

# 스테레오 카메라와 2축 회전기구를 이용한 대형 이동물체의 치수측정

## Dimension Measurement for Large-scale Moving Objects Using Stereo Camera with 2-DOF Mechanism

옹후쿠옹<sup>1</sup>, 이병룡<sup>1,✉</sup>  
Nguyen Huu Cuong<sup>1</sup> and Byung Ryong Lee<sup>1,✉</sup>

<sup>1</sup> 울산대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, University of Ulsan)  
✉ Corresponding author: brlee@ulsan.ac.kr, Tel: +82-52-259-2861

Manuscript received: 2015.1.21. / Revised: 2015.4.28. / Accepted: 2015.5.20.

*In this study, a novel method for dimension measurement of large-scale moving objects using stereo camera with 2-degree of freedom (2-DOF) mechanism is presented. The proposed method utilizes both the advantages of stereo vision technique and the enlarged visibility range of camera due to 2-DOF rotary mechanism in measuring large-scale moving objects. The measurement system employs a stereo camera combined with a 2-DOF rotary mechanism that allows capturing separate corners of the measured object. The measuring algorithm consists of two main stages. First, three-dimensional (3-D) positions of the corners of the measured object are determined based on stereo vision algorithms. Then, using the rotary angles of the 2-DOF mechanism the dimensions of the measured object are calculated via coordinate transformation. The proposed system can measure the dimensions of moving objects with relatively slow and steady speed. We showed that the proposed system guarantees high measuring accuracy with some experiments.*

KEYWORDS: Stereo vision (스테레오 비전), Moving object (이동물체), Dimension measurement (치수측정), Stereo calibration (스테레오 교정), Rotary mechanism (회전기구)

### 1. 서론

생산현장에서 물체의 형상이나 치수를 측정하는 방법은 매우 다양하고 많이 적용되고 있는 것이 사실이다. 하지만, 이러한 측정방법의 적용은 주로 중소형 물체에 국한되어 있다는 점이다. 지금까지도 대형 공작물이나 대형물체의 형상이나 치수를 직접적으로 측정하는 방법은 많이 연구되

고 있지 않은 실정이다. 이러한 부분의 몇몇 연구들을 소개하면 다음과 같다.

He 등은 1축 선형이동기구와 3개의 관절형 기구를 갖는 펜스 레이저 측정시스템을 사용하여 회전하고 있는 대형 원통형 강체의 치수를 측정하였다.<sup>1</sup>

그들이 고안한 측정시스템은 회전하는 원통 강체의 축에 수직한 방향으로 스캔을 하도록 되어 있다. 따라서, 레이저 스캐너 방식의 측정에서 야

기되는 측정속도 저하문제로 대형물체를 측정하는 분야에 적용하는 데에는 한계성을 가지고 있다.

Liu 등은 원통형태의 열간단조 부품의 치수를 측정하기 위해 스테레오 비전 시스템을 적용하였다.<sup>2</sup> 이 시스템은 레이저 프로젝트와 2개의 디지털 카메라를 사용하여 구현하였다. 하지만, 대부분의 컴퓨터 비전 기반의 측정시스템의 문제점으로 대두되는 카메라의 영역깊이(depth of field) 제한으로 대형물체의 측정에는 제한이 따른다.

Park 등은 컴퓨터 비전 기반의 측정방법을 사용하여 고층건물을 여러 개로 분할하여 각각의 거리와 각도를 구하는 방식을 사용하였다.<sup>3</sup> 하지만 이 방법에서는 분할된 부분을 측정하기 위하여 분할된 개수만큼의 스테레오 비전을 사용하였기 때문에 시스템이 복잡하고 가격적인 면도 문제가 된다. 또한 특정한 물체의 계측에 적용하도록 설계되었기 때문에 유연성(flexibility)이 떨어진다고 볼 수 있다.

대형 구조물을 측정하기 위한 연구 외에 움직이는 물체의 3차원 계측에 대한 연구도 여러 편 보고되고 있다.<sup>4-6</sup> Hu 등은 움직이는 물체의 3차원 표면을 측정하기 위하여 상 천이(phase-shifting) 기법을 적용하였다.<sup>5</sup> 이 방법은 2 스텝 상천이를 시키는 디지털 격자(grating) 방식의 빛이 물체의 표면에 주기적으로 주사된다. 물체의 표면 상에서 변형된 격자 패턴은 짧은 노출시간 동안에 CCD 카메라에 의해 획득된다. 이러한 방식은 빔 프로젝터와 CCD 카메라 간의 동기화를 필요로 한다.

Ishii 등은 한 방향으로 움직이는 물체의 3차원 형상을 측정하기 위하여 구조광(structured light)을 주사하는 방법을 사용하였다.<sup>6</sup> 이 방식은 시간에 무관한 방식의 부호화 된 영상을 물체에 주사하는 방식인데, 여러 개의 구조용 슬릿광(slit light) 패턴을 사용하였다.

프로젝터에서 주사된 영상은 물체의 표면에서 왜곡되며, 이 표면정보가 카메라에 의해서 획득되어지게 된다. 이 경우 카메라와 프로젝터는 적정한 각도를 가지게 설치되어 있다. 일반적으로 이러한 방식은 측정 정밀도가 카메라와 프로젝트의 동기화 여부에 민감하게 좌우된다. 또한 이러한 방식은 대형 물체를 측정하기 어렵다는 점이다.

본 논문에서는 스테레오 카메라와 2축 회전기구를 이용하여 저속으로 움직이는 대형물체의 치수를 측정하는 방법을 제안하였다.

이 시스템의 장점은 대형물체를 측정할 때 발

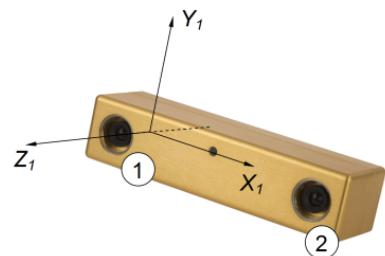


Fig. 1 Stereo camera used for dimension measurement

생되는 시계(field of view)의 한계점을 극복할 수 있고, 물체가 움직이더라도 측정시스템의 상대위치를 별도로 계산할 필요가 없는 컴퓨터비전의 특성을 이용할 수 있다는 점이다. 즉, 스테레오 비전 기술을 이용하여 2개의 카메라로부터 획득된 각각의 영상으로부터 3차원의 좌표를 계산할 수 있고, 동시에 2축 회전기구를 이용하고 좌표변환을 사용하면 대형물체의 임의의 두 특징점 사이의 거리를 효율적으로 계산할 수 있다는 점이다. 본 논문에서는 제안된 측정방법의 정확성을 입증하기 위하여 임의 형상을 가지고 일정한 속도로 움직이는 물체에 대한 치수측정 실험을 수행하였고, 실험결과를 통하여 제안된 측정방법이 이동하는 대형물체의 크기 및 치수측정에도 유효하게 적용될 수 있음을 보였다.

## 2. 사용된 스테레오 비전 관련 알고리즘

스테레오 비전은 2개 이상의 카메라로부터 얻어진 영상화면으로부터 3-D 위치정보를 계산하는데 사용된다.<sup>7</sup> 스테레오 비전을 이용하여 정확한 3-D 위치정보를 얻어내기 위해서는 일반적으로 영상교정(calibration), 영상정렬(rectification), 영상대응(correspondence) 등의 과정을 거치게 된다. 아래에 각각의 알고리즘을 간단히 소개하였다.

### 2.1 스테레오 영상 교정 (Stereo Calibration)

스테레오 카메라는 기본적으로 Fig. 1과 같이 두 개의 카메라로 구성되어 있다. 스테레오 카메라는 내부 파라미터(intrinsic parameter)와 외부 파라미터(extrinsic parameter)를 얻기 위해서 캘리브레이션(calibration) 되어야 한다. 캘리브레이션 과정은 두 카메라 사이의 기하학적인 관계를 계산하는 것을 의미한다. 이를 위하여 본 연구에서는 핀홀(pin-hole) 카메라 모델을 적용하였다.

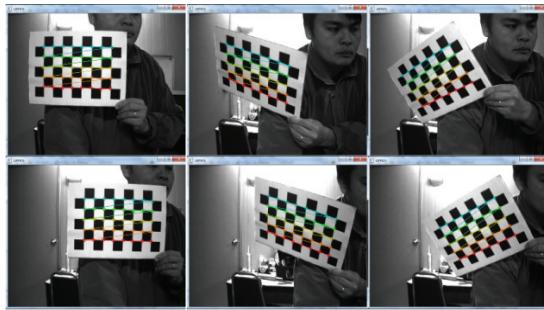


Fig. 2 Three pairs of the chessboard images were used for camera calibration

3차원 상의 위치좌표와 영상화면에 투영된 점 사이의 관계는 다음 식과 같이 주어진다.

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

위 식에서  $(X, Y, Z)$ 는 실제 3-D 공간상에서의 점을 의미하며,  $(u, v)$ 는 그 점의 영상화면상에서의 픽셀 단위의 좌표를 나타낸다.  $\mathbf{A}$ 는 카메라 행렬(camera matrix), 혹은 내부 파라미터 행렬(matrix of intrinsic parameters)라고도 불린다.  $(c_x, c_y)$ 는 영상화면의 중심을 나타내며 영상중심(principal point)이라고 한다.  $f_x$  와  $f_y$ 는 픽셀단위로 나타내는 촛점거리의 스케일 상수(scale factor)이다. 그리고 축의 회전 및 직선이동 행렬인  $[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$ 는 외부파라미터 행렬(matrix of extrinsic parameter)을 의미한다.  $s$ 는 두 영상 축인  $u$ 와  $v$ 의 스케일(skew)을 나타낸다.

카메라를 캘리브레이션 하기 위한 알고리즘은 많이 있는데, 본 연구에서는 Zhang<sup>8</sup> 이 제안한 방법을 사용하였다. 이를 위하여 가로 및 세로의 격자가 6 x 9 인 서양장기판을 사용하였다. 격자 한 개의 크기는 29 mm x 29 mm 이다. 그리고 내부 파라미터 행렬과 외부파라미터 행렬을 구하기 위해 30 쌍의 서양장기 영상을 사용하였다. 30쌍 중에서 3쌍의 영상을 Fig. 2에 나타내었다. 위의 사진은 좌측 카메라의 영상이고, 아래 사진은 우측 카메라의 영상이다.

본 연구에서 사용된 두 개의 카메라는 상대위치와 틀어진 회전각은 변하지 않고 고정된 것으로 간주하였다. 따라서, 첫 번째 카메라에 대한 두 번째 카메라의 상대위치 및 회전각을 알게 되면 된

다. 첫 번째 카메라의 좌표축이 Fig. 1과 같이 정의되고 주어진 치수를 이용하면, 내부 및 외부 파라미터 행렬은 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 8.081 \times 10^2 & 0 & 3.566 \times 10^2 \\ 0 & 8.081 \times 10^2 & 2.313 \times 10^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{A}_2 = \begin{bmatrix} 8.081 \times 10^2 & 0 & 3.539 \times 10^2 \\ 0 & 8.081 \times 10^2 & 2.313 \times 10^2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 9.999 \times 10^{-1} & -2.451 \times 10^{-3} & 1.078 \times 10^{-2} \\ 2.411 \times 10^{-3} & 9.999 \times 10^{-1} & 3.673 \times 10^{-3} \\ -1.078 \times 10^{-2} & -3.646 \times 10^{-3} & 9.999 \times 10^{-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{t} = \begin{pmatrix} 4.078 \\ 3.13 \times 10^{-2} \\ -1.139 \times 10^{-2} \end{pmatrix}$$

## 2.2 스테레오 영상 정렬 (Stereo Rectification)

스테레오 비전에서 중요한 사항 중의 하나는 영상 사이의 조밀한 정합점(dense correspondence)을 찾는 문제이다. 이렇게 조밀한 정합점을 찾는 문제를 해결하기 위한 효율적인 방법으로 제안된 것이 영상정렬(image rectification)기법이다. 이는 에피폴라 기하(epipolar geometry)를 이용하여 그 정합점이 다른 영상에서의 에피폴라 선(epipolar line) 위에 존재한다는 것을 이용하여 모든 에피폴라 선을 영상에 수평하게 맞춰주는 방법이다. 그 결과를 이용하면 스테레오 비전에서의 정합점을 찾는 대상 영역을 상대 영상에서 같은 위치의 수평선 위의 픽셀들로 한정할 수 있다. 스테레오 영상정렬 기법으로 많이 사용되는 방법은 Bouguer 알고리즘<sup>8</sup>과 Harley 알고리즘<sup>9</sup> 등이 있다. 본 논문에서는 Bouguer 알고리즘을 적용하였는데, 그 이유는 본 논문의 경우 축의 회전 및 이동 행렬인  $[\mathbf{R} | \mathbf{t}]$ 의 값을 알 수 있기 때문이다. 이 방법은 두 영상의 각각에 대한 재투영(reprojection)의 변화를 최소화 할 수 있으며, 반면에 가시영역(viewing area)을 최대화할 수 있다. 스테레오 영상정렬이 된 영상의 예를 Fig. 3에 나타내었다.

## 2.3 스테레오 영상 대응 (Stereo Correspondence)

스테레오 영상대응이란 3D 상의 특정한 점을 좌우 카메라의 영상에서의 해당되는 점과 매칭시

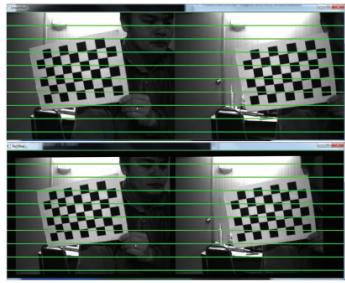


Fig. 3 Stereo rectification result: the upper pair is left and right raw images and the lower pair is left and right rectified images

키는 것을 말한다. 만약 왼쪽영상과 오른쪽 영상에서의 매칭점(matching point)이 각각  $x_l$  과  $x_r$  이라고 하면, 대응점 사이의 디스파리티(disparity)는  $d = x_l - x_r$  로 정의된다. 본 논문에서는 스테레오 영상대응점을 찾기 위하여 Hajer의 알고리즘<sup>10</sup>을 적용하였다.

#### 2.4 2-D 영상으로부터 3-D 위치의 결정

주어진 내부 파라메터 행렬을 이용하면, 2-D 영상에서의 매칭점은 카메라의 삼각법(triangulation method)에 의하여 공간상의 3-D 위치로 재투영(reprojection) 될 수 있다. 재투영 행렬  $\mathbf{Q}$  는 다음 식과 같이 나타내어진다.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/t_x & -(c_x - c'_x)/t_x \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식에서  $(c_x, c_y)$  는 영상중심(principal point)을 나타내고,  $f$  는 카메라의 촛점거리이다. 그리고,  $t_x$  는 직선이동 벡터  $\mathbf{t}$  의  $x$  성분을 의미한다.  $c'_x$ 은 우측 영상의 영상중심점을 나타낸다.  $\mathbf{Q}$  행렬에서  $c'$  를 제외한 3개의 파라메터들은 좌측영상으로부터 구해지게 된다.  $\mathbf{Q}$  행렬을 이용하여 3-D 좌표를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\mathbf{Q} \begin{bmatrix} x \\ y \\ d \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} \quad (3)$$

위 식에서 3-D 좌표는 각각  $X/W$ ,  $Y/W$ , 그리고  $Z/W$  이다.

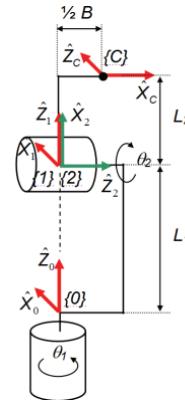


Fig. 4 Kinematic diagram of the proposed rotating system

#### 2.5 해리스 코너 검출기 (Harris Corner Detector)

영상 내부에서 특정한 물체의 코너를 검출하는 것은 물체의 치수를 측정하는데 있어서 중요한 과정이다. 일반적으로 많이 사용되는 방법은 해리스 코너 검출기인데, 많은 응용부분에 효과적으로 적용되고 있다.<sup>11,12</sup> 해리스 코너는 지역적인 신호변화를 측정할 수 있는 지역자기상관함수(local auto-correlation)에 바탕을 두고 있다.

#### 3. 2축 회전기구의 해석

본 논문에서 고안된 2축회전기구(two-axis rotary mechanism)는 스테레오 카메라를 지탱하고 있으면서 스테레오 카메라를 수평 및 수직축으로 회전할 수 있는 구조이다. 2축 회전기구에 대한 기하학적인 관계는 Fig. 4와 같다.

위 그림에서 정의된 좌표축  $\{0\}-x_0y_0z_0$ ,  $\{1\}-x_1y_1z_1$ , 그리고  $\{2\}-x_2y_2z_2$  는 각각 베이스, 링크1, 링크2에 붙어있는 좌표계를 의미하며 Craig의 기구학적 표현<sup>13</sup>을 따르고 있다.

그림에서  $\mathbf{C}$  는 첫 번째 카메라의 촛점 중심을 나타낸다. 따라서, 좌표계  $\{C\}-x_cy_cz_c$  는 첫 번째 카메라의 좌표계를 나타낸다. 좌표계  $\{C\}$ 의 원점은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 촛점 센터  $\mathbf{C}$  와 일치하는 점이다.

그리고,  $L_1$  과  $L_2$  는 각각 링크1과 링크2의 길이이다.  $B$  는 두 카메라 사이의 베이스라인의 길이를 나타낸다. 위와 같은 링크 파라메터를 이용하여 링크변환행렬(link transformation matrix)  ${}^0_1\mathbf{T}$ ,  ${}^1_2\mathbf{T}$  및  ${}^2_C\mathbf{T}$  가 계산될 수 있다. 그러므로, 카메라 베이

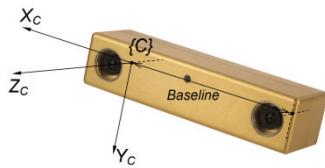


Fig. 5 Camera frame  $\{C\}$  -  $x_c y_c z_c$  attached to the first camera

스 좌표축  $\{\mathbf{0}\}$  -  $x_0 y_0 z_0$ 에 대한 카메라 좌표축  $\{\mathbf{C}\}$  -  $x_c y_c z_c$ 의 좌표변환 행렬은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} {}^0_C \mathbf{T} &= {}^0_1 \mathbf{T} \cdot {}^1_2 \mathbf{T} \cdot {}^2_C \mathbf{T} \\ {}^0_C \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} s\theta_1 & c\theta_1 s\theta_2 & c\theta_1 c\theta_2 & -L_2 \cdot c\theta_1 s\theta_2 + B/2.s\theta_1 \\ -c\theta_1 & s\theta_1 s\theta_2 & s\theta_1 c\theta_2 & -L_2 \cdot s\theta_1 s\theta_2 - B/2.c\theta_1 \\ 0 & -c\theta_2 & s\theta_2 & L_1 + L_2 \cdot c\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4) \end{aligned}$$

위 식에서  $c\theta_i = \cos(\theta_i)$ ;  $s\theta_i = \sin(\theta_i)$ ,  $i = 1, 2$ .

#### 4. 제안된 측정 알고리즘

일반적으로 스테레오 카메라를 이용하여 대형 물체를 측정하고자 할 때, 그 물체가 매우 크기 때문에 카메라의 영상 안에 들어가지 않는다. 이러한 점이 카메라를 이용하여 대형물체를 측정하고자 할 때 발생하는 애로사항이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 스테레오 카메라에 2축 회전기구를 장착하여 이러한 문제를 해결하였다.

##### 4.1 물체의 코너점의 3-D 위치 결정

물체의 특정 코너점의 3-D 위치는 스테레오 비전 알고리즘을 사용하면 쉽게 구할 수 있다. 주어진 영상에 스테레오 영상정렬 알고리즘을 적용하면 3-D상의 어떤 특징점이 좌우 영상의 같은 수평선 상에 존재하게 된다.

물체에서 관심 있는 코너를 자동적으로 검출하기 위하여 직사각형 모양의 ROI(region of interest)를 영상 정렬된 두 영상 중에서 우측 영상에 적용한다. ROI 내에서 코너를 검출하기 위해서 해리스 코너 알고리즘을 적용하였다.

일단 우측 영상에서 코너점이 검출되면, 그 점의 좌측영상에서의 위치는 같은 수평선 상에 놓이므로 쉽게 찾을 수 있다. 두 대응점 사이의 불일치(disparity) 값은 스테레오 영상대응 알고리즘(stereo correspondence algorithm)으로 구할 수 있다.

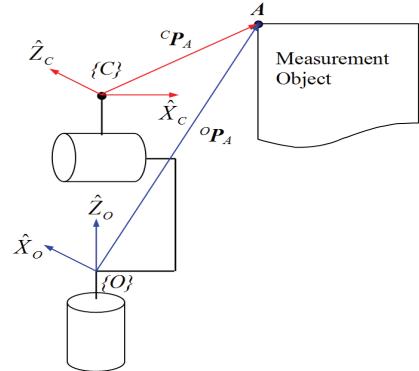


Fig. 6 3-D object corner position with respect to coordinate systems

주어진 카메라의 내부 파라메터와 스테레오 삼각법에 의해 대응하는 두 점은 3-D 공간상의 한 점으로 투영된다. 그러나, 이 점은 카메라 좌표축에 대한 위치값이다. 따라서, 물체의 크기를 계산하려면 모든 코너점의 위치값을 Fig. 6에서 보는 바와 같이 기준좌표계인 카메라 베이스 좌표계 ( $\{\mathbf{0}\}$ - $x_0 y_0 z_0$ )에 대한 위치값으로 변환을 해야 한다.

측정물체의 한 코너점을  $\mathbf{A}$  점이라고 하면, 위치벡터  ${}^C \mathbf{P}_A$ 는 카메라 좌표계  $\{C\}$ - $x_c y_c z_c$ 에서 그 코너점에 대한 거리를 나타낸다. 그리고, 위치벡터  ${}^0 \mathbf{P}_A$ 가 베이스 좌표계  $\{\mathbf{0}\}$ - $x_0 y_0 z_0$ 에서 그 코너점에 대한 거리를 나타낸다고 정의하면, 두 위치벡터 사이에 다음과 같은 관계가 성립된다.

$${}^0 \mathbf{P}_A = \begin{bmatrix} s\theta_1 & c\theta_1 s\theta_2 & c\theta_1 c\theta_2 & -L_2 \cdot c\theta_1 s\theta_2 + B/2.s\theta_1 \\ -c\theta_1 & s\theta_1 s\theta_2 & s\theta_1 c\theta_2 & -L_2 \cdot s\theta_1 s\theta_2 - B/2.c\theta_1 \\ 0 & -c\theta_2 & s\theta_2 & L_1 + L_2 \cdot c\theta_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot {}^C \mathbf{P}_A \quad (5)$$

위 식(5)에서  $\theta_1$ 과  $\theta_2$ 는 카메라 베이스의 초기자세로부터의 회전각도를 나타낸다. 이 회전각도는 2개의 회전 엔코더를 이용하여 쉽게 측정할 수 있다.

##### 4.2 움직이는 물체의 크기측정

물체의 크기를 측정하는 알고리즘을 작성하기 위하여 Fig. 7에서 보는 바와 같이  $n$ 개의 코너를 가지는 다각형을 대상 물체로 간주하였다.  $n$ 개의 코너 중 한 개를 기준점으로 삼고 0번째 코너로 정의하면, 순차적으로 다음 코너는 첫번째, 두번째, ...,  $(n-1)$ 번째 코너로 각각 정의된다. 본 연구에서

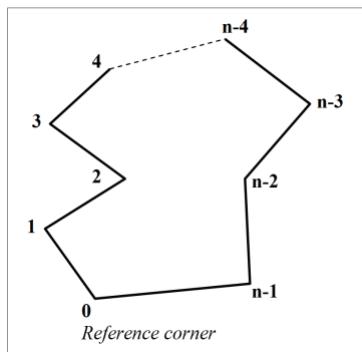


Fig. 7 Arbitrary polygon shape having n vertices

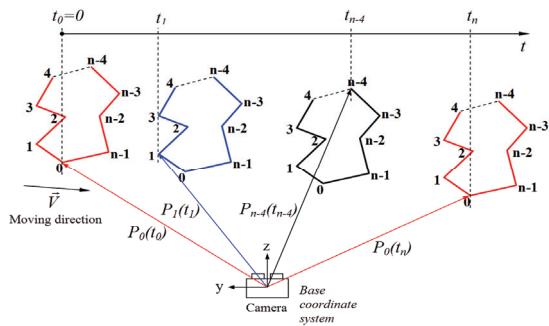


Fig. 8 Measuring process of an arbitrary polygon object in translational motion

는 물체가 저속으로 일정한 속도로 움직인다고 가정하였다. 실제로 선박의 블록이나 중량물을 움직이는 차량은 저속으로 일정한 속도로 움직이는 경우가 대부분이므로 대형 물체를 측정하는 경우 이 가정은 적절하다고 할 수 있다.

Fig. 8은 일정한 속도  $\vec{V}$ 로 직선운동을 하는 임의의 다각형에 대한 측정과정을 나타내고 있다. 측정의 시작시간을  $t = t_0$  라 놓고 0번째 코너점은 스테레오 카메라를 이용하여 캡처한다. 이 때 위치벡터  $\mathbf{P}_0(t_0)$ 는 시간  $t_0$ 에서 베이스 좌표계에 대한 0번째 코너의 3차원 위치를 나타낸다. 삼차원 위치를 계산하는 방법은 앞의 4.1 절에 잘 설명되어 있다. 그 다음 카메라 베이스를 회전하여 시간이  $t = t_1$ 인 시점에 1번째 코너를 캡처하게 된다. 베이스 좌표계에 대한 1번째 코너의 위치벡터는  $\mathbf{P}_1(t_1)$ 로 정의된다. 같은 방법으로 위치벡터  $\mathbf{P}_2(t_2)$ ,  $\mathbf{P}_3(t_3)$ , ...,  $\mathbf{P}_{n-1}(t_{n-1})$ 를 구할 수 있다.

끝으로, 시간이  $t = t_n$ 인 시점에 0번째 코너의 위치를 다시 구하고  $\mathbf{P}_0(t_n)$ 으로 정의한다. 앞에서 가정한 바와 같이 물체가 일정한 속도로 움직인

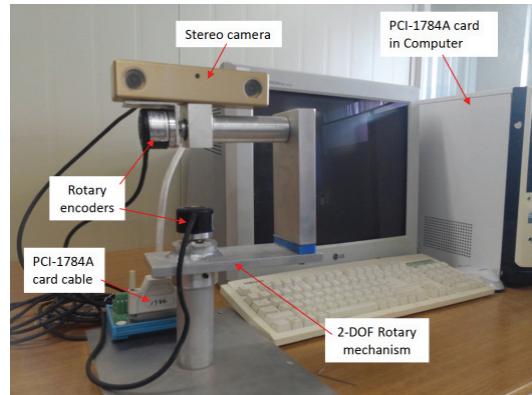


Fig. 9 The proposed measurement system with 2-DOF rotary mechanism and stereo camera

다면 물체의 이동속도는 다음과 같이 구해진다.

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{P}_0(t_n) - \mathbf{P}_0(t_0)}{t_n - t_0} \quad (6)$$

그리면, 시작시간  $t_0 = 0$  시점에서 베이스 좌표계에 대한 모든 코너점의 3차원 위치는 다음과 같은 식으로 구해진다.

$$\mathbf{P}_i(0) = \mathbf{P}_i(t_i) - \mathbf{V} \cdot t_i \quad (7)$$

그러므로, 측정된 물체의 각 모서리 길이는 다음과 같이 구해진다.

$$L_i = \|\mathbf{P}_i(0) - \mathbf{P}_{i-1}(0)\| \quad \text{and} \quad L_n = \|\mathbf{P}_0(0) - \mathbf{P}_{n-1}(0)\| \quad (8)$$

위 식에서  $i = 1, \dots, n-1$ .

## 5. 측정실험

측정실험을 위하여 각 카메라의 픽셀이 640 x 480 인 Bumblebee®2 스테레오 카메라<sup>14</sup>를 사용하였다. 카메라 베이스의 회전각을 측정하기 위해 E40H6-1000-3-N-5 모델의 회전식 엔코더를 사용하였다. 엔코더로부터의 회전각 데이터를 읽기 위하여 1784A PCI 카드를 사용하였다. Fig. 9는 제작된 측정시스템을 나타내고 있다. 측정에 사용된 물체는 길이가 1200mm인 금속자와 코너점이 7개인 다각형 형태의 보드를 사용하였다. 그리고 측정물체를 일정한 속도로 움직이기 위하여 콘베이어 장치를 사용하였다.

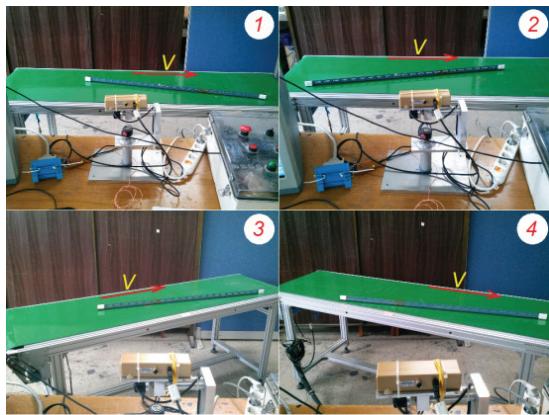


Fig. 10 Measuring experiments for a moving iron bar

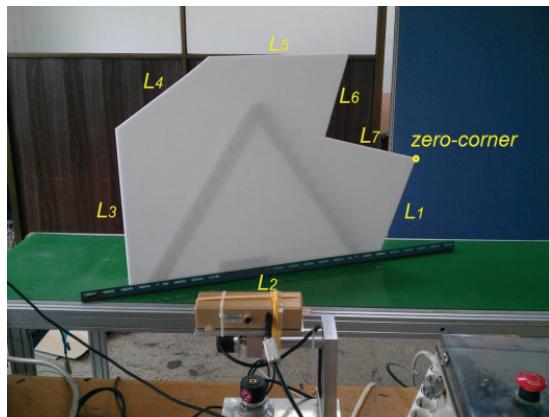


Fig. 11 The shape information of 6-corner polygon for measuring experiment

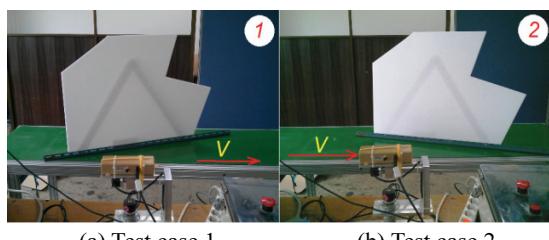
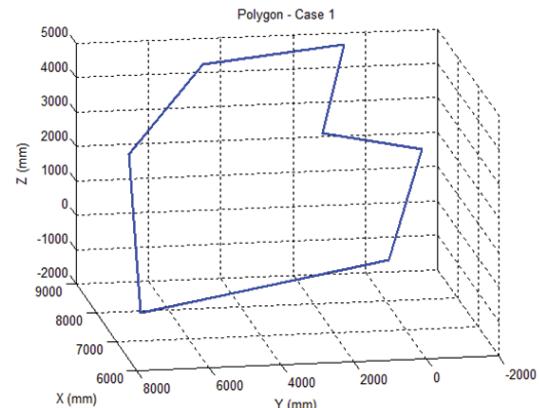
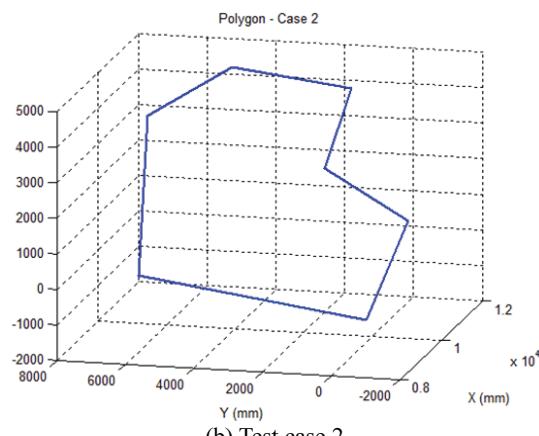


Fig. 12 Measuring experiments for a moving polygon

첫 번째 실험은 콘베이어 위에서 움직이는 금속자의 길이를 측정하는 실험이며, 실험장면은 Fig. 10과 같다. 실험의 신뢰성을 높이기 위하여 그림에서 보는 바와 같이 금속자의 위치를 4군데로 변경하면서 실험하였고, 각각의 경우에 속도조건도 2가지로 변경하여 총 8개의 경우에 대하여 측



(a) Test case 1



(b) Test case 2

Fig. 13 Shape reconstruction of the 7-corner polygon in the 3-D coordinate

정실험을 하였다. 실험에서 금속자의 양쪽 끝점의 3차원 위치값이 스테레오 비전과 회전축의 좌표변환에 의해 구해지고, 3차원 상의 두 점의 길이 즉, 자의 길이가 측정되었다. 실험결과 실제값과 측정값의 오차를 Table 1에 정리하였다. 두 번째 실험은 콘베이어 위에서 일정하게 움직이는 다각형의 각 모서리 길이를 계산하는 실험이다. 측정을 위해 사용된 기준 코너점인 0번째 코너점은 Fig. 11과 같이 할당되었다. Fig. 12는 같은 다각형을 자세를 바꾸어서 2가지 실험을 수행한 것을 보여준다. 실험결과는 Table 2에 나타나 있다. 그리고, Fig. 13(a)와 (b)는 Fig. 12에서 측정된 2 경우에 대하여 각각의 코너점을 이용하여 3차원 공간에 형상을 재구축(reconstruction) 한 것을 보여주고 있다.

Table 1 Experimental measuring results for a moving iron bar

Case	V (mm/s)			Measured value (mm)	Error (mm)	Error (%)
	V <sub>x</sub>	V <sub>y</sub>	V <sub>z</sub>			
1	0.27	-19.21	0.23	1197.18	-2.82	-0.24%
1	0.97	-30.69	0.57	1199.59	-0.41	0.03%
2	0.85	-19.03	0.23	1197.02	-2.98	-0.25%
2	1.17	-30.64	0.59	1197.32	-2.68	-0.22%
3	18.04	-33.35	0.11	1197.08	-2.92	0.24%
3	10.47	-20.34	0.49	1196.50	-3.50	0.29%
4	-18.67	-33.29	0.66	1196.45	-3.55	0.30%
4	-11.52	-20.76	0.40	1197.79	-2.21	0.18%

Table 2 Measured edge lengths of the polygon object moving on conveyor

Case	V <sub>(x/y/z)</sub> (mm/s)	Value	L <sub>1</sub> (mm)	L <sub>2</sub> (mm)	L <sub>3</sub> (mm)	L <sub>4</sub> (mm)	L <sub>5</sub> (mm)	L <sub>6</sub> (mm)	L <sub>7</sub> (mm)
		Real	310.00	790.00	430.00	315.00	415.00	245.00	315.00
1	-0.03	Measured	309.50	788.72	430.88	317.05	416.96	244.01	313.35
	-19.18	Error (mm)	-0.50	-1.28	0.88	2.05	1.96	-0.99	-1.65
	0.14	Error (%)	-0.16%	-0.16%	0.20%	0.65%	0.47%	-0.40%	-0.52%
1	-0.54	Measured	307.96	785.28	427.63	316.84	416.95	245.50	313.46
	-38.26	Error (mm)	-2.04	-4.72	-2.37	1.84	1.95	-1.50	-1.54
	-0.86	Error (%)	-0.66%	-0.60%	-0.55%	0.58%	0.47%	-0.61%	-0.49%
2	-0.25	Measured	309.02	790.34	427.28	313.55	413.09	243.51	313.09
	-19.24	Error (mm)	-0.98	0.34	-2.72	-1.45	-1.91	-1.49	-1.91
	0.39	Error (%)	-0.32%	0.04%	-0.63%	-0.46%	-0.46%	-0.61%	-0.61%
2	-0.24	Measured	309.25	785.73	431.29	315.36	413.66	243.62	314.33
	-38.61	Error (mm)	-0.75	-4.27	1.29	0.36	-1.34	-1.38	-0.67
	-0.56	Error (%)	-0.24%	-0.54%	0.30%	0.11%	-0.32%	-0.56%	0.21%

## 6. 결론

본 논문에서는 스테레오 비전과 좌표변환의 원리를 이용하여 저속으로 움직이는 대형물체의 형상 및 유치수를 측정하는 방법을 제안하였다.

2 자도 회전기구에 부착된 스테레오 카메라 시스템을 이용하여, 일반 스테레오 카메라 시스템을 이용하여 대형 물체를 측정할 때 생기는 가시성의 한계점을 극복할 수 있었다. 또한, 본 방법은 움직이는 물체의 치수뿐 만 아니라 물체의 외형 모습도 파악할 수 있다.

제안된 시스템은 다른 측정시스템에 비해 많은 장점을 가지고 있다. laser를 이용하여 대형물체를 측정하는 방법과는 달리 측정기와 물체 사이에 유리벽과 같은 투명 장막이 있더라도 측정이 용이하며, 저속으로 움직이는 물체에 대해서도 측정을 할 수 있다는 것이 다른 시스템과 차별화 되므로,

중공업이나 조선업체에서 선박블록 등과 같이 천천히 움직이는 물체의 치수를 측정하거나 철강산업이나 건설현장에서의 기자재들을 측정하는데 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 작동하기가 쉽고 값비싼 측정부품을 사용하지 않아도 된다는 잇점이 있다.

본 논문에서는 제안된 시스템의 성능을 알아보기 위하여 실제 실험장치를 구성한 후 실험을 수행하였다. 실험으로부터 제안된 시스템은 양호한 성능을 보여주었다. 픽셀값이 640 x 480인 카메라를 사용했음에도 Table 1과 Table 2에서 보는 바와 같이 0.7% 이내의 측정오차를 나타내었다.

## REFERENCES

- He, J., Gao, F., Wu, S., Liu, R., and Zhao, X., "Measure Dimension of Rotating Large Hot Steel

- Shell using Pulse Laser on PRRR Robot," Measurement, Vol. 45, No. 7, pp. 1814-1823, 2012.
2. Liu, W., Jia, Z., Wang, F., Ma, X., Wang, W., et al., "An Improved Online Dimensional Measurement Method of Large Hot Cylindrical Forging," Measurement, Vol. 45, No. 8, pp. 2041-2051, 2012.
  3. Park, J.-W., Lee, J.-J., Jung, H.-J., and Myung, H., "Vision-based Displacement Measurement Method for High-rise Building Structures using Partitioning Approach," NDT & E International, Vol. 43, No. 7, pp. 642-647, 2010.
  4. Getmanov, V., Modyaev, A., and Firsov, A., "A Method of Measurement of the Coordinates of a Moving Object with the Use of a Passive Hydroacoustic Detection and Ranging System," Measurement Techniques, Vol. 55, No. 3, pp. 248-256, 2012.
  5. Hu, E., He, Y., and Hua, Y., "Profile Measurement of a Moving Object using an Improved Projection Grating Phase-shifting Profilometry," Optics Communications, Vol. 282, No. 15, pp. 3047-3051, 2009.
  6. Ishii, I., Koike, T., Gao, H., and Takaki, T., "Fast 3D Shape Measurement using Structured Light Projection for a One-directionally Moving Object," Proc. of the IECON 37<sup>th</sup> Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 135-140, 2011.
  7. Lee, D.-H., Baek, S. Y., and Cho, N. G., "Six-degree-of-freedom Manipulator Displacement Measurement using Stereo Vision," J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 2, pp. 191-198, 2015.
  8. Zhang, Z., "A Flexible New Technique for Camera Calibration," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, pp. 1330-1334, 2000.
  9. Hartley, R. I., "Projective Reconstruction and Invariants from Multiple Images," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 16, No. 10, pp. 1036-1041, 1994.
  10. Fradi, H. and Dugelay, J.-L., "Improved Depth Map Estimation in Stereo Vision," Proc. of the SPIE7863, Stereoscopic Displays and Applications XXII, 78631U, Vol. 7893, 2011.
  11. Chen, J., Zou, L., Zhang, J., and Dou, L., "The Comparison and Application of the Corner Detection Algorithms," Journal of Multimedia, Vol. 4, No. 6, pp. 435-441, 2009.
  12. Cuong, N. H. and Hoang, H. T., "Eye-gaze Detection with a Single Webcam based on Geometry Features Extraction," Proc. of the IEEE 11<sup>th</sup> International Conference on Control Automation Robotics & Vision, pp. 2507-2512, 2010.
  13. Craig, J. J., "Introduction to Robotics: Mechanics and Control," Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005.
  14. Point Grey, "Bumblebee®2 IEEE-1394a Stereo Vision Digital Camera System," <http://www.ptgrey.com/bumblebee2-firewire-stereo-vision-camera-systems> (Accessed 15 April 2012)