

비접촉식 실시간 6자유도 운동계측시스템

조 용범[†] · 편 용범^{**} · 도 덕희^{***} · 조효제^{****}

Non-contact Realtime 6D-Motion Tracking System

Doh D. H., Cho Y. B. and Pyun Y. B.

Key Words: 6D Motion tracking(6자유도 계측), Real time(실시간), Floating vessel(부유식 구조물)

Abstract

A non-contact 6D motion tracking system is proposed. The system consists of two color cameras, a color image grabber and a host computer. Motions of a floating vessel was measured by the constructed system. The instantaneous forces of the floating vessel are analyzed. The floating vessel was put on the water in a small water container in free conditions. The measured forces are reconstructed by the measurement results. The system can be used to non-contact measurements for 6D dynamic analysis of floating vessels.

기호설명

H	: 색상 값(Hue)
F_x, F_y, F_z	: 힘의 3성분
x, y	: 사진 좌표
m_x, m_y	: 중심축의 이동량
(X_m, Y_m, Z_m)	: X, Y, Z축에 의한 회전된 입자좌표
(X_0, Y_0, Z_0)	: 카메라 중심의 위치(절대 좌표계)
c	: 투영면(초점거리)
ΔV	: 3D-PTV 속도측정결과의 변화
W	: 구조물 중량

1. 서 론

파랑 중에 떠있는 부유식 구조물의 운동을 정확하게 추정하는 것은 구조물의 가동능력 및 안전성 면에서 중요한 문제이다. 따라서, 부유식 구조물의 응답추정을 위하여 많은 연구자들에 의해 이론적 실험적 연구가 계속되고 있다. 요즈음 해양개발의 목적을 위하여 여러 가지 형상의 부유식 구조물이 등장하게되고, 이의 운동응답 추정에는 여러 이론해석법이 사용되고 있으나 이들 해석법에 의한 추정치의 타당성을 검증하기 위해서는 일반적으로 수조시험을 수행하여 그 결과를 비교검토하고 있다. 따라서 수조시험에 의한 부유식 구조물의 운동응답 측정기법의 정확성은 구조물의 성능평가에 상당한 영향을 미치게 된다.

지금까지 수조시험에서의 운동응답 측정에는 기계식 6자유도 운동측정 장치와 LED취부의 비접촉식 측정방법이 있다¹⁾. 그러나, 이들 방법은

[†] 정회원, 한국해양대학교 대학원
doh@hanara.hhu.ac.kr, Tel:051-410-4364

^{**} 회원, (주)티엔텍
flowtech@tientech.com, Tel:051-403-2691

^{***} 종신회원, 한국해양대학교 기계정보공학부

^{****} 종신회원, 한국해양대학교 조선해양시스템공학부

기계적 마찰존재로 인하여 일부 모드 구축에 따른 완전한 연성운동을 재현할 수 없거나, LED취부를 위한 지지대 설치오차 등에 따른 오차가 존재한다.

본 연구에서는 측정장치를 쉽게 설치할 수 있을 뿐만 아니라 모형에 완전 비접촉 조건을 부여하면서 실시간으로 정도 높게 측정할 수 있는 6자유도 운동 측정시스템을 구축하고자 하였다.

최근에 유체 유동장에 미소입자를 투입한 다음 이들의 운동을 해석함으로써 유체유동의 해석을 하는 PTV(Particle Tracking Velocimetry)기술이²⁾⁽³⁾ 유체계측분야에 많이 적용되고 있다. PTV계측을 위해서는 최소 2시각에서의 영상만 있으면 유동장의 순간 속도분포정보를 얻을 수 있으나 부유식 구조물과 같이 구조물의 운동을 장시간 파악해야할 경우 기존의 PTV계측 알고리즘으로는 계속하기가 어렵다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 추적입자의 색(色) 정보를 이용한 실시간 운동을 계속할 수 있는 알고리즘을 구축하여 이를 부유식 구조물 모델에 대한 운동측정에 성공하였는데 이에 보고를 하고자 한다.

한편, 본 연구에서 구축한 계속법은 물체의 非常 운동뿐만 아니라 탄성구조물의 모드형상의 계속 등 다양한 목적에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

2. 6D 운동계측시스템

2.1 계속시스템 및 계속방법

Fig. 1은 계속시스템의 구성을 나타낸다. 계속시스템은 두 대의 칼라카메라, 두 대의 이미지 그래버 및 호스트컴퓨터로 구성된다. 부유식 구조물의 운동을 계속하기 위하여 두 대의 칼라카메라를 계속대상물을 향하여 설치한다. 미리 알고 있는 기준점을 갖다 놓고 카메라에 대한 교정작업을 한다. 교정작업이 끝나면 기준점들이 놓였던 자리에 Fig. 2와 같은 부유식 구조물 모델을 설치한다. 구조물 모델에는 4색(Red, Green, Blue, White)의 표적점이 설치되어 있는데 이들 표적점들의 면심과 칼라정보가 모델의 공간 운동계산에 이용된다. 계산되는 과정 중의 결과는 호스트 컴퓨터의 모니터에 출력된다.

한편, 실시간의 계산을 위하여 이미지 그래버의 고속 A/D변환기를 통하여 2치화 된 영상정보를

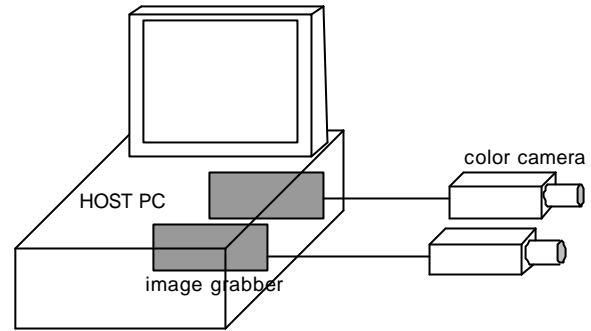


Fig. 1 Measurement system.

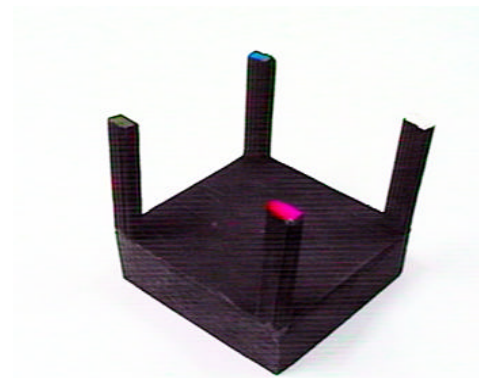


Fig. 2 Floating vessel model.

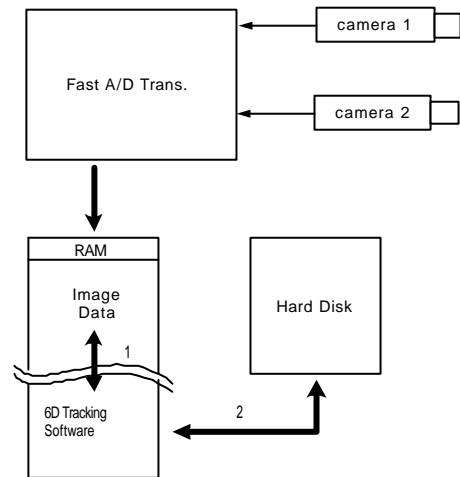


Fig. 3 Direct processing on RAM

호스트 컴퓨터의 RAM상에서 바로 인식하도록 하였다. Fig. 3은 이를 나타낸다. 통상, 이미지 그래버 제작사에서 출시하는 구동 프로그램들은 사용자들로 하여금 하드디스크상에 저장된 형태의 영상파일을 사용하도록 되어있다. 그렇게 되면 하드디스크와 사용자 프로그램간의 엑세스(access)시간이 많이 흐르게되어 Off-Line 계산이

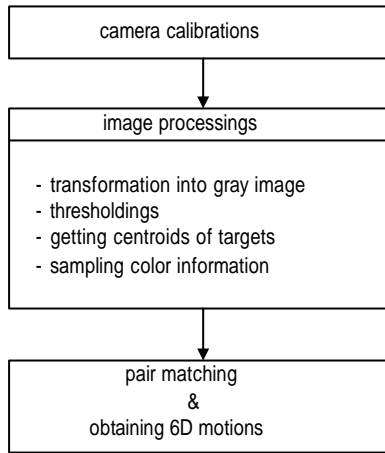


Fig. 4 Procedure of 6D motion tracking.

될 수밖에 없다. 본 연구에서는 입력되는 영상을 하드디스크에 저장하기 전에 바로 RAM상에서 영상을 인식한 뒤 운동계측을 위한 계산이 수행될 수 있도록 하였다.

Fig. 4는 계측시스템에서 힘을 계산하기까지의 계산과정을 나타낸다. 전술한 바와 같이 카메라에 대한 교정을 통하여 공간에 대한 인식을 시킨다. 다음으로, 카메라로부터 얻어진 칼라영상을 흑백영상으로 변환한 뒤 이를 2치화 과정을 거침으로써 표적물의 면심을 구한다. 그 다음, 면심 주변의 대표적인 색을 다음의 Hue(색상)식 (1)으로 정량화 한다. 여기서, R, G, 및 B는 각각 255 계조치를 가지고 있으며 칼라영상의 빨강(Red), 초록(Green) 및 파랑(Blue)색을 나타낸다.

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\}$$

(when $B \leq G$)

$$H = 2\pi - \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R-G) + (R-B)]}{[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)]^{1/2}} \right\}$$

(when $B > G$)

(1)

이와 같은 계산을 통하여 얻어진 제 1카메라의 표적점의 색 정보와 제 2카메라의 색 정보와의 차이가 임의의 값 이내일 때에 두 카메라간의 동일한 표적점으로 인식한다.

2.2 표적물의 공간좌표 계산

전술한 바와 같이 카메라를 이용한 공간인식을 위해서는 2대 이상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 교정작업을 통하여 카메라파라미터(절대좌표계에 대한 카메라의 상대적 위치정보, 자세기울기, 카메라 렌즈 및 CCD cell 위치)가 필요하다. 본 연구에서는 10개 파라미터 교정법⁽⁴⁾을 사용한다. 즉, 외부요소를 6개 ($dis, \alpha, \beta, \kappa, m_x, m_y$), 내부요소를 4개로 나뉘어 (c_x, c_y, k_1, k_2) 총 10개의 카메라 파라미터를 사용한다.

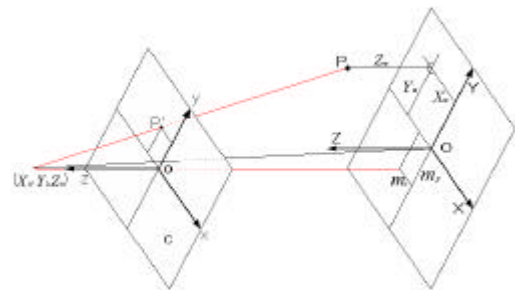


Fig. 5 Camera parameters on the absolute and the photographic coordinates.

Fig. 5는 절대좌표계(X, Y, Z)에 대한 카메라 좌표계(x, y, z)와의 관계에서 10개 파라미터와의 관계를 보여 주고 있다. dis는 절대 좌표계 O(0, 0, 0)점으로부터 카메라 중심까지의 거리를 의미한다. 절대좌표계에 대한 카메라 좌표계의 회전각을 각각 α, β, κ 로 정의하면 축에 대한 회전행렬은 $M_M = M_Z M_Y M_X$ 가 된다. 회전된 절대좌표값은 (X_m, Y_m, Z_m)로 표시되고 카메라의 z축과 절대좌표계의 Z축을 일치시키기 위한 이동량이 (m_x, m_y)로 표시된다. 절대좌표계상의 대상점과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 다음과 같은 관측방정식이 얻어지게 된다.

$$x = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta x$$

$$y = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta y$$

(2)

여기서 (c_x, c_y)는 이미지 그래버에 따른 장방비를

고려한 렌즈 초점거리이며, $(\Delta x, \Delta y)$ 은 다음의 식 (3)으로 표시되는 렌즈의 굴절량을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{x}{r}(k_1 r^2 + k_2 r^4), \quad \Delta y = \frac{y}{r}(k_1 r^2 + k_2 r^4) \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)는 카메라의 파라미터를 구하기 위해 이미 알고 있는 3차원 기준점 좌표 (X_i, Y_i, Z_i) 와 사진 좌표 (x_i, y_i) 에 대한 관측방정식 다음의 식 F, G로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{\text{dis}^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (x - \Delta x) = 0 \\ G &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{\text{dis}^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (y - \Delta y) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

이 방정식은 비선형 연립방정식이므로 이를 풀기 위하여 초기에 카메라 파라미터의 미지값을 가정하고 테일러 급수전개에 의한 최소자승법⁽⁶⁾으로 보정량을 구하여 수렴될 때까지 근사치를 보정하는 수정 Gauss - Newton법을 사용한다.

카메라의 파라미터가 구해지면 사진좌표 (x, y) 와 절대좌표 (X, Y, Z) 간에 식 (4)으로부터 다음과 같은 관계식 (5)이 성립된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, M_M 은 회전변환행렬이며 B는 이의 역행렬이다. 이때의 X_m, Y_m, Z_m 은 다음 식 (6)으로 표시된다.

$$\begin{aligned} X_m &= \frac{x - \Delta x}{c_x} t + m_x \\ Y_m &= \frac{y - \Delta y}{c_y} t + m_y \\ Z_m &= d - t \\ d &= \sqrt{\text{dis}^2 - m_x^2 - m_y^2} \end{aligned} \quad (6)$$

이다. 카메라의 중심위치를 (X_0, Y_0, Z_0) 라 하면

이 중심과 표적물입자의 중심을 지나는 직선 식은 $P(X, Y, Z) = P(\alpha_1 t + X_0, \alpha_2 t + Y_0, \alpha_3 t + Z_0)$ 로 표시되며 2 대의 카메라로 구성되는 다음의 식 (7)로 표현되는 2개의 직선 방정식의 교점이 최종적으로 구해지는 표적물의 공간좌표이다.

$$\begin{aligned} A(X, Y, Z) &= A(\alpha_{11}t + b_{11}, \alpha_{12}t + b_{12}, \alpha_{13}t + b_{13}) \\ B(X, Y, Z) &= B(\alpha_{21}s + b_{21}, \alpha_{22}s + b_{22}, \alpha_{23}s + b_{23}) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, t와 s는 최소자승법⁽⁶⁾에 의하여 구해지며 최종적으로 정의되는 추적입자(표적물)의 공간좌표는 두 직선의 교점이 되는데 식 (8)로 표현된 교점의 중간점으로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (8)$$

각 표적물에 대해 위와 같은 과정을 거치면 대응하는 카메라간의 동일 표적물에 대한 공간좌표가 구해진다. 표적물의 공간좌표가 구해지면 시간 연속적으로 단위 시간당 표적물의 이동속도를 계산함으로써 가속도가 얻어지게 되고 가속도가 얻어지면 힘이 구해지게 된다.

3. 부유식 구조물 모델 운동 계속 실험

전술한 실험수조내의 상자형 부유식 구조물을 교란시킨 뒤 구조물에 칼라로 표시된 부분 4곳을 추적의 표적으로 삼아 얻어낸 계속결과를 Fig. 6에 나타내고 있는데 표적물들이 2.2초 동안 구조물의 운동에 따라 추적한 결과를 재현한 것이다. 왼쪽 상부 쪽이 표적물 1(Red), 반 시계방향으로 표적물 2(White), 표적물 3(Blue), 표적물 4(Green)가 된다. Fig. 7은 표적물 3의 운동을 확대하여 3차원적으로 재현한 것을 나타내고 있다. 표적물 3은 선회운동을 하고 있음을 알 수 있다. 이렇게 얻어진 궤적에 대하여 속도와 함께 가속도를 구하게 되면 힘을 구할 수 있게 된다. 힘은 구조물의 중량이 0.175Kg이므로 질량은 쉽게 구해지며 가속도만 계산되면 힘을 얻을 수 있게 된다. 가속도는 3차원 PTV법에 의거하여 구한 속도가 두 시각 사이에 변한 크기로부터 구해진다.

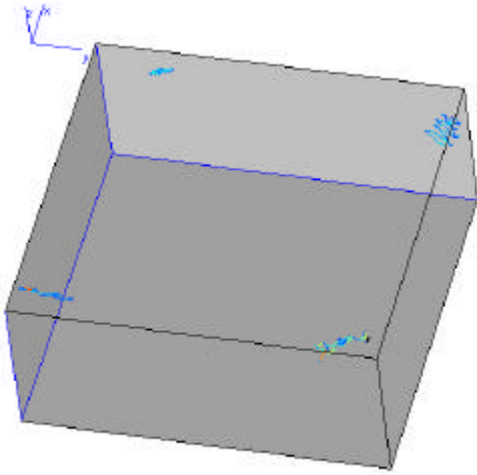


Fig. 6 Motions of four targets.

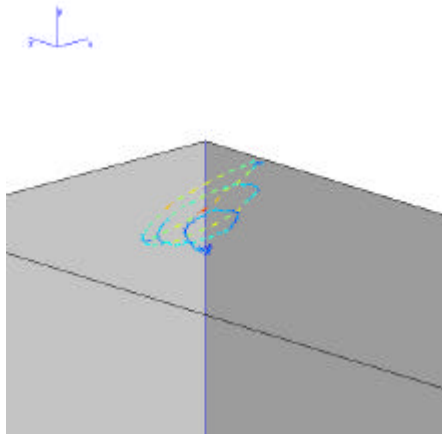


Fig. 7 Motions of the target 3(Blue Target).

즉, 힘은 다음 식 (1)로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F &= W/g \times a \text{ [Kgf]} \\
 a &= \Delta V / \Delta t \text{ [m}^2\text{/sec]}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

이 때, W는 구조물 중량, g는 중력가속도, a는 가속도, ΔV는 3D-PTV에 의하여 구해지는 속도이며 Δt는 카메라의 시간간격이다.

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11은 시간의 변화에 따른 표적물 1, 2, 3 및 4에서의 힘 Fx, Fy, Fz성분으로 나누어 표시한 것이다. 시간에 따라서 각 표적물에서의 3성분의 힘이 서로 다를 수 있다.

전반적으로 Fz의 성분이 Fx와 Fy의 성분보다

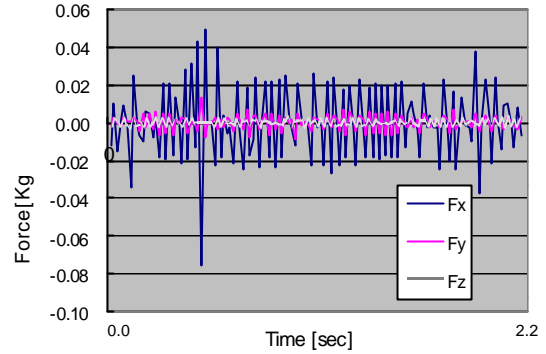


Fig. 8 Forces working at RED point target.

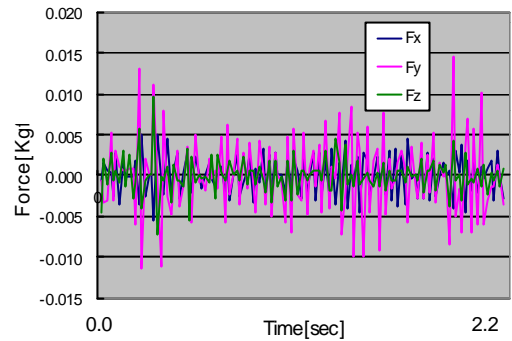


Fig. 9 Forces working at WHITE point target.

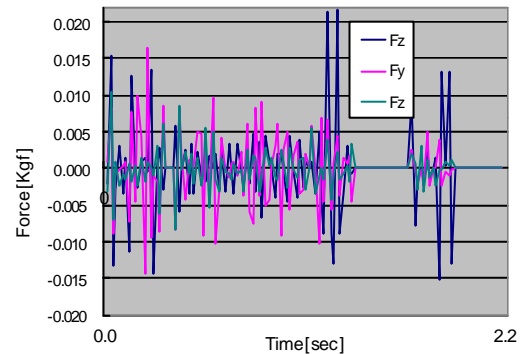


Fig. 10 Forces working at BLUE point target.

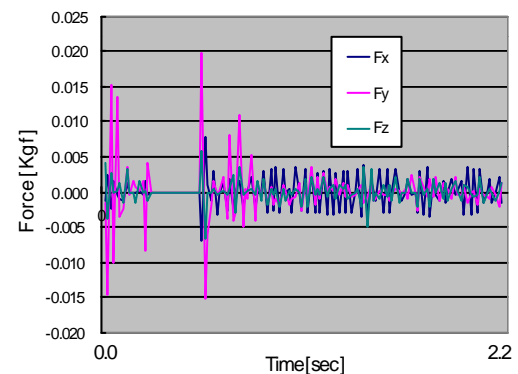


Fig. 11 Forces working at GREEN point target.

적게 나타나 보임을 알 수 있다. 또한, 모든 그 래프가 상하진동을 보이는 것은 구조물과 물의 상호작용에 의하여 구조물이 좌우전후로 요동하고 있기 때문이다. 도중에 데이터가 끊어져 사라 지게 되는 곳이 있는데 이는 표적물들끼리 서로 가려서 인식이 되지 않은 것에 기인한다.

Fig. 8에서는 시간의 변화에 따라 표적물 1의 F_z 성분이 거의 변화가 없음이 나타나 보인다. F_x 의 성분이 다른 성분에 비하여 크게 나타나고 있음은 그림에서 y 축을 기준으로 피칭(pitching)작용이 지배적임을 의미한다.

Fig. 9에서 F_y 의 성분이 다른 성분에 비하여 크게 나타나고 있는데 이는 x 축을 기준으로 롤링(rolling)작용이 지배적임을 의미한다.

Fig. 10에서는 힘의 세 성분이 모두 비교적 크게 나타나 보이고 있는데 이는 비교적 과격한 롤링, 피칭운동이 복합적으로 발생하고 있음을 의미한다.

Fig. 11에서는 초기 약 0.8초 정도까지는 F_y 성 분이 크게 나타나지만 그 이후가 되면 갑자기 모든 성분이 작게 나타난다. 이는 과도적 운동을 하다가 감쇄적 운동을 하고 있음을 의미한다.

4. 결 론

2대의 칼라카메라의 영상을 이용하여 3차원 인식기술을 구현함으로써 부유식 구조물의 운동을 정량적으로 측정할 수 있는 계측기법을 구축하였으며 그 과정에서 다음과 같이 정리하였다.

본 계측법은 완전 비접촉 계측이므로 측정 대상물에 계측으로 인한 영향을 미치지 않으며 여러 점의 표적물을 동시에 계측할 수 있으므로 부 유식 구조물의 非常 운동을 정도 높게 측정할 수 있다.

절대좌표계에 있어서 X방향의 평균오차 및 표준편차는 0.20mm 및 0.30mm, Y방향의 평균오차 및 표준편차는 0.20mm 및 0.25mm, Z방향의 평균오차 및 표준편차는 0.35mm 및 0.75mm 이었다. 이는 측정영역의 크기가 약 100mm정도 인 것을 고려해 봤을 때, 길이대비 0.5%정도의 오차 임을 알 수가 있으며 힘 대비 최대 5%이내 임이 확인되었다.

카메라로부터 입력된 영상정보가 컴퓨터의 RAM상에서 인식이 가능하도록 하였으며, 표적

물영상의 칼라정보를 이용하여 공간좌표계산이 실시간 수준으로 가능케 함으로써 On-Line측정이 가능하게 하였다.

본 연구에서 구축한 계측법은 물체의 非常 운동뿐만 아니라 탄성구조물의 모드형상의 계측 등 다양한 목적에 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- (1) 日本造船研究協會, "海洋構造物の設計外力および復原性に関する研究", 研究資料 No. 373, 1984.
- (2) Adrian, R. J., 1991, "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp. 261-304.
- (3) 도덕희, 2002, "PTV 기술의 현황과 발전," 기계저널, Vol.42, No.5, pp.36-40.
- (4) Doh, D. H., Kim, D. H., Cho, K. R., Cho, Y. B., Saga, T. and Kobayashi, T., 2002, "Development of GA based 3D-PTV Technique," Journal of Visualization, Vol.5, No.3, pp.243-254.
- (5) 東京大學出版會, "最小自乗法による實驗データ解析", 1983.