

구조물의 6 자유도 변위 측정을 위한 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇 시스템

Visual Servoing-Based Paired Structured Light Robot System for Estimation of 6-DOF Structural Displacement

전 해 민, 방 유 석, 김 한 근, 명 현*
(Haemin Jeon¹, Yuseok Bang¹, Hangeun Kim¹, and Hyun Myung¹)
¹KAIST

Abstract: This study aims to demonstrate the feasibility of a visual servoing-based paired structured light (SL) robot for estimating structural displacement under various external loads. The former paired SL robot, which was proposed in the previous study, was composed of two screens facing with each other, each with one or two lasers and a camera. It was found that the paired SL robot could estimate the translational and rotational displacement each in 3-DOF with high accuracy and low cost. However, the measurable range is fairly limited due to the limited screen size. In this paper, therefore, a visual servoing-based 2-DOF manipulator which controls the pose of lasers is introduced. By controlling the positions of the projected laser points to be on the screen, the proposed robot can estimate the displacement regardless of the screen size. We performed various simulations and experimental tests to verify the performance of the newly proposed robot. The results show that the proposed system overcomes the range limitation of the former system and it can be utilized to accurately estimate the structural displacement.

Keywords: SHM (Structural Health Monitoring), displacement, visual servoing, laser, vision

I. 서론

지난 수십 년 동안 구조물 건전도 진단(SHM: Structural Health Monitoring)에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그 중에서도 구조물의 변위 측정 기술은 건전도 진단 기술 중에서 가장 중요하고 도전적인 분야 중 하나로 간주 되고 있으며 주로 가속도계, GPS, LDVT (Linear variable differential transformer)와 같은 기기들을 사용하여 측정한다. 그러나 위 기기들의 경우 변위를 간접적으로 측정하고, 설치 및 유지가 어려우며, 가격이 비싸다는 단점이 있다. 그 예로 가장 활발히 연구되고 있는 가속도계 센서의 경우 가속도 신호를 두 번 적분하여 변위를 측정하고 신호 이동(signal drift)이 발생하기 때문에 계산된 변위 값이 정확하지 않으며 안정적이지 않다[1]. GPS 역시 최근에 관련 기술이 발전하면서 수 cm 이내의 정확도를 보장한다는 장점이 있지만, 가격이 매우 비싸다는 단점이 있다[2]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 최근 영상 기반의 구조물 변위 측정 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[3,4]. 대부분의 영상 기반 시스템 방식은 측정하고자 하는 임의의 지점에 마커를 설치하고, 고정된 지표면에 설치한 카메라를 이용해 마커의 움직임을 관찰한다. 이러한 영상 기반의 변위 측정 시스템의 경우 직접적으로 변위를

측정하기 때문에 비교적 정확하고, 시스템의 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 하지만, 마커와 카메라 사이의 시야가 확보되지 않은 경우, 예를 들어 날씨가 좋지 않거나 조도가 어두운 경우, 측정이 불가능하다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Myung *et al.* 은 카메라와 스크린 사이가 매우 가까운 양립형 구조 광 로봇을 제안하였다[5]. 시스템의 한 면은 스크린, 레이저 그리고 카메라로 구성되어 있으며 두 면이 서로 마주보도록 설계되었다. 이 시스템의 경우 카메라와 스크린 사이의 거리가 짧기 때문에 날씨 혹은 조도와 같은 외부 환경에 거의 영향을 받지 않고, 따라서 기존 영상 기반의 구조물 변위 측정 시스템의 한계점을 극복할 수 있다. 하지만, 스크린의 크기가 한정되어 있기 때문에 측정할 수 있는 변위의 크기 역시 한정적이라는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 Jeon *et al.* 은 비주얼 서보잉 기법을 이용하여 투영된 레이저의 위치가 항상 스크린 내에 존재하도록 하는 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇을 제안하였다 [6,7]. 본 논문에서는 새롭게 제안된 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇 시스템의 구조 및 기구학 방정식을 소개하고, 시뮬레이션 및 실험을 수행하며 계산된 6 자유도 변위 값을 바탕으로 로봇의 성능을 확인한다. 마지막으로 결론을 말하며 본 논문을 마무리 짓는다.

II. 구조물 변위 측정 로봇

1. 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇

그림 1과 같이 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇은 서로 마주보는 두 면이 쌍을 이루어 한 로봇을 구성한다. 각 면은 한 개 혹은 두 개의 레이저, 스크린, 카메라, 그리고 2 자유도 레이저 기구부(manipulator)로 구성되어 있으며 각 면

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 4. 18., 수정: 2011. 7. 6., 채택확정: 2011. 7. 20.

전해민, 방유석, 김한근: KAIST 건설 및 환경공학과

(inhishand@kaist.ac.kr/richard@kaist.ac.kr/sskhk05@kaist.ac.kr)

명현: KAIST 건설 및 환경공학과, 로봇학제전공(hmyung@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 교육과학기술부 일반연구지원사업(과제번호: 2009-0075397)과 국토해양부의 U-City 석박사과정 지원사업에 의하여 연구되었음.

※ 본 논문은 2011년 26회 ICROS 학술대회에서 초안이 발표되었음.

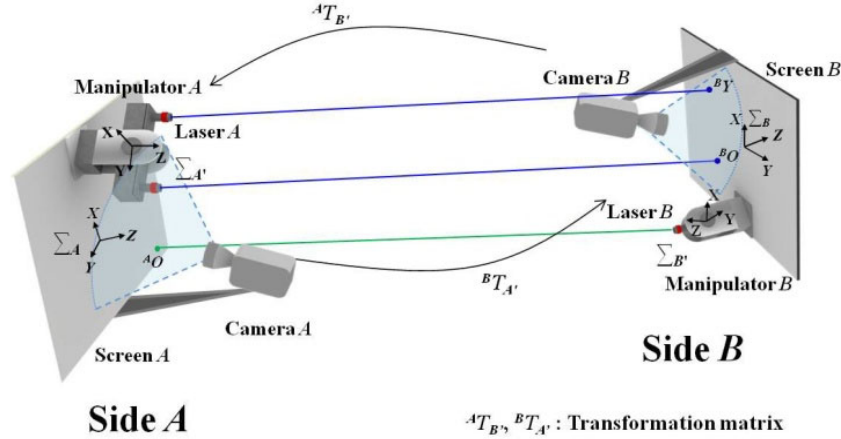


그림 1. 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇의 세부 도식[6,7].

Fig. 1. Architecture of the visual servoing-based paired structured light (SL) robot [6,7].

의 레이저는 반대 면의 스크린을 향해 투영되도록 설계되어 있다. 이 때 투영된 레이저 빔이 스크린을 벗어날 경우, 2 자유도 기구부를 이용하여 항상 스크린 내에 존재하도록 제어한다. 레이저 기구부의 세부 도식은 그림 2와 같다.

두 축으로 회전 가능하도록 설계된 2 자유도 레이저 기구부는 X 축과 Z 축을 중심으로 회전 가능하며, A 면의 경우에는 두 개의 레이저 포인터의 중심이 반대편 스크린의 중점을 향하도록 하고, 레이저가 한 개인 B 면의 경우에는 반대편 스크린에 투영된 한 개의 레이저 포인터가 스크린의 중점을 향하도록 제어한다. 이때 기구부의 제어 각은 투영된 레이저의 스크린 내 위치 값과 목표 위치 값의 차이를 이용하여 계산한다. 이와 같이 영상 정보를 바탕으로 기구부를 제어하는 방식을 비주얼 서보잉 (Visual Servoing) 기법이라고 칭하며 [8,9], 본 논문에서도 이러한 방식을 이용하는 로봇을 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇으로 명칭 하였다.

본 로봇 시스템을 이용한 6 자유도 변위 측정 과정은 그림 3과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 각 카메라로 획득한 스크린 영상을 바탕으로 렌즈의 왜곡을 보정하고, 보정된 영상에서 스크린의 경계선 추출한다. 이 때 스크린의 크기는 알고 있으므로, 스크린 내 투영된 레이저 포인터의 위치를 계산할 수 있다. 레이저 포인터의 현재 위치와 목표 위치를 바탕으로 2 자유도 기구부의 회전 각도를 계산 할 수 있으며, 본 논문에서는 레이저의 목표 위치를 스크린의 중점으로 설

정하여 레이저가 항상 스크린의 중심에 있도록 하였다. 계산된 기구부의 회전각은 PID 제어를 통해 제어된다. 모터의 엔코더 정보를 바탕으로 현재 기구부의 회전 각도를 계산하며, 각 기구부의 2 자유도 회전 값과 총 3개의 투영된 레이저 위치를 바탕으로 두 면 사이의 상대 변위를 계산한다.

2. 기구학 방정식

본 로봇 시스템의 기구학 방정식은 관측된 레이저 포인터의 위치 정보 $m = [{}^A O, {}^B O, {}^B Y]^T$, 2 자유도 기구부의 엔코더 정보, 그리고 6 자유도 변위 $p = [x, y, z, \theta, \phi, \psi]^T$ 사이의 지형적인 관계를 바탕으로 나타낼 수 있다. 여기에서, ${}^A O$ 는 스크린 A 에 투영된 레이저 포인터의 위치이고, ${}^B O$ 와 ${}^B Y$ 는 스크린 B 에 투영된 레이저 포인터 위치 정보이다. 각 축의 선형 및 회전 변위, 다시 말해 6 자유도 변위를 계산하기 위하여 최소 3개 이상의 레이저 포인터 위치가 주어져야 한다. 이는 각 레이저 포인터가 2D 스크린에 투영되므로 각 투영된 레이저 좌표는 x 와 y 정보를 갖기 때문이다. 본 기구학 방정식은 좌표 변환 행렬 ${}^A T_B$ 와 ${}^B T_A$ 를 사용하여 나타낼 수 있다. ${}^A T_B$ 는 B 좌표계를 A 좌표계로 변환하는 좌표 변환 행렬이며 식 (1)과 같이 3축 선형 변환 행렬과 회전 변환 행렬의 곱으로 나타낼 수 있다.

$${}^A T_B = T(x, y, z)R(X, \theta)R(Y, \phi)R(Z, \psi). \tag{1}$$

여기에서 x, y , 그리고 z 는 각 축에 대한 선형 변위이며, θ, ϕ , 그리고 ψ 는 각 축에 대한 회전 변위를 의미한다. 식 (1)의 변환 행렬을 바탕으로 스크린 A 에 투영된 레이저 포인터 ${}^A O$ 를 계산하면 식 (2)와 같다.

$${}^A O = {}^A T_B \cdot {}^B T_B [0LZ_{AB}1]^T \tag{2}$$

여기에서 ${}^B T_B$ 는 B 면의 2 자유도 레이저 기구부의 회전 행렬이며 모터의 엔코더 정보를 바탕으로 ${}^B T_B = R(X, \theta_{Benc})R(Z, \psi_{Benc})$ 와 같이 계산된다. θ_{Benc} 와 ψ_{Benc} 는 레이저 기구부 B 의 X 와 Z 축을 중심으로 회전된 각도이며, L 은 레이저의 Y 축 설치 위치, Z_{AB} 는 A 면과 B 면 사이의 거리이다. ${}^A O$ 와 마찬가지로, ${}^B O$ 와 ${}^B Y$ 를 계산하면 아래의 식과 같다.

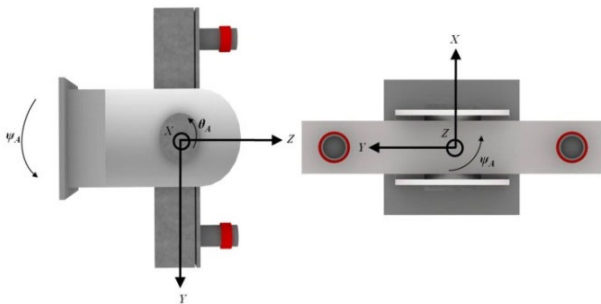


그림 2. A 면 2자유도 기구부의 상면도 및 우측면도.

Fig. 2. Top view and right view of the 2-DOF manipulator on Side A [6,7].

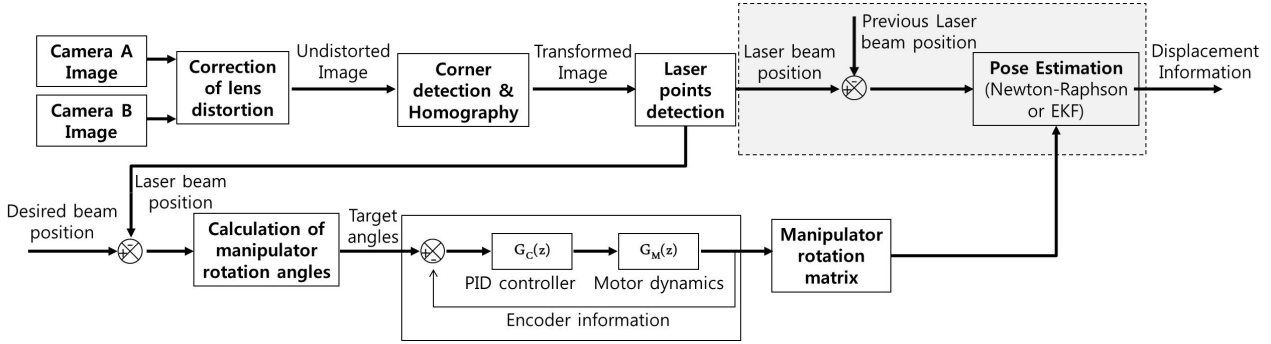


그림 3. 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇의 6자유도 변위 측정 과정[6,7].

Fig. 3. 6-DOF displacement estimation procedure of the visual servoing-based paired SL robot [6,7].

$${}^B O = {}^B T_A \cdot {}^A T_A [0LZ_{AB} 1]^T \quad (3)$$

$${}^B Y = {}^B T_A \cdot {}^A T_A [0-LZ_{AB} 1]^T. \quad (4)$$

식 (2)-(4)를 바탕으로 두 면 사이의 6 자유도 변위를 포함한 기구학 방정식 M 을 식 (5) 와 같이 표현할 수 있다.

$$M = [{}^A O_x \quad {}^A O_y \quad {}^B O_x \quad {}^B O_y \quad {}^B Y_x \quad {}^B Y_y]^T \quad (5)$$

6 자유도 변위 p 는 식 (6)과 같이 뉴턴-랩슨 (Newton-Raphson) 방법을 이용하여 예측할 수 있다.

$$\hat{p}(k+1) = \hat{p}(k) + J_p^+ (m(k) - \hat{m}(k)). \quad (6)$$

여기에서 $J_p = \partial M / \partial p$ 는 식 (5)의 자코비안 행렬이며, J_p^+ 는 자코비안 행렬의 의사 역행렬이다. 그리고, \hat{m} 는 방정식 M 을 통해 예측한 레이저 포인트의 위치 값이다.

본 로봇 시스템을 실제 구조물에 적용하고 두 지점 사이의 상대 변위를 정확하게 측정하기 위해, 초기 기울어진 경사면 혹은 레이저 설치 오차로 인한 초기의 변위 값을 보정해야 한다. 따라서 첫 영상을 바탕으로 계산한 초기의 6 자유도 변위 $p_i = [x_b \ y_b \ z_b \ \theta_b \ \phi_b \ \psi_b]^T$ 를 계산하고, 그 이후의 움직임은 계산된 초기의 변위 값을 고려하여 다음과 같이 측정할 수 있다.

$$T_{new} = ({}^A T_{cal})^{-1} \cdot {}^A T_B \quad (7)$$

여기에서 ${}^A T_{cal}$ 은 맨 처음 획득된 영상을 바탕으로 계산된 6 자유도 변위 값으로 구성된 변환 행렬이며, 식 (1)의 변위 $p = [x \ y \ z \ \theta \ \phi \ \psi]^T$ 값을 초기 변위 값 $p_i = [x_b \ y_b \ z_b \ \theta_b \ \phi_b \ \psi_b]^T$ 로 대체하여 나타낼 수 있다. 초기 위치를 보정한 상대 변위 값을 계산하기 위하여 식 (7)과 같이 변환 행렬 ${}^A T_B$ 에 초기 위치 보정 변환 행렬 ${}^A T_{cal}$ 의 역행렬을 곱한다.

III. 시뮬레이션

비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇의 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 레이저 기구부를 제어하는 DC모터의 성능을 표 1과 같이 가정하였으며, 이를 바탕으로 시스템 및 PID 제어기의 전달함수를 설계하였다.

DC 모터의 연속 전달 함수는 입력 전압과 출력 회전 각도의 관계를 나타내며, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 이 때, $E_a(s)$ 는 입력 전압이며 $\Theta_m(s)$ 는 출력 회전각이다.

표 1. 시뮬레이션에서 사용되는 DC 모터의 성능[6,7].

Table 1. The specific parameter values of the DC motor used in the simulation [6,7].

계수	Meaning	Value
K_t	Torque constant	0.0274 Nm/Amp
L_a	Armature inductance	2.75×10^{-6} H
J_m	Rotor inertia	3.2284×10^{-6} kg · m ² /s ²
R_a	Armature resistance	4 ohm
B_m	Viscous-friction coefficient	3.5077×10^{-6} Nms
K_b	Back-emf constant	2.75×10^{-6} Nm/Amp
T_a	Sampling time	0.001 sec

$$G_M(s) = \frac{\Theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{L_a J_m s^3 + (R_a J_m + B_m L_a) s^2 + (K_b K_t + R_a B_m) s} \quad (8)$$

식 (8)에 표 1의 DC 모터 계수를 대입하고 연속 전달함수를 이산 전달함수로 나타내면 식 (9)과 같다.

$$G_M(z) = \frac{0.001039z^2 + 0.001021z + 9.454 \times 10^{-10}}{z^3 - 1.942z^2 + 0.9425z} \quad (9)$$

루트 로커스 분석(root locus analysis)를 바탕으로 시스템에 맞는 PID 게인 값을 $K_P=2.1$, $K_I=0.21$, 그리고 $K_D=0.021$ 로 설정하였으며 PID 제어기의 전달 함수는 식 (10) 와 같다. PID 제어기가 포함된 시스템의 전달함수는 식 (9)과 식 (10)의 곱으로 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 레이저 기구부의 회전 각도를 제어하는 시뮬레이션을 수행하였다.

$$G_C(z) = \frac{44.1z^2 - 84z + 39.9}{z^2 - 1} \quad (10)$$

본 논문의 시뮬레이션에서는 동적 변위 값을 $(x, y, z, \theta, \phi, \varphi) = (0.1, 0.01, 100, 0.005 \sin(\frac{2\pi}{50}t), 0.001, -0.01)$ 로 설정하고 관측 값에 [-0.25 0.25]cm사이의 임의의 오차를 넣어 실제 실험에서 발생할 수 있는 센서의 노이즈를 고려하였다. 비주얼 서보잉 기능이 포함된 로봇 시스템을 이용한 변위 측정 결과는 그림 4에 나타나 있다.

그림에서 보는 바와 같이 본 시스템을 이용하면 6 자유도 변위를 매우 정확하게 예측할 수 있으며, 별표 구간은 스크

린 크기를 30 cm(너비)×30 cm(높이) 로 가정할 경우 2 자유도 레이저 기구부가 포함된 현 로봇 시스템으로만 측정 가능한 구간이다.

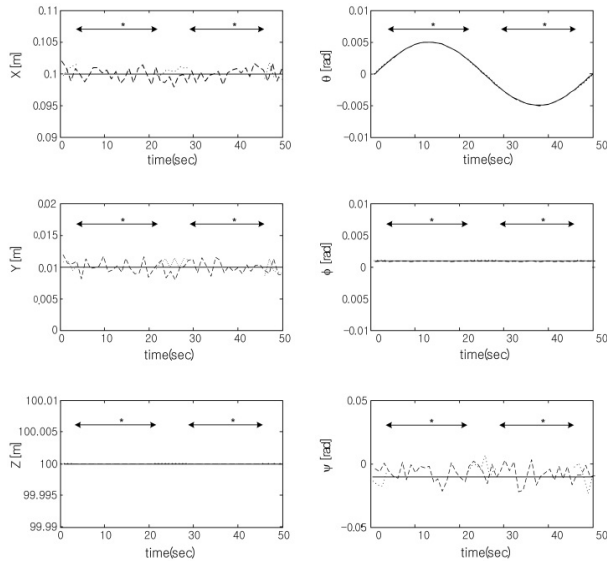


그림 4. 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇을 이용한 6자유도 동적 변위 예측 결과. 실선: 참 값. 일점 쇄선: 2자유도 기구부가 포함된 로봇 시스템을 이용한 예측 변위. 점선: 2자유도 기구부가 포함되지 않은 기존 로봇 시스템을 이용한 예측 변위[6,7].

Fig. 4. Dynamic displacement estimation using the visual servoing-based paired SL robot. Solid line: true value. Dashed dot line: estimation results with the 2-DOF manipulator. Dotted line: estimation results without the 2-DOF manipulator [6,7].

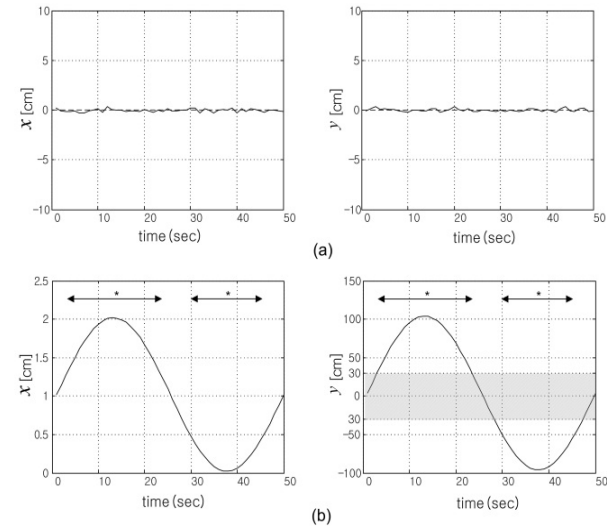


그림 5. 투영된 레이저 위치 좌표 값: (a) 비주얼 서보잉 기능이 포함된 로봇 시스템을 이용한 결과, (b) 비주얼 서보잉 기능이 포함되지 않은 기존의 로봇 시스템을 이용한 결과[6,7].

Fig. 5. The trajectory of the projected laser beam using: (a) the visual servoing-based paired SL robot, (b) the paired SL robot without the visually servoed manipulator [6,7].

그림 5에서는 2 자유도 레이저 기구부가 포함된 현 로봇 시스템과 레이저 기구부가 포함되지 않은 기존의 양립형 구조 광 로봇을 이용할 경우의 투영된 레이저 포인터의 위치를 비교하였다. 그림 5(a)에서 보는 바와 같이 현 시스템을 이용할 경우 레이저 포인터가 스크린 내에 항상 존재하지만 레이저 기구부가 포함되지 않은 로봇을 이용할 경우 그림 5(b)와 같이 투영된 레이저 포인터가 한정된 크기의 스크린 범위를 벗어나므로 별표 구간의 변위는 측정이 불가능하다.

IV. 실험

본 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇의 구현 가능성을 증명하기 위하여 다양한 실험을 수행하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 각 면은 카메라, 한 개 혹은 두 개의 레이저, 스크린, 그리고 2 자유도 기구부로 구성되어 있으며, 그림 7(a)와 같이 각 면의 레이저는 2 자유도 기구부에 의해 그림 내 표기된 화살표 방향으로 회전한다. 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 각 면 2 자유도 기구부의 움직임은 2개의 모터, DSP, 그리고 시리얼 통신 모듈을 이용하여 제어한다. 스크린 크기는 20 cm(너비)×15 cm(높이) 로 설정하였다.

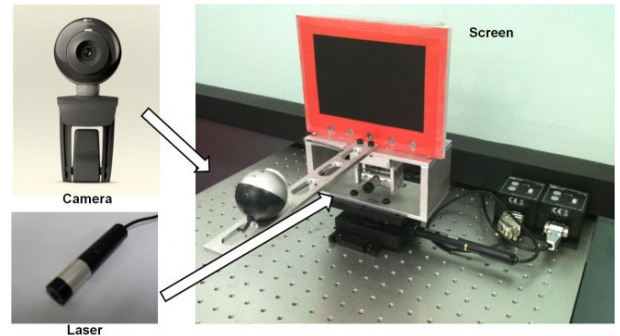


그림 6. 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇의 한 면의 구성[6].

Fig. 6. One side of the proposed visual servoing-based paired SL system [6].

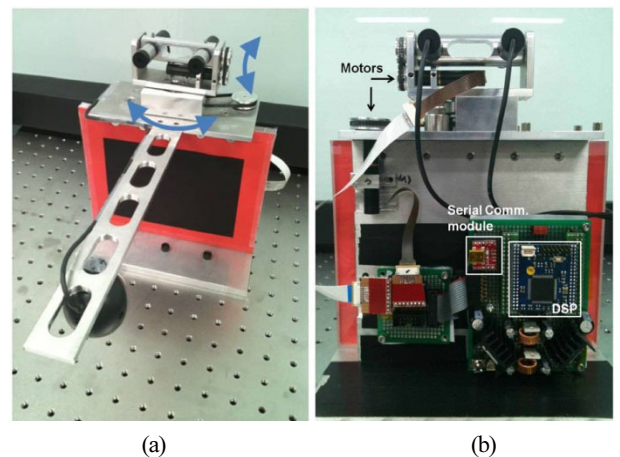


그림 7. 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇 한 면의 정면도(a)와 후면도(b)[6].

Fig. 7. Front view (a) and rear view (b) of one side of the proposed visual servoing-based paired SL system [6].

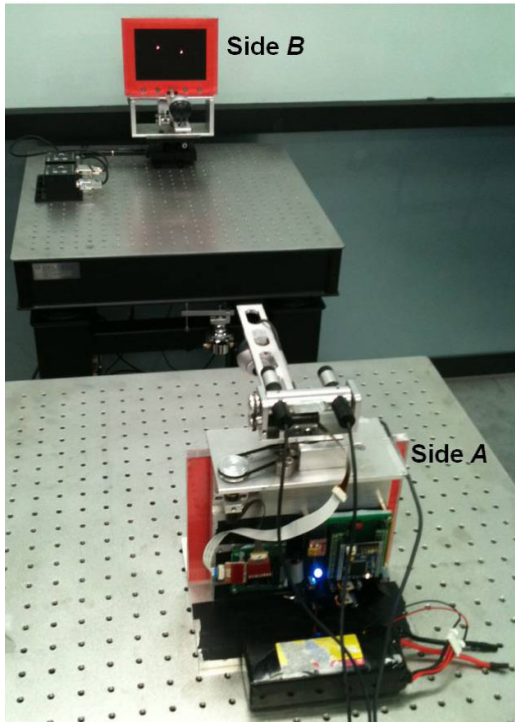


그림 8. 실험 구성. 로봇의 한 면은 테이블 위에 장착하였으며 다른 한 면은 선형 및 회전 움직임이 가능한 모션 스테이지 위에 장착함[6].

Fig. 8. Experimental setup. On side of the robot is laid on the table another on the motorized motion stage which controls the translational and rotational movement [6].

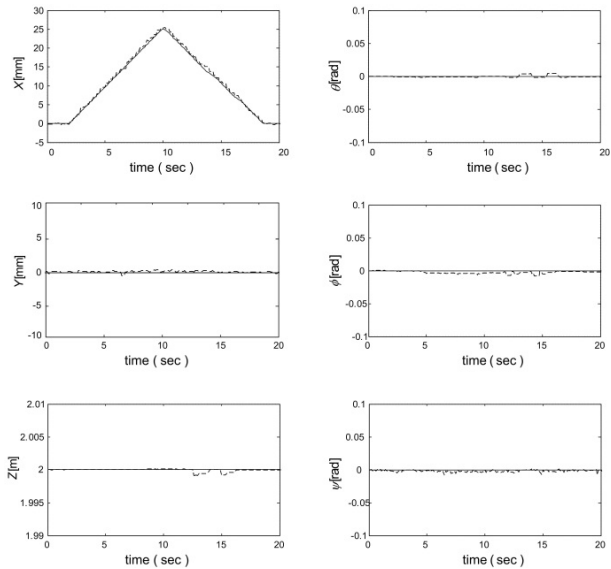


그림 9. X축 방향의 동적 선형 변위 실험 결과. 점선: 모션 스테이지의 참 값. 일 점 쇄선: 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇을 이용하여 계산한 6자유도 변위 값[6].

Fig. 9. Experimental result of the dynamic translational displacement about the X axis. The solid line represents the ground truth. The dashed line represents the estimated displacement by the proposed visual servoing-based paired SL system [6].

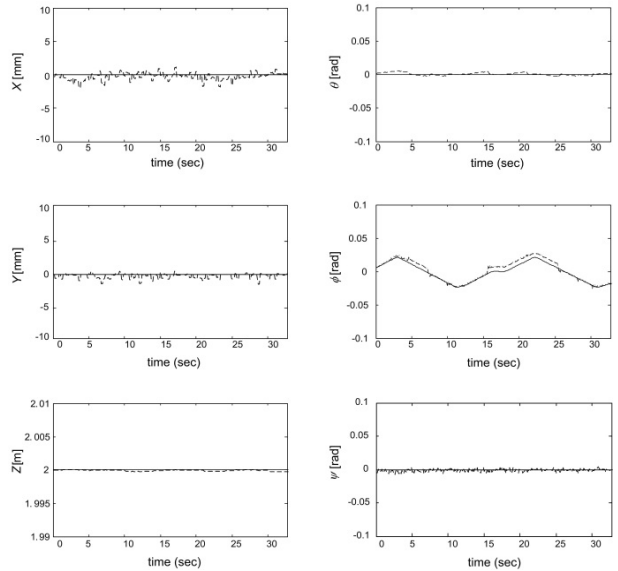


그림 10. Y축 방향의 동적 회전 변위 실험 결과. 점선: 모션 스테이지의 참 값. 일점 쇄선: 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇을 이용하여 계산한 6자유도 변위 값[6].

Fig. 10. Experimental result of the dynamic rotational displacement about the Y axis. The solid line represents the ground truth. The dashed line represents the estimated displacement by the proposed visual servoing-based paired SL system [6].

실험의 구성은 그림 8과 같다. 두 면 중 한 면은 고정된 테이블 위에 설치하였으며, 다른 한 면은 선형 및 회전 변위 움직임이 가능한 모션 스테이지 위에 설치하였다. 본 논문에서는 모션 스테이지를 통해 두 면 사이의 움직임을 인위적으로 발생하도록 하였으며, 모션 스테이지의 움직임 값과 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇을 이용하여 계산된 변위 값을 비교하여 본 로봇의 성능을 증명하였다.

실험 결과는 그림 9와 10과 같다. 모션 스테이지를 통해 두 면 사이의 X 축 선형 변위, Y 축 회전 변위를 주었으며, 본 로봇을 이용하여 6 자유도 변위 값을 예측하였다. 모션 스테이지의 참 값과 비교해 볼 때 본 로봇이 실시간으로 매우 정확하게 변위를 예측하는 것을 증명할 수 있다.

본 실험에서 두 경우의 실험 모두 모션 스테이지의 움직임을 스크린 크기 이상으로 주었으며, 실험 결과를 통해 비주얼 서보잉 기능이 포함되지 않은 기존 양립형 구조 광 로봇과 비교하여 새롭게 제안된 비주얼 서보잉 기반 양립형 구조 광 로봇의 경우 스크린 크기에 상관없이 항상 두 면 사이의 선형 및 회전 변위를 측정할 수 있음을 증명하였다.

V. 결론

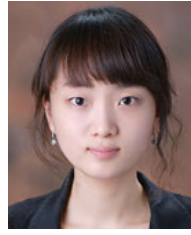
본 연구는 구조물 선형 및 회전 변위 측정이 가능한 비주얼 서보잉 기반의 양립형 구조 광 로봇의 구조 및 기구학 방정식을 소개하였다. 본 로봇은 레이저, 카메라, 스크린, 그리고 레이저의 움직임을 제어하는 2 자유도 레이저 기구부가 한 면을 구성하고 마주보는 두 면이 쌍을 이루어 한 로봇을 이룬다. 이 시스템은 기존의 양립형 구조 광 로봇에 비주얼 서보잉 기술을 도입함으로써 한정된 스크린 크기로 인한 한

정된 변위 측정 범위의 문제점을 극복하였다.

시뮬레이션 및 실험을 통하여 비주얼 서보잉 기반 로봇의 성능을 확인하였으며, 결과를 통해 본 로봇이 기존 연구의 한계점을 극복하였으며, 변위의 크기 혹은 스크린의 크기에 상관없이 두 면 사이의 6 자유도 변위를 정확하게 예측할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] K. T. Park, S. H. Kim, H. S. Park, and K. W. Lee, "The determination of bridge displacement using measured acceleration," *Journal of Engineering Structures*, vol. 27, no. 3, pp. 371-378, Feb. 2005.
- [2] X. Meng, G. W. Roberts, A. H. Dodson, E. Cosser, J. Barnes, and C. Rizos, "Impact of GPS satellite and pseudolite geometry on structural displacement monitoring: analytical and empirical studies," *Journal of Geodesy*, vol. 77, no. 12, pp. 809-822, June 2004.
- [3] Y. F. Ji and C. C. Chang, "Nontarget stereo vision technique for spatiotemporal response measurement of line-like structures," *International Journal of Engineering Mechanics*, vol. 134, no. 6, pp. 466-474, June 2008.
- [4] J. J. Lee and M. Shinozuka, "Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques," *Experimental Mechanics*, vol. 46, no. 1, pp. 105-114, Feb. 2006.
- [5] H. Myung, S. M. Lee, and B. J. Lee, "Paired structured light for structural health monitoring robot system," *Structural Health Monitoring*, vol. 10, no. 1, pp. 49-64, Jan. 2011.
- [6] H. Jeon, Y. Bang, and H. Myung, "A paired visual servoing system for 6-DOF displacement measurement of structures," *Smart Materials and Structures*, vol. 20, no. 4, p. 045019, April 2011.
- [7] H. Jeon, Y. Bang, and H. Myung, "The measurement of 6-DOF displacement using visual servo-based paired structured light robot," *Proc. of the 26th ICROS Annual Conference (in Korean)*, Gwangju, Korea, May 2011.
- [8] S. J. Lim, H. Lim, and Y. S. Lee, "Tip position control of a robot manipulator using visual markers," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 9, pp. 883-890, Sep. 2010.
- [9] C. S. Kim, E. J. Mo, and K. W. Lee, "Image-based robust control of robot manipulators with image Jacobian and dynamics uncertainties," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 14, no. 10, pp. 1047-1052, Oct. 2008.



전 해 민

2008년 한동대학교 공간 환경 시스템 공학부 졸업. 2010년 KAIST 건설 및 환경공학과 석사. 2010년~현재 동 대학원 건설 및 환경공학과 박사과정 재학 중. 관심 분야는 구조물 건전도 진단, 컴퓨터 비전.



방 유 석

2008년 한림대학교 전자 공학과 졸업. 2010년 KAIST 로봇학제전공 석사. 2010년~현재 동 대학원 건설 및 환경공학과 위촉 연구원. 관심분야는 컴퓨터 비전, 비주얼 서보잉, 수상 로봇.



김 한 근

2009년 경희대학교 전자 전과공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전자 전과공학과 석사. 2011년~현재 KAIST 건설 및 환경공학과 박사과정 재학 중. 관심분야는 이동 로봇 네비게이션, AI.



명 현

1992년 KAIST 전기 및 전자 공학과 학부 졸업. 1994년 동 대학원 석사. 1998년 동 대학원 박사. 1998년~2002년 ETRI 선임연구원. 2002년~2003년 (주)이머시스 CTO, 연구소장 겸임. 2003년~2008년 삼성종합기술원 전문연구원. 2008년~현재 KAIST 건설 및 환경공학과 교수, 로봇학제공학 전공 겸임. 관심분야는 로봇 네비게이션, 위치인식, 구조물 건전도 진단, 수상 로봇, 군집 로봇.