선박용 곡판형상의 실시간 측정을 위한 다중 슬릿빔 보정법

3D Calibration Method on Large-Scale Hull Pieces Profile Measurement using Multi-Slit Beams

김 병 창*, 이 세 한
 (ByoungChang Kim¹ and Se-Han Lee¹)

¹School of Mechanical Engineering, Kyungnam University

Abstract: In the transportation industry, especially in the shipbuilding process, 3D surface measurement of large-scale hull pieces is needed for fabrication and assembly. We suggest an efficient method for checking the shape of curved plates under the forming operation with short time by measuring 3D profiles along the multi lines of the target surface. For accurate profile reconstruction, 2D camera calibration and 3D calibration using gauge blocks were performed. The evaluation test shows that the measurement accuracy is within the boundary of tolerance required in the shipbuilding process.

Keywords: 3D profile measurement, multi-slit beams, 2D camera calibration, 3D calibration, gauge block

1. 서론

선박, 항공기, 자동차로 대표되는 운송기 제조분야에 형상 정밀도를 요구하는 대형구조물의 제작이 요구된다. 특히 후판(thick plate)을 소성변형시켜 물리적 결함을 하는 선박제조 공정에서는 추가 소성변형량을 결정하기 위해 중간재의 형상을 주기적으로 측정하여야 하는 필요가 요구된다. 아직도 대부분의 선박제조 현장에서는 그림 1과 같이 목형 템플릿(wooden template)을 이용해 곡판의 깊이를 목측으로 측정하는 것이 현실이지만, 점차 측정자동화를 위한 노력을 진행 중에 있다.

대형 곡판의 형상 측정에서 고려해야 할 사항으로는 첫째, 성형 중 실시간 측정을 통해 추가로 요구되는 성형량을 빠르게 결정할 수 있어야 한다. 둘째, 측정 대상이 대형구조물이므로 측정장비가 가능한 간단한 구조를 가져야 한다. 셋째, 수 미터 크기의 전체 형상에 대해 수 밀리미터 수준의 측정 정밀도를 만족시켜야 한다. 넷째, 기존 전통적인 측정방식인 목형 템플릿 사용법에서 알 수 있듯이 일련의 가로방향 형상 측정만으로도 곡판의 형상 특징을 결정할 수 있다[1].

대형 곡판의 형상측정을 위해 사용 가능한 상업용 장비는 3차원측정기(CMM: Coordinate Measuring Machine), 레이저트랙커(LTS: Laser Tracking System) [2], 위성항법장치(GPS: Global Positioning System) [3,4] 등이 있다. 이들은 모두 공간상에 존재하는 한 점의 좌표를 정밀하게 측정하는 것을 목적으로하는 상업용 측정장비로서 가공 중 대형가공물의 형상에 대해 실시간 측정이 불가능하고, 고가인 단점이 있다. 따라서 상기 요구조건들을 만족시킬 수 있는 특성화된 머신비전이 필요한데, 이는 다수의 슬릿빔광원(multi-slit beam)과 1대의 카메라

를 이용해 구성할 수 있다. 다중 구조광(structured beam)을 이용한 사례에서 물체의 3차원 정보를 획득하기 위해 다른 파장광, 원패턴[5] 또는 일련의 렌즈군을 사용한 경우[6]가 있었으나 선박 곡판측정에 적용하기에는 복잡한 측정법과 장비구조를 가지고 있다.

머신비전에서의 보정과정(calibration process)은 2D, 3D 측정의 성공을 좌우하는 필수요소이다. 특히 측정 대상물이 형상 정밀도를 요구하는 가공 중간재 또는 완성품인 경우, 가공의 성패는 보정 정밀도와 깊은 연관을 가진다.

실좌표계(real-world coordinates)상에 존재하는 물체의 형상은 빛이라는 매개체를 통해 카메라의 스크린 좌표계(screen coordinates)로 변환(mapping)하는 과정을 거치게 된다. 이 과정에서 실좌표계 상에 존재했던 물체의 형상정보는 스크린 상에서 화소수(number of pixels)라는 이질적인 정보로 변경된다. 따라서 두 좌표계 사이의 상관관계를 결정짓는 과정이 요구되며 이 과정을 보정과정이라 정의한다. 이상적으로는 결상렌즈의 배율로써 두 좌표계 사이의 상관관계를 정의할 수 있지만, 실제적으로는 결상된 영상의 영역에 따라 배율이

그림 1. 대형 선박용 곡판 형상측정을 위해 사용되는 전통적인 목형 템플릿 측정법.

Fig. 1. Traditional method of the surface measurement on large-scale hull pieces using wooden templates.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received August 20, 2013 / revised September 15, 2013 / accepted October 4, 2013

김병창, 이세한: 경남대학교 기계공학부

(bckim@kyungnam.ac.kr/leesehan@kyungnam.ac.kr)

※ 이 연구결과물은 2013학년도 경남대학교 학술연구장려금 지원에 의한 것임.

달라지는 현상이 발생한다. 이는 사용된 결상렌즈의 광특성 상 비선형적인 왜곡 이미지를 생성하기 때문이다. 또한 머신 비전법은 3차원 형상정보가 2차원 평면에 투영되는 과정에서 3차원 정보를 잃어 버리므로, 3차원에 대한 보정과정을 수행하여야 비로소 정밀도 높은 3차원 형상 측정이 가능하게 된다. 본 논문에서는 성형중인 선박의 후판 형상측정용 다중 슬릿빔 시스템을 구성하고, 측정시스템의 2D, 3D 보정을 통해 정밀도 높은 측정결과를 획득하고자 한다.

II. 측정시스템 구성

선박용 곡판가공법으로 주로 열간성형이 수행되어 왔으며, 최근 냉간성형 기술이 현장에 적용되고 있다. 선박용 곡판가공의 경우, 두꺼운 후판을 소성변형 시켜야 하므로 점진적이고 지속적인 변형 가공공정이 요구된다. 성공적인 가공을 위해서는 가공 중에 지속적인 형상측정을 통해 추가적으로 성형이 필요한 영역과 변형량을 결정하여야 한다. 또한 가공물의 크기가 대형이므로 간단하면서 곡판의 형상특징을 비교적 정밀하게 결정할 수 있는 측정법이 요구된다. 이를 위해서 다중 슬릿빔을 이용한 측정장비를 구성하였다. 가공중인 곡판에 추가로 요구되는 소성변형력을 결정하기 위해서는 곡판 전체의 형상 보다는 특징적인 영역의 형상만을 획득하여도 충분하다. 하지만 기존의 단일 슬릿빔을 사용할 경우 측정시스템 또는 가공물을 이동하여야 하므로 측정시간이 길어지고, 측정장비가 복잡·대형화된다. 다수의 슬릿빔을 장착한 광학계를 사용한다면 구동부 없이 곡판의 기하학적 특징을 실시간으로 획득할 수 있게 된다.

측정 시스템 구성은 4개의 라인레이저로 구성된 광원부(light sources)와 대상물 위에 투영된 슬릿빔의 영상을 결상하는 영상획득부로 구성되며, 광원부의 광축과 영상획득부의 중심선은 일정 각도를 두고 정렬된다.

기존의 단일 슬릿빔을 이용한 측정법을 확대하여, 4개의 슬릿빔을 동시에 복원하는 알고리즘을 구현하였다. 그림 3과 같이 영상축에서 벗어난 i 번째 슬릿빔을 대상으로 하는 경우, i 번째 광원축과 카메라 영상축을 정보로 하는 기하학적 광삼각법 이론을 적용하였으며, 형상측정에 필요한 기하학적 변수들은 III, IV 장에서 기술할 2차원과 3차원 보정법을 통하여 획득하였다.

그림 3의 기하학적 관계를 적용해 임의 높이를 복원한 결과는 식 (1)과 같이 표현된다.

그림 2. 곡판 형상측정을 위한 다중 슬릿빔 측정 시스템 구성도 및 구현사진.

Fig. 2. Schematic diagram and photo of multi-slit beams system for the hull pieces surface profile measurement.

그림 3. 4개의 슬릿빔 중 임의빔에 적용한 광삼각법.

Fig. 3. Optical triangulation method applied to arbitrary i th slit-beam line.

$$z_i = \frac{\sin(\theta_i)}{\sin(\alpha_i + \theta_i)} \cdot d_i \quad (1)$$

여기에서 d_i 는 카메라구경(aperture)으로부터 기준면에 투영된 슬릿빔까지 거리이며, α_i 는 광원축과 i 번째 기준축과의 각도이며, θ_i 는 카메라에서 바라본 물체의 화각을 나타낸다.

III. 2차원 카메라(이미지) 보정법

카메라를 이용한 머신비전에서 가정 먼저 수행되어 져야 할 과정이 2차원 카메라 보정과정이자. 이는 실좌표계와 카메라좌표계 사이의 상관관계를 정의함으로써, 획득된 영상으로부터 측정물의 실제 형상을 결정짓는 단계이다. 또한 결상렌즈를 통해 비선형적으로 왜곡되어지는 영상을 보정함으로써 머신비전을 통한 형상측정의 정밀도를 향상시키는데 목적이 있다.

머신비전을 통해 선박, 항공기, 자동차와 같이 대형 구조물의 형상을 측정하기 위해서는 주로 초점거리가 짧은 광각렌즈(wide-angle imaging lenses)를 사용하는데, 광각렌즈의 경우 주로 각종 렌즈 수차에 노출되어지는 경우가 많다. 따라서, 머신비전을 이용한 대형 구조물의 2 또는 3차원 측정에서는 카메라 보정이 더욱 중요한 요소로 대두된다.

카메라 보정의 기본개념은 실좌표계 내에 존재하는 3차원 물체의 한 측정점(object point, image plane scene point) 좌표와 카메라 카메라좌표계 내의 결상점(image point)을 연결하는 투영 관계식을 결정하는 것이다. 두 개의 다른 좌표계는 그림 4와 같이 핀홀 카메라 모델에 근거하여 행렬식으로 정의할 수 있다.

영상면 위의 2차원 좌표는 $m = [u, v, 1]^T$ 로 표현되며, 실좌표계 내의 3차원 좌표는 $M = [X, Y, Z, 1]^T$ 로 표현하였다. 점 M 과 투영점 m 사이의 관계식은 식 (2)와 같다.

$$s * m = A * [R | t] * M \quad (2)$$

여기에서 s 는 임의 스케일상수(scale factor)이다. $[R | t]$ 는 3X3 회전행렬과 3D 병진행렬로 구성된 외부변수(extrinsic param-

그림 4. 핀홀 카메라 모델; 실좌표계 내 3차원좌표와 이상적인 핀홀 카메라의 좌표계 사이의 수학적 관계를 표현함. 여기서 카메라 구경은 렌즈가 아닌 점으로 표현되었으며, 영상면은 원점으로부터 f (초점거리) 떨어진 거리에 위치한다.

Fig. 4. Pinhole camera model; describes the mathematical relationship between the coordinates of a 3D point and its projection onto the image plane of an ideal pinhole camera, where the camera aperture is described as a point and no lenses are used to focus light. The image plane locates at distance f (focal length) from the origin.

eters)로서 실좌표계와 카메라좌표계의 상대위치 및 자세를 정의하며, A는 카메라를 포함한 결상광학계 고유의 내부변수(intrinsic parameters)로서 아래와 같이 정의된다.

$$A = \begin{bmatrix} f_x & \kappa & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기에서 (c_x, c_y) 는 주점(principal point)이며, (f_x, f_y) 는 화소수(pixel size units)를 단위로 하는 수평, 수직방향의 초점거리이다. κ 는 두 영상축의 비틀림(skewness)을 표현하는 변수이다.

보정과정에서의 계산 편리성을 위해, 길이 단위를 화소 단위로 변경할 필요가 있는데, 두 단위의 관계식은 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} x_{pix} &= k_x x_i + x_0 = k_x \left(f \frac{X}{Z} \right) + x_0 \\ y_{pix} &= k_y y_i + y_0 = k_y \left(f \frac{Y}{Z} \right) + y_0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 주점인 (x_0, y_0) 는 카메라 좌표계의 중심을 화소단위로 표현한 좌표이며, (k_x, k_y) 는 x축과 y축 방향의 길이단위를 각각 화소단위로 변환하는 스케일상수이다. (x_i, y_i) 는 그림 5에서와 같이 카메라좌표계 위에 존재하는 영상점의 길이단위 좌표점이다.

2차원 카메라보정 과정에서 중요한 점은 사용된 카메라 모델의 내·외부변수를 결정하는 것이다. 외부변수는 두 좌표계 사이의 상대위치를 나타내는 병진행렬[t], 상대자세를 나타내는 회전행렬[R], 그리고 결상렌즈의 배율로 구성되며, 내부변수는 렌즈의 초점거리 f , 주점, 그리고 렌즈의 수차(aberrations)로 구성된다. Zhang의 보정알고리즘을 사용하기 위해 그림 6과 같이 크기가 50 mm인 단위격자가 18X19개의

그림 5. 카메라 좌표계에서의 길이단위와 화소단위의 관계.

Fig. 5. Relationship between length format and pixel format in the imaging coordinate system.

그림 6. 다양한 위치와 자세에서 획득된 체크보드 영상.

Fig. 6. Images of a model plane, together with the extracted corners indicated by colored circle.

패턴을 가진 흑백 체크보드(checkerboard)를 사용하였다.

Zhang의 보정알고리즘은 사전에 알고 있는 체크패턴을 실좌표계에 포함시켜 그 패턴의 투영된 영상을 이용하여 카메라를 교정한다[7]. 이 알고리즘을 사용하기 위해서는 위치와 자세가 다른 n 개의 체크보드의 영상들을 획득하고, 획득된 영상들로부터 반복 패턴의 모서리를 추출하여, n 개의 모서리 패턴 영상들 간의 반복루프 계산을 통해 내·외부 카메라 보정과정을 수행한다. 보정에 사용된 Zhang 알고리즘은 OpenCV의 함수를 이용하여 구현하였으며, 보정을 위해 사용된 영상은 총 15장을 사용하였다. 2차원 카메라보정을 수행한 결과 측정에 사용된 광학시스템의 내·외변수는 다음과 같이 획득되어졌다.

- 초점거리(focal length: f_x, f_y) : 2408.5, 2411.45
- 주점(principal point: c_x, c_y) : -0.1929, 0.1053
- 접선방향 왜곡(tangential distortion) : 0.0029, 0.0014
- 반경방향 왜곡(radial distortion) : -0.1929, 0.1053

획득된 내·외변수를 이용하여 1개의 직선 슬릿빔을 보정한 결과 그림 7과 같이 향상됨을 확인할 수 있다.

그림 7은 카메라보정 전후의 결과를 비교한 것으로 기준 평면(reference flat surface)에 투영된 직선 슬릿빔을 보정 전 결상한 영상과 보정 후 결상한 영상을 각각 비교하여 나타내었다. 보정 전 13화소에 걸쳐 왜곡된 영상이 보정 후 2화소 안으로 보정됨을 확인할 수 있다. 보정 후에도 잔존하는 오차는 보정과정에서 발생하는 미소한 오차와 기준면 자체의 형상 왜곡이 원인으로 생각된다.

그림 7. 카메라 보정 전·후의 직선패턴 변화.

Fig. 7. Camera calibration effects; curved laser line in the original image is straightened after calibration.

IV. 3차원 형상 보정법

앞서 2차원 카메라보정을 통해 측정시스템에 대한 보정은 수행되어 졌지만 본 논문에서 적용할 슬릿빔 측정법에 대한 3차원 보정이 추가로 요구된다. 3차원 보정과정은 일정 높이를 가진 물체를 일정 각도로 바라본 영상에서 물체의 높이와 기타 기하학적 관계를 결정짓는 일련의 과정에 해당한다. 이를 위해서 높이를 정확하게 알고 있는 게이지블록 등을 이용하면 3차원 보정이 가능하다. 그림 8과 같이 4개의 광원이 기준면 위에 투영시킨 각 기준라인별로 게이지블록을 이용해 각각 3차원 보정을 수행하였다. 그림 3과 같이 기준면에 투영된 i 번째 슬릿빔을 포함하고 영상축에 수직인 가상 평면을 i 번째 물체면으로 정의한다. 기준면 위에 수직으로 세워진 게이지블록은 i 번째 기준축과 α_i 각도를 이루며 이는 시스템 구성단계에서 결정된다. 3차원 보정을 위한 공간상의 각 변수들의 관계식은 광삼각법에 의해 식 (5)로 정의되므로, 사용된 게이지블록의 높이(h)로부터 카메라구경과 i 번째 기준라인 사이의 거리(d)를 결정할 수 있다.

$$d_i = \frac{\sin(\alpha_i + \theta_i)}{\sin(\theta_i)} \cdot h_i \quad (5)$$

여기에서 h 는 게이지블록의 높이로서 이미 알려진 값이며, θ 는 게이지블록 상단에 투영된 슬릿빔과 기준라인 사이의 각

그림 8. 3차원 높이 보정을 위한 기하학적 관계.

Fig. 8. Schematic diagram for 3D height calibration process.

그림 9. 게이지블록을 이용한 3차원 보정 검증실험.

Fig. 9. 3D calibration test using gauge block.

으로 카메라의 초점거리와 영상 좌표계를 이용하여 결정이 가능하다. 따라서 최종적으로 3차원 보정에서는 기준면에 투영되는 슬릿빔의 기준라인과 카메라 구경 사이의 거리 d 를 결정하는 것으로 요약될 수 있다. 이는 임의의 슬릿빔 위에 놓인 임의의 높이를 결정하기 위해서 식 (1)에서 d 가 결정되어야 했던 이유이다.

2차원, 3차원 보정을 마친 시스템에 대해 형상 복원 정밀도를 검증하기 위하여 그림 9와 같이 높이를 알고 있는 각각의 단차 시편에 대하여 실험을 수행하였다. 사용된 단차시편은 100~500 mm까지 50 mm 간격으로 총 9개를 이용하였으며, 총 4개의 슬릿빔 위치에 대해 각각 측정을 수행하였다.

네 번째 슬릿빔 위치에서의 측정결과는 그림 10과 같이 게이지블록의 높이를 복원하였으며, 나머지 세 개의 슬릿빔에 대해서도 유사한 결과를 획득하였다. 가장자리 게이지블록 전후로는 그림자효과에 의한 노이즈가 보이지만, 단차시편이 아닌 연속 곡면을 가진 곡면측정에서는 그림자효과에 의한 현상은 나타나지 않는다.

그림 11은 그림 10에서 측정한 각 시편의 복원오차를 게이지블록별로 나타냄으로써 3차원 형상복원에 대한 측정 정밀도를 해석하였다. 게이지블록의 길이에 따라 미소한 차이는

그림 10. 네 번째 슬릿빔 위치에서 게이지블록 측정결과.

Fig. 10. Height measurement results by each gauge block on the 4th slit-beam line.

그림 11. 네 번째 슬릿빔 위치에서 게이지블록별 측정오차.
Fig. 11. Measurement errors by each block gauge on the 4th slit-beam line.

표 1. 슬릿빔 위치별, 단차 게이지블록별 최대 측정오차.
Table 1. Maximum errors by slit-beam position and by gauge block.

GB height No.Line	단위[mm]								
	100mm	150mm	200mm	250mm	300mm	350mm	400mm	450mm	500mm
Line1	1.4	1.6	0.2	1.2	0.9	1.5	1.2	1.7	1.3
Line2	1.6	1.9	1.4	1.0	1.0	0.6	1.6	1.9	1.9
Line3	1.2	1.2	1.3	1.8	1.0	1.8	1.5	1.5	1.3
Line4	1.3	1.9	1.3	1.4	0.5	1.3	1.8	1.7	1.5

있지만, 높이가 각각 다른 9개 시편에 대해 최대 1.9 mm 측정오차를 보인다.

동일한 위치, 동일한 높이의 게이지블록에 대해 미소한 측정값 차이를 보이는 것은 게이지블록의 표면 광특성 차이가 영향을 준 것으로 판단되며, 이는 추후 미세 영상처리를 통해 향상시켜야 할 부분이다. 표 1은 복원된 측정값의 최대오차를 각 슬릿빔 위치별, 각 게이지블록별로 나타낸 것이다.

표 1에 의하면 개발된 측정장비는 곡판깊이 500 mm 이하의 형상을 측정할 때, 슬릿빔 위치에 상관없이 1.9 mm 이하의 측정 최대오차를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 물체 표면의 광특성에서 발생하는 오차와 측정장비 자체에서 발생하는 모든 오차를 포함한 결과로써, 영상처리를 통해 표면 특성에 따른 오차를 줄인다면 더 좋은 결과를 얻을 것으로 판단된다. 측정정밀도 확인결과 선박용 곡판 제작현장에서 요구되는 곡판형상 허용오차범위 ± 5 mm 범위에 들어가는 것을 알 수 있다.

V. 형상측정 결과

2차원, 3차원 보정이 끝난 측정장비를 그림 12와 같이 성형 가공 중에 있는 곡판의 형상측정에 적용하였다. 사용된 곡판 시편은 세로방향으로 세 곳의 지점에서 롤포밍(roll forming)한 선박용 후판이다.

임의 형상을 가진 곡판에 대해서 본 논문에서 제안한 다중 슬릿빔 측정법과 잘 보정된 상업용 접촉식 스타일러스로 상호 비교 측정하였다. 비교 측정에 사용된 접촉식 스타일러스는 Rainshaw사의 cyclone으로 측정범위가 600X500X400 mm이고, 0.1 mm 측정분해능을 가졌다. 측정결과 복원된 시편은 그림 13과 같이 3곳의 지점에서 롤포밍으로 인한 절곡점이 발견되며, 점진적 성형에 의해 휘어진 형상을 나타낸다. 비교측

그림 12. 가공 중인 곡판에 투영된 4개의 슬릿빔.
Fig. 12. 4 slit-beams projected on the hull piece surface under roll forming process.

그림 13. 가공 중인 곡판에 대해 상업용 접촉식 측정법과 비교 측정한 결과.

Fig. 13. A measurement result of surface profile of the roll formed plate; one is reconstructed profile by stylus profiler and the other is by suggested system.

정 결과 600 mm 측정영역에서 접촉식 측정값과 최대 1.9 mm의 측정값 차이를 보인다. 이는 게이지블록을 이용한 최대 측정오차 실험에서 획득한 최대오차와도 일치하는 값을 확인할 수 있다.

VI. 결론

선박 제작현장에서 곡판의 형상을 측정하기 위해 사용되고 있는 목형 템플릿을 대신하여, 실시간으로 곡판의 형상특징을 측정할 수 있는 다중 슬릿빔을 이용한 3차원 머신비전 측정장비를 개발하였다. 다중 슬릿빔은 기존의 단일 슬릿빔에 비해 구동부 없이 성형 중인 곡판의 형상특징을 측정하여, 실시간으로 가공량을 결정할 수 있는 장점이 있다. 3차원 측정 정밀도를 향상시키기 위하여 구성된 머신비전 시스템에 대해 2차원 카메라 보정과 단차 게이지블록을 이용한 3차원 보정을 실시하였다. 보정결과 500 mm 깊이에 대해 최대오차 1.9 mm를 얻었으며, 이는 선박용 곡판가공의 허용오차 한계치 이하임을 확인하였다. 실제 롤포밍 중에 있는 곡판을 상

업용 접촉식 측정기와 비교측정한 결과 게이지블록 테스트와 동일한 최대오차를 획득함으로써 선박 제조 현장에서 실시간 곡판형상측정에 적용가능함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] J. G. Shin, J. M. Lee, and J. H. Nam, "An efficient algorithm for measurement and comparison of large-scale hull pieces in the line-heating process," *Journal Ship Production*, vol. 20, no. 1, pp. 60-67, 2004.
- [2] C. J. Leigh-Lancaster and B. Shirmzadeh, "Development of a laser tracking system," *Proc. of the 4th Annual Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, pp. 163-168, 1997.
- [3] E. B. Hughes, A. Wilson, and G. N. Peggs, "Design of a high-accuracy CMM based on multi-lateration technique," *ICIRP*, vol. 49, pp. 391-395, 2000.
- [4] O. Nakamura and M. Goto, "Four-beam laser interferometry for three-dimensional microscopic coordinates measurement," *Applied Optics*, vol. 33, no. 1, pp. 31-35, 1994.
- [5] L. Jorge and C. Sanz, "Advances in machine vision," *Springer*, 1989.
- [6] M. Baba and T. Konishi, "Range imaging system with multiplexed structured light by direct space encoding," *IEEE Instrument and Measurement Technology Conference*, vol. 3, pp. 1437-1442, 1999.
- [7] Z. Zhang, "A flexible new technique for camera calibration," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, no. 11, pp. 1330-1334, 2000.

김 병 창

1996년 부산대학교 기계공학과(공학사). 1998년, 2003년 KAIST 기계공학과(공학석/박사). 2003년~2004년 미국표준연구소 방문연구원. 2012년~2013년 아리조나대학교 광과학센터 방문연구원. 2005년~현재 경남대학교 기계공학부 부교수.

관심분야는 자유곡면 삼차원 형상측정, 광학시스템 설계 및 보정, 옵토메카트로닉스.

이 세 한

1989년 고려대학교 기계공학과(공학사). 1991년 고려대학교 기계공학과(공학석사). 2002년 고려대학교 기계공학과(공학박사). 2004년~현재 경남대학교 기계공학부 부교수. 관심분야는 자동화로봇 시스템의 설계 및 제어, 모터 제어 시스템, 생산자동화 기구, 메카트로닉스.

시스템, 생산자동화 기구, 메카트로닉스.