

다중 슬릿 구조화 광원을 이용한 곡판 측정장치 개발

Development of a Measurement System for Curved Ship Hull Plates with Multi-Slit Structured Light

이현호^{1,✉}, 이돈진¹, 허만주¹
Hyunho Lee^{1,✉}, Don Jin Lee¹, and Man Joo Huh¹

¹ 대우조선해양 산업기술연구소 (Industrial Application R&D Institute, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering)
✉ Corresponding author: hosat@dsmc.co.kr, Tel: +82-55-735-8555

Manuscript received: 2012.10.4 / Accepted: 2012.12.27

The measurement in the manufacturing process of curved ship hull plates still depends on wooden templates as a standard instrument. The metrology-enabled automation in the shipbuilding process has been challenged instead of line measurement with wooden templates. The developed measurement system consists of a CCD camera, multiple structured laser sources and 3-DOF motion device. The system carries out measurement of curved profiles for large scale plates by an optical triangulation method. The results of experiment conducted in a manufacturing shop demonstrate the accurate and robust performance.

Key Words: Curved Ship Hull Plates (선체 외곡판), Metrology-enabled Automation (측정 기반 자동화), Multiple Structured Laser Sources (다중 구조화 레이저 광원), Measurement of Curved Profiles (곡 형상 측정)

기호설명

s = Arbitrary scale factor
 A = Intrinsic matrix
 (f_x, f_y) = Scale factors in m
 (c_x, c_y) = Coordinates of the principal point
 γ = Skewness parameter
 $[R | t]$ = Extrinsic parameter

1. 서론

중·대형 구조물을 제조하는 기계, 중공업, 조선해양산업에서 비접촉식으로 구조물의 치수 및 형상 측정에 적용할 수 있는 정밀 측정장비로는 토탈 스테이션(Total station), 사진 측정 시스템(Photogrammetry), 레이저 및 백색광 스캐닝 시스

템(Laser/White light scanning system), 레이저 추적기(Laser tracker), 레이저 비전 시스템(Laser vision system) 등이 있다. 이들 측정 시스템은 각 대상물의 특성 및 측정 환경에 따라 선택적으로 활용되어질 수 있으며 특정 목적을 위하여 시스템간의 통합 운용도 이루어지고 있다.

하지만, 생산 제품의 형상이 일정하지 않은 선박 구조물에 있어 복잡한 형상의 자유곡면을 가지는 곡 형상 부재는 곡면 형상 또는 곡선 프로파일 형태의 템플릿을 이용하여 가공 곡면의 일치여부를 목측으로 확인하는 방법을 사용하고 있다.¹

본 연구에서는 선박의 선수, 선미부에 주로 적용되는 대형 후곡판의 냉간 자동화 가공을 위하여 연구되고 있는 점진적 롤 성형 시스템의 개발 모델을 이용하여 가공한 곡판의 형상을 측정

하기 위한 장치를 개발하였다. 점진적 롤 성형에 의한 냉간 성형공법은 조선해양산업에서의 대형 후곡판 성형 공정 자동화를 위하여 연구되고 있으며 이에 적합한 측정 조건과 환경을 만족시킬 수 있도록 개발에 필요한 몇 가지 필요조건들이 고려되어야 한다.^{2,3}

- 측정 준비와 측정 단계에서 인력에 의한 조력이 필요치 않은 비접촉식 측정방법 적용
- 개성형 등의 후공정 지연을 최소화하기 위한 측정 데이터 획득 및 처리시간 최소화
- 측정 가능 영역은 성형 대상 부재의 크기와 곡 형상에 따른 곡판 최고점과 최저점의 높이 차이를 반영하여 결정
- 작업장 조명 조건을 고려하여 외란광에 강건한 광원 특성을 보유한 측정기술 적용
- 곡 형상 정도관리를 위한 공차 수준을 고려하여 ± 2 mm 이내의 측정 정확도 구현

상기 조건들을 만족시킬 수 있는 측정 방법들을 검토한 결과, 목적 곡 형상의 주요 특징적 인자를 빠르고 간편하게 측정할 수 있는 기술로서 구조화 광원을 이용한 광삼각법 기술을 채택하였다. 일반적으로 산업계에 적용되고 있는 광삼각법을 이용한 레이저 비전 시스템은 하나의 광원을 활용하여 측정장치가 이동하거나 또는 측정 대상물이 이동하며 형상정보를 획득하는 방식이 적용되고 있으나,⁴ 본 연구에서는 곡판의 종방향 및 횡방향에 대한 형상 정보를 광범위하게 획득하기 위하여 복수개의 구조화 광원을 이용하여 측정영역을 확대시킬 수 있는 방안을 구현하였다.

2. 측정 원리

2.1 슬릿광을 이용한 광삼각 측정방법

구조물에 조사되는 슬릿 구조화 광원과 그 이미지를 획득하기 위한 카메라가 Fig. 1 과 같이 구성될 경우 측정 대상 물체 상의 점 P(x, y, z)에 결상된 슬릿 광원이 카메라 영상으로 획득되고 이는 영상점 P'(x', y')에 대응된다. 여기서 카메라는 핀홀 카메라로 가정하고 카메라 광축의 직선 방정식과 슬릿 광원의 평면방정식을 영상점 P'와 물체점 P 와의 관계식으로 나타내면 수식(1)과 같이 표현할 수 있다.⁴

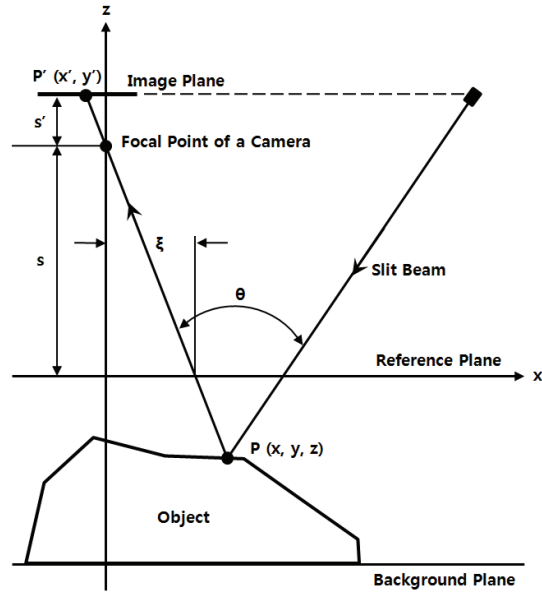


Fig. 1 Principle of optical triangulation with a slit beam

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 1 & 0 & -\tan \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기에 배율 m 을 대입하면 대상 물체 상의 점 p 의 삼차원 좌표값은 수식 (2)와 같이 결정된다. 따라서, 공간변수(θ, ξ, s, s')가 미리 결정되면, 획득된 영상점 P'(x', y')로부터 물체의 삼차원 형상 좌표값 P(x, y, z)를 결정할 수 있다.⁴

$$\begin{aligned} x &= \frac{x'(\xi + s \tan \theta)}{x' + s' \tan \theta} \\ y &= \frac{y'(\xi + s \tan \theta)}{y' + s' \tan \theta} \\ z &= \frac{s' \xi - x' s}{x' + s' \tan \theta} \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 2 차원 보정

2 차원 보정은 실제 공간에 존재하는 좌표계와 카메라 내에 존재하는 좌표계 사이를 연결하는 관계를 정의하는 것이다. 카메라 렌즈를 통해 결상된 영상의 위치 P'(x', y') 정보가 실제공간에 위치한 물체의 삼차원 형상위치 P(x, y, z)를 의미하므로, 형상 좌표값은 획득된 영상의 왜곡에 의해 심각한 영향

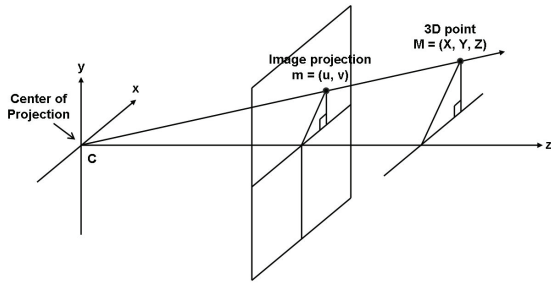


Fig. 2 Pinhole camera model

을 받을 수 있음을 예측할 수 있다. 이러한 광학계의 결상 왜곡현상을 보정하여 측정 신뢰성을 확보하기 위해 Fig. 2 와 같이 카메라를 핀 홀 형태로 모델링하여 카메라 평면에 결상된 2 차원 영상점 m 과 실제 공간상의 3 차원 좌표점 M 으로 표현된 수식 (3)과 같은 관계식을 도출하였다.⁵

$$s m = A [R | t] M \tag{3}$$

$$s \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \\ X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

2 차원 보정과정에서 카메라의 회전운동(R), 병진운동(t)을 나타내는 외적변수(Extrinsic parameter)와 왜곡변수(Distortion parameter) γ , 초점거리(f_x, f_y), 주요점 좌표(c_x, c_y)로 구성되는 내적변수(Intrinsic parameter) A 를 찾기 위하여 체크무늬 패턴 보정판을 다양한 자유도로 위치시켜 얻은 영상으로 해석하여 보정 변수를 획득하였다.⁵⁻⁷

2.3 3 차원 보정

광학계에 사용된 카메라 보정작업 후, 레이저 슬릿광 평면에 대한 높이 방향 보정을 위한 3 차원 보정과정이 필요하다. 이를 위하여 높이를 정확하게 알고 있는 게이지 블록과 같은 표준시편을 이용하여 Fig. 3 과 같은 대상물체와 영상과의 기하학적 관계를 결정할 수 있다.

Fig. 3 의 기하학적 모델로부터의 높이(h)은 카메라로부터 기준면까지의 거리(d)와 카메라가 물체를 바라보는 화각(θ), 카메라 영상축과 광축이 이루는 각도(α)의 상관관계를 표현한 수식 (4)를 통하여 산출된다.

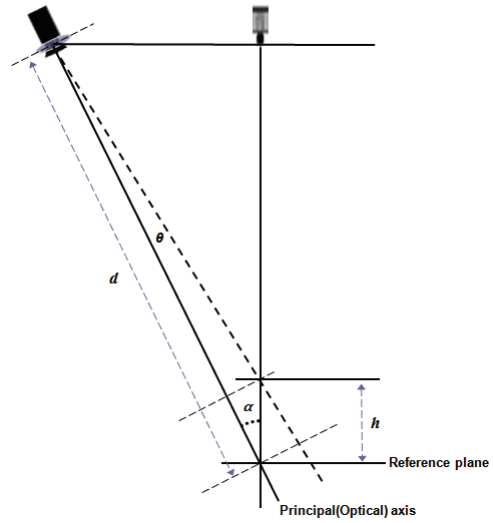


Fig. 3 3D calibration model

$$h = \frac{\sin \theta}{\sin(180 - \alpha - \theta)} d \tag{4}$$

3. 다중 슬릿 구조화 광원을 이용한 레이저 비전 시스템

3.1 3 차원 형상 복원 알고리즘

기존의 단일 슬릿광을 이용한 광삼각법을 확장하여, 4 개의 슬릿광을 동시에 복원하는 알고리즘을 구현하였다. Fig. 4 와 같이 영상축에서 벗어나 있는 4 개의 라인패턴을 획득하여 각 광원의 광축과 카메라 영상축을 정보로 하는 기하학적 광삼각법 이론을 적용하였으며, 주어진 시스템 변수는 앞서 기술한 2 차원과 3 차원 보정법을 통하여 획득할 수 있다.

3.2 측정장치 구성

측정장치는 4 개의 레이저 슬릿광으로 구성된 광원부(Light source)와 대상물 위에 투영된 슬릿광의 영상을 결상하는 결상부(Imaging part)로 구성되며, 광원부의 광축과 결상부의 중심선은 일정 각도를 두고 정렬된다. 측정장치 프레임에 설치된 광원은 지면에 수직하게 투영되며, 4 개의 광원은 일정거리를 두고 설치되어 각각 또는 동시에 측정대상 물체에 레이저 슬릿광 패턴을 형성시킨다. 광원부는 가시광 영역에 속하는 635 nm 파장의 98 mW 출력을 가진 다이오드레이저를 사용하였다.

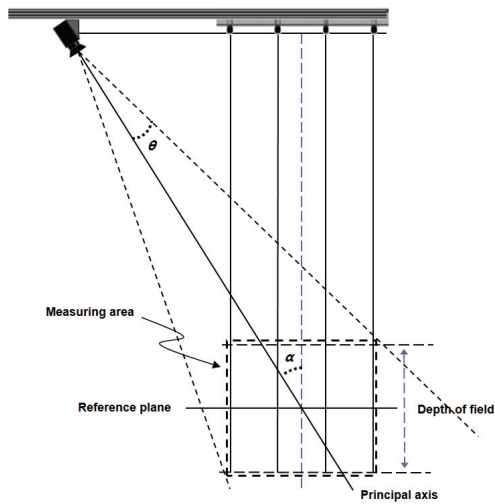


Fig. 4 Optical triangulation with multiple structured laser sources

측정 대상물체 상에 생성된 일련의 패턴 영상을 결상하기 위한 결상렌즈는 결상 광학계 내에 수차(Aberration)가 보정되어 있어야 하며, 측정 물체의 크기와 작동거리가 민감한 경우에는 결상 광학계의 화각(View angle)을 고려해야 한다. 본 측정 시스템의 결상렌즈는 광각렌즈(Large view angle lens)를 사용하여 대영역 측정 대상물에 대해서도 최소한의 작동거리를 유지할 수 있도록 하였고, 결상렌즈에서 발생하는 왜곡수차는 2 차원 카메라 보정 과정을 통하여 문제점들을 해결하였다.⁷ 본 연구에 사용된 결상렌즈는 8 mm 컴퓨터 비전용(Compute vision) 렌즈가 사용되었다. 영상을 획득하는 카메라(CCD Camera)는 촬상부의 크기와 이를 이루고 있는 화소의 크기에 따라 각각 측정영역(FOV: Field of View)과 측정 분해능(Resolution)이 결정된다. 본 연구에서는 유효 감지영역(Active sensing area)이 2/3 inch(12.5 mm × 11.4 mm)이고, 화소가 2448 pixels × 2048 pixels 이며 한 개의 화소크기는 5.3 μm × 5.3 μm 의 특성을 가지는 CCD 카메라를 채택하였다.

광원부와 결상부는 일정 거리와 각도의 기하학적 상관관계에 따라 구성되며 Table 1 과 같은 측정 영역을 확보하였다.

측정장치는 측정 대상물인 성형 판재의 형상에 따라 다양한 위치에 대한 측정을 수행해야 한다. 기본적인 실린더(Cylinder) 및 오목(Concave) 형상의 경우 성형 판재의 횡방향 및 종방향 중심선을 기준으

Table 1 Measuring volume of the developed system

FOV		(H) 57.62° × (V) 44.83°
DOF		1193 mm (Near 1321 mm ~ Far 2514 mm)
Measuring Area	Plane	(H) 1900 mm × (V) 1750 mm
	Depth	1000 mm

Table 2 Specification of rotational and linear motion devices

Section	Y-axis	Z-axis	C-axis
Stroke	1500 mm	400 mm	350°
Speed	Max.10 m/min.	Max.5 m/min.	Max.5 m/min.
Actuator	Ball screw (BLR3232)	GE2005	-
Guide	LM guide (HSR25R)	LM guide (SR25WY)	-
Motor	Servo motor (SGMAS-04A)	Servo motor (SGMAS-08A)	Servo motor (SGMAS-04A)
Reduction	1/5	-	1/170.4

로 영역별 곡선 프로파일을 측정해야 하고, 트위스트 형상은 성형방향(Principal direction)에 따라 일정 각도가 틀어진 상태에서 횡방향 및 종방향을 측정해야 한다.

그리고, 종방향 곡률에 따라서 판재의 높이가 상이하기 때문에 측정장치가 높이 방향으로 이동하며 최적의 측정거리를 유지해야 한다. 따라서 측정장치는 다양한 형상의 측정에 대응하기 위하여 회전 구동부와 횡방향 및 수직방향 직선운동 구동부를 구비한 3 자유도의 구동장치로 구성하였으며, Table 2 와 같은 사양의 각 구동부는 PMAC 제어기를 통한 서보모터 제어로 측정 위치에 대한 정확한 정렬작업을 수행하게 된다.

다중 슬릿 구조화 광원을 이용한 측정장치의 궁극적인 목적은 성형된 곡판의 완성도를 평가하기 위함이기때문에 점진적 롤 성형시스템을 통해 가공되는 곡판 부재가 1 차 성형이 완료되었을 때, 즉 성형 판재의 일측부가 성형시스템에 로딩>Loading) 되어 있는 상태에서 측정을 실시하여 곡판 내 지정된 위치에 대한 곡선 프로파일 정보를 획득하게 된다. 측정장치는 점진적 롤 성형시스템의 왕복성형에 대응하기 위하여 Fig. 5 와 같이 성형시스템 양단에 2 대가 통합되어 운용된다.



Fig. 5 System integration in the incremental roll forming system

3.3 카메라 2 차원 보정

카메라 보정을 위한 보정판 크기는 측정영역과 동일하면 가장 좋고 적어도 측정영역(FOV: Field of view)의 2/3 이상은 되어야 하며 흑백의 체스 패턴은 홀수 × 짝수개를 맞춰야 한다. 그리고 이 보정판의 편평도가 10% 오차를 가질 경우 보정 후 형상복원 결과 오차에 약 0.4% 수준의 영향을 줄 수 있다.^{8,9} 대형 보정판을 적용함에 있어 렌즈의 왜곡 정도, CCD 사양, 보정영상 획득 과정 등 다양한 오차 발생 요인이 잔존하기에 가능한 한 편평도를 확보할 수 있는 재질의 보정판을 제작하기 위하여 강화유리, LCD 도광판용 PMMA, 자작나무 합판(Birch plywood) 판넬들을 제작하여 검토하였다.

상기 요구사항을 만족하며 열, 습도 등의 영향에 의한 변형이 적고 자중에 의한 처짐이 적으며, 사람이 직접 들고 작업을 할 수 있는 조건들을 만족시키기 위하여 최종적으로 아래 사양과 같은 자작나무 합판(Birch plywood)을 이용한 복합 구조 판넬로 제작한 보정판을 적용하였다.

- 보정판 크기: 1400 mm × 1100 mm
- 격자 크기: 100 mm × 100 mm
- 외판 재질: 6.5 t Birch Plywood
- 내부골재: 30 mm × 10 mm 단면적의 Birch plywood 를 이용한 격자 구조
- 편평도: Max. 0.45 mm

Fig. 6 과 같은 보정판을 이용하여 정확도가 높은 크로스 컨트롤 포인트(Cross control point) 추출 방법의 보정법을 적용하였다.⁵⁻⁷ 반복실험을 통하여 일정 위치의 보정판 자세와 획득 영상 수를 도출하여 안정적인 보정결과를 확보할 수 있는 최적화된 절차를 확보하였으며 보정결과 반복 정밀도는 0.1% 이하 수준임을 확인하였다.



Fig. 6 Camera calibration with the calibration panel

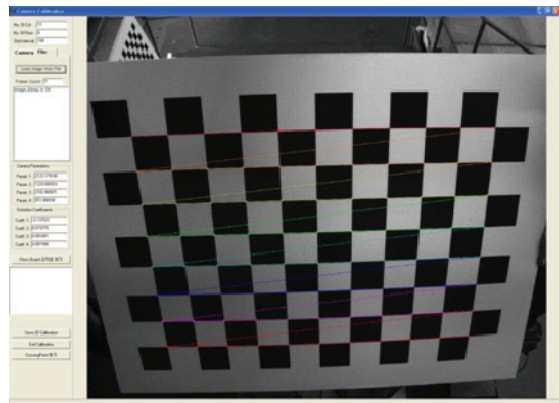


Fig. 7 2D camera calibration module

Table 3 Parameters from camera calibration

Calibration parameter		1st device	2nd device
Focal length (pixel)	f_x	2400.738972	2402.482385
	f_y	2401.31759	2402.896935
Principal point (pixel)	c_x	1232.63405	1223.242162
	c_y	999.688067	1068.02737
Tangential distortion		-0.175683	-0.171784
		0.117464	0.111056
Radial distortion		-0.00073	0.000093
		0.000141	0.000003

카메라 보정은 Fig. 7 의 보정 모듈을 통하여 획득한 40 개 영상을 이용하여 Table 3 과 같은 보정 파라미터를 산출하였으며 이 결과를 통하여 영상 왜곡 보정을 수행하였다.

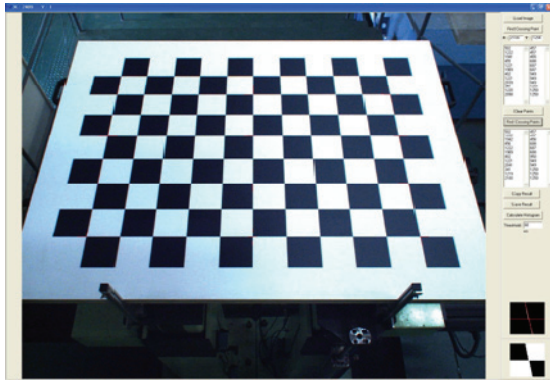


Fig. 8 3D spatial calibration

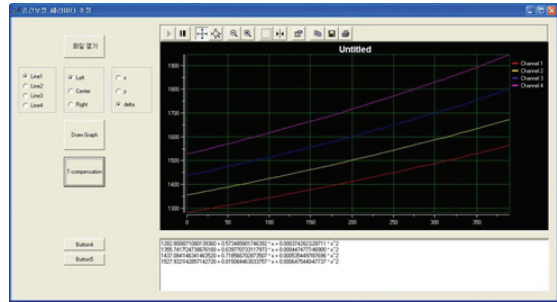


Fig. 9 Data fitting for 3D spatial calibration

3.4 3 차원 공간 보정

카메라에 결상된 레이저 라인 픽셀 위치와 실제 공간에서의 스케일(Scale) 차이를 보정하는 공간 보정 과정은 라인형태의 구조화 광원을 이용할 경우 라인 방향의 스케일(Scale) 보정과 높이 방향 스케일(Scale) 보정이 모두 이루어져야지만 피 측정대상물에 결상되는 라인 구조화 광원의 치수정보를 정확히 획득할 수 있다.

정확한 보정 결과 확보와 표준화된 보정 절차 정립을 위하여 보정판을 높이 방향 구동이 가능한 전동 핀지그(Pin jig) 장치에 설치해 놓고 슬릿 광과 보정판 격자 라인을 일치 시킨 후, 일정 간격으로 높이를 조정하며 각 높이에서의 격자 패턴 위치에 대한 크로스 컨트롤 포인트(Cross control point) 픽셀 정보를 획득하는 방법으로 공간 보정을 수행하였다.¹⁰

Fig. 8 과 같이 기준면 위치에서부터 높이방향 측정영역 범위까지 일정높이 간격으로 보정판 영상을 획득하여 레이저 라인 별로 횡방향에 대한 픽셀 위치정보를 획득하고 높이별 픽셀 위치좌표 데이터를 이용하여 2 차 곡선맞춤(Curve fitting) 방법으로 높이별 공간 보정 변수를 추정하였다. 보정 결과는 Fig. 9 와 같이 나타나며, 높이에 따른 격자 패턴의 크로스 컨트롤 포인트(Cross control point)들을 2 차 곡선 맞춤을 하면 다항식 $y = k_0 + k_1x + k_2x^2$ 의 보정 변수 k_0, k_1, k_2 을 얻을 수 있고 이 결과를 이용하여 입체 공간 상의 이미지 보정을 수행하게 된다.

4. 측정실험 및 결과

4.1 곡판 측정

본 연구에서는 보정 과정에서부터 곡판 측정,

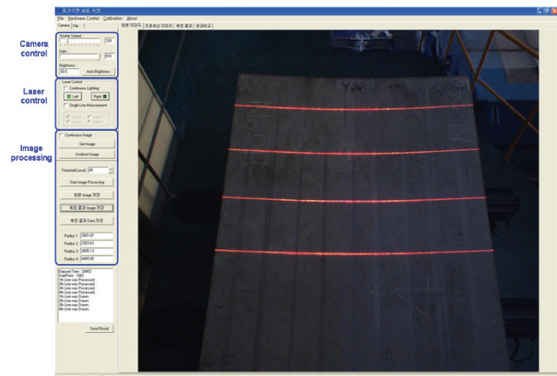


Fig. 10 Measurement system for a curved ship hull plate

결과 분석 등의 전체 프로세스의 통합 운용을 위하여 Fig. 10 과 같은 전용 프로그램을 개발하였으며, 측정장치 선택, 구동장치 제어, 조명 설정을 위한 카메라 셔터 속도(Shutter speed) 및 신호 이득(Gain) 조정, 레이저 슬릿광 전원, 카메라 보정 및 공간 보정, 이미지 획득, 보정이미지를 이용한 형상복원과 측정 등의 기능으로 구성하였다.

구현된 레이저 비전 시스템은 2 차원 및 3 차원 보정을 통한 보정 파라미터 반영작업이 완료 되면 피측정 대상물의 영상을 획득하여 왜곡된 영상을 자동 보정하고, 기 설정된 보정 파라미터에 의하여 3 차원 공간 보정을 수행한 다음 획득 영상에서의 레이저 슬릿광 위치를 광삼각법을 이용한 높이값 복원 알고리즘을 이용하여 계산된다.

점진적 롤 성형시스템을 이용하여 실제 가공되어진 곡판에 대한 측정결과는 Fig. 11 과 같이 원시 데이터(Raw data) 기반으로 1 차 가시화하고 각각의 곡선 프로파일 정보는 곡선맞춤(Curve fitting) 방법으로 후처리하여 최종 측정결과를 산출하게 된다.

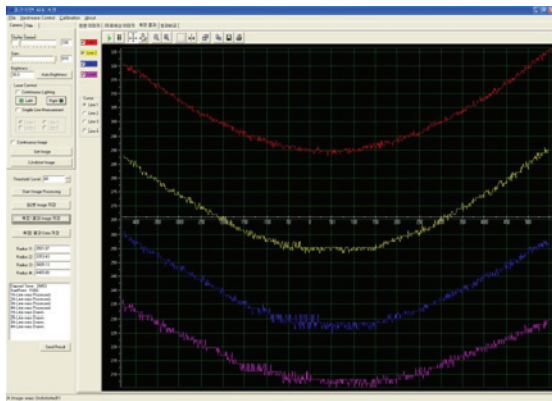


Fig. 11 Measurement result for a curved ship hull plate

개발된 광삼각법 원리의 레이저 비전 시스템에 대한 기본 성능 수준은 높이방향 및 횡방향 복원 결과를 통하여 판단할 수 있으나, 개발 목적인 성형 곡판 측정을 위해서는 높이와 횡방향 정보의 정확성이 모두 반영된 최종 후처리 데이터의 정확도가 더욱 중요하다. 따라서 알고 있는 곡선정보에 따라 NC 가공된 목형 템플릿 시편의 직접 측정을 통하여 실질적인 측정성능 평가를 수행하였다.

4.2 표준 시편 측정 결과

다양한 곡 형상에 대한 적응성과 실질적인 곡판측정 성능 검증을 위하여 물 성형 시스템에 적용 가능한 성형 대상 곡판의 곡선 정보를 활용하여 시편을 제작하였다. 시편은 변형이 적은 자작나무 합판(30 t)를 이용한 목형 템플릿으로 제작하였으며 실제 곡판과 유사한 표면특성을 나타내기 위하여 측정 대상면에 아연 프라이머(Zinc primer)를 도포하였다.

성능 평가를 위한 측정실험은 각기 다른 형상의 목형 템플릿 4 개를 Fig. 12 와 같이 4 개의 레이저 슬릿광에 각각 정렬시켜 놓고, 높이방향 측정 가능영역 내에서 100 mm 간격으로 5 단계 높이 위치에 대해 측정하는 방식으로 수행하였다. 템플릿 종류, 레이저 슬릿광 위치, 측정 높이 위치에 대한 각각의 경우의 수를 조합하여 총 80 개 경우에 대한 실험 결과 데이터를 획득할 수 있었다.

측정결과는 곡 깊이에 대한 오차와 곡선 프로파일 정확도에 대한 오차율로 분석하여 평가하였으며 그 결과를 Table 4 에 나타내었다.

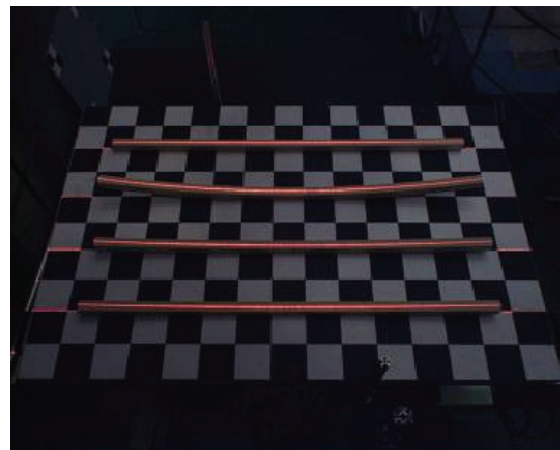


Fig. 12 Measurement for wooden templates

Table 4 Measurement result for performance evaluation

Template	Laser	Curve depth error(mm)			Profile error rate(%)
		Max.	Ave.	Std.Dev.	RMS
A	1	0.66	0.31	0.33	0.52
	2	-0.29	-0.02	0.24	0.26
	3	-0.79	-0.47	0.22	0.75
	4	-0.81	-0.59	0.16	0.86
B	1	0.81	0.45	0.27	1.39
	2	-0.70	-0.42	0.22	1.40
	3	-1.33	-1.10	0.14	3.23
	4	-1.38	-1.14	0.16	3.35
C	1	0.91	0.76	0.12	2.68
	2	-0.47	-0.16	0.28	1.26
	3	-1.24	-0.94	0.22	4.03
	4	-1.09	-0.94	0.16	3.95
D	1	1.27	1.15	0.13	5.87
	2	0.33	0.08	0.26	1.25
	3	-0.70	-0.59	0.10	3.60
	4	-0.94	-0.54	0.36	4.06

광삼각법에 의하여 산출되는 높이값 정보에 대한 검증을 위하여 기준 곡 깊이 위치를 산출하여 목형 템플릿의 NC 가공 설계정보와의 비교를 통해 곡 깊이 오차값을 산출하였으며 최대 오차범위 - 1.38 mm ~ 1.27 mm 의 성능을 확인할 수 있었다. 또한 3 차원 보정결과가 반영된 측정결과의 정확도를 판단하기 위하여 곡선 프로파일 전체에 대한 일치여부를 확인하였으며 NC 가공 설계정보와 측정결과의 일치 정확도를 오차율로 분석해

서 평가하였다. 그 결과 불일치 정도가 약 5% 이내의 범위임을 확인하였고 이러한 실험 결과를 통하여 본 연구에서 개발한 측정장치가 점진적 롤 성형시스템 개발 모델에 적용 가능한 성능을 보유하고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 조선용 대형 후곡판 측정에 수반되는 다양한 제약조건을 효과적으로 극복하기 위하여 냉간 자동화 성형공정 전용 측정시스템을 개발하였으며 실제 측정환경에서의 적용성 및 성능을 실험적으로 검증하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 어두운 색체의 자유곡면 형상을 가지는 측정대상물에 대하여 성형 중 실시간 측정이 가능하도록 4 개의 구조화 광원을 적용한 레이저 비전 시스템을 개발하였으며, 요구조건을 충족하는 측정 정밀도, 측정 소요시간 등이 구현됨을 확인하였다.

(2) 카메라 보정 및 공간 보정 과정을 거쳐 실제 성형곡판 측정환경에서 실험을 수행한 결과 ± 1.5 mm 이하의 측정 정확도가 검증되었다. 또한, 점진적 롤 성형 시스템의 개발 모델로 가공한 곡판(3 m \times 1.5 m)을 대상으로 측정시간을 산출한 결과, 4 개의 구조화 광원으로 1 회 동시 측정 및 데이터 프로세싱에 평균 1 분이 소요되었으며, 곡판 전체 측정에는 성형장치에 의한 부재 이송시간 등을 포함하여 평균 8~10 분 소요되었다.

(3) 측정시스템은 곡판의 임의 위치에 대한 형상 정보를 획득할 수 있도록 3 자유도 구동부를 구비함으로써 측정영역의 확장 유연성을 확보할 수 있었다. 따라서 상기의 검증된 측정성능을 통하여 본 연구에서 개발한 기술이 실제 현장에서 효과적으로 적용되어 자동화 생산 공정에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Shin, J. G., Lee, J. M., and Nam, J. H., "An efficient algorithm for measurement and comparison of large-scale hull pieces in the line-heating process," *Journal of Ship Production*, Vol. 20, No. 1, pp. 60-67, 2004.
2. Lee, D. J., Jung, S. W., Lee, H. H., Lee, K. H., Kim, S. J., Roh, J. H., Han, M. S., Han, J. M., and Son, Y. S., "Development of Cold Forming System For Doubly

- Curved Thick Steel Plate," *Proc. of CASS Autumn Conference*, pp. 180-183, 2008.
3. Lee, D. J., Lee, C. H., Shim, D. S., Lee, K. H., Lim, C. M., Han, M. S., and Ko, M. S., "Development of Cold Roll Forming System for Ship Hull Plates," *Proc. of KSPE Spring Conference*, pp. 111-112, 2011.
4. Park, H. G., Kim, S. W., and Park, J. H., "3-Dimensional Profile Measurement of Free-Formed Surfaces by Slit Beam Scanning Topography," *Transactions of the KSME*, Vol. 17, No. 5, pp. 1202-1207, 1993.
5. 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.
6. Zhang, Z., "Flexible Camera Calibration by Viewing a Plane from Unknown Orientations," *Proc. of the 7th IEEE International Conference*, Vol. 1, pp. 666-673, 1999.
7. Zhengyou Zhang's Homepage, <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/zhang/>
8. Wanga, W., Guoa, B., Li, X., and Cao, J., "Influence Factors Evaluation on High-precision Planar Calibration of Non-metric Digital Camera," *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, pp. 1071-1075, 2008.
9. Graphics & Media Lab, <http://graphics.cs.msu.ru/en/science/research>
10. Park, H. G., Kim, M. C., and Kim, S. W., "System Design and Camera Calibration of Slit Beam Projection for Maximum Measuring Accuracy," *Transactions of the KSME*, Vol. 18, No. 5, pp. 1182-1191, 1994.