역설계를 위한 3차원 모델형상 측정

도덕희[†] · 조경래^{*} · 조용범^{**}

Measurements of 3D Model Shapes for Reverse Designs

Deog Hee Doh, Kyeong Rae Cho and Yong Beom Cho

Abstract. Reverse Design(RD) plays an important role in simulation engineering, such as CFD (Computational Fluid Dynamics) and Virtual Engineering and Design. RD becomes much more valuable when there is no shape data of the practical models for CFD grid generations. In this study, two-camera based rapid prototyping(RP) system is proposed. 3D-PTV based measurement algorithm was adopted. The developed system was applied to reconstruct three-dimensional data of a human face, a motorcycle model, a cylindrical body and a triangular pyramid.

Key Words: Reverse Designs(역설계), 3D-Shape Measurement(3차원 형상측정), CFD(전산유체역학), Rapid Prototyping(쾌속조형기술)

1. 서 론

전산유체역학(CFD)의 급속한 발전에 따라 유체기기 등에 대한 성능평가 및 개발기술이 빠른 속도로 발전되고 있다. 전산유체역학(CFD)에 의한 산업분야에의 응용이 증가할수록 적용되는 대상의 형상데이터의 확보는 수치모사에 있어서 필수요인으로 대두될 것으로 예상되고 있다. 산업기기들의 형상데이터는 업체의 기밀사항으로 간주되는 바 이들 데이터 확보는 용이하지 않다. 이는 수치모사분야에 종사하는 연구자들에게는 모델데이터의 확보 어려움으로 인한 연구개발의 의욕 혹은 동기부여의 결여로 이어질 수 있다.

본 연구는 산업의 다양한 분야에 적용되고 있는 열유체기기들의 복잡한 형상을 용이하게 확보할 수 있는 3차원 형상측정시스템의 구현함으로써 CFD분야의 발전에 기여하고자 함에 있다. 한편, 산업분야에 적용되고 있는 열유체기기들의 모델에 대한 형상측정은 1대 카메라와 1대 레이저스캐너(laser scanner)에 의한 것⁽¹⁾과 1대 카메라와 1대 레이저레인지센서(laser range

sensor)의한 것이 있는데, 이들은 형상측정시스템이 제한된 장소에서 사용되어야 한다는 점과 장시간의 측정시간을 요한다는 제약을 가지고 있다. 본 연구는 이들 문제점을 극복하기 위한 2대의 카메라를 이용한 형상측정시스템의 구현에 연구의 목적을 두고자 하였으며 도 등⁽²⁾이 구축한 3차원 형상측정 성과물을 기반으로 보다 정량적으로 검증한 내용을 바탕으로 작성하였다. 본 연구에서 구축된 3차원 형상측정시스템은 수술기계의 형상, 건물의 형상 및 유체기기의 형상에 대한 3차원 데이터 확보에 응용될 수 있다.

2. 3차원 모델 형상측정 시스템

2.1 측정 원리

기본적 측정원리로서 스테레오 3차원 측정법에 기반하고 있다. 3차원 측정을 위해서는 카메라에 대한 캘리브레이션 과정(calibration work)이 필요한데 본 연구에서는 Doh 등⁽³⁾의 10개 파라미터법을 적용하였다. 이 과정에서 2대 카메라 좌표계의 지상좌표계에 대한 상대적 위치 및 카메라의 내부요소(굴절율, 렌즈중심위치)가 구해진다. 카메라캘리브레이션 작업이 완료되면 3차원 매칭법⁽⁴⁾에 따라 측정하고자 하는 물체형상의 목표점의 3차원 위치를 구한다. 측정정도가 높은 3차

[†]한국해양대 기계에너지시스템공학부
E-mail : doh@hhu.ac.kr

^{**}(주)LG전자 냉장고사업부

원 영상데이터를 얻기 위하여 물체형상의 특징점 영상에 대한 노이즈제거, 특징점 추출과정을 반복계산을 실시하였다.

2.2 카메라 캘리브레이션 원리

전술한 바와 같이 3차원 측정을 위해서는 카메라 2대에 대한 캘리브레이션이 필요한데, 본 연구에서는 10개 파라미터 교정법⁽³⁾을 사용하였다. 이 과정에서 절대좌표계에 대한 카메라의 상대적 위치정보, 카메라 기울기, 카메라 렌즈 및 CCD 셀 중심위치가 구해진다. Fig. 1은 카메라좌표계와 절대좌표계(physical coordinate)와의 상관관계를 나타낸다. 절대좌표계에 대한 카메라좌표계의 기울기 각도(α, β, κ)를 회전시켜 일직선상으로 두면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 축에 대한 회전행렬은 $M_M = M_2 M_1 M_X$ 가 되고 회전된 절대좌표값은 (X_m, Y_m, Z_m) 로 표시된다. 카메라의 z축과 절대좌표계의 Z축을 일치시키기 위한 이동량을 (m_x, m_y) 로 하였을 때, 절대좌표계상의 특징점(측정점)과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선 조건식은 다음의 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{\text{dis}^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta x \\ y &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{\text{dis}^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 dis는 절대좌표계 O(0, 0, 0)점으로부터 카메라 중심까지의 거리, (c_x, c_y) 는 이미지 그래버에 따른 장방비를 고려한 렌즈 초점거리이며, $(\Delta x, \Delta y)$ 은 다음의 식 (2)로 표시되는 렌즈의 굴절량을 나타낸다.

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

Fig. 1. Photographic coordinate and physical coordinate.

식 (1)은 카메라의 파라미터를 구하기 위해 이미 알고 있는 3차원 기준점 좌표(X_i, Y_i, Z_i)와 사진좌표(X_i, Y_i)에 대한 관측방정식으로 다음의 식 F, G로 나타낼 수 있다. 여기서 k_1 과 k_2 는 렌즈의 왜곡보정계수를 의미한다.

$$\begin{aligned} F &= c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{\text{dis}^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (x - \Delta x) = 0 \\ G &= c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{\text{dis}^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (y - \Delta y) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

이 식을 풀기 위하여 10개의 파라미터에 대한 초기값을 가정하고 Taylor급수에 의한 최소자승법으로 보정량을 구하여 10개의 파라미터가 수렴될 때까지 근사치를 보정하여 반복 계산함으로써 최종 파라미터를 구하였다. 카메라의 파라미터가 구해지면 사진좌표(x, y)와 절대좌표(X, Y, Z)간에 식 (3)으로부터 다음과 같은 관계식 (4)가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서, M_M 은 회전변환행렬이며 B는 이의 역행렬이다. 이때의 X_m, Y_m, Z_m 은 다음 식 (5)로 표시된다.

$$\begin{aligned} X_m &= (x - \Delta x)t / c_x + m_x \\ Y_m &= (y - \Delta y)t / c_y + m_y \\ Z_m &= d - t \\ d &= \sqrt{\text{dis}^2 - m_x^2 - m_y^2} \end{aligned} \quad (5)$$

카메라의 중심위치를 (X_0, Y_0, Z_0) 로 하면 이 점과 측정점의 중심을 지나는 직선 식은 $P(X, Y, Z) = P(a_1 t + X_0, a_2 t + Y_0, a_3 t + Z_0)$ 로 표시되며 2대의 카메라로 구성되는 다음의 식 (6)으로 표현되는 2개의 직선 방정식의 교점이 최종적으로 구해지는 표적물의 3차원 좌표이다.

$$\begin{aligned} A(X, Y, Z) &= A(a_{11}t + b_{11}, a_{12}t + b_{12}, a_{13}t + b_{13}) \\ B(X, Y, Z) &= B(a_{21}s + b_{21}, a_{22}s + b_{22}, a_{23}s + b_{13}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, t와 s는 최소자승법에 의하여 구해지며 최종적으로 정의되는 측정점의 공간좌표는 두 직선의 교점이 되는데 식 (7)로 표현된 교점의 중간점으로 정의하였다.

Fig. 2. Calibrator.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\} \quad (7)$$

2.3 카메라 캘리브레이션 및 측정 오차

카메라 파라미터를 구하기 위해 Fig. 2와 같은 교정기(calibrator)를 사용하였다. 가로, 세로 각각 280 mm 이고, 20 mm간격으로 격자형상이 오차한도 ± 0.01 mm 내에서 분포되어 있다. 이 교정기를 카메라의 시선의 전후방향으로 20 mm(-120, -100, -80, -60, -40, -20, 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 mm) 간격으로 13회 이동하여 얻어진 3차원적 영상정보로부터 Doh 등⁽³⁾이 사용한 10개의 표점요소를 가지는 관측방정식을 이용하여 카메라 파라미터를 구하였다. Fig. 3은 교정기(캘리브레이터, calibrator)의 카메라 영상을 나타낸다. 이 영상으로부터 전술의 카메라교정 이론에 의거하여 측정 한 결과를 Table 1에 나타내었다. 카메라 캘리브레이션 과정에서

Fig. 3. Captured camera image for the calibrator.

Table 1. Measurement errors

Z plane (mm)	Average error			Standard deviation		
	X	Y	Z	X	Y	Z
-120	0.02	0.03	0.28	0.03	0.04	0.30
-100	0.02	0.02	0.35	0.03	0.07	0.23
-80	0.02	0.02	0.20	0.03	0.06	0.22
-60	0.02	0.03	0.38	0.03	0.05	0.24
-40	0.02	0.05	0.28	0.03	0.03	0.23
-20	0.02	0.04	0.24	0.03	0.04	0.25
0	0.02	0.05	0.34	0.03	0.04	0.27
20	0.02	0.05	0.35	0.03	0.06	0.40
40	0.03	0.09	0.34	0.03	0.04	0.33
60	0.02	0.03	0.38	0.03	0.05	0.22
80	0.02	0.02	0.24	0.03	0.04	0.23
100	0.02	0.03	0.36	0.03	0.05	0.24
120	0.03	0.04	0.13	0.03	0.04	0.24
Total Average	0.02	0.04	0.31	0.03	0.05	0.26

얻어진 측정오차에서의 표준편차는 최소 0.03 mm 최대 0.26 mm였다. 측정오차는 Fig. 3에 나타나 있는 교정기의 196개의 표적점에 대한 2대 카메라 영상을 이용하여 3차원 위치계산을 한 결과와 실제 물리좌표계 상에서의 3차원 위치와의 비교를 의미한다. 측정오차의 불확도 해석법⁽⁵⁾을 적용하면 측정신뢰도 95%에서 상대오차는 측정영역 크기대비 5% 정도가 됨이 확인되었다.

3. 모델 형상측정 결과

Fig. 4는 원통형 모델에 대한 형상측정결과를 나타낸다. original은 실제 원통형 모델의 데이터를 나타내며, measured는 구축된 모델형상 측정시스템으로 측정 한 결과를 [mm]단위로 나타내었다. 결과에서 알 수 있듯이 모서리 부분을 제외하고는 거의 오차 없이 형상이 원래대로 복원됨을 알 수 있다. 모서리부분은 주위 배경과의 특징적인 차이가 없기 때문에 인식율이 저하되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 삼각뿔 모델에 대한 형상측정결과를 나타낸다. 삼각뿔 맨 윗부분을 고의로 손상시켜 구축한 측정시스템이 제대로 인식할 수 있는 지를 확인하였다. 결과에서 알 수 있듯이 맨 위의 손상된 꼭지점을 그대로 인식하고 있음을 알 수 있다. 또한, 원통형에 대한 측정사례와는 달리 주위 배경과 맞닿는 가장자리 부분에 있어서는 오차 없이 형상을 원래대로 복원하고 있

Fig. 4. Cylindrical body measurements.

Fig. 5. Triangle pyramid measurements.

Fig. 6. Measured results on human face.

Fig. 7. Measured profile on the center line of the human face.

음을 알 수 있다.

Fig. 6(a), (b)는 각각 두 대 카메라를 이용하여 사람의 얼굴(공저자 조용범씨)을 촬영한 원래 영상을 나타낸다. Fig. 6(c)은 이들 두 영상을 이용하여 3차원 측정된 결과를 3차원으로 복원한 것을 나타낸다. Fig. 7은 동일한 인물에 대하여 코의 중심선을 통과하는 측정데이터 결과를 나타낸다. 레이저스캐너⁽⁶⁾ 측정장비로 실제 측정한 데이터와 본 연구에서 구축한 2대 카메라 측정시스템으로 측정한 데이터와의 비교한 결과를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 측정오차는 최소 1.3 mm에서 최대 4 mm 전후인 것으로 나타났다.

Fig. 8(a), (b)는 각각 두 대 카메라를 이용하여 CFD

Fig. 8. Measured results on motorcycle.

계산에 자주 쓰이는 오토바이 모델을 촬영한 원래 영상을 나타낸다. Fig. 8(c)는 측정결과를 측면에서 봤을 때를 기준으로 하여 158°에서 관찰하였을 때의 3차원 데이터를 재구성한 결과를 나타낸다. 본 결과로부터 복잡한 형상에 대해서도 측정데이터가 잘 복원되고 있음을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

2대 카메라와 3차원 PTV측정기술 기반의 모델형상 측정시스템을 구축하여 원통형과 삼각뿔의 표준모델 형상측정을 한 결과, 매우 높은 정도의 측정결과를 얻었는데, 그 과정에서 다음과 같이 요약할 수 있었다.

구축된 측정시스템의 오차는 교정기측정을 기준으로 본다면, 전체 측정범위 280 mm 체적 범위에서 X, Y, Z 방향으로 평균오차가 각각 0.02 mm, 0.04 mm, 0.31 mm로 나타났으며 편차는 각각 0.03 mm, 0.05 mm, 0.26 mm로 나타났다. 카메라 시선각이 작은 관계로 Z방향의 오차가 커지게 됨이 확인되었다.

사람의 얼굴측정에 있어서도 복잡한 형상 복원이 가능할 뿐만 아니라, CFD계산에 자주 등장하는 오토바이 모델에 대한 측정한 결과, 복잡한 형상에 대해서도 모델측정 데이터를 구현할 수 있음을 확인하였고, 이로부터 역설계에 필요한 RP(rapid prototyping)가 가능

함이 확인되었다.

본 연구에서 구축된 측정알고리즘이 기존의 스테레오PIV측정법보다 높은 정도의 3차원 복구가 가능하게 된 점은 물체의 영상상에서 특이점을 추출하는 방식으로 측정의 해상도를 향상시켰기 때문이다.

한편, 얻어진 데이터를 필요로 하는 사용자는 자신이 계산하고자 하는 좌표계에 좌표변환만 수행하면 다양한 수치모사에 활용할 수 있게 될 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 한국연구재단 도약과제(2008-0060153)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Hennessy, R. J., Kinsella, A., Waddington, J. L., 2002, 3D laser surface scanning and geometric morphometric analysis of craniofacial shape as an index of cerebro-craniofacial morphogenesis: initial application to sexual dimorphism, Biological psychiatry, Vol. 51(6), pp.507-514.
- 2) 도덕희, 조경래, 편용범, 조용범, CFD를 위한 실물 모델 형상 측정 및 데이터 구현, 대한기계학회추계학술대회, 무주리조트, 2006. 11.1-3, pp.2076-2081.
- 3) Doh, D. H., Kim, D. H., Cho, K. R., Cho, Y. B., Saga, T., Kobayashi, T., 2002, Development of Genetic Algorithm based 3D-PTV Technique, Journal of Visualization, Vol. 5(3), pp.243-254.
- 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(3), pp 243-254.
- 5) 도덕희, 황태규 (2004). "표준화상을 이용한 2차원 PIV와 3차원 PIV 성능시험", 대한기계학회지, 제28권, 제11호, pp 1315-1321.
- 6) Zhao, H., Shibasaki, R., 2003, Reconstructing a textured CAD model of an urban environment using vehicle-borne laser range scanners and line cameras, Machine Vision and Applications, Vol. 14(1), pp.35-41.