

6 축 힘/모멘트센서를 가진 인간형 로봇의 지능형 발 개발

Development of Humanoid Robot's Intelligent Foot with Six-axis Force/Moment Sensors

김갑순^{1,✉}, 김현민¹, 윤정원²

Gab-Soon Kim^{1,✉}, Hyeon-Min Kim¹ and Jungwon Yoon²

¹ 경상대학교 제어계측공학과 (ERI, Department of Control and Instrumentation Engineering, Gyeongsang National Univ.)

² 경상대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering and ReCAPT, Gyeongsang National Univ.)

✉ Corresponding author: gskim@gsnu.ac.kr, Tel: 055-751-5372

Manuscript received: 2008.9.17 / Revised: 2008.12.16, 2009.1.14 / Accepted: 2008.2.16

This paper describes a humanoid robot's intelligent foot with two six-axis force/moment sensors. The developed humanoid robots didn't get the intelligent feet for walking on uneven surface safely. In order to walk on uneven surface safely, the robot should measure the reaction forces and moments applied on the soles of the feet, and they should be controlled with the measured the forces and moments. In this paper, an intelligent foot for a humanoid robot was developed. First, the body of foot was designed to be rotated the toe and the heel to all directions, second, the six-axis force/moment sensors were manufactured, third, the high-speed controller was manufactured using DSP(digital signal processor), fourth, the humanoid robot's intelligent foot was manufactured using the body of foot, two six-axis force/moment sensors and the high-speed controller, finally, the characteristic test of the intelligent foot was carried out. It is thought that the foot could be used for a humanoid robot.

Key Words: Intelligent Foot (지능형 발), Intelligent Robot (지능형 로봇), Humanoid Robot (인간형 로봇), 6-Axis Force/Moment Sensor (6 축 힘/모멘트센서), Interference Error (상호간섭오차)

1. 서론

사람은 자신과 비슷한 인간형 로봇(humanoid robot)을 개발하기 위하여 많은 연구비를 투입하고 있을 뿐만 아니라 많은 사람들이 연구를 하고 있다. 현재 개발된 인간형 로봇은 평평한 지면에서 걸을 수 있고 음성인식, 감정표현 등을 할 수 있으나 불규칙한 지면에서는 걸을 수 없는 단점을 가지고 있다. 그리고 기발표된 논문^{1,2}의 인간형 로봇 또한 평평한 지면에서만 걸을 수 있다. 위에 나타난 인간형 로봇은 모두 불규칙한 지면에서 걸을 수 없는 단점을 가지고 있다.

미래의 인간형 로봇은 지면이 평평한 실내환경보다 지면이 불규칙한 실외환경에서 더 많이 활용될 수 있으므로 실외환경에서 걸을 수 있는 로봇이 필요하다. 이와 같은 로봇에 필수적인 요소중의 하나는 로봇의 지능형 발(intelligent foot)이다. 인간형 로봇이 불규칙한 지면에서 넘어지지 않고 안전하게 걷기 위해서는 로봇에 부착된 지능형 발의 발바닥이 사람의 그것과 같이 발목에서 사방으로 회전되어야 로봇의 균형을 잃지 않도록 로봇의 발이 회전하여 지면에 접촉된다. 그러기 위해서는 발바닥에 지면의 반력을 측정하는 6 축 힘/모멘트 센서가 부착되어야 하고 로봇의 발은 발목에서 회

전할 수 있도록 특수하게 설계되어야 하며, 제어장치는 여러 개의 힘센서의 값을 받고, 여러 개의 모터를 제어할 수 있으며 빠른 속도를 가진 마이크로프로세서를 이용하여 제작되어야 한다. 발바닥에 고정되는 6 축 힘/모멘트센서는 지능형 발의 크기에 맞도록 설계 및 제작되어야 하며, 발바닥의 반력을 정확하게 측정하기 위해서는 상호간섭 오차가 3%이하^{3,4}가 되도록 제작되어야 한다.

본 논문에서는 불규칙한 지면에서 안전하게 걸을 수 있는 인간형 로봇의 지능형 발을 개발하였다. 발의 본체를 앞꿈치와 뒤꿈치로 분리하여 사람과 같이 사방으로 회전할 수 있도록 특수하게 설계 및 제작하였고, 체중의 반력을 측정할 수 있는 6 축 힘/모멘트센서를 제작하였으며, 힘센서들의 출력과 모터의 제어를 빠르게 처리할 수 있는 제어장치를 설계 및 제작하였다. 그리고 개발된 힘센서들의 특성실험과 지능형 발의 제어특성실험을 실시하였다.

2. 지능형 발 설계 및 제작

2.1 지능형 발

Fig. 1 의 (a)는 본 논문에서 개발한 인간형 로봇의 지능형 발 사진의 정면도, (b)는 지능형 발 사진의 측면도를 나타내고 있다. 지능형 발은 다리 몸체(leg body), 앞꿈치(front-part of the sole)와 뒤꿈치(rear-part of the sole), 앞꿈치 우측 직선운동기구(linear moving structure(F-R)),⁵ 앞꿈치 좌측 직선운동기구(linear moving structure(F-L), 뒤꿈치 우측 직선운동기구(linear moving structure(R), 뒤꿈치 뒤 직선운동기구(linear moving structure(B), 중앙 구조인트(spherical joint; S1), 앞꿈치 연결 구조인트(S2), 앞꿈치 우측 직선운동기구와의 연결 상부 구조인트(S3)와 하부 구조인트(S4), 앞꿈치 좌측 직선운동기구와의 연결 상부 구조인트(S5)와 하부 구조인트(S6), 뒤꿈치 우측 직선운동기구와의 연결 상부 구조인트(S7)와 하부 구조인트(S8), 뒤꿈치 뒤 직선운동기구와의 연결 상부 핀조인트(P1)와 하부 구조인트(S9), 앞꿈치 발바닥 6 축 힘/모멘트센서(6-axis force/moment sensor), 뒤꿈치 발바닥 6 축 힘/모멘트센서, 모터드라이브(motor drive), 제어장치(control system), 앞꿈치 우측 직선운동기구와 앞꿈치 좌측 직선운동기구의 스톱퍼(stopper-1), 뒤꿈치 뒤 직선운동기구의 회전방지 스톱퍼(stopper-2) 등으로 구성되어 있다.

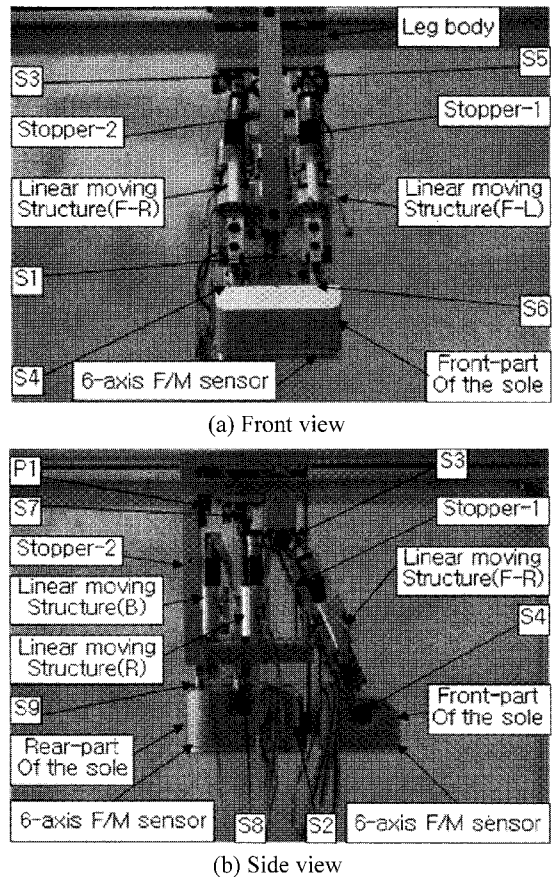


Fig. 1 Photograph of the developed intelligent foot for a humanoid robot

앞꿈치 발바닥 및 뒤꿈치 발바닥 6 축 힘/모멘트센서는 발바닥의 앞꿈치와 뒤꿈치에 가해지는 방향의 힘(F_x , F_y , F_z)과 3 방향의 모멘트(M_x , M_y , M_z)를 동시에 측정하는데 사용되며, 각각 앞꿈치와 뒤꿈치에 내장된다.

4 개의 직선운동기구는 앞꿈치와 뒤꿈치를 사람의 발과 같이 사방으로 움직(회전)이는데 사용되고, 앞꿈치 우측 직선운동기구와 앞꿈치 좌측 직선운동기구를 동시에 움직이면 앞꿈치 연결 구조인트(S2)를 기준으로 앞꿈치가 회전하여 위로 들리거나 아래로 내려가며, 둘 중 하나만 움직이면 연결 구조인트(S2)를 기준으로 발바닥의 앞꿈치와 뒤꿈치의 중심선을 기준으로 좌우로 회전한다. 즉 앞꿈치 밑의 좌측 혹은 우측부분에 돌출부가 있으면 로봇 다리의 중심이 흐트러지기 전에 앞꿈치 발바닥 6 축 힘/모멘트센서의 측정값에 따라 앞꿈치를 좌우로 회전시킨다. 그리고 뒤꿈치 우측 직

선운동기구를 상하로 움직이면 뒤꿈치가 중앙 구조인트(S1)를 기준으로 발바닥의 앞꿈치와 뒤꿈치의 중심선을 기준으로 좌우로 회전하고, 뒤꿈치 뒤 직선운동기구를 상하로 움직이면 발바닥의 앞꿈치와 뒤꿈치의 중심선과 직각인 선을 기준으로 앞뒤로 회전한다.

앞꿈치가 지면과 수직인 축을 기준으로 회전하지 않는 것은 앞꿈치 우측 직선운동기구와 앞꿈치 좌측 직선운동기구의 스톱퍼(stopper-1)가 각각의 직선운동기구가 회전하는 것을 방지하기 때문이고, 뒤꿈치가 지면과 수직인 축을 기준으로 회전하지 않는 것은 뒤꿈치 뒤 직선운동기구의 회전방지 스톱퍼(stopper-2)가 그 직선운동기구가 회전하는 것을 방지하기 때문이다.

각 직선운동기구는 최대 20mm 까지 움직일 수 있고, 직선운동기구의 몸체와 구조인트들이 조립되는 부분은 나사로 되어있으며 10mm의 조정이 가능하도록 되어있다. 직선운동기구가 20mm 움직이는데 1.5 초가 소요된다. 뒤꿈치의 회전각도는 뒤꿈치와 앞꿈치의 중심축(y)을 기준으로 $\pm 14^\circ$ 이고, 그와 수직인 축(x)을 기준으로 $\pm 11.5^\circ$ 이며, 앞꿈치의 회전각도는 뒤꿈치와 앞꿈치의 중심축(y)을 기준으로 $\pm 7.2^\circ$ 이고, 그와 수직인 축(x)을 기준으로 $\pm 8.5^\circ$ 이다. 지능형 로봇발은 사각형 구조로 된 로봇다리의 상부에 4 개의 직선운동기구의 상부 구조인트가 연결되어 있고, 하부에 중앙 구조인트(S1)의 몸체와 고정되어 있으며, 4 개의 직선운동기구의 하부 구조인트가 앞꿈치와 뒤꿈치에 연결된 구조를 형성한다.

지능형 발의 구동은 뒤꿈치가 지면과 접촉하면 6 축 힘/모멘트센서의 힘과 모멘트들의 출력신호에 따라 4 개의 직선운동기구를 제어장치가 동작시켜 사람의 발의 움직임과 비슷하게 동작될 수 있고, 지면에 돌출부가 있으면 로봇이 균형을 잃지 않도록 앞꿈치와 뒤꿈치의 중심선을 기준으로 좌우측으로 앞꿈치와 뒤꿈치를 회전시킨다.

2.2 로봇 발의 기구학적 해석

2.2.1 역기구학(Inverse Kinematics) 해석

Fig. 2 는 로봇발 조인트의 좌표계를 나타내고있으며, Fig. 2 와 같이 고정되어 있는 발목좌표계 O_{base} 를 기준으로 발목 고정 프레임에 부착되어 있는 조인트 위치 A_b, B_b, C_b, D_b 가 주어지고, 뒤 발 플랫폼 회전각 ϕ_r, θ_r 및 앞 발 플랫폼 회전각 ϕ_f, θ_f 가 주어질 경우 능동 조인트 각각의

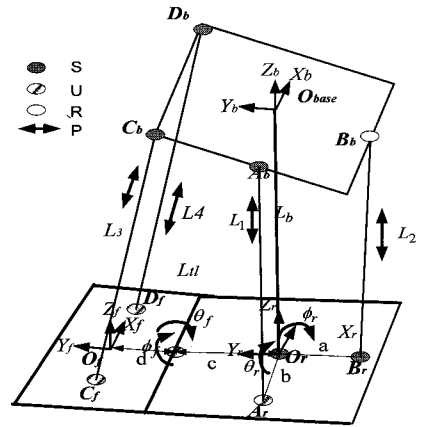


Fig. 2 Coordinate system of intelligent robot's foot joints

길이 L_1, L_2, L_3, L_4 를 구하는 것을 본 기구부의 역기구학으로 정의된다. 우선, 뒤 발 플랫폼에 부착된 조인트의 위치 A_r, B_r 및 앞 발 플랫폼의 조인트 위치 C_r, D_r 는 다음과 같이 구해진다.

$$A_r = T_b^r(0,0,-L_b)R_x(\phi_r)R_y(\theta_r)T_r^r(-b,0,0) \quad (1)$$

$$B_r = T_b^r(0,0,-L_b)R_x(\phi_r)R_y(\theta_r)T_r^r(0,-a,0) \quad (2)$$

$$C_f = T_b^f(0,0,-L_b)R_x(\phi_f)R_y(\theta_f)T_r^f(0,c,0)R_x(\phi_f)R_y(\theta_f)T_f^f(-f,d,0) \quad (3)$$

$$D_f = T_b^f(0,0,-L_b)R_x(\phi_f)R_y(\theta_f)T_r^f(0,c,0)R_x(\phi_f)R_y(\theta_f)T_f^f(f,d,0) \quad (4)$$

여기서, R 은 회전 행렬, $T_b^r(x,y,z)$ 는 병진 행렬, 병진 행렬 첨자 b, r 은 각각 병진 전의 좌표계 및 병진 후의 좌표계를 의미한다. 따라서, 각 플랫폼의 조인트 좌표가 식(1)-(4)와 같이 구해진다면 능동조인트 길이는 다음과 같이 계산된다.

$$L_1 = \sqrt{(A_r)^2 - (A_b)^2} \quad (5)$$

$$L_2 = \sqrt{(B_r)^2 - (B_b)^2} \quad (6)$$

$$L_3 = \sqrt{(C_f)^2 - (C_b)^2} \quad (7)$$

$$L_4 = \sqrt{(D_f)^2 - (D_b)^2} \tag{8}$$

2.2.2 운동 분석(Motion Analysis)

주어진 기구부 모션은 다음의 Grübler 공식을 이용하여 식(9)와 같이 정의될 수 있다.

$$M = d(n - g - 1) + \sum_{i=1}^g f_i \tag{9}$$

여기서 d, n, g, f_i 는 각각 주어진 기구부의 각 조인트의 운동공간 차수, 지면을 포함한 링크의 수, 각 조인트의 수, i -th 조인트에서의 자유도를 나타낸다. Fig. 3 은 제한된 2 개의 플랫폼을 가진 기구부의 링크-조인트 관계도를 나타낸다. Fig. 3 의 흰색 상자는 수동조인트를 빗금 친 상자는 능동조인트를 선은 링크를 의미한다. 여기서 링크의 수는 11, 조인트의 수는 14 가 나오며 각각의 조인트의 자유도를 계산하면 식(10)과 같이 계산되어 최종 4 자유도 운동을 만들어 낸다는 것을 알 수 있다.

$$M_{4dof} = 6(11 - 14 - 1) + 1 \times 5 + 2 \times 4 + 3 \times 5 = 4 \tag{10}$$

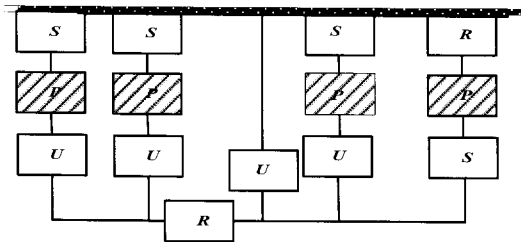


Fig. 3 Link-pair relationship diagram of the 4-dof mechanism with two platforms

2.2.3 운동 특성(Motion Characteristics)

구동부의 적용 가능한 최대 힘이 정해졌을 때, 디바이스 플랫폼에서의 최대 힘/토크는 플랫폼과 구동기 사이의 아래 힘/토크 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\tau = J^T F \tag{11}$$

여기서 τ 는 구동부의 힘 벡터이고, F 는 플랫폼의 힘 벡터이다. 제한된 구동부의 힘으로부터, 플랫폼에 적용 가능한 최대 힘/토크는 각 구동부의 최대 힘이 정해진 범위를 넘기는 지의 유무를

이용하여서 이산적으로 계산될 수 있다.

비슷하게 구동부의 적용 가능한 최대 속도가 주어졌을 때 디바이스 최대 속도는 아래 속도 관계식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\dot{x} = J\dot{\theta} \tag{12}$$

여기서 \dot{x} 은 디바이스 플랫폼의 속도, $\dot{\theta}$ 는 구동부의 속도를 나타낸다. 따라서 모터의 최대 토크 0.2Nm 가 주어졌을 때 플랫폼이 낼 수 있는 x, y 축 방향 최대 토크 및 모터의 최대속도 0.013m/s 가 주어졌을 때 플랫폼의 최대 각속도는 각각 표 1 같이 구해진다.

Table 1 The performance of the intelligent foot

	Pitch	Roll	Actuator
Velocity	0.5rad/s	0.5rad/s	0.013m/s
Torque	0.2Nm	0.2Nm	0.2Nm

2.3 6 축 힘/모멘트센서

2.3.1 6 축 힘/모멘트센서 제작

본 논문에서는 로봇의 지능형 발을 위한 6 축 힘/모멘트센서를 제작하기 위하여 Kim³ 이 개발한 6 축 힘/모멘트센서의 구조를 그대로 사용였고, 용량은 사람 성인의 몸무게를 고려하여 힘 $F_x = F_y = 500N, F_z = 1200N$ 이고 모멘트는 $M_x = M_y = 18Nm, M_z = 8Nm$ 로 결정하였다. 그리고 6 축 힘/모멘트센서는 각각의 게이지부착위치에 스트레인게이지(N2A-13-S1452-350, Micro-Measurement Company 사 제작, 게이지 상수 2.03, 크기 3x7.2mm)를 부착하고 휘스톤브리지³⁴ 구성하여 제작하였으며, Fig. 4 는 오른쪽 발의 앞꿈치와 뒤꿈치를 위한 제작된 6 축 힘/모멘트센서의 사진을 보이고 있다.

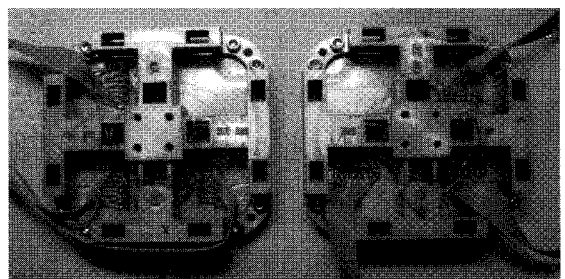


Fig. 4 Photograph of developed 6-axis force/moment sensors for right foot

2.3.2 센서의 특성실험 및 고찰

6 축 힘/모멘트센서의 특성실험은 6 축 힘/모멘트센서 교정장치⁶를 이용하여 정격하중 $F_x=F_y=500N$, $F_z=1200N$ 과 모멘트 $M_x=M_y=18Nm$, $M_z=8Nm$ 를 가하고 각 센서의 정격출력을 측정하였으며, 총 세 번의 실험을 실시하여 평균값으로 각 센서의 정격출력을 결정하였다. Table 2 와 3 은 각각 앞꿈치와 뒤꿈치를 위한 6 축 힘/모멘트센서의 상호 간섭오차를 나타내고 있다. 개발한 6 축 힘/모멘트센서의 최대 상호간섭오차는 2.84%이내 이었다.

Table 2 Interference errors of the sensor for front-part of the sole

Sensor F/M	Interference error (%)					
	F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z
F _x =200N	-	0.36	0.26	0.16	-0.83	-0.56
F _y =200N	0.12	-	0.43	0.22	0.25	0.78
F _z =200N	0.06	0.17	-	-1.38	0.92	0.34
M _x =5Nm	-0.42	2.65	-1.48	-	-0.09	-0.28
M _y =5Nm	2.84	-0.74	1.02	0.16	-	0.87
M _z =5Nm	-1.12	1.29	0.19	0.88	0.43	-

Table 3 Interference errors of the sensor for front-part of the sole

Sensor F/M	Interference error (%)					
	F _x	F _y	F _z	M _x	M _y	M _z
F _x =200N	-	0.27	0.31	0.36	-1.13	-0.23
F _y =200N	0.17	-	0.23	0.44	0.21	1.11
F _z =200N	0.21	0.31	-	-1.09	0.88	0.32
M _x =5Nm	-0.26	2.67	-0.86	-	-0.18	-0.46
M _y =5Nm	2.39	-0.84	1.02	0.15	-	0.82
M _z =5Nm	-0.89	1.56	0.19	0.83	0.27	-

3. 제어장치

Fig. 5 는 지능형 발의 제어장치 블록도를 나타내고 있으며, Fig. 6 은 제작된 지능형 발의 제어장치를 나타내고 있다. 이 제어장치는 5 개의 DSP(digital signal processor), 외부 메모리(memory), 증폭기부(amplifier), 통신부, 전원부, 스위치부, 모터드라이브 등으로 구성되었다. DSP 는 30MHz 크리스탈을 사용하여 발생된 클럭(clock)을 DSP 내부에서 5 배 증폭시켜 150 MHz 로 동작되고, 내부 플래쉬롬에 프로그래밍된 동작 프로그램을 램에 임

시로 저장한 상태에서 각각의 명령을 처리하며, A/D 컨버터, 병렬 인터페이스, 직렬 통신 인터페이스 등을 동작 시킨다. DSP 를 5 개 사용한 것은 오른 쪽과 왼쪽 지능형 발 2 개에 내장되어 있는 4 개의 6 축 힘/모멘트센서의 값을 받아 처리하고, 또한 직선운동기구에 설치되어 있는 총 8 개의 모터를 구동하며, 인간형 로봇의 무릎, 골반 부분의 모터를 구동하기 위해서이다.

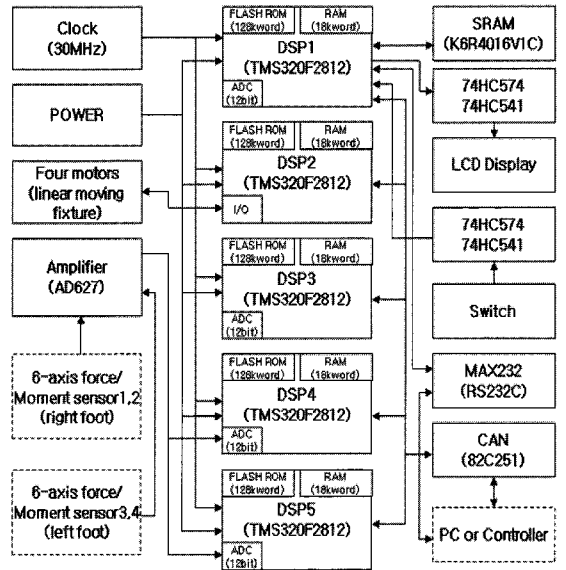


Fig. 5 Block diagram of controller for the intelligent foot

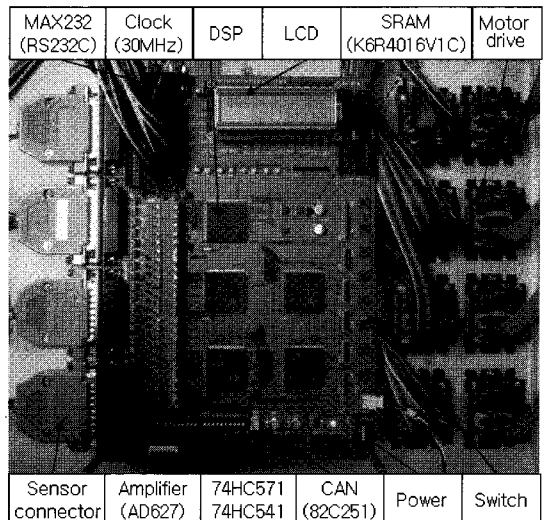


Fig. 6 Photograph of the manufactured controller for the intelligent foot

A/D 컨버터는 4 개의 6 축 힘/모멘트 감지센서로부터 출력되는 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸기 위하여 사용되고, 병렬 인터페이스는 LCD 에 신호를 주기 위하여 사용되며, 직렬통신 인터페이스는 컴퓨터 혹은 다른 제어장치와 통신하기 위해 사용된다. 그리고 전원은 DSP 와 다른 주변 장치들에 전압 9 V, 5 V, 3.3 V, 1.8 V 를 각각 공급하며, 스위치는 원하는 6 축 힘/모멘트 센서들의 각 센서(Fx 센서, Fy 센서, Fz 센서, Mx 센서, My 센서, Mz 센서)의 측정값을 LCD 에 나타내거나 지능형 발의 움직임 등의 명령을 내리기 위해 사용된다. 제작된 제어장치의 크기는 240 mm×180 mm 로 로봇에 장착하기에 적당한 크기이다. 모터드라이브는 오른쪽과 왼쪽 지능형 발의 각각 4 개(총 8 개)의 직선운동기구에 내장되어있는 모터(제작회사:맥슨, 모델: 345324)를 제어하기 위해 사용되며, 맥슨 모터에서 제작되었고 모델은 EPOS24 이다.

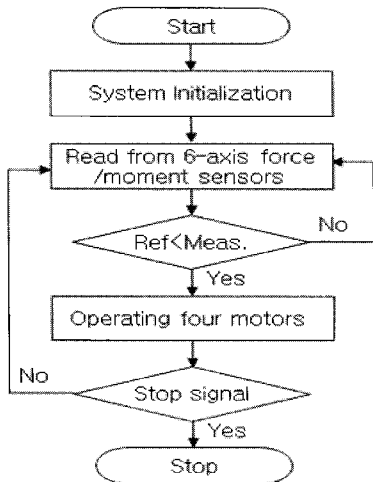


Fig. 7 Flow chart of controller

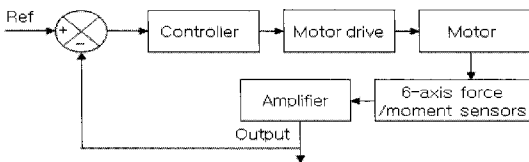


Fig. 8 Block diagram of controller

Fig. 7 은 제어장치의 흐름도를 나타내고 있다. 제어장치의 동작은 첫째, 제어장치의 전원 스위치를 ON 하면 각 센서의 출력값을 순차적으로 측정하여 LCD 에 출력, 모터의 초기위치 등의 초기화

를 실시한다. 둘째, 지능형 발의 뒤꿈치 및 앞꿈치에 내장되어 있는 6 축 힘/모멘트센서들로부터 측정값을 읽는다. 셋째, 각 센서의 기준값과 측정값을 비교하여 정해진 값보다 클 경우에는 직선운동기구의 모터를 회전시켜 뒤꿈치 및 앞꿈치를 회전시킨다. 넷째, 정지신호가 있으면 지능형 발의 모든 기구의 위치를 초기 위치로 제어하여 똑바로 서있는 자세로 정지한다.

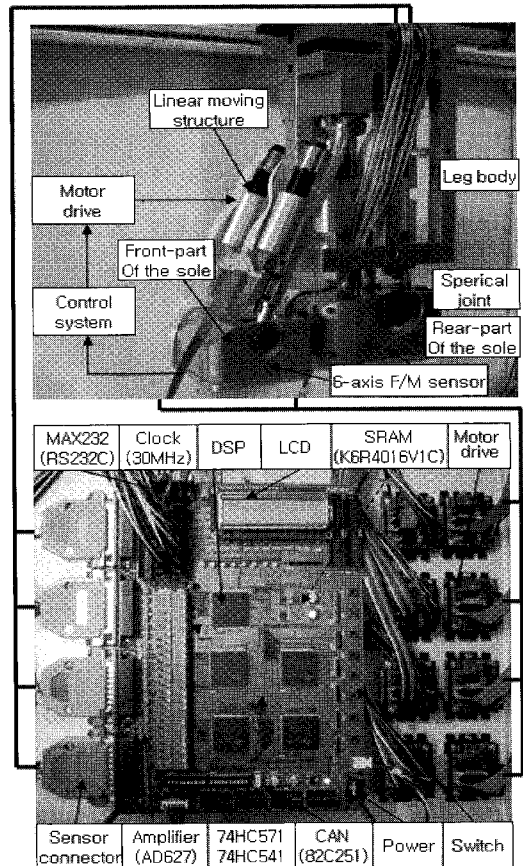


Fig. 9 Photograph of the developed intelligent robot's foot

Fig. 8 은 제어장치의 블록도를 나타내고 있다. 뒤꿈치의 좌우방향 제어일 경우에는 모멘트 Mx 의 제어를 위한 기준값은 0 이고, 제어방법은 뒤꿈치의 Mx 측정값에 따라 모터드라이브에 정방향 혹은 역방향의 펄스를 내보내고 모터 드라이브는 모터에 전원을 공급하여 모터를 회전시킨다. 그러면 직선운동기구가 움직이고 이것에 의해 인간형 로봇이 균형을 잃지 않고 안전하게 걸을 수 있다.

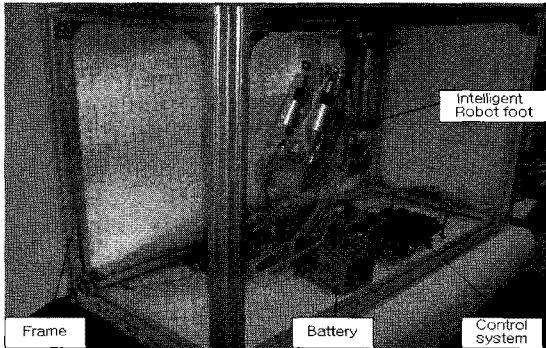


Fig. 10 Experimental set up for the characteristic test of the developed intelligent foot

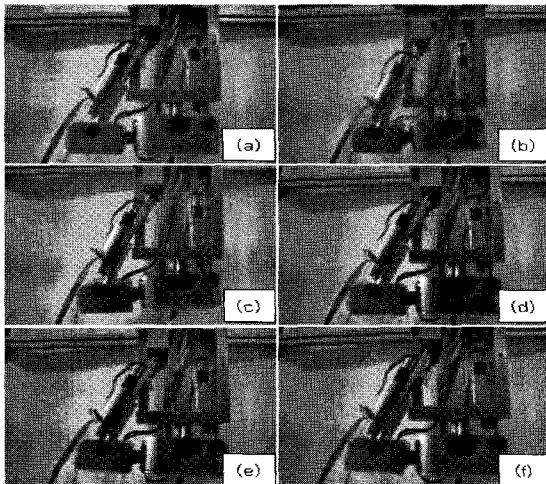


Fig. 11 Photograph on walking process of the developed intelligent foot

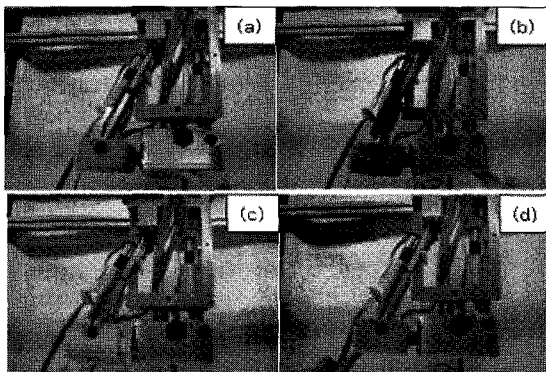


Fig. 12 Photograph of the developed intelligent foot under reaction force

4. 지능형 발의 교정, 특성실험 및 고찰

Fig. 9 는 본 연구에서 개발한 지능형 로봇발의 사진을 나타내고 있다. 앞꿈치와 뒤꿈치에 내장되어 있는 6 축 힘/모멘트센서의 교정은 제어장치의 출력이 무하중일 경우에는 1500mV 가 되도록 조절하고, 6 축 힘/모멘트센서 교정장치⁶을 이용하여 각 정격하중을 가한 후 제어장치의 출력이 최대일 때 1000mV 가 되도록 하였다. 즉 정격하중이 +방향으로 가해졌을 경우에는 2500mV 가 출력되도록 교정하였다.

Fig. 10 은 개발한 인간형로봇의 지능형 발의 특성실험을 위한 실험장치를 나타내고 있으며, 인간형 로봇의 본체가 없으므로 실험장치를 제작하여 부착한 후 특성실험을 실시하였다. 본 연구의 특성실험은 프레임으로 구성에 몸체에 지능형 발을 매달고 인간이 걸어가는 것과 같이 발의 움직임 실험을 실시하였으며, Fig. 11 의 (a)-(f)가 뒤꿈치로부터 앞꿈치까지 걷는 한걸음의 동작을 나타내는 사진이다. 사람과 같이 자연스럽게 움직임을 확인하였으며, 로봇발의 움직임이 기구학적으로 문제가 없음을 확인하였다.

Fig. 12 는 앞꿈치와 뒤꿈치를 가진 지능형 로봇 발에 외부힘을 가했을 때 뒤꿈치와 앞꿈치가 각각 회전한 상태의 사진을 나타낸 것이다. 이것은 불규칙한 지면에서 걸을 수 있는지를 확인하기 위한 특성실험이고, Fig. 12 의 (a)-(d)에서 보는 것과 같이 손으로 누르는 쪽을 향하여 회전함을 확인하였다. 이 결과는 힘이 가해진 곳이 블록한 지면 혹은 돌과 같은 장애물을 밟아도 로봇의 균형을 유지할 수 있음을 나타낸 것이다. Fig. 12 의 (a)와 (c) 는 앞꿈치와 뒤꿈치를 연결하는 중앙 중심선을 기준으로 좌우로 회전한 그림이고 (b)와 (d)는 앞꿈치와 뒤꿈치를 연결하는 중앙 중심선의 직각방향의 선을 기준으로 각각의 구조인트를 중심으로 앞과 뒤로 회전한 그림이다.

Fig. 13 은 Fig. 12 의 (a), (c)와 같이 외력을 가하였을 경우에 6 축 힘/모멘트센서의 출력을 나타낸 것이고, 각각의 그래프에서 Fz1 과 Fz2 는 수직방향으로 가해진 힘이고 Mx1 과 Mx2 는 뒤꿈치와 앞꿈치의 축을 기준으로 시계방향으로 가해진 모멘트를 나타낸다. 이와 같은 값을 제어장치가 받으면 각각 Fig. 12 의 (a)-(d)같은 상태로 지능형 발을 제어하게 되고 이로 인해 로봇은 중심을 잃지 않고 안전하게 걸을 수 있다. 실험결과, 지능형 발은 인간형 로봇이 안전하게 서고 걸을 때 사용될

수 있을 것으로 판단된다.

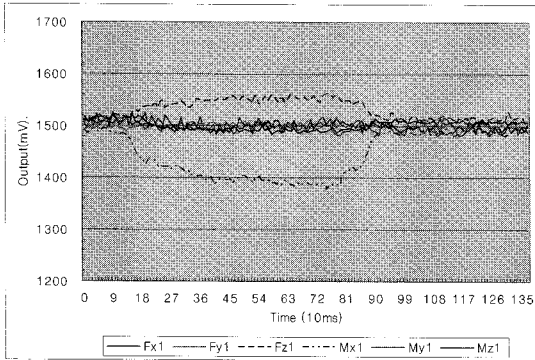
단된다.

후 기

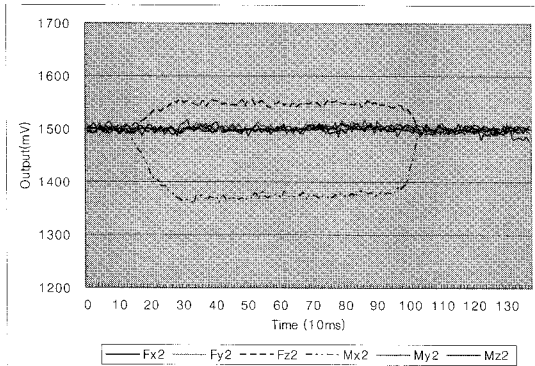
이 논문은 2007 년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2006-000-10468-0).

참고문헌

1. Park, I. W., Kim, J. Y., Cho, B. K. and Oh, J. H, "Control hardware integration of a biped humanoid robot with an android head," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 56, No. 1, pp. 95-103, 2008.
2. Kagami, S., Mochimaru, M., Ehara, Y., Miyata, N., Nishiwaki, K., Kanade, T. and Inoue, H., "Measurement and comparison of humanoid H7 walking with human being," Robotics and Autonomous Systems, Vol. 48, No. 4, pp. 177-187, 2004.
3. Kim, G. S. and Yoon, J. W., "Development of 6-axis force/moment sensor for robot's intelligent foot," J. of KSPE, Vol. 24, No. 7, pp. 90-97, 2007.
4. Nagai, K., Ito, Y., Yazaki, M., Higuchi, K. and Abe, S., "Development of a small Six-component force/torque sensor based on the double-cross structure," Journal of the Robotics Society of Japan, Vol. 22, No. 3, pp. 361-369, 2004.
5. Kim, G. S., Shin, H. J., Kim, H. M., Hu, D. C. and Yoon, J. W., "Linear Moving Structure and Position Sensor for Robot's intelligent foot," Proc. of KSPE Spring Conference, pp. 685-686, 2008.
6. Kim, G. S. and Yoon, J. W., "Development of Calibration System for Multi-Axis Force/Moment Sensor and its Uncertainty Evaluation," J. of KSPE, Vol. 24, No. 10, pp. 91-98, 2007.



(a) in case of Fig. 12-(a)



(b) in case of Fig. 12-(c)

Fig. 13 Graph of the developed intelligent foot under reaction force

5. 결론

본 논문에서는 발바닥에 작용되는 반력을 측정하여 사람의 발과 같이 자연스럽게 사방으로 회전하는 인간형 로봇의 지능형 발을 개발하였다. 앞꿈치와 뒤꿈치에 내장되는 6 축 힘/모멘트센서를 제작하였고, 그들의 특성실험결과 상호간섭오차가 3%이하로 매우 우수함이 확인되었다. 지능형 발의 특성실험 결과, 앞꿈치와 뒤꿈치에 가해지는 반력에 따라 뒤꿈치는 발목에 설치된 구 조인트를 기준으로 사방으로 회전됨을 확인하였고, 앞꿈치 도 좌우 및 전후로 회전함을 확인하였다. 지능형 발의 특성실험결과, 사람과 비슷하게 자연스럽게 움직임을 확인할 수 있었다.

따라서 본 논문에서 개발한 로봇의 지능형 발은 불규칙한 지면에서 안전하게 걸을 수 있는 인간형 로봇에 부착하여 사용할 수 있을 것으로 판