

부드러운 지면에서의 휴머노이드 로봇의 안정보행

Stable Walking of a Humanoid Robot under Soft Terrains

유영국^{1,✉}, 김진걸¹
Young-Kuk Yoo^{1,✉} and Jin-Geol Kim¹

1 인하대학교 IT 공과대학 전기공학부 (School of Electrical Engineering, Inha Univ.)
✉ Corresponding author: drager007@nate.com, Tel: 032-860-8923

Manuscript received: 2008.4.14 / Revised: 2008.11.3 / Accepted: 2009.1.8

The purpose of this paper is to accomplish the stable humanoid robot walking on the soft terrains. The goal of the humanoid robot development is to make the robotic system perform some tasks in human living environment. However, human dwelling environments are very different from those of laboratories, where varied experiments are performed by the robot. In many cases, the ground is soft or elastic unlike the floor of a laboratory. When a robot walks on the soft ground, the sole of robot contacts the uneven ground. This results in unstable walking or walking may be impossible according to the degree of softness. Therefore, the algorithm that facilitates stable walking on the soft ground surface is required. In this paper, we suggest an algorithm that controls the ankle to help the robot walk stably on the soft ground using the humanoid robot (ISHURO-II) as a real model. A humanoid robot walking on the soft ground was simulated to verify that the proposed algorithm results in stable walking.

Key Words: Humanoid Robot (인간형 로봇), Soft Terrain (부드러운 지면), Walking Trajectory (보행 궤적)

1. 서론

최근 지능형 로봇에 관한 관심이 높다. 그 중에서도 인간과의 대화, 접촉 또는 조작 등에 반응하고 인간의 생활환경에 적응할 수 있는 휴머노이드 형태의 로봇¹⁻³에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 휴머노이드 로봇은 인간과 유사한 구조를 가지므로 인간과의 협동 작업 및 인간이 수행하기 어렵고 위험한 작업을 대신할 수 있다. 이와 같이 휴머노이드 로봇이 인간과 협업하거나, 인간의 업무를 대신하기 위해서는 인간의 생활 공간에서 안정되고 자율적인 보행이 보장되어야 한다. 그러나 인간의 생활공간은 실험실의 환경과 달리 복잡하게 이루어져 있다. 가정집의 바닥을 예로 들면 콘크리트, 타일, 나무, 매트, 이불 등 다양한 재질로

이루어져 있으며 장소마다 다르며 그 변화를 인식하기도 어렵다. 바닥의 재질은 휴머노이드 로봇의 보행에 많은 영향을 미치므로 바닥 환경을 인식하기 위하여 많은 연구들이 이루어지고 있으며 재질에 따른 보행 방식을 결정하는 연구⁴가 진행되어 왔다. 또한 바닥과 로봇의 발바닥과의 접촉관계를 모델링하여 안정된 보행을 연구하였다.⁵ 하지만 기존의 연구들은 재질의 인식이 어렵고 단순한 보행 방식의 결정으로는 다양한 환경의 변화에 유연하게 대처하기 어렵다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 휴머노이드 로봇의 허리에 장착된 가속도 센서를 이용 보행 시 휴머노이드 로봇의 기울기 가속도 변화를 측정하였다. 그리고 측정된 가속도 변화를 사용 바닥의 재질을 인식하여 보행 궤적을 선택하고 기울기를 측정하여 바닥의 기울기

를 파악 휴머노이드 로봇의 발목을 사용하여 단단하지 않은 바닥에서의 보행으로 발생한 불안정성을 보상하였다.

2. 휴머노이드 로봇의 구성

2.1 기구적 구성

본 논문의 연구 대상인 휴머노이드 로봇 ISHURO-II 는 총 24 자유도를 가지고 있는 시스템으로 이를 세부적으로 보면 로봇이 사람과 유사한 움직임을 수행할 수 있는 각각 6 자유도를 가진 다리와, 몸체 보정을 위한 2 자유도의 몸체, 비전 시스템이 장착된 4 자유도의 머리, 물체를 원하는 위치로 보내기 위한 각각 3 자유도의 팔을 가지고 있다. 그림 1 은 자체 제작된 휴머노이드 로봇과 좌표계를 나타낸다.

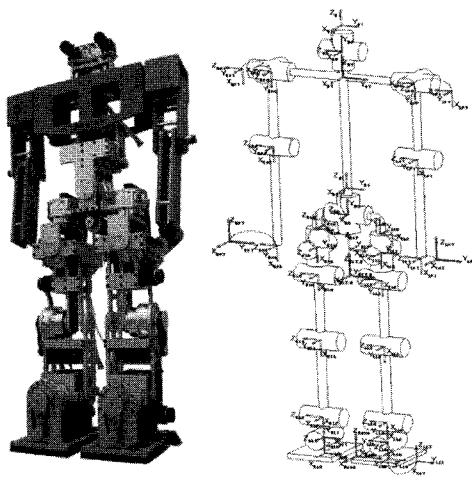


Fig. 1 Humanoid robot, ISHURO-II

ISHURO-II 의 전체 높이는 950.5mm, 최대 폭 290mm 이며 전체 무게는 약 35kg 으로 설계되었다. 표 1 은 휴머노이드의 기구부 주요 재원을 나타낸다.

휴머노이드의 하체 프레임은 변형을 최소화 하면서 무게를 줄이기 위해 두랄루민을 사용하였으며, 동력전달에는 타이밍 벨트와 풀리를 사용하여 소음과 백래쉬를 줄이고 기어비를 높였으며 인간과 유사한 형상의 설계가 가능하게 하였다. 모터와 벨트로 연결되어 각 관절의 구동단에 장착된 정밀 감속기는 고강성, 고토크와 함께 높은 회전정밀도를 지니고 있어 출력 축 엔코더가 필요 없

다는 장점이 있다.

Table 1 Hardware specifications

Height	950.5mm
Width	459 X 290mm
Weight	35kg
Foot	215mm X 140mm
D.O.Fs	24
Actuator	RE - 40 DC motor(lower body)
Power	150W(lower body motor)
Gear Ratio	1:199(lower body)
FSR Sensors	Interlink FSRTM #400

2.2 동역학 해석

안정적인 구동을 위한 로봇을 설계할 때 필요한 각 관절의 토크 요구를 예측하고 보행 시 안정성을 고려하기 위해서는 로봇 시스템에 대한 동역학적인 해석이 필요하다. 로봇 설계를 위한 토크 해석과 로봇 보행 시 발생할 수 있는 로봇 균형 안정성의 고려를 위해 Newton-Euler Method 를 이용하였다. 로봇의 토크 계산을 위한 동역학적인 해석 방법은 크게 Lagrange-Euler 방법과 Newton-Euler 방법으로 크게 나뉠 수 있는데, Lagrange-Euler 방법은 로봇을 에너지 관점에서 해석하여 처리한 방법으로써 일반적이고 로봇의 다양한 환경에서 모두 적용할 수 있는 장점을 가지고 있으나 연산량이 많고 복잡한 구조에서 적용하기 어려운 단점을 가지고 있다. 이에 대해 Newton-Euler 방법은 로봇의 기계적인 연쇄를 통해 동역학을 해석한 기법으로 해석 시 컴퓨터를 통한 산술 연산이 유리하다. 폐쇄형 구조의 경우 정확한 토크 계산이 어렵다는 단점이 있지만, 휴머노이드 로봇의 경우 한 다리 지지 상태에서의 안정성에 대한 문제와 토크 문제가 로봇 동역학 해석에 있어서 주요한 고려 사항이므로 개방형 연쇄 구조라고 가정하여도 크게 무리가 없기 때문에 Newton-Euler Method 를 이용하여 동역학 해석을 수행하였다.

로봇 시스템의 동역학적 해석을 위해 그림 1 과 같은 좌표계 시스템을 사용하였다. 다리에 9 개, 몸통 및 상체 전체 1 개의 질량으로 가정하여 로봇을 총 10 개의 질점으로 해석하였다. Newton-Euler Method 를 이용한 동역학 해석은 식(1)~(8)으로써 표현 될 수 있다.

$${}^i R_0 p_i^* = [a_i \quad d_i \sin \alpha_i \quad d_i \cos \alpha_i]^T \quad (1)$$

$${}^i R_0 \omega_i = {}^i R_{i-1} ({}^{i-1} R_0 \omega_{i-1} + z_0 \dot{q}_i) \quad (2)$$

$${}^i R_0 \dot{\omega}_i = {}^i R_{i-1} [{}^{i-1} R_0 \dot{\omega}_{i-1} + z_0 \ddot{q}_i + ({}^{i-1} R_0 \omega_{i-1}) \times z_0 \dot{q}_i] \quad (3)$$

$${}^i R_0 \dot{v}_i = ({}^i R_0 \dot{\omega}_i) \times ({}^i R_0 p_i^*) + ({}^i R_0 \omega_i) \times [({}^i R_0 \omega_i) \times ({}^i R_0 p_i^*)] + {}^i R_{i-1} ({}^{i-1} R_0 \dot{v}_{i-1}) \quad (4)$$

$${}^i R_0 a_i = ({}^i R_0 \dot{\omega}_i) \times ({}^i R_0 s_i) + ({}^i R_0 \omega_i) \times [({}^i R_0 \omega_i) \times ({}^i R_0 s_i)] + {}^i R_0 \dot{v}_i \quad (5)$$

$${}^i R_0 f_i = {}^i R_{i+1} ({}^{i+1} R_0 f_{i+1}) + m_i {}^i R_0 a_i \quad (6)$$

$${}^i R_0 n_i = {}^i R_{i+1} [{}^{i+1} R_0 n_{i+1} + ({}^{i+1} R_0 p_i^*) \times ({}^{i+1} R_0 f_{i+1})] + ({}^i R_0 p_i^* + {}^i R_0 s_i) \times ({}^i R_0 f_i) + (R_0 I_i, R_i) (R_0 \omega_i) + (R_0 \omega_i) \times [({}^i R_0 I_i, R_i) ({}^i R_0 \omega_i)] \quad (7)$$

$$\tau_i = ({}^i R_0 n_i)^T (R_{i-1} z_0) + b_i \dot{q}_i \quad (8)$$

여기에서 ${}^i R_0$ 는 기준 좌표계에서 i 좌표계까지의 회전 행렬을 의미하며, ω_i 와 $\dot{\omega}_i$ 는 각각 기준 좌표계에서 본 i 좌표계의 각속도(angular velocity)와 각가속도(angular acceleration)를, z_0 는 $(0, 0, 1)^T$ 를, \dot{q}_i 와 \ddot{q}_i 는 각각 i 좌표계에서의 각속도와 각가속도를, \dot{v}_i 은 기준 좌표계에서 본 i 좌표계의 선속도(linear velocity)를, a_i 는 기준 좌표계에서 i 번째 질량 중심에서의 선가속도(linear acceleration)를 의미한다. 그리고 f_i, F_i, n_i, b_i 는 각각 질점에 걸리는 힘(internal force), 외력(external force), 모멘트(moment), 점성 마찰(viscous damping)상수를 의미하며, I_i, τ_i 는 각각 i 링크의 형상에 의한 관성 모멘트(moment of inertia)와 관절에 걸리는 토크를 의미한다. 기구학적 연쇄 구조로 이루어진 로봇의 경우 위의 식(1)부터 식(8)로부터 비교적 간단하게 토크를 구할 수 있으므로 휴머노이드 로봇의 보행 중에 발생하게 될 토크를 유추하여 설계와 보행 생성에 이용할 수 있게 된다.

식(9)와 식(10)은 로봇 시스템의 안정적인 보행에 기본적인 척도가 되는 ZMP(Zero Moment Point)를 나타낸다.

$$x_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i (z_i + G_z) x_i - \sum_{i=0}^8 m_i (\dot{x}_i + G_x) z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (z_i + G_z)} \quad (9)$$

$$y_{ZMP} = \frac{\sum_{i=0}^8 m_i (z_i + G_z) y_i - \sum_{i=0}^8 m_i (\dot{y}_i + G_y) z_i}{\sum_{i=0}^8 m_i (z_i + G_z)} \quad (10)$$

여기서, m_i 는 i 번째 질점, G 는 중력가속도를 의미한다. x_i, y_i, z_i 는 지지각 기준 좌표계에서의 i 번째 링크의 질량중심에 대한 거리벡터, $\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i$ 항들은 기준 좌표계에서의 i 번째 질점의 x, y, z 방향 가속도를 의미하고 로봇의 운동 해석 및 방정식의 해결을 위해 꼭 계산 되어야 할 항들이다. 만약 ZMP 의 정보가 한 다리 지지 상태(single supported state)일 경우에 로봇의 발바닥 안에 ZMP 가 들어 오고 양다리 지지 상태(double supported state)에서 ZMP 가 두 발바닥 사이에 존재하는 영역 내에 존재하게 되면 로봇은 안정적인 보행을 수행하고 있다고 가정할 수 있다.

2.3 제어기 구성

통신방법에 있어서 병렬 접속을 하면 속도 면에는 이점이 있으나 접속회로가 복잡해지는 단점이 있어 접속회로가 간단한 직렬 접속 방법을 이용한다. 여러 가지 직렬 통신 방식 중에서도 자동차, 로봇, 산업 자동화 등과 같은 다양한 분야에서 많이 사용되고 있는 CAN 프로토콜⁶ 을 사용하여 ISHURO-II 의 제어기 간의 네트워크를 구현하였다.

CAN 프로토콜은 시스템의 실시간 제어가 가능하고 구현이 간단하다. 또한 10m 이내에서 최대 1Mbps 의 전송속도를 가지고 한 프레임에 8 바이트의 데이터를 전송할 수 있어 짧은 데이터 전송에 장점을 가진다. 그리고 Bit error, Stuff error, CRC error, Form error, Acknowledgment error 의 에러 검출이 가능하다는 장점이 있다. 그림 2 는 휴머노이드의 전체 제어 시스템 구성을 나타낸다.

그림 2 에서와 같이 ISHURO-II 의 제어 시스템은 레직의 생성과 안정화 알고리즘을 주관하는 등, 로봇의 두뇌역할을 하는 주제어기와 각 관절마다 구성되어 모터의 구동을 담당하는 지역 제어기, 그리고 주 제어기와 지역 제어기 사이의 통신을 담당하는 미들웨어인 메시지 컨트롤러로 구성된다.

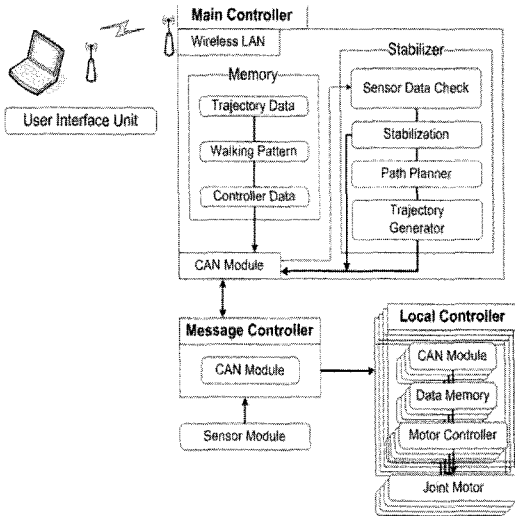


Fig. 2 Control system structure of ISHURO-II

주 제어기는 범용 PC 를 사용하여 소프트웨어 개발 및 디버깅 작업을 용이하게 하였고, OS 는 윈도우 XP 를 사용하였다. 그리고 윈도우 XP 를 실시간으로 사용하기 위해서 RTX(Real Time Extension)⁷ 을 적용하였다. 지역제어기 및 센서와 CAN 통신을 하기 위해서 PC 에 Ethernet CAN 모듈을 장착하였다.

한편, 그림 3 에서 나타낸, TMS320F2812 DSP 를 탑재한 지역제어기는 FET 를 사용한 150W 급 고성능 모터 드라이버 및 eCAN 모듈이 장착되어 있다. eCAN 모듈은 CPK(CAN Protocol Kernel)와 32 개의 메시지 박스를 가지고 있다. 11 비트와 29 비트 메시지 인식자 사용이 가능하나 주 제어기와의 통신을 고려하여 11 비트를 사용한다. ISHURO-II 의 지역 제어기는 하나의 제어기가 하나의 모터를 제어하는 독립된 구조를 가진다.

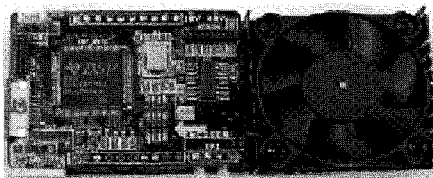


Fig. 3 Local controller

2.4 센서 시스템

휴머노이드 ISHURO-II 는 허리에 장착된 가속도센서를 이용해 보행하는 동안 가속도의 변화를 측정하여 환경인식 알고리즘의 파라미터로 사용한

다. 가속도 센서는 센서에 가해지는 가속도를 감지하여 중력의 변화나 센서의 기울기 등을 측정할 수 있다. 실제 실험에 사용된 가속도센서인 Analog Device 社의 ADIS 16003⁸ 은 MEMS(Micro Electro Mechanical Systems) 기술을 사용하여 기존의 가속도 센서보다 가격이 저렴하고 저전력이며 크기가 작고 정밀하다는 장점이 있다. 그림 4 는 ADIS 16003 을 사용한 3 축 가속도센서 모듈이다.

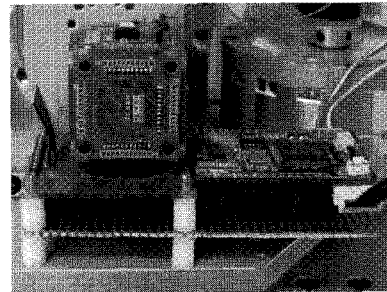


Fig. 4 3-axis accelerometer

보행패턴에 따른 가속도 변화를 정확히 측정하기 위해서 허리의 중심부에 3 축 가속도 센서의 중심을 위치시켰으며, CAN 통신을 사용하여 지역 제어기의 엔코더 피드백과 동시에 센서 값을 측정하여 저장하도록 하였다. 표 2 는 사용한 센서의 특성을 보여준다. ADIS16003 가속도 센서는 SPI 통신을 이용하여 별도의 A/D 변환이 필요 없이 센서 컨트롤러와 가속도 정보를 주고 받을 수 있다. 최대 ±1.7g 의 진동인 동적 가속도 및 중력가속도인 정적 가속도의 측정이 가능하고 샘플링 주기가 60Hz 에서 최소 1mg 의 가속도 변화를 측정할 수 있다.

Table 2 ADIS 16003 sensor characteristics

Parameter	Value
Size Range	7.2x7.2mm
Measure Range	±1.7g
Device Thickness	3.6mm
Resolution	1mg
Zero g Bias Lever	2048(LSB)
Power Consumption	<2mA
Package Type	LGA
Temperature Range	-40° C~ +125° C

센서 모듈로부터 측정된 데이터는 CAN 통신을 사용해 주제어기로 보내지는데 이 작업을 수행하기 위해 본 연구에서는 센서제어기에 지역제어기와 같은 TMS320F2811 을 사용하였다. 주제어기에서 지역제어기로는 매 40ms 마다 2 개의 궤적데이터가 전송되고 지역제어기는 20ms 마다 주제어기에서 전송 받은 2 개의 궤적을 하나씩 레퍼런스로 사용하여 모터를 제어하고 제어된 결과인 엔코더 데이터를 주제어기로 전송한다. 그림 5 는 주제어기의 궤적전송과 센서제어기의 센서피드백을 하는 CAN 통신의 타이밍도이다.

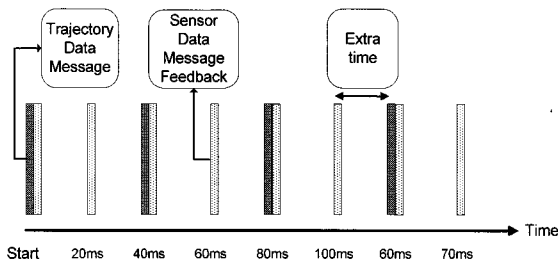


Fig. 5 Timing of sensor data

센서 제어기는 지역제어기가 매 20ms 마다 피드백 데이터로 엔코더 데이터를 주제어기로 전송할 때 동시에 X, Y, Z 축의 가속도 센서 값을 TMS320F2811 내장의 SPI 인터페이스를 사용하여 센서 모듈로부터 수집하고 수집된 데이터를 주제어기로 전송한다. 이렇게 전송된 센서데이터는 주제어기에서 바닥 재질을 파악하기 위한 정보로 활용된다.

3. 보행알고리즘

3.1 전체 보행 알고리즘

휴머노이드 로봇이 안정적인 보행을 수행하기 위해서는 기본적으로 로봇의 움직임이 안정적이면서 부드러워야 한다. 이와 더불어 로봇이 스스로의 상태에 대해 인지하고 이를 근거로 안정적인 보행을 할 수 있는 보행제어가 첨가되어야 실제 외부의 외란에 대해서 안정적인 보행을 수행할 수 있게 된다. 그렇기 때문에 단단하지 않은 바닥에서 보행 안정성 확보를 위한 환경인식과 보행 제어에 대한 개념은 필수적이다. 그림 6 은 보행 알고리즘을 나타낸 것이다. 먼저 가속도 데이터와 DWT(Discrete Wavelet Transform)^{9,10} 알고리즘 그리

고 기본 움직임 이용하여 바닥 재질 인식을 하게 되고 여기서 나온 데이터를 이용하여 K-NN 알고리즘을 이용해 바닥재질에 맞는 궤적을 생성하게 된다. 그 데이터를 메인 컨트롤러와 모터로 전송하여 실제적인 보행이 가능하게 된다.

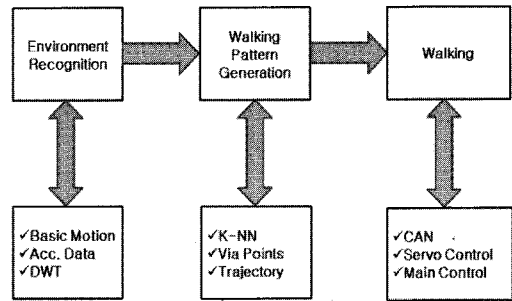


Fig. 6 Walking algorithm

그림 7 의 (a)와 같은 경우는 바닥이 단단하지 않은 재질이기 때문에 휴머노이드 로봇의 무게에 바닥이 눌린 상태이다. 이 경우 다음 보행을 위해 다리를 이동할 때 바닥에 걸리게 되어 보행이 불가능 하거나 회전이 발생하게 된다. 이와 같은 환경에 대해 안정성 확보를 위해 본 논문에서는 바닥의 환경을 인식하고 보행 패턴을 결정하는 과정을 안정화 알고리즘의 첫 단계로 하였다. 로봇은 단단한 바닥이라 가정하고 선 자세에서 보행을 위한 기본 자세로 자세를 변경한다. 기본자세는 보행을 하기 위해 무게 중심을 이동하기 쉬운 자세로 결정하였으며 바닥의 환경에 안정성을 잃지 않도록 하였다. 기본자세로 이동하는 동안 허리에 장착된 가속도 센서를 사용 가속도의 변화를 측정하고 바닥의 재질을 판단한다. 판단된 재질을 바탕으로 보행 궤적을 선택한다. 하지만 재질인식과 보행궤적의 선택만으로는 안정적인 보행이 불가능하다.

그림 7 의 (b)와 같은 경우는 보행을 진행하는 도중 바닥이 로봇과 함께 기울여진 상태이다. 이런 경우 휴머노이드 로봇의 보행의 안정성은 보행 패턴을 결정하는 과정에서 고려한 안정성과 큰 차이가 생기게 되고 결국 보행이 불가능하게 된다. 이런 환경에 대해 안정성을 확보하기 위해서 보행 패턴을 결정한 이후 보행을 진행하면서 보행을 허리에 장착된 가속도 센서로 기울기를 파악하여 바닥의 기울기를 판단하고 발목의 관절을 제어하여

보행 안정성을 확보한다.

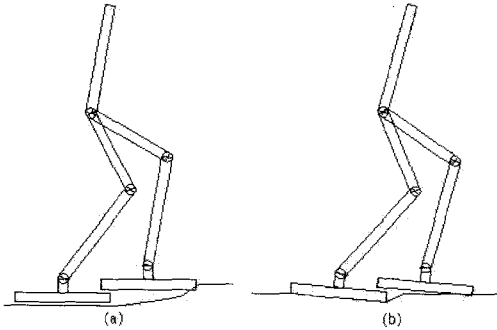


Fig. 7 Walking conditions

3.2 DWT 를 사용한 가속도 데이터 추출

로봇이 보행하는 동안 발생한 가속도의 변화를 측정해 바닥의 환경을 인식하기 위해서는 중력에 대한 가속도량과 보행 동작에 의한 가속도 변화가 바닥 환경과 관련한 가속도 변화의 특징을 추출할 수 있는 데이터 처리가 필요하다. 휴머노이드 로봇이 보행하면서 추출한 가속도 변화 데이터에서 보행으로 생긴 가속도 변화와 재질의 변화로 인해 발생된 가속도 변화를 분리하기 위해 DWT 를 사용하였다. DWT 는 JPEG2000(Joint Photographic Coding Experts Group)과 같은 영상압축과 영상처리 등에 사용되었지만 음성신호 등에 크기, 피치, 하모니 등의 신호를 추출하는데도 이용되고 있다. 아래의 그림 8 을 보면 입력된 신호를 high-pass filter 를 적용한 데이터를 다운, 샘플하여 detail 데이터와 low-pass filter 를 적용한 데이터를 다운, 샘플하여 approximation 데이터에는 전체 신호에서 고주파 성분인 노이즈 및 진동을 없앤 개략적인 모습을 확인할 수 있고 detail 데이터에서는 신호의 저주파 성분을 제거한 신호의 진동 및 노이즈를 포함한 데이터를 확인할 수 있다.

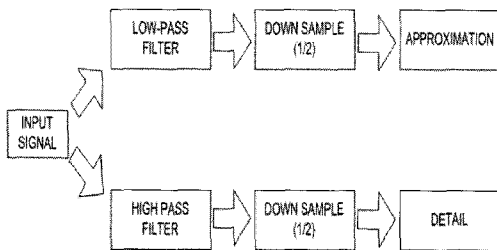


Fig. 8 Block Diagram of DWT

그림 9 는 실제 ISHURO-II 의 보행실험으로 얻은 가속도 데이터를 DWT 에 적용한 모습이다.

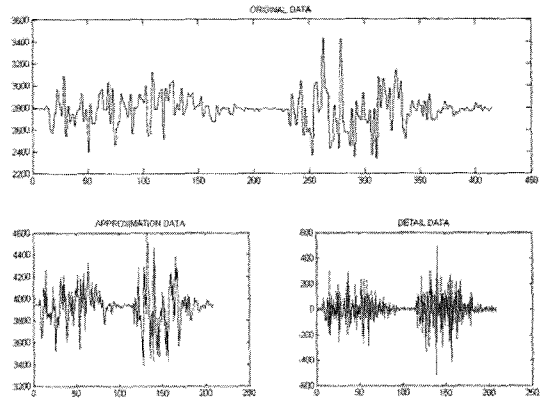


Fig. 9 Implemented data of DWT

3.3 바닥환경인식 알고리즘

휴머노이드 로봇을 보행시키면서 가속도를 측정하면 그 가속도 정보에는 실제 로봇의 구동에 따라 발생한 가속도, 로봇의 초기 자세에 따른 중력 가속도 그리고 재질에 따른 진동 데이터가 포함된다. 이런 다양한 가속도 정보에서 재질에 따른 정보를 추출하기 위해서 DWT 를 사용하여 가속도의 고주파 성분을 추출하였다. 다른 재질에서의 보행 시 가속도의 고주파 성분은 각각 다른 변화를 보인다. 하지만 이 차이에 따른 가속도의 변화의 상관관계를 결정하기 어려우며 새로운 재질에 대한 인식을 하는데 어려움을 겪게 된다. 따라서 본 논문에서는 가속도 센서로 바닥 환경을 인식하는데 machine learning 알고리즘의 하나인 K-NN¹¹⁻¹³ 을 사용하였다. 로봇이 보행 환경에 대해 인식하기 위해 미리 다양한 재질에서의 보행 시 가속도 변화를 측정하여 학습 시켰고 로봇은 학습된 데이터를 바탕으로 현재 입력된 가속도 변화가 어떤 환경에서의 가속도 변화인지 파악한다. 그림 10 은 바닥환경인식 알고리즘의 순서도이다

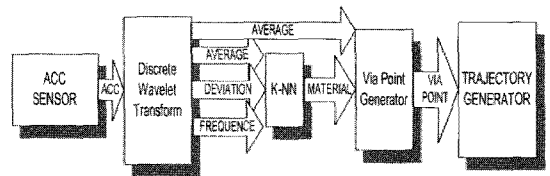


Fig. 10 Environment recognition algorithm

주제어기는 실시간 환장 소프트웨어인 RTX 타 이머를 통해 하체 12 개 관절의 궤적을 40ms 마다 전송한다. 또한 3 축가속도센서모듈을 통한 가속도 데이터는 20ms 마다 CAN 을 통해 모터의 엔코더 데이터와 함께 피드백 되어 주제어기로 전송된다. 전송된 센서 데이터는 DWT 를 통해 K-NN 알고리즘의 입력으로 사용된다. 보행을 위한 초기자세로 동작하면서 발생하는 센서입력을 사용해서 K-NN 알고리즘으로 환경을 인식하고 궤적 생성에 소요 되는 0.34 초 이후부터 알고리즘에 의해 선택된 동작이 수행된다. 표 3 은 초기에 완전히 일어난 자세에서 무릎을 구부리는 기본자세를 취하는 동안 측정된 가속도변화를 이용하여 환경을 인식한 결과이다. 실험은 각각의 환경에 대해 40 번 수행되었다.

환경인식의 결과를 살펴보면 실제보행실험에서 진동이 가장 컸던 인조잔디의 경우가 인식률이 85%로 가장 높았고, 진동이 가장 적었던 나무 또한 72.5%로 높은 인식률을 나타냈다. 하지만 스포츠매트는 나무와 서로 비슷한 특징이 나타나서 K-NN 알고리즘을 사용한 인식에서 나무와 서로 혼동이 되어 인식률이 37.5%로 가장 낮은 결과가 나왔다.

Table 3 Environmental recognition result using K-NN

material	Recognition(%)
Tile	72.5
Wood	52.5
Sports Mat	37.5
Artificial turf	85

3.4 보행안정 알고리즘

휴머노이드 로봇이 보행할 때 바닥의 재질이 단단하지 않은 경우 바닥이 기울는 것에 따라 보행 안정성이 떨어지게 된다. 이런 현상을 방지 하기 위해 보행 안정 알고리즘을 적용하는데 바닥의 기울기를 측정하기 위해서 허리에 장착된 가속도 센서를 사용하였다. 그림 11 은 이를 구현하기 위하여 허리에 장착된 가속도 센서의 측정값을 중력 가속도와와의 역 삼각함수 방식으로 이용하여 기울기를 얻어내는 것이다. 이는 아래의 식 (11)에서 보여주고 있다.

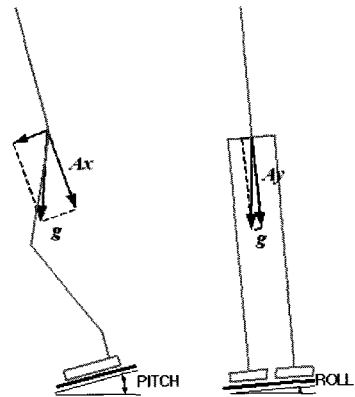


Fig. 11 Diagram of gradient between gravity and acceleration values

$$\begin{aligned}
 \text{PITCH} &= \arcsin(Ax / g) \\
 \text{ROLL} &= \arcsin(Ay / g)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

여기서, g 는 중력을 말하며 Ax 는 x 방향의 가속도이며 Ay 는 y 방향의 가속도이다. 휴머노이드 로봇은 보행을 진행하면서 허리에 장착된 가속도 센서를 사용 바닥의 기울기를 측정한다. 측정된 바닥의 기울기를 발목의 자유도를 사용하여 보상에 줌으로써 바닥 재질에 의해 생긴 불안정성을 극복한다.

4. 시뮬레이션

논문에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위해서 시뮬레이션을 진행하였다. 먼저 단단하지 않은 바닥을 시뮬레이션 하기 위하여 휴머노이드 로봇의 지지발에 2 개의 자유도를 추가하였다. 추가된 2 개의 자유도를 움직여서 로봇이 보행하면서 생기는 지지면의 변화를 시뮬레이션 하게 하였다. 그림 12 는 COG(Center of Gravity)를 계산하기 위하여 제작된 시뮬레이터로써 Visual Studio 와 OpenGL 을 사용하여 제작하였다. 시뮬레이터에서 COG 를 계산하여 보행의 안정성을 판별하였다.

K-NN 알고리즘을 통해 생성된 재질 정보를 기반으로 생성된 ISHURO-II 의 보행궤적은 다음 보행을 진행하는 4 개의 궤적 데이터와 재질 인식에 따라 더 이상 보행이 불가능하다고 판단된 상태에서 정지동작 1 개의 총 5 개의 궤적 데이터가 있다. 정지동작을 제외한 각각의 보행은 재질에 무

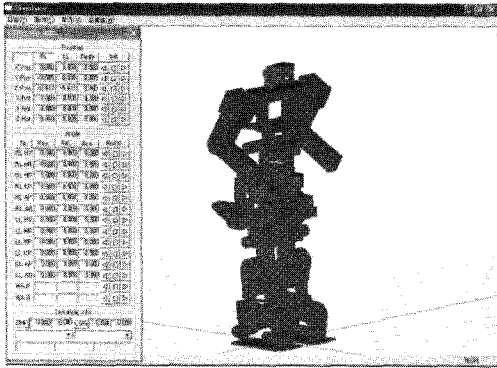


Fig. 12 Robot simulator

큰 정도에 따라서 ISHURO-II 의 두발지지 상태와 한발 지지 상태에서 바닥이 눌리는 정도를 측정하여 재질정보와 함께 입력하였다. 그림 13 은 다음 보행을 진행하는 왼쪽 발목 관절의 4 개의 궤적 데이터이고 그림 14 는 무릎 관절의 궤적 데이터이다.

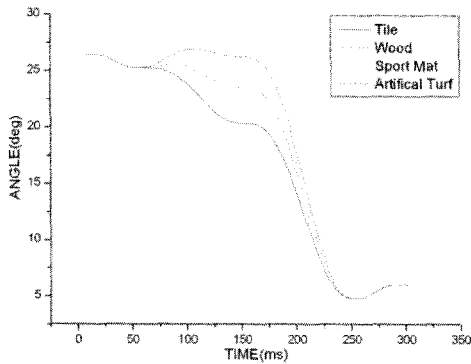


Fig. 13 Trajectory of left ankle joint

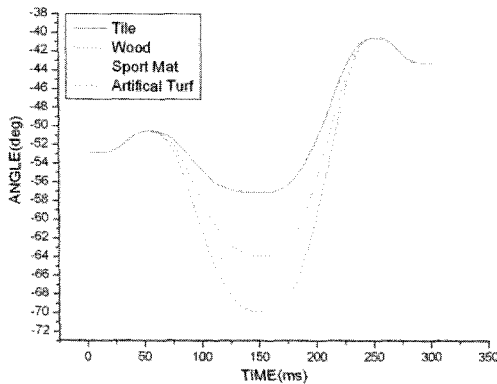


Fig. 14 Trajectory of left knee joint

그림 13 을 보면 시간이 지남에 따라 각 관절의 각도가 달라지기 시작해서 170ms 정도에서 가장 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 이는 휴머노이드 로봇이 왼쪽 다리를 들어 다음 왼발의 위치로 이동할 때 바닥에 걸리는 것을 피하기 위한 동작으로 최대 5.9 도의 차이를 보인다. 마찬가지로 그림 14 의 무릎관절의 궤적을 확인하면 타일과 인조잔디의 궤적의 차이가 가장 크며 나무와 스포츠매트도 각각 왼쪽 발을 이동하는 때에 발끝의 높이 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

5. 실험 및 결과

그림 15 는 기본적인 휴머노이드 로봇의 보행시 COG의 궤적이다. COG 궤적은 보행시 지지발의 안쪽에 분포하고 있으며 이는 보행이 안정적인 것을 알 수 있다.

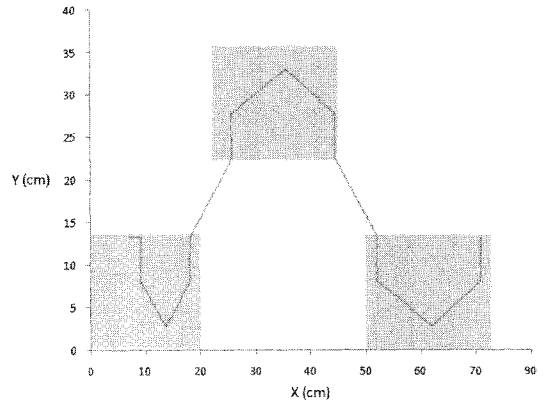


Fig. 15 COG on the ideal floor

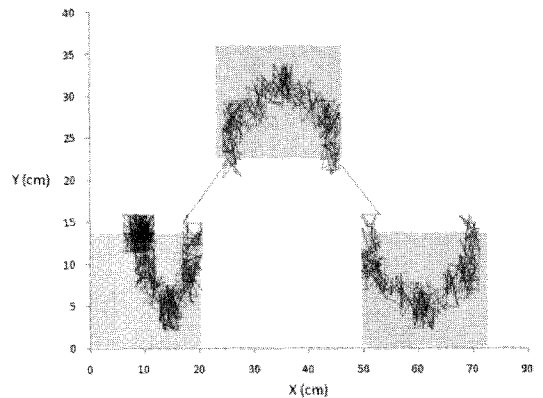


Fig. 16 COG trajectory without control

단단하지 않은 지면을 가정하여 보행 시 지지 발에 추가된 2 개의 자유도를 랜덤하게 움직이고 이런 상태에서의 COG 를 구하였다. 그림 16 를 보면 COG 가 안정영역 밖으로 나가게 되어 휴머노이드 보행이 불안정함을 알 수 있다.

단단하지 않은 지면의 불안정성을 발목의 관절을 사용하여 안정성을 확보하는 시뮬레이션 결과이다. 이는 바닥의 기울기를 측정 발목의 관절을 기울기를 상쇄하는 방향으로 제어 결과이다. 그림 17 을 보면 COG 가 안정한 영역으로 들어오는 것을 확인할 수 있다

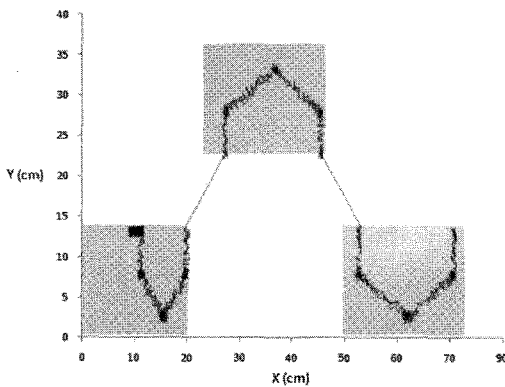


Fig. 17 COG trajectory with control method

6. 결론

본 연구의 목적은 다양한 재질의 바닥환경에서 바닥환경 인식 및 보행 패턴 선택 알고리즘을 구현하였다. ISHURO-II 를 모델로 하여 다양한 재질의 가속도 변화 데이터를 추출하기 위하여 DWT 를 사용하였고 추출된 데이터를 이용하여 재질을 인식하기 위하여 K-NN 알고리즘을 이용하였다. 알고리즘의 안정성을 확인하기 위하여 부드러운 바닥을 시뮬레이션 하였다. 실험의 결과로 제안된 알고리즘이 부드러운 바닥에서 COG 궤적을 안정하게 만든다는 것을 확인하였다.

향후 연구할 과제는 보다 다양한 지면환경에 대처하는 알고리즘의 확장과 보다 정확한 환경인식을 위해 재질에 따른 가속도의 변화를 추출할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

후 기

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되

었음.

참고문헌

1. Kanehira, N., Kawasaki, T. U., Ohta, S., Ismumi, T., Kawada, T., Kanehiro, F., Kajita, S. and Kaneko, K., "Design and experiments of advanced leg module (HRP-2L) for humanoid robot (HRP-2) development," Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, Vol. 3, pp. 2455-2460, 2002.
2. Hirai, K., Hirose, M., Haikawa, Y. and Takenaka, T., "The development of Honda humanoid robot," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 2, pp. 1321-1326, 1998.
3. Fujita, M., Kuroki, Y., Ishida, T. and Doi, T. T., "A small humanoid robot SDR-4X for entertainment applications," Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Vol. 2, pp. 938-943, 2003.
4. Hagita, N. and Ishiguro, H., "Behavior Selection Environment Recognition Methods for Humanoids based on Sensor History," IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3468-3473, 2006.
5. Park, J. H. and Chung, H., "ZMP Compensation by On-Line Trajectory Generation for Biped Robots," Proc. of IEEE SMC Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 4, pp. 960-965, 1999.
6. Zuberi, K. M. and Shin, K. G., "Design and implementation of efficient message scheduling for controller area network," IEEE Transactions on Computers, Vol. 49, No. 2, pp. 182-188, 2000.
7. De Silva, C. W., McCourt, R. and Ohmiya, M., "Control of multimodule deployable manipulator using RTX," Proc. of IEEE Pacific Rim Conference on Communications Computers and Signal, Vol. 2, pp. 864-867, 2003.
8. ANALOG DEVICES, <http://www.analog.com>, ADIS16003.
9. Wang, F. T., Lee, J. C. Y., Chang, S. H., Chou, C. P., Chang, H. H. and Wang, Y. H., "Signal Detection in Underwater Sound by Dual-Tree Discrete Wavelet Transform," OCEANS 2007, pp. 1-4, 2007.
10. Wu, B. -F. and Lin, C. -F., "A high-performance and

- memory-efficient pipeline architecture for the 5/3 and 9/7 discrete wavelet transform of JPEG2000 codec,” IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 15, No. 12, pp. 1615-1628, 2005.
11. Kolbe, D., Qiang, Zhu. and Pramanik, S., “On k-Nearest Neighbor Searching in Non-Ordered Discrete Data Spaces,” IEEE 23rd International Conference on Data Engineering, pp. 426-435, 2007.
 12. Han, J. H. and Kim, Y. K., “A fuzzy K-NN algorithm using weights from the variance of membership values,” IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 394-399, 1999.
 13. Chou, T. -S. and Yen, K. K., “Fuzzy Belief k-Nearest Neighbors Anomaly Detection of User to Robot and Remote to Local Attacks,” IEEE SMC, Information Assurance and Security Workshop 2007, pp. 207-213, 2007.