

第四章 結論與展望

在本篇論文中，對於利用雷射鑷夾進行生物實驗量測時，在直接捕捉操縱細胞等非均質的生物樣品，以及藉由捕捉其他均質微粒子以量測捕捉力的微粒子追蹤應用上，針對目前應用的情形與現階段技術的缺點做了介紹，同時也提出我們的解決方式。

對於直接捕捉操縱細胞等非均質的生物樣品的部分，我們提出了適合在兩種樣品尺寸範疇的模型——適用微粒子尺寸遠大於波長的幾何光學模型，以及當微粒子尺寸遠小於波長時的電場感應模型。其中，我們利用徑向對稱的球形微粒子以模擬細胞等非均質的微粒子，且也對於細胞等生物樣品其整體折射率變化不大的情形，引入了微小折射率變化的近似，以簡化計算。同時，我們也將我們所提出的非均質模型與過去僅考慮均質情況的模型進行比較。而且，為了以實驗驗證我們所提出的模型，也藉由水流黏滯力量測法，量測了肺上皮細胞受雷射鑷夾捕捉時的捕捉力與細胞中心對捕捉中心位移間的關係。而我們的模型對於細胞的捕捉力，相對於過去的均質模型來說，也確實有較好的預測，且減少了 20% 以上的誤差。

在利用微粒子追蹤以量測生物樣品間作用的應用裡，我們不僅介紹了如何以追蹤微粒子的方式量測生物樣品的物理機械特性，與樣品間的作用力，也針對如何設計與最佳化一個探測光束式的單一粒子追蹤系統，以突破利用捕捉光束之散射光進行追蹤的限制。其中，我們不僅介紹了如何設計與架設一套以雷射鑷夾為基礎的單一粒子追蹤系統，也藉由實驗的方式驗證了藉由與捕捉雷射光束離焦之探測雷射光束的引入，可以確實地滿足在生物量測實驗時，對使用較大微粒子以增加捕捉力的需要。同時，我們也利用了延伸的米氏散射理論，對我們的實驗結果進行說明與驗證。且也可以發現，在最佳化探測光束的離焦距離時，不論是由我們的散射模型或實驗結果，都可以說明隨著微粒子尺寸的改變，最佳探測光束離焦所對應的趨勢。最後，經由實驗證實，相較於未使用探測雷射光束的情況下，使用探測雷射光束在追蹤的效能與正確性上，可以產生顯著地提升。

由目前的文獻中顯示，使用雷射鑷夾在的效應，應用在捕捉、操縱與分離生物樣品，在研究細胞分類與組織工程上，已漸漸受到研究者的關注。而這些研究的基礎便是對於生物樣品捕捉力的了解。而我們們所提出的利用徑向對正的球體，以描述非均勻的生物微粒子，也只是最簡單的描述方式。而使用幾何光學模型或是瑞利範疇的電場感應模型，也是提供我們對捕捉力隨微粒子位移的變化一個明確概念，在更廣泛的生物樣品尺寸上，終究也有一些不適用的範圍。如何建構一個可以適用更複雜的微粒子構造與尺寸的模型，以協助實驗的設計，便是一

個在本篇論文之後重要的工作。

另外，以雷射鑷夾為基礎的單一粒子追蹤系統，有鑑於其對力量與位移的精確解析，已經成為細胞與分子生物研究時，了解其機械與物理特性的強大工具。且其可以在顯微鏡下非侵入性的主動操控的能力，更也對此類的研究，有相當的幫助。在本篇論文中，我們針對使用離焦探測光束以增加微粒子追蹤時的適用範圍與正確性，都有了仔細的研究。不過，由實驗結果中，我們也可以發現，雖然，探測光束確實增加了微粒子使用尺寸選擇上的彈性，在追蹤時也提供了奈米級的空間解析能力，但對於可追蹤的範圍，終究仍限制在數百個奈米的界線。因此，如何增加追蹤範圍，以適應更大範圍的生物結構與作用，也是一個接續本論文之後的重要工作。而目前最有機會的方式，便是利用具有迴授設計的光路，使得在追蹤的過程能夠更主動運用有效的追蹤範圍。

最後，運用其他領域的新技術對生物問題進行研究，不僅可以觀察到各多有趣的生物現象，也提供更多不同的角度去了解複雜的生物問題。雷射鑷夾單一粒子追蹤系統的在生物研究上的應用，便是一個很明顯的例子。而針對生物的問題去提供適合生物應用的需求，雖然需要許多從事其他領域研究人員的努力，卻也同時提供了許多跨領域的機會，和觀察新現象的契機。因此，希望藉由本篇論文，不僅是對雷射鑷夾系統設計與分析的研究，也希望能夠為對跨領域生物研究有興趣的研究人員，提供一個範例，而激發出更多有趣的研究。