

디지털 화상처리를 이용한 부유식 구조물의 3차원운동 계측법에 관한 연구

조 효 제* · 도 덕 희**

(97년 10월 9일 접수)

A Study on Three-Dimensional Motion Tracking Technique for Floating Structures Using Digital Image Processing

Hyo-Jae Jo* · Deog-Hee Doh**

Key Words : Non-contact Multi-point Measurement(비접촉 다점측정), Digital Image Processing(디지털화상처리), Three-Dimensional Movement(3차원 운동), Floating Structure(부유식구조물), Position Identification(위치결정), Camera Calibration(카메라 교정)

Abstract

A quantitative non-contact multi-point measurement system is proposed to the measurement of three-dimensional movement of floating vessels by using digital image processing. The instantaneous three-dimensional movement of a floating structure which is floating in a small water tank is measured by this system and its three-dimensional movement is reconstructed by the measurement results. The validity of this system is verified by position identification for spatially distributed known positional values of basic landmarks set for the camera calibration. It is expected that this system is applicable to the non-contact measurement for an unsteady physical phenomenon especially for the measurement of three-dimensional movement of floating vessels in the laboratory model test.

1. 서 론

과랑중에 떠있는 부유식 구조물의 운동응답을 정확하게 추정하는 것은 구조물의 가동능력 및 안

전성 면에서 중요한 문제이다. 따라서, 부유식 구조물의 응답추정을 위하여 많은 연구자들에 의해 이론적 실험적 연구가 계속되고 있다. 요즈음 해양개발의 목적을 위하여 여러 가지 형상의 부유식

* 종신회원, 한국해양대학교 조선해양공학부

** 종신회원, 한국해양대학교 기계·냉동·자동차공학부

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 측정을 위하여 여러 가지 측정기법이 개발되어 이용되고 있으나 정확성 및 설치에 있어서 많은 어려움을 수반하고 있다. 예를 들어 선박 등의 운동응답 계측에 많이 사용되어온 기계식 6자유도 운동측정 장치의 경우에는 기계적 마찰이 운동의 감쇠력으로 작용하여 고유의 운동특성을 변화시킬 우려가 있을 뿐만 아니라 원하는 모드의 측정을 위해서는 일부 모드를 구속해야하므로 완전한 연성운동을 재현할 수 없다. 그리고, 비접촉 운동측정장치로는 광학적 센서를 이용한 원격측정방법이 있고, 이는 모형에 발광다이오드(LED)를 취부하여 직각으로 설치한 2대의 카메라로부터 운동변위를 검출하는 계측방법으로), 완전 부체 자유로 알려져 있지만 센서의 발광을 위한 코드 및 센서부착용 지지대를 설치해야 하므로 이에 의한 오차가 포함될 수 있다.

따라서 본 논문에서는 측정장치를 쉽게 설치할 수 있을 뿐만 아니라 모형에 완전 비접촉 조건을 부여함으로써, 정도 높은 운동응답 측정기법을 개발하고자 한다. 부유식 구조물의 3차원운동을 비접촉으로 계측하기 위하여 모형의 관측점에 페인트표시만 하고, 2대의 흑백 CCD카메라를 계측대상물을 향하여 설치하고 이로부터 얻어지는 화상을 디지털 처리함으로써, 관측점들의 3차원 공간이동을 추정한다. 이는 유체유동장의 최근 계측법으로 각광을 받고있는 PIV(Particle Imaging Velocimetry)를²³⁾ 확장 개선한 방법이다. PIV는 유체유동장에 추적입자를 투입하여 이들 추적입자들을 카메라로 영상화한 후 그 화상들을 이미지프로세싱에 의하여 추적입자들의 거동을 계측함으로써 유체유동장의 속도를 계측하는 방법이다⁴⁾. 하지만 이들 PIV계측법에서는 유체유동이 각 공간에서 시시각각으로 변화하는 특성이 있으므로 장시간동안 추적을 하는 알고리즘은 개발되지 않았다(현재 8시각 추적법⁵⁾이 최장시각추적). 한편 유체유동장의 속도를 3차원적으

로 계측하기 위하여 복수대의 카메라를 이용하여 3차원 계측시스템을 구축하였지만 추적시간은 2시각에 불과하였다⁶⁾⁷⁾. 하지만 부유식 구조물과 같이 구조물의 운동을 장시간 파악해야할 경우 기존의 계측알고리즘으로는 계측하기가 어렵다.

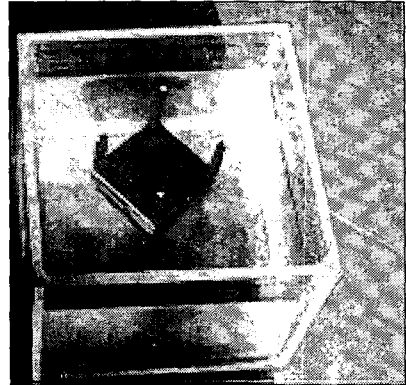


Fig. 1 Experimental model

본 연구에서는 이를 개선하여 32시각까지 추적할 수 있는 알고리즘을 개발하여 상자형 부유식 구조물의 운동을 연속으로 추적함으로써 본 계측기법의 타당성을 확인한다.

본 논문에서 개발한 기법은 물체의 비정상 이동뿐만 아니라 파랑의 비선형 형상계측, 탄성구조물의 모드형상의 계측등 다양한 목적에 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 부유식 구조물의 3차원 운동 계측

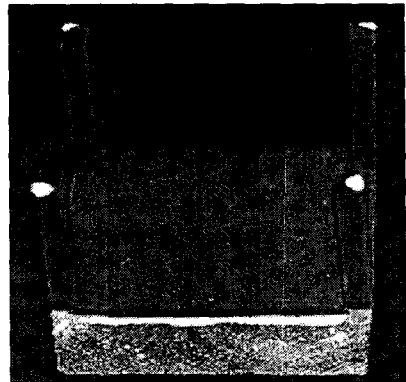


Fig. 2 Floating structure.

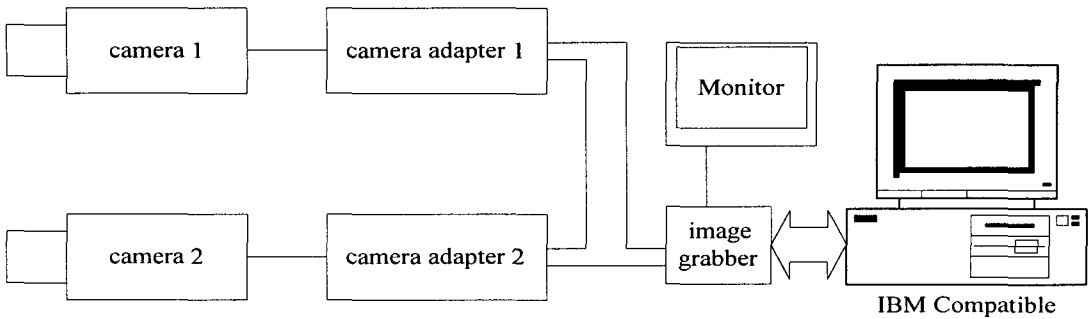


Fig. 3 Schematic apparatus for 3-D measurement

크기가 250mm x 250mm x 250mm 인 아크릴제의 수조에 Fig. 1과 같이 상온의 담수를 180mm수심으로 채운 다음 Fig. 2에 나타나 있는 목재의 상자형 부유식 구조물(85mm x 85mm x 30mm)을 수면에 띄운다. 이때, 임의 교란에 대한 모형의 실시간 3차원 운동을 계측하기 위하여 모형의 네 모서리에 부착되어 있는 높이 55mm기둥 위를 표적점으로 두었다. 이 표적은 가시화를 위하여 흰색의 형광페인트를 기둥 상부에 칠하였다

2.1 계측장치 및 방법

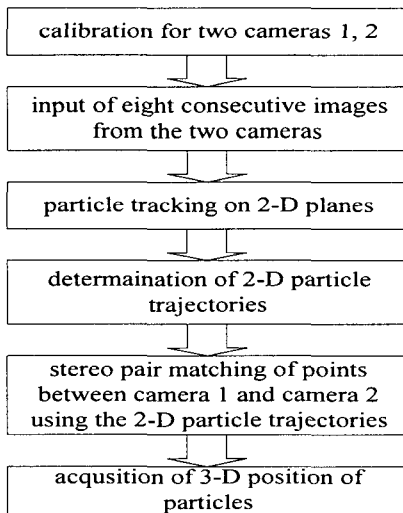


Fig. 4 Procedure of 3-D object tracking.

Fig. 3은 계측장치의 개요를 나타낸다. 부유식 구조물의 3차원운동을 비접촉계측하기 위하여 2대의

흑백 CCD카메라(Sony, SSC-M370)를 계측대상물을 향하여 설치한다. 카메라로부터 입력된 화상은 각각의 카메라어댑터(Sony, YS-W130)를 통하여 이미지그래버(Ditect, DT-64)로 입력된다. 화상처리되는 도중의 결과는 이미지그래버의 출력측에 연결되어 있는 모니터로 출력된다. 이미지그래버에 입력된 화상은 호스트컴퓨터에 의해 이진화 및 패턴인식의 과정을 거치게 된다.

Fig. 4는 계측 알고리즘의 흐름도를 나타낸다. 전술한 Fig. 2의 부유식 구조물의 3차원운동을 계측하기 위해서는 2대의 카메라에 대한 위치에 대한 교정작업이 필요하다. 즉, 지상좌표계에 대한 각각의 카메라의 3차원 위치 및 자세를 구해야 한다. 이때 교정작업에 기준이 되는 절대지상좌표계는 이미 알고 있는 36개의 3차원 기준점을 이용한다. 이 기준점들은 지상좌표계에 대하여 상대적 3차원 위치가 미리 계측이 된 점들이며 Fig. 5에 나타나 있다.

다음에 구조물상부에 설치한 표적물의 시간 연속적인 추적을 위하여 표적물의 2차원 경로를 결정한다. 이를 위하여 본 연구에서는 새로운 32시각추적법을 제안한다. 32시각법은 8시각추적법⁵⁾에 4시각추적법³⁾을 적용하여 32시각까지 추적할 수 있는 알고리즘이다. 다시 말하면 제 1시각에서부터 제 8시각까지, 제 9시각에서부터 제 16시각까지, 제 17시각에서부터 제 24시각까지, 제 25시각에서부터 제 32시각까지는 각각 8시각추적법으로 2차원 경로를 결정하고 제 8시각에서 제 11시각까지, 제 16시각에서 제 19시각까지, 제 24시각에서 제 27시각까지는 각각 4시각추적법을 적용하여 8시각에서 구한

경로들을 32시각이 되도록 연결하였다.

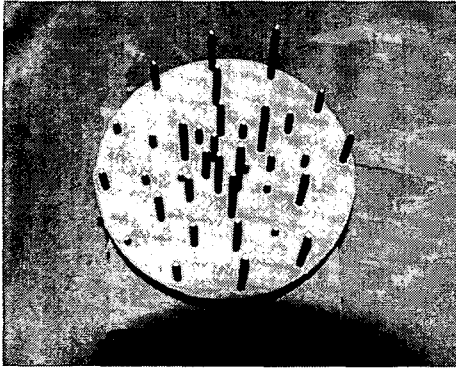


Fig. 5 Basic landmarks.

위와 같이 하여 결정된 2대의 카메라에 대한 표적물의 2차원 경로들에 대하여 전술한 사진측량법의 원리를 이용하여 동일한 2차원 경로쌍을 결정했다. 각각의 카메라에 대한 2차원 경로쌍의 사진좌표와 교정작업에서 구한 카메라 파라미터인 카메라의 3차원 위치 및 자세를 이용하여 표적물의 3차원 위치의 시간변화를 구한다.

2.2 사진측량법

Fig. 6은 절대좌표계(X, Y, Z)와 카메라좌표계(X, Y, Z) 및 사진좌표계(x, y)의 관계를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 추적입자 P는 카메라좌표계에서는 p점에 해당된다. 투영중심, 사진상 및 지상의 추적입자가 일직선상에 있다는 공선(共線) 조건으로부터 다음 식 (1)이 성립된다.

$$\begin{aligned} x &= -c \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + \Delta x \\ y &= -c \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

이때, 회전행렬 a_{ij} 는 다음 식 (2)와 같으며 ϕ, ω, θ 는 각각 X축, Y축, Z축에 관한 회전각이며, 카메라렌즈의 왜곡에 의한 수정량 $\Delta x, \Delta y$ 는 식 (3)과 같다.

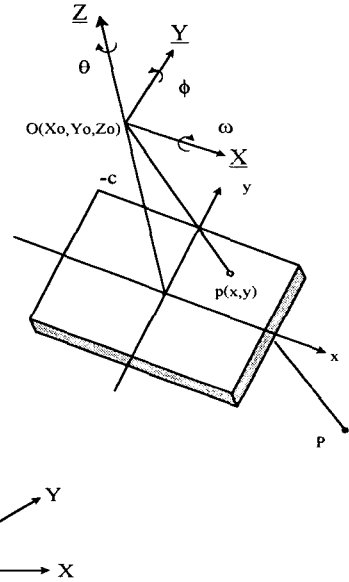


Fig. 6 Calibration of camera.

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos \phi \cos \theta \\ a_{12} &= -\cos \phi \sin \theta \\ a_{13} &= \sin \phi \\ a_{21} &= \cos \omega \sin \theta + \cos \omega \sin \phi \cos \theta \\ a_{22} &= \cos \omega \cos \theta - \sin \omega \sin \phi \sin \theta \\ a_{23} &= -\sin \omega \cos \phi \\ a_{31} &= \sin \omega \sin \theta - \cos \omega \sin \phi \cos \theta \\ a_{32} &= \sin \omega \cos \theta + \cos \omega \sin \phi \sin \theta \\ a_{33} &= \cos \omega \cos \phi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta x = x_0 + \bar{x}(k_1 r^2 + k_2 r^4),$$

$$\Delta y = y_0 + \bar{y}(k_1 r^2 + k_2 r^4)$$

$$\begin{aligned} r^2 &= (x^2 + y^2)/c^2 \\ \bar{x} &= x - x_0, \quad \bar{y} = y - y_0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, (X, Y, Z)는 대상물 P의 절대좌표, (X_0, Y_0, Z_0) 는 투영중심의 절대좌표, c는 화면거리, r^2 은 카메라렌즈의 방사방향 왜곡량, (x, y)는 대응하는 사진상의 사진좌표이며 (x_0, y_0) 는 주점 위치의 이동량을 나타낸다.

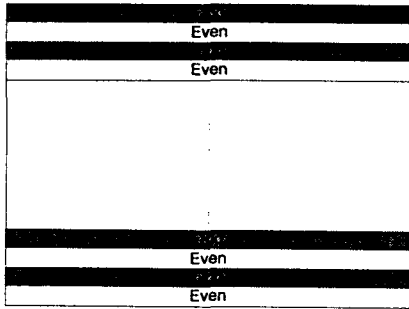


Fig. 7 Frame image.

2.3 카메라의 교정

표적물의 3차원위치 $P(X, Y, Z)$ 를 계산하기 위하여 카메라의 3차원위치 및 자세를 전술한 사진측량법에 의해 구해야 한다. 알고 있는 기준점의 3차원의 절대좌표와 이에 대한 사진좌표를 이용하여 식 (1), (2), (3)에 대한 최소자승법과 접목한 측차근사해법⁸⁾으로부터 카메라의 외부파라미터 ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \phi, \theta$)와 내부파라미터 (c, x_0, y_0, k_1, k_2)를 구했다. 카메라의 교정을 위한 데이터는 전술한 이미 알고 있는 36개의 기준점을 이용한다. 이들 36개의 기준점들은 측정영역내(130mm x 130mm x 130mm) 지상좌표계에서 3차원적으로 배치되어 있으며 이들의 기준점을 표적물로 삼아 카메라의 교정작업을 했다.

2.4 표적물의 3차원 궤적 추정

2대의 카메라에 대한 교정작업이 끝나면 표적물의 시간 연속적인 추적을 위하여 16장의 프레임화상(frame image)이 카메라를 통해 컴퓨터내장의 이미지그래버로 입력시킨다. 일반적으로 하나의 프레임화상은 Fig. 7과 같이 기수필드화상(odd field image)과 우수필드화상(even field image)이 각각 1/60sec 간격으로 합하여 이루어진 화상이므로 프레임화상은 1/30sec의 시간간격을 가지고 있다. 입력된 16장의 프레임화상은 기수필드화상 16장과 우수필드화상 16장으로 분리시킨다. 분리가 끝나면 기수필드화상에서는 우수필드화상이 없으며 반대로 우수필드화상에서는 기수필드화상이 없으므로

하나의 완전한 필드화상을 만들기 위하여 사라진 부분을 상하의 필드의 화상농도분포를 평균한 값으로 대체시켰다.

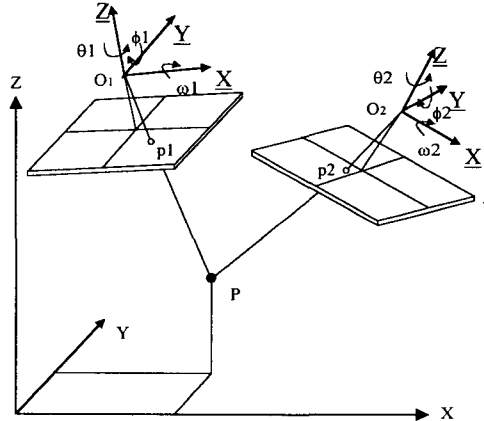


Fig. 8 Principle of 3-D photogrammetry.

부유식 구조물의 이동에 대한 추적은 4개의 표적물의 중점 이동으로부터 구해진다. 표적물의 중점은 어떤 기준농도치(threshold value)로부터 화상의 농도를 이진화한 뒤, 그 형상에 대한 면심을 계산하므로써 구해진다. 이때 조명으로 인해 수면의 난반사가 일어나지 않도록 전체적으로 조명을 어둡게 하고 표적물이 잘 보이도록 표적물 상부에 형광페인트를 발랐다. 동일 표적물을 화상에서 추적하기 위하여 8시각추적법⁵⁾을 도입했다. 위에서 결정된 2차원이동경로의 정보와 각 시각에서의 표적물의 면심정보를 삼각측량법의 원리를 적용하여 표적물의 3차원궤적을 추적한다.

Fig. 8은 위치와 기울기가 서로 다른 2대의 카메라로 촬영한 경우를 나타낸다. 지상좌표계의 좌표가 (X, Y, Z) 인 표적 P 를 투영중심 $O_1(X_{01}, Y_{01}, Z_{01})$, 3축의 기울기각도가 $(\omega_1, \phi_1, \theta_1)$ 인 카메라1과 투영중심 $O_2(X_{02}, Y_{02}, Z_{02})$, 3축의 기울기각도가 $(\omega_2, \phi_2, \theta_2)$ 인 카메라2로 촬영했을 때, 입력된 상은 투영중심으로부터 화면거리만큼 떨어진 평면상에 투영된 것과 같다. 전 절에서와 같이 카메라의 파라미터가 구해지면, 투영중심, 사진상, 피

사체간의 공선조건식이 결정되므로 이것을 이용하여 피사체의 3차원좌표는 다음과 같이 결정한다.

서로 다른 위치로부터 한 조의 입체사진을 촬영해서 각각 독립으로 카메라의 교정작업을 실행한다. 식 (1)을 변형하면 대응하는 한 조의 사진좌표계 (x, y) 로부터 절대좌표계 (X, Y, Z) 로의 변환은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

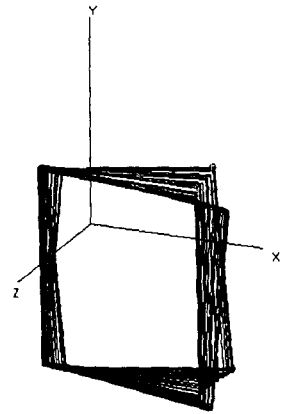
대응하는 사진좌표 $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2)$ 를 식 (4)에 의해 사진좌표계로부터 절대좌표계로 변환한 후, 관측방정식을 세워서 계산하면 구해지는 3차원의 좌표는 다음 식으로 표시된다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \left[\begin{pmatrix} X_{01} + X_{02} \\ Y_{01} + Y_{02} \\ Z_{01} + Z_{02} \end{pmatrix} + t_1 \begin{pmatrix} X_{p1} - X_{01} \\ Y_{p1} - Y_{01} \\ Z_{p1} - Z_{01} \end{pmatrix} + t_2 \begin{pmatrix} X_{p2} - X_{02} \\ Y_{p2} - Y_{02} \\ Z_{p2} - Z_{02} \end{pmatrix} \right] \quad (5)$$

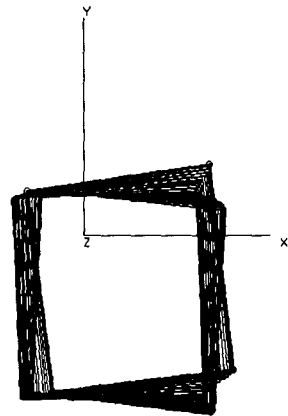
이때 $(X_{pi}, Y_{pi}, Z_{pi}) (i=1,2)$ 는 제1카메라와 제2카메라의 좌표변환후의 사진상이며, 미지변수 (t_1, t_2) 는 정규방정식으로부터 구한다.

3. 계측결과

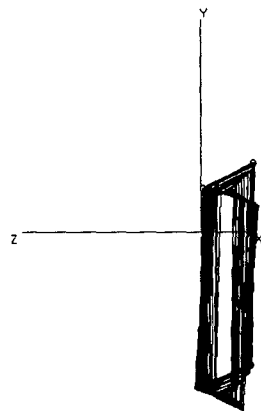
전술한 실험수조내의 상자형 부유식 구조물을 교란시킨 뒤 구조물의 가장자리 4곳을 추적의 표적으로 삼아 얻어낸 계측결과를 Fig. 9(a), (b), (c)에 나타내며, 이들은 각각 다른 위치에서 관측했을 때의 3차원운동을 보여준다. 이 그림에서 원형으로 표시된 부분이 계측의 시작점이다. 또한, 4개의 가장자리를 표적물로 삼아 지상좌표계상에서 32개의 연속필드화상을 3차원 추적한 결과를 Fig. 10, Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13에 나타낸다. 이때 측정시간은 0.517초이다. 또한, 계측시스템의 계측정도를 평가하기 위하여 3차원 절대좌표계에서 이미 알고 있는



(a)



(b)



(c)

Fig. 9 3-D measurement results for the movement of the floating object.

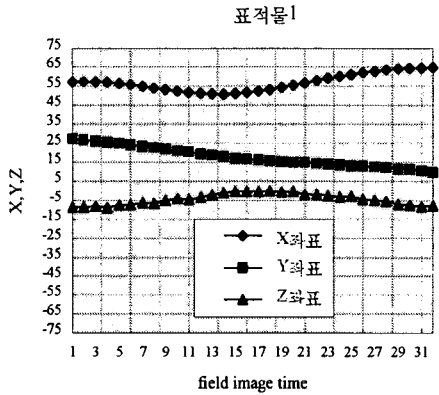


Fig. 10 3-dimensional spatial time history of the target 1.

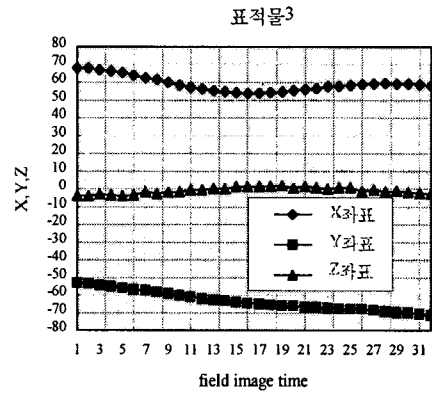


Fig. 12 3-dimensional spatial time history of the target 3.

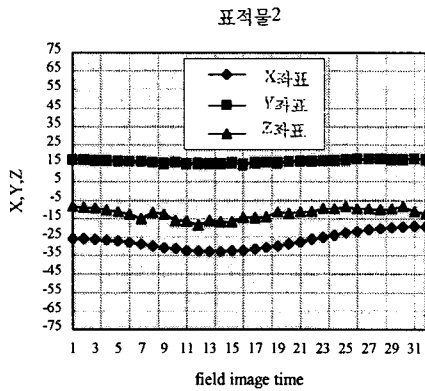


Fig. 11 3-dimensional spatial time history of the target 2.

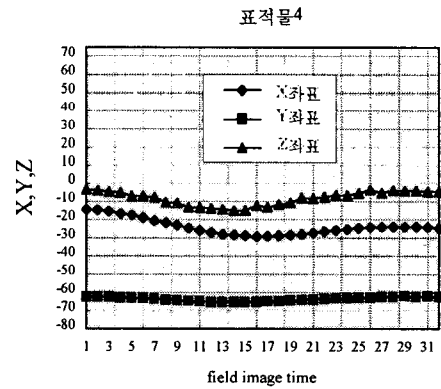


Fig. 13 3-dimensional spatial time history of the target 4.

27개의 3차원좌표를 측정하였다. Table 1은 그 결과를 나타낸다. 절대좌표계에 있어서 X방향의 평균오차 및 표준편차는 0.24mm 및 0.33mm, Y방향의 평균오차 및 표준편차는 0.19mm 및 0.25mm, Z방향의 평균오차 및 표준편차는 0.77mm 및 0.96mm 이었다. 이는 측정영역의 크기가 약 300mm정도 인 것을 고려해 봤을 때 상대적으로는 매우 작은 오차임을 알 수가 있으며 본 계측시스템의 부유식 구조물에 대한 3차원운동의 계측 결과의 정확도에 대해 타당성이 있음을 알 수가 있다.

4. 결 론

2대의 카메라와 삼각측량법으로 구성된 디지털 화상처리시스템을 구축하여 부유식 구조물의 3차원 거동을 추적할 수 있는 계측기법을 개발하였다.

본 계측법은 완전 비접촉 계측이므로 측정 대상물에 계측으로 인한 영향을 미치지 않을 뿐만 아니라 여러 점의 추적물을 동시에 계측할 수 있으므로 비정상 운동도 정도 높게 추정할 수 있다.

본 논문에서 개발한 기법은 Off-line으로 계측하는 방법이나 파랑의 비선형 형상계측, 탄성구조물의 모드형상의 계측등 다양한 목적에 이용될 수

Table 1 Measurement error. (unit: mm)

No.	Measured value(X)	Basic Marks(X)	Measured value(Y)	Basic Marks(Y)	Measured value(Z)	Basic Marks(Z)	ΔX	ΔY	ΔZ
1	-0.50	0.00	120.26	120.04	24.79	24.00	0.50	0.22	0.79
2	-60.62	-60.02	104.40	103.96	44.02	44.15	0.60	0.44	0.13
3	-0.29	0.00	79.83	80.07	31.01	30.75	0.29	0.24	0.26
4	-0.20	0.00	45.15	45.09	91.76	90.70	0.20	0.06	1.06
5	69.30	69.34	39.74	40.04	85.11	83.85	0.04	0.30	1.26
6	-69.57	-69.34	40.21	40.04	68.29	68.85	0.23	0.17	0.56
7	22.46	22.54	38.86	39.05	38.09	38.80	0.08	0.19	0.71
8	38.96	39.05	22.46	22.54	75.84	75.70	0.09	0.08	0.14
9	-38.95	-39.05	22.61	22.54	63.25	63.70	0.10	0.07	0.45
10	-10.19	-10.07	17.50	17.44	70.30	70.55	0.12	0.06	0.25
11	10.01	10.07	17.38	17.44	65.35	65.75	0.06	0.06	0.40
12	119.73	120.04	-0.73	0.00	105.87	104.15	0.31	0.73	1.72
13	-20.24	-20.13	0.04	0.00	99.31	98.85	0.11	0.04	0.46
14	45.23	45.09	-0.14	0.00	35.64	35.80	0.14	0.14	0.16
15	-9.99	-10.07	-17.34	-17.44	115.27	114.70	0.08	0.10	0.57
16	-39.17	-39.05	-22.50	-22.54	116.58	115.70	0.12	0.04	0.88
17	39.03	39.05	-22.94	-22.54	112.61	110.70	0.02	0.40	1.91
18	10.45	10.07	-17.33	-17.44	23.01	23.75	0.38	0.11	0.74
19	-69.25	-69.34	-39.76	-40.04	87.67	88.85	0.09	0.28	1.18
20	22.68	22.54	-39.19	-39.05	40.98	40.80	0.14	0.14	0.18
21	0.27	0.00	-44.97	-45.09	20.59	20.75	0.27	0.12	0.16
22	-103.71	-103.96	-59.89	-60.02	99.61	100.80	0.25	0.13	1.19
23	103.04	103.96	-60.34	-60.02	47.84	46.15	0.92	0.32	1.69
24	-39.42	-40.04	-69.06	-69.34	17.44	18.80	0.62	0.28	1.36
25	-0.04	0.00	-80.24	-80.07	86.74	85.80	0.04	0.17	0.94
26	-59.50	-60.02	-103.78	-103.96	92.54	94.00	0.52	0.18	1.46
27	59.84	60.02	-104.14	-103.96	74.27	74.10	0.18	0.18	0.17

average : 0.24 0.19 0.77
 standard deviation: 0.33 0.25 0.96

을 것으로 생각된다. 또한 본 연구에서는 기록장치가 이미지그래버의 자체 메모리가 제한인 관계로 장시간의 표적물 추적은 어려우나 VTR등의 기록장치를 이용한다면 여하한 장시간의 운동해석도 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

1) 日本造船研究協會, "海洋構造物の設計外力およ

び復原性に關する研究", 研究資料 No. 373, 1984.

2) Schon, J. P., "New techniques for flow visualization measurement of velocity and concentration", von Karman Inst. Fluid Dyn. Lecture Series, pp. 1-12, 1986.

3) Kobayashi, T., Saga, T., Segawa, S. and Kanda, K., "2次元流動場の實時間畫像計測システムの開發", 日本機械學會(B), Vol.55, No.

- 509, pp.107-115, 1989.
- 4) Adrian, R. J., "Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics", Ann. Rev. Fluid Mech., Vol. 23, pp. 261-304, 1991.
 - 5) Doh, D. H., "A study on three-dimensional particle imaging thermometry and velocimetry using liquid crystal", Ph.D. Thesis, The Univ. of Tokyo, 1995.
 - 6) Kasagi, N. and Nishino, K., "Probing turbulence with three dimensional particle tracking velocimetry", Exp. Thermal and Fluid Sci., Vol. 4, pp.601-612, 1991.
 - 7) Kato, H., Nishino, K., and Torii, K., "Application of a 3-D PTV to the measurement of turbulent air flows", Flow Visualization VI, pp.797-801, 1992.
 - 8) 東京大學出版會, "最小自乘法による實驗データ解析", 1983.