

# 시뮬레이션에 기반한 휴머노이드 로봇 두 대의 안정적인 물체 운반 및 제어 연구

## Simulation Based for Intelligent Control System of Multi - Humanoid Robots for Stable Load Carrying

김 한 근, 김 형 진, 박 원 만, 김 윤 혁, 김 동 한, 안 진 응\*

(Han-Guen Kim, Hyung-Jean Kim, Won-Man Park, Yoon-Hyuk Kim, Dong-Han Kim, and Jin-Ung An)

**Abstract:** This paper proposes an intelligent PID/Fuzzy control system for two humanoid robots to transport objects stably. When a robot transports an object while walking, a whole body system of a robot may not be stable due to vibration or external factors from a different departure speed error and a body movement of walking robots. Therefore, it is necessary to measure the horizontal and vertical locations and speeds of object, then calibrate the difference of departure speed between robots with PID/Fuzzy control. The results of simulation with two robots indicated that a proposed controller makes robots to transport an object stably.

**Keywords:** PID/fuzzy control, stable load-carrying, multi-humanoid robot

### I. 서론

1996년 혼다의 첫 번째 이용 가능한 휴머노이드 로봇인 P2의 개발로 휴머노이드 로봇의 가능성을 확인하였고[1], 이와 관련하여 다양한 분야에 걸쳐 연구와 개발이 지속되고 있다. 휴머노이드 로봇은 인간을 대신하여 다양한 영역에서 작업을 수행할 수 있고 인간이 작업을 할 수 없는 환경에서 작업을 수행할 수 있는 강점이 있다[2,3]. 하지만, 단일 휴머노이드 로봇이 수행할 수 있는 일은 한계가 있으므로[4], 다수의 휴머노이드 로봇이 일을 수행하여 효율을 높일 수 있는 휴머노이드 로봇 협력시스템의 연구 필요성이 대두되고 있다. 이에 본 논문에서는, 서로 다른 출발속도를 가진 휴머노이드 로봇들이 물체를 나르는데는 전제조건에서 다수의 휴머노이드 로봇이 한 물체를 안정적으로 나를 수 있는 시스템을 설계하고자 한다[5-8].

본 논문에서는 휴머노이드 로봇의 시스템 구성과 시뮬레이션 환경을 위한 3D 모델링, 역기구학적 해석, 시뮬레이션 환경변수에 대해 논의하고, PID와 Fuzzy 제어기의 시스템 구성에 대해서 소개한 뒤에, 시뮬레이션의 결과를 분석하고, 마지막으로 본 논문의 결론을 이야기할 것이다.

### II. 시뮬레이션 환경 구성 및 제어 시스템 설계

#### 1. 휴머노이드 로봇의 역기구학 해석 모델 개발

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2009. 11. 15., 수정: 2009. 12. 15., 채택확정: 2009. 12. 30.

김한근: 경희대학교 전자·전파 공학과(sskhk05@khu.ac.kr)

김형진, 김동한: 경희대학교 전자공학과

(hjkim86@naver.com/donghani@khu.ac.kr)

박원만, 김윤혁: 경희대학교 기계공학과

(muahagy@khu.ac.kr/yoohkim@khu.ac.kr)

안진응: 대구 경북 과학 기술원 실용로봇연구소(robot@dgist.ac.kr)

※ 본 연구는 교육과학기술부의 대구경북과학기술원 일반사업 연구비 지원과 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국 과학재단의 지원을 받아 수행되었음(R01-2008-000-20352-0).

#### 1.1 휴머노이드 로봇 구성

본 연구에서 사용한 휴머노이드 로봇은 그림 1의 로봇으로 양다리 12자유도, 양팔 8자유도, 양손 2자유도, 허리 2자유도, 목 1자유도로 총 25자유도를 가지고 키는 30cm, 무게 5kg의 소형 로봇이다. 각 관절은 3kgf-cm의 토크를 가지며, 최대 10cm/s의 이동 속도를 가지고 있다. 소형 Zigbee 모듈을 탑재하여 PC로 제어 할 수 있고, 로봇의 상태 값을 송수신 할 수 있다. 제어 시스템에서도 이를 이용하여 마스터 로봇과 슬레이브 로봇 간에 통신을 수행할 수 있다.

휴머노이드 로봇의 역기구학 해석을 위하여, 먼저 상용 소프트웨어인 SolidWorks® v2003(SolidWorks Corp., U.S.A)를 이용하여 휴머노이드 로봇 부품들을 모델링하고 이를 결합하여 그림 1과 같이 휴머노이드 로봇 모델의 3차원 CAD 모델을 완성하였다. 다물체 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn™ v.7.2(Functionbay Inc., Korea)을 이용하여, 완성한 3차원 CAD 모델에 각 부품의 무게 등의 특성을 부여하

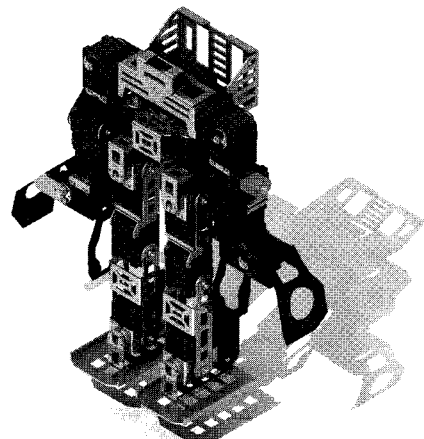


그림 1. 휴머노이드 로봇의 3D 모델.

Fig. 1. 3D Modeling of humanoid robot.

였고 각각의 부품들을 개발한 휴머노이드 모델이 실제 휴머노이드 로봇과 동일한 움직임을 가질 수 있도록 힌지조인트 및 고정조인트를 이용하여 연결하였다. 또한 로봇의 발바닥과 지면 사이에는 면 접촉 조건을 부가하여 휴머노이드 로봇의 보행이 가능하도록 하였다.

1.2 로봇의 역기구학적 해석

로봇의 역기구학적인 해석을 하기위해 로봇의 링크에 대한 좌표계를 상체와 하체로 나눠 설정한 뒤에 Denavit - Hartenberg 규약에 의한 링크인자를 설정하였다. 상체와 하체에 대한 좌표계는 그림 2에 나타내었고 Denavit - Hartenberg 파라미터는 표 1에 나타내었다. 상체와 하체 모두 Denavit - Hartenberg 규약에 의한 링크 인자를 대칭적으로 적용할 수 있으므로 한쪽만 수식을 세웠으며 상체와 하체 모두 허리의 링크를 기준으로 Denavit - Hartenberg 규약에 의한 링크 인자를 설정하였다. 표 1과 다음의 수식 (1), (2)를 이용하여 각각 상체와 하체의 Homogeneous Transform Matrix T를 구할 수 있다. 이때  $i$ 는 좌표계의 순서를 의미

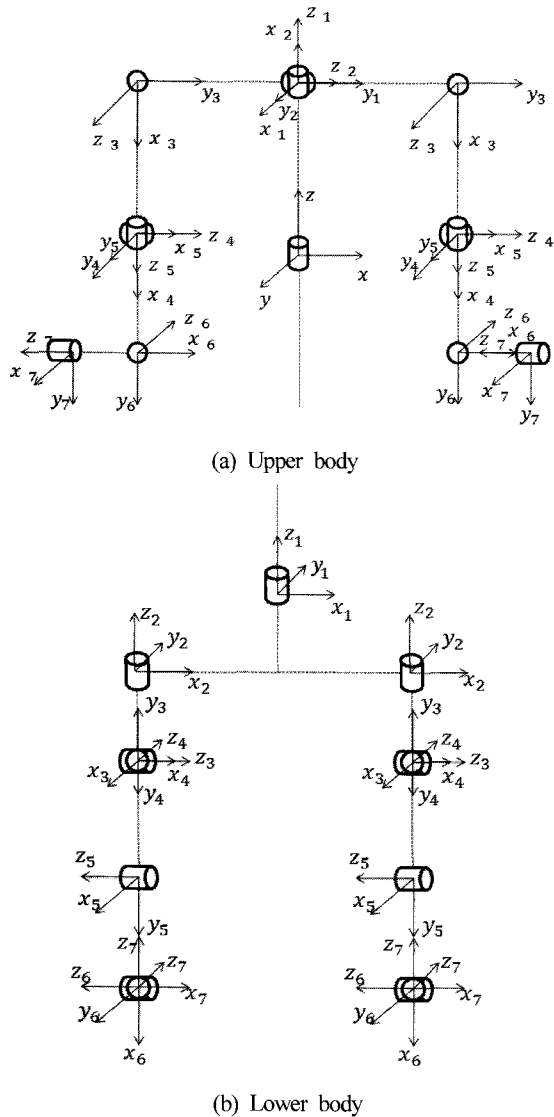


그림 2. 각 관절의 좌표계.

Fig. 2. The coordinates system of each joints.

표 1. D-H 규약에 의한 상체와 하체의 인자 설정.

Table 1. Denavit - Hartenberg parameters for upper and lower body of the robot.

(a) Upper body

Link	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	$-\pi/2$	0	2.55	$\theta_1$
2	$\pi/2$	0	6.33	$\theta_2$
3	$\pi/2$	6.849	2.1	$\theta_3$
4	$-\pi/2$	0	0	$\theta_4$
5	$-\pi/2$	0	8.182	$\theta_5$
6	0	-1.998	0	0
7	$\pi/2$	-5.441	0	$\theta_7$
8	$\pi/2$	0	6.912	0

(b) Lower body

Link	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	$\theta_i$
1	0	3.69	-3.71	$\theta_1$
2	$\pi/2$	0	-3.15	$\theta_2$
3	$\pi/2$	0	0	$\theta_3$
4	$-\pi/2$	9.98	0	$\theta_4$
5	0	-10.04	0	$\theta_5$
6	$\pi/2$	0	0	$\theta_6$
7	$\pi/2$	-3.35	0	$\theta_7$

한다.

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & \alpha_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & \alpha_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$${}^0T_n = {}^0A_1 A_2 \dots A_{n-1} A_n \quad (2)$$

여기서 A Matrix는 각 링크간의 Homogeneous Transform Matrix 이고, T Matrix는 Base Frame에서 End Effector 간의 Homogeneous Transform Matrix를 의미한다. 위의 T Matrix는 시뮬레이션에서 로봇 각 관절을 움직이기 위해 사용되며 RecurDyn™에서 계산한 로봇의 역기구학으로부터 나온 각 관절의 값을 이용하여 물체의 수평, 수직 성분의 위치와 속도, 로봇간의 이동 초기치를 계산하여 제어기로 입력해 주게 된다. 이를 설계한 PID/Fuzzy 제어기로 보정하여 다시 물체의 수평, 수직 성분의 가속도와 로봇의 이동 속도 보정 값을 입력하여 로봇들이 이동하면서 물체의 균형을 안정적으로 유지하게 하였다.

1.3 시뮬레이션 환경 변수 설정

앞서 설정한 역기구학 수식과 설계한 제어기의 동작을 확인하기 위하여 RecurDyn™으로 시뮬레이션 환경을 구성하였다. 로봇이 물체를 나르는데 있어 보행과 보행으로 인한 반동은 전체 시스템의 성능과 안정도에 큰 영향을 미치게 된다. 이와 관련된 파라미터로는 마찰계수와 탄성계수로, 중력을 9.8N, 로봇이 움직이는 바닥을 평탄하고 건조한 콘크리트 바닥이라고 가정하고, 로봇의 발바닥을 고무 재질로 하여 마찰계수와 탄성계수를 구하여 설정했다. 기본적인

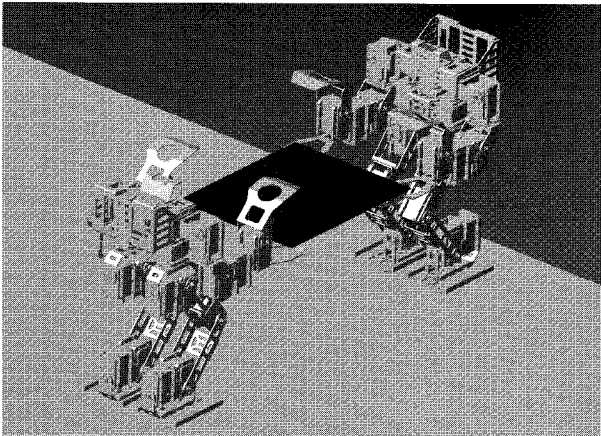


그림 3. 시뮬레이션 환경 설정.

Fig. 3. Simulation environment configuration.

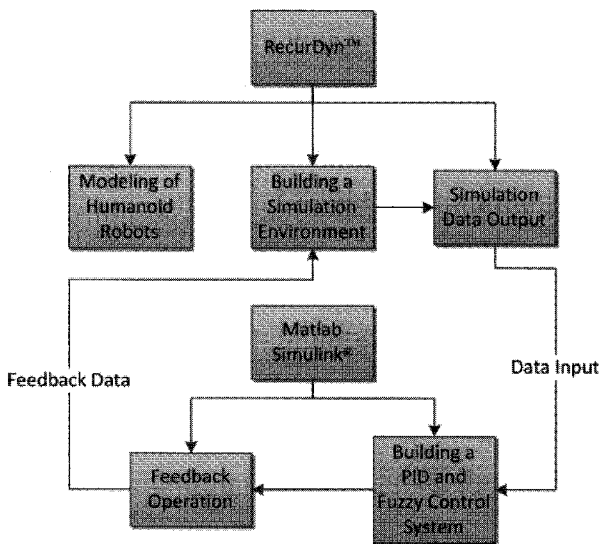


그림 4. 시뮬레이션 시스템 구성도.

Fig. 4. Simulation system diagram.

파라미터를 설정한 뒤, 초기 구성을 나타낸 것이 그림 3이다. 나르는 물체는 알루미늄 판넬이라고 가정하고 시뮬레이션을 시행할 시에 수치 해석 및 프로그래밍 툴인 Matlab<sup>®</sup> R2008a (The Mathworks Inc, USA)으로 마스터 로봇의 가슴을 기준으로한 물체의 위치 오차와 속도 오차를 출력하게 했다. Matlab<sup>®</sup>으로 설계한 제어기는 RecurDyn<sup>™</sup>이 출력한 값을 받아 보정한 뒤, 이를 다시 RecurDyn<sup>™</sup>으로 케환해주었다. 전체 시스템 구성도는 그림 4에 나타내었다.

2. 제어시스템 구성

그림 5는 본 논문을 위한 제어시스템을 Matlab Simulink<sup>®</sup>로 설계한 것으로, RecurDyn<sup>™</sup>과 연동하기 위한 블록을 중심으로 PID/Fuzzy 제어를 설계하고 로봇의 통신을 위한 통신 블록을 설계하였다.

2.1 PID 제어기

휴머노이드 로봇이 물체를 안정적으로 나르게 하기위해 로봇의 가슴을 기준으로 잡고 물체의 수평, 수직 성분의 위치 오차와 속도 오차를 PID 제어기로 보정했다. PID 제어기를 사용한 이유는, 로봇이 이동하고 있는 바닥면을 평평

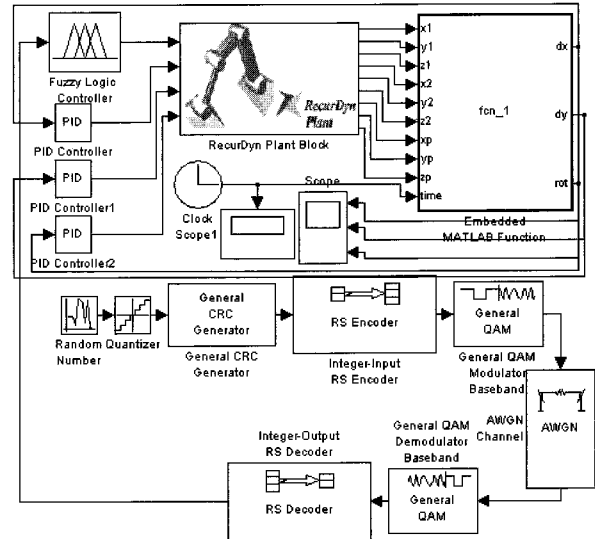


그림 5. PID / Fuzzy 제어 시스템.

Fig. 5. PID /Fuzzy control system.

하다고 가정했기 때문에, 물체의 안정성은 로봇의 모션과 로봇간의 이동 차이에 의해 결정 된다. 그러므로 일정한 규칙성이 있는 로봇의 모션은 다른 제어기 보다 PID 제어기의 효율이 더 좋다고 판단되어 사용했다. PID 제어기는 (3)의 수식으로 표현된다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3)$$

수식 (3)에서  $e(t)$ 는 기준입력  $r$ 과 제어기 출력  $y$ 사이의 오차 량으로써 다음과 같이 표현된다.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (4)$$

수식 (3)에서  $K$ 는 각각 비례-적분-미분의 이득이며 이 값은 Ziegler - Nichols 방법인 수식 (5)를 통해 구했다. 이때,  $K_c$ 는 Critical Gain,  $T_c$ 는 Oscillation Period이다.

$$K_p = 0.6K_c, K_i = \frac{2K_p}{T_c}, K_d = \frac{K_p T_c}{8} \quad (5)$$

Oscillation Period는 로봇의 모션으로 발생하는 반동이크로 약 7초로 잡았고, Critical Gain은 보정을 전혀 하지 않았을 때 발생하는 위치와 속도 오차의 최대 값으로 설정하여 계산 한 뒤에, 로봇의 모션에 지장을 주지 않는 범위 내에서 다시 값을 조절했다. 각각 수평, 수직 성분의 위치, 속도 오차를 보정하기 위한 이득 값은 표 2에 나타냈다.

표 2. Ziegler-Nichols 방법을 이용한 이득 값.

Table 2. Profit values using Ziegler-Nichols formula.

Component	$K_p$	$K_i$	$K_d$
Horizontal displacement error	102	5.14286	5.25
Horizontal velocity error	174	1.71429	4.25
Perpendicular displacement error	174	49.71429	152.25
Perpendicular velocity error	66	18.85714	57.75

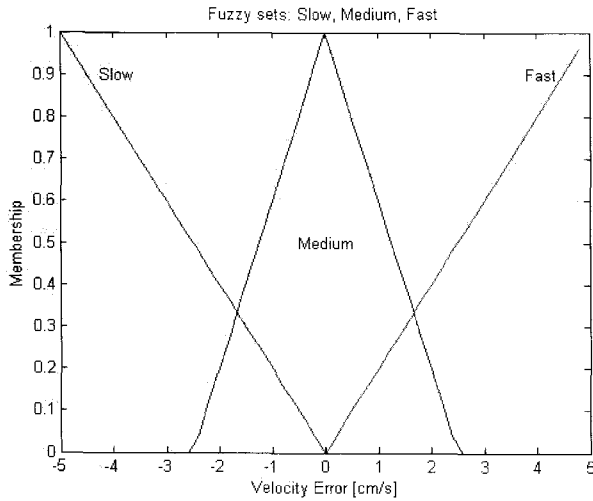


그림 6. 휴머노이드 로봇의 속도 fuzzy 함수.  
Fig. 6. Speed of humanoid robot fuzzy function.

표 3. 속도 보정을 위한 fuzzy rule.

Table 3. Fuzzy rule to correct speed.

	Slave	Slow	Medium	Fast
Master		Slow	Medium	Fast
Slow		Medium	Slow	Slow
Medium		Fast	Medium	Slow
Fast		Fast	Fast	Medium

2.2 Fuzzy 제어기

일정한 주기가 있는 로봇의 보행과는 다르게, 휴머노이드 로봇들이 물체를 나르기 시작할 때 발생하는 로봇의 이동 속도 차이는 출발 시간이 다르므로 불규칙적이다. 따라서 이를 fuzzy 제어기로 보정하였으며, 물체를 나를 때 로봇의 위치가 물체를 기준으로 평행이 되도록 보정했다. fuzzy 제어기의 fuzzy 소속 함수는 그림 6과 같다. 소속 함수는 그림과 같이 slow, medium, fast, 총 3개의 구간을 가지며 각 구간은 로봇이 상대 로봇에 비해 어떻게 출발하였는지를 나타낸다. 표 3은 속도 보정을 위한 fuzzy rule을 나타낸다. 휴머노이드 로봇 두 대를 이용하여 물체를 나르므로, 총 2개의 입력과 2개의 출력 값이 나온다. 이동 속도를 조절하는 로봇은 master와 slave의 구분이 있어야 가능하므로 시뮬레이션 수행 시에는 master 로봇이 먼저 출발하게 하여 slave 로봇에게 Zigbee 모듈로 출발 신호를 보내고, 계산된 값으로 결과를 확인하였다.

III. 결과 및 고찰

앞에서 설명한 시뮬레이션 환경과 제어기를 이용하여 시뮬레이션 결과를 확인한다. 먼저, 그림 7은 본 연구에서 구현한 제어기를 이용하여 시뮬레이션을 하였을 때, 실제 시뮬레이션 화면을 시간별로 나타내었다. 처음에 master 로봇이 출발하여 물체를 나르기 시작할 때, slave 로봇이 따라 움직이면서 물체의 수평을 맞추기 위해 master 보다 속도가 빨라진 것을 알 수 있었다.

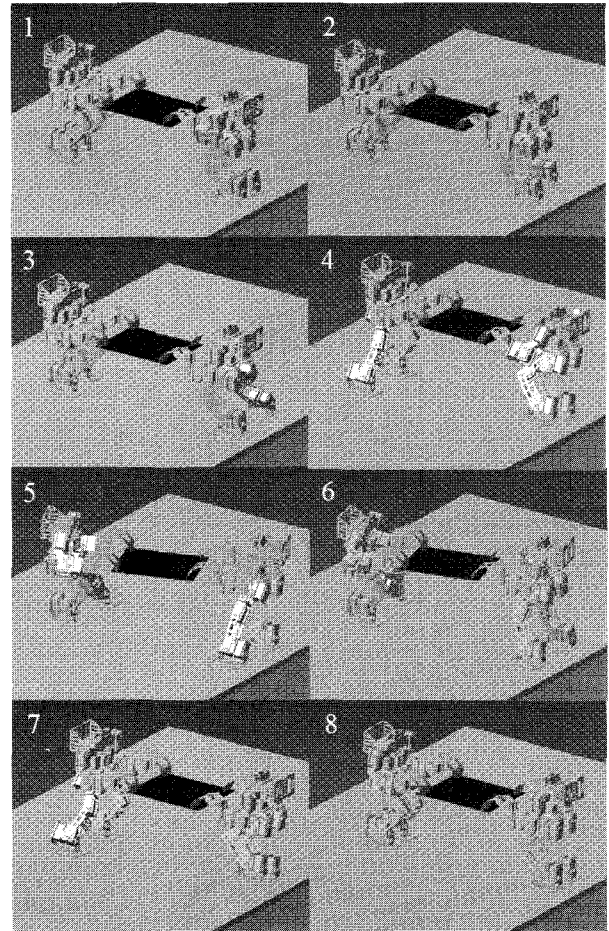
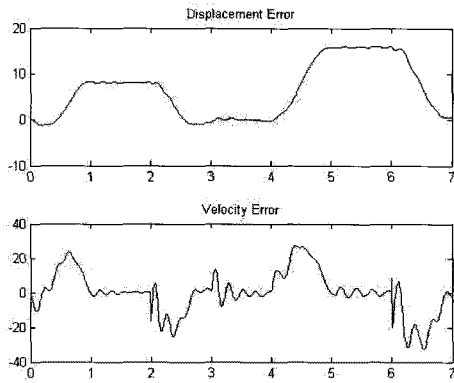
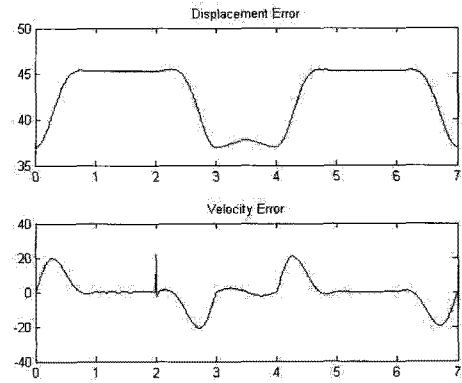


그림 7. 시뮬레이션 결과.  
Fig. 7. Simulation result.

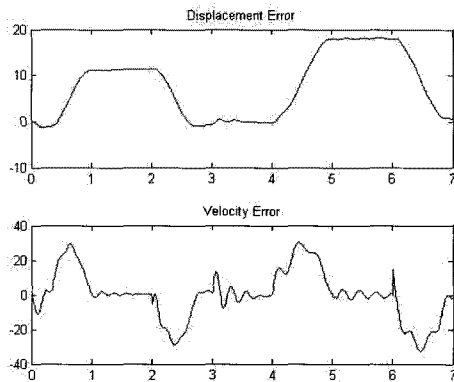
그림 8은 물체의 수직, 수평 성분의 위치 오차와 속도 오차를 그래프로 나타내었는데 본 연구에서 구현한 제어기의 성능을 확인하기 위해 각각 보정이 없는 경우, PID 제어만 하는 경우, 본 연구에서 구현한 제어기로 하는 경우의 오차 그래프를 나타내었다. 그림 8(a), (b)의 무 보정 상태일 경우, 수직, 수평 모두 로봇의 모선에 맞춰 물체의 위치와 속도가 크게 변하는 것을 알 수 있다. PID 보정의 경우인 경우는 (c), (d)이고 PID/Fuzzy 보정의 경우는 (e), (f) 인데, 수직 성분의 위치 오차가 초기치를 제외하고는 거의 0에 수렴하는 것을 알 수 있다. 하지만, PID 보정, PID/Fuzzy 보정의 수평 성분의 위치, 속도 오차의 그래프에서 보았듯이, 정상적으로 보정하지 못하고 로봇이 이동할 때 발생하는 반동이 나타났는데, 이는 PID/Fuzzy 제어기가 강제적으로 수평 성분의 물체의 위치 오차를 보정 하게 될 경우, 로봇의 모선에 직접적인 영향을 주게 되어 로봇의 넘어짐을 막고자 보정 값을 낮추었기 때문이다. 또한 그림 8의 결과에서 속도 오차의 데이터 중, 갑자기 속도 오차가 튀는 곳이 있는데 이는 로봇의 모선에서 발바닥이 땅이 닿는 경우 발생하는 반동이 원인이었다. 수직 성분의 경우, PID 제어기만 구성되어 있을 경우와 PID/Fuzzy 제어기로 구성되어 있을 경우, 초기치를 제외하고 거의 같은 궤환율을 보이는 것을 알 수 있다.



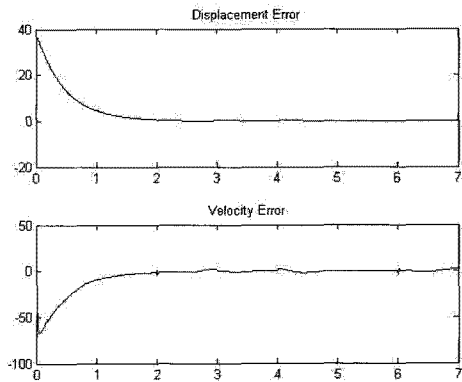
(a) Horizontal with no feedback



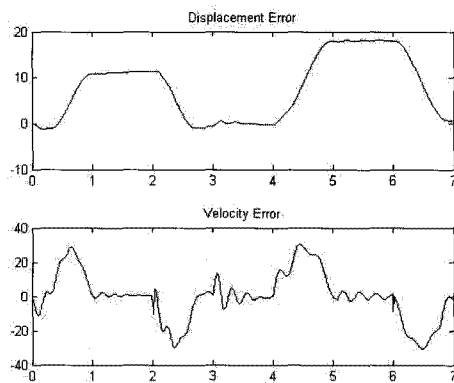
(b) Perpendicular with no feedback



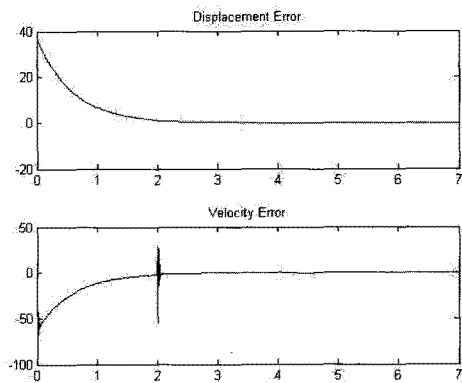
(c) Horizontal with PID feedback



(d) Perpendicular with PID feedback



(e) Horizontal with PID/Fuzzy feedback



(f) Perpendicular with PID/Fuzzy feedback

그림 8. 수직, 수평 성분의 위치와 속도 오차.

Fig. 8. Perpendicular, Horizontal position and speed error of element.

IV. 결론

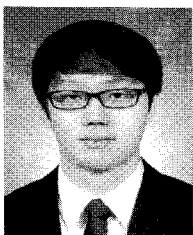
본 논문은 휴머노이드 로봇들이 서로 협력하여 물체를 안정적으로 나르기 위해 로봇의 가슴을 기준으로 잡고, 역기구학을 계산하여 물체의 위치와 속도 오차를 보정하기 위한 PID/Fuzzy 제어를 설계하여 시뮬레이션으로 결과를 확인하였다. 이 연구를 좀 더 발전 시켜서 앞으로는 평지뿐만 아니라, 경사진 곳이나 바닥면이 불규칙적인 곳에서 안정적으로 물체를 나르기 위한 연구에 초점을 맞출 것이다.

참고문헌

[1] K. Hirai, "Current and future perspective of honda humanoid robot" *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conference on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 500-508, 1997.

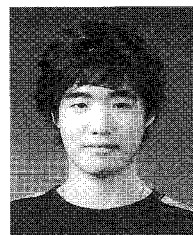
[2] K. Yokoyama, J. Meada, T. Isozumi, and K. Kaneko, "Application of humanoid robots for cooperative tasks in the outdoors" *Proc. of Int. Conference on Intelligent Robots and Systems, Workshop2*, 2001.

- [3] K. Harada, S. Kajita, H. Saito, M. Morisawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko, and H. Hirukawa, "A humanoid robot carrying a heavy object," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1712-1717, April 2005.
- [4] K. Yokoyama, H. Handa, T. Isozumi, Y. Fukase, K. Kaneko, F. Kanehiro, Y. Kawai, F. Tomita, and H. Hirukawa, "Cooperative works by a human and humanoid robot," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, vol. 3, pp. 2985-2991, 2003.
- [5] K. Kosuge, H. Kakuya, and Y. Hirata, "Control algorithm of dual arms mobile robot for cooperative works with human," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 5, pp. 3223-3228, 2001.
- [6] K. Yokoi, "Humanoid robotics," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Control, Automation and Systems*, Oct. 2007.
- [7] R. Suda and K. Kosuge, "Handling of object by mobile robot helper in cooperation with a human using visual information and force information," *Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, vol. 2, pp. 1102-1107, 2002.
- [8] 김한근, 박원만, 김윤혁, 김동한, "안정적인 물체 운반을 위한 두 대의 휴머노이드 로봇의 협동 자세 제어 시스템 설계" 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 대구, 한국, pp. 359-360, Oct. 2009.



**김 한 근**

2009년 경희대학교 전자·전파공학과 졸업. 2009년~현재 동 대학원 석사 과정. 관심분야는 지능제어, Haptics, Mobile OS 제어 및 개발.



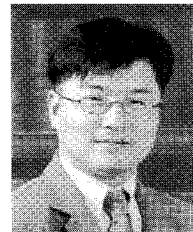
**김 형 진**

2005년 경희대학교 전자공학과 입학. 2005년~동 대학 재학중. 관심분야는 임베디드 시스템을 이용하여 효율적인 개체간의 통신 및 디바이스 제어.



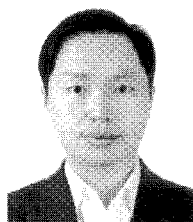
**박 원 만**

2004년 경희대학교 기계공학과(공학사). 2006년 동 대학원 섬유공학과(공학석사). 2006년~현재 동 대학원 기계공학과 박사과정. 관심분야는 생체역학, 의료용 로봇.



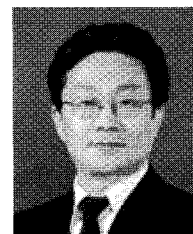
**김 윤 혁**

1992년 KAIST 기계공학과(공학사). 1994년 동 대학원(공학석사). 2000년 동 대학원(공학박사). 2002년~현재 경희대학교 공과대학 기계산업시스템공학부 교수. 관심분야는 생체역학, 의료용 로봇.



**김 동 한**

1995년 KAIST 전기 및 전자공학과(공학사). 1998년 동 대학원(공학석사). 2003년 동 대학원(공학박사). 2003년~2004년 일리노이 주립대학 Post Doc. 2004년~2007년 삼성전자 무선사업부 책임연구원. 2007년~현재 경희대학교 전자정보대학 교수. 관심분야는 로봇제어, 다개체 지능제어.



**안 진 응**

1993년 성균관대학교 기계설계학과(공학사). 1997년 한국과학기술원 기계공학과(공학석사). 2005년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 2008년~현재 대구경북과학기술원 실용로봇연구소장. 관심분야는 지능제어, 햅틱스, 인간로봇 상호작용, 진화컴퓨팅, 뇌기계인터페이스.