

# 스테레오 비전정보를 사용한 휴머노이드 로봇 팔 ROBOKER의 동적 물체 추종제어 구현 및 실험

## Implementation and Experimentation of Tracking Control of a Moving Object for Humanoid Robot Arms ROBOKER by Stereo Vision

이 운 규, 김 동 민, 최 호 진, 김 정 섭, 정 슬\*  
(Woonkyu Lee, Dong Min Kim, Ho Jin Choi, Jeong-Seob Kim, and Seul Jung)

**Abstract :** In this paper, a visual servoing control technique of humanoid robot arms is implemented for tracking a moving object. An embedded time-delayed controller is designed on an FPGA(Programmable field gate array) chip and implemented to control humanoid robot arms. The position of the moving object is detected by a stereo vision camera and converted to joint commands through the inverse kinematics. Then the robot arm performs visual servoing control to track a moving object in real time fashion. Experimental studies are conducted and results demonstrate the feasibility of the visual feedback control method for a moving object tracking task by the humanoid robot arms called the ROBOKER.

**Keywords :** humanoid robot arms, visual feedback, time-delayed controller

### I. 서론

휴머노이드 로봇은 인간의 걸음새를 모방하는 것을 넘어 인간의 움직임을 모방하고, 말을 하고 사물을 인식할 수 있으며, 인간의 감정을 표현하는 지능로봇으로 점차 발전하고 있는 추세이다.

인간과 비슷한 움직임을 나타내기 위해서는 많은 자유도가 필요하게 된다. 우선 로봇 팔의 기본적인 움직임을 나타내기 위해서는 6자유도를 갖고 있어야 한다. 휴머노이드 로봇의 상체를 제어하기 위해서는 모두 12관절을 제어해야 하며, 머리 부분의 3자유도 또한 고려해야 한다. 따라서 여러 개의 관절을 움직이는 구동기가 내장되어야 하므로 설계 및 제작이 매우 어렵다. 또한 여러 관절을 제어해야 하는 제어기가 장착되어야 하기 때문에 제어기도 임베디드 형태로 설계되어야 한다. DSP(Digital Signal Processing)나 MCU(Micro Control Unit)가 일반적이지만 휴머노이드와 같이 제어할 관절이 많은 경우는 각 관절의 모터를 제어할 출력 포트가 충분해야 한다.

또한, 인간처럼 작업하기 위해서는 비전 정보를 통한 로봇 팔의 조작도 성능을 높여야 한다. 이러한 작업을 수행하기 위해서는 로봇이 비전정보를 통해 물체의 위치를 파악하고 추종하는 것은 매우 기본적이고 중요한 일이다. 이와 같은 비전기반의 제어방식에는 여러 형태가 있다[1]. 대부분의 로봇응용에서는 동적 물체를 추종하기 위한 비주얼 서보잉 기법에 대해 연구가 진행되고 있다[2-7]. 비주얼 서보잉 방식 중 eye-in-hand 방식이란 카메라가 움직이는 end-effector에 달

려있는 형태를 말하며, eye-to-hand란 카메라가 end-effector를 바라보는 형태를 말한다. 카메라가 놓여 있는 위치에 따라 비주얼 서보잉 제어 방식이 달라지게 된다.

따라서, 본 논문에서는 움직이는 물체를 로봇 머리가 추종하도록 하는 eye-in-hand 방식과 로봇의 머리에 탑재된 비전 정보를 사용하여 움직이는 물체의 좌표를 알아내는 eye-to-hand 방식을 사용한다. 물체의 좌표값(x,y,z position)을 알아낸 뒤에 이 정보를 사용하여 역기구학을 통해 조인트 좌표값을 계산한다. 이 계산된 값이 로봇 머리카나 로봇 팔의 기준 조인트 좌표가 되어 조인트 제어의 입력으로 설정된다.

내부 제어기로는 외란에 강건한 시간지연제어기를 사용해서 로봇의 위치 추종 제어 성능을 높였다. 시간지연제어기는 로봇 팔의 제어나 모터에 적용되어 그 성능을 이미 검증한 바 있다[8,9].

스테레오 비전 처리는 PC를 기반으로 하고, 로봇의 자체 제어는 FPGA를 기반으로 연산량을 분산시켜 실시간 비전 기반 작업이 가능한 시스템을 구현하였다[10].

### II. ROBOKER

#### 1. 전체구조

그림 1은 본 논문에서 사용한 휴머노이드 로봇(ROBOKER: Robot Worker)의 모습이다. 로봇은 한 팔 6관절씩 양 팔 12관절의 구조로 구동되며, 머리에 2개의 관절이 있다. 그리고, 하체는 4륜 이동로봇으로 구성되어 있다. 이 로봇의 각 관절의 위치는 최대한 인간과 유사한 형태로 구성했다. 한 팔을 기준으로 어깨는 3개의 관절로 구동되며, 팔꿈치 2개의 관절, 팔 끝에 1개의 관절로 구동된다.

#### 2. 기구학

카테시안 공간에서 위치 정보(px,py,pz)가 주어질 경우, 조인트 공간의 경로를 설정하기 위해 역기구학이 필요하다. 하지만 카테시안 정보가 셋으로 조인트정보보다 적으므로 이를 해결하기 위해서는 몇 가지 구속 조건이 필요하게 된다. 그림 2는 기하학적인 방법으로 각 조인트의 값을 구해내기

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 10. 29., 채택확정 : 2008. 7. 15.

이운규 : 도답시스템(seespace@hotmail.com)

김동민, 최호진, 김정섭, 정슬 : 충남대학교 메카트로닉스전공

(ellegan@cnu.ac.kr/qorwlcjffa@hotmail.net/insideasuram@hotmail.com/jungs@cnu.ac.kr)

※ 본 연구는 2006년도 충남대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

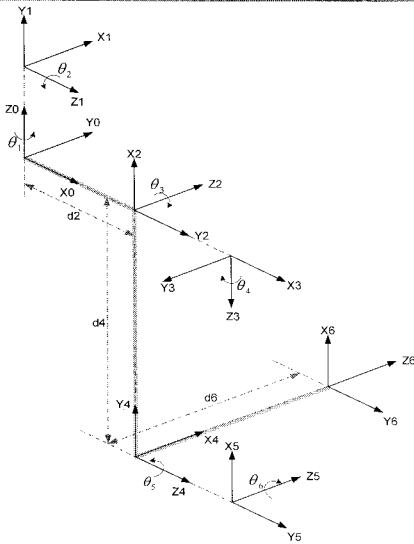
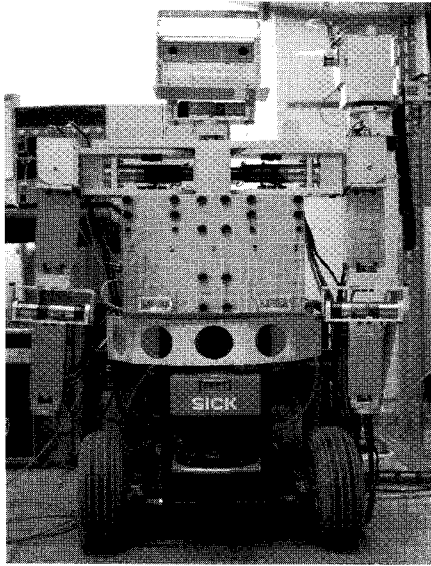


그림 1. ROBOKER의 외관 및 좌표계.  
Fig. 1. The ROBOKER and its coordinates.

위한 직교 좌표를 나타낸다[11].

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$  는 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_1 = \pi/2 \pm \varphi_1, \theta_2 = \pi/2 \pm \varphi_2, \theta_3 = \pi/2 - \varphi_3 \quad (1)$$

여기서

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \frac{p_y x + p_x r}{p_x x + p_y r}, \varphi_2 = \tan^{-1} \frac{r}{|b|}, \varphi_3 = \tan^{-1} \frac{c - d_2}{a}$$

$$R_{xyz} = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}, c = \frac{R_{xyz}^2 + d_2^2 - d_4^2}{2d_2}$$

$$r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 - c^2}, b = p_z, a = \sqrt{R_{xyz}^2 - c^2}$$

나머지 조인트  $\theta_4, \theta_5, \theta_6$  는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left( \frac{s_4}{c_4} \right) \theta_5 = \frac{\pi}{2} + \tan^{-1} \left( \frac{s_5}{c_5} \right) \theta_6 = \tan^{-1} \left( \frac{s_6}{c_6} \right) \quad (2)$$

여기서

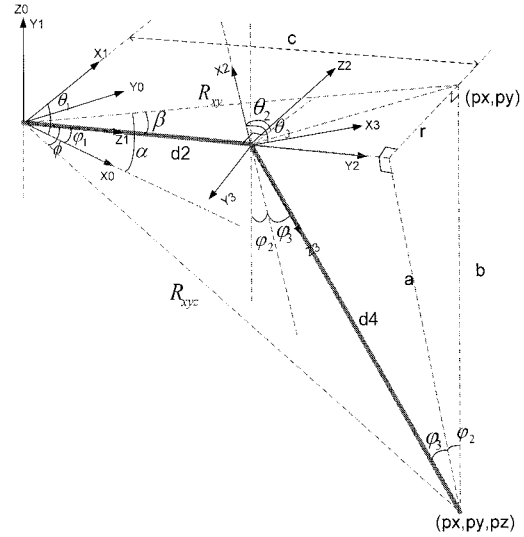


그림 2. ROBOKER 직교 좌표계.  
Fig. 2. The cartesian coordinates.

$$\begin{aligned} s_4 &= -C_1 S_2 a_x - S_1 S_2 a_y + C_2 a_z \\ c_4 &= (C_1 C_2 C_3 + S_1 S_3) a_x + (S_1 C_2 C_3 - C_1 S_3) a_y + S_2 C_3 a_z \\ s_5 &= (C_1 C_2 S_3 - S_1 C_3) a_x + (S_1 C_2 S_3 + C_1 C_3) a_y + S_2 S_3 a_z \\ c_5 &= (C_1 C_2 C_3 C_4 + S_1 S_3 C_4 - C_1 S_2 S_4) a_x \\ &\quad + (S_1 C_2 C_3 C_4 - C_1 S_3 C_4 - S_1 S_2 S_4) a_y + (S_2 C_3 C_4 - S_2 S_3) a_z \\ s_6 &= -(C_1 C_2 C_3 S_4 + S_1 S_3 S_4 + C_1 S_2 C_4) n_x \\ &\quad - (S_1 C_2 C_3 S_4 - C_1 S_3 S_4 + S_1 S_2 C_4) n_y - (S_2 C_3 S_4 - C_2 C_4) n_z \\ c_6 &= -(C_1 C_2 C_3 S_4 + S_1 S_3 S_4 + C_1 S_2 C_4) s_x \\ &\quad - (S_1 C_2 C_3 S_4 - C_1 S_3 S_4 + S_1 S_2 C_4) s_y - (S_2 C_3 S_4 - C_2 C_4) s_z \end{aligned}$$

### III. 제어기 설계

#### 1. 비주얼 서보잉 제어

비주얼 서보잉 제어는 카메라가 어디에 놓여있는가에 따라 제어방식이 나뉜다. 그림 3은 카메라를 통해 물체의 좌표를 인식하고 카테시안 좌표의 명령어  $X_D^c$  와 함께 사용되어 보정하는 제어블록을 나타낸다. 보정된 신호는 역기구학을 통해 조인트 명령어  $q_d$  로 바꾸어 제어하게 된다.

그림 4는 실제 구현된 제어 블록도이다. PC에서 대부분의 비전신호를 처리하고 제어신호를 FPGA 임베디드 제어기로 보내 로봇을 구동한다.

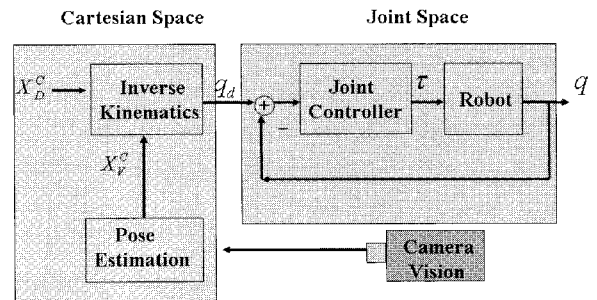


그림 3. 비주얼 서보잉 제어 블록.  
Fig. 3. Visual servoing control block diagram.

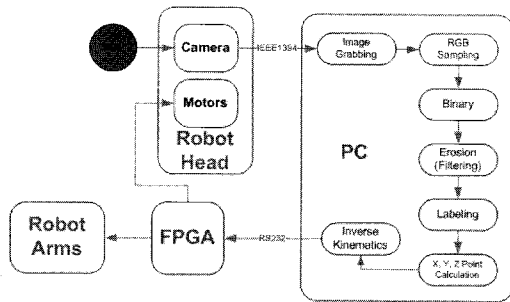


그림 4. 비주얼 서보잉 제어 전체구조.  
Fig. 4. Visual servoing control process.

2. 시간 지연 제어

본 논문에 사용된 시간지연 제어 방식은 이전의 정보를 사용해서 불확실성을 없애는 강건제어 방식으로 그 구조가 간단하여 로봇 제어에 많이 사용된다. 로봇의 동역학식은 다음과 같이 나타내어 진다[12].

$$D(q)\ddot{q} + h = \tau \tag{3}$$

여기서,  $D(q)$  는  $n \times n$ 관성행렬이고,  $\tau$  는  $n \times 1$ 토크 벡터, 그리고  $h = C(q, \dot{q}) + G(q)$  로 콜리오리스와 중력힘이다. 제어입력은 다음과 같다.

$$u = \ddot{q} \tag{4}$$

(3)으로부터  $h$  는 다음과 같이 표현된다.

$$h = \tau - D(q)\ddot{q} \tag{5}$$

짧은 시간의 샘플링 시간을 사용하여 이전의 값을 저장했다가 사용하면  $h(t) \approx h(t - \lambda)$  로 나타낼 수 있다. 따라서 (5)로부터 실제 얻을 수 있는 모델은 다음과 같이 이전의 정보를 사용해서 대략적인 값으로 나타낼 수 있다.

$$\bar{h} = \tau(t - \lambda) - \bar{D}\ddot{q}(t - \lambda) \tag{6}$$

여기서  $\lambda$  는 샘플링 시간이다.

결과적으로 PD제어기를 사용하는 제어법칙은 다음과 같다.

$$\tau = \bar{D}(\ddot{q}_d + K_D\dot{e} + K_P e) + \bar{h} \tag{7}$$

여기서,  $K_D, K_P$  는 제어기 이득 행렬이다.

3. 임베디드 FPGA 제어기 설계

FPGA는 제어기로서 외부에서 전송되는 각 관절의 각도와 로봇의 각 관절에 부착된 엔코더를 이용하여 로봇을 제어한다. 이를 위해 FPGA에는 주 컨트롤러와 PWM 생성기가 포함되어 있으며, 외부와의 통신을 위한 RS232 신호 변환기도 포함하고 있다. 여기서 주 컨트롤러는 시간지연제어기이다. 총 12개의 관절을 제어하기 위해 엔코더 카운터, 컨트롤러, PWM 생성기는 12개가 병렬 구조로 설계된다. 즉, 외부에서 12관절 각각에 해당하는 엔코더 신호와 관절의 각도를 입력받아 이를 이용해 제어 연산을 수행하고 제어 결과로 PWM 신호가 출력되는 구조이다. 이러한 기능을 수행하는 모듈을 설계하고 이 모듈들을 조합하여 하나의 로봇 제어용 FPGA 프로그램으로 설계를 완성했다[12].

IV. 영상처리

스테레오 영상 처리를 위해 사용한 카메라는 Point Grey Research사의 Bumble Bee 카메라를 사용하였다. 카메라로부터 이미지 데이터는 이미지 Grabbing함수를 사용하여 특정 조건에 따라 이진화 과정을 거치며, 주변의 잡음을 제거하기 위해 침식 연산을 사용하여 필터링 과정을 거치게 된다. 다시 라벨링 과정을 거쳐 대상의 구분을 해 주게 되면, 이 데이터를 기반으로 면적 중심법으로 좌, 우 카메라에서의 대상의 중심 좌표를 산출하게 되며, stereo vision에서의 깊이 추출 공식을 사용하여 대상의 Z축 정보를 산출하게 된다. 그림 5에서는 위에서 설명한 image processing 과정의 흐름을 보여준다. 그림 6은 라이브러리에서 제공하는 함수를 사용하여 카메라로부터 영상 데이터를 얻어오는 것을 나타낸다. 얻어온 데이터는 R, G, B를 각각 8비트씩 할당한 이미지 버퍼에 저장하게 된다. 그리고, 빨간색 영역에 해당하는 값들만 TRUE로 나머지는 FALSE로 저장시키게 된다. 그림 7은 원본 이미지에서 붉은색 영역의 이진화를 수행한 결과를 나타낸다. 왼쪽 원본 이미지에서 조건보다 밝은 영역은 TRUE로, 어두운 영역은 FALSE로 처리를 하였다.

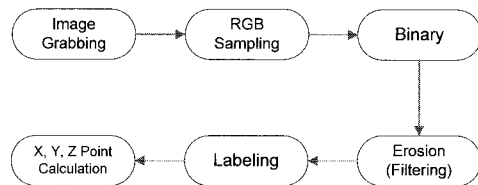


그림 5. 영상 처리 과정.  
Fig. 5. Image processing procedure.

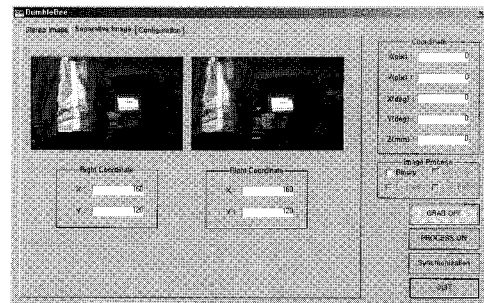


그림 6. 영상 획득.  
Fig. 6. Capture of images.

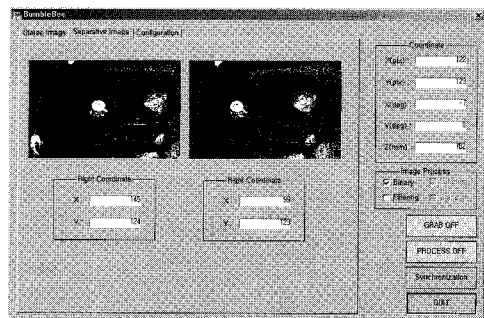


그림 7. 영상 이진화.  
Fig. 7. Digitized images.

다음으로 침식 연산을 수행하게 된다. 침식(erosion)연산은 다양한 구조의 마스크를 통하여 영상 내에서 구조 요소의 모든 요소가 영역 내에 존재하면 마스크의 가운데 지점의 값을 1로 설정한다. 본 논문에서는 3×3 마스크를 사용하여 처리하였다. 그림 8은 이진화 된 영상에 대한 침식 연산을 적용하여 잡음을 제거하는 필터링 기능을 구현한 모습이다. 그림 9에는 존재했던 잡음이 제거된 것을 확인할 수가 있다.

그림 9는 필터링된 이미지에서 라벨링을 한 모습이다. 스테레오 영상에서의 깊이를 추출하기 위해서는 두 영상에서의 X, Y축의 변수와 카메라 사이의 거리인 baseline, image plane과 카메라 렌즈 사이의 거리에 관한 정보가 있어야 하며, 삼각법에 의한 공식이 만들어 지고 깊이를 계산 할 수 있다. 그림 10은 카메라의 좌, 우 영상을 처리하여 깊이를 추출한 모습이다.

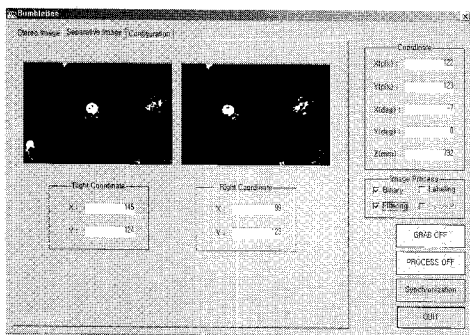


그림 8. 침식에 의한 필터링.  
Fig. 8. Filtering of images.

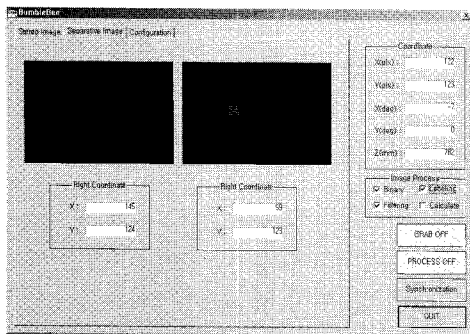


그림 9. 영상의 라벨링.  
Fig. 9. Labeling of images.

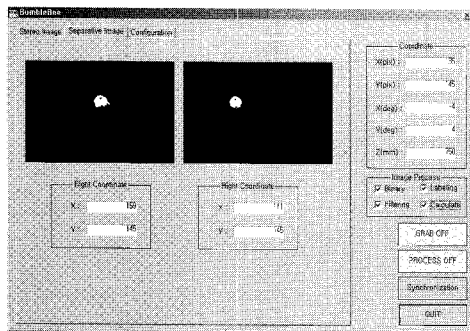


그림 10. 영상처리에 의한 좌표계산.  
Fig. 10. Calculation of coordinates.

V. 실험 결과

1. 로봇 헤드의 움직이는 공 추종

로봇 머리는 가장 간단한 형태로 tilt, pan의 2개의 회전 조인트를 사용한다. 파란 색의 공을 움직이면서 로봇 머리가 따라서 움직이는 것을 실험하였다. 그림 11은 움직임 중에 몇 개의 상을 나타낸 것이다.

2. 로봇 팔의 움직이는 공 추종

다음으로 그림 12와 같이 로봇의 시야에 붉은 공을 위치시키고 공이 움직일 때 로봇의 손 끝이 그 공을 추종하는지를 실험함으로써 비전 시스템의 성능을 확인했다. 단, 로봇 팔이 닿지 않는 거리에 공이 위치할 경우 로봇 팔을 최대한 공에 가까운 곳에 위치하도록 설정했다.

PC에서 vision 데이터 처리와 PC의 시리얼 통신을 이용해 로봇을 동시에 제어하는 경우 비전 처리 속도는 약 170ms/frame 이다. 공을 카메라를 기준으로 X축으로 미세한 진자운동을 주어 움직였다. 공의 중심점 좌표의 변화는 그림 13과 같다.

그림 13을 보면 입력되는 영상의 변화가 상당히 거칠게 나타난다. 그 이유는 영상 처리 시간이 170ms로 지나치게 길기 때문이다. 만일 이 값을 로봇의 제어 입력으로 바로 사용할 경우 로봇의 제어가 거의 불가능하다. 그래서 이 신호를 FIR 필터를 통해 사인파 형태로 변화 시킨 후 로봇 제어의 제어

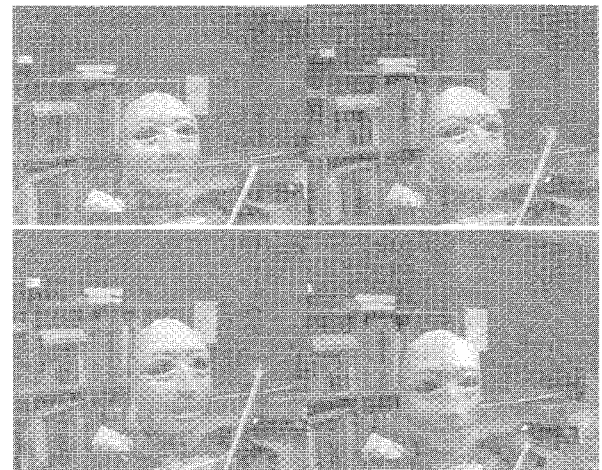


그림 11. 로봇 머리 움직임.  
Fig. 11. Robot head tracking task.

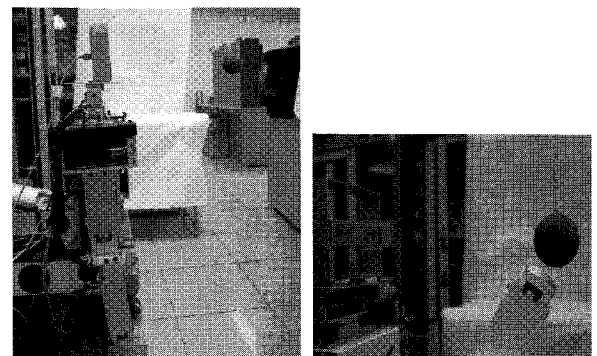


그림 12. Vision 기반의 로봇제어 실험 환경.  
Fig. 12. Robot tracking task of a moving object.

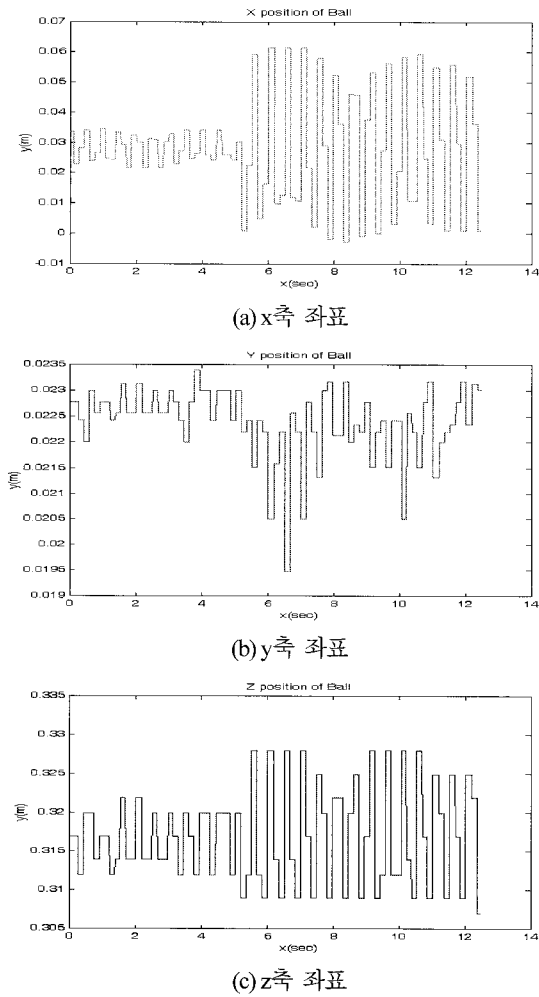
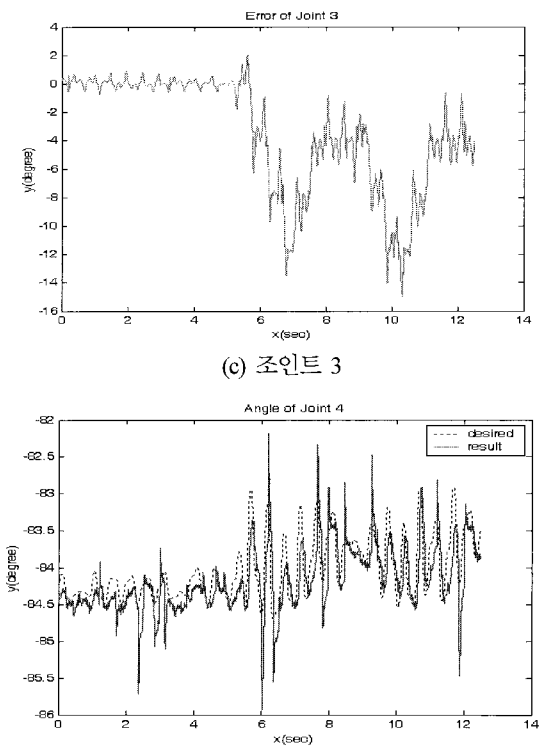
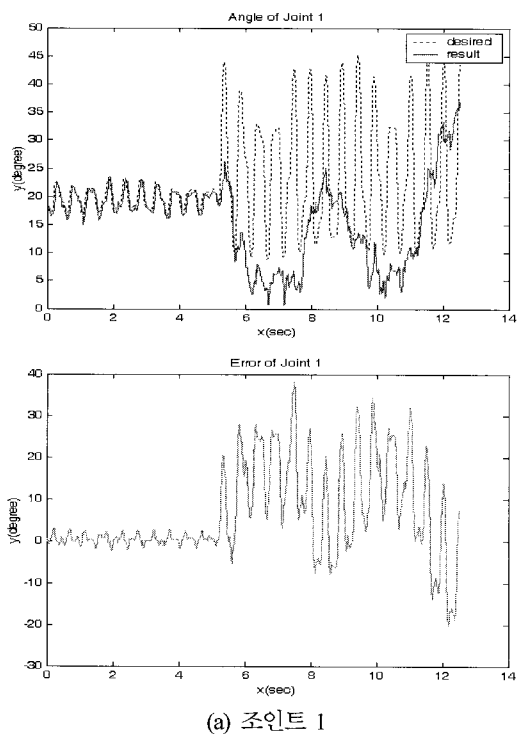
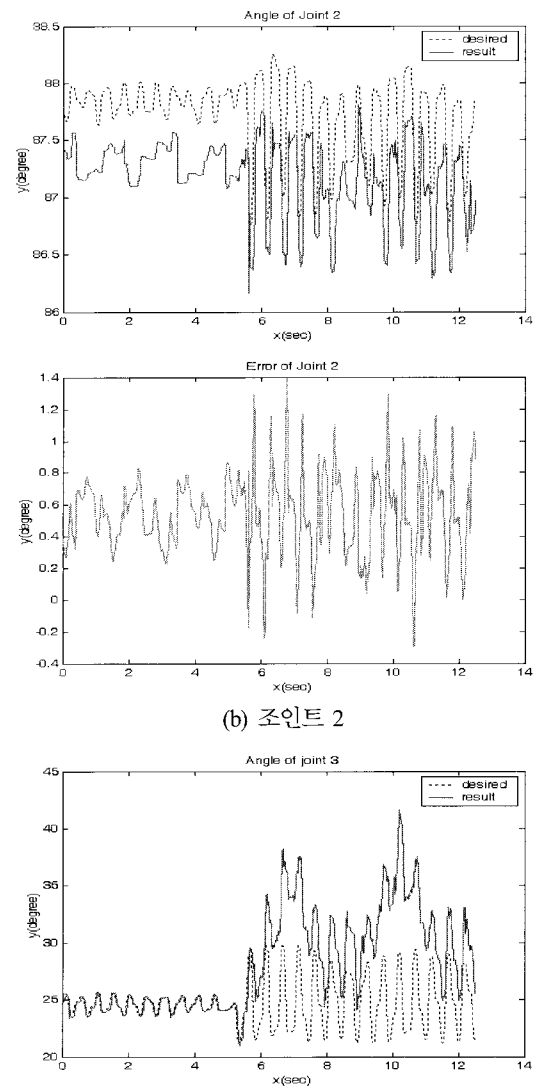
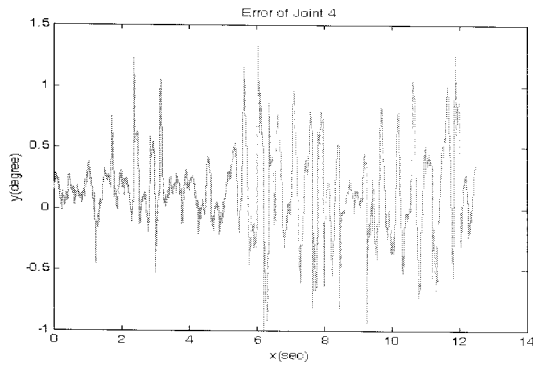
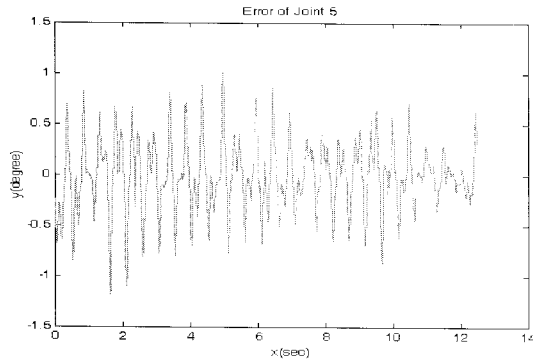
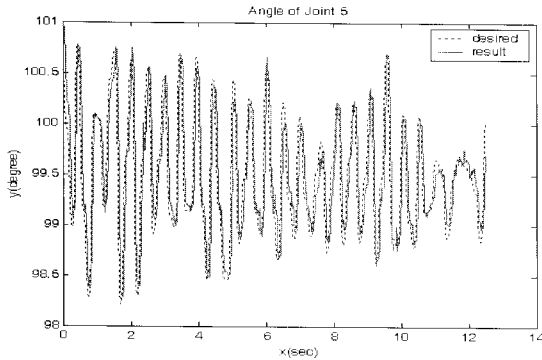


그림 13. 목표 물체의 영상의 궤적.  
Fig. 13. Trajectories of a moving object.





(d) 조인트 4



(e) 조인트 5

그림 14. 비전 기반의 물체 추종 로봇 제어 결과.

Fig. 14. Robot tracking results of a moving object.

입력으로 사용했다.

그림 14는 로봇의 움직임 결과이다. 그림 14의 파형을 분석해 보면 처음 5초 동안은 X축 진폭이 약 1cm인 파형을 나타내고, 그 이후에는 약 6cm 정도의 진폭을 가지는 파형을 나타낸다. 영상 처리를 통한 3차원 좌표를 역기구학으로 해석하여 각 관절의 각도를 계산하여 이 값을 로봇으로 전송하고 그 결과를 확인했다. 결과를 살펴 보면 초기 공의 좌표 변화량이 적을 때는 로봇 팔이 큰 오차 없이 수렴하지만, 갑자기 공의 좌표 변화량이 커지게 되면 하중이 많이 작용하는 1,2,3번 관절의 경우 완벽하게 수렴하지 못한다. 이는 영상 처리 속도가 느린 것이 가장 큰 이유이며 로봇 팔에 부착된 모터의 유격, 토크의 부족 등도 그 이유라 할 수 있다.

## VI. 결론

본 논문에서는 비전 정보를 이용한 로봇이 움직이는 물체

를 추종하도록 시스템을 구현하고 실험하였다. 스테레오 비전 카메라로 물체의 위치를 알아내고, 강건제어방식인 시간 지연제어기를 FPGA에 설계하여 12관절 로봇을 제어하여 성능을 확인했다. 물체의 움직임을 달리하며 로봇의 추종 성능을 실험을 통해 알아보았다. 느린 영상 처리 속도에도 불구하고 실시간으로 영상을 처리하고 그 데이터를 이용해 로봇을 제어했다. 하지만 앞으로 해결해야 할 과제가 남아 있다.

- 물체가 빨리 움직이는 경우에는 추종하지 못하는 결과가 발생하여 추후에 영상 처리 속도를 향상해야 한다.
- 물체의 정확한 위치 검출을 위한 비전처리가 필요하다. 자코비안을 고려한 비주얼 서보잉 방식의 적용이 필요하다.
- 정확한 물체 추종을 위한 세련된 비주얼 서보잉 방식에 대한 연구가 필요하다.

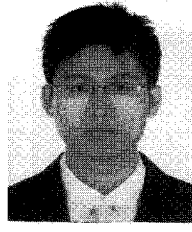
## 참고문헌

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A tutorial on visual servo control," *IEEE Trans. on Robotics and Automations*, vol. 12, no. 5, pp. 651-670, 1996.
- [2] F. Chaumette and S. Hutchinson, "Visual servo control part I: Basic approaches," *IEEE Robotics and Automations Magazine*, December 2006, pp. 82-90.
- [3] Y. Shen, D. Sun, Y. H. Liu, and K. Li, "Asymptotic trajectory tracking of manipulators using uncalibrated visual feedback," *IEEE Trans. on Mechatronics*, vol. 8, no. 1, pp. 87-98, 2003.
- [4] K. Hashimoto, T. Kimoto, T. Ebine, and H. Kimura, "Manipulator control with image-based visual servo," *IEEE Conf. On Robotics and Automations*, 1991, pp. 2267-2272.
- [5] S. H. Han, W. H. Seo, J. Lee, M. H. Lee, and H. Hashimoto, "Image-based visual servoing control of a SCARA type dual-arm robot," *International Symposium on Industrial Electronics*, 2002, pp. 517-522.
- [6] P. J. Goncalves, L. F. Mendonca, J. M. Sousa, and J. R. Pinto, "Improving visual servoing using fuzzy filters," *FUZZ-IEEE*, pp. 1185-1190, 2004.
- [7] Q. M. Wu and K. Staley, "Modular neural-visual servoing using a neural-fuzzy decision network," *IEEE Conf. on Robotics and Automations*, pp. 3238-3243, 1997.
- [8] T. C. Hsia and L. S. Gao, "Robot manipulator control using decentralized linear time-invariant time-delayed joint controllers," *IEEE Conf. on Robotics and Automations*, pp. 2070-2075, 1990.
- [9] K. Yousef-Toumi and O. Ito, "A time delay controller for systems with unknown dynamics," *Journal of Dynamic Systems, measurement, and Control*, vol. 112, pp. 133-142, 1990.
- [10] 김성수, 정슬, "비선형 시스템을 위한 DSP와 FPGA를 이용한 지능제어기의 하드웨어 구현," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 10 권 제 10 호, pp. 922-929, 2004.
- [11] P. W. Jeon and S. Jung, "Tele-operated control of mobile robot using exoskeleton type motion capturing device through wireless communication," *IEEE/ASME Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1107-1112, 2003.
- [12] 이운규, 전효원, 정슬, "다관절 휴머노이드 로봇 팔의 제어를 위한 시간지연 제어기의 FPGA 구현 및 실험," 제어 자동화 시스템공학 논문지, 제 13 권 제 7 호, pp. 649-655, 2007.



### 이 윤 규

1978년 2월 25일생. 2003년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학과 석사 졸업. 현재 도담시스템 연구원. 관심분야는 임베디드 시스템 설계, 로봇공학, 무인 차량 로봇 제어.



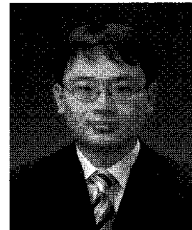
### 김 동 민

1982년 10월 17일생. 2007년 2월 충남대학교 메카트로닉스공학 전공 졸업. 현재 동 대학 석사과정. 관심분야는 영상 처리, 비주얼 서보잉 제어, 지능 로봇 시스템.



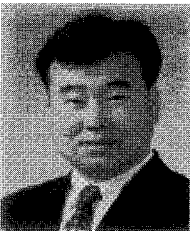
### 최 호 진

1982년 10월 12일생. 2007년 2월 충남대학교 메카트로닉스공학 전공 졸업. 현재 동 대학 석사과정. 관심분야는 센서 및 신호처리, 지능 시스템 및 지능 로봇 시스템, 인간 중심의 로봇.



### 김 정 섭

1980년 1월 3일생. 2006년 충남대학교 메카트로닉스공학과 졸업. 2007년~현재 충남대학교 대학원 메카트로닉스공학과 지능로봇시스템 석사과정 재학중. 관심분야는 지능 시스템의 SoC 구현, 영상 처리 및 인식 시스템.



### 정 슬

1964년 9월 11일생. 1988년 미국 웨인주립대 전기 및 컴퓨터공학과 졸업. 1991년 미국 캘리포니아대 데이비스 전기 및 컴퓨터 공학과 석사. 동 대학 박사. 1997년~현재 충남대학교 메카트로닉스공학과 교수. 관심분야는 지능 제어

시스템 및 지능 로봇 시스템, 인간중심의 로봇, 무인 로봇의 위치 추정 및 원격제어.