

中華民國第 55 屆中小學科學展覽會 作品說明書

高中組 物理科

第一名

最佳創意獎

040110

水波全像法

學校名稱：高雄市立高雄高級中學

作者： 高一 梁竣閔 高一 曾少茵	指導老師： 曾柏文 盧政良
-------------------------	---------------------

關鍵詞：全像、相干性

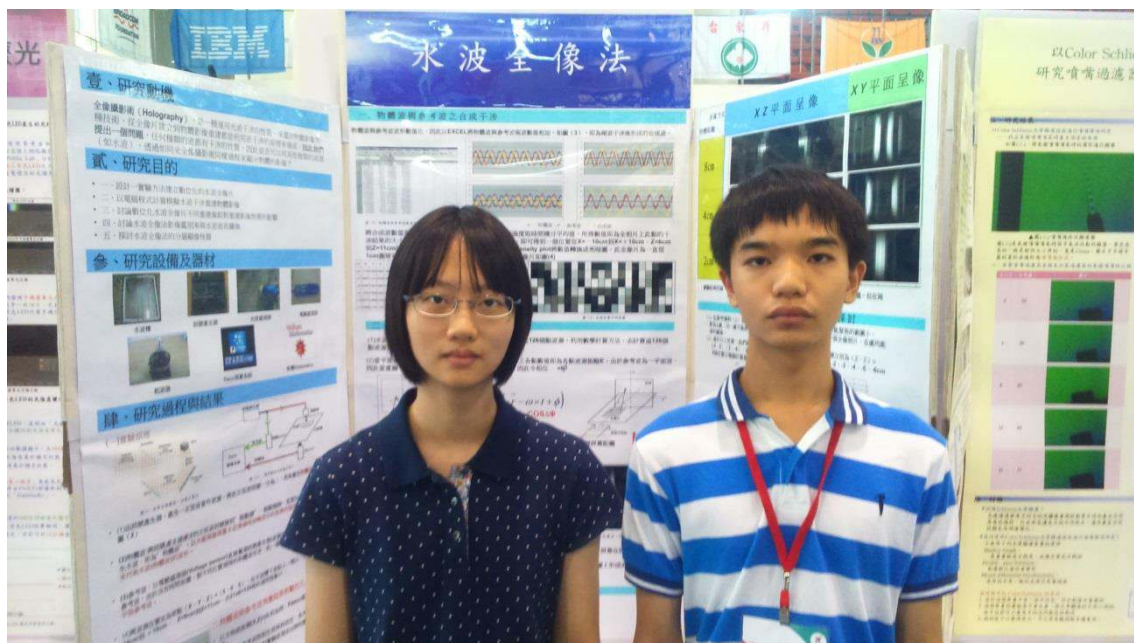
得獎感言

科展~打開科學探索的鑰匙

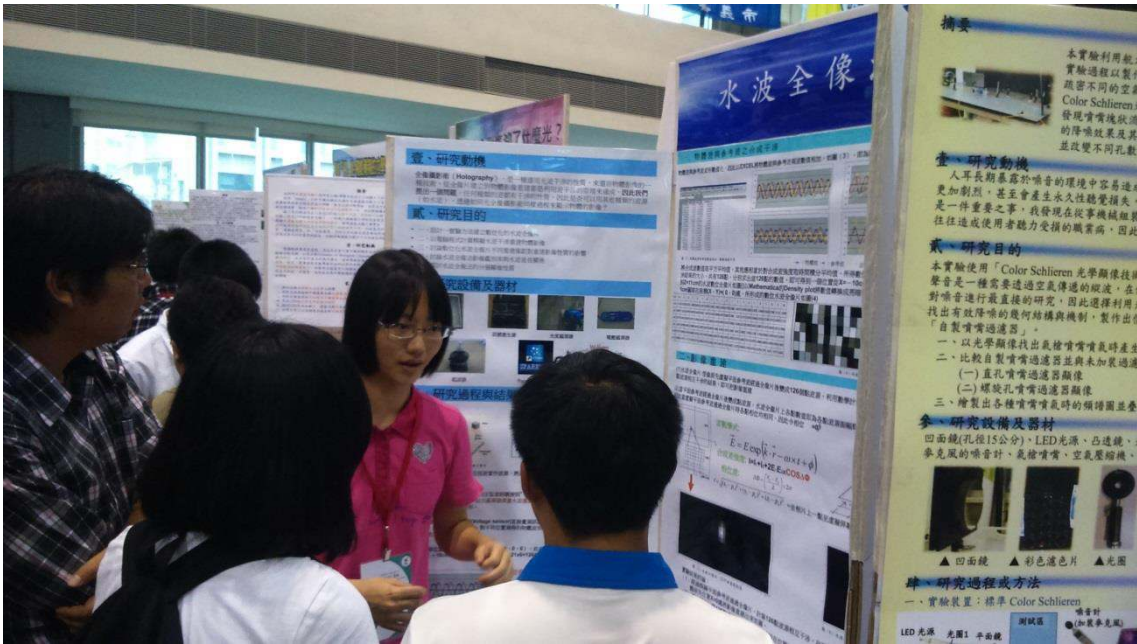
科展像一把鑰匙，開啟通往探索科學奧秘的道路，讓我們一頭栽進水波全像攝影術的領域。永遠不會忘記年假時待在實驗室的孤寂奮戰、段考前整理報告的揪心熬夜、實驗不順如重石壓胸口的挫折忍耐、長期待在實驗室暗房中測量數據的革命情感、準備口試及面對教授提問時的膽顫心驚…，這些都是最寶貴的回憶與經歷。

基於我們實驗的獨特性，遇到瓶頸是家常便飯，但是我們越挫越勇，不停的重新設計實驗，有部分實驗器材甚至是在老師的協助下由我們自行製作完成的。我們利用假日、放學的時間，待在實驗室進行研究，希望能夠驗證我們的想法，吃飯時也滿腦子都在想如何才能降低實驗的誤差，每一次的進步都是從這些失敗與錯誤中逐漸累積得來的，慢慢地改進實驗的方法…終於有了美好的成果！

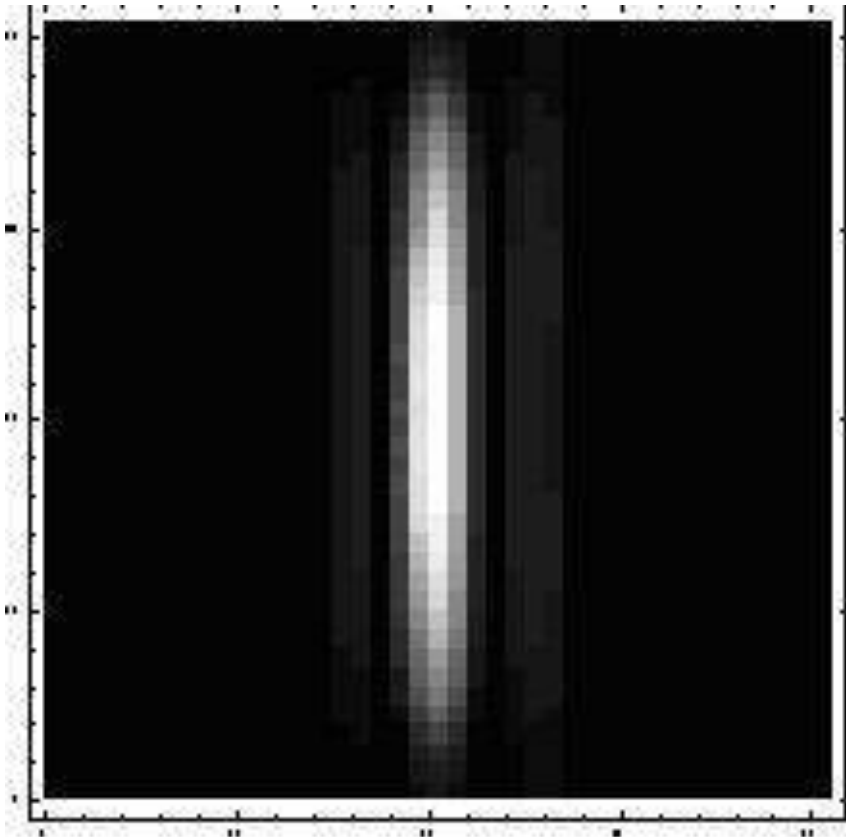
當然最重要的是這一路走來受到許多人不遺餘力的幫助，不論是老師的指導，父母、好友的關心打氣，都給了我們莫大的鼓勵與支持，讓我們探索科學的能力更臻成熟，由衷感謝他們為我們的付出與關懷。我們將帶著這些洗鍊與祝福，在未來的學習路上，繼續創造巔峰。



作者與作品看板



與參觀者解說作品



水波全像影像重建圖

摘要

全像攝影 (Holography)，是運用光波干涉性質，來呈現物體影像。干涉是波基本性質因此我們嘗試改以水波當波源，經過全像攝影相同過程來呈現物體影像。

我們將訊號產生器產生訊號一分為二，一個接到振動器產生水波，用光感測器接收相當於全像攝影物體波，另一個訊號直接以電壓感測器測量作為一虛擬平面參考波，將兩數值相加模擬物體波與參考波干涉，得到一數位化水波全像片。然後以程式計算虛擬平面參考波通過水波全像片，全像片上各個點波源相互干涉結果，成功將影像重建出來。然後討論影響影像重建變因、鑑別率，最後我們將不同位置物體影像一層一層顯示達成斷層掃瞄效果。水波全像法是我們自行獨力發展出來，以關鍵字搜尋並沒有發現類似實驗。

壹、研究動機

全像攝影術 (Holography)，主要是運用光波干涉的性質，來呈現物體影像的一種方法，從全像片建立到物體影像重建都是利用波干涉的原理來達成，因此我們提出一個問題，任何種類的波都有干涉的性質，我們是否可以用其他種類的波源（例如水波），透過如同光全像攝影術同樣過程來顯示物體的影像？

貳、研究目的

- 一、設計一實驗方法，建立數位化的水波全像片
- 二、以電腦程式計算，模擬水波干涉重建物體影像
- 三、討論數位化水波全像片不同重建像距對重建影像性質的影響
- 四、討論水波全像法，影像鑑別率與水波波長關係
- 五、討論水波全像法，分層重建影像的性質

參、研究設備及器材

			
水波槽	訊號產生器	起波器	光度 sensor
			
電壓 sensor	Pasco 測量系統	軟體 Mathematic	

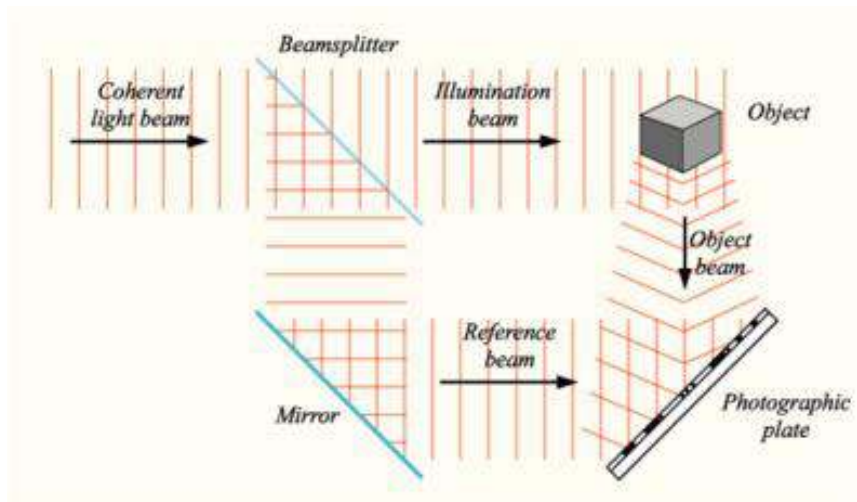
肆、研究過程與研究結果

一、設計一實驗方法，建立數位化的水波全像片：

水波全像片實驗原理：

光學全像攝影，全像片製作：

圖(1)為光的全像攝影，首先將一束雷射用分光器分成兩束：一束光用於照亮物體，物體會將它散射，反射光（物體波）會照在記錄介質上；另一束（參考波）光直接照射在記錄介質上面。根據繞射理論，物體上面的每一個點都可以看作是一個點光源。每個點光源所發射出來的光(物體波)都會和參考光發生干涉，結果產生的圖樣（全像片）是所有的點光源和參考光源干涉圖樣的疊加。



圖(1) 光學全像攝影，全像片製作

如何以光波建立全像片，分解成以下 4 個步驟：

- (1) 將一道光以半透鏡分成兩道光
- (2) 其中一道光照射物體，反射產生物體波(Object Wave)

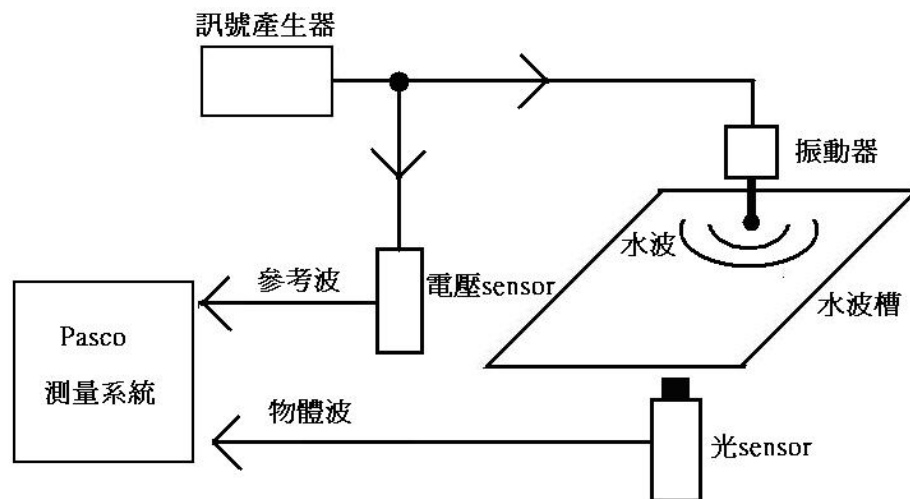
(3) 另外一道光當作參考波(Reference Wave)

(4) 將物體波與參考波相互干涉，以底片曝光記錄下「物體波」與「參考波」的干涉結果，產生全像片。因此全像攝影不只記錄下物體波的強度，同時也記錄到物體波與參考波兩者相位差的資訊。

如何建立由水波干涉，形成”數位化水波全像片”

對照光波建立全像片 4 個步驟：

(1)由訊號產生器，產生一正弦波當作波源，與光不同，訊號產生器是由電子零件震盪方式產生的訊號，因此訊號很穩定，具有良好的相干性(coherence)。將此正弦波訊號一分為二，用來產生物體波與參考波，如圖（2）



圖（2）：製作數位化水波全像片

(2)物體波:

(a)將訊號產生器產生的正弦波訊號接到”振動器”，振動端接一直徑 1cm 的圓

球,振動水面產生水波，即為”物體波”

(b)物體波的記錄：

如何測量水波的形狀、將水波波形數值化？

如何測量水波經過時，水面上下微小的變化？在嘗試多種作法後，我們選擇將水波波形轉化為光的明暗程度，以光感測器測量水波通過時波峰波谷的差異所造成明暗不同的亮度變化，來代表水波(物體波)的形狀。

(3)參考波：

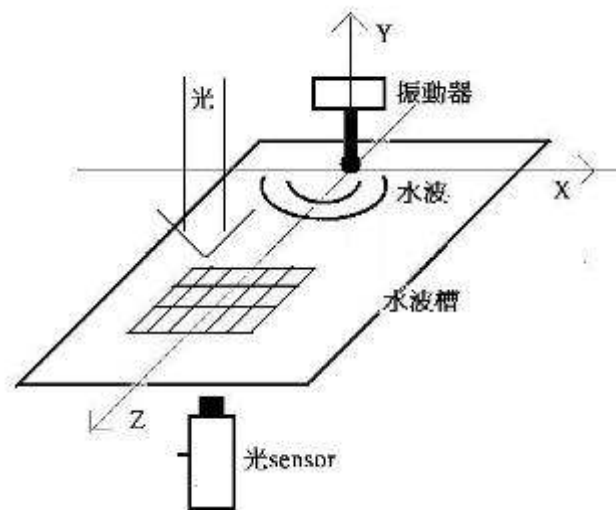
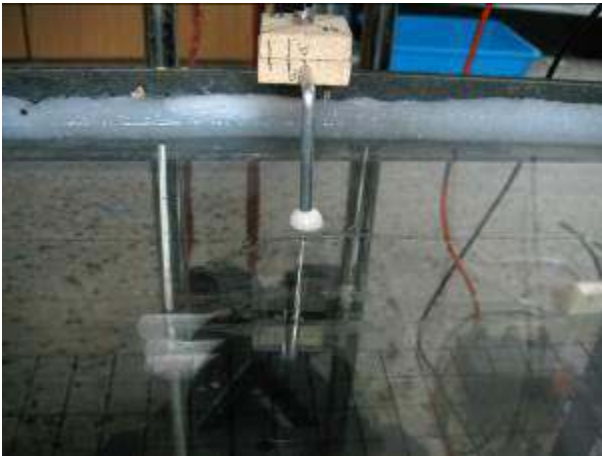
問題：水波全像法中要如何產生參考波是這個實驗最困難的部分，剛開始的構想就如同光的全像法一樣，從訊號產生器分出另一個訊號並也接上起波器，在同一水波槽上同時產生另一個水波作為參考波，直接讓物體波和參考波在水波槽上相互干涉，但接下來的問題是，要如何重建影像？因為水波和光波性質的差異，並沒有辦法以一真實水波(參考波)經過水波全像片，在水波槽上還原出原來的影像。

作法：以光波全像法而言，如果所用光源為平面波，以此平面波當作參考波，當波到達底片時，在某一時刻，此參考波在底片上的每個位置均為同一相位。以此為依據，在水波全像裡，另一參考波訊號不轉換為水波，而是以電壓感測器(Voltage sensor)直接量測訊號產生器(波源)所產生的電訊號，以此訊號作為參考波，由於沒有時間延遲，對不同位置測得的物體波而言，此一虛擬參考波相位均相同，為一虛擬平面參考波，和光波全像法平面參考波到達底片時的情形是一樣的。

(4)物體波”與”參考波”的干涉：在光波全像中，以底片紀錄兩波干涉後的合成波形成全像片，在水波全像中，我們已成功經將物體波與參考波形狀數位化，以數值來代表波形，因此將兩波數值相加效果，相當於兩波互相干涉，故將在水波槽上每一格測得的數據經處理後即可構成”數位化全相片”

水波全像片實驗操作：

水波全像片建立，實驗裝置如圖（3）：



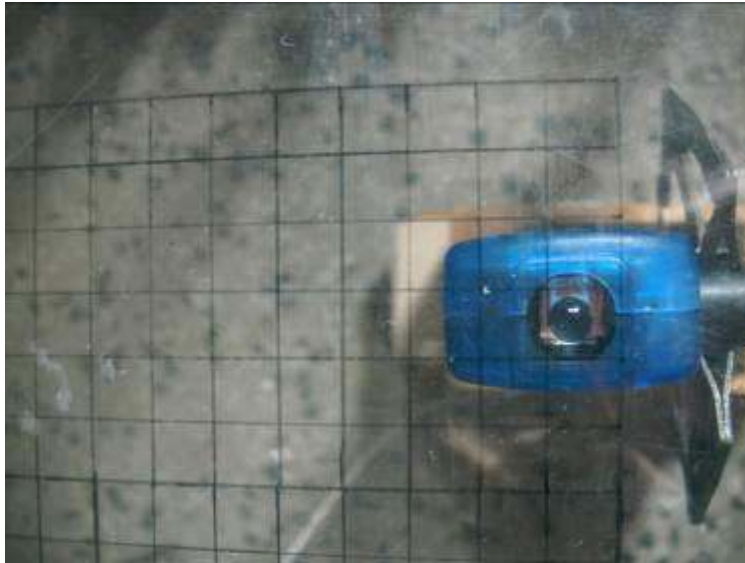
圖（3）水波全像片建立，實驗裝置

(1) 以訊號產生器產生 $f=30\text{Hz}$ 的正弦波，分成兩路：

A 線路：

- 1、訊號產生器產生正弦波訊號接上振動器，振動器接上一個直徑 1cm 圓球，在水面上振動產生水波，作為物體波。
- 2、將波源位置定為原點 $(X, Y, Z) = (0, 0, 0)$ ，在水波槽下面貼上一張以一公分為間隔， $X=-10\text{cm}$ 到 $+10\text{cm}$ ， $Z=6\text{cm}$ 到 $Z=11\text{cm}$ ，共 $21 \times 6=126$ 格

的透明投影片如圖（4）。



圖（4）光訊號（物體波）測量

- 3、將 Light sensor 感應器置於水波槽下方，測量水波經過時，光亮度的變化，改變位置時只要將 Light sensor 感應器置於格子內，增加測量便利性。
- 4、由於使用的光源非理想平行光，為免發生測量位置改變的誤差，因此必須將光 sensor 感應頭盡量水波槽。
- 5、實驗剛進行時，Light sensor 測量到很嚴重的雜訊，類似於圖（5），經過一番努力後才發現，雖然光源是鎢絲燈，但因為所接電源為交流電，所以鎢絲燈所發出的光線並非穩定亮度的光源，而是有些微大小變化(頻率為 60Hz)，一般情況並不易察覺，但在這實驗中影響水波波形測量，後來將電源改為有穩定電源功能的直流電源供應器，才解決雜訊的問題。
- 6、利用快速攝影機，求出水深 1cm，水波波速為 24cm/s，這次實驗所用訊號頻率 $f=30\text{Hz}$ ，因此水波波長 $\lambda=0.8\text{cm}$ ，如圖（5）

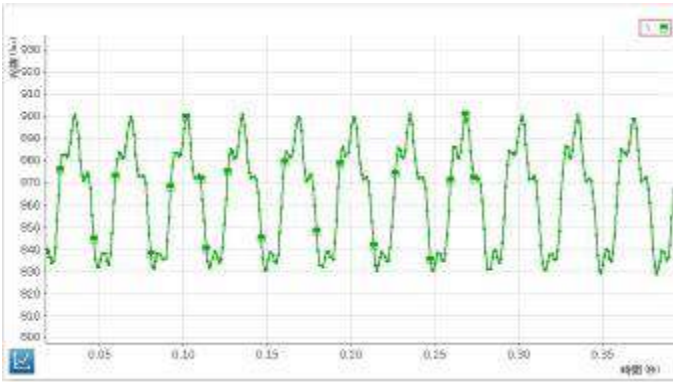


圖 (5A) 受雜訊干擾水波波形



圖 (5B) 水波波速測量

B 線路： 同時間將訊號產生器產生的訊號直接接上 Voltage sensor，測量電壓作為參考波。

(1) 以 Pasco 測量系統，設定測量頻率為 1000Hz(每秒進行 1000 次量測)，同時測量物體波與參考波，light sensor 在水波槽下方，按照事先畫好的格子每隔 1cm 測量水波槽不同位置水波波形，同時以 voltage sensor 測量訊號產生器電壓訊號，每次實驗共測量 126 次，最後得到 126 組的資料。

(2) 物體波與參考波測量結果如圖 (6)：

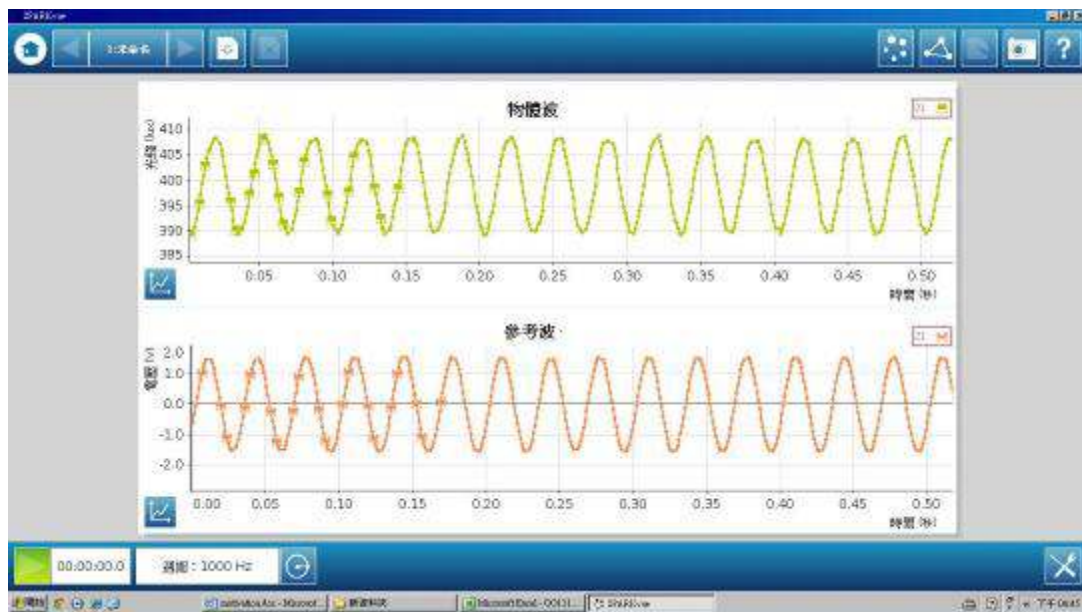
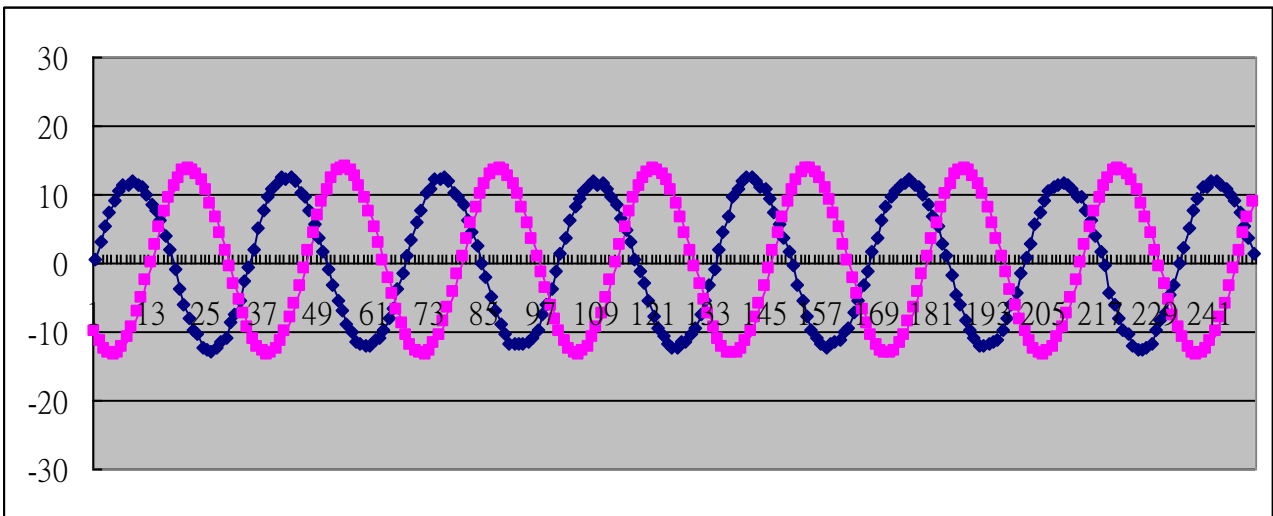
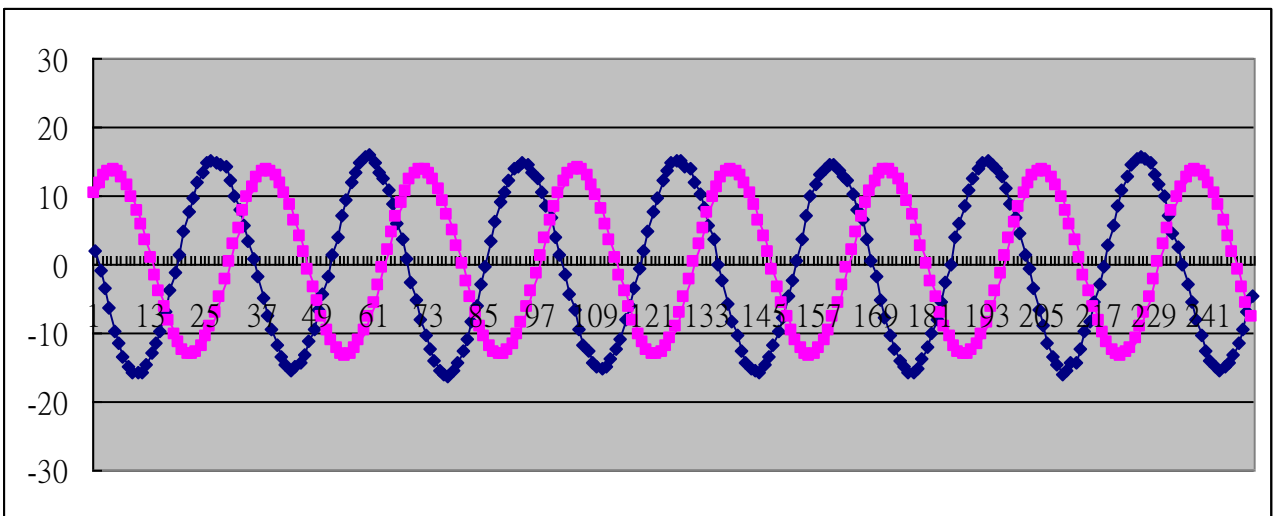


圖 (6) 物體波與參考波測量結果

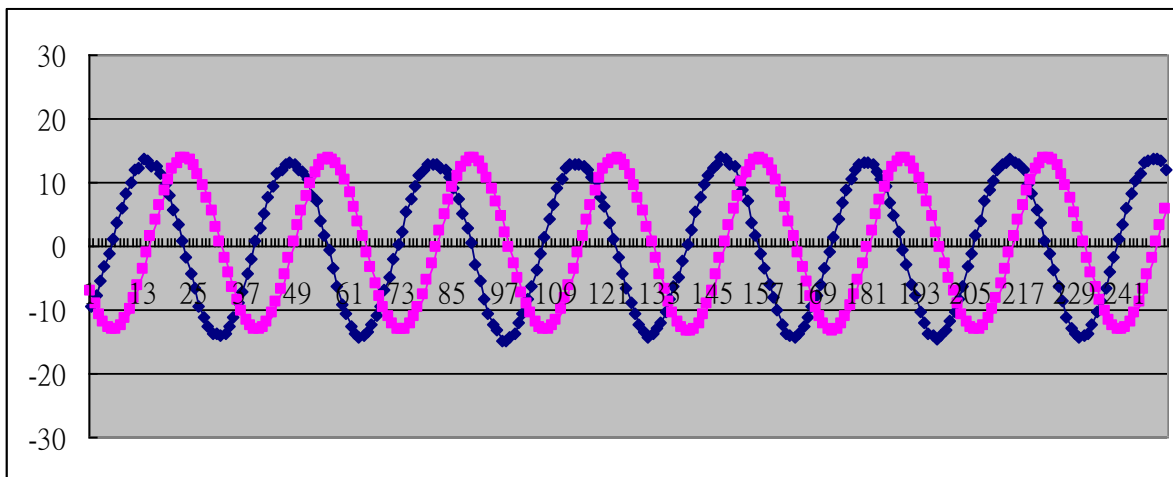
(3) 圖(7)是在座標 (X、Z) : (6、0)、(6、5)、(6、7)、(7、-5)、(7、4)，測量得到物體波與參考波的波形。



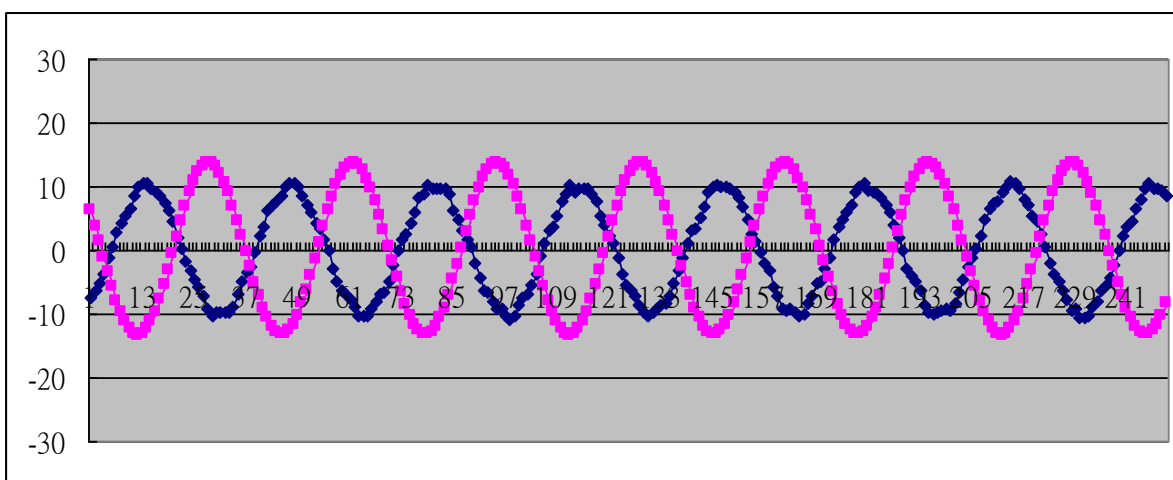
座標 (X、Z) : (6、0) 測得物體波與參考波波形 —◆— : 物體波 —■— : 參考波



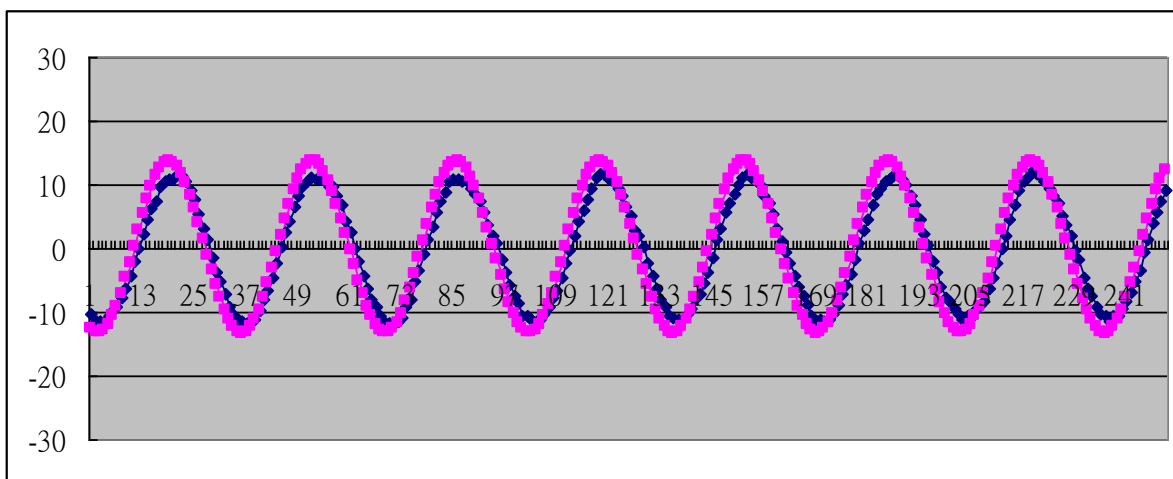
座標 (X、Z) : (6、5) 測得物體波與參考波波形 —◆— : 物體波 —■— : 參考波



座標 (X、Z) : (6、7) 測得物體波與參考波波形 —◆— : 物體波 —■— : 參考波



座標 (X、Z) : (7、-5) 測得物體波與參考波波形 —◆— : 物體波 —■— : 參考波



座標 (X、Z) : (7、4) 測得物體波與參考波波形 —◆— : 物體波 —■— : 參考波

圖(7)在不同座標測得物體波與參考波波形

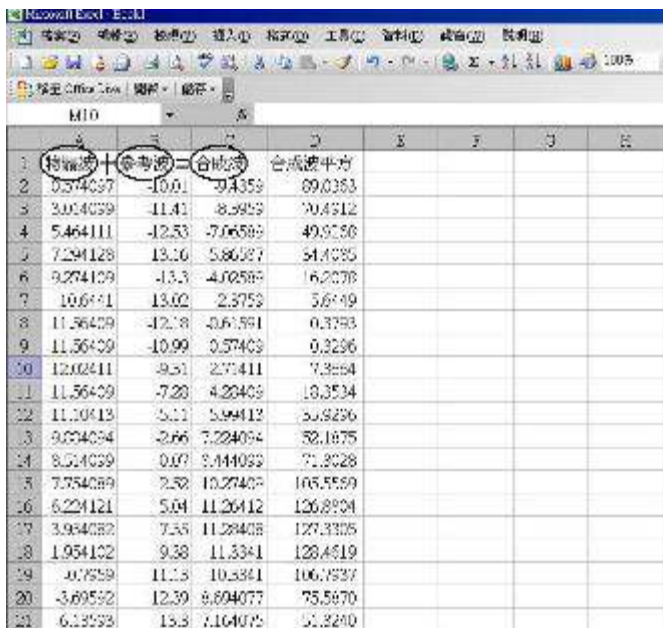
實驗結果討論：

(1) 由測量結果，物體波波形（光的亮暗）與參考波波形（直接測量訊號電壓）均為正弦波形狀，因此將水波槽下方光的明暗程度來代表水波波形是可行的。

(2) 由測量圖形，在不同位置測量到的物體波與參考波之間有不同相位差，因物體波是由起波器產生水波，傳遞一距離後被測量到（有一時間延遲），與參考波直接測量電壓（沒有時間延遲），因此兩波之間產生相位差。

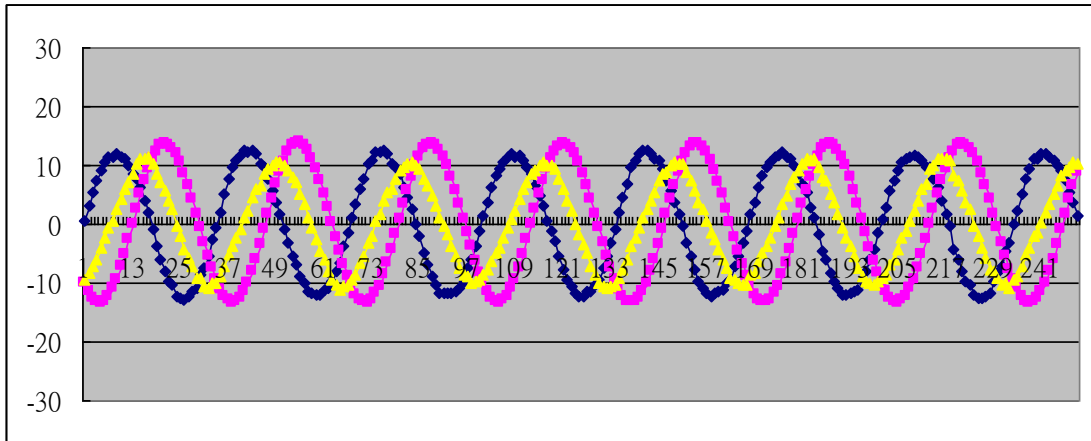
(3) 由測量圖形，物體波與參考波之間有相位差，在同一位置相位差保持不變，也就是說我們實驗設計物體波與參考波之間有很好的相干性（coherence），反之，如果物體波與參考波之間沒有相干性，水波全像法將不可行。

(1) 如何將物體波與參考波兩波干涉？因為我們已經將物體波與參考波數值化，用 EXCEL 將物體波與參考波兩波數值相加，如圖（8），即為兩波干涉後形成的合成波。

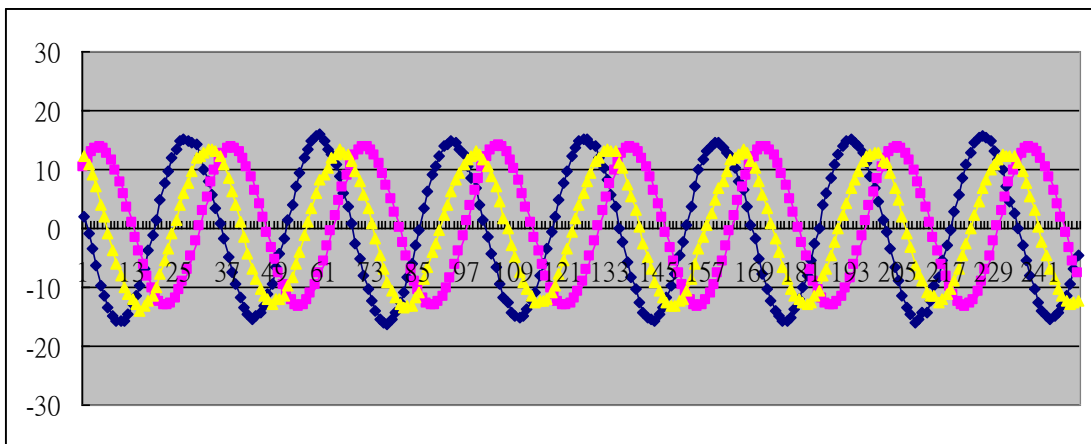


	物體波	參考波	合成波	合成波平方
1	0.574037	-10.01	-9.4359	89.0363
2	3.054039	-11.41	-8.3559	70.4212
3	5.464111	-12.53	-7.06589	49.9256
4	7.291128	-13.16	-5.86987	34.4435
5	9.274109	-13.3	-4.02589	16.2078
6	10.6441	-13.02	-2.3758	5.6449
7	11.56409	-12.18	-0.61581	0.3793
8	11.56409	-10.99	0.57403	0.3296
9	12.03411	-9.51	2.52411	6.3714
10	11.56409	-7.20	4.36409	19.0454
11	11.50413	-5.11	6.39413	40.8796
12	9.034094	-2.66	6.374094	40.6375
13	5.54039	0.07	5.61039	31.4688
14	3.754039	2.52	6.27403	39.3659
15	5.224121	5.04	10.26412	105.3304
16	3.954032	7.35	11.30403	127.7705
17	1.954102	9.38	11.3341	128.4519
18	-0.7559	11.13	10.3741	107.6037
19	-3.69592	12.39	8.694077	75.5870
20	6.13593	13.3	7.164075	51.3280

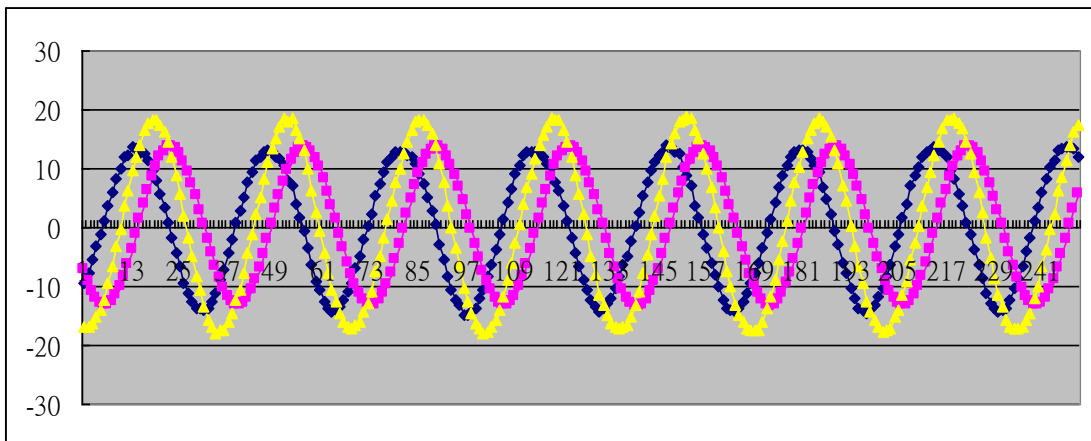
圖（8）物體波與參考波數值相加，模擬兩波干涉



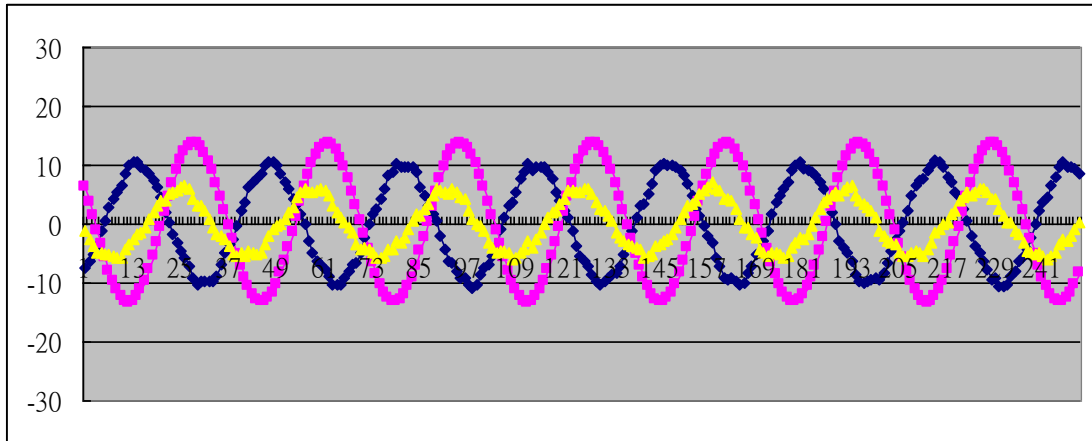
座標 (X、Z) : (6、0) ◆ : 物體波 ■ : 參考波 ▲ : 合成波



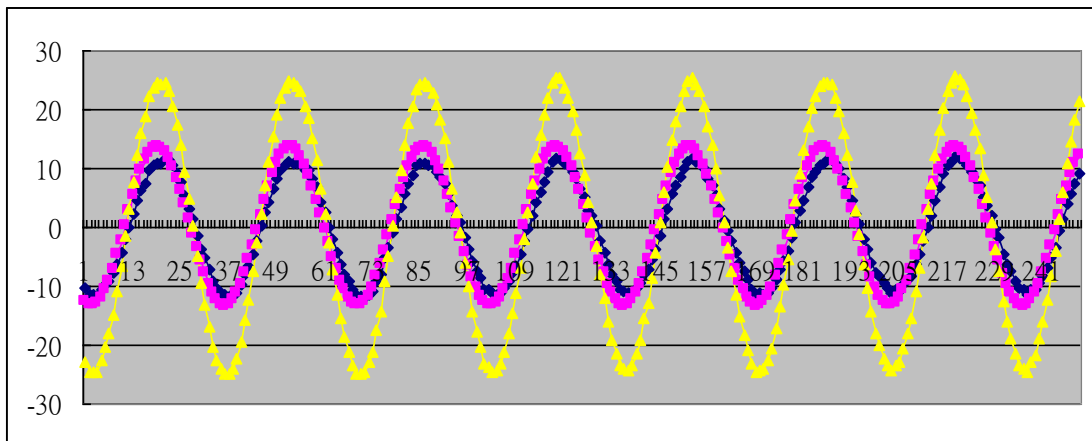
座標 (X、Z) : (6、5) ◆ : 物體波 ■ : 參考波 ▲ : 合成波



(X、Z) : (6、7) ◆ : 物體波 ■ : 參考波 ▲ : 合成波



座標 (X、Z) : (7、-5) ◆ : 物體波 ■ : 參考波 ▲ : 合成波



座標 (X、Z) : (7、4) ◆ : 物體波 ■ : 參考波 ▲ : 合成波

圖 (9) 在不同座標，測得合成波的波形

(2) 圖(9)，為水波槽不同位置合成波的波形，在物體波與參考波不同相位差下，兩者干涉後合成波有不同振幅。

(3) 將合成波數值取平方平均值，其效應相當於對合成波強度取時間積分平均值，所得數值即為全相片上此點的干涉結果的大小，共有 126 點，分別求出這 126 點的數值，即可得到一個位置從 $X = -10\text{cm}$ 到 $X = +10\text{cm}$ ， $Z = 6\text{cm}$ 到 $Z = 11\text{cm}$

的水波數位全像片。

(4) 結果如圖 (10)，以 Mathematica 的 Density plot 將數值轉換成亮暗圖，此全像片為一直徑 1cm 圓球在座標(X、Y)=(0、0)處，所形成的數位水波全像片

x=	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
z=6	0.176	0.2262	0.5824	0.985	0.6814	0.1013	0.9761	0.2582	0.985	0.1636	0.1578	0.2682	0.9927	0.2939	0.8902	0.2029	0.848	0.9162	0.3394	0.114	0.024
z=7	0.0055	0.181	0.0558	0.8955	0.6824	0.0391	0.847	0.4164	0.9828	0.4435	0.8852	0.5081	0.957	0.4712	0.9876	0.0046	0.9322	0.7138	0.0745	0.0505	0.1722
z=8	0.9567	0.6013	0.0055	0.2971	0.9584	0.0187	0.7917	0.0602	0.9103	0.9929	0.8327	0.9606	0.5686	0.0139	0.9856	0.0615	0.8851	0.6507	0.0633	0.2812	0.9908
z=9	0.492	0.9979	0.0924	0.2984	0.8624	0.1087	0.8235	0.9103	0.1066	0.458	0.3055	0.3698	0.0427	0.9092	0.706	0.1148	0.196	0.8586	0.1424	0.4921	0.8343
z=10	0.9122	0.9984	0.4736	0.4898	0.5476	0.1643	0.4837	0.6964	0.0067	0.1702	0.8703	0.1093	0.03374	0.8002	0.5533	0.0707	0.2096	0.8685	0.4289	0.9709	0.9647
z=11	0.0928	0.7779	0.775	0.5224	0.8713	0.0396	0.4475	0.9746	0.7291	0.0543	0.2302	0.0645	0.7253	0.9674	0.3199	0.0734	0.8128	0.5745	0.447	0.741	0.0241

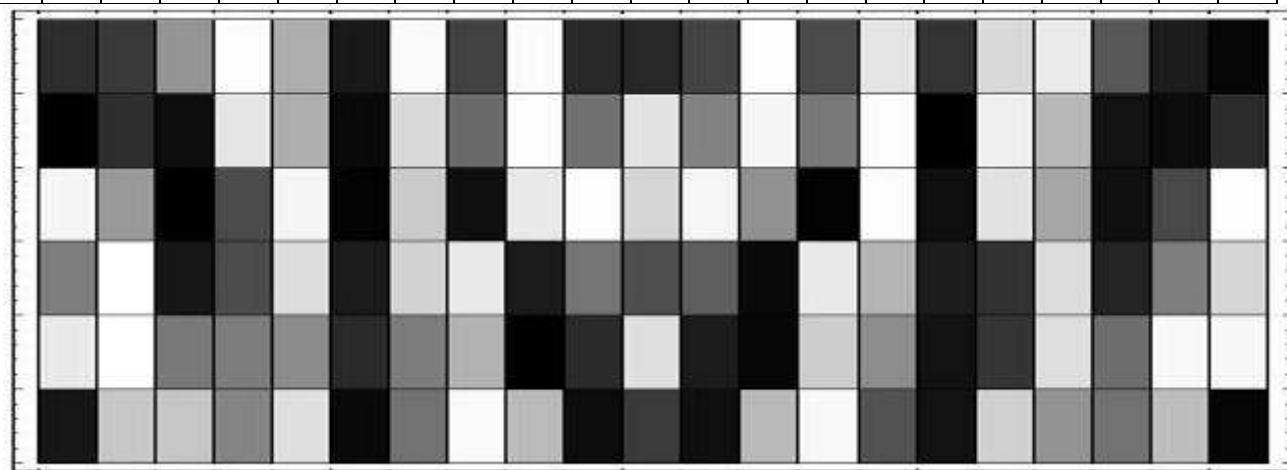


圖 (10) 水波全像片明暗圖

二、以電腦程式計算，模擬水波干涉重建物體影像

水波全像片:影像重建

- (1) 光全像法如何重建影像：在光波全像法中只要將原先的參考光打回記錄著各點參考波和物體波相位差的全相片，這個過程可視為在全像片上產生多個點波源，這些點波源在空間中相互干涉，即可重建原先影像，如圖 (11)

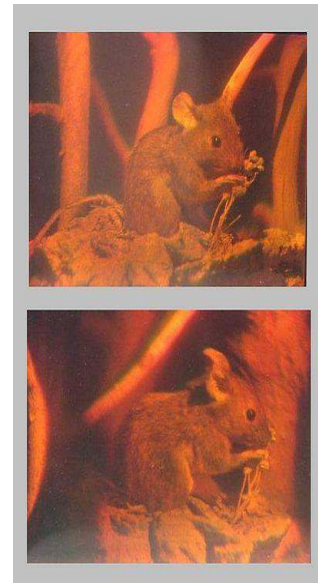
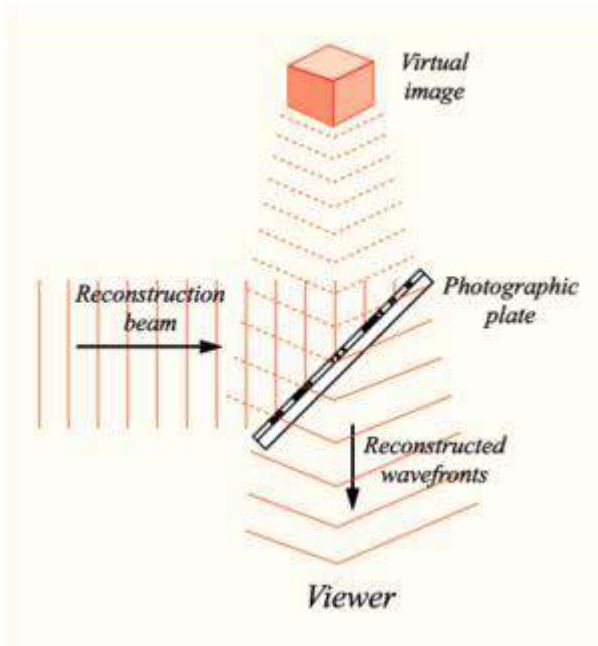


圖 (11) 光全像法，影像重建

(2) 如何在水波全像法重建物體影像，想像原先虛擬平面參考波經過全像片後變成 126 個點波源，利用數學計算方法，去計算這 126 個點波源相互干涉的結果，即可把影像重建。

(3) 有一波朝 \vec{r} 方向前進，這一個波可用下列數學式表示：

$$\vec{E} = E \exp(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \times t + \phi)$$

E：振幅 $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ λ 波長 $\omega = 2\pi f$ 角頻率 ϕ 相位

當平面參考波經過全像片後變成點波源，水波全像片上各點數值即為各點波源振幅 E，由於我們使用的是平面參考波，因此當虛擬平面參考波通過全像片時各點相位均相同，因此令相位 $\phi = 0$ ，各點波源可用下列數學式表示：

$$\vec{E} = E \exp(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega \times t)$$

(4) 由參考資料(1)兩波干涉的理論計算：

當兩波在空間相遇，相互干涉形成合成波，合成波 E

$$E^2 = (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2) = E_1^2 + E_2^2 + 2 \times \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2$$

對時間取積分平均值，合成波強度 I， $I = I_1 + I_2 + 2E_1E_2 \times \cos \Delta \Phi$

第三項 $2E_1E_2 \times \cos \Delta \Phi$ 為干涉項

$$\Delta \Phi : \text{相位差} \quad \Delta \Phi = \left(\frac{\ell_1 - \ell_2}{\lambda} \right) \times 2\pi \quad \ell : \text{波程}$$

三個波源干涉

$$\begin{aligned} & (\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3) \cdot (\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3) \\ &= I_1 + I_2 + I_3 + 2 \times (E_1E_2 \times \cos \Delta \Phi_{12} + E_1E_3 \times \cos \Delta \Phi_{13} + E_2E_3 \times \cos \Delta \Phi_{23}) \end{aligned}$$

兩兩一對，干涉項共有 $C_2^3 = 3$ 項

(5) 假想平面參考波經水波全像片，形成 126 個點波源，第 i 個點波源與第 j 個點波源的干涉：

(6) 重建影像時，「假想屏幕」可置於 XZ 平面如圖 (12a)，或置於 XZ 平面如圖

(12b)

計算 i 與 j 至屏幕某點距離： $\ell_i \quad \ell_j$

$$\text{兩點相位差：} \quad \Delta \Phi = \left(\frac{\ell_i - \ell_j}{\lambda} \right) \times 2\pi$$

兩波干涉項： $2E_iE_j \times \cos \Delta \Phi$

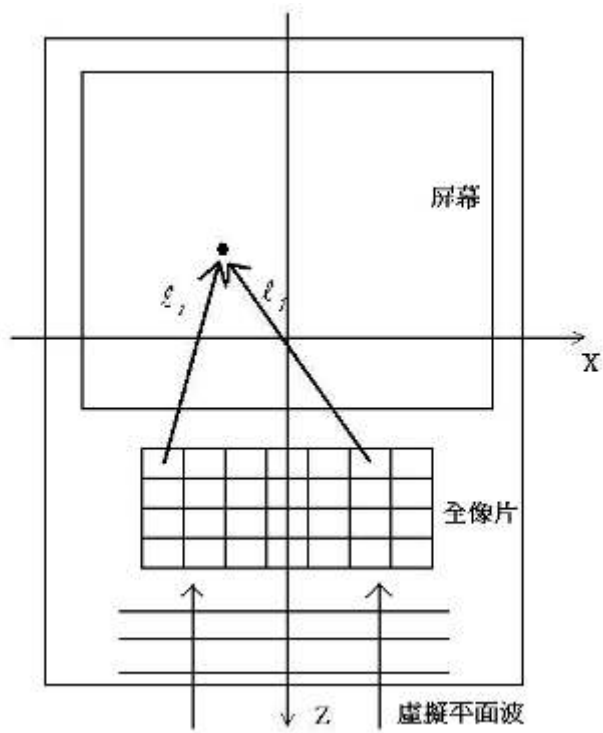


圖 (12a) 水波全像法，於 XZ 平面重建物體影像

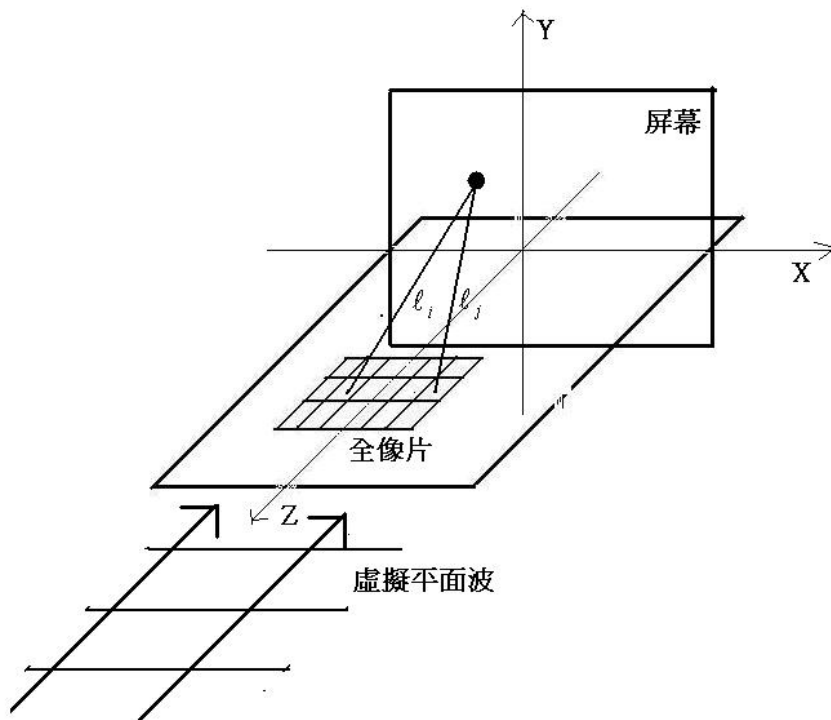


圖 (12b) 水波全像法，於 XY 平面重建物體影像

(7) N 個點波源干涉，兩兩一對，干涉項會有 C_2^N 項，126 個點波源干涉，干涉

項會有 $C_2^{126} = \frac{126 \times 125}{2 \times 1} = 7875$ 項，用手工去一項項計算實在不可能，因此寫一程式，來計算這 126 個點波源的干涉。

(8) 電腦程式簡略如下：px py 屏幕某點位置 xi zj 全像片某點位置

$p(f) = ((xi - px(f))^2 + py(f)^2 + zi * zi)^{.5}$ -----計算波程：點波源至屏幕距離

FOR i = 1 TO 125 -----迴圈：126 個點波源兩兩一組

FOR j = i + 1 TO 126 共有 7875 項

tep = (ABS(p(i) - p(j))) / b -----計算兩點波源波程差

tep = tep - FIX(tep)

lltep = lltep + (2×pe(i)× pe(j)×COS(tep× 6.283)) --計算兩波源干涉結果

NEXT j

NEXT i

p(i)：波程 pe(i)：波振幅 b：波長

(9) 於 XZ 平面重建物體影像：計算屏幕在 X=-10cm 至 X=+10cm、Z=-3cm

至 Z=+6Cm 每隔 0.5cm 計算 126 個點波源相互干涉結果，把影像重建

(10) 於 XY 平面重建物體影像：屏幕取在 (X、Y) = (0,0) 處 (原物體所在

位置)，計算屏幕在 X=-10cm 至 X=+10cm、Y=-10cm 至 Y=+10cm 每隔

0.5cm 計算 126 個點波源相互干涉結果，把影像重建。

(11) 經過電腦計算水波全像片 126 個點波源的干涉，得到一 41×41 數值矩陣，

以 Mathematica 的 DensityPlot 將數值大小轉換成亮暗，最後影像如圖 (13)。

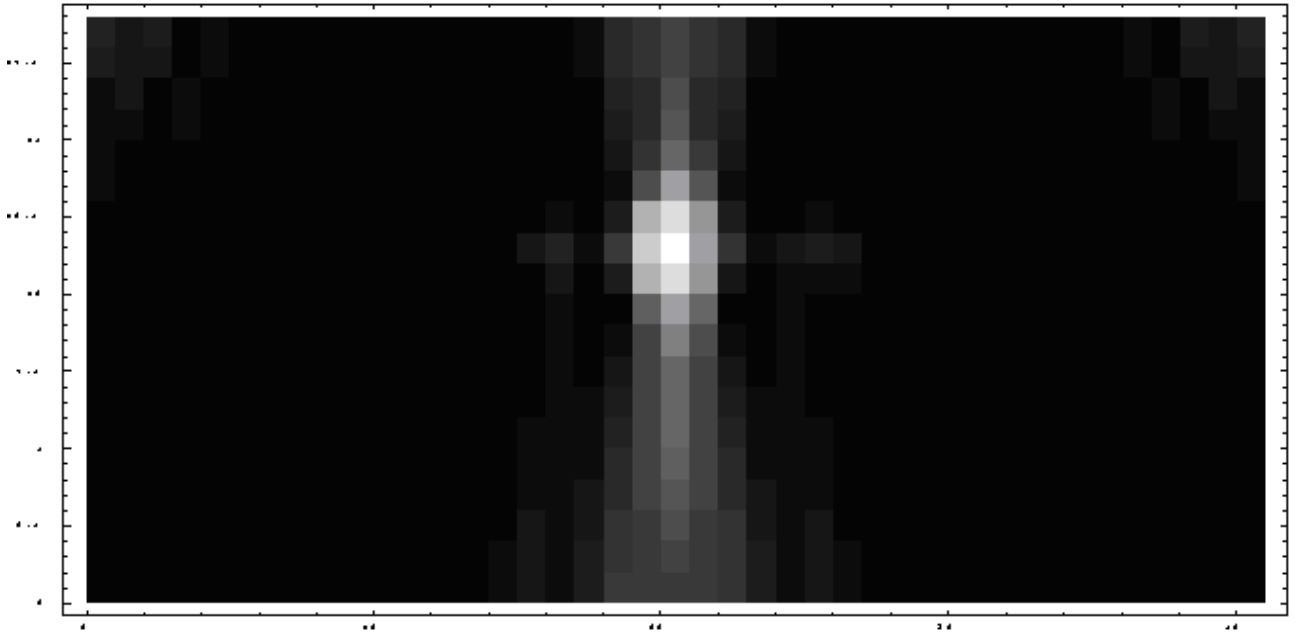


圖 (13a) XZ 平面重建出來的物體影像

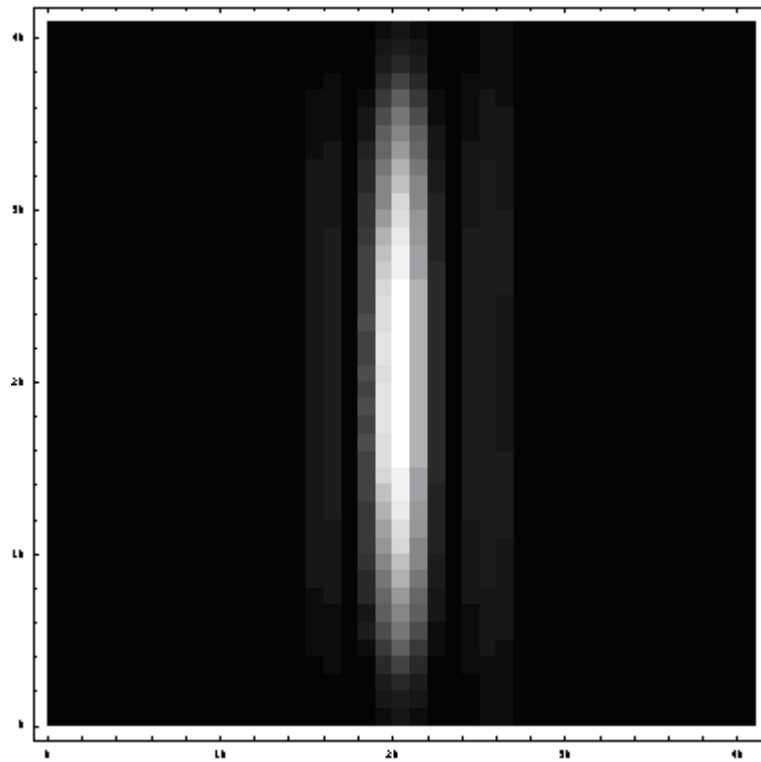


圖 (13b) XY 平面重建出來的物體影像

實驗結果討論：

(1) 經過模擬平面參考波通過全像片，計算 126 點波源相互干涉，在 xy 屏幕

在物體原先位置 $X=0$ 處將影像重建出來如圖 (13)。

(2) 由實驗結果可以驗證我們以水波取代光波，發展出「水波全像法」確實可行。

(3) 經由電腦計算 126 點波干涉，在原先物體所在位置計算出較大數值，在圖上形成亮點，其餘不是物體所在位置，計算出較小數值，在圖上形成暗點。

三、討論數位化水波全像片不同重建像距對重建影像性質的影響

(1) 在證明並確認水波全像法的可行性後，我們探討於屏幕位置對影像重建性質差異的影響：

(2) 物體原先位置在 $Z=0$ 處，電腦模擬干涉重建影像時用三個不同位置，分別離物體 0cm、2cm、4cm 圖 (14)。

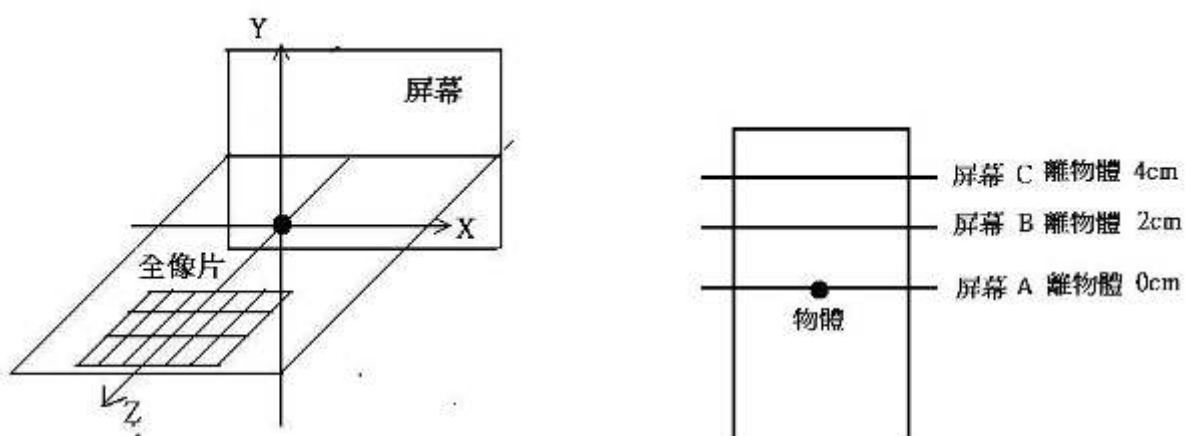
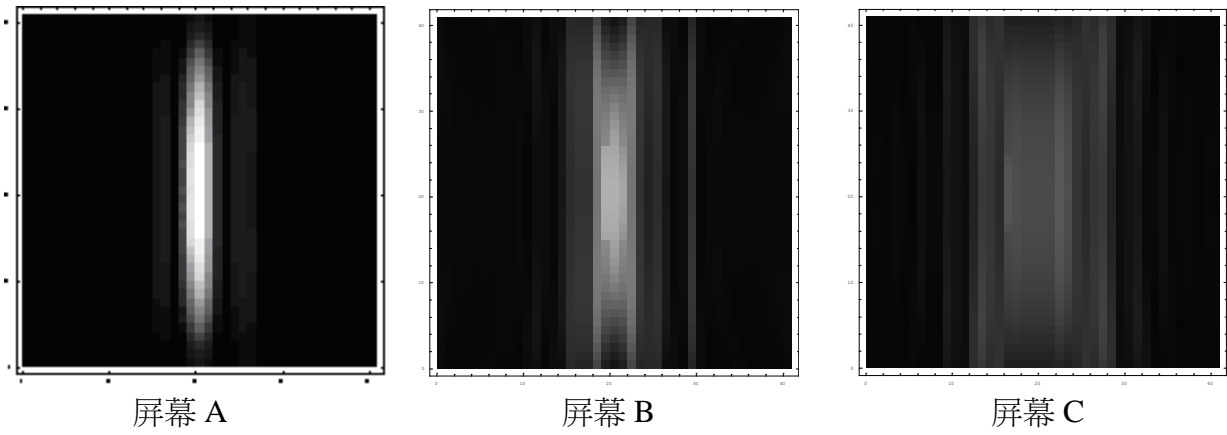


圖 (14) 離物體不同距離屏幕重建影像



圖（15）離物體不同距離重建的影像

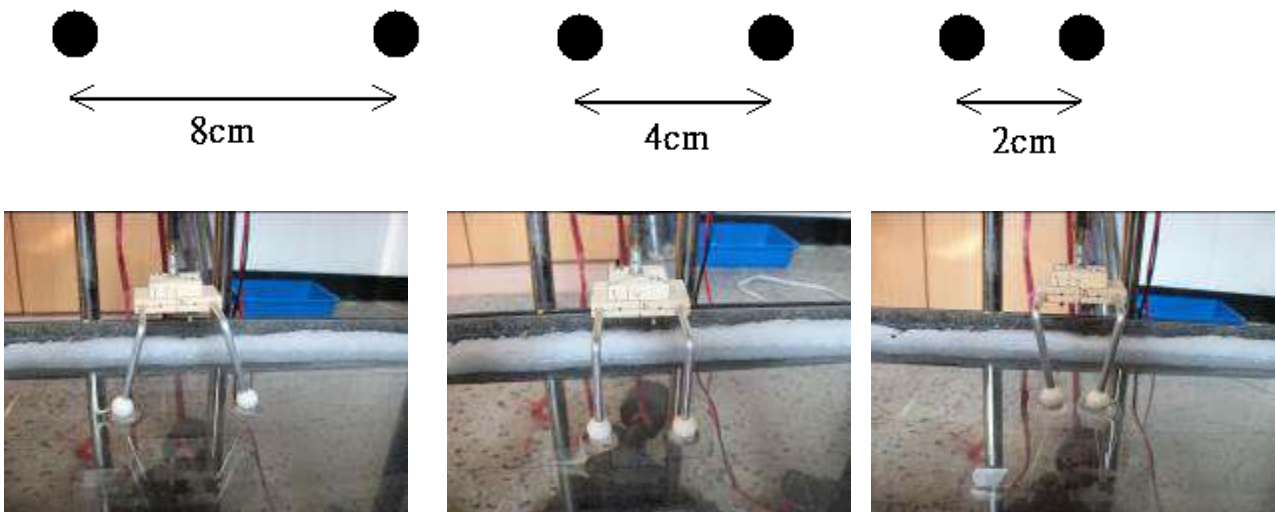
實驗結果討論：

實驗結果圖（15）如同透鏡成像，當屏幕置於成像位置時最為清晰，否則影像較模糊。

四、討論水波全像法，影像鑑別率

以兩個直徑 1cm 的圓球產生水波，改變兩球距離分別為 2cm、4cm、8cm

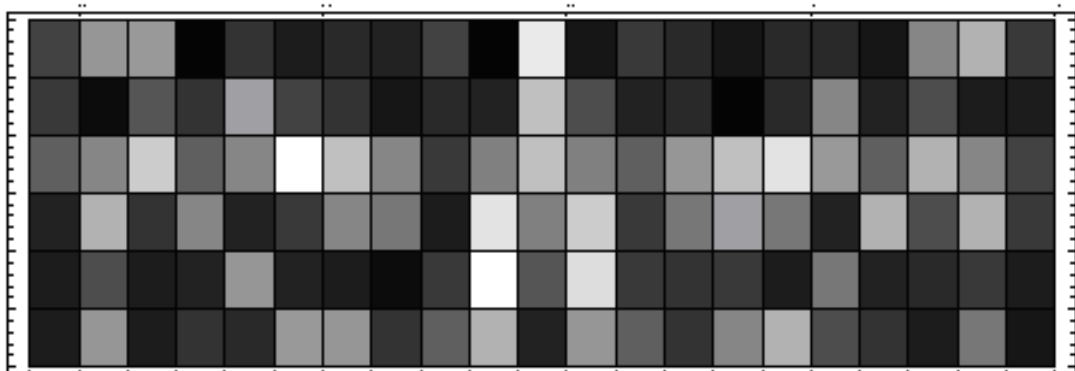
如圖（16）



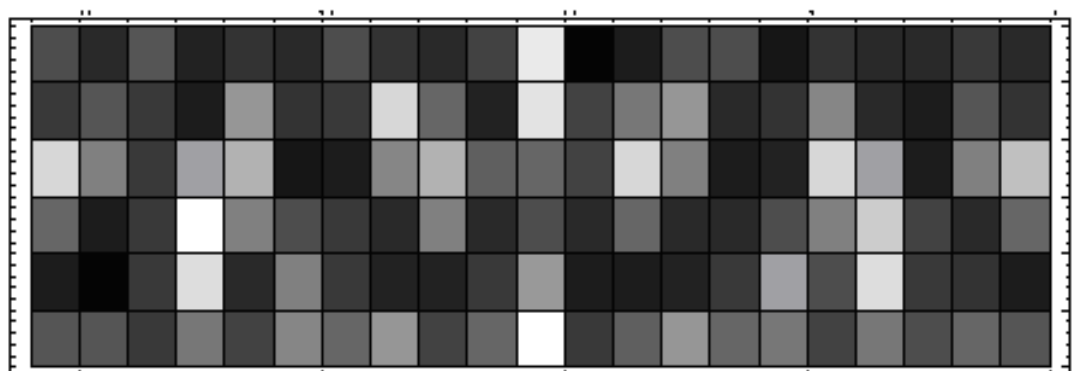
圖（16）兩物體不同距離

重複上述實驗

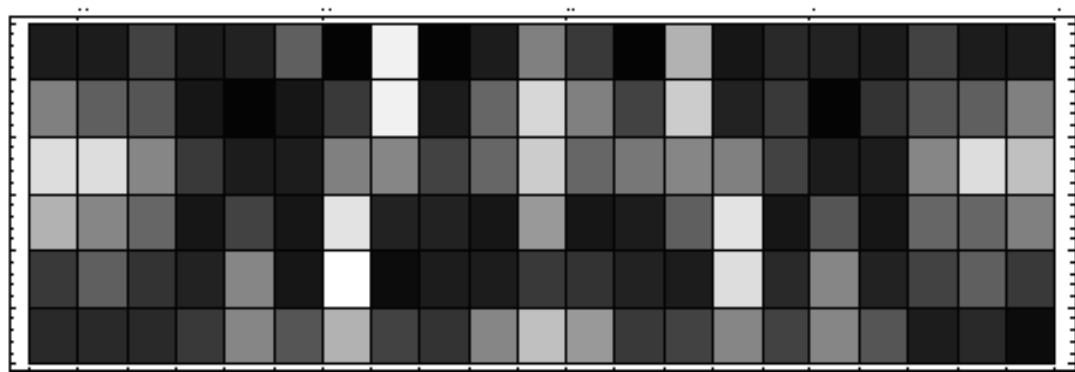
分別測量三種情形所得的水波全像片如圖（17）



兩物距離 8cm

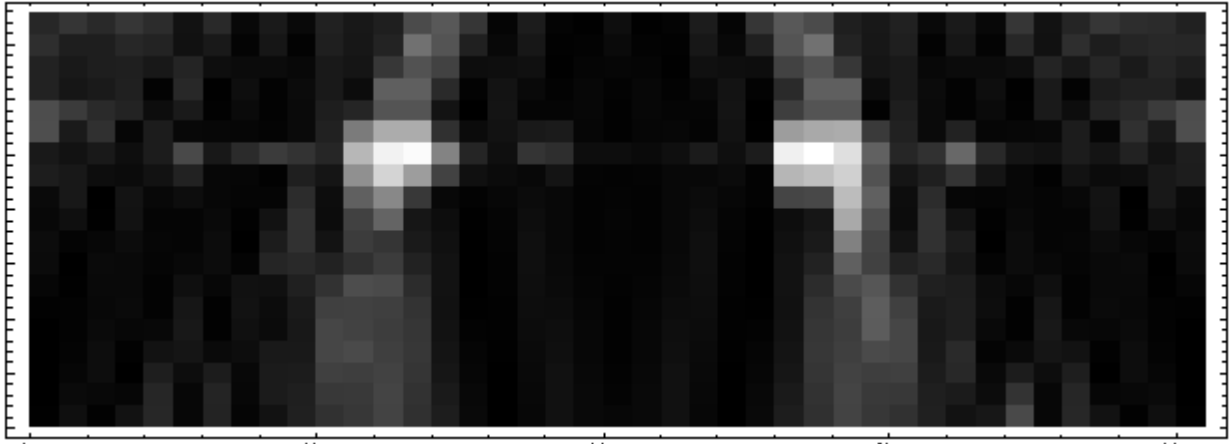


兩物距離 4cm

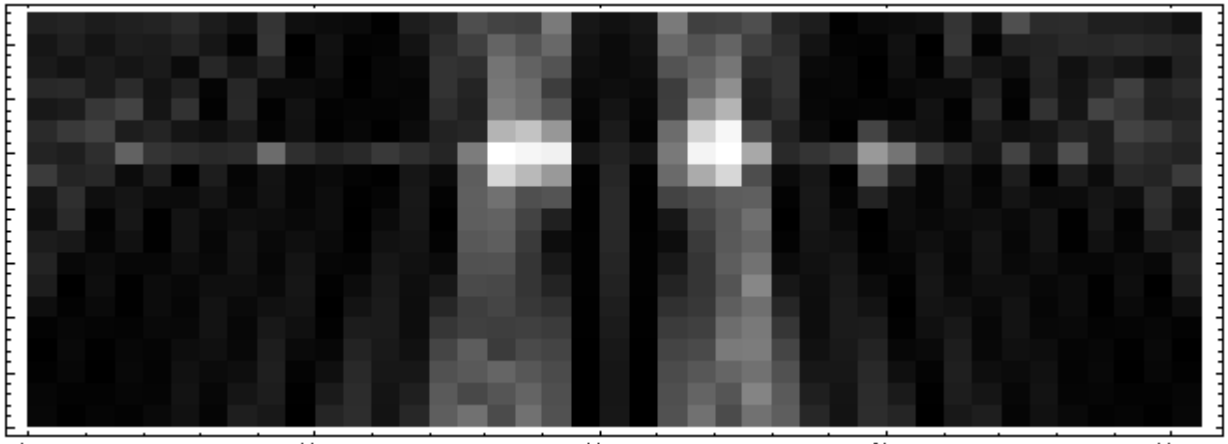


兩物距離 2cm

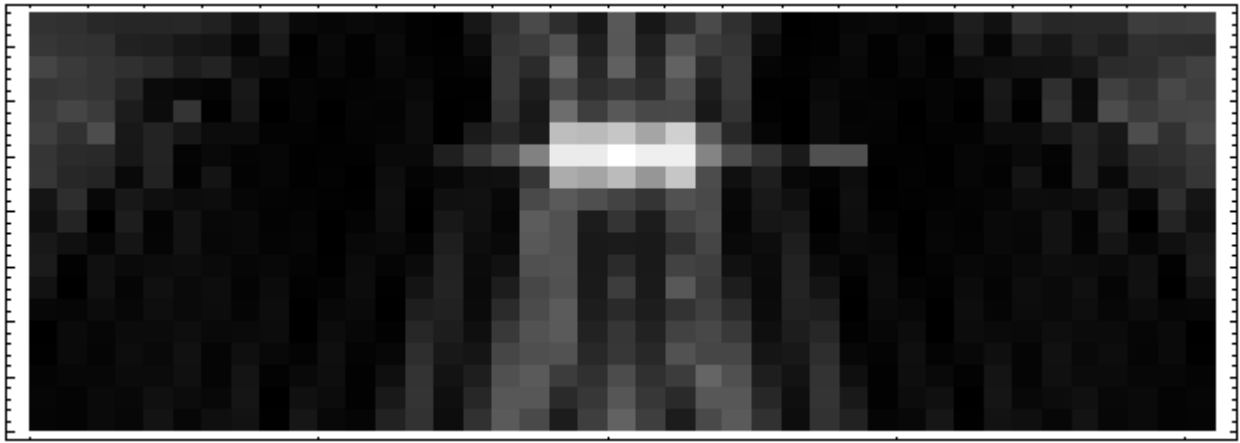
圖（17）兩物不同距離建立的全像片



兩物相距 8cm 影像

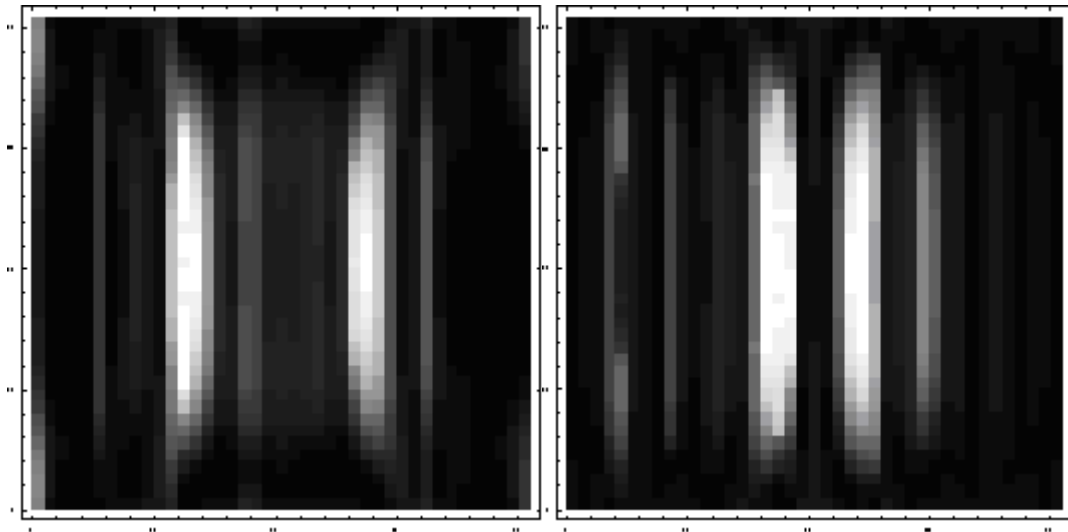


兩物相距 4cm 影像



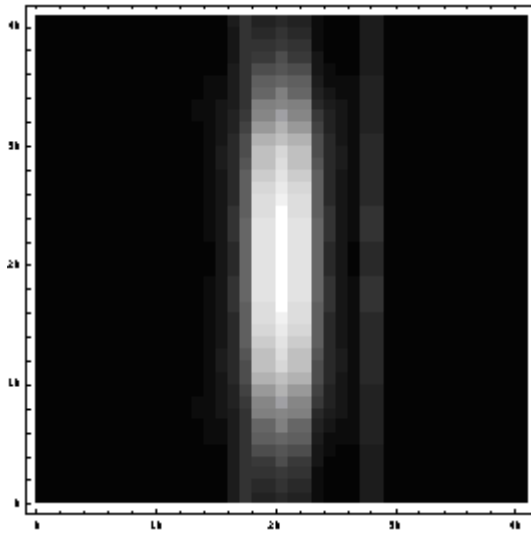
兩物相距 2cm 影像

圖 (18a) 相距不同距離兩物體，在 XZ 平面重建影像



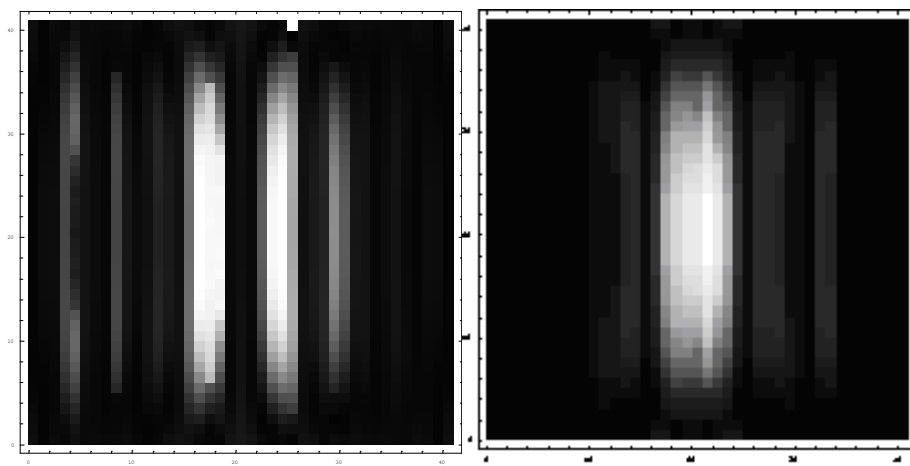
兩物相距 8cm 影像

兩物相距 4cm 影像



兩物相距 2cm 影像

圖 (18b) 相距不同距離兩物體，在 XY 平面重建影像



波長 0.8 cm

波長 1.2 cm

圖 (19) 兩物同樣相距 4cm，不同水波波長，水波全像法兩物影像

實驗結果討論：

(1) 所用水波波長 0.8cm 時，在兩物相距 8cm，4cm 均可以分辨出兩個物體。但在兩物相距 2cm 時已經無法分辨如圖 (18)。

(2) 改變頻率 $f=20\text{ Hz}$ 水波波長 1.2cm，測量兩物相距 4cm，結果如圖 (19)。

(3) 由圖(18)圖(19)可得到以下結論：比較兩者，水波波長 $\lambda=0.8\text{cm}$ $\lambda=1.2\text{cm}$ 波長較長，鑑別率較差，水波波長較短，鑑別率較佳。

五、討論水波全像法，分層重建影像的性質

(1) 在參考資料 (2) 提到，光全像法與一般透鏡照像不同，一般照像所能聚焦的範圍小，聚焦 A 處，B 處可能就無法清晰顯像。全像法則不同，只要建立一張全像照片，各處均能清晰顯像。

(2) 基於以上性質，我們將兩圓球調整成有前後距離差如圖 (20)，兩物座標分別為 $(X, Z) = (-2, 0)$ $(2, -4)$ ，重複以上步驟建立全像片，從 $X=-10\text{cm}$ 到 $X=+10\text{cm}$ ， $Z=6\text{cm}$ 到 $Z=11\text{cm}$ 建立水波數位全像片。

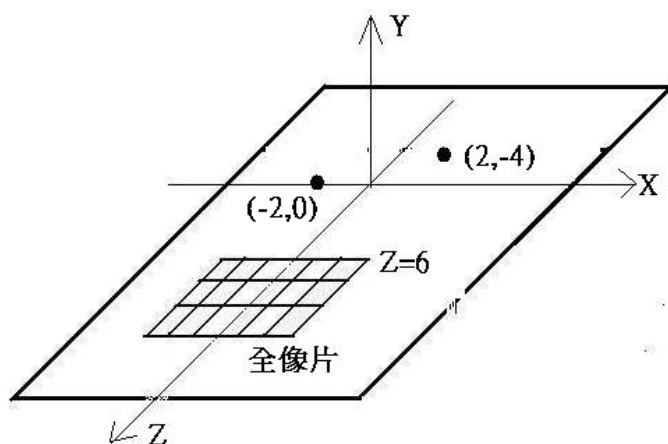


圖 (20) 實驗裝置示意圖

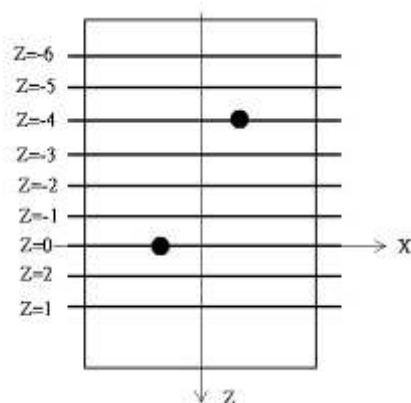
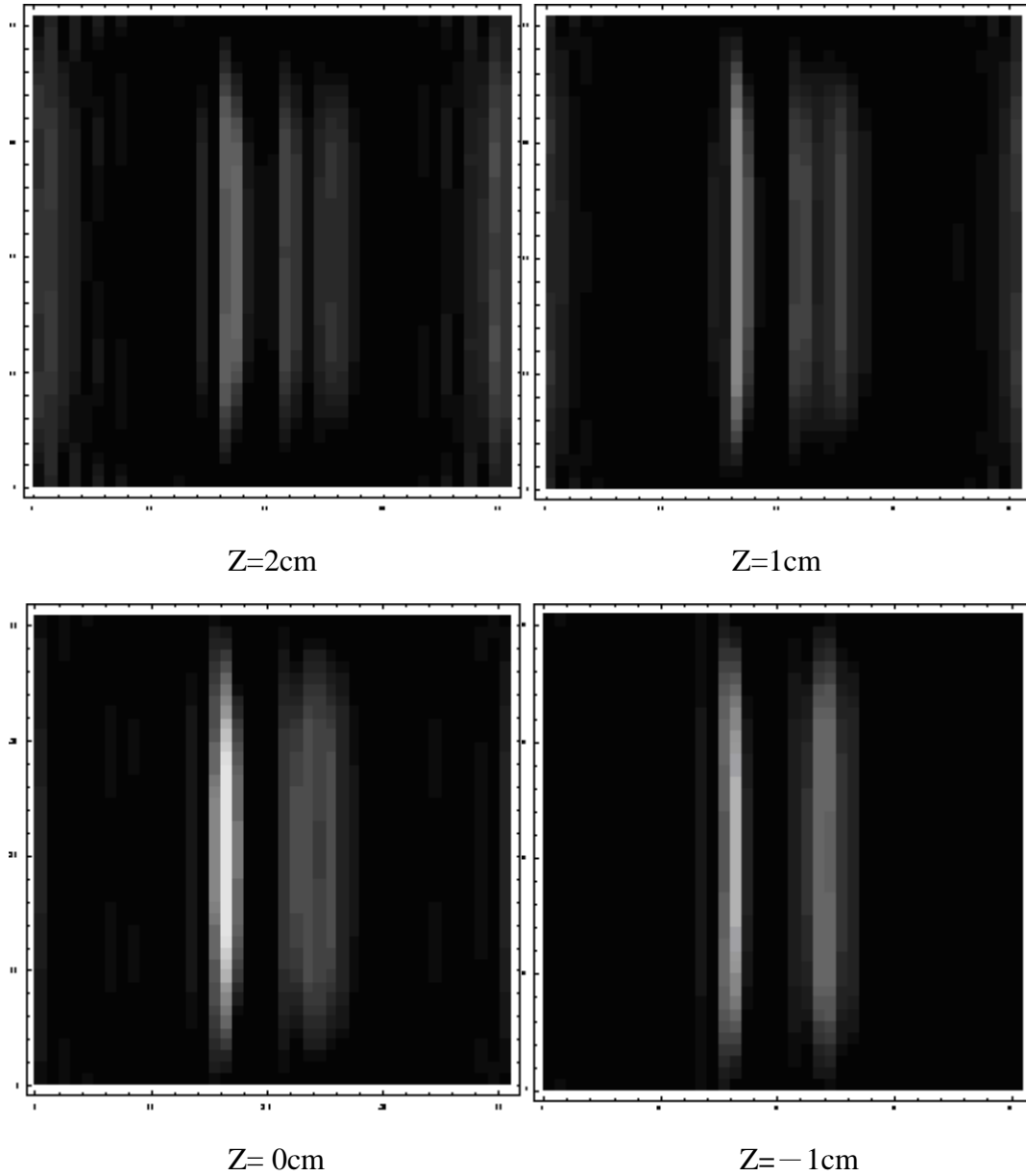


圖 (21) 屏幕在不同位置重建影像

(3) 然後在 $Z=2、1、0、-1、-2、-3、-4、-5、-6\text{cm}$ 在 XY 平面 9 個位置以電腦計算重建物體影像如圖 (21)。

(4) 實驗結果如圖 (22)



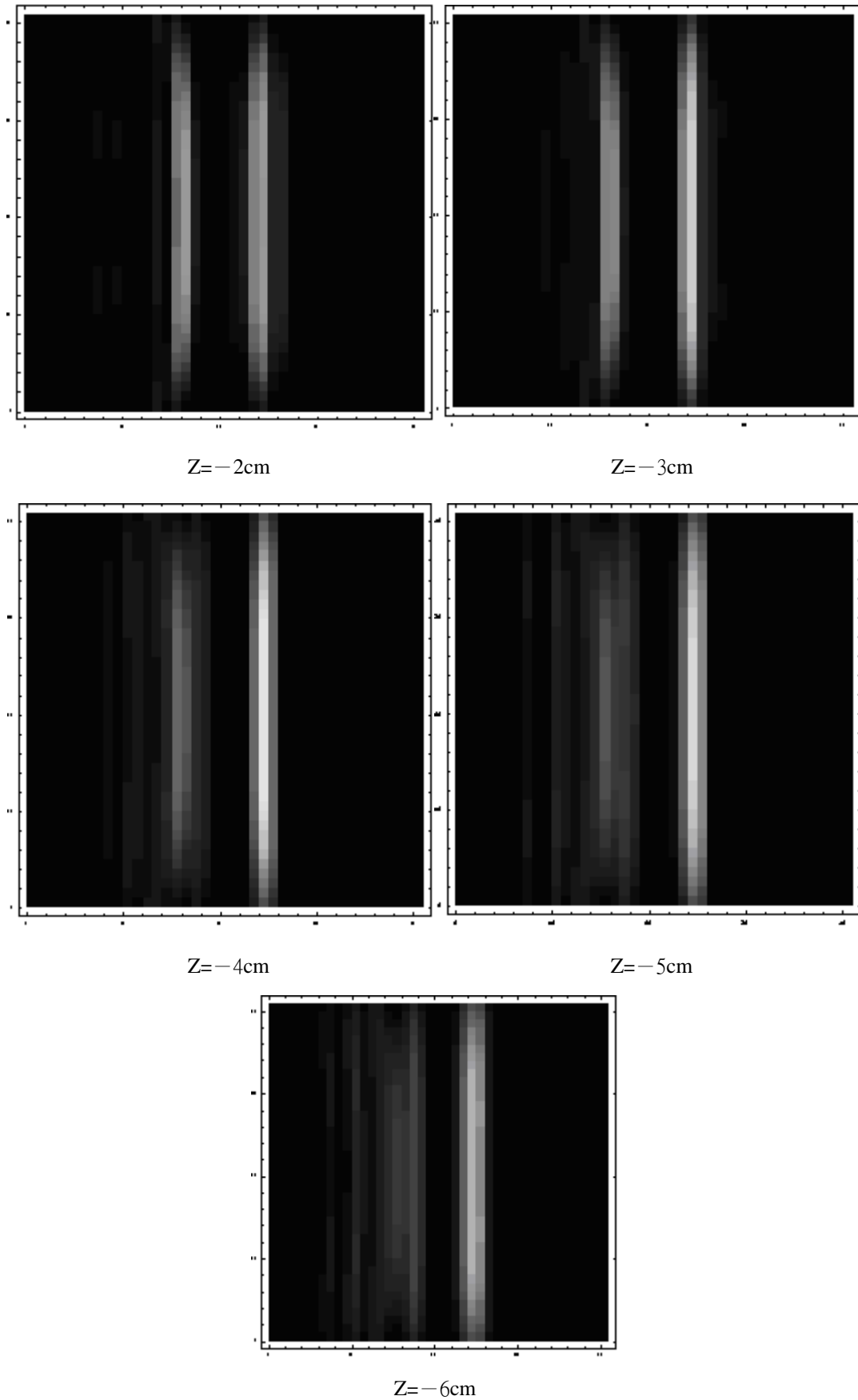


圖 (22) 在不同位置重建物體影像

(4) 在 XZ 平面， $X=-10\text{cm}$ 至 $+10\text{cm}$ $Z=+2\text{cm}$ 至 $Z=-6\text{cm}$ ，重建物體影像，結果如圖 (23)

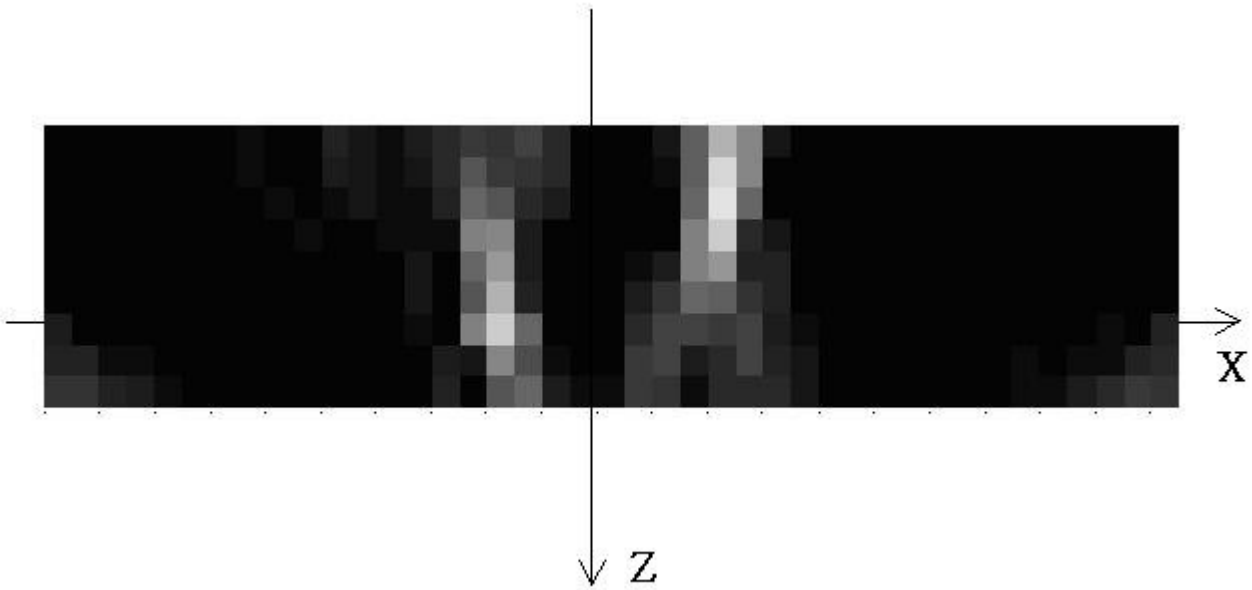


圖 (23) 水波槽 XZ 平面影像

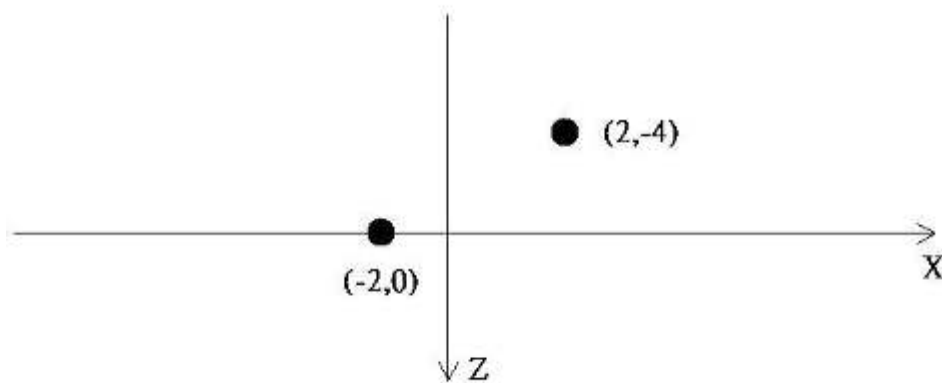


圖 (24) 水波槽物體位置座標

實驗結果討論：

(1) 由圖 (22)，在 $Z=0$ 重建時能把在 $(X, Z)=(-2, 0)$ 物體顯示出來，在 $Z=-4$ 重建能把另一個在 $(X, Z)=(2, -4)$ 物體顯示出來。

(2) 水波全像法如同光全像一樣，沒有一般照像對焦問題。在建立全像片後，

將屏幕設於不同位置重建影像，可以把不同位置物體分別清楚顯示出來。達到分層顯像效果。

(3) 我們把在不同位置重建的影像組合起來，呈現出在水波槽 XZ 水面上，在座標 $(X, Z)=(-2, 0)$ 及 $(+2, -4)$ 兩個影像的圖形如圖 (23)，這效果相當於醫療上常用的”斷層掃描”，我們的水波全像法，可以把在水波槽上的物體在不同位置影像一層一層顯示。

伍、結論與討論

(1) 全相片建立：我們以水波為波源，透過如同光全像攝影術同樣過程來顯示物體的影像，由訊號產生器，產生一正弦波當作波源，將此正弦波訊號一分為二，用來產生物體波與參考波，一個接到振動器產生水波，以光感測器測量水波通過時波峰波谷的差異所造成明暗不同的亮度變化，來代表水波的形狀為**物體波**，以電壓感測器直接量測另一訊號，以此訊號作為**參考波**，為一虛擬平面參考波，將兩波數值相加相當於兩波互相干涉，數據經處理後即可構成”數位化水波全相片”。

(2) 影像重建：虛擬平面參考波經過全像片後變成 126 個點波源，以 Basic 寫一程式，來計算這 126 個點波源的干涉，最後以 Mathematica 的 DensityPlot 將數值大小轉換成亮暗圖，即可把影像重建出來，**由實驗結果證實之前假設，水波確實可以用全像干涉方法來呈現物體影像。**

(3) 由於水波與光波性質不完全相同，因此水波全像與光波全像過程並不全然

一樣：(a) 由於水波不可能有相當於光波全像以底片來記錄物體波與參考波干涉，水波全像是將物體波與參考波數值相加模擬兩波干涉，最後得到是數位化水波全相片 (b) 光全像是以原先參考波打在全像片重建影像，水波全像是以電腦計算全像片上波源的干涉重建影像。

(4) 水波全像法重建影像位置於原先物體位置時最為清晰，否則影像較模糊。

(5) 鑑別率實驗，所用水波波長 0.8cm 時，在兩物相距 8cm，4cm 均可以分辨出兩個物體。但在兩物相距 2cm 時已經無法分辨。不同波長，波長較長，鑑別率較差，波長較短，鑑別率較佳。

(6) 水波全像法，沒有一般照像對焦問題。在建立一次全像片後，在不同位置重建影像，可以把不同位置物體分別清楚顯示出來。達到斷層顯像效果。

(7) 水波全像法是由我們自行獨力發展，以關鍵字搜尋並未發現類似實驗

陸、參考文獻

1. Eugene Hecht/Alfred Zajac (1986) OPTICS
2. 游漢輝(1980). 全像攝影術 科學月刊 128 期
3. 黃世陽 (1999) Qbasic 入門

【評語】 040110

作者利用光學全像攝影（Holography）的概念，利用水波來實現。光學全像攝影是當光波經物體反射後與原來之參考光進行干涉而被記錄下干涉條紋之圖樣，再利用參考光可以重建原物體之立體之影像。在水波中，需要解決的是如何記錄反射波與參考波之干涉圖樣？如何利用參考光做影像重建？

作者利用將訊號產生器產生訊號一分為二，一個接到振動器產生水波當物體波，另一個訊號直接以電壓測量作為虛擬參考波，再利用電腦將兩數值相加模擬物體波與參考波干涉，得到一數位化水波全像片。在影像重建上，直接以程式計算虛擬數位化水波全像片上各個點波源相互干涉結果，成功將影像重建出來，並討論在水深與水平面之成像的鑑別率，也成功地重建斷層掃描上不同深度的聚焦效果。

本作品在原理的理解與進一步的推論與利用電腦來模擬呈現全像之光學概念，是一項創新的研究，能同時呈現出不同維度之成像並探討其解析度，是一件理論與實驗相輔相成的作品。作者有效的掌握全像中波干涉與重建的相關性，熟稔電腦數位化的應用。本實驗如果能在水中放置不同的柱子改變水深，利用不同水深對水波產生速度變化進而改變水波之相位來模擬” 虛擬數位化水波全像片”，再製造參考水波通過此陣列重建影像，會讓水波全像術更具實驗性。