

利用複合式干涉儀技術之表面 3D 形貌顯微鏡

Surface Profiler with the Technique of Composite Interferometer

許怡仁、張群偉、林鈺凱、侯帝光

I-Jen Hsu, Chun-Wei Chang, Yu-Kai Lin, Max T. Hou

本研究團隊於近年來發展並驗證一用以量測表面形貌、且具備奈米準確度的低成本光學系統。該系統是由邁克爾遜干涉儀和馬赫-策德爾干涉儀所組成的複合式干涉儀。利用系統中的相位補償機制，來自光學系統的不穩定和環境干擾所造成的相位偏差可同時獲得補償。在無需特殊屏蔽和保護、以及樣品的特殊製備之下，該系統可進行數毫米尺度的大範圍造影，以及 ± 5 nm 以內軸向解析度的量測。此外，以光纖元件為基礎的複合式干涉儀亦可實現具備奈米尺度靈敏度的表面形貌量測，量測的靈敏度與造影的速度亦顯著提升，使該系統可作為一高速、高解析度的大範圍動態造影系統。該系統的軸向精確度經驗證可達到 0.82 nm。此系統亦以每幀影像 75 秒的速度針對洋蔥細胞脫水過程進行高解析度縮時動態造影。目前本研究團隊已利用此技術完成一表面 3D 形貌顯微鏡的開發，在進一步改良系統的設計之後，此系統不但可同時作高解析度的材料表面光訊號強度與相位分布的量測，且無論是系統的穩定性或靈敏度更均獲得大幅度的提升。

Our research team developed and demonstrated a low-cost optical system for surface profilometry with nanometer-accuracy recently. The system is based on a composite interferometer consisting of a Michelson interferometer and a Mach-Zehnder interferometer. With the phase compensating mechanism, the phase deviation due to the instability of the optical system and environmental perturbation can be compensated simultaneously. The system can perform a large-range imaging in the millimeter scale and a measurement with the axial resolution within ± 5 nm without special shielding and protection of the system as well as any special preparation of the sample. Furthermore, a fiber-based composite interferometer can also perform the measurement of surface profile with sensitivity at nanometer scale. The measurement sensitivity and imaging speed can be significantly improved such that the system can be used as a high-speed, high-resolution and wide-range dynamical imaging system. The axial precision of the system was examined to be 0.82 nm. High-resolution time-lapsed dynamical imaging of onion cells during dehydration processes were performed with this system with one frame captured in 75 seconds. Our research team has currently completed the development of a surface profiler with this technique. Due to the improvement of the design of the system, it can perform high-resolution measurements of intensity and phase distribution of light signal from surface of material simultaneously. Furthermore, the stability and sensitivity of the system were significantly improved.

一、前言

隨著科技的發展，無論在材料、生醫研究領域或者工業上，可針對物體的表面形貌作高靈敏度量測的技術日益重要。通常用於材料科學而具備奈米級解析度的表面造影技術包括原子力顯微鏡 (AFM) 與掃描式電子顯微鏡 (SEM)。原子力顯微鏡和掃描式電子顯微鏡等材料表面形貌造影技術於軸向及橫向皆具備奈米尺度的高解析度造影能力。然而這些技術的量測通常相當費時，而且缺乏大範圍掃描的能力，因此在高速與大範圍造影上存在著固有的限制。此外，這些技術還存在著諸如樣品的特殊製備與環境的屏蔽等限制。而特殊的樣品製備與真空的條件等要求亦導致這些技術不適用於大部分的生醫應用。相對的，光學方法由於其具有非侵入性、高靈敏度、高穩定度、且可作大範圍造影等優點，使其適於生物細胞與組織的動態行為之活體研究。許多的光學技術業已開發，且由於其具有非侵入性與高靈敏度的造影能力，而成功實現了生物樣品表面形貌的高解析度造影。然而光學系統的橫向解析度通常受光的繞射性質限制而無法達到奈米尺度。目前諸如干涉顯微術與共焦顯微術等光學顯微技術已廣泛使用於生物細胞與組織的造影。使用單色光或非同調光源的傳統干涉顯微術，雖已能實現極佳的縱向解析度，但對於具有較大高度落差的表面量測較困難，且振幅與相位資訊的複雜難處理。作為一相當成熟的技術，共焦顯微術使用共焦孔徑以提高造影解析度，然而其軸向解析度仍難以低於一百奈米。

近年來，有許多用於材料表面形貌造影或量測的光學技術相繼被提出。在用於物體表面形貌造影的光學技術當中，諸如條紋投影系統、傅立葉變換形貌造影、數位全像術、相位量測偏折術 (PMD)、超光譜干涉術、波長掃描干涉術、廣域式光學同調斷層攝影術 (OCT) 與白光干涉術 (WLI) 等廣域造影系統，皆可提供表面形貌的高速和高解析度造影。然而雖然已有一些方法可被用以降低光斑問題，使用這些廣域技術所獲得的影像仍常會產生亮度光斑。

另一方面，在諸如外差干涉儀、掃描式光學同

調斷層攝影術、寬頻超連續光譜干涉儀以及合成波長干涉術等點掃描系統當中，光斑雜訊可顯著降低。然而，與廣域技術相比，點掃描技術通常較費時。此外，在相關技術當中，利用相移的干涉技術可獲得高解析度的材料三維形貌；這些技術通常需要一可提供精確相位定位的相移裝置，很難實現即時造影。光學同調斷層攝影術亦可用於表面形貌造影，但此技術難以達到奈米尺度的解析度。結合數位分析的投影干涉儀已被證實為可作粗糙表面輪廓造影的非破壞性方法。雖然此技術可實現高速高解析度造影，但其精確度卻受限於表面反射率的均勻度與粗糙表面所造成的光斑雜訊。其它技術像是波長偏移干涉術與白光干涉術，亦被用於三維形貌造影，但這些技術通常在掃描速度和深度範圍上受到限制。

本研究團隊於近年提出並實現一可對材料表面形貌造影與量測的光學系統。該造影技術基礎於複合式干涉儀的概念，且已證實其以奈米準確度針對樣品表面形貌造影的能力。雖然干涉儀常被用於表面形貌的量測，然而就我們所知，這是首次利用複合式干涉儀使表面形貌量測達到奈米尺度的軸向解析度。該系統的基本結構使用一搭配同調光源的典型邁克爾遜干涉儀量測樣品的表面形貌。此外，一與邁克爾遜干涉儀共用同一參考端的馬赫-策德爾干涉儀用以量測各次軸向掃描之間的相位偏差。此系統具備光學方法的優勢，且可準確的量測樣品的縱向位置。此外，此低成本系統可在不需特殊的樣品製備與環境的屏蔽之下進行大範圍的表面形貌造影。因此，此系統相當適合不同型態的生物細胞與組織活體造影上的應用。在以光纖元件為基礎所建構的複合式干涉儀中，系統的穩定性提高、體積縮小，造影速度也大幅提升。利用系統的相位補償機制，由環境擾動所造成的量測偏差可在動態造影過程中持續獲得補償。此補償機制無需回饋電路即可自行達成，且不需對位於參考端的壓電致動器作監控與精準定位。該系統實現以每幀影像 75 秒量測洋蔥細胞在不同條件下的脫水過程的動態影像。此系統的軸向準確度經驗證達到 0.82 nm 的標準差。目前本研究團隊已利用此技術完成一表面 3D 形貌顯微鏡的開發，在進一步改良系統的設計之後，此

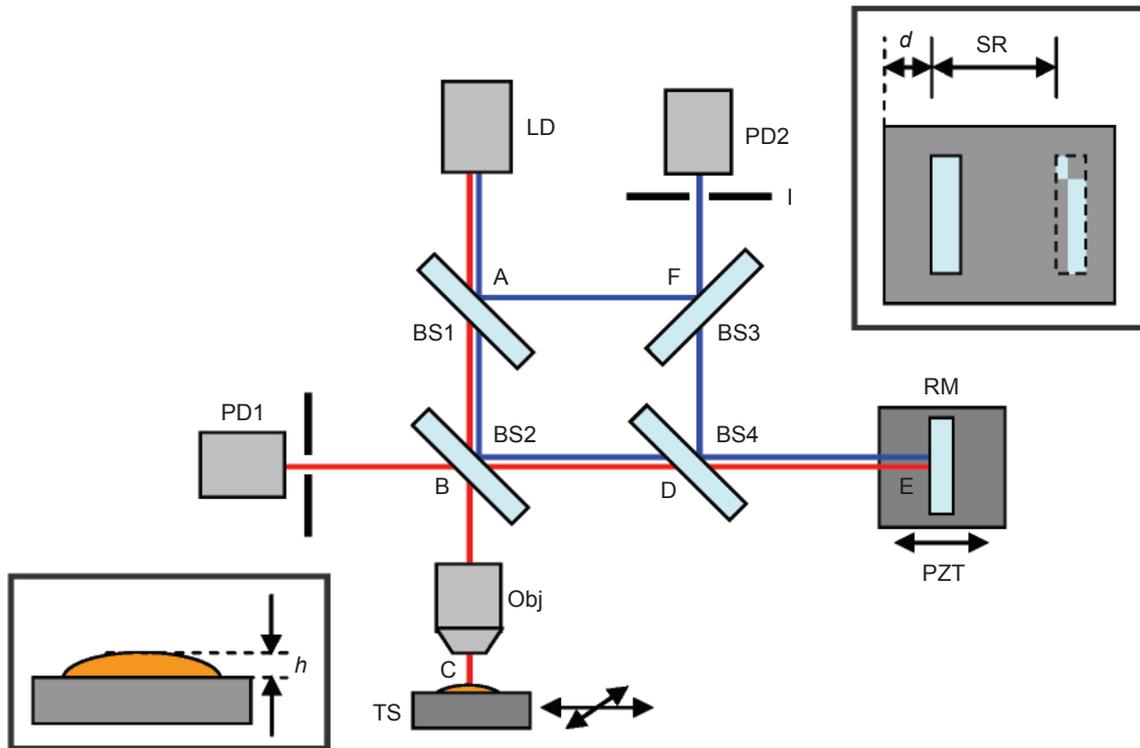


圖 1. 複合式干涉儀示意圖。LD：二極體雷射，BS1, BS2, BS3, BS4：分光鏡，Obj：物鏡，RM：反射鏡，TS：二軸平移臺，PZT：壓電致動器，PD1, PD2：光偵測器，I：光圈。插圖：表面高度 h 與光延遲元件軸向掃描起始位置 d 的定義，其中 SR 表示掃描範圍⁽¹⁾。

系統不但可同時作高解析度的材料表面光訊號強度與相位分布的量測，且無論是系統的穩定性或靈敏度均獲得大幅度的提升。

二、系統架構

圖 1 為複合式干涉儀的示意圖。此系統由一以紅線表示光傳播路徑的典型邁克爾遜干涉儀，與一以藍線表示光傳播路徑的馬赫－策德爾干涉儀所組成。光源為一波長 532 nm、輸出功率 5 mW 的二極體雷射。邁克爾遜干涉儀的參考端為路徑 BDE，其中固定於壓電致動器驅動平臺上的反射鏡作為光延遲元件。在以路徑 BC 表示的樣品端中，一物鏡用以將探測光束聚焦於樣品的表面，樣品則置於一與壓電致動器同步的二軸平移臺上，以作二維的橫向掃描。擷取兩個光偵測器所測得的干涉訊號相位，將其相減之後即可獲得位於該點的樣品表面高度。

在邁克爾遜干涉儀中，自樣品表面反射的電場可表示為

$$E_S = E_{0S} e^{j(\omega t + \phi)} \quad (1)$$

其中 E_{0S} 為樣品端反射電場的振幅， ω 為光源的角頻率。相對於某參考高度的表面高度所造成的相位偏移 ϕ 定義為

$$\phi = \frac{4\pi h}{\lambda} \quad (2)$$

其中 h 為相對於參考高度的表面高度，如圖 1 的插圖所示， λ 為光源的波長。自參考鏡反射的電場可表示為

$$E_R = E_{0R} e^{j\omega(t - \tau)} \quad (3)$$

其中 E_{0R} 為參考端的反射電場的振幅，而樣品與參考端之間的時間延遲為

$$\tau = \frac{2(\ell_R - \ell_S)}{c} \quad (4)$$

其中 ℓ_R 及 ℓ_S 分別為參考端及樣品端的光程長， c 為光速。光偵測器 1 所測得的強度與合成場的平方成正比，因此

$$I_1 \propto |E_S + E_R|^2 = |E_{0S}|^2 + |E_{0R}|^2 + 2E_{0S}E_{0R} \cos(\omega\tau + \phi) \quad (5)$$

干涉訊號可以交叉相干函數表示：

$$\Gamma_1 = E_{0S}E_{0R} \cos(\omega\tau + \phi) \quad (6)$$

欲獲得樣品表面高度的二維分布，需作二維橫向掃描。然而由於系統的不穩定與環境擾動，在不同的橫向位置上，光延遲元件的軸向掃描範圍理論上不會完全相同，如此將造成樣品表面高度量測上的偏差。若考慮各次軸向掃描起始位置的偏差，由參考鏡反射的電場便成為

$$E_R = E_{0R} e^{j[\omega(t-\tau)-\delta]} \quad (7)$$

其中各次軸向掃描起始位置的偏差所造成的相位偏移 δ 定義為

$$\delta = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (8)$$

其中 d 為光延遲元件的軸向掃描的起始位置，如圖 1 所示。因此，表示干涉訊號的交叉相干函數便成為

$$\Gamma_1 = E_{0S}E_{0R} \cos(\omega\tau + \delta + \phi) \quad (9)$$

在馬赫－策德爾干涉儀中，通過 AF 的光程長固定，而通過 ABDEDF 的光程長則隨光延遲元件的軸向掃描而改變。同樣的，表示馬赫－策德爾干涉儀的干涉訊號的交叉相干函數可表示為

$$\Gamma_2 = E'_0 E'_{0R} \cos(\omega\tau' + \delta) \quad (10)$$

其中 E'_0 及 E'_{0R} 為光偵測器 2 所測得來自兩不同路徑的電場振幅，而兩路徑之間的時間延遲為

$$\tau' = \frac{2(\ell'_R - \ell')}{c} \quad (11)$$

其中 ℓ'_R 及 ℓ' 分別為通過 ABDEDF 及 AF 的光程長。為了確保兩干涉儀相位偏移的值相同，自光延遲元件中的反射鏡通過 DB 至光偵測器 1 的光程長需與自該反射鏡通過 DF 至光偵測器 2 之間的光程長相同，以消除系統誤差與環境擾動所造成的偏差。顯然的，若在對應於各特定橫向位置的軸向掃描當中提取干涉訊號的相位，則兩相位間的差會剛好正比於位於該點的樣品表面高度。如此便可獲得高軸向解析度的樣品二維表面形貌。

以光纖元件為基礎的複合式干涉儀的示意圖如圖 2 所示。此複合式干涉儀由一 2×2 的光纖耦合器與三個 1×2 的光纖耦合器所組成。紅色箭頭表示邁克爾遜干涉儀中的光傳播方向，藍色箭頭表示馬赫－策德爾干涉儀中的光傳播方向。系統中所使用的光纖為芯／包層直徑 $3.5 \mu\text{m}/125 \mu\text{m}$ 的單模光纖。光源為波長 532 nm 、輸出功率 150 mW 的二極體雷射。在二干涉儀共用的參考端中，固定於以相移靈敏度為 10 nm 的壓電致動器 (Thorlabs, PE4) 所驅動的平移臺上的反射鏡，作為軸向掃描的光延遲元件。在邁克爾遜干涉儀的樣品端中，自準直鏡輸出的光束由物鏡聚焦於樣品表面。樣品則置於與壓電致動器同步的二軸平移臺上作二維橫向掃描。邁克爾遜干涉儀與馬赫－策德爾干涉儀的干涉訊號分別由光偵測器 1 (Newport, 1801-FC) 與光偵測器 2 (Newport, 2051-FC) 所偵測。由二光偵測器所測得的兩組干涉訊號的相位則由電腦程式進行即時提取與相減，以獲得各位置的樣品表面高度。

近來本研究團隊與博隆精密科技有限公司合作，利用多年來的研發成果，推出兼具高解析度與高精確度的表面 3D 形貌顯微鏡。此表面 3D 形貌顯微鏡以本團隊所特有的「複合式干涉儀」作為數位全像顯微技術的基礎，透過量測系統的自我相位

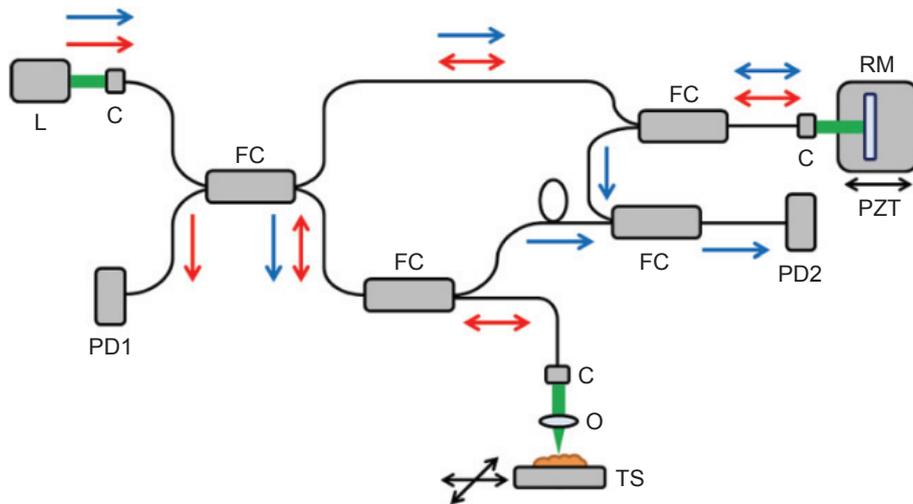


圖 2. 以光纖元件為基礎的複合式干涉儀的示意圖。L：二極體雷射，C：準直鏡，FC：光纖耦合器，RM：反射鏡，PZT：壓電致動器，O：物鏡，TS：二軸平移臺，PD1 及 PD2：光偵測器。邁克爾遜干涉儀中的光傳播方向以紅色箭頭表示，馬赫-策德爾干涉儀中的光傳播方向以藍色箭頭表示⁽²⁾。

補償機制，可在尋常環境之下達到小於一奈米的縱向精確度。圖 3 為表面 3D 形貌顯微鏡的結構圖。

三、結果與討論

為了量測壓電致動器的不穩定與環境擾動的效應，並驗證相位補償機制的 ability，一反射鏡靜止置於樣品平臺，並進行壓電致動器的連續軸向掃描。

圖 4(a) 與 (b) 分別表示在一千次連續掃描當中，由光偵測器 1 測得的干涉訊號相移所計算的反射鏡表面高度，以及由光偵測器 2 所測得的軸向掃描範圍相對位移。不作相位補償時的精確度 (即軸向解析度)，約為 20 nm。然而如箭頭所示，環境擾動將嚴重造成系統的不穩定。此外，在重複的量測當中，訊號有一穩定的爬升。此現象推測是由無閉迴路回饋機制的壓電致動器的遲滯現象與熱效應所造

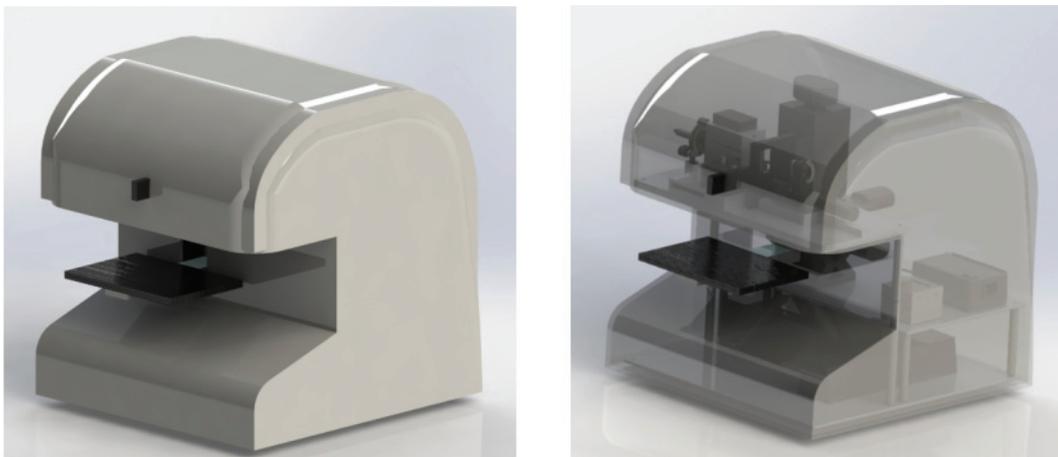
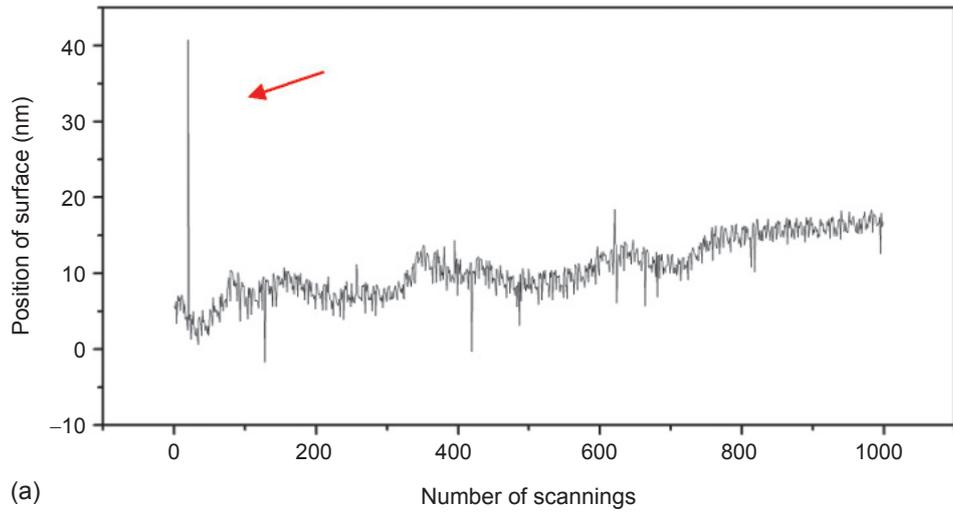
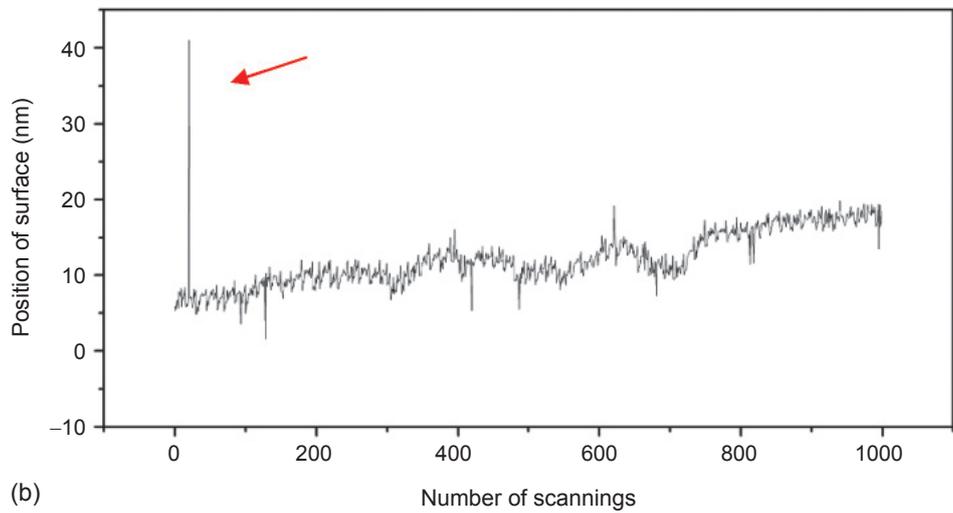


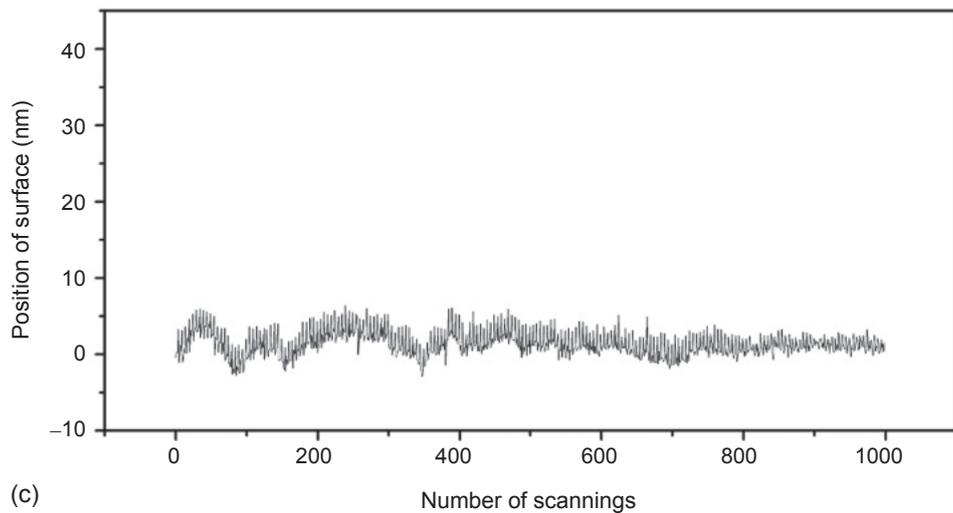
圖 3. 表面 3D 形貌顯微鏡的結構圖。



(a)



(b)



(c)

圖 4. 計算靜止反射鏡於一千次連續掃描中的表面高度以量測系統的精確度：(a) 由光偵測器 1 所測得干涉訊號計算的表面高度，(b) 由光偵測器 2 所測得軸向掃描範圍的相對位移，(c) 相位補償機制作用下的系統軸向解析度⁽¹⁾。

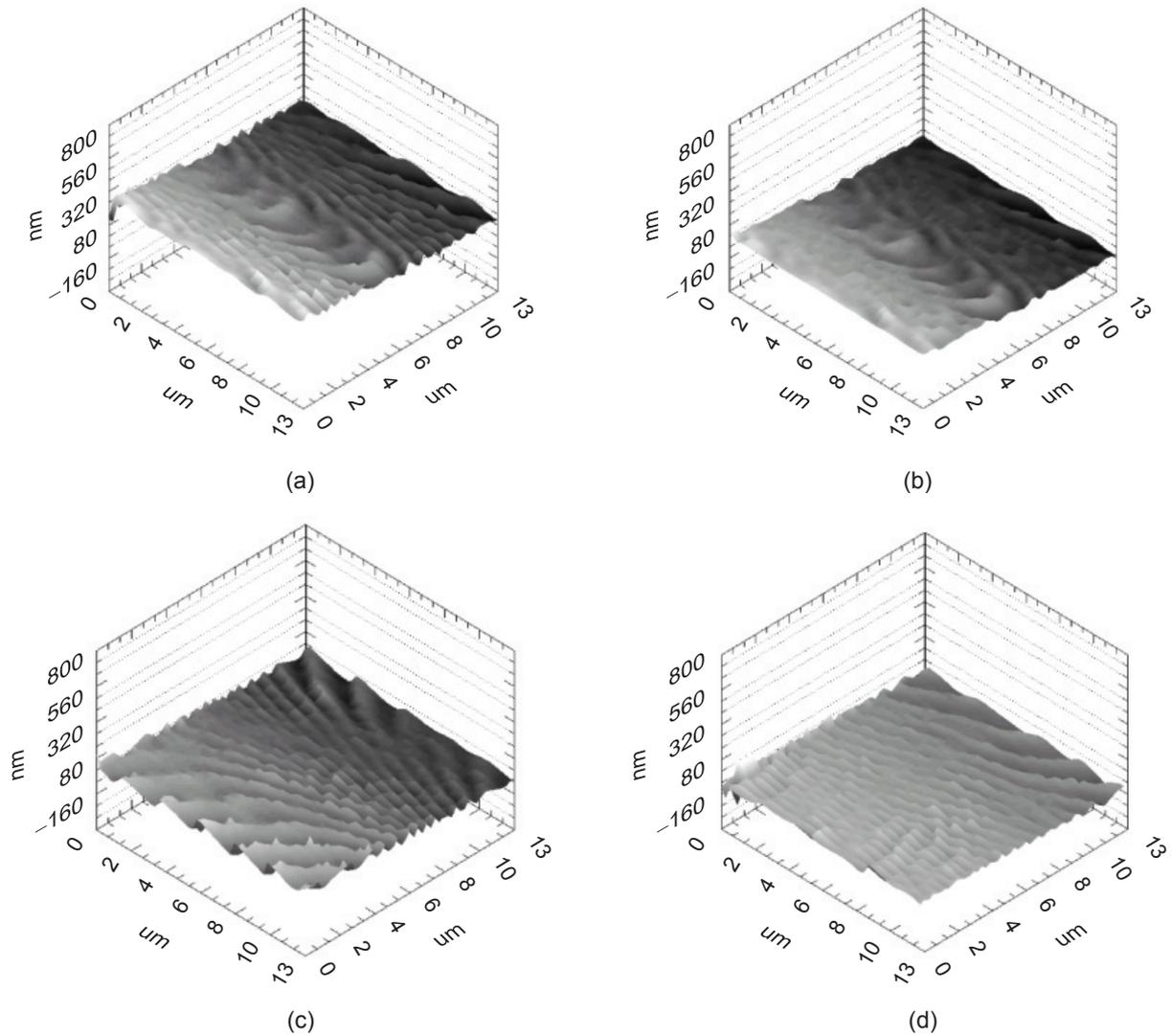


圖 5. 洋蔥細胞局部於脫水過程中的縮時影像。影像尺寸為 $12.75 \mu\text{m} \times 12.75 \mu\text{m}$ 。影像間的時間間隔約十分鐘⁽¹⁾。

成。藉由使用將二偵測器所測得的相位相減的補償機制，不穩定性、系統誤差與環境擾動的效應即可消除，而系統的軸向解析度亦顯著提升至 $\pm 5 \text{ nm}$ 以內，如圖 4(c) 所示。

此系統用以量測不同樣品的表面形貌。圖 5 顯示洋蔥細胞的局部於脫水過程的系列縮時影像。每張圖的尺寸為 $12.75 \mu\text{m} \times 12.75 \mu\text{m}$ 。各圖之間的時間間隔約十分鐘。細胞表面形貌的變化可明顯看出。此實驗證實此系統適於以奈米尺度的軸向解析度作生物細胞與組織表面形貌的量測。需注意軸向與橫向長度尺度的不同。雖然此技術可以奈米尺度

的軸向解析度進行材料表面形貌的量測，逐點掃描的過程仍頗耗時。在壓電致動器的掃描率設為 10 Hz 時，掃描圖 5 中各影像約需 5 分鐘。因此雖然其在環境擾動下相當穩定，但若樣品在量測過程當中移動，結果將會不準確。此外，橫向解析度受光的繞射現象的限制因而無法達到奈米尺度。

在以光纖元件為基礎的複合式干涉儀中，二光偵測器所測得的典型干涉圖如圖 6(a) 所示，其中邁克爾遜干涉儀的干涉圖以紅線表示，馬赫-策德爾干涉儀的干涉圖以藍線表示。實心黑線表示用以驅動壓電致動器的電壓，因此正比於共用參考端中

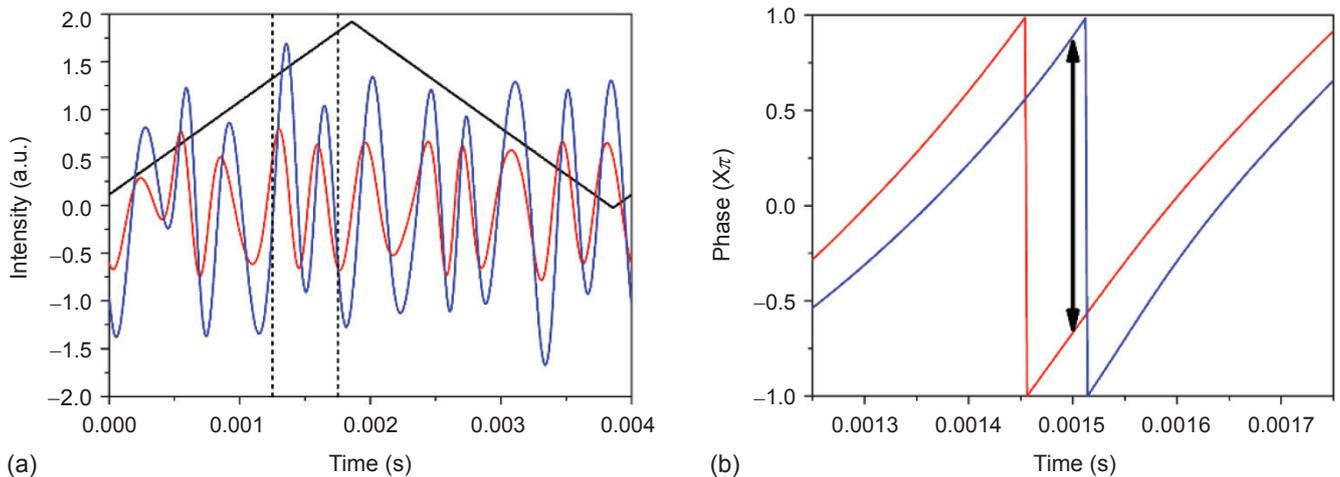


圖 6. (a) 邁克爾遜干涉儀 (紅線) 與馬赫-策德爾干涉儀 (藍線) 的干涉圖。實心黑線表示用於驅動壓電致動器的電壓。(b) 於 (a) 中以點線標示的窗口中二干涉訊號所對應的相位⁽²⁾。

的反射鏡的位移。於干涉圖中引入一窗口以提取相位，如圖 6(a) 中的黑點線所示。圖 6(b) 表示由希爾伯特轉換所得二干涉圖在窗口內所對應的相位。隨後藉由窗口中間的相位相減，以計算正比於樣品表面高度的二干涉圖的相位差，如圖 6(b) 中黑色雙箭頭所示。

相位補償機制的可行性與此干涉儀的穩定性藉由重複量測作為樣品的靜止反射鏡表面高度加以驗證。圖 7 的黑線表示在 10,000 次的連續軸向掃描中，由光偵測器 1 所測得的相位計算的對應表面高度，其中的起伏對應於來自光延遲元件的不穩定與環境擾動的效應。在 10,000 次重複量測中的最大

與最小值的差為 94.36 nm。圖 7 中的紅線表示由光偵測器 2 所量測的相位計算所獲得、馬赫-策德爾干涉儀的固定端的對應路徑長的變化。從兩條線的起伏可看出具有類似的趨勢。圖 7 中的藍線表示由黑線與紅線所示的兩個值相減的結果。藍線所表示的值對應於相位補償後反射鏡的表面高度。在 10,000 次的連續軸向掃描當中，相位補償後的量測表面高度的最大與最小值的差估計為 6.17 nm，而量測的表面高度的起伏的標準差為 0.82 nm。由不同時間的重複實驗所獲得的類似結果亦驗證了干涉儀的長期穩定性。

此系統用於在不同條件下脫水過程中的洋蔥細

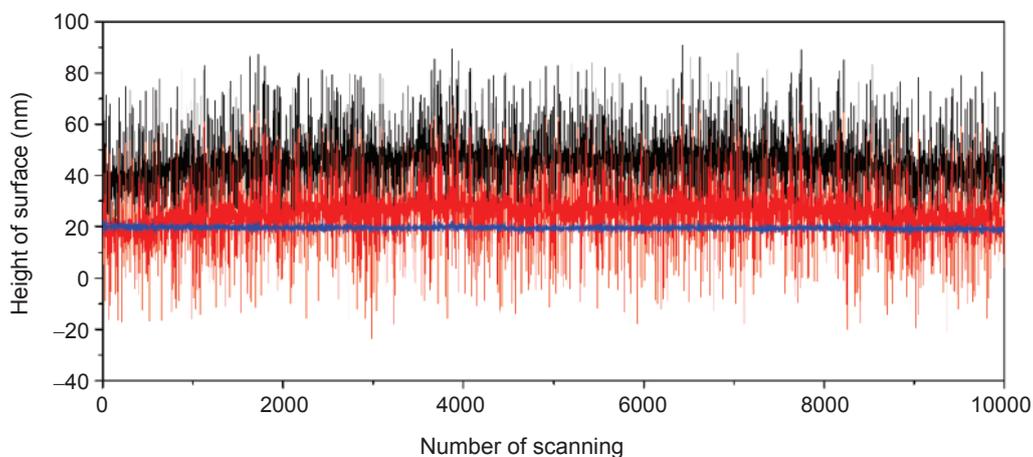


圖 7. 計算靜止反射鏡於 10,000 次連續掃描的表面高度以測試系統的量測準確度⁽²⁾。

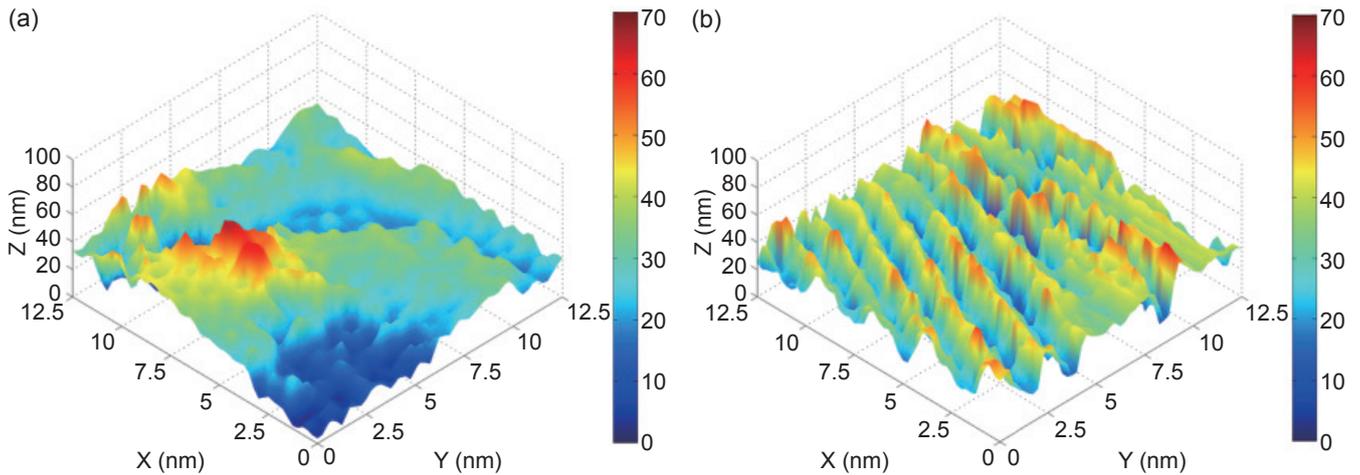


圖 8. 取自以 (a) 生理食鹽水與 (b) 高濃度鹽水處理的洋蔥細胞局部在脫水過程中的動態影像⁽²⁾。

胞局部的表面形貌動態造影。圖 8(a) 與 (b) 分別取自以生理食鹽水與高濃度鹽水處理的洋蔥細胞局部的表面形貌動態影像。各影像由相位差的二維分布透過 2π 混淆的相位攤平與高空間頻率雜訊濾波而獲得。影像的尺寸為 $12.5 \mu\text{m} \times 12.5 \mu\text{m}$ 。連續影像間的時間間隔為 75 秒，壓電致動器的掃描率設定為 100 Hz。掃描速度的限制來自參考端中平移臺與壓電致動器間的連結品質。藉由改善平移臺與壓電致動器間的連結以進一步提高掃描率，此問題可期望獲得解決。量測的結果與前面的相似。細胞在脫水過程中因滲透壓不平衡引起細胞壁收縮所造成的表面形貌變化可被觀察到。以不同濃度的鹽水處理的細胞之間表面形貌變化速率的不同亦可輕易區別。

在進一步改良系統的設計之後所開發完成的表面 3D 形貌顯微鏡當中，不但可同時作高解析度的材料表面光訊號強度與相位分布的量測，且無論是系統的穩定性或靈敏度更均獲得大幅度的提升。圖 9、圖 10 分別為以表面 3D 形貌顯微鏡針對硬幣與光學鏡片表面的量測結果。

四、結論

本研究團隊於近年來提出並驗證一具備奈米解析度的材料表面形貌造影的低成本光學系統。藉由相位補償機制，來自光延遲元件於連續掃描中的不同掃描範圍與環境擾動所造成的相位偏差可顯著降低。第一代自由空間系統的軸向解析度經驗證在

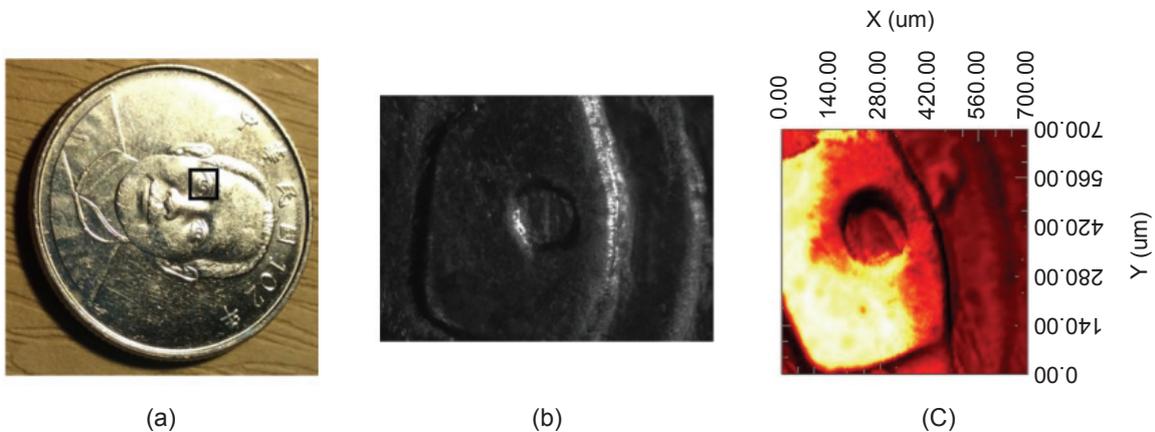


圖 9. 硬幣表面形貌的 (a) 照片，(b) 光學顯微鏡影像與 (c) 表面 3D 形貌顯微鏡的強度影像。

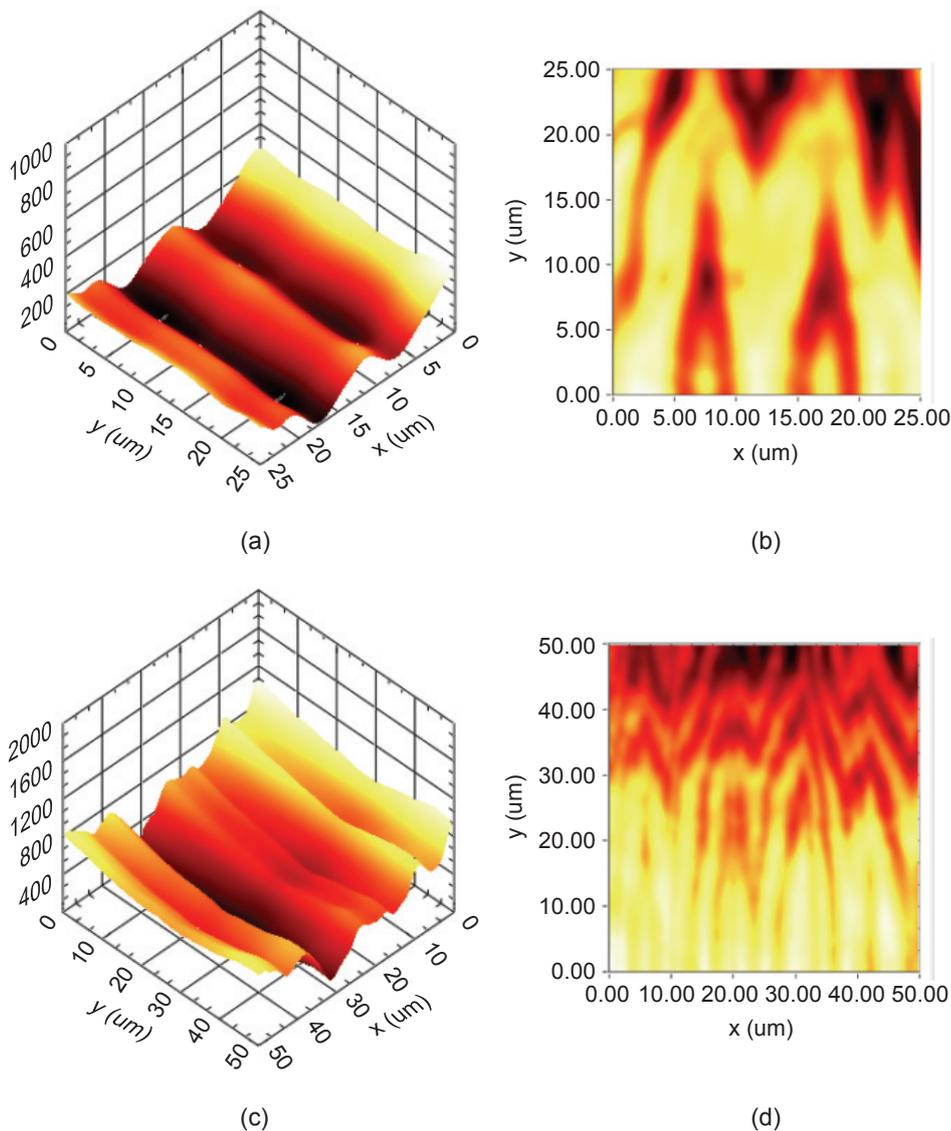


圖 10. 以表面 3D 形貌顯微量測光學鏡片的影像，其中 (a) 與 (b) 分別為相同位置的相位與強度影像，(c) 與 (d) 分別為相同位置的相位與強度影像。

$\pm 5 \text{ nm}$ 以內。雖然橫向解析度受光的繞射性質限制，此系統不需任何樣品的特殊製備即可進行大面積與大深度範圍的表面形貌造影。系列的縮時造影用以觀察洋蔥細胞於脫水過程的形貌變化。此系統已證實適於以奈米尺度的解析度作材料表面形貌的量測。

而以光纖元件為基礎的複合式干涉儀亦已驗證可作生物細胞的奈米靈敏度表面形貌造影。結合相位補償機制，由光延遲元件的不穩定與環境擾動所造成的相位偏差可顯著降低。使用光纖系統可顯著

縮小系統的體積、提升系統的相容性與穩定性，從而提高量測的速度與準確度。此系統的量測靈敏度已驗證在相位補償之後可達到 0.82 nm 的標準差。此系統以 $12.5 \mu\text{m} \times 12.5 \mu\text{m}$ 的影像尺寸與 75 秒的時間間隔，以動態影像進行洋蔥細胞脫水過程形貌變化的觀察。此系統已證實其於可能的生物醫學應用上以奈米尺度的靈敏度量測物體表面形貌的可行性。

至於本研究團隊與博隆精密科技有限公司合作開發的表面 3D 形貌顯微鏡，無論在量測光學鏡

片、半導體元件，甚至生物細胞的動態行為等各方面的應用上皆已獲得極佳的驗證。此產品的推出提供了一兼具低成本、小體積、高效能的表面反射率暨 3D 形貌量測設備的新選擇。此表面 3D 形貌顯微鏡亦具備下列幾項特點：

1. 不需針對待測樣品作任何特殊製備或裁切，即可在短時間內完成非破壞性量測高解析度反射率分布與表面 3D 形貌。
2. 透過此技術特有的自我相位補償機制，量測過程不受環境的電磁與振動干擾，可在尋常環境當中達到小於一奈米的表面 3D 形貌縱向精確度。
3. 有別於一般的廣域量測設備，此儀器即使在量測具高粗糙度與大起伏的樣品表面時，也不會有斑點雜訊與像差的問題，且量測的橫向解析度與量測範圍可依使用者的需求自行決定，適於量測各種尺寸的樣品表面。
4. 市場上唯一可針對不同應用，進行客製化機台外觀與應用軟體的表面 3D 形貌量測設備。

參考文獻

1. C.-C. Lai, and I.-J. Hsu, *Optics Express*, **15** (21), 13949 (2007).
2. C.-W. Chang, M. T. Hou, and I.-J. Hsu, *Optics Letters*, **38** (14), 2434 (2013).



許怡仁先生為國立清華大學物理博士，現任中原大學物理系副教授。

I-Jen Hsu received his Ph.D. in physics from National Tsing Hua University.

He is currently an associate professor in the Department of Physics at Chung Yuan Christian University.



張群偉先生為中原大學物理博士。

Chun-Wei Chang received his Ph.D. in physics from Chung Yuan Christian University.



林鈺凱先生現為中原大學物理系博士班研究生。

Yu-Kai Lin is currently a Ph.D. student in the Department of Physics at Chung Yuan Christian University.



侯帝光先生為國立清華大學動力機械博士，現任國立聯合大學機械系副教授。

Max T. Hou received his Ph.D. in power mechanical engineering from National Tsing Hua University. He is currently an associate professor in the Department of Mechanical Engineering at National United University.