

## 위상천이 디지털 홀로그래피를 이용한 3차원 상대 거리 측정

김 현 · 이연호†

성균관대학교 정보통신공학부 광정보 시스템 연구실

☎ 440-746 경기도 수원시 장안구 천천동 300번지

(2003년 1월 21일 받음, 2003년 3월 20일 수정본 받음)

본 논문에서는 기존의 위상천이 디지털 홀로그래피에서 기준빔으로 사용되는 평면파 대신 보다 일반적인 구면파를 이용하여 3차원 공간상에 위치한 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 측정하는 새로운 시스템 및 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서는 이러한 시스템에 대한 모의실험 및 광학실험을 실시하였다. 이러한 시스템에서는 홀로그램 기록에 사용된 기준빔의 정확한 정보를 알고 있지 않더라도 3차원 공간상의 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 정확하게 측정할 수 있다. 본 논문에서는 광학 실험을 통하여 약 300 cm 거리에서 서로 0.5 cm 떨어진 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 10% 미만의 오차로 측정하였다.

주제어 : phase-shifting interferometer, digital holography, Fresnel diffraction.

### I. 서 론

현재까지 레이저 빔을 이용하여 3차원 공간상에서 절대 거리를 측정하거나 그러한 거리 측정 데이터로부터 3차원 물체를 복원하는 방법에 대한 많은 연구가 이루어져왔다. 이러한 방법들은 첫째로, 주어진 한 지점으로부터 3차원 물체의 각 지점까지의 거리를 측정하여 3차원 영상을 복원하는 방법이 있고,<sup>[1-5]</sup> 둘째로 레이저 간섭계를 이용하여 3차원 물체의 거리를 측정하는 방법이 있다.<sup>[6-8]</sup> 첫 번째 방법에서는 레이저 펄스의 진행 및 반사 시간을 측정하여 물체의 각 지점까지의 거리를 측정하는 방법과<sup>[1-4]</sup> CW 레이저 빔이 물체를 향하여 진행하는 각도와 반사된 레이저 빔이 광검출기에 검출되는 위치를 이용한 광학 삼각법에 의하여 물체의 각 지점까지의 거리를 측정하는 방법이 있다.<sup>[5]</sup> 두 번째 방법에서는 간섭패턴으로부터 물체의 위상 정보를 추출해 거리를 측정하는 방법으로 2 파장 간섭계, 백색광 간섭계 등이 있다.<sup>[6-8]</sup> 또한 최근에는 단일 모드 광섬유를 점원 레이저로 이용해 절대거리를 측정하는 부피 간섭계가 새로이 제안되었다.<sup>[9-10]</sup>

레이저 펄스를 이용하는 첫 번째 방법에서는 측정되는 물체가 대략 수백 m에서 수 km 떨어져 있고 이 경우 측정오차는 수 m에서 수십 m로 주어진다. 간섭계를 이용한 두 번째 방법의 경우 보다 정밀한 거리 측정이 가능하지만 측정되는 물체의 크기에 제한이 존재하므로 한 번의 길이가 수 m에서 수십 m로 주어지는 대형 3차원 물체의 거리를 측정하기에 적합하지 않다. 최근에 새로이 제안된 부피 간섭계는 계산이 복잡하며 수렴하는 최종 절대좌표를 얻기 위해 사용되는 초기 절대좌표값이 실제 참값에서 크게 벗어나는 경우 수렴되지 않는 단점이 존재한다.

본 논문에서 제안하는 방법은 기준빔과 물체빔을 동시에 3

차원 물체의 표면에 입사시킨 후 반사되는 두 레이저 빔의 간섭패턴을 CCD(Charge Coupled Device)에 기록한다. 이 경우 기준빔의 위상을 90°씩 바꿔가면서 네 개의 간섭패턴들을 기록한 후, 이들로부터 간섭위상 정보를 추출한다. 이러한 간섭위상 정보를 이용하여 홀로그램을 복원하면 주어진 물체점들의 3차원 좌표를 측정할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 시스템에서는 기존의 홀로그래피 시스템에 존재하는 광경로 차이 문제가 존재하지 않는다. 그러므로 이러한 방법을 이용하면 먼 거리에 떨어져 있는 대형 3차원 물체를 인식할 수 있는 새로운 디지털 홀로그래피 시스템 설계가 가능하다.

본 논문에서는 대형 3차원 물체 표면 위의 두 물체점들을 디지털 홀로그램으로 기록한 후 이들을 복원하여 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 측정하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 이 경우 홀로그램의 복원에 필요한 기준빔을 홀로그램 기록시 사용된 기준빔과 다른 구면파로 가정하여도 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 정확하게 측정할 수 있다. 또한 이러한 측정에 필요한 첫 번째 물체점의 절대좌표에 오차가 발생하여도 상대적인 거리를 정확하게 측정할 수 있다. 본 논문에서는 새로이 제안된 방법을 이용하여 모의실험 및 광학실험을 실시하여 약 3 m 거리에 위치한 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 측정하였다.

### II. 3차원 상대 거리 측정을 위한 이론적 모델

위상천이 디지털 홀로그래피에서는 물체빔에 대한 홀로그램 정보를 얻기 위하여 CCD에 물체빔과 기준빔을 동시에 입사시켜서 간섭패턴을 형성한 다음 이들을 그레이 코드값으로 표현한 후 컴퓨터에 디지털 정보로 저장한다.<sup>[11]</sup> 그림 1에서처럼 입사하는 기준빔의 위상을 각각 0°, 90°, 180°, 270°로 변화시키면서 기준빔과 물체빔 사이의 네 개의 간섭패턴들을 CCD에 기록한다. 이러한 네 개의 간섭패턴들로부터 물체빔의 wavefront

†E-mail: yeonlee@yurim.skku.ac.kr

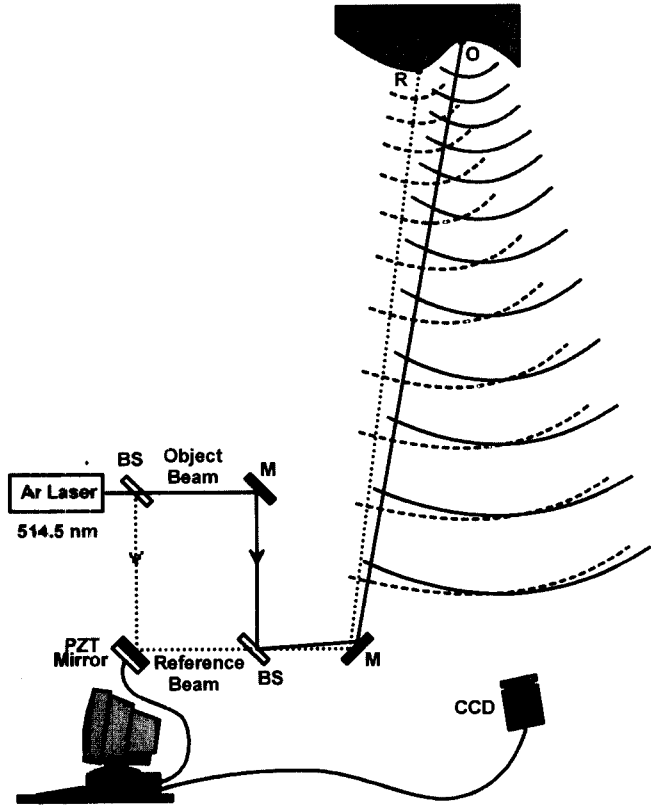


그림 1. 3차원 상대 거리 측정을 위한 위상천이 디지털 홀로그래피 시스템의 개략도. PZT: Piezo-electric Transducer, BS: Beamsplitter, M: Mirror, CCD: Charge Coupled Device, R: Reference point, O: Object point.

정보(홀로그램)를 컴퓨터에 의해 계산하여 구할 수 있고 또한 이러한 정보를 이용하여 3차원 물체를 컴퓨터에 의해 복원할 수 있다.

물체빔과 기준빔을 각각 3차원 공간상의 좌표  $O(x_o, y_o, z_o)$  와  $R(x_r, y_r, z_r)$ 에 위치한 점원들로부터 발생하는 구면파로 가정하고 여기에 paraxial 근사화를 적용하면 이들이 CCD 평면  $(x, y)$ 에서 만나서 이루는 간섭패턴  $I(x, y)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$I(x, y) = \left| \frac{A_o}{z_o} e^{j\phi_o(x, y)} + \frac{A_r}{z_r} e^{j\{\phi_r(x, y) + \alpha\}} \right|^2$$

$$= \frac{A_o}{z_o} e^{j\left\{ \frac{\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2) + \frac{\pi}{\lambda z_o}(x^2 + y^2) - \frac{2\pi}{\lambda z_o}(xx_o + yy_o) \right\}}$$

$$+ \frac{A_r}{z_r} e^{j\left\{ \frac{\pi}{\lambda z_r}(x_r^2 + y_r^2) + \frac{\pi}{\lambda z_r}(x^2 + y^2) - \frac{2\pi}{\lambda z_r}(xx_r + yy_r) + \alpha \right\}} \quad (1)$$

여기서  $z_o$ 와  $z_r$ 은 각각 물체 점원과 기준 점원으로부터 CCD 평면까지의 거리이다. 이 식으로부터 기준빔에 인가되는 위상 값  $\alpha$ 에 따라 각각  $I_0(x, y)$ ,  $I_{90}(x, y)$ ,  $I_{180}(x, y)$ ,  $I_{270}(x, y)$ 의 네 개의 간섭패턴들을 얻을 수 있다. 이러한 네 개의 간섭패턴들로부터 기준빔과 물체빔 사이의 간섭위상  $\Phi_o(x, y) - \Phi_r(x, y)$ 를 계산하면 식 (2)처럼 주어진다.<sup>[11]</sup>

$$\Phi_o(x, y) - \Phi_r(x, y) = \arctan \left( \frac{I_{270}(x, y) - I_{90}(x, y)}{I_0(x, y) - I_{180}(x, y)} \right) \quad (2)$$

이러한 홀로그램에 구면파 형태의 복원 기준빔  $R_c(x, y)$ 를 입사시키는 경우 CCD로부터 일정한 거리  $Z$ 만큼 떨어진 평면상에서 복원되어지는 물체  $U_i(X, Y)$ 는 아래 식 (3)과 같은 Fresnel 회절 적분으로 표현된다.

$$U_i(X, Y) = e^{-j\frac{\pi}{\lambda Z}(X^2 + Y^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j[\Phi_o(x, y) - \Phi_r(x, y)]}$$

$$R_c(x, y) e^{-j\frac{\pi}{\lambda Z}(x^2 + y^2)} e^{j\frac{2\pi}{\lambda Z}(xX + yY)} dx dy$$

$$= e^{-j\frac{\pi}{\lambda Z}(X^2 + Y^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ e^{j\left\{ \frac{\pi}{\lambda z_o}(x_o^2 + y_o^2) + \frac{\pi}{\lambda z_o}(x^2 + y^2) - \frac{2\pi}{\lambda z_o}(xx_o + yy_o) \right\}} \right.$$

$$\times e^{j\left\{ \frac{\pi}{\lambda z_r}(x_r^2 + y_r^2) + \frac{\pi}{\lambda z_r}(x^2 + y^2) - \frac{2\pi}{\lambda z_r}(xx_r + yy_r) \right\}}$$

$$\times e^{j\left\{ \frac{\pi}{\lambda Z_f}(X_f^2 + Y_f^2) + \frac{\pi}{\lambda Z_f}(x^2 + y^2) - \frac{2\pi}{\lambda Z_f}(xX_f + yY_f) \right\}}$$

$$\times e^{-j\frac{\pi}{\lambda Z}(x^2 + y^2)} e^{j\frac{2\pi}{\lambda Z}(xX + yY)} \left. \right] dx dy$$

$$= e^{-j\frac{\pi}{\lambda Z}(X^2 + Y^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ e^{-j\left\{ \left( \frac{1}{Z} - \frac{1}{z_o} - \frac{1}{Z_f} + \frac{1}{z_r} \right) \frac{\pi}{\lambda} (x^2 + y^2) \right\}} \right.$$

$$\left. e^{j\left\{ \left( \frac{X}{Z} - \frac{x_o}{z_o} - \frac{X_f}{Z_f} + \frac{x_r}{z_r} \right) \frac{2\pi}{\lambda} x + \left( \frac{Y}{Z} - \frac{y_o}{z_o} - \frac{Y_f}{Z_f} + \frac{y_r}{z_r} \right) \frac{2\pi}{\lambda} y \right\}} \right] dx dy \quad (3)$$

여기서  $R_c(x, y)$ 는 홀로그램 복원에 사용되는 초점좌표가  $(X_f, Y_f, Z_f)$ 로 주어지는 구면파 형태의 기준빔으로  $R_c(x, y) = \exp[j\pi(X_f^2 + Y_f^2 + x^2 + y^2 - 2(xX_f + yY_f))/\lambda Z_f]$ 이다. 또한 기록되는 물체는 홀로그램 기록매체인 CCD로부터 수 m 이상 멀리 떨어져 있어서 CCD에 기록되는 물체빔 및 기준빔의 세기  $A_o/z_o$ 와  $A_r/z_r$ 은 CCD 평면상에서 일정하다고 가정하여 무시하였고, 이 식에서 상수 위상항들  $\exp[j\pi(x_o^2 + y_o^2)/\lambda z_o]$ ,  $\exp[j\pi(x_r^2 + y_r^2)/\lambda z_r]$ ,  $\exp[j\pi(X_f^2 + Y_f^2)/\lambda Z_f]$ 도 무시하였다. 위의 Fresnel 회절 적분식은 아래의 이차원 이산 푸리에 변환(2-dimensional Discrete Fourier Transform) 형태로 표현되어지며 이것은 이차원 FFT(Fast-Fourier Transform) 알고리즘을 이용하여 컴퓨터에서 계산된다.

$$U_i(m, n) = e^{-j\frac{\pi}{\lambda Z}(m^2 \Delta x^2 + n^2 \Delta y^2)} \sum_{p=0}^{N_x-1} \sum_{q=0}^{N_y-1} e^{j[\Phi_o(p, q) - \Phi_r(p, q)]}$$

$$R_c(p, q) e^{-j\frac{\pi}{\lambda Z}(p^2 \Delta x_c^2 + q^2 \Delta y_c^2)} e^{j2\pi \left( \frac{mp}{N_x} + \frac{nq}{N_y} \right)} \quad (4)$$

여기서 좌표  $(m, n)$ 은 복원평면 위의 좌표이고  $(p, q)$ 는 홀로그램 평면 혹은 CCD 평면 위의 좌표이다. 또한  $N_x, N_y$ 는 각각 CCD의 x-방향 및 y-방향으로 픽셀 개수들이고  $\Delta x_c, \Delta y_c$ 는 각

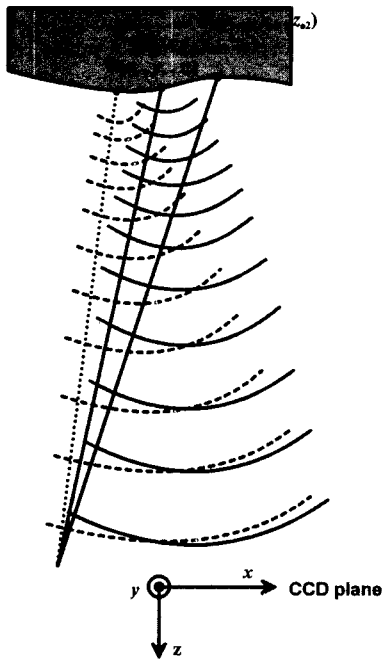


그림 2. 홀로그래프 기록을 위한 좌표계.  $R(x_n, y_n, z_n)$ 은 기록시 사용되는 구면파 형태의 기준빔의 절대좌표를,  $O_1(x_{01}, y_{01}, z_{01})$ 은 첫번째 물체점의 절대좌표를,  $O_2(x_{02}, y_{02}, z_{02})$ 는 두 번째 물체점의 절대좌표를 각각 나타낸다.

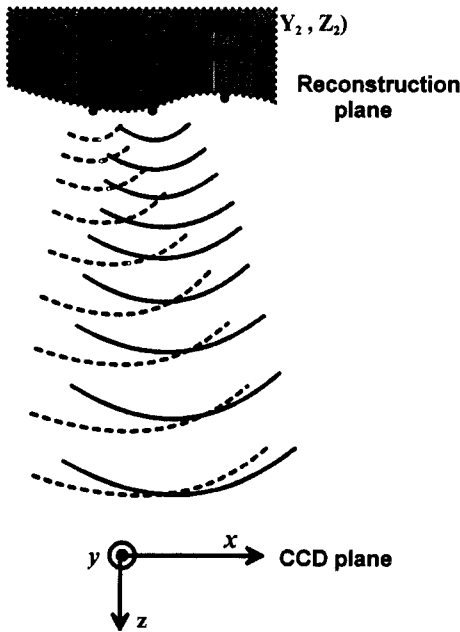


그림 3. 홀로그래프 복원을 위한 좌표계.  $R(X_f, Y_f, Z_f)$ 은 복원시 사용되는 구면파 형태의 기준빔의 초점좌표를,  $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 은 첫번째 물체점의 절대좌표를,  $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 는 복원되는 두 번째 물체점의 절대좌표를 각각 나타낸다.

각 CCD의 x-방향 및 y-방향으로 픽셀 pitch들이다. 복원평면의 x-방향 및 y-방향으로 픽셀 pitch들은  $\Delta X, \Delta Y$ 로 주어진다.

본 논문에서 홀로그래프 기록과 복원을 위해 채택한 좌표계는 그림 2와 3에서처럼 표현되어진다. 아래 그림 2는 홀로그래프 기

록을 위한 좌표계를 나타낸다. 먼저, 3차원 공간상의 좌표  $O_1(x_{01}, y_{01}, z_{01})$ 에 위치한 첫 번째 물체점으로부터 발생된 물체빔과 좌표  $R(x_n, y_n, z_n)$ 에 위치한 점원으로부터 발생된 기준빔과의 간섭패턴을 CCD에 기록하고 그 다음 좌표  $O_2(x_{02}, y_{02}, z_{02})$ 에 위치한 두 번째 물체점으로부터 발생된 물체빔과 앞에서와 동일한 좌표  $R(x_n, y_n, z_n)$ 로부터 발생된 기준빔과의 간섭패턴을 CCD에 기록한다. 각각의 물체점들에 대한 간섭패턴은 기준빔의 위상을  $90^\circ$ 씩 변화시키면서 네 개의 간섭패턴들을 CCD에 기록한다. 이러한 간섭패턴들로부터 각각의 물체점들의 간섭 위상을 식 (2)로부터 계산한다. 그림 3은 이러한 홀로그래프에 초점좌표가  $R(X_f, Y_f, Z_f)$ 로 주어지는 구면파 형태의 기준빔을 입사시켜 두 점원 물체들의 홀로그래프를 복원할 때 사용되는 좌표계이다. 이 경우 첫 번째 물체점은 복원 평면상의 좌표  $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ 에서 점원 형태로 복원되고 두 번째 물체점은 복원 평면상의 좌표  $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ 에서 점원 형태로 복원되어진다.

일반적으로 홀로그래프 복원을 통하여 기록된 점원 물체의 3차원 절대좌표를 찾아내려면 홀로그래프 기록시 사용된 기준빔에 대한 정확한 정보를 알고 있어야 한다. 그러나 3차원 공간상의 두 물체점들 사이의 상대적인 거리는 아래와 같은 알고리즘을 이용하면 홀로그래프 기록시 사용된 기준빔에 대한 정보가 없이도 비교적 정확히 측정될 수 있다. 이러한 상대 거리 측정은 Fresnel 회절 적분식 (3)을 이용하여 다음과 같이 수행된다. 초점좌표가  $(X_f, Y_f, Z_f)$ 로 주어지는 paraxial 근사화된 구면파를 홀로그래프 복원을 위한 기준빔으로 가정하여 Fresnel 회절 적분식 (3)에 대입한다. 이 경우  $Z_f$ 가 정확히  $z_f$ 가 아니면 피적분 항들 중에서 복원 기준빔의 일차 위상항  $\exp[j\pi(x^2 + y^2)/\lambda Z_f]$ 과 홀로그래프 기록시 사용된 기준빔의 일차 위상항  $\exp[-j\pi(x^2 + y^2)/\lambda z_f]$ 은 정확히 상쇄되지 않고, 또한 복원 기준빔의 일차 위상항  $\exp[-j2\pi(xX_f + yY_f)/\lambda Z_f]$ 와 기록 기준빔의 일차 위상항  $\exp[j2\pi(xx_f + yy_f)/\lambda z_f]$ 도 정확히 상쇄되지 않는다. 비슷한 이유로 Fresnel 회절과 관련된 일차 위상항  $\exp[-j\pi(x^2 + y^2)/\lambda Z]$ 과 홀로그래프 기록시 사용된 물체빔의 일차 위상항  $\exp[j\pi(x^2 + y^2)/\lambda z_0]$ 이 상쇄되지 않고 또한 Fresnel 회절과 관련된 일차 위상항  $\exp[j2\pi(xX + yY)/\lambda Z]$ 와 물체빔의 일차 위상항  $\exp[-j2\pi(xx_0 + yy_0)/\lambda z_0]$ 이 상쇄되지 않는다. 그러나 물체점의 복원 좌표  $(X, Y, Z)$ 가 아래의 조건을 만족하는 위치에서는 위에서 언급한 일차 위상항 및 일차 위상항들이 서로 정확히 상쇄될 수 있다. 다시 말하여  $Z_f$ 가  $z_f$ 과 다른 경우 좌표  $(x_{01}, y_{01}, z_{01})$ 에 위치한 원래의 첫 번째 물체점이 다른 위치, 즉, 좌표  $(X_1, Y_1, Z_1)$ 에서 복원된다.

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{z_{01}} + \frac{1}{Z_f} - \frac{1}{z_f}$$

$$\frac{X_1}{Z_1} = \frac{x_{01}}{z_{01}} + \frac{X_f}{Z_f} - \frac{x_f}{z_f}$$

$$\frac{Y_1}{Z_1} = \frac{y_{01}}{z_{01}} + \frac{Y_f}{Z_f} - \frac{y_f}{z_f} \tag{5}$$

마찬가지 방법으로 좌표  $(x_{02}, y_{02}, z_{02})$ 에 위치한 두 번째 물체 점도 앞에서와 동일한 기준빔과 간섭하여 CCD에 네 개의 간섭패턴 형태로 기록된다. 비슷한 방법으로 식 (2)로부터 두 번째 물체점에 대한 간섭위상을 계산할 수 있다. 이러한 홀로그

램어 앞에서와 동일한 기준빔(초점거리  $Z_f$ )을 이용하여 홀로그래프를 복원하면 두 번째 물체점의 복원좌표( $X_2, Y_2, Z_2$ )를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{Z_2} &= \frac{1}{z_{o2}} + \frac{1}{Z_f} - \frac{1}{z_r} \\ \frac{X_2}{Z_2} &= \frac{x_{o2}}{z_{o2}} + \frac{X_f}{Z_f} - \frac{x_r}{z_r} \\ \frac{Y_2}{Z_2} &= \frac{y_{o2}}{z_{o2}} + \frac{Y_f}{Z_f} - \frac{y_r}{z_r} \end{aligned} \quad (6)$$

본 논문에서는 홀로그래프의 복원에 사용되는 기준빔의 초점좌표( $X_f, Y_f, Z_f$ )가 홀로그래프 기록시 사용된 기준빔의 초점좌표( $x_n, y_n, z_n$ )와 일반적으로 다르다고 가정하여 초점거리가  $Z_f$ 이고 초점이 광축축 위에 존재하는 구면파를 홀로그래프 복원을 위한 기준빔으로 사용한다. 만약 복원시 사용되는 기준빔의 초점좌표( $X_f, Y_f, Z_f$ )가 홀로그래프 기록시 사용된 기준빔의 초점좌표( $x_n, y_n, z_n$ )와 다르다면 위의 식 (5)와 (6)에서 복원 좌표의 X-좌표 혹은 Y-좌표는 같은 크기의 오차  $X_f/Z_f - x_n/z_n$  및  $Y_f/Z_f - y_n/z_n$ 가 더해지고 Z-좌표는  $1/Z_f - 1/z_n$ 의 오차가 더해진다. 이러한 오차는 첫 번째 물체점과 두 번째 물체점 사이의 상대 거리를 측정하는 경우 서로 상쇄되어진다. 따라서 식 (5)와 (6)에서 홀로그래프를 복원하여 상대거리를 측정하고자 할 때 기록시 사용된 기준빔의 정보, 즉 초점좌표( $x_n, y_n, z_n$ )에 대한 정확한 정보가 필요하지 않다. 식 (6)과 식 (5)의 차이를 구하면 두 번째 물체점의 3차원 절대좌표( $x_{o2}, y_{o2}, z_{o2}$ )를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} z_{o2} &= \frac{1}{\frac{1}{z_{o1}} + \frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_1}} \\ x_{o2} &= z_{o2} \left( \frac{x_{o1}}{z_{o1}} + \frac{X_2}{Z_2} - \frac{X_1}{Z_1} \right) \\ y_{o2} &= z_{o2} \left( \frac{y_{o1}}{z_{o1}} + \frac{Y_2}{Z_2} - \frac{Y_1}{Z_1} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

이들 식에 홀로그래프로부터 복원한 첫 번째 물체점의 복원좌표( $X_1, Y_1, Z_1$ ) 및 두 번째 물체점의 복원좌표( $X_2, Y_2, Z_2$ )를 대입하고 또한 실측하여 알고 있는 첫 번째 물체점의 절대좌표( $x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}$ )을 대입하면 두 번째 물체점의 절대좌표를 구할 수 있다. 만약에 실측된 첫 번째 물체점의 절대좌표가 정확하지 않거나 복원시 사용되는 기준빔의 초점좌표가 정확하지 않으면 식 (7)로부터 계산된 두 번째 물체점의 절대좌표는 정확하지 않지만 첫 번째 물체점과 두 번째 물체점 사이의 상대 거리( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ )는 위에서 설명한 것처럼 두 식의 차이를 구하면 오차가 서로 상쇄되므로 이론상으로는 매우 정확하게 구할 수 있다.

### III. 컴퓨터 모의실험 및 광학실험

본 논문에서는 새로이 제안된 3차원 상대 거리 측정에 대한 이론적 모델을 이용하여 두 물체점들 사이의 상대 거리 측정에 대

한 모의실험 및 광학실험을 실시하였다. 본 논문의 모의실험에서는 기준 점원과 첫 번째 물체점의 3차원 좌표를 각각 ( $x_n, y_n, z_n$ ) = (-2.5 cm, 0.0 cm, 277.5 cm) 및 ( $x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}$ ) = (2.0 cm, 0.0 cm, 269.0 cm)로 가정하였다. 그 다음 이러한 첫 번째 물체점으로부터 두 번째 물체점의 상대적인 위치가 x-방향으로  $\pm 0.5$  cm, z-방향으로  $\pm 1.0$  cm만큼 떨어져서 주어진다고 가정한다. 이러한 조건하에서 기준 점원과 첫 번째 물체점과의 간섭패턴에 의한 홀로그래프 및 기준 점원과 두 번째 물체점과의 간섭패턴에 의한 홀로그래프를 각각 CCD에 기록한다. 이 경우 홀로그래프 이론에 의하면 기록시 사용된 것과 동일한 기준빔 혹은 위상 공액된 빔을 입사시켜 홀로그래프를 복원한다. 하지만 본 논문에서는 홀로그래프의 복원을 위해 초점이 광축축에 있고 초점거리가  $Z_f$ 로 주어지는 구면파 형태의 기준빔을 입사시켜 Fresnel 회절 적분을 이용하였다. 본 모의실험에서는 홀로그래프 기록시 사용된 기준빔의 초점거리( $z_n = 277.5$  cm)와 다른 초점거리(200 cm 혹은 300 cm)의 구면파 기준빔을 사용하여 홀로그래프를 복원하고 이로부터 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 측정한다.

초점거리가 200 cm인 구면파 기준빔을 이용하여 첫 번째 물체점을 복원하면 복원 공간상의 한 좌표( $X_1, Y_1, Z_1$ ) = (3.2283 cm, 0.0 cm, 195.55 cm)에 물체가 복원되고, 초점거리가 300 cm인 구면파 기준빔을 이용하여 앞에서와 동일한 첫 번째 물체점을 복원하면 복원 공간상의 한 좌표( $X_1, Y_1, Z_1$ ) = (4.7890 cm, 0.0 cm, 290.09 cm)에 물체가 복원된다. 다시 말하여, 홀로그래프 기록시 사용된 구면파 기준빔(초점좌표 ( $x_n, y_n, z_n$ ) = (-2.5 cm, 0.0 cm, 277.5 cm)대신에 초점이(0.0 cm, 0.0 cm, 200.0 cm) 및 (0.0 cm, 0.0 cm, 300.0 cm)로 주어지는 구면파 기준빔을 사용하여 첫 번째 물체점을 복원하면 원래의 좌표 ( $x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}$ )와 다른 좌표 ( $X_1, Y_1, Z_1$ )에서 복원된다.

두 번째 물체점의 절대좌표는 첫 번째 물체점의 절대좌표( $x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}$ )에 대하여 상대적으로 x-방향으로 +0.5 cm 혹은 -0.5 cm만큼 떨어져 위치하고 z-방향으로는 -1 cm 혹은 +1 cm만큼 떨어져 위치한다고 가정한다. 그 다음, 앞에서와 마찬가지로, 좌표 ( $x_n, y_n, z_n$ )에 위치한 기준 점원과 두 번째 물체점과의 간섭패턴에 의해 기록된 홀로그래프에 구면파 형태의 기준빔을 입사시켜 복원한다. 이 경우 첫 번째 물체점의 경우와 마찬가지로 복원시 사용되는 기준빔의 초점거리  $Z_f$ 를 200 cm 혹은 300 cm로 가정한 후 홀로그래프를 복원하여 두 번째 물체점의 복원 좌표값 ( $X_2, Y_2, Z_2$ )를 계산한다. 그 다음 이러한 값들을 식 (7)에 대입하면 두 번째 물체점의 절대좌표 ( $x_{o2}, y_{o2}, z_{o2}$ )와 상대 거리 ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ )를 구할 수 있다. 다시 말하여, 본 논문에서는 첫 번째 물체점의 실측 절대좌표 ( $x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}$ )과 홀로그래프 복원에 의하여 얻은 좌표들 ( $X_1, Y_1, Z_1$ ) 및 ( $X_2, Y_2, Z_2$ )로부터 첫 번째 물체점과 두 번째 물체점 사이의 상대적인 거리를 측정한다.

그 다음 본 논문에서는 제안된 3차원 상대 거리 측정 알고리즘을 광학실험에 적용하여 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 측정하였다. 그림 1에서 보는 것처럼 본 실험에서는 기준빔의 위상을 정밀히 제어하기 위해 PZT를 이용하여 제작된 piezo-electric transducer 미러를 기준빔 경로상에 설치하여 기

준빔의 위상을 90°씩 변화시키면서 네 개의 간섭패턴들을 CCD에 기록하였다. 이렇게 기록된 간섭패턴들은 컴퓨터에 설치된 Frame Grabber에 의해 8-bit 그레이 코드값들로 변환된 다음 컴퓨터에 디지털 정보로 저장된다. 본 실험에서 사용된 CCD는 UNIQ사의 UM-200으로 유효 픽셀 개수는 640×480이며 픽셀 피치  $\Delta x_c$ 와  $\Delta y_c$ 는 각각 8.4  $\mu\text{m}$  및 9.8  $\mu\text{m}$ 으로 주어진다. 본 실험에서 사용된 PZT 미러는 크기가 약 2 mm×5 mm×5 mm로 주어지는 piezo-electric transducer위에 크기가 약 2 mm×5 mm로 주어지는 작은 미러를 부착하여 제작되었다. 3차원 상대 거리 측정 실험에 앞서 본 실험에서는 PZT에 0volt에서부터 100volts까지 인가 전압을 바꾸면서 CCD에 기록되어지는 간섭 무늬로부터 위상천이가 얼마나 발생하는지를 미리 측정하였다. 실험에서 PZT에 약 9volts를 인가하면 PZT 미러에 의해 반사된 기준빔의 위상이 90°만큼 변화였고 약 18volts를 인가하면 위상이 180°만큼 변화였으며 약 26volts를 인가하면 270°만큼 변화였다. 실험으로부터 얻은 이러한 pre-calibration 전압값을 이용해 기준빔의 위상을 90°씩 변화시키면서 네 개의 간섭 패턴들을 CCD에 기록하였다. 그림 4는 이렇게 기록되어지는 간섭 무늬중 기준빔의 위상이 0°인 경우 CCD로 찍은 사진이다. 또한 실험에 사용된 Ar<sup>+</sup> 레이저 빔의 폭은 약 1 mm이며 가간섭 길이는 약 2 m로 측정되었다.

간섭위상  $\Phi_0(x, y) - \Phi_1(x, y)$ 는 실험에서 측정된 이러한 네 개의 간섭패턴들을 식 (2)에 대입하면 얻어진다. 이러한 간섭 위상을 식 (3)에 대입한 후 컴퓨터상에서 Fresnel 회절 적분을 수행하여 홀로그램을 복원한다. 첫 번째 물체점의 홀로그램과 두 번째 물체점의 홀로그램에 각각 Fresnel 회절 적분을 수행하면 식 (5)와 (6)으로부터 복원 좌표들  $(X_1, Y_1, Z_1)$  및  $(X_2, Y_2, Z_2)$ 가 얻어진다. 두 물체점들 사이의 상대 거리 ( $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ )는 이러한 복원 좌표들과 실측을 통해 미리 측정되어지는 첫 번째 점원 물체의 절대좌표  $(x_{o1}, y_{o1}, z_{o1})$ 를 이용하여 식 (7)로부터 측정되어진다. 광학실험에서 첫 번째 점원 물체의 실측 절대좌표가  $(x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}) = (2.0 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 269.0 \text{ cm})$ 로 측정되었고 복원시 사용되는 기준빔의 초점좌표  $(X_f, Y_f, Z_f)$ 는  $(0.0 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 200.0 \text{ cm})$  혹은  $(0.0 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 300.0 \text{ cm})$ 로

가정하였다. 광학실험에서 홀로그램 기록시 사용된 기준빔의 초점거리  $z_f$ 는 약 277.5cm로 측정되었다.

#### IV. 실험결과

본 논문에서 수행한 모의실험 및 광학실험의 결과는 아래와 같다. 표 1은 복원시 사용되는 구면파 형태의 기준빔의 초점좌표  $(X_f, Y_f, Z_f)$ 를  $(0.0 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 200.0 \text{ cm})$ 로 가정한 경우 모의실험 및 광학실험의 결과들이고 표 2는 초점좌표  $(X_f, Y_f, Z_f)$ 를  $(0.0 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 300.0 \text{ cm})$ 로 가정한 경우의 실험 결과들이다. 표 1의 모의실험에서 기준 점원의 절대좌표는  $(x_o, y_o, z_o) = (-2.5 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 277.5 \text{ cm})$ 이고 첫 번째 물체점의 절대좌표와 두 번째 물체점의 절대좌표는 각각  $(x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}) = (2.0 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 269.0 \text{ cm})$  및  $(x_{o2}, y_{o2}, z_{o2}) = (2.0 \pm 0.5 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 269.0 \pm 1.0 \text{ cm})$ 로 가정하였다. 이 경우 첫 번째 물체점의 복원 좌표는  $(X_1, Y_1, Z_1) = (3.2283 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 195.55 \text{ cm})$ 로 계산되었다. 반면에 표 1의 광학실험에서 첫 번째 물체점의 실측 절대좌표는  $(x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}) = (2.0 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 269.0 \text{ cm})$ 로 측정되었고, 실험에 사용된 두 번째 물체점은 첫 번째 물체점으로부터 각각 x-방향으로  $\Delta x = \pm 0.5 \text{ cm}$ , y-방향으로  $\Delta y = 0.0 \text{ cm}$ , z-방향으로  $\Delta z = \pm 1.0 \text{ cm}$ 만큼 떨어져 위치하였다. 이 경우 첫 번째 물체점의 복원 좌표는  $(X_1, Y_1, Z_1) = (3.5846 \text{ cm}, -0.0318 \text{ cm}, 193.57 \text{ cm})$ 로 측정되었다.

표 1의 모의실험에서 계산된 상대 거리  $\Delta x$ 의 최소오차는 두 번째 물체점이 첫 번째 물체점으로부터 x-방향으로 0.5 cm, z-방향으로 +1 cm만큼 떨어져 위치할 때 0.35%로 주어졌다. 또한 계산된 상대 거리  $\Delta x$ 의 최대오차는 두 번째 물체점이 첫 번째 물체점으로부터 x-방향으로 -0.5 cm, z-방향으로 0 cm만큼 떨어져 위치할 때 2.98%로 주어졌다. 비슷한 방법으로 계산된 상대 거리  $\Delta z$ 의 최소오차는 두 번째 물체점이 첫 번째 물체점으로부터 z-방향으로 -1.0 cm만큼 떨어져 위치할 때 0.19%로 주어졌고 최대오차는 두 번째 물체점이 첫 번째 물체점으로부터 z-방향으로 +1.0 cm만큼 떨어져 위치할 때 1.50%로 주어졌다. 이러한 모의실험을 반복하여 얻은 데이터들의 평균오차는 계산된  $\Delta x$ 와  $\Delta z$ 에 대하여 각각 1.59% 및 0.85%로 주어졌다. 본 논문에서는 새로이 제시된 3차원 상대 거리 측정 알고리즘을 실험적으로 입증하기 위해 여러번의 광학실험을 수행하였다. 표 1에서 보는 것처럼 광학실험을 통하여 측정된 상대 거리  $\Delta x = \pm 0.5 \text{ cm}$ 는 초점거리가 200 cm인 구면파를 기준빔으로 이용하는 경우 9.29%의 평균오차 범위 내에서 측정되었다. 반면에 표 1의 첫 행에서 측정된 상대 거리  $\Delta z = 0.463 \pm 0.001 \text{ cm}$ 는 여러번의 광학실험중 최선의 경우 측정된 값을, 나머지 행들의 측정된 상대 거리  $\Delta z$ 는 공기 흐름, 진동 등 외부 환경 변화가 있는 최악의 경우 측정된 값들을 나타낸다. 그러나 나머지 행들의 경우에도 최선의 경우 상대 거리  $\Delta z$ 는 첫 행과 비슷한 오차 범위내에서 측정되었다. 표 1로부터 광학실험을 통하여 두 물체점들 사이의 z-방향으로의 상대 거리  $\Delta z = \pm 1.0 \text{ cm}$ 를 정확하게 측정하기가 매우 어렵다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 실제 광학실험시 발생하는 파는 CCD로부터 수 m 이상 멀리 떨어져 있으므로 CCD

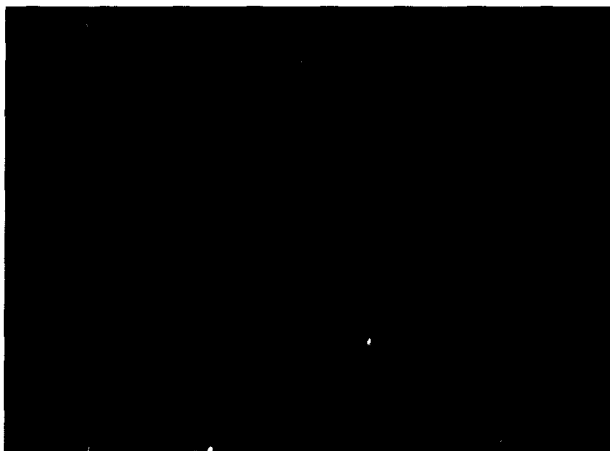


그림 4. 두 물체점들로부터 발생된 빔들이 CCD상에서 이루는 간섭 무늬.

상에서 구면파의 곡률이 매우 작아서 이를 실험적으로 검출해 내기가 어렵기 때문이다. 그 결과 홀로그램 복원식 (3)을 통하여 계산되어지는 물체점의 복원 Z-좌표가 모의실험의 경우보다 상대적으로 오차가 크기 때문이다. 또한 광학실험에서는 공기흐름, 진동 등 외부 환경의 변화가 CCD상에서 측정되는 간섭무늬에 영향을 미칠 수 있으며 이것이 오차의 한 원인으로 작용할 수 있다.

표 2는 표 1과 동일한 홀로그램에 초점좌표  $(X_f, Y_f, Z_f) = (0.0 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 300.0 \text{ cm})$ 인 구면파 기준빔을 입사시켜 홀로그램을 복원하고 이것을 이용하여 두 물체점들 사이의 상대 거리를 계산 및 측정된 결과들이다. 표 2의 모의실험에서 첫 번째 물체점의 복원 좌표는  $(X_1, Y_1, Z_1) = (4.7890 \text{ cm}, 0.0 \text{ cm}, 290.09 \text{ cm})$ 로 계산되었고 광학실험에서는  $(X_1, Y_1, Z_1) = (5.2920 \text{ cm}, -0.0469 \text{ cm}, 285.77 \text{ cm})$ 로 구해졌다. 표 2의 모의실험에서 보는 것처럼 초점거리가 300 cm인 구면파를 기준빔으로 이용하는 경우 계산된 상대 거리  $\Delta x$ 와  $\Delta z$ 는 각각 1.58% 및 0.25%의 평균오차 범위내에서 계산되어졌다. 반면에 광학실험을 통하여 측정된 상대 거리  $\Delta x$ 는 9.30%의 평균오차 범위내에서 측정되었다. 표 1에서와 마찬가지로 표 2의 첫 행에서 측정된 상대 거리  $\Delta z = 0.460 \pm 0.001 \text{ cm}$ 는 여러번의 광학실험 중 최선의 경우 측정된 값을, 나머지 행들의 측정된 상대 거리  $\Delta z$ 는 최악의 경우 측정된 값들을 나타낸다. 따라서 표 1에서와 마찬가지로 광학실험을 통하여  $\Delta z = \pm 1.0 \text{ cm}$ 를 정확하게 측정하기는 매우 어려우며 이러한 오차는 여러번의 광학실험으로부터 얻은 데이터들의 평균을 취함으로써 줄일 수 있을 것이다.

표 1과 표 2의 데이터들을 비교하면 주어진 두 물체점들 사이의 상대적인 거리  $\Delta x$  혹은  $\Delta z$ 는 홀로그램의 복원에 사용되는 구면파 형태의 기준빔의 초점거리와 관계없이 동일한 값으로 모의실험에서 계산되고 또한 광학실험에서도 거의 동일한 값으로 주어진다 것을 알 수 있다. 그러나 기준빔의 초점거리가 고정된 경우, 표 1 혹은 표 2에서 보는 것처럼 두 물체점들 사이의 상대 거리  $\Delta x$ 는 평균오차 10%내에서 측정되어짐을 알 수 있다.

본 논문에서 제안된 3차원 상대 거리 측정 알고리즘을 이용해 두 물체점들 사이의 상대 거리를 계산 혹은 측정하기 위해서는 첫 번째 물체점의 절대좌표  $(x_{01}, y_{01}, z_{01})$ 을 알아야 한다. 그리하여 본 논문에서는 첫 번째 물체점의 절대좌표 측정에 x-방향으로  $\pm 1 \text{ cm}$  및 z-방향으로  $\pm 5 \text{ cm}$ 만큼 좌표오차가 발생했을 경우 이것이 3차원 상대 거리 측정에 어떠한 영향을 미치는지를 계산하였다. 그림 5는 첫 번째 물체점의 좌표오차에 대하여 계산 혹은 측정되는 상대 거리  $\Delta x$ 의 값들을 표시하고, 그림 6은 이러한 좌표오차에 대하여 계산 혹은 측정되는 상대 거리  $\Delta z$ 의 값들을 표시한다.

그림 5의 모의실험에서 초점거리가 200 cm인 구면파를 복원 기준빔으로 이용하는 경우 각각의 주어진 좌표오차에 대해 상대 거리  $\Delta x = \pm 0.5 \text{ cm}$ 는 2.08%, 1.22%, 1.82%, 2.38%의 평균오차 범위내에서 계산되어졌다. 또한 비슷한 방법으로 초점거리가 300 cm인 구면파를 복원 기준빔으로 이용하는 경우 각각의 좌표오차에 대해 상대 거리  $\Delta x$ 는 2.08%, 1.23%, 1.82%, 2.39%의 평균오차 범위내에서 계산되어졌다. 그림 5의 광학실험은 모의실험과 마찬가지로 첫 번째 물체점의 실측 절대좌표

표 1 초점거리  $Z_f = 200 \text{ cm}$ 인 구면파를 이용해 복원된 두 물체점들 사이의 상대 거리

두 물체점 사이의 상대 거리 [cm]			계산된 상대 거리 (모의실험) [cm]			측정된 상대 거리 (광학실험) [cm]		
$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
-0.5	0.0	0.0	$-0.514 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.000 \pm 0.001$	$-0.563 \pm 0.001$	$0.029 \pm 0.001$	$0.463 \pm 0.001$
0.5	0.0	0.0	$0.489 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.000 \pm 0.001$	$0.507 \pm 0.001$	$0.0001 \pm 0.0001$	$-8.745 \pm 0.001$
-0.5	0.0	-1.0	$-0.494 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-1.001 \pm 0.001$	$-0.571 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$3.917 \pm 0.001$
0.0	0.0	-1.0	$-0.007 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-1.001 \pm 0.001$	$-0.029 \pm 0.001$	$0.0001 \pm 0.0001$	$-3.904 \pm 0.001$
0.5	0.0	-1.0	$0.505 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-1.001 \pm 0.001$	$0.522 \pm 0.001$	$0.0001 \pm 0.0001$	$-7.206 \pm 0.001$
-0.5	0.0	1.0	$-0.509 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.985 \pm 0.001$	$-0.584 \pm 0.001$	$0.029 \pm 0.001$	$-3.367 \pm 0.001$
0.0	0.0	1.0	$0.007 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.985 \pm 0.001$	$-0.039 \pm 0.001$	$0.0001 \pm 0.0001$	$-5.319 \pm 0.001$
0.5	0.0	1.0	$0.498 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.985 \pm 0.001$	$0.528 \pm 0.001$	$0.0001 \pm 0.0001$	$-6.578 \pm 0.001$

표 2 초점거리  $Z_f = 300 \text{ cm}$ 인 구면파를 이용해 복원된 두 물체점들 사이의 상대 거리

두 물체점 사이의 상대 거리 [cm]			계산된 상대 거리 (모의실험) [cm]			측정된 상대 거리 (광학실험) [cm]		
$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta z$
-0.5	0.0	0.0	$-0.514 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.000 \pm 0.001$	$-0.563 \pm 0.001$	$0.029 \pm 0.001$	$0.460 \pm 0.001$
0.5	0.0	0.0	$0.489 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.000 \pm 0.001$	$0.507 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-8.745 \pm 0.001$
-0.5	0.0	-1.0	$-0.494 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-0.997 \pm 0.001$	$-0.571 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$3.912 \pm 0.001$
0.0	0.0	-1.0	$-0.007 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-0.997 \pm 0.001$	$-0.029 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-3.911 \pm 0.001$
0.5	0.0	-1.0	$0.505 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-0.997 \pm 0.001$	$0.522 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-7.215 \pm 0.001$
-0.5	0.0	1.0	$-0.509 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.997 \pm 0.001$	$-0.584 \pm 0.001$	$0.029 \pm 0.001$	$-3.378 \pm 0.001$
0.0	0.0	1.0	$0.007 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.997 \pm 0.001$	$-0.039 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-5.331 \pm 0.001$
0.5	0.0	1.0	$0.498 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$0.997 \pm 0.001$	$0.528 \pm 0.001$	$0.0000 \pm 0.0001$	$-6.593 \pm 0.001$

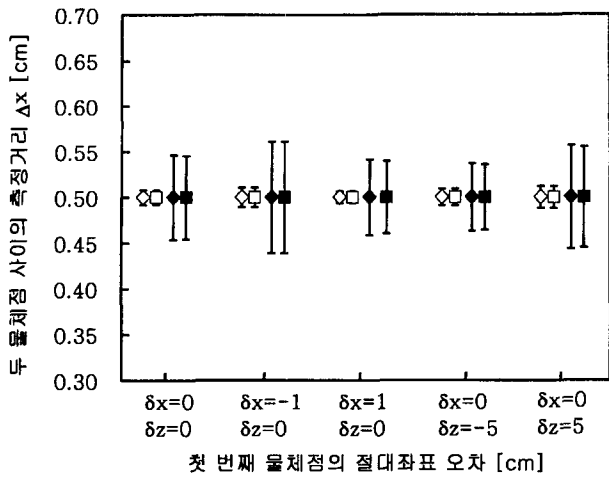


그림 5. 서로 다른 구면파를 이용해 복원된 두 물체점들 사이의 거리  $\Delta x$ .  $\diamond, \blacklozenge$  :  $Z_1 = 200\text{cm}$ .  $\square, \blacksquare$  :  $Z_1 = 300\text{cm}$ .  $\diamond, \square$  : 모의실험.  $\blacklozenge, \blacksquare$  : 실험.

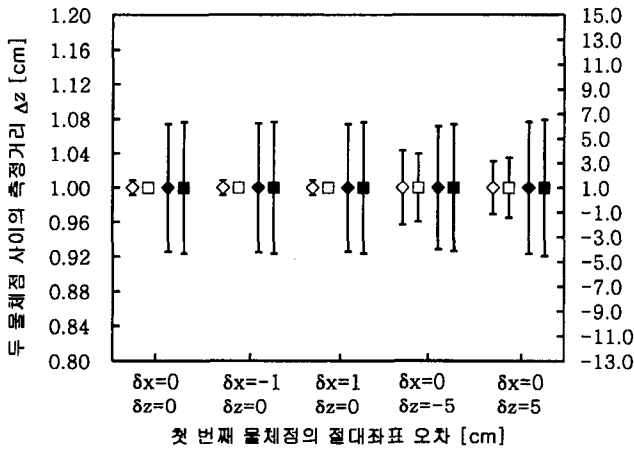


그림 6. 서로 다른 구면파를 이용해 복원된 두 물체점들 사이의 거리  $\Delta z$ .  $\diamond, \blacklozenge$  :  $Z_1 = 200\text{cm}$ .  $\square, \blacksquare$  :  $Z_1 = 300\text{cm}$ .  $\diamond, \square$  : 모의실험(왼쪽 y-축을 참조).  $\blacklozenge, \blacksquare$  : 실험(오른쪽 y-축을 참조).

$(x_{01}, y_{01}, z_{01})$ 를  $(2.0 \pm 1.0\text{ cm}, 0.0\text{ cm}, 269.0 \pm 5.0\text{ cm})$ 로 가정 한 후 상대 거리를 측정 한 결과를 보여준다. 이 경우 x-방향으로의 상대 거리가  $\Delta x = \pm 0.5\text{ cm}$ 로 주어지는 경우 광학실험의 결과는 평균오차 10%내에서 측정되어짐을 알 수 있다.

그림 6은 그림 5와 동일한 조건에서 수행한 모의실험 및 광학실험으로부터 계산 및 측정된 z-방향으로의 상대 거리를 나타낸다. 모의실험인 경우, 초점거리가 200 cm인 구면파를 복원 기준점으로 이용하면 그림의 수평축에서 주어진 각각의 좌표오차에 대해 상대 거리  $\Delta z$ 는 0.85%, 0.85%, 4.31%, 3.07%의 평균오차 범위내에서 계산되어졌다. 또한 초점거리가 300 cm인 구면파를 복원 기준점으로 이용하면 각각의 좌표오차에 대해 상대 거리  $\Delta z$ 는 0.25%, 0.25%, 3.93%, 3.49%의 평균오차 범위내에서 계산되어졌다. 비슷한 방법으로 실제의 광학실험을 통하여 첫 번째 물체점의 실측 절대좌표  $(x_{01}, y_{01}, z_{01})$ 이  $(2.0 \pm 1.0\text{ cm}, 0.0\text{ cm}, 269.0 \pm 5.0\text{ cm})$ 로 주어지는 경우 두 물

체점들 사이의 z-방향으로의 상대 거리를 측정하였다. 표 1과 표 2에서처럼 그림 6의 광학 실험은 최악의 경우를 고려하여 측정된 z-방향으로의 상대 거리를 나타낸다. 이 경우, 표 1과 표 2에서와 같이 z-방향으로의 상대 거리  $\Delta z = \pm 1.0\text{ cm}$ 는 이러한 광학실험을 통하여 측정하기가 매우 어렵다는 것을 알 수 있다. 그러나 실험에서 측정되는 두 번째 물체점의 절대 z-좌표는 첫 번째 물체점의 실측 절대 z-좌표 269 cm에 대해 약 2%의 평균오차 범위내에서 구해졌다. 다시 말하여, 약 3 m 거리에서 z-방향으로 6 cm 미만(약 2%)의 상대 거리는 잘 찾지 못하지만 그 이상의 상대 거리는 잘 찾을 수 있음을 의미한다. 여러번의 모의실험과 광학실험 결과들로부터 y-방향으로의 상대 거리  $\Delta y$ 도 x-방향으로의 상대 거리  $\Delta x$ 와 마찬가지로 약 10% 오차 범위안에서 측정되어진다는 것을 알 수 있었다.

### V. 결 론

본 논문에서는 두 물체점들 사이의 3차원 상대 거리를 위상 천이 디지털 홀로그래피를 이용하여 측정하는 방법을 제안하고 모의실험 및 광학실험을 이용하여 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 계산 및 측정하였다. 이 경우 홀로그램의 복원에 사용되는 기준점이 홀로그래피의 기록시 사용된 기준점과 다른 구면파 형태로 주어지는 경우 이것이 측정되는 두 물체점들 사이의 상대적 거리에 미치는 영향을 계산 및 측정하였다. 또한 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 계산 및 측정하는 경우 첫 번째 물체점의 절대좌표가 사용되는데 본 논문에서는 첫 번째 물체점의 절대좌표에 오차가 있는 경우 이것이 두 물체점들 사이의 상대적인 거리 측정에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다.

본 논문의 모의실험 및 광학실험에서 두 물체점들은 CCD로부터 약 270 cm 떨어진 위치에 x-방향으로  $\Delta x = \pm 0.5\text{ cm}$ , z-방향으로  $\Delta z = \pm 1.0\text{ cm}$  만큼 떨어져 위치한다고 가정하였다. 이들 물체점들의 홀로그램을 복원할 때 초점거리가 200 cm 혹은 300 cm로 주어지는 서로 다른 구면파를 사용하여도 두 물체점들 사이의 상대적인 거리는 동일하게 측정되었다(측정오차 1%미만). 그러나 주어진 하나의 초점거리(200 cm 혹은 300 cm)에 대해 모의실험에서 측정된 두 물체점들 사이의 상대적인 거리  $\Delta x$ 와  $\Delta z$ 는 각각 1.59% 및 0.85% 오차내에서 측정되었고, 광학실험에서  $\Delta x$ 는 약 10% 오차내에서 측정되었다. z-방향으로의 상대적인 거리가  $\Delta z = \pm 1.0\text{ cm}$ 로 주어지는 경우 이것을 광학실험을 통하여 측정하기가 매우 어려웠다. 그 이유는 본 논문에서 제안한 3차원 상대 거리 측정 알고리즘을 이용한 광학실험에서 최악의 경우를 고려한 z-방향으로의 분해능은 3 m 거리에서 약 6 cm로 주어지기 때문이다.

첫 번째 물체점의 실측된 절대좌표에 좌표오차가 발생한 경우 모의실험에서 측정된 두 물체점들 사이의 상대적인 거리  $\Delta x$ 와  $\Delta z$ 는 각각 2.39% 및 4.31% 오차내에서 측정되었다. 이 경우 광학실험에서 측정된  $\Delta x$ 는 약 10% 오차 범위안에서 측정되지만  $\Delta z$ 는 위에서와 마찬가지로 측정하기가 매우 어렵다는 것을 알 수 있었다.

본 논문에서 제안한 3차원 상대 거리 측정을 위한 위상천이 디지털 홀로그래피 시스템은 기준빔과 물체빔을 동시에 3차원 물체표면에 입사시키므로 기존의 홀로그래피 시스템에 존재하는 기준빔과 물체빔 사이의 광경로 차이의 제약을 해결할 수 있었다. 따라서 이러한 시스템은 수 m 이상 먼 거리에 떨어져 있는 대형 3차원 물체의 표면 위에 존재하는 두 물체점들 사이의 상대적인 거리를 약 10% 오차내에서 측정하는데 응용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단의 지역협력연구센터(RRC)인 성균관대학교 정보통신용 신기능성 소재 및 공정 연구센터의 지원 과제번호 : R12-2002-057-02002-0)으로 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

- [1] T. Aoki, M. Takabe, K. Mizutani, and T. Itabe, "Laser-ranging scanning system to observe topographical deformations of volcanoes," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 6, pp. 1239-1244, 1997.
- [2] E. Gagnon and J. F. Rivest, "Laser range imaging using the self-mixing effect in a laser diode," *IEEE Trans. on Inst. and Meas.*, vol. 48, no. 3, pp. 693-699, 1999.
- [3] B. Journet and G. Bazin, "A low-cost laser range finder based on an FMCW-like method," *IEEE Trans. on Inst. and Meas.*, vol. 49, no. 4, pp. 840-843, 2000.
- [4] G. Mourat, N. Servagent, and T. Bosch, "Distance measurement using the self-mixing effect in a three-electrode distributed Bragg reflector laser diode," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 3, pp. 738-743, 2000.
- [5] J. A. Beraldin, F. Blais, M. Rioux, L. Cournoyer, D. Laurin, and S. G. MacLean, "Eye-safe digital 3-D sensing for space applications," *Opt. Eng.*, vol. 39, no. 1, pp. 196-211, 2000.
- [6] Z. Sodick, E. Fischer, T. Ittner, and H. J. Tiziani, "Two-wavelength double heterodyne interferometry using a matched grating technique," *Appl. Opt.*, vol. 30, no. 22, pp. 3139-3144, 1991.
- [7] T. Li, A. Wang, K. Murphy, and R. Claus, "White-light scanning fiber Michelson interferometer for absolute position-distance measurement," *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 7, pp. 785-787, 1995.
- [8] U. Schnell and R. Dandliker, "Dispersive white-light interferometry for absolute distance measurement with dielectric multilayer systems on the target," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 7, pp. 528-530, 1996.
- [9] H. G. Rhee, J. Y. Chu, and S. W. Kim, "Volumetric interferometry using spherical wave interference for three-dimensional coordinate metrology," *J. Opt. Soc. Kor.*, vol. 5, no. 4, pp. 140-145, 2001.
- [10] H. G. Rhee and S. W. Kim, "Absolute distance measurement by two-point diffraction interferometry," *Appl. Opt.*, vol. 41, no. 28, pp. 5921-5928, 2002.
- [11] K. Creath, "Phase-measurement interferometry techniques," *Progress in Optics*, vol. 26, pp. 349-393, 1988.

## Three-dimensional relative-distance measurement by use of the phase-shifting digital holography

Hyun Kim and Yeon H. Lee<sup>†</sup>

School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Kyongki-Do 440-746, KOREA

<sup>†</sup>E-mail : yeonlee@yurim.skku.ac.kr

(Received January 21, 2003, Revised manuscript March 20, 2003)

In this paper we present a new method of measuring the relative distance of two point objects in three-dimensional space by using phase-shifting digital holography. In our system the reference beam of a spherical wave is used instead of a plane wave. The system is computer simulated and built on an optical table for experiments. It is shown from computer simulations and experiments that the relative distance can be measured without the exact information on the reference beam used in the hologram record. It is shown from experiments that the relative distance between two point objects separated by 0.5 cm in the distance of about 300 cm from the CCD can be measured with an error less than 10%.

OCIS Codes : 090.2880, 120.2880, 120.3940.