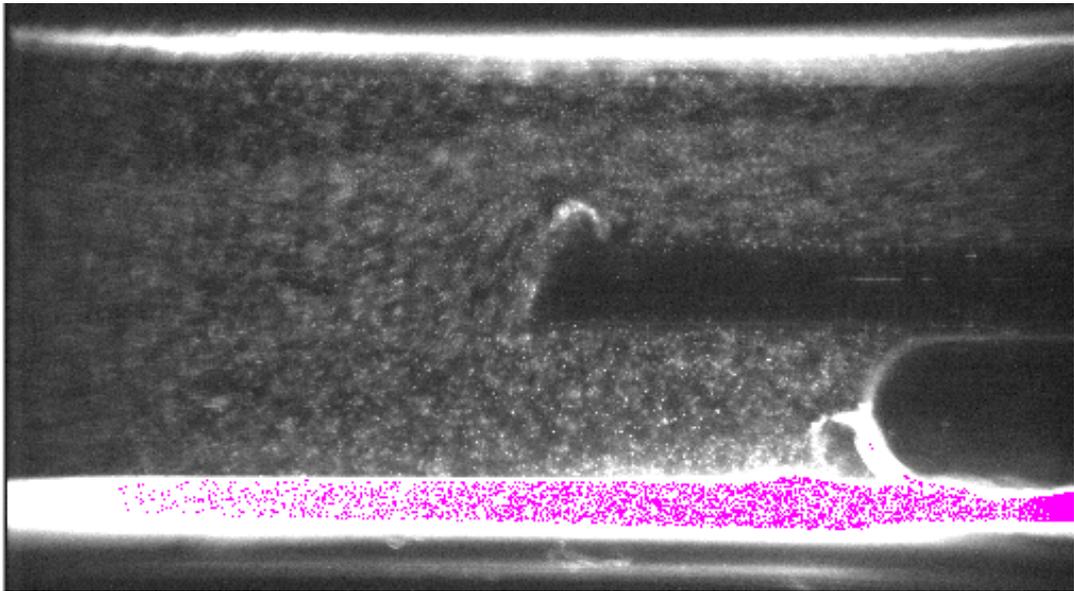
圖五十六 PDMS-PDMS 流道不同深度下的速度分布情形 (XY 平面)



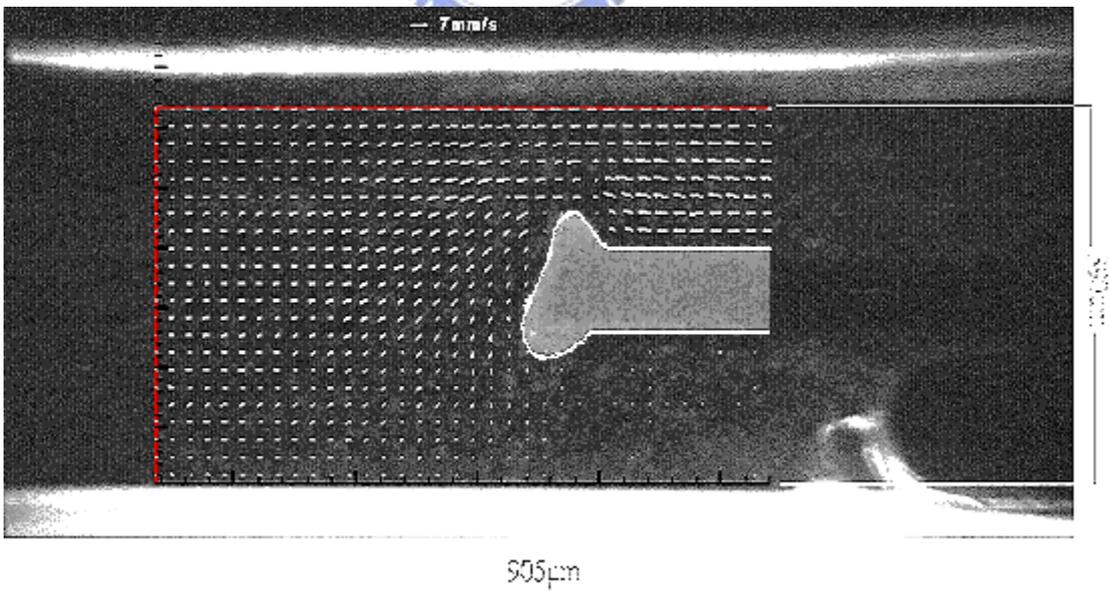
圖五十七  $\mu$ -PIV 系統 CCD 受損後所拍攝的影像

### 3.4 微粒子顯像測速儀初步量測分析結果

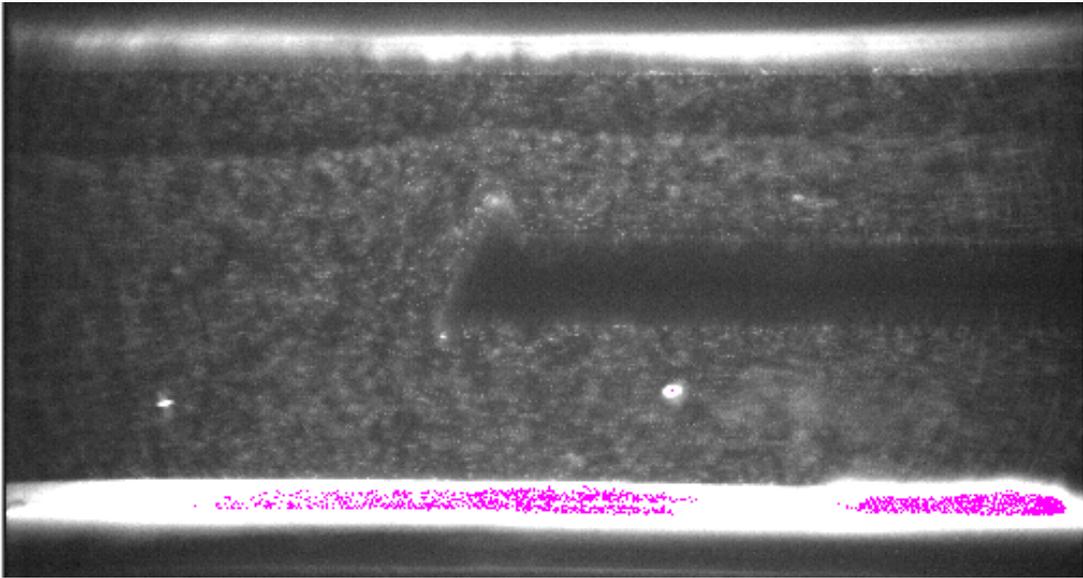
在實驗設備已架設完成後，為了測試設備做動是否正常，因此利用線徑  $63\mu\text{m}$  的 polymer 線材來當作流道的左右邊界，並以厚薄規來控制流道深度及寬度，並使用載玻片作為流道的上下邊界，製作一些簡單的流道以供量測測試。此簡易流道的深度控制在  $50\mu\text{m}$ ，寬度約  $200\mu\text{m}$ 。由於較深的流道會有較大的背景雜訊，過淺的流道，流體又會受到邊界層的影響，在做文獻回顧時，發現一般做微流道研究的流道深度大約在  $50\mu\text{m}$  上下，所以本研究的初步測試也將流道深度以厚薄規控制在  $50\mu\text{m}$ 。日後待量測技術更加成熟後再討論不同流道深度，邊界曾對流場的影響。另外，由於微流體系統的元件多半以矽微基材，因此利用微機電製程製技術，同樣使用矽為基材，作一個噴嘴流道來作為模擬日後拍攝微流體元件的樣品。在這期間也試著開始歸納一些有關於量測控制的參數。整個測試結果，所有系統運作正常，也利用微粒子顯像測速儀拍攝到微流場的影像，並成功的使用軟體分析出流場的速度向量分佈情形。下列將呈現微粒子顯像測速儀所拍攝到的流道外形及速度向量分佈情形。圖五十八至圖六十一為利用 polymer 線材所製作的簡易流道，圖五十八和圖五十九是當時驗進行時，由於不小心使氣泡流入流道內，而阻塞了流道，圖五十八的右下角即可清楚的看見氣泡的位置。圖六十為清除氣泡後的流道外形。圖六十二則為使用微機電製程技術，以矽為基材所製作的噴嘴流道。圖六十二影像中垂直部分的尺寸為  $620\mu\text{m}$ ，噴嘴喉部的尺寸約  $90\mu\text{m}$ 。而圖五十九、圖六十一、圖六十三則分別為各個流道所分析出來的速度向量分佈情形。



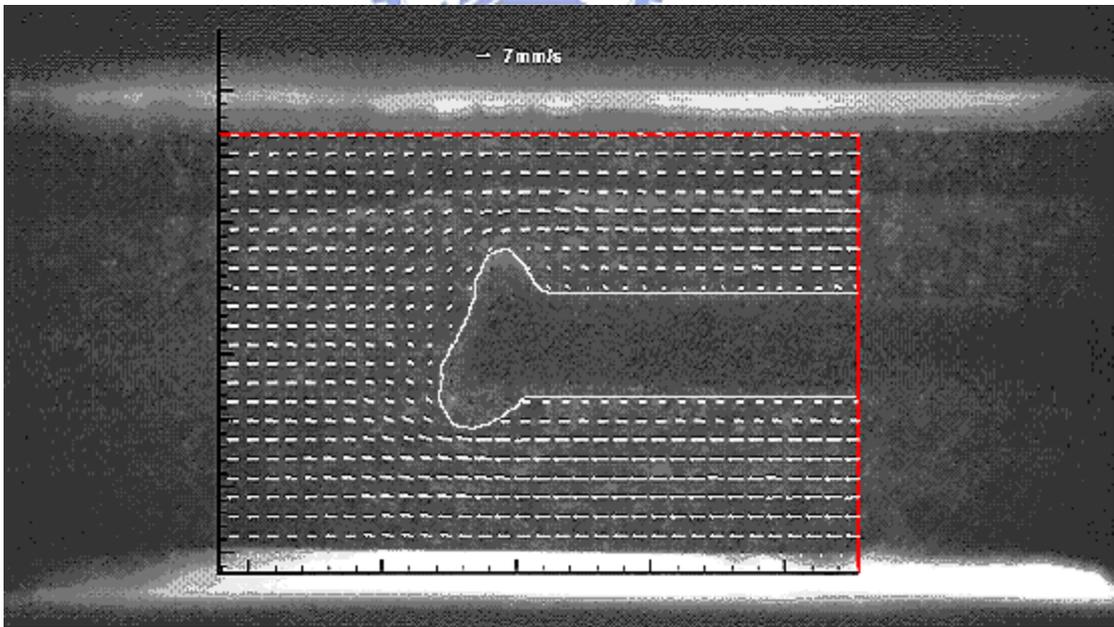
圖五十八 簡易流道（受氣泡阻塞）



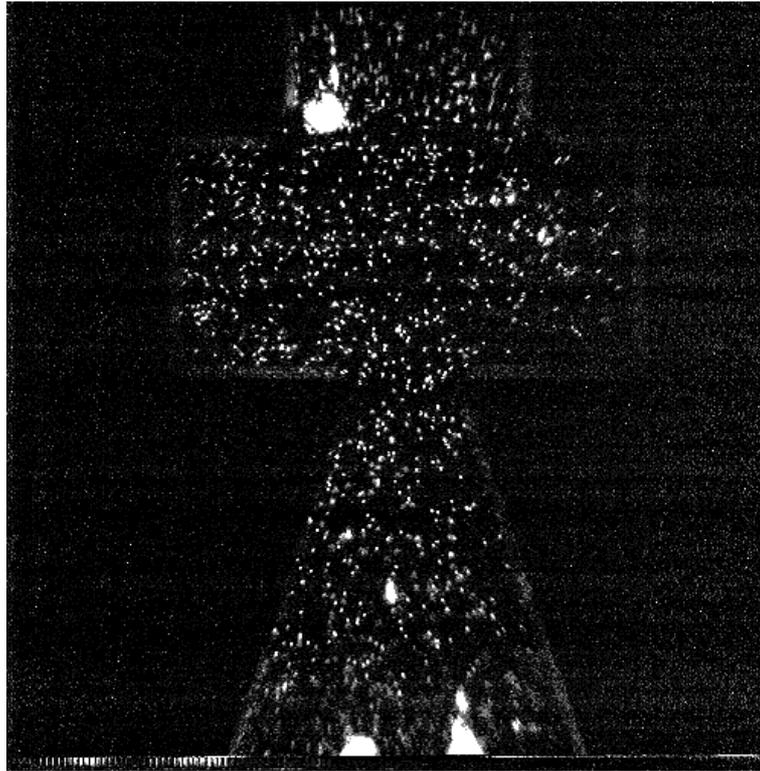
圖五十九 簡易流道（受氣泡阻塞）速度向量分佈圖



圖六十 簡易流道（未受氣泡阻塞）



圖六十一 簡易流道（未受氣泡阻塞）速度向量分佈圖

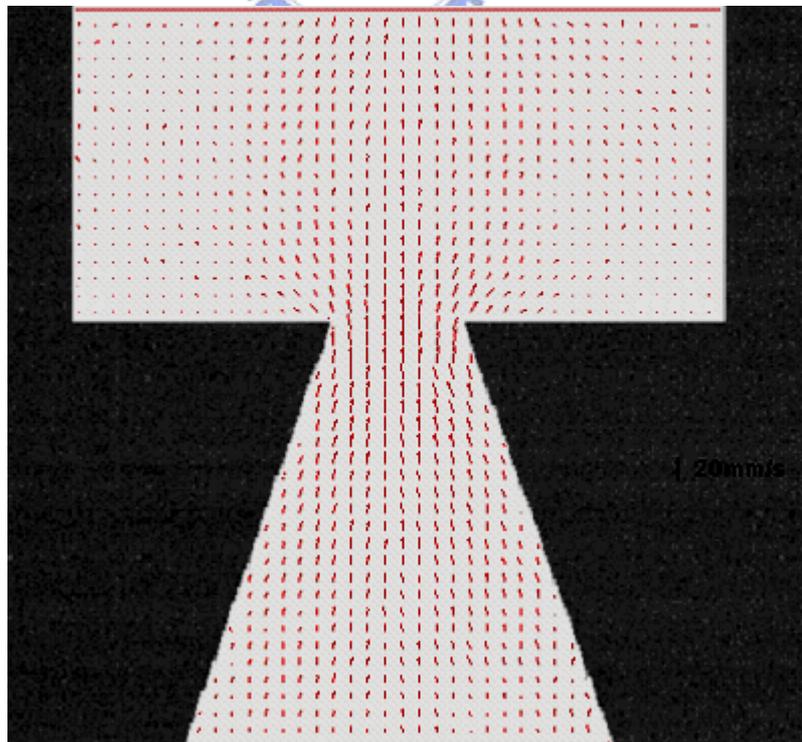


620 $\mu$ m

610 $\mu$ m



圖六十二 噴嘴流道



20mm/s

圖六十三 噴嘴流道速度向量分布圖

### 3.5 微粒子顯像測速儀應用於微流場量測分析

本實驗在成功的架設完成  $\mu$ -PIV 系統後，經過初步的量測分析以及許多拍攝上的經驗後，對整個  $\mu$ -PIV 系統已有大略的掌握。再透過驗證系統的準確性時，不斷的調整測試各項參數後，終於可依各種經驗上的累積，發揮  $\mu$ -PIV 系統對流場流速量測的能力。在做系統準確性驗證的過程，發現要使用  $\mu$ -PIV 系統量測較佳的數據結果需要注意下列各點：

- (1) 盡量讓螢光粒子的影像大小占較少的 Pixel 數。而經過測試後發現，如果能調整放大倍率以及搭配適合的螢光粒子粒徑，讓螢光粒子的影像大小只占一個 Pixel 數時（最少需要占一個 Pixel），則實驗數據可以得到較高的解析度及較好的分析結果。
- (2) 螢光粒子的濃度是否適當要視不同粒徑大小的螢光粒子、不同的放大倍率及不同的景深厚薄而定，利用  $\mu$ -PIV 系統檢視所觀測到的流場內，螢光粒子濃度的影像，恰當的螢光粒子濃度要以可以觀察到相鄰的每一顆螢光粒子，而螢光粒子的影像彼此間盡量以不要重疊為原則。在此一原則下，螢光粒子的濃度越高越好。
- (3) 盡量讓景深平面與要量測的流場平面有較佳的平行度，如此一來可以獲得較正確的流場流速。

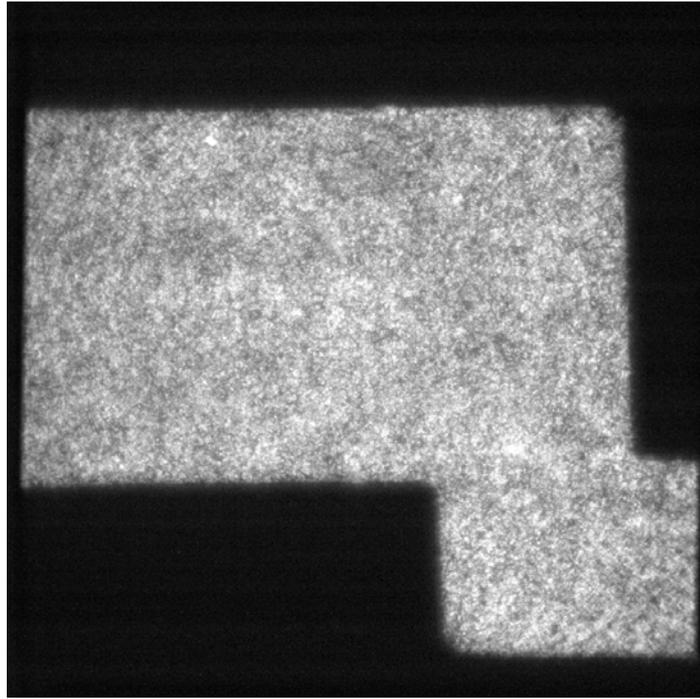
利用上述所測試各項參數的經驗，接下來本研究要將  $\mu$ -PIV 系統應在各種不同的微流場，包括量測蛇狀流道出口端、V 型流道出口端、4x4 圓柱矩陣流道、微小噴嘴流道以及直流電場下陽離子交換樹脂附近的微小渦流流場。希望可以成功的量測及分析各種不同流場下，流體的速度向量分布情形。

### 3.5.1 蛇狀流道出口端的流場速度向量分佈

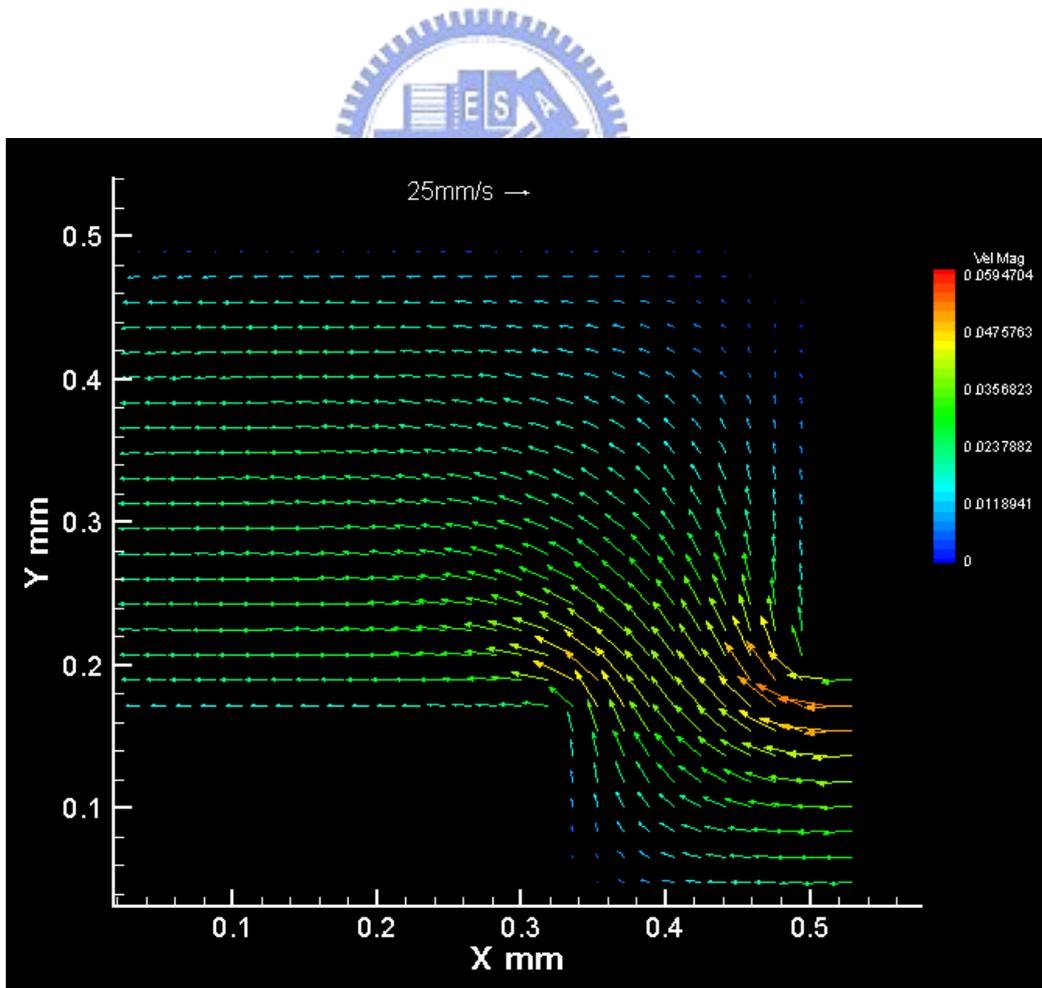
同樣是利用 PDMS 為材料，使用載玻片 Bonding，製作一個蛇狀流道，流道簡圖如下圖六十四所示。圖六十四中右端為入口端，流道寬度為  $225\mu\text{m}$ ，左端為出口端，流道寬度為  $300\mu\text{m}$ 。蛇狀部分的流道寬度為  $150\mu\text{m}$ 。整體流道深度約為  $45\mu\text{m}$ 。利用注射幫補控制流場流量為  $10\mu\text{l}/\text{min}$ 。以出口端的流道水力直徑為特徵長度，計算其  $Re=0.9621$ 。圖六十五為蛇狀流道出口端的  $\mu$ -PIV 影像圖，圖六十五影像中，垂直部分尺寸為  $560\mu\text{m}$ 。圖六十六為 Interrogation spot  $64\times 64$  下。蛇狀流道出口端的  $\mu$ -PIV 分析結果，圖六十七為將 Interrogation spot 設為  $32\times 32$  下，較高解析度的流場速度向量分佈圖。從圖六十六及圖六十七中可以發現，在  $90^\circ$  彎角部分的流場具有較大的速度梯度。靠近凹入的  $90^\circ$  彎角深處，流速幾乎接近於 0。而靠進凸出的  $90^\circ$  度角部份具有較高的流速。由於微小尺度下雷諾數很低，所以流場狀況均為層流。圖六十八為蛇狀流道出口端的流線圖，可以看到在出口端  $90^\circ$  彎角部分並沒有巨觀流場中的渦流出現。圖六十九為其渦度圖。



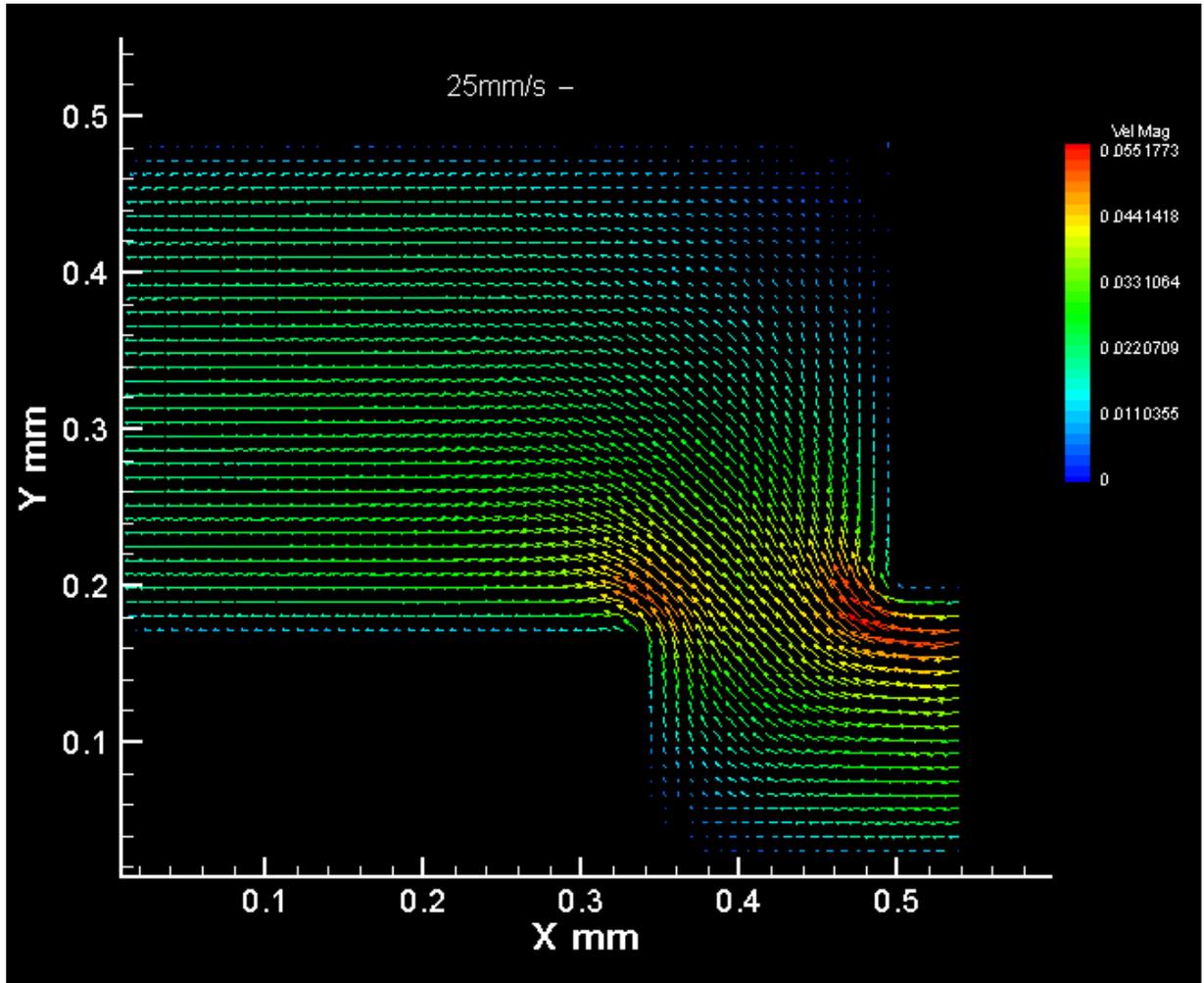
圖六十四 蛇狀流道的示意圖[19]



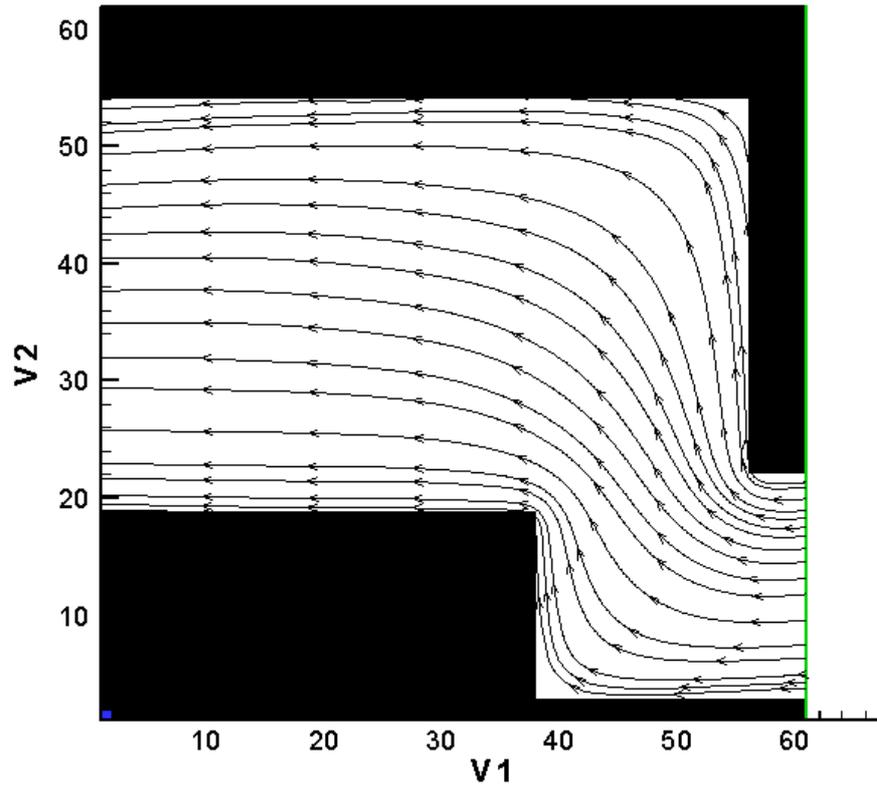
圖六十五 蛇狀流道出口端的  $\mu$ -PIV 影像圖



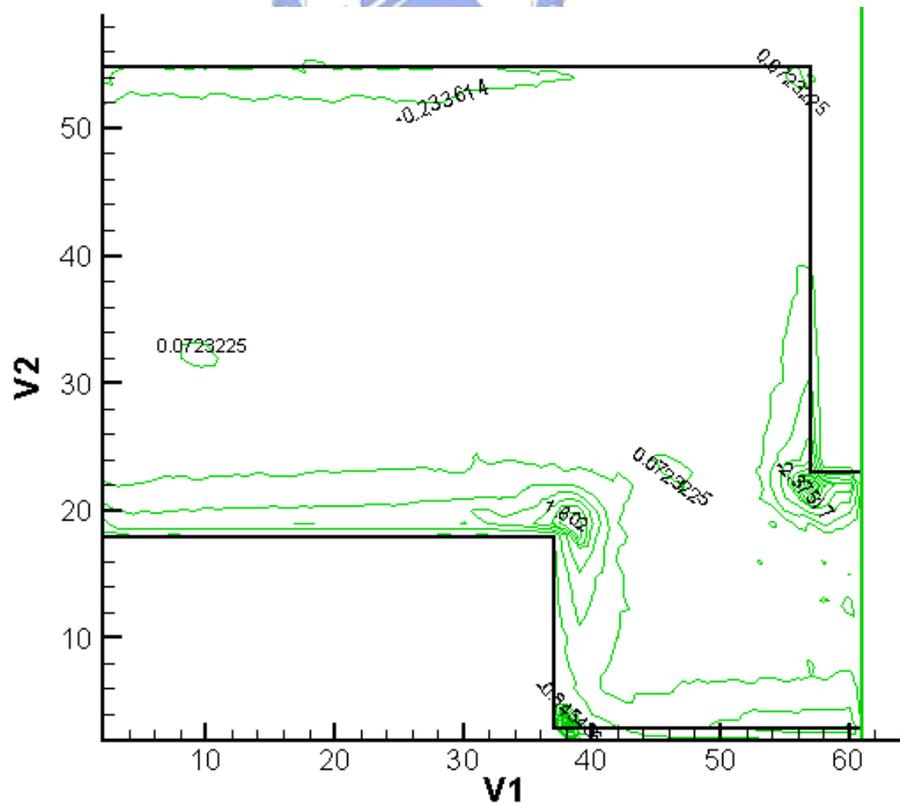
圖六十六 蛇狀流道出口端的  $\mu$ -PIV 分析結果



圖六十七 提高解析度後蛇狀流道出口端的 $\mu$ -PIV分析結果



圖六十八 蛇狀流道出口端的流線圖



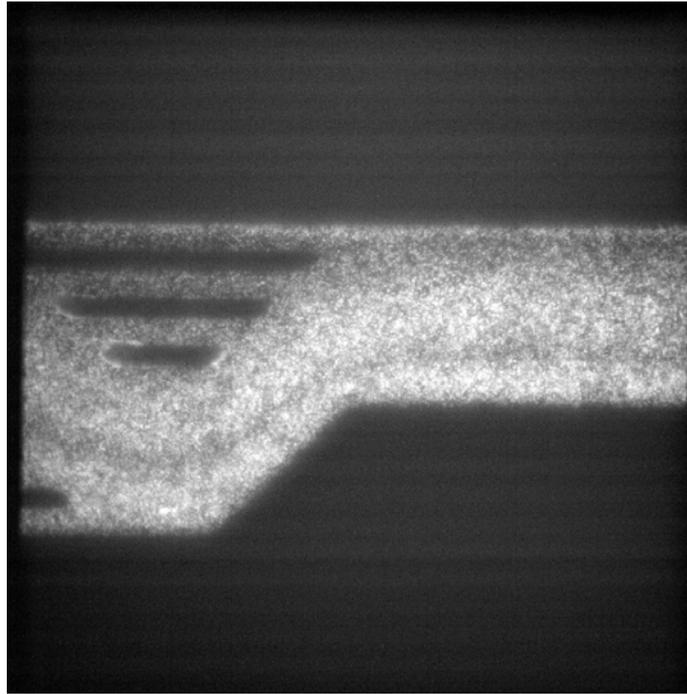
圖六十九 蛇狀流道出口端的渦度圖

### 3.5.2 V 型流道出口端的流場速度向量分佈

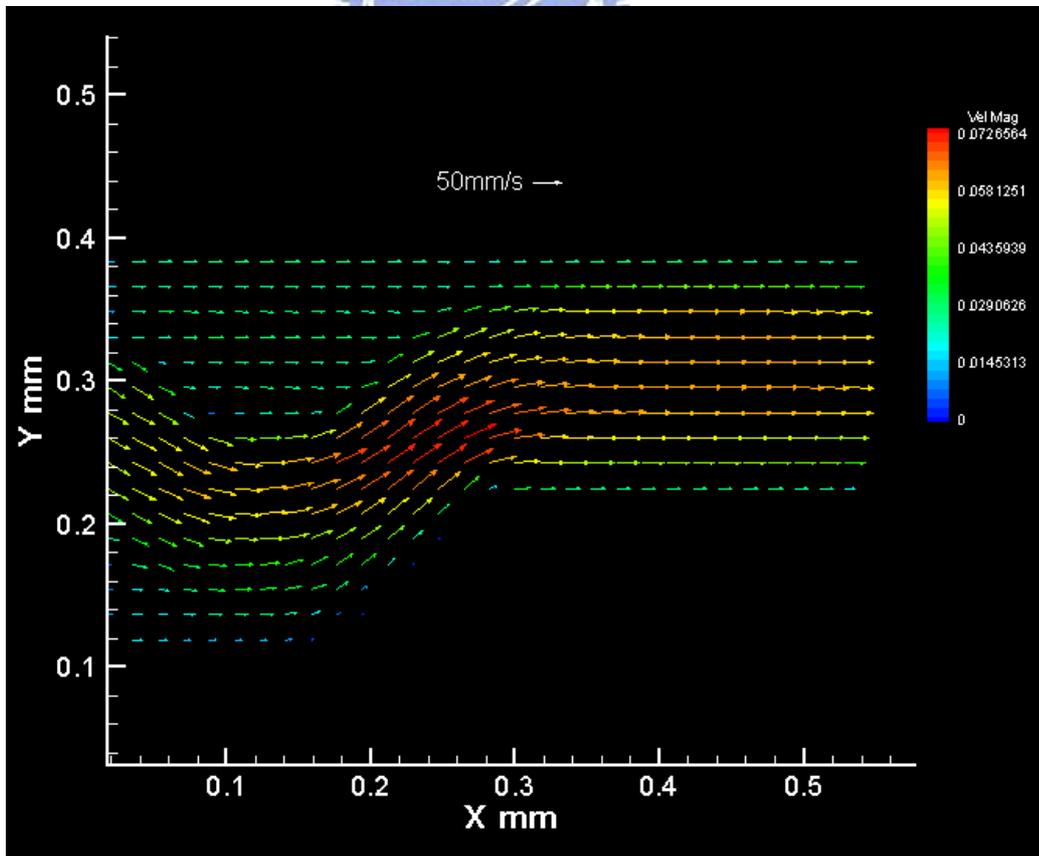
圖七十為 V 型流道示意圖，左端為入口端，流道寬度為  $300\mu\text{m}$ 。右邊為出口端，流道寬度為  $225\mu\text{m}$ 。中間 V 型流道部分，主流道寬度為  $150\mu\text{m}$ ，細小的支流部分寬度為  $30\mu\text{m}$ ，整體流道深度亦約  $45\mu\text{m}$ 。一樣控制流量為  $10\mu\text{l}/\text{min}$ ，以流道出口端的水力直徑為特徵長度，計算其  $\text{Re}=1.2294$ 。圖七十一為 V 型流道出口端的  $\mu\text{-PIV}$  影像圖，圖七十一影像中，垂直部分尺寸為  $860\mu\text{m}$ 。圖七十為 Interrogation spot  $64\times 64$  下。V 型流道出口端的  $\mu\text{-PIV}$  分析結果，圖七十三為將 Interrogation spot 設為  $32\times 32$  下，較高解析度的流場速度向量分佈圖。從圖七十二及圖七十三中可以發現，寬度為  $30\mu\text{m}$  的細小支流流道部分，由於其阻力較大，所以流體不易流入，流體的流速相對較小。主流道  $150\mu\text{m}$  的部分阻力較小，所以大部分流體均在此流道內流動，流速相對較快。流道凹角處內部的速度較低，凹角處具有較大的速度梯度。靠近流道內部凸出部分的流體具有較快的流速。由於微小尺度下雷諾數很低，所以流場狀況均為層流。



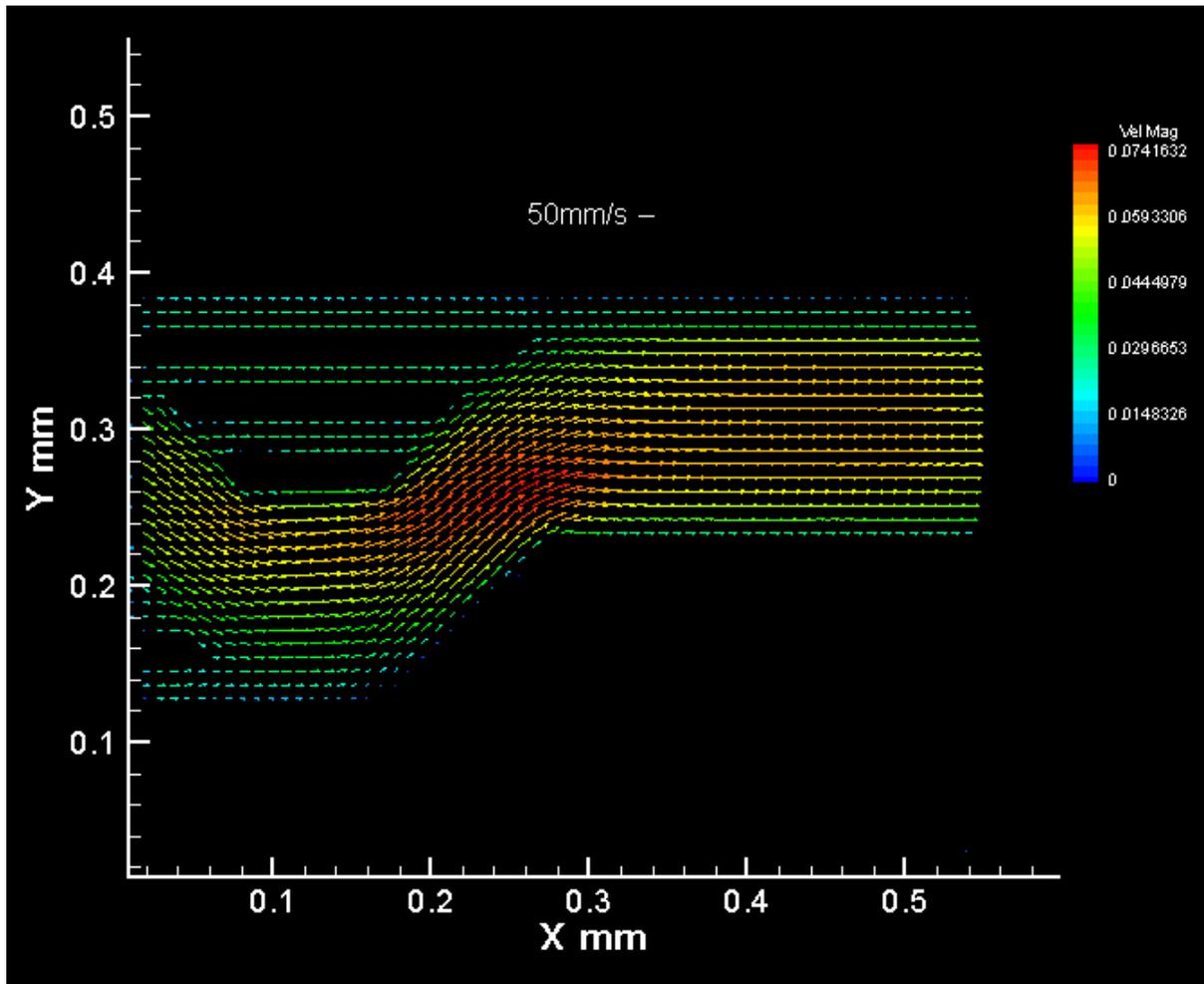
圖七十 V 型流道的示意圖[18]



圖七十一 V 型流道出口端的  $\mu$ -PIV 影像圖



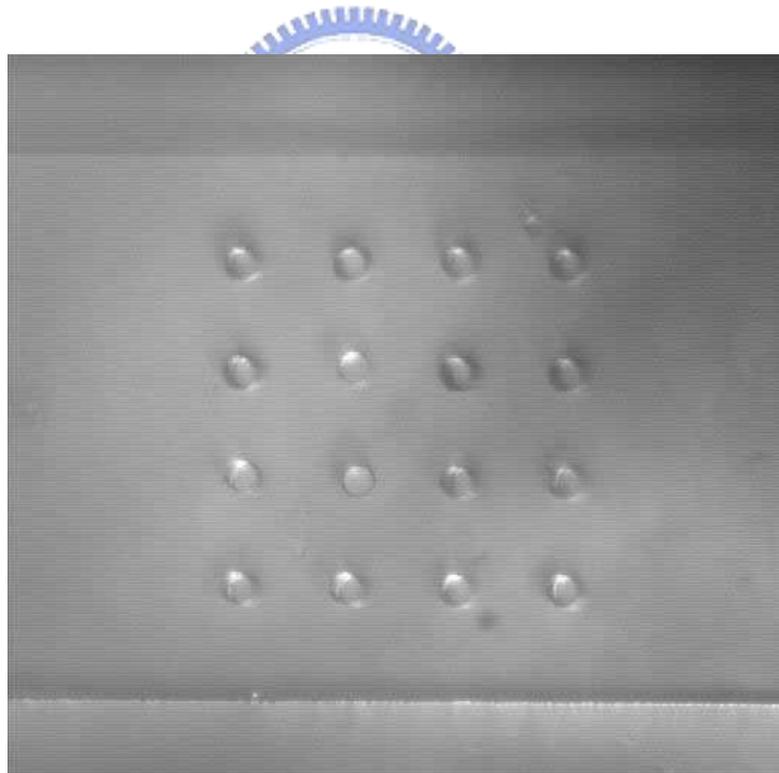
圖七十二 V 型流道出口端的  $\mu$ -PIV 分析結果



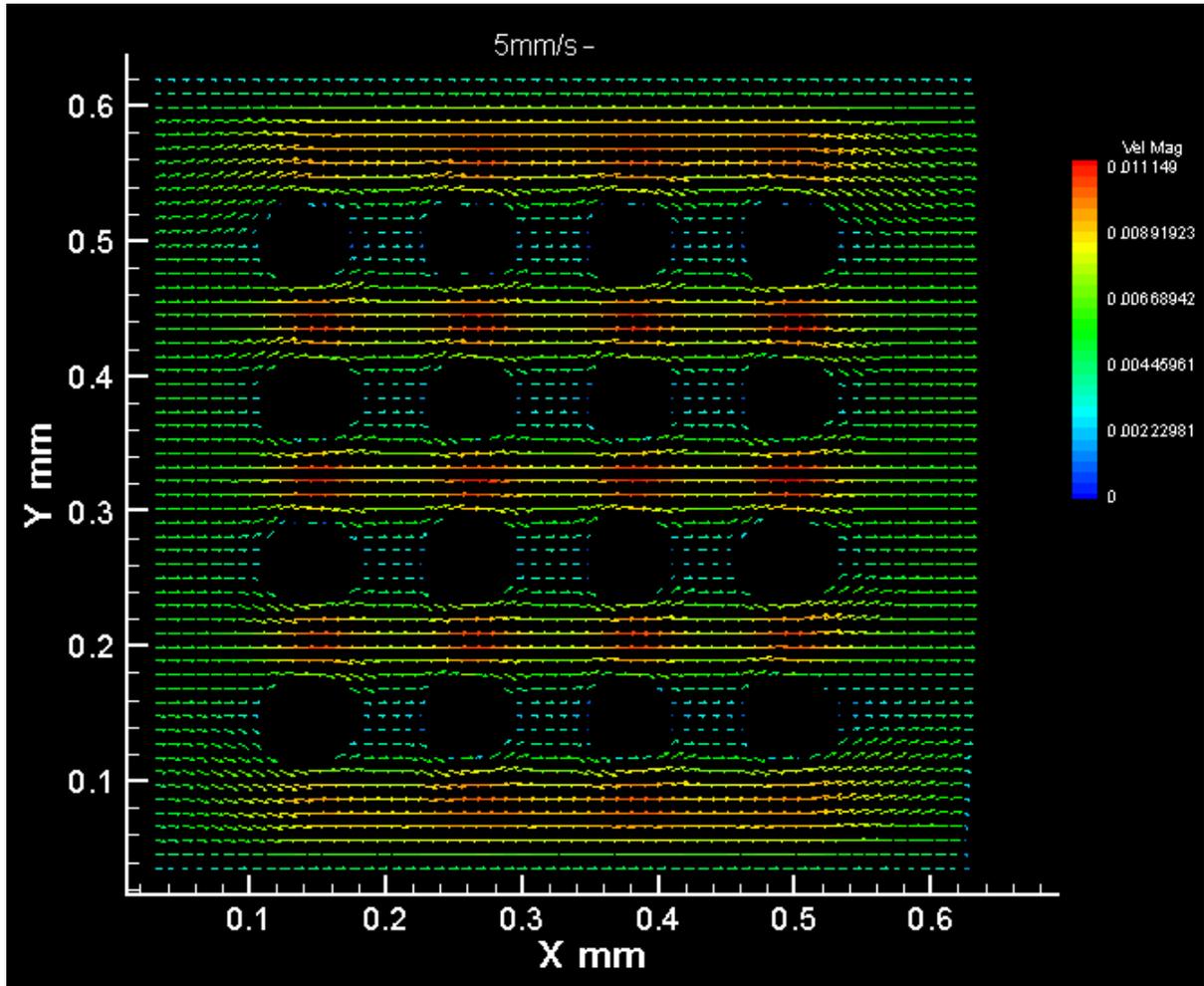
圖七十三 提高解析度後 V 型流道出口端的  $\mu$ -PIV 分析結果

### 3.5.3 4x4 圓柱矩陣流道的流場速度向量分佈

圖七十四為 4x4 圓柱矩陣流道的  $\mu$ -PIV 影像圖，此流道是由大同大學的許哲維同學所製作與提供[15]。左端為入口端，右邊為出口端，流道寬度為 600 $\mu\text{m}$ 。中間的 4x4 圓柱矩陣每個圓柱的直徑是 40 $\mu\text{m}$ ，整體流道深度約 70 $\mu\text{m}$ 。一樣控制流量為 10 $\mu\text{l}/\text{min}$ ，以 600 $\mu\text{m}$  流道寬的水力直徑為特徵長度，計算其  $\text{Re}=0.4954$ 。圖七十四的  $\mu$ -PIV 影像圖中，垂直部分的尺寸為 650 $\mu\text{m}$ 。圖七十五為 Interrogation spot 32x32 下。4x4 圓柱矩陣流道的  $\mu$ -PIV 分析結果，從圖七十五中可以看出，流體在流入 4x4 圓柱矩陣的兩個圓柱之間時，由於流道寬度變小所以流體的速度變快，流出兩個圓柱之間時流道寬度變大，流體的流速降低，如此往覆變化直至通過 4x4 圓柱矩陣為止，因此圖中可以看出流體在垂直方向兩兩相鄰的圓柱之間均有較高的流速。同樣的因為雷諾數很低，所以流體在流經 4x4 圓柱矩陣後並沒有 Wake 產生。整個流場的狀況仍然為層流。



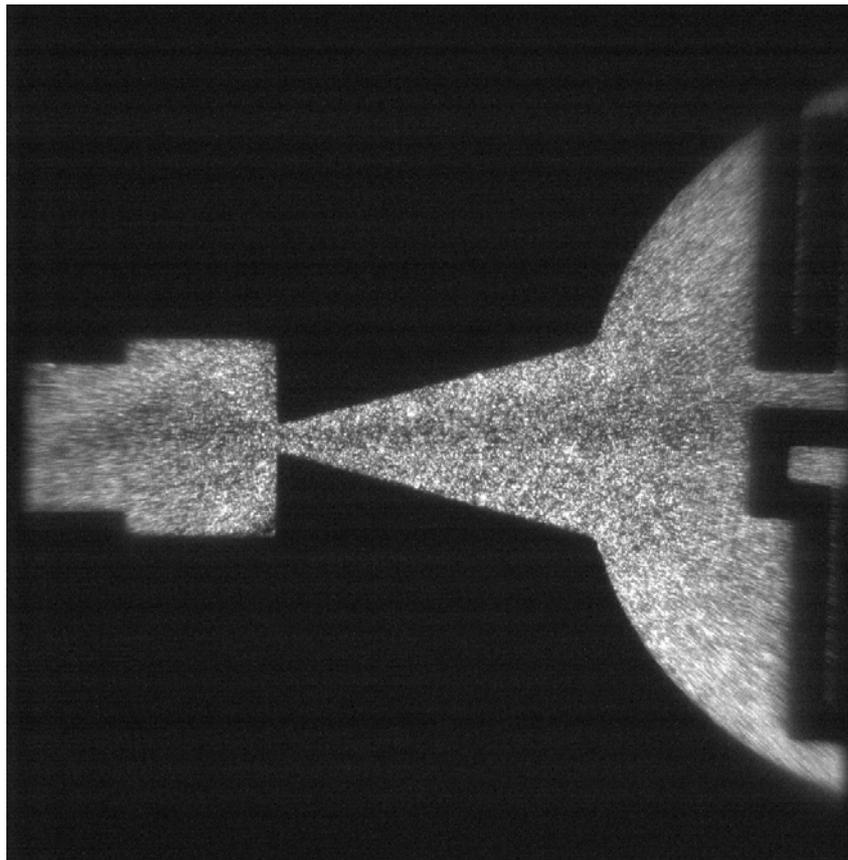
圖七十四 4x4 圓柱矩陣流道的  $\mu$ -PIV 影像圖[15]



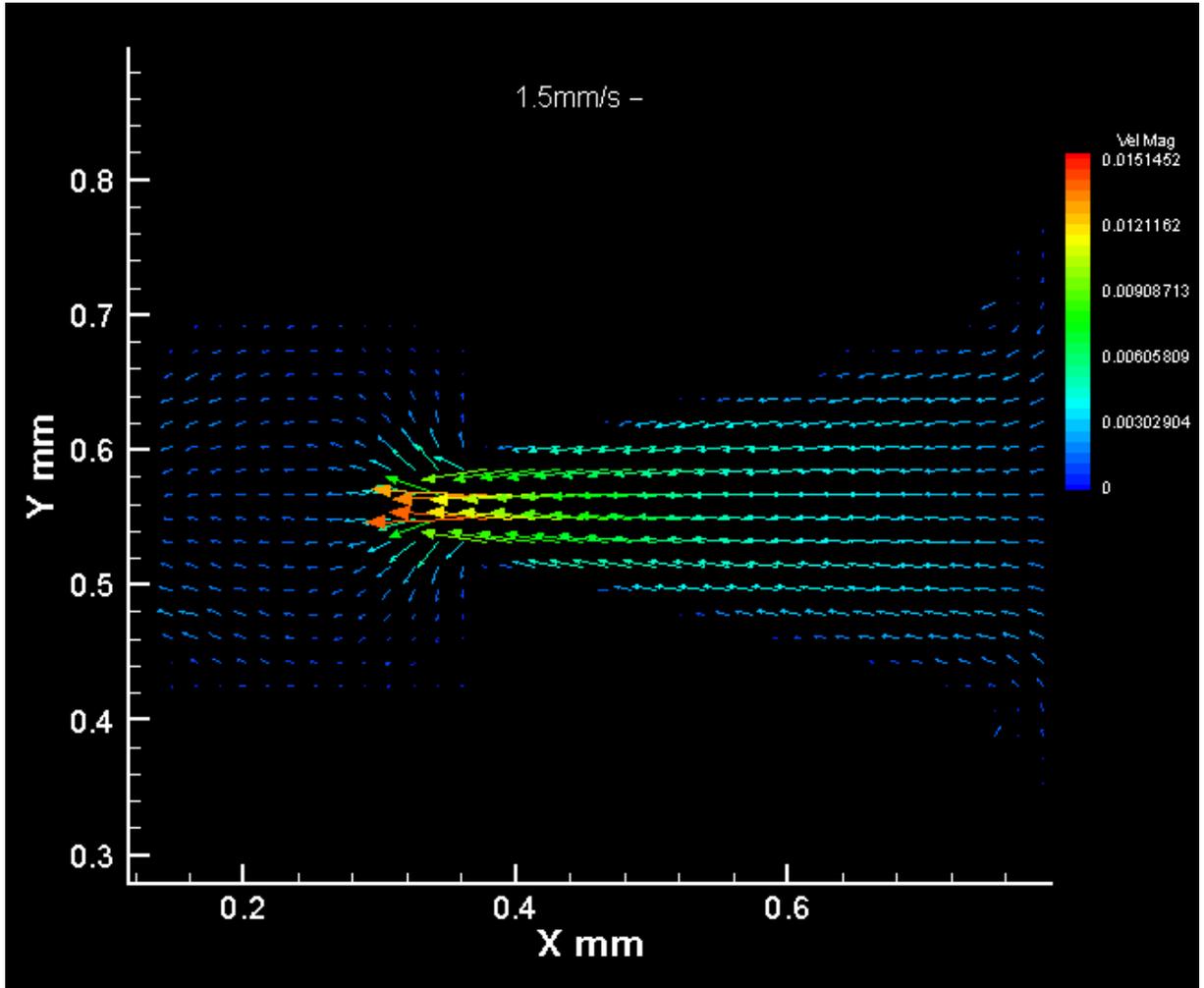
圖七十五 4x4 圓柱矩陣流道的  $\mu$ -PIV 分析結果

### 3.5.4 噴嘴流道的流場速度向量分佈

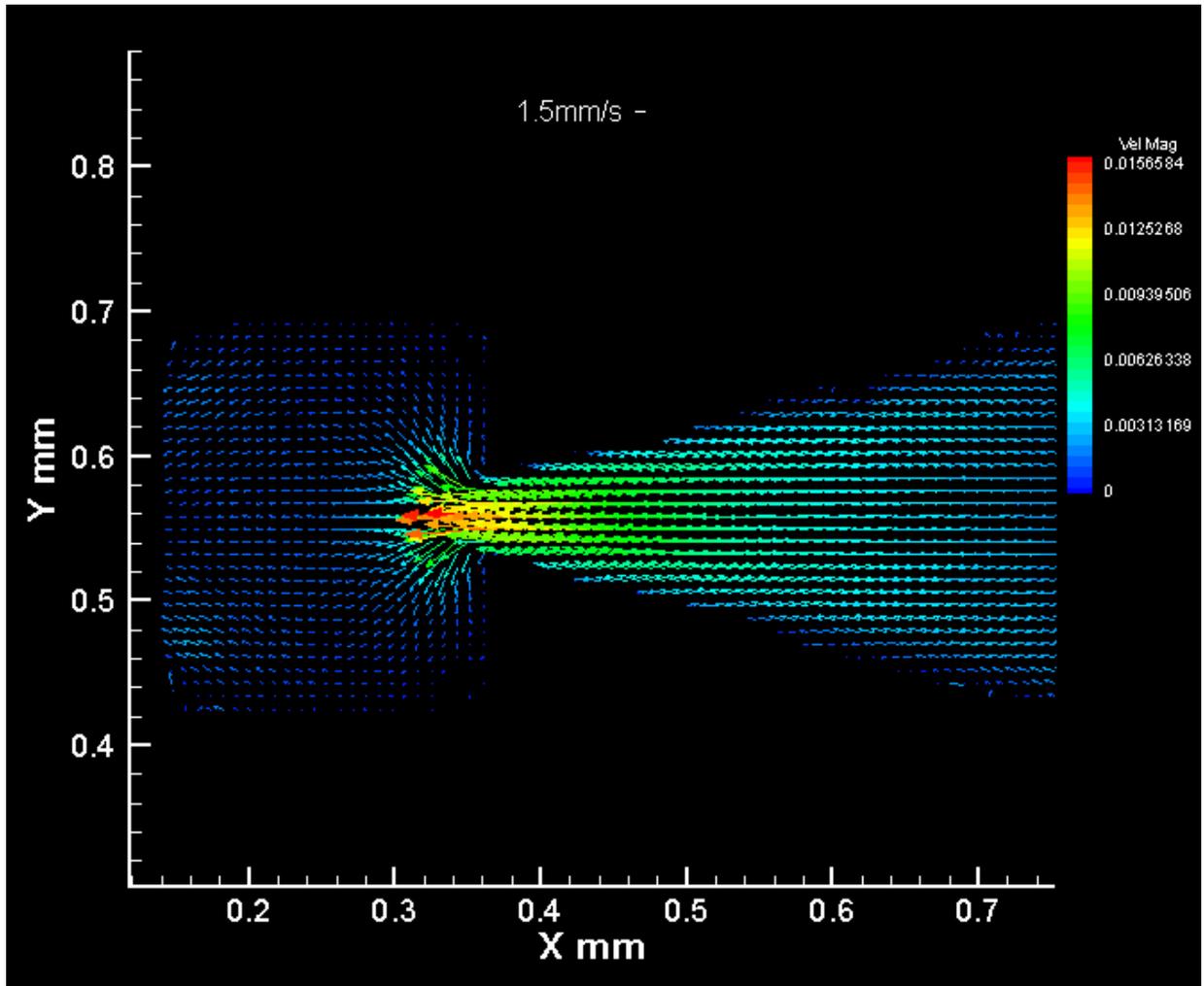
圖七十六為噴嘴流道的 $\mu$ -PIV 影像圖，左邊為出口端，流道寬度為 $200\mu\text{m}$ 。右端為入口端。噴嘴的喉部寬度為 $30\mu\text{m}$ ，整體流道深度約 $45\mu\text{m}$ 。控制流體流量為 $1\mu\text{l}/\text{min}$ ，若以流道出口端的水力直徑為特徵長度，計算其 $\text{Re}=0.1355$ 。圖七十六的影像中，垂直部分尺寸為 $1160\mu\text{m}$ 。圖七十七為 Interrogation spot  $64\times 64$  下。噴嘴流道的 $\mu$ -PIV 分析結果，圖七十八為將 Interrogation spot 設為 $32\times 32$  下，較高解析度的流場速度向量分佈圖。從圖七十七及圖七十八中可以發現，流體流經噴嘴喉部後，由於截面積變小，所以流速增快，流出噴嘴喉部後截面積變大，流速隨即下降。圖七十九是將圖七十八的速度向量的數目減少所得到的速度向量變化圖。圖八十則是將圖七十九的速度向量在 Y 方向的 V 分量去除，即得到噴嘴流場沿 X 方向，在 X 方向上的速度分量 U 的速度變化情形。



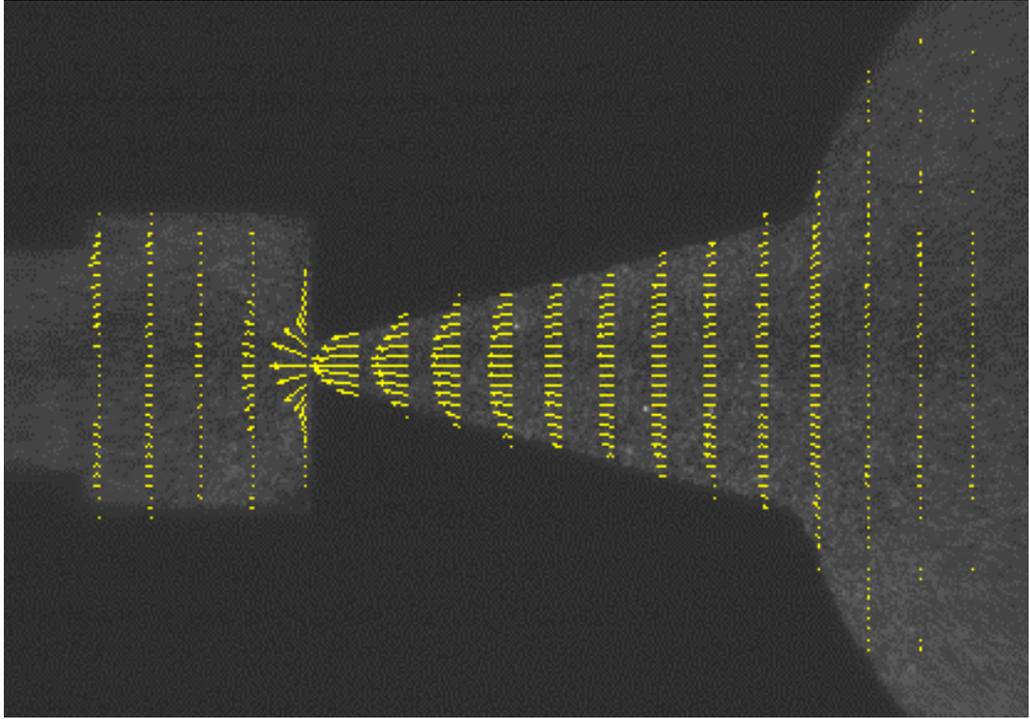
圖七十六 噴嘴流道的 $\mu$ -PIV 影像圖



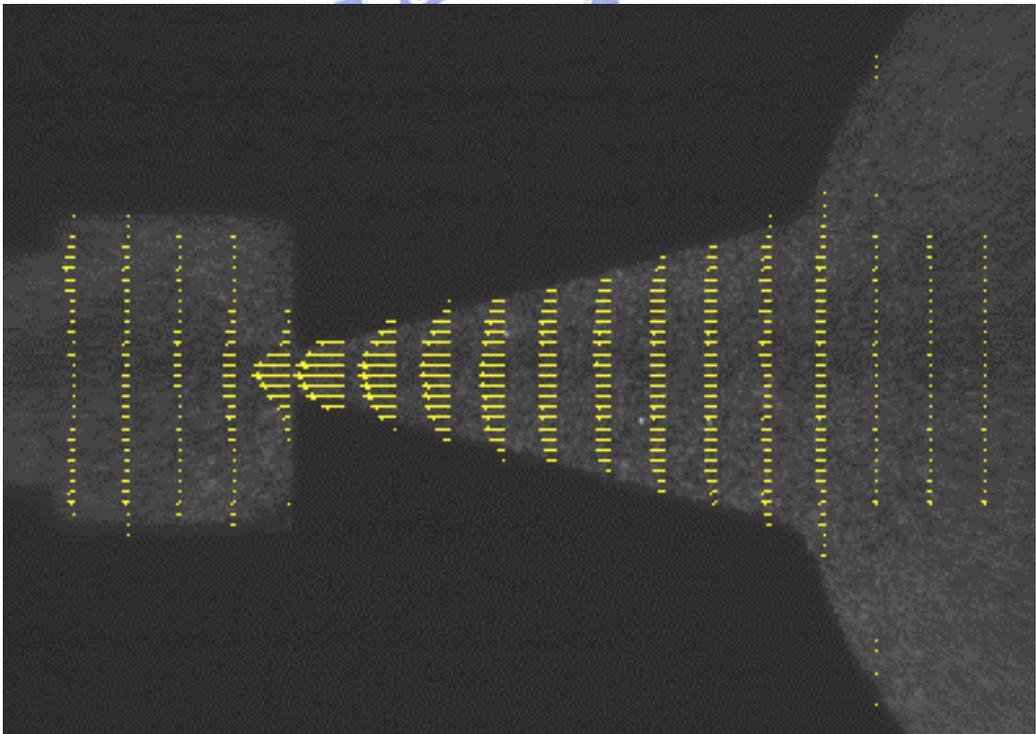
圖七十七 噴嘴流道的  $\mu$ -PIV 分析結果



圖七十八 提高解析度後噴嘴流道的 $\mu$ -PIV分析結果



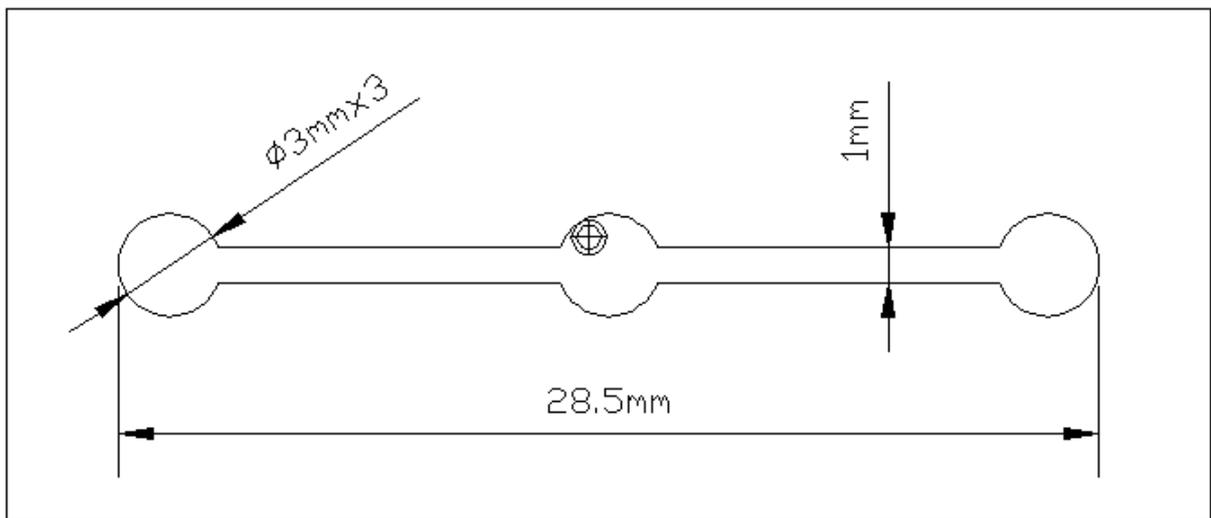
圖七十九 噴嘴流道速度向量分佈情形



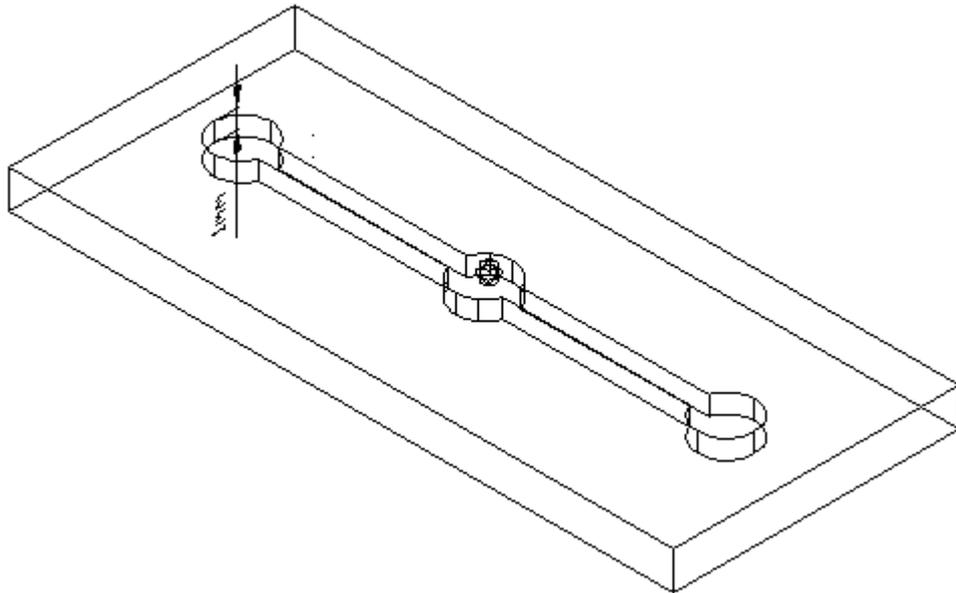
圖八十 噴嘴流道在 X 方向上 U 分量的速度向量分佈情形

### 3.5.5 直流電場下陽離子交換樹脂附近的微小渦流

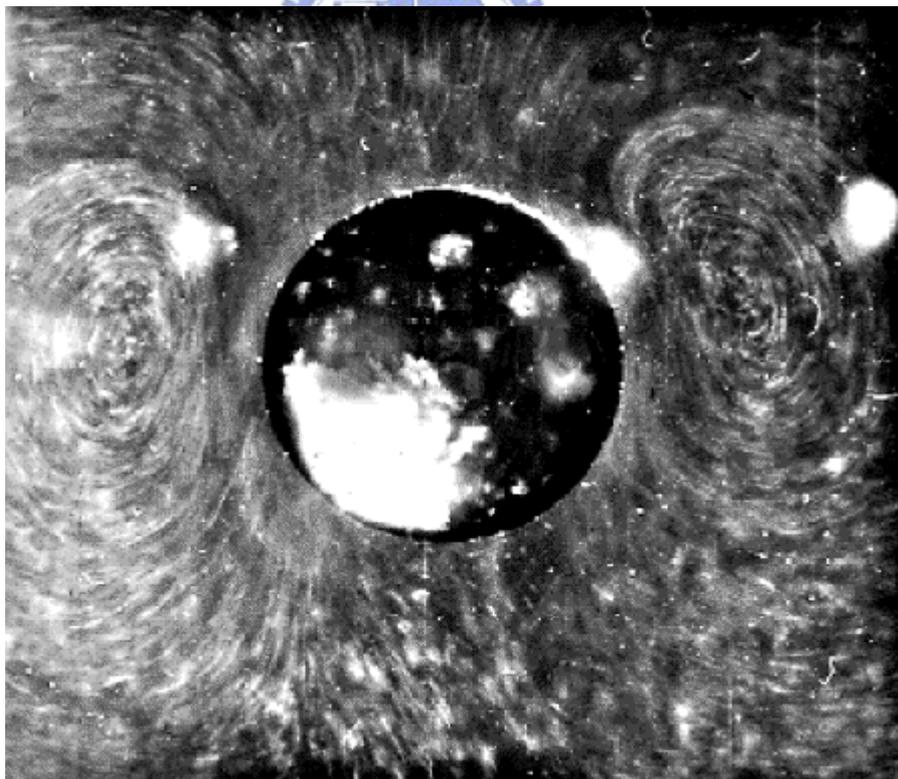
本實驗所使用的流道及陽離子交換樹脂均為中正大學的王少君老師所提供。圖八十一為流道的上視圖，流道由三個直徑 3mm 的圓形所構成，彼此之間以 1mm 寬的流道連接，流道的深度為 1mm。陽離子交換樹脂的粒徑大約在 1mm 上下。流道的立體圖如圖八十所示。而實驗時陽離子交換樹脂所擺放的位置就如圖八十一及圖八十二所示。電極為不易氧化的白金電極，分別將正負兩極置於兩邊外側的圓形區域內（必須要接觸到工作流體），下面的實驗結果所使用的電壓為 229V 的直流電。圖八十三為王老師所發表的論文中[13]，拍攝的陽離子交換樹脂和其附近的為小渦流的位置相對關係圖。圖八十四為本實驗利用  $\mu$ -PIV 所拍攝的影像圖，圖中陰影的部分為陽離子交換樹脂。圖八十四的影像垂直部分的尺寸為  $1140\mu\text{m}$ 。圖八十五則為陽離子交換樹脂周圍微小渦流的  $\mu$ -PIV 分析結果，經由  $\mu$ -PIV 的速度向量分佈圖可明顯的看到陽離子交換樹脂旁的微小渦流。



圖八十一 流道上視圖及陽離子交換樹脂的擺放位置



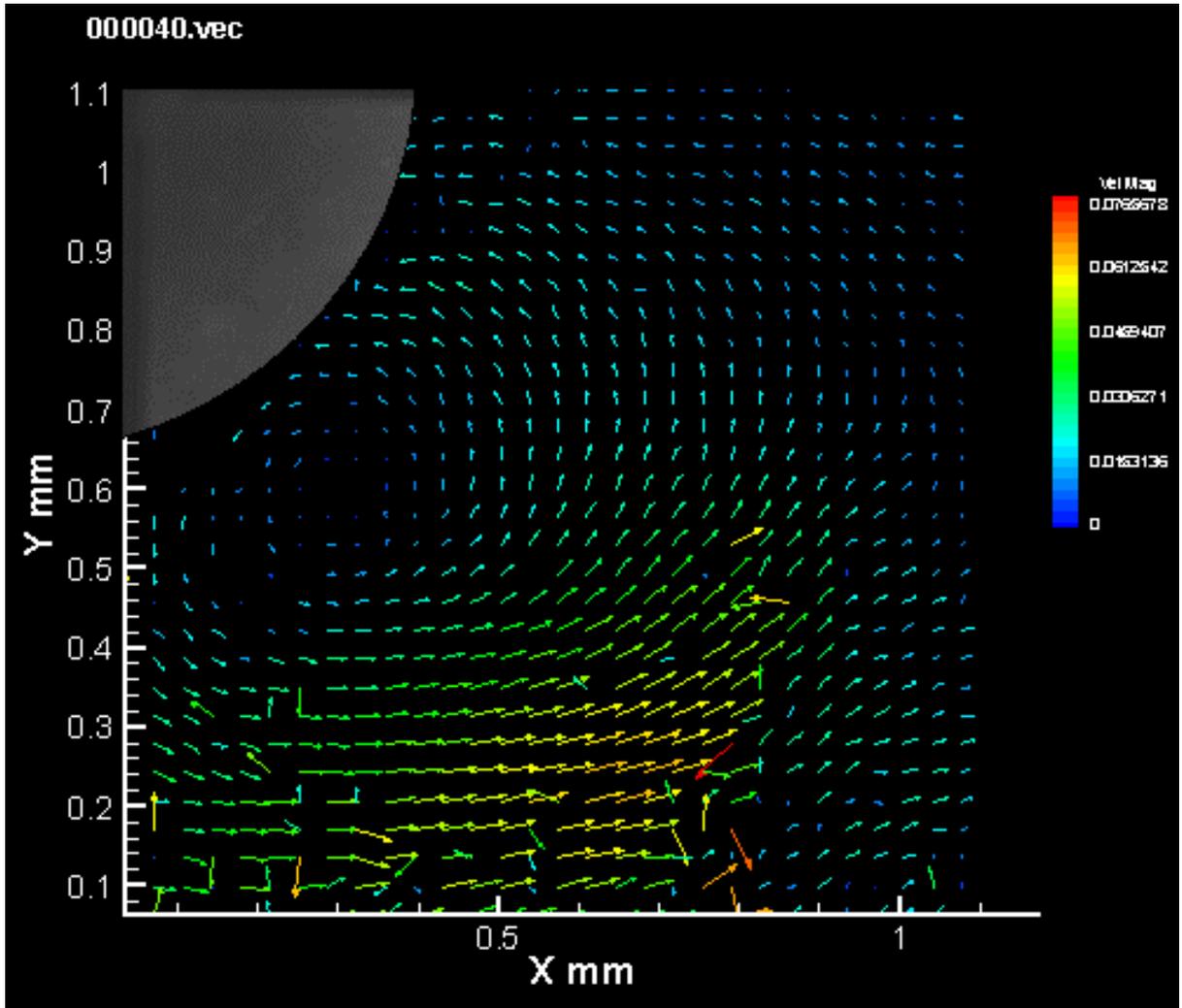
圖八十二 流道的立體圖及陽離子交換樹脂的擺放位置



圖八十三 陽離子交換樹脂周圍的微小渦流[13]



圖八十四 陽離子交換樹脂周圍的  $\mu$ -PIV 影像圖



圖八十五 陽離子交換樹脂周圍微小渦流的  $\mu$ -PIV 分析結果

#### 四、未來展望

目前所有實驗設備已架設完成，實驗設備量測上的準確性也經過了驗證。 $\mu$ -PIV 的技術發展已經近趨於成熟。並且成功的拍攝到一些不同狀況下的微小流場。希望日後可以分析更多的微流體系統元件、或是一些有研究價值的微流場。然後建立一系列的實驗數據，期望本實驗可以對微流體系統中微流場的研究，能夠有所貢獻、有所助益。最後條列整理未來尚可研究的方向下：

- (1) 本實驗在調整景深平面與量測平面的平行度上尚須靠人力及眼力來做調整，所以不同的人員所調整的平行度情況不一，如果可以發展其他輔助工具或是再將設備改善，將更有助於景深平面與量測平面之間平行度的調整。
- (2) 目前本實驗所使用的螢光粒子最小粒徑為  $0.7\mu\text{m}$ 。可以透過控制雷射光強度而得到  $10\mu\text{m}$  的景深厚度。而本實驗所使用的顯微鏡頭，型錄上所標示的最小解析度為  $0.5\mu\text{m}$ 。另外已經確定本實驗設備無法觀察到  $0.3\mu\text{m}$  粒徑的螢光粒子。所以日後可以測試本設備是否可觀察到粒徑在  $0.5\mu\text{m}$  上下的螢光粒子，以期望獲得更小的景深厚度及更好的分析結果。
- (3) 本實驗的顯微鏡頭最高倍率為 100X，而 Mitutoyo 公司尚有生產 200X 的顯微鏡頭，若要觀察更微小的流場可考慮此一鏡頭，不過由於價格昂貴（約二十萬新台幣）所以是否有其必要性也須列入考慮之中。
- (4) 生產 PIV 系統的 TSI 公司有生產更高解析度的 CCD 畫素為  $1.6\text{k}\times 1.2\text{k}$ （約 2M），若要提升實驗設備的解析度也可將其列入考慮。
- (5) 在觀察陽離子交換樹脂附近的微小渦流時，由於本實驗所使用的螢光粒子帶有負電的電性，所以螢光粒子本身會受電場的影響而向正極移動。因此實驗時，螢光粒子的移動是否確實反應出真實的流場狀況？此一問題可待日後試著購買是否有不任何帶電性的螢光粒子產品，再對此題目做更深入的探討。
- (6) 未來希望能將  $\mu$ -PIV 系統應用在微混合流場的觀察與量測上，以及應用至更多的微流體流場。

## 参考文献

- (1) S. Stone, C. D. Meinhart, D. C. Tretheway and S. T. Wereley (2003) **Out of Plane Spatial Resolution of Volume Illumination PIV Using a Compound Lens System** *PIV03 Paper 3234, Micro PIV, S.T. Wereley*
- (2) F. Billy, L. David, G. Pineau and M. Arghir (2003) **Flow Measurements in Micro-Channel Using a Single Pixel Based Cross-Correlation** *PIV03 Paper 3236, Micro PIV, L. David*
- (3) S. Jin, P. Huang, J. Park, J. Y. Yoo and K. S. Breuer (2003) **Near-Wall PTV Measurements Using Evanescent Wave Illumination** *PIV03 Paper 3237, Micro PIV, Kenneth S. Breuer*
- (4) K. Shinohara, Y. Sugii, K. Okamoto, A. Hibara, M. Tokeshi and T. Kitamori (2003) **Micro PIV and Micro LIF Measurements of Chemically Reacting Flow in Micro Fluidic Device** *PIV03 Paper 3238, Micro PIV, Yasuhiko Sugii*
- (5) M. J. Kim, M. J. Kim, J. C. Bird, J. Park, T. R. Powers and K. S. Breuer **Macro-Scale PIV Experiments on Bacterial Flagellar Bundling** *PIV03 Paper 3313, Micro PIV, Kenneth S. Breuer*
- (6) S. Walker (2003) **Velocity, Acceleration, and Shear Measurements of Cell Environments for Orbital Shaker Table Testing** *PIV03 Paper 3104, Micro PIV, S. Walker*
- (7) C D Meinhart, S T Wereley and M H B Gray (2000) **Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry** *Meas. Sci. Technol.* **11** : 809–814. Printed in the UK
- (8) Carl D. Meinhart and Hongsheng Zhang (2000) **The Flow Structure Inside a Microfabricated Inkjet Printhead** *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS, VOL. 9, NO. 1, MARCH 2000*
- (9) C. D. Meinhart, S. T. Wereley, J. G. Santiago (1999) **PIV measurements of a b microchannel flow** *Experiments in Fluids* 27 : 414–419© Springer-Verlag 1999
- (10) J. G. Santiago, S. T. Wereley, C. D. Meinhart, D. J. Beebe, R. J. Adrian (1998) **A particle image velocimetry system for microfluidics.** *Experiments in Fluids* 25 : 316–319© Springer-Verlag 1998
- (11) Derek C. Tretheway(1), Xiaojun Liu, and Carl D. Meinhart(2) **Analysis of Slip Flow in Microchannels** University of California Santa Barbara, CA 93106
- (12) P. Gondret, N. Rakotomalala, M. Rabaud, D. Salin, and P. Watzky (1997) **Viscous parallel flows in finite aspect ratio Hele-Shaw cell: Analytical and numerical results** Laboratoire F.A.S.T. (Paris 6 et 11, et CNRS), Bât. 502, Campus Universitaire, F-91405 Orsay Cedex, France
- (13) Shau-Chun Wang† and Yi-Wen Lai Department of Chemistry and Biochemistry, National Chung Cheng University, 160 San Hsing, Ming Hsiung, Chia Yi 621, Taiwan Yuxing Ben† and Hsueh-Chia Chang\*, † Department of Chemical and Biomolecular Engineering, University of Notre Dame, Notre Dame, Indiana

- 46556 (2004) **Microfluidic Mixing by dc and ac Nonlinear Electrokinetic Vortex Flows**
- (14) S. Kim, H. J. Lee, J. Y. Yoo **Micro-PIV measurement of the fluid motion near the meniscus in the hydrophilic and hydrophobic capillaries** 5th International Symposium on Particle Image Velocimetry Busan, Korea, September 22-24, 2003
- (15) 許哲維,「微流體裝置之設計與製作—微致動器與微混合器」,大同大學,碩士論文,民國93年。
- (16) 楊東拾,「微粒子顯像測速儀之發展及其於微管流場之量測」,國立台灣大學,碩士論文,民國90年。
- (17) Hart, D. P., 1998, **High-Speed PIV Analysis Using Compressed Image Correlation**, ASME Journal of Fluids Engineering, Vol.120, No.3, pp.463-470.
- (18) Bing He,† Brian J. Burke, Xiang Zhang, Roujian Zhang, and Fred E. Regni, **A Picoliter-Volume Mixer for Microfluidic Analytical Systems**, Anal. Chem.2001, 73,1942-1947
- (19) Robin H. Liu, et al, **Passive Mixing in a Three-Dimensional Serpentine Microchannel**, J. of MEMS SYSTEMS, v9, N2,2000, pp.190-197

