

영상표식 기반의 로봇 매니플레이터 끝점 위치 제어

Tip Position Control of a Robot Manipulator using Visual Markers

임 세 준, 임 현, 이 영 삼*
(Sei-Jun Lim¹, Hyun Lim², and Young-Sam Lee¹)

¹Inha University
²Seoul National University

Abstract: This paper proposes tip position control system which uses a visual marker to determine the tip position of a robot manipulator. The main idea of this paper is to introduce visual marker for the tracking control of a robot manipulator. Existing researches utilize stationary markers to get pattern information from them. Unlike existing researches, we introduce visual markers to get the coordinates of them in addition to their pattern information. Markers need not be stationary and the extracted coordinate of markers are used as a reference trajectory for the tracking control of a robot manipulator. To build the proposed control scheme, we first obtain intrinsic parameters through camera calibration and evaluate their validity. Secondly, we present a procedure to obtain the relative coordinate of a visual marker with respect to a camera. Thirdly, we derive the equation for the kinematics of the SCORBOT-ER 4pc manipulator which we use for control of manipulator. Also, we provide a flow diagram of entire visual marker tracking system. The feasibility of the proposed scheme will be demonstrated through real experiments.

Keywords: robot manipulator, visual markers, tip position control, marker tracking

1. 서론

로봇 매니플레이터는 위치 제어 장치로 산업현장에서 물건의 이동, 수송, 용접 등을 위한 중요 도구로 이용되고 있다. 이를 위해 많은 종류의 센서들이 사용되고 있으며 현재 개발 중에 있다.

이런 센서들 중 발전 가능성이 높은 대표적인 분야가 영상 정보를 이용한 분야이다. 영상센서를 이용하면 가변적인 목표물의 추종을 보다 정밀하게 할 수 있으며 외부의 변화에 민감하게 대처가 가능해진다. 영상센서를 이용한 방법은 크게 카메라와 목표물 사이의 상대적인 위치와 자세에 의해 표현되는 위치를 이용하는 제어(position-based control)와 이미지 평면상에 주어지는 목표물의 특징점을 이용하는 제어(feature-based control)로 나눌 수 있다[1]. 이렇게 영상센서는 어떤 물체를 특징점을 추적하거나 현재 위치를 파악하고 물체와의 거리를 측정하는 경우 등 많은 곳에서 쓰이고 있다.

영상의 객체를 인식함에 있어 자연적인 방법은 넓은 환경 범위에서 다양하게 사용이 가능하지만 크게 두 가지 문제를 담고 있다. 첫 번째는 인식에 관한 문제이다. 작은 물체나 먼 곳의 물체를 식별하는 경우 오류발생 확률이 상당히 커지게 되고 복잡한 환경에서의 다양한 대응이 어렵다. 두 번째는 좌표 정보에서의 문제점이다. 어떤 표적 물체까지의 거리와 좌표를 측정하려면 적어도 두 대의 카메라를 사용해야만 한다[2].

본 논문에서 사용한 그림 1과 같은 형태의 영상표식은 주로 위치를 인식하는 SLAM[3]이나 증강현실[4], 내부의 패턴

정보를 읽어 목표 물체와 손잡이의 위치좌표를 얻어와 물체의 손잡이를 잡는 문제[5] 등에 이용되어 왔다. 하지만 이러한 기존의 연구들은 패턴의 정보만을 얻어오거나 정지된 영상 표식의 위치만을 파악하는데 초점이 맞춰졌다.

본 논문의 연구는 영상표식에 대한 기존 방법을 발전시켜 이동하는 영상표식의 위치 정보를 실시간으로 구하고 이를 매니플레이터와 결합해서 매니플레이터의 끝점 위치 제어에 이용한다. 이로 인해 로봇 매니플레이터는 이동하는 영상표식에 대한 추적이 가능해지며 이러한 실시간 영상표식 추적을 통해 기존에는 하기 힘들었던 다양한 분야로의 응용이 가능하다. 이에 대한 예로 영상표식이 어느 물체나 버튼에 부착이 되어 있는 경우를 들 수 있다. 표식에 따른 역할이 무엇인지 미리 학습 되어있다면 영상표식이 임의로 놓여진 어떤 환경에서도 매니플레이터는 스스로 판단하여 해당 물체를 추적해 쉽게 조작 할 수 있다. 이를 통해 산업용 로봇, 서비스 로봇 그리고 가정용 로봇까지 다양한 분야에 응용될 수 있다.

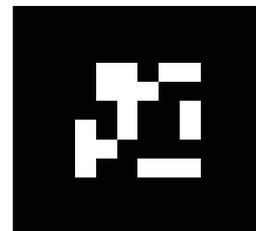


그림 1. 본 논문에서 사용하는 영상표식의 형태[6]. 검은 사각형 안의 문양은 표식 식별번호 (위 패턴의 경우 숫자 0)를 의미한다.

Fig. 1. The form of visual markers [6] that are used in this paper, Patterns in the black square are identity numbers (the above pattern means number 0).

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 5. 7., 수정: 2010. 6. 21., 채택확정: 2010. 6. 27.

임세준, 이영삼: 인하대학교 전기공학부

(ercetec@gmail.com/lys@inha.ac.kr)

임현: 서울대학교 기계항공공학부(hyunlim@snu.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (2009T100100499) 주관으로 수행된 과제임.

이를 검증하기 위해 본 논문에서는 영상표식의 좌표 정보를 매니플레이터의 끝점에 부착된 카메라를 통해 받고 그 위치로 매니플레이터의 끝점이 추적하는 추적성능을 실험한다. 영상표식이 각 축으로 이동 할 때 매니플레이터 끝점의 이동 정보와 매니플레이터와 카메라 사이의 상대좌표의 변화를 도시하여 영상표식의 움직임에 대한 끝점 위치 제어가 가능함을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서는 관련된 연구에 대해 소개하고 본 논문에서 제안하는 방법의 장점에 대해 기술한다. III 장에서는 영상표식 기반의 카메라 모델과 카메라의 내부 파라미터를 구하기 위한 카메라 보정, 그리고 카메라와 영상표식 사이의 좌표 관계에 대해서 다룬다. IV 장에서는 본 논문을 위해 실험에 사용한 SCORBOT-ER 4pc 매니플레이터에 대한 기구학 해석과 경로계획에 대해 유도한다. V 장에서는 영상 표식 추적 시스템에 대한 흐름도와 이에 대한 설명을 기술한다. VI 장에서는 본 논문의 검증을 위해 수행한 실험과 그 결과를 제시 하고 VII 장에서 결론을 맺는다.

II. 관련 연구

영상 시스템과 매니플레이터를 활용한 다양한 방법들에 대한 연구는 계속 되어 왔다.

[7]에서는 자세제어를 위해 영상 시스템이 사용되었다. 로봇 매니플레이터의 말단부에 카메라를 부착시키고 카메라로부터 얻는 이미지 평면상의 특징점 오차를 이용하는 제어시스템에 의해 로봇 매니플레이터의 구동제어를 한다. [8]의 경우 영상센서를 이용하여 로봇 매니플레이터의 끝점 위치를 측정하여 제어시스템의 상태를 측정한 논문이다. [9]의 연구는 로봇 매니플레이터의 제어기 설계를 위해 영상 시스템을 활용한 것으로 특징점을 원하는 위치로 이동 시킬 때 발생하는 오차를 개선하기 위해 강인한 제어기를 설계하였다. [10]은 로봇 매니플레이터와 카메라를 이용한 부품의 형상 인식 및 자동 검사를 위한 시스템 개발에 대해 기술되어 있다. 이와 관련해 정확한 형상인식을 위한 카메라 모델링이 자세히 기술 되었다. 이들 연구는 매니플레이터의 제어를 위해 카메라로부터 얻는 이미지 평면상의 특징점을 사용하지만 이러한 자연적인 특징점은 환경이 복잡하면 안정적으로 얻기가 힘들고 다양한 대응이 힘들다.

두 대의 카메라를 이용하여 매니플레이터의 위치정보를 알아내는 대표적인 연구로는 [2]가 있다. 이 연구는 한 대의 카메라가 아닌 두 대의 카메라를 이용한다. 두 대의 카메라를 이용하면 목표 물체의 정보에 대해 알지 못한다고 해도 목표 물체까지의 좌표를 알아낼 수 있다. 하지만 카메라에 대한 비용이 두 배로 소요되며 영상 처리를 위한 연산 역시 크게 늘어 나는 단점이 존재한다. [11]은 두 대의 카메라를 이용하여 매니플레이터가 사람의 행동과 동일하게 동작하도록 한 연구이다. 주로 원거리 조작으로서 응용가능성이 높은 연구이지만 사람이 반드시 조작을 해야 한다는 점 때문에 지능형 로봇으로의 활용이 어려우며 시스템 구성에 많은 비용이 소요된다.

영상표식과 관련된 연구에는 ARToolKit[4], ARTag[12], ARToolKitPlus[6] 등이 있다. 이 연구들은 증강 현실(그림 2 참조)을 목적으로 영상표식을 사용하였다. 이들 연구는 영상



그림 2. 영상표식이 증강현실(실제 존재하는 실사 위에 가상의 정보를 덧붙인 것)에 이용된 경우.

Fig. 2. Using visual marker for AR(Augmented Reality: Mixed real world with virtual information).

표식을 카메라의 자세를 추정하는 용도로만 사용해서 전역 좌표계를 기준으로 하는 영상표식의 위치를 알아 낼 수 없다. 또한 고정된 프레임 워크가 아니기에 관찰자의 절대 위치도 파악할 수 없다.

매니플레이터와 영상표식을 결합한 최근의 연구로는 [13]이 있다. 이 연구는 로봇 매니플레이터를 이용하여 미래의 일상 생활에 적용시킬 수 있는 새로운 환경을 제안했다. 우리의 일상 생활이 영상표식을 사용하여 규격화된 환경이라고 가정하고 로봇 매니플레이터가 목표로 하는 문이나 서랍을 찾아서 열 수 있다. 하지만 이 시스템은 모든 문이나 손잡이가 동일한 크기와 위치로 통일 되어 있어야만 가능하다는 단점이 존재한다.

III. 영상 시스템

영상을 이용하여 위치좌표를 얻으려면 먼저 카메라 모델을 세우고 이에 따른 카메라 보정과정을 거쳐 내부 파라미터를 구해야 한다. 이러한 전처리 작업이 끝나야 영상표식의 좌표인식 알고리즘을 통해 실시간으로 좌표 값을 구할 수 있다.

1. 핀홀 카메라 모델

3차원 객체 위의 한 점 에서 빛이 발산되면 그 중 하나의 광선만이 핀홀을 통과하고, 통과한 광선은 영상평면에 투영된다. 객체가 영상평면에 어느 정도의 크기로 상이 맺히는지는 초점 거리에 의해 결정되며 그림 3의 카메라 모델을 통하여 어떠한 점 Q가 영상 평면에 맺히는 점의 좌표 (x_c, y_c)는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

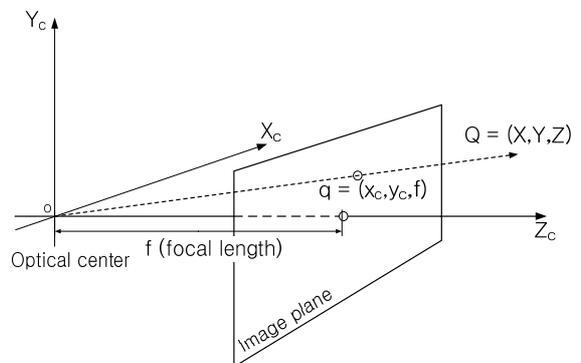


그림 3. 핀홀 카메라 모델.

Fig. 3. Pinhole camera model.

$$x_c = f_x \left(\frac{X}{Z} \right) + c_x, \quad y_c = f_y \left(\frac{Y}{Z} \right) + c_y \quad (1)$$

식 (1)에서 c_x 와 c_y 는 광축이 센서의 중심을 정확히 지나 가도록 카메라를 제조하기는 불가능하므로 보정을 위해 필요한 변수이며 X, Y, Z 는 점 Q 의 X, Y, Z 좌표이다. f_x 는 초점 거리 f 에 영상센서의 개별 요소의 x 축 크기를 곱한 값이며 f_y 역시 초점거리 f 에 영상센서의 개별 요소의 y 축 크기를 곱한 값이다.

2. 카메라 보정

카메라 보정은 카메라의 내부 파라미터와 외부 파라미터를 구하기 위한 과정이다[14]. 보통은 그림 4과 같이 검은색과 흰색으로 이루어진 한 변의 크기를 알고 있는 체커보드를 카메라를 이용하여 촬영을 한다.

내부 파라미터에는 초점 거리(f_c), 카메라 영상 표면의 실제 원점(c), 비틀림 계수(α_c), 왜곡 계수(kc)가 있으며 이를 통해 실제계의 한 점이 카메라로 투영되는 관계는 식 (2)와 같은 행렬 연산으로 표현할 수 있다.

$$q = MQ, \quad q = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ f \end{bmatrix}, \quad M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad Q = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

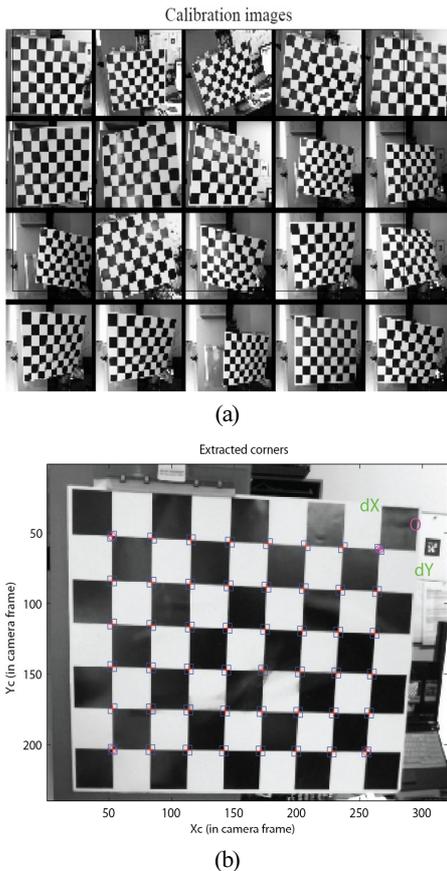


그림 4. 카메라 보정을 위해 촬영한 20개의 체커보드 사진 (a), 각 사진들에 대한 코너추출 과정 (b).

Fig. 4. Twenty checkerboards for camera calibration (a), Corner extraction process for each picture (b).

표 1. 실험에 쓰인 카메라의 보정 결과.

Table 1. The result of camera calibration used for experiments.

	보정 결과			
초점 거리	[294.72	294.98]		
실제 원점	[157.25	120.06]		
비틀림 계수	[0.00000]			
왜곡 계수	[0.01393	-0.09397	-0.00106	-0.00128]
화소 오차	[0.15863	0.14520]		

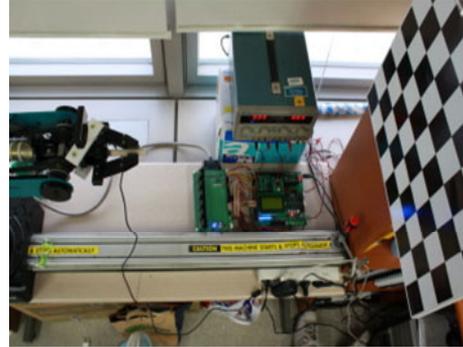


그림 5. 보정결과의 정확도를 검증하기 위한 실험 환경.

Fig. 5. Experiment environment to validate calibration results.

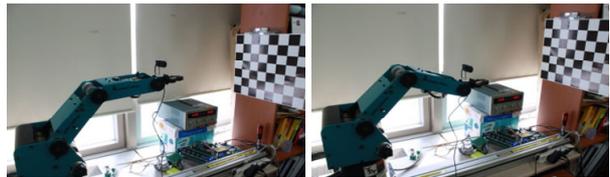


그림 6. 로봇 매니플레이터의 이동 모습.

Fig. 6. Movement of robot manipulator.

식 (2)의 변수들은 3.1절의 카메라 모델에서 정의하였다.

이론적으로는 왜곡(distortion)이 없는 렌즈가 존재할 수 있지만 실제 환경에서의 렌즈는 반드시 왜곡이 발생한다. 방사 왜곡(radial distortion)은 렌즈의 모양에 의해 발생하며, 접선 왜곡(tangential distortion)은 카메라 조립과정에서 발생한다.

위와 같은 수학적 모델을 통해 만들어진 camera calibration toolbox*를 이용하여 보정 과정을 수행하였다. 그림 4와 같이 체커보드를 이용하여 중복되는 해가 존재 하지 않도록 다양한 방향에서 카메라로 사진을 촬영하고 각 그림에 대해 코너를 추출한다.

실험을 위한 카메라 보정 결과는 표 1와 같다. 카메라 보정결과의 타당성을 확인하기 위하여 그림 5와 같은 실험 환경을 구성하였다. 로봇 매니플레이터의 끝점과 체커보드 사이의 거리는 675mm이다. 그리고 그림 6과 같이 상에서 하로 95mm만큼 반복 이동시키며 카메라를 통해 영상을 촬영하였다. 상하 이동 값의 정확도는 매니플레이터 각 축의 엔코더 값과 레이저를 이용하여 확인하였다.

촬영된 영상에서 매니플레이터가 가장 위에 위치했을 때의 사진과 가장 아래에 위치했을 때의 사진을 추출한 후 각 사진의 외부 파라미터를 구하여 계산된 두 좌표의 거리가

* http://www.vision.caltech.edu/bougetj/calib_doc/index.html에서 다운로드 받을 수 있다.

95mm로 일치하는지 확인하였다.

각각의 외부 파라미터로 구해진 병진 이동 벡터와 회전 벡터를 곱하면 식 (3)의 좌표를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} t_{upper} &= [209.68 \quad 231.29 \quad 686.17] \\ t_{lower} &= [214.83 \quad 136.83 \quad 689.63] \end{aligned} \quad (3)$$

이 두 좌표의 벡터 norm을 구하면 94.6630이 나오며 오차는 약 0.3mm로 앞서 구한 내부 파라미터 값의 타당함을 검증할 수 있다.

3. 영상표식의 좌표

영상표식은 적외선 시료를 이용하면 사람의 눈에는 보이지 않지만 로봇은 적외선 카메라를 통해 영상표식에 대한 인식이 가능하다. 이는 영상표식이 실제 공간에서 사람에게 줄 수 있는 불쾌감을 해소 시켜준다. 또한 영상표식은 사진에 크기를 알 수 있으므로 한 대의 카메라로도 해당표식의 좌표와 패턴의 정보까지 상태의 지연 없이 알아낼 수 있어 프로세서의 연산량도 크게 줄이며 복잡한 환경에서의 대응이 쉽고 인식률이 뛰어나다[3].

영상표식은 그림 7과 같은 정사각형 형태이다. 영상표식의 4개의 꼭지점 값은 Z축 값이 모두 0인 평면에 위치한다. 영상 표식의 가운데 좌표를 (x_m, y_m, z_m) 라 하고 카메라의 좌표를 $(x_c(k), y_c(k), 0)$ 이라 하면 영상 표식의 3차원 좌표와 카메라의 좌표의 사이의 영상표식에 대한 측정값 $z(k)$ 는 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$z(k) = h(x(k), 0) = \begin{bmatrix} x_z(k) \\ y_z(k) \\ z_z(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi_{11} \\ \Phi_{22} \\ z_m(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

즉 h 는 전역 좌표계를 기준으로 저장된 영상표식의 좌표 m 을 카메라 좌표계로 변환해주는 함수이다.

식 (4)에서 Φ_{11}, Φ_{22} 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Phi_{11} &= (x_m(k) - x_v(k)) \cos(\theta(k)) \\ &\quad + (y_m(k) - y_v(k)) \sin(\theta(k)) \\ \Phi_{22} &= -(x_m(k) - x_v(k)) \sin(\theta(k)) \\ &\quad + (y_m(k) - y_v(k)) \cos(\theta(k)) \end{aligned} \quad (5)$$

그림 8은 영상표식 좌표계에서 카메라 좌표계로 이미지

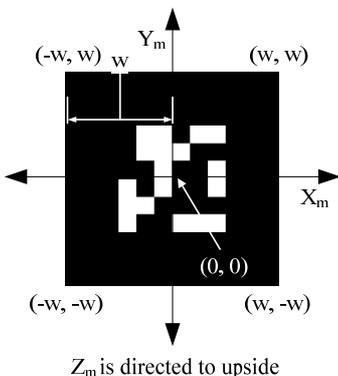


그림 7. 영상표식의 좌표계.

Fig. 7. Coordinates of a visual marker.

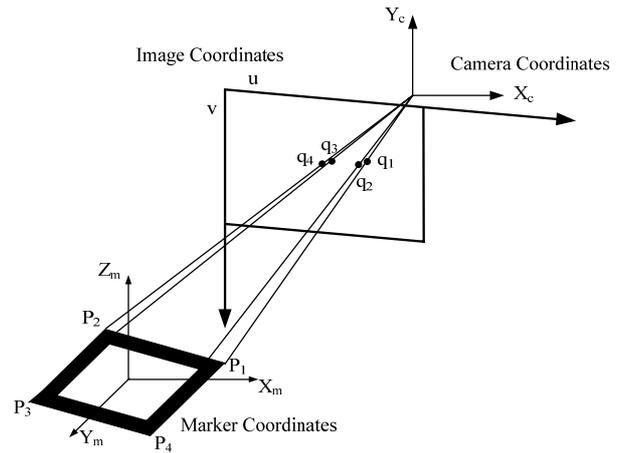


그림 8. 영상표식 좌표계와 카메라 좌표계의 관계.

Fig. 8. The relations between visual marker coordinates and camera coordinates.

평면상에 나타난 관계를 보여준다. 그림에서 P_1, P_2, P_3, P_4 는 크기를 알고 있는 영상표식의 네 모서리 좌표를 의미하며 q_1, q_2, q_3, q_4 는 이미지 평면상에 나타난 네 모서리의 좌표를 의미한다. 영상표식의 중심으로부터 카메라의 좌표를 구하기 위해 [3]에서 제안한 과정을 사용하였다.

카메라의 내부 파라미터는 영상 좌표계 (x_c, y_c) 와 카메라 좌표계의 관계를 기술하는 변환 행렬의 요소이다. 영상 표식으로부터 카메라 좌표계로의 변환행렬 T_{cm} 은 식 (6)과 같이 정의된다. $R_{3 \times 3}$ 은 3차원 공간상의 회전요소이며 $T_{3 \times 1}$ 은 병진 이동요소이다. 카메라 좌표계에서 영상표식까지의 거리는 변환행렬 T_{cm} 에서 병진 이동요소 $T_{3 \times 1}$ 와 같다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & T_{3 \times 1} \\ O_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \\ 1 \end{bmatrix} = T_{cm} X_m \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 Levenberg-Marquardt의 방법을 이용하여 최적화된 회전 변환 $R_{3 \times 3}$ 과 병진 이동 벡터 $T_{3 \times 1}$ 를 구하기 위해서 다음과 같은 평가 함수를 도입한다.

$$J = \sum_{i=1}^4 \left\| \begin{bmatrix} x_c(i) \\ y_c(i) \end{bmatrix} - f \left(\begin{bmatrix} X_m(i) \\ Y_m(i) \\ Z_m(i) \end{bmatrix}, \phi, \varphi, \psi, T, f, s_x, s_y, x_0, y_0 \right) \right\|^2 \quad (7)$$

여기에서 ϕ, φ, ψ 는 회전변환 행렬 $R_{3 \times 3}$ 을 Rodrigues공식을 통해 파라미터화된 값이다. 그리고 s_x, s_y 는 스케일 파라미터이며 x_0, y_0 는 영상 표면의 실제 원점이다. Levenberg-Marquardt의 방법을 이용한 비선형 최적화를 하기 위해 3차 유도로 파라미터화 한 후에 이를 다시 $R_{3 \times 3}$ 로 바꾸어 주어야 한다.

IV. SCORBOT-ER 4pc 기구학 해석

이 장에서는 5 자유도를 가진 SCORBOT-ER 4pc 좌표계와 이를 이용하여 유도한 매니플레이터의 순 기구학과 역 기구학에 대해 기술한다.

그림 9는 본 논문에서 사용한 매니플레이터의 모습이며 각 링크에 대한 SCORBOT-ER 4pc의 좌표계는 그림 10과 같다.

1. 순 기구학

Danavit와 Hartenberg(1955)은 순 기구학 체인에서 각 링크에 대해 오른손 직교 정규 좌표계를 위한 체계적인 표기법을 제시했다[15]. 그림 10의 좌표계를 통해 표 2과 같은 D-H 매개변수를 구할 수 있다.

2. 역 기구학

본 논문에서는 기하학적인 방법을 통하여 역 기구학 해를 유도하였다. 기하학적인 방법은 그 해법이 한 종류의 매니플레이터 밖에 적용이 안되지만 연산이 매우 간단하고 빠른 장점이 있다.

그림 11에서 로봇 매니플레이터의 기저 위치가 (0, 0, 0)이고 끝점이 위치해야 하는 점이 (x, y, z)일 때 다음의 식으로 기저 회전축의 각도 θ_0 와 끝점과 기저의 평면거리 r을 구한다.

$$\theta_0 = A \tan 2(y, x) \tag{8}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} - d_0 \tag{9}$$

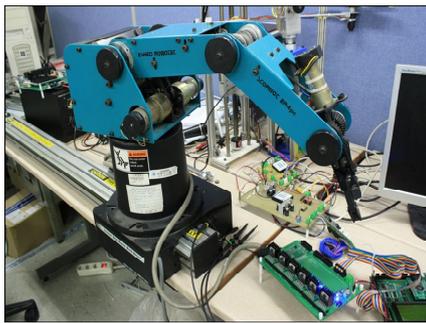


그림 9. SCORBOT-ER 4pc의 모습.
Fig. 9. Features of SCORBOT-ER 4pc.

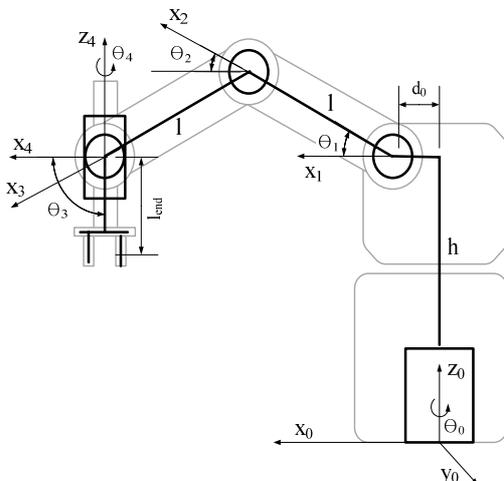


그림 10. SCORBOT-ER 4pc의 각 링크에 대한 좌표계.
Fig. 10. Link coordinates of the SCORBOT-ER robot manipulator.

표 2. SCORBOT-ER 4pc의 D-H 매개변수 표.

Table 2. D-H parameters of SCORBOT-ER 4pc.

	θ	a	d	α
링크 1	θ_0	d_0 : 40mm	h: 354mm	90°
링크 2	θ_1	l: 220mm	0	0°
링크 3	$\theta_2 - \theta_1$	l: 220mm	0	0°
링크 4	$\theta_3 - \theta_1 - 180^\circ$	0	0	-90°
링크 5	θ_4	0	l_{end} : 140mm	0°

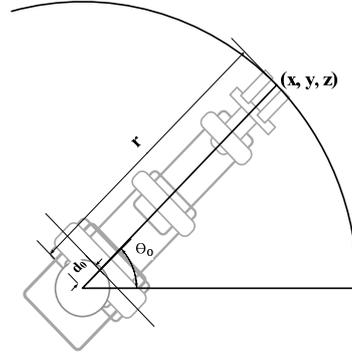


그림 11. SCORBOT-ER 4pc의 평면도.
Fig. 11. A plane figure of SCORBOT-ER 4pc robot manipulator.

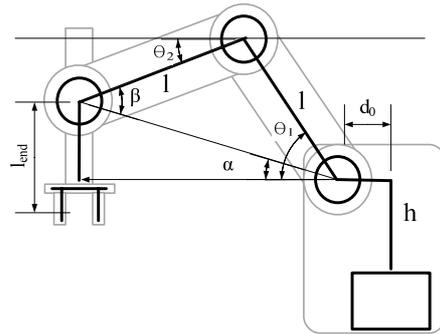


그림 12. SCORBOT-ER 4pc의 측면도.
Fig. 12. Side view of SCORBOT-ER 4pc robot manipulator.

끝점이 지면과 이뤄야 하는 각도 θ_3 는 목표 물체의 방향에 따라 다르다. 하지만 본 논문은 지면에 놓인 영상표식을 추적하는 것을 주 목적으로 한다. 즉 끝점의 형태는 항상 지면을 향해 있는 것을 가정하여

$$\theta_3 = 90^\circ \tag{10}$$

식 (10)이 되어야 한다.

그림 12는 로봇을 옆면에서 봤을 경우의 단면도이다. 로봇의 형태와 각도들을 모두 조합하여 각 α 와 각 β 를 구하면 식 (11), (13)과 같다.

$$\alpha = A \tan 2(l_{end} + z - h, r) \tag{11}$$

$$b = \sqrt{r^2 + (l_{end} + z - h)^2} / 2 \tag{12}$$

$$\beta = A \tan 2(\sqrt{l^2 - b^2}, b) \tag{13}$$

이를 이용하여 1번 축의 각도 θ_1 과 2번 축의 각도 θ_2 는 식 (14), (15)과 같이 구해진다.

$$\theta_1 = \alpha + \beta \tag{14}$$

$$\theta_2 = \alpha - \beta \tag{15}$$

3. 경로 계획

경로 계획은 로봇 매니플레이터의 끝점이 이동하게 되는 경로를 말한다. Cartesian 좌표 시스템에서는 로봇 매니플레이터가 한 점에서 다른 한 점까지 이동할 때 끝점은 직선을 따라 순서대로 이동한다. 식 (16)은 각 관절이 이동하는 시간 동안 동시에 움직이며 일정한 궤적을 그릴 수 있도록 각 축에 대해서 속도와 각도의 비를 일정하게 정의해 준 것이다. 이를 통해 궤적을 이루는 끝점에 대한 역 기구학의 결과에 따른 각 관절의 입력 전압을 결정해줄 수 있다.

$$\frac{\theta_1}{V_1} = \frac{\theta_2}{V_2} = \frac{\theta_3}{V_3} = \frac{\theta_4}{V_4} = \frac{\theta_5}{V_5} = const \tag{16}$$

식 (16)에서 $V_1 \sim V_5$ 는 각 축에 인가하는 전압이며 이는 각 축에 대한 회전 속도를 결정한다. $\theta_1 \sim \theta_5$ 는 각 축이 움직여야 하는 각도이다.

V. 매니플레이터 영상 표식 추적 시스템

그림 13은 전체 시스템에 대한 흐름을 보여준다. 먼저 카메라에서 초당 30프레임의 속도로 영상정보를 받게 된다. 입력부의 카메라에서 받은 영상을 이용하면 식별 알고리즘을 통해 영상표식의 좌표와 영상 표식의 ID값이 출력된다. 이렇게 출력된 좌표를 끝점 위치 제어에 사용하기 위해 매니플레이터의 끝점과 카메라의 위치 그리고 목표 영상표식의 이용 방법에 따라 좌표를 보정한다. 하지만 보정된 좌표는 카메라와 영상표식 사이의 상대 좌표이므로 이를 매니플레이터 기준 좌표계로 변환해 준다.

여기에서 또 다른 입력인 엔코더 입력을 통해 구해진 매니플레이터의 각 링크의 각도 값을 이용하여 4.1절에서 유도한 순 기구학을 이용하면 매니플레이터 끝점의 현재 위치 좌표 값을 얻을 수 있다. 이렇게 얻은 매니플레이터의 초기 위치

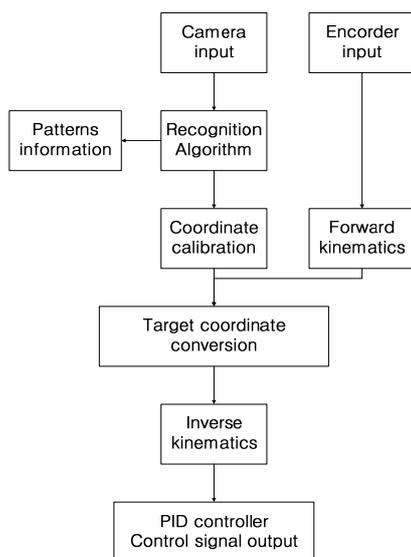


그림 13. 영상표식 추적 시스템 흐름도.
Fig. 13. The flow diagram of a visual marker tracking system.

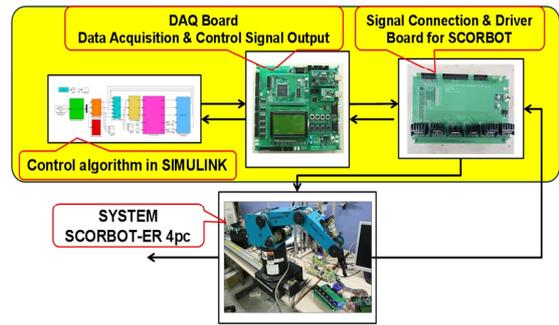


그림 14. 본 논문의 제어 시스템 환경.
Fig. 14. Control system environment of this paper.

좌표와 카메라와 영상표식 사이의 좌표를 이용하면 다음의 식으로 매니플레이터의 목표 좌표를 구할 수 있다.

$$M_{yout} = M_{yinit} - (M_{yinit} - M_{ynow}) - C_{ynow} \tag{17}$$

$$M_{xout} = M_{xinit} - (M_{xinit} - M_{xnow}) - C_{ynow} \tag{18}$$

$$M_{zout} = M_{zinit} - (M_{zinit} - M_{znow}) - C_{znow} \tag{19}$$

카메라의 x좌표는 매니플레이터의 y좌표와 방향이 같으며 y좌표는 x좌표와 방향이 같다. 위 식에서 M_{init} 는 매니플레이터 좌표의 초기값이며 C_{now} 는 영상표식으로부터 카메라까지의 상대 좌표를 나타낸다. 기구 치짐이나 마찰력에 대한 위치 오차는 발생하지 않지만 백래쉬에 대한 오차는 발생한다. 하지만 회전축에 엔코더가 직접 부착된 로봇의 경우에는 이러한 백래쉬 오차가 발생하지 않으며 이를 해결하기 위한 다양한 방법이 고려될 수 있다.

Remark 1: 카메라를 통해 입력되는 영상표식과 카메라 사이의 좌표 값의 정확도는 다음과 같은 방법으로 향상시킬 수 있다.

- 해상력이 우수한 카메라의 사용
- 카메라 입력 신호에 대한 고성능 필터의 설계
- 고성능 프로세서를 이용한 샘플링 타임 향상

이렇게 계산된 M_{xout} , M_{yout} , M_{zout} 를 4.2절에서 유도한 역 기구학 해법으로 풀면 각 링크에 제어 입력신호로 들어가게 된다. 모든 매니플레이터의 좌표는 카메라의 입력제어 입력 신호는 PID제어기를 통해 DC모터를 제어한다.

본 논문에서는 이 흐름도를 그림 14와 같은 시스템을 통해 구현하였다.

VI. 실험 결과

1. 실험 환경

수행된 실험의 환경은 그림 15와 같다. 매니플레이터의 끝점에 카메라가 부착이 되어 있고 영상 표식은 70 × 50 cm의 넓은 판 위의 일축 이동 테이블에 부착 되어 있다. 매니플레이터의 끝점을 기준으로 카메라의 좌표는 (-5, 20, 20)이며 매니플레이터의 끝점과 영상표식의 Z축 거리는 항상 290mm를 유지하도록 하였다. 정밀한 일축 이동 테이블을 이용하여 각 축으로 이동 시켜가며 영상표식을 추적하는 로봇 매니플레이터의 끝점 위치 제어 성능을 검증한다.

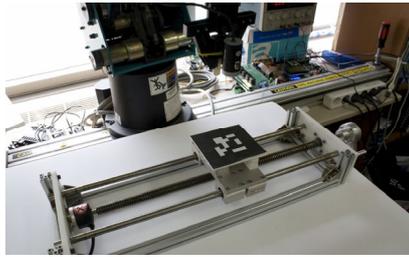


그림 15. 일축 제어 실험 환경.

Fig. 15. Experimental environment for single axis control.

2. 실험 결과

먼저 영상표식의 X축 이동부터 실험하였다. 그림 16은 X축으로 왕복 운동하는 영상표식에 따른 로봇 매니플레이터 끝점의 움직임을 보인다. X축으로 영상표식이 -100에서 250 위치까지 왕복 운동을 할 때 끝점이 X축으로 영상표식을 잘 추적하는 것을 볼 수 있다. 이때 Y, Z축으로의 변화는 입력과 출력 모두 없어 영상표식의 X축 이동으로 인한 커플링은 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 또한 Y, Z축에 대한 끝점 위치의 변화 역시 X축 실험과 동일한 결과를 확인하였다.

3축 동시 이동에 대한 끝점 위치 제어성능을 확인하기 위해 그림 17과 같은 실험을 수행하였다. 모든 축에 대해서 동시에 왕복운동을 하는 경우에도 끝점이 영상표식을 잘 추적함을 볼 수 있다.

그림 18은 영상표식의 이동에 대한 끝점 위치의 오차 정도를 평가하기 위해 영상표식과 카메라 사이의 좌표를 나타낸 것이다. 실험 중에 좌표 오차가 크게 벗어나지 않고 0으로 계속해서 수렴하며 매니플레이터의 끝점이 목표 위치로 추

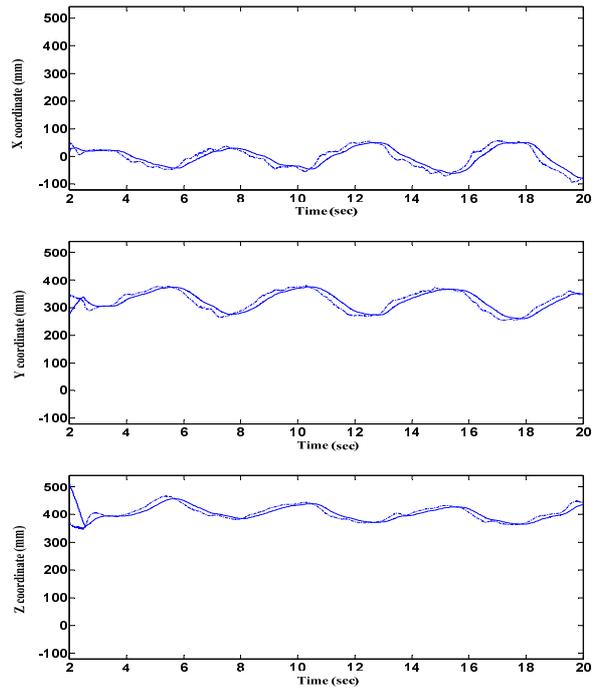


그림 17. 영상표식의 X, Y, Z축 동시 이동에 대한 끝점 위치 좌표(점선: 영상표식의 좌표, 실선: 끝점 위치 좌표).

Fig. 17. Movement of the tip position result of X, Y, Z axis marker moving(dotted line: coordinate of a marker, solid line: coordinate of the tip position).

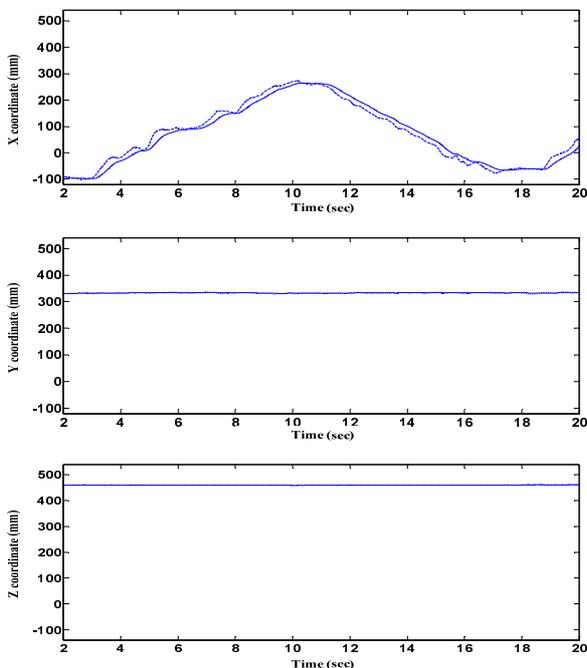


그림 16. 영상표식의 X축 이동에 대한 끝점 위치 좌표(점선: 영상표식의 좌표, 실선: 끝점 위치 좌표).

Fig. 16. Movement of the tip position result of X axis marker moving(dotted line: coordinate of a marker, solid line: coordinate of the tip position).

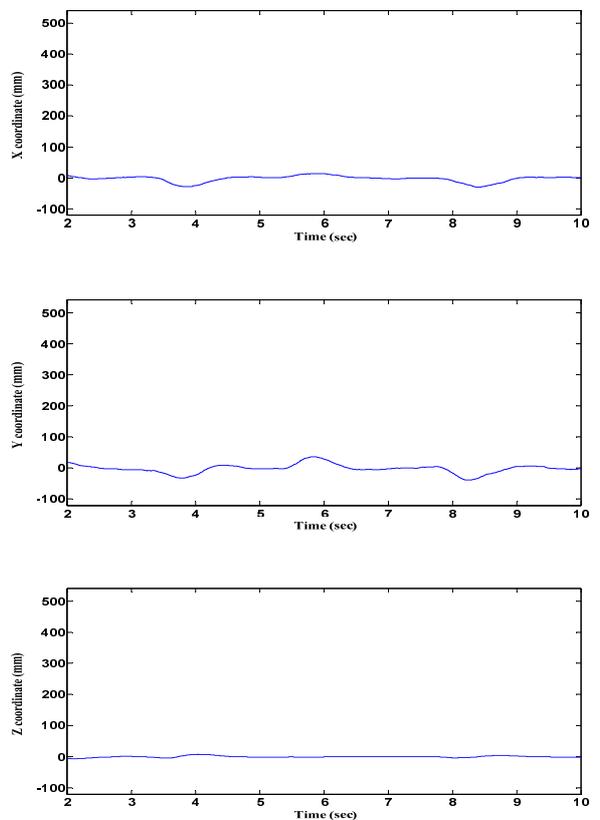


그림 18. 영상표식과 카메라 사이의 상대 좌표.

Fig. 18. Relative coordinates of a visual marker with respect to a camera.

적함을 보여준다. 이 실험들을 통해 영상표식이 이동하는 위치를 따라 실시간으로 로봇 매니플레이터의 끝점 위치 제어가 가능함을 검증하였다.

VII. 결론

본 논문에서는 영상표식과 한 대의 카메라를 이용한 매니플레이터의 끝점 위치 제어 시스템을 제안하였다.

영상표식을 이용하지 않은 영상 시스템 기반의 연구에서는 카메라가 두 대 이상이 필요하거나 특징점을 찾아내기 위해 여러 번 관측을 반복해야 하며 오차를 줄이기 위해 많은 노력을 기울여야 한다. 또한 영상표식을 이용하는 경우에도 정지된 영상표식을 사용하며 내부 패턴 정보만 활용했다.

하지만 기존 연구와는 달리 본 논문에서 제안한 시스템에서는 이동하는 영상표식에 대해서도 추적이 가능하다. 영상표식 추적 시스템의 설계를 위해 다음과 같은 과정을 거쳤다. 먼저 카메라의 내부 파라미터를 구하고 이를 이용하여 영상표식과 카메라 사이의 상대 좌표를 구하는 알고리즘을 기술하였다. 그리고 사용한 매니플레이터의 기구학과 경로계획을 유도한 후 전체 추적 시스템의 흐름도를 계획하고 실제 실험을 위한 시스템을 설계하였다. 마지막으로 실험을 통해 영상표식을 기반으로 하는 매니플레이터의 끝점 위치 제어가 가능함을 보였다.

영상표식의 이동에 따른 입력은 카메라 입력을 통한 좌표 값 필터의 성능에 영향을 많이 받았다. 또한 끝점의 위치에 대한 추종오차를 해결하는 것도 앞으로 해결해야 할 과제이다. 때문에 우수한 필터의 설계와 좌표 인식 알고리즘의 개선과 함께 카메라와 매니플레이터의 하드웨어적인 성능향상이 동시에 이루어진다면 더욱 우수한 성능으로 다양한 산업에서 이 시스템이 응용될 수 있다.

참고문헌

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A Tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, vol. 12, no. 5, Oct. 1996.
- [2] H. J. Lee, M. G. Park, and M. C. Lee, "Visual Servoing of a Mobile Manipulator Based on Stereo Vision," *ICCAS, Gyeongju*, October 2003.
- [3] 임현, 양지혁, 이영삼, 김진걸 "한 대의 카메라와 Fiducial 마커를 이용한 SLAM," *제어 · 로봇 · 시스템학회 논문지*, 제15권 제4호, pp. 353-364, 2009.
- [4] H. Kato and M. Billinghurst, "Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system," *Proc. of the 2nd International Workshop on Augmented Reality (IWAR99)*, Sanfrancisco, USA, Oct. 1999.
- [5] K. Ohara, T. Sugawara, J. H. Lee, T. Tomizawa, H. M. Do, X. Liang, Y. S. Kim, B. K. Kim, Y. Sumi, T. Tanikawa, H. Onda, and K. Ohba, "Visual marker for robot manipulation and its RT-Middleware component," *Advanced Robotics 22*, pp. 633-655, 2008
- [6] W. Daniel and S. Diester, "ARToolKitPlus for pose tracking on mobile devices," *Proc. of 12th Computer Vision Winter Workshop (CVWW'07)*, 2007.
- [7] 지민석, 이영찬, 김진수, 이강웅, "비전을 이용한 로봇 매니플레이터의 자세제어," *전자공학회 논문지*, 제43권 제

1호, pp. 13-20, 2006.

- [8] 신효필, 이종광, 강이석, "비전 센서를 이용한 유연한 로봇팔의 끝점 위치 측정," *제어 · 자동화 · 시스템공학 논문지*, 제6권 제8호, pp. 682-688, 2000.
- [9] 이영찬, 지민석, 백중환, 이강웅, "비전 시스템을 이용한 로봇 매니플레이터의 강인 제어기 설계," *전자공학회 논문지*, 제41권 제1호, pp. 9-16, 2004.
- [10] 왕한홍, 장영희, 김종수, 이종봉, 한성현, "로봇 매니플레이터의 자세 보정을 위한 카메라 모델링," *한국 공작 기계학회, 2002 춘계 학술대회 논문집*, pp. 179-183, 2002.
- [11] J. Kofman, X. Wu, T. J. Luu, and S. Verma, "Teleoperation of a robot manipulator using vision-based human-robot interface," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 52, no. 5, October 2005.
- [12] M. Fiala, "Artag, a fiducial marker system using digital techniques," *Proc. of the Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, 2005.
- [13] H. Tanaka, T. Tomizawa, Y. Sumi, J. H. Lee, H. M. Do, Y. S. Kim, B. K. Kim, T. Tanikawa, H. Onda, and K. Ohba, "Visual marker system for control of flexible manipulator supporting daily living," *ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, pp. 1666-1670, August 2009.
- [14] J. Heikkila and O. Silven, "A four-step camera calibration procedure with implicit image correction," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 1106-1112, 1997.
- [15] J. Denavit and R. S. Hartenberg, "A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices," *ASME Journal of Applied Mechanics*, pp. 215-221, June 1955.



임 세 준

2008년 인하대학교 전기공학과(공학사). 2008년~현재 인하대학교 대학원 전기공학과 석사과정 재학 중. 관심분야는 로봇 공학, 임베디드 시스템, Computer-Vision.



임 현

2008년 인하대학교 전기공학과(공학사). 2010년 인하대학교 전기공학과(공학석사). 2010년~현재 서울대학교 기계항공공학부 박사과정 재학 중. 관심분야는 SLAM, Optimal Estimation, Structure from Motion, 모바일 로봇.



이 영 삼

1997년 인하대학교 전기공학과(공학사). 1999년 인하대학교 전기공학과(공학석사). 2003년 서울대학교 전기컴퓨터공학부(공학박사). 2004년~현재 인하대학교 전기공학부 부교수. 관심분야는 임베디드 시스템, 디지털 제어, CACSD (Computer-aided Control System Design) 소프트웨어.