

관성 센서를 이용한 휴머노이드 로봇용 3축 자세 추정 알고리즘 개발

Development of 3-Dimensional Pose Estimation Algorithm using Inertial Sensors for Humanoid Robot

이 아 람, 김 정 한*
(Ah-Lam Lee and Jung-Han Kim)

Abstract : In this paper, a small and effective attitude estimation system for a humanoid robot was developed. Four small inertial sensors were packed and used for inertial measurements(3D accelerometer and three 1D gyroscopes.) An effective 3D pose estimation algorithm for low cost DSP using an extended Kalman filter was developed and evaluated. The 3D pose estimation algorithm has a very simple structure composed by 3 modules of a linear acceleration estimator, an external acceleration detector and an pseudo-accelerometer output estimator. The algorithm also has an effective switching structure based on probability and simple feedback loop for the extended Kalman filter. A special test equipment using linear motor for the testing of the 3D pose sensor was developed and the experimental results showed its very fast convergence to real values and effective responses. Popular DSP of TMS320F2812 was used to calculate robot's 3D attitude and translated acceleration, and the whole system were packed in a small size for humanoids robots. The output of the 3D sensors(pitch, roll, 3D linear acceleration, and 3D angular rate) can be transmitted to a humanoid robot at 200Hz frequency.

Keywords : humanoid robot, inertial measurement, accelerometer, gyroscope, extended Kalman filter, attitude estimation, acceleration estimation switching algorithm

I. 서론

로봇의 비약적인 발전으로 인하여, 일반적인 로봇에 대한 개념 또한 단순한 공장안에서의 생산용 매니플레이터에서, 인간의 형상과 운동 능력을 닮은 휴머노이드 로봇으로 점차 바뀌고 있으며, 이는 좀 더 지능적이고 인간과 유사하게 행동하며, 사람이 보다 친근하게 느낄 수 있는 동작이 가능한 로봇에 대한 요구가 발생하고 있다는 것을 뜻한다. 기존의 엔터테인먼트 로봇에 대한 휴머노이드 로봇의 차별성중 하나는 인간과 유사한 생김새와 동작에 있으며, 이의 구현을 위해서는 인간의 전정기관에 해당되는 3D 자세 센서가 꼭 필요하다[1]. 간단한 예로 휴머노이드 로봇이 기울어진 비탈길을 올라가려면 현재 로봇의 자세에 대한 기울기 및 가속도 값을 측정해 주는 센서가 있어야만 균형성과 안정성을 유지하면서 직립 보행을 할 수 있다[2].

이러한 휴머노이드용 3D 자세센서는 기본적으로 가속도계와 자이로스코프를 활용하여 좌표축의 변환과 기울기를 연산하는데[3], 휴머노이드 로봇의 자체 움직임에 의한 가속도가 함께 측정되므로, 관성센서의 출력 중에서 로봇의 자체 움직임에 대한 가속도 값과 중력에 의한 가속도 값을 분리해내는 작업이 성능을 좌우하는 핵심 기술을 이룬다.

따라서 본 논문에서는 이러한 로봇 자체 가속도의 영향

에 대하여 강인한 휴머노이드 로봇용 자세 추정 알고리즘을 개발하는 것이 주된 연구 목적이다.

좌표계의 변환을 다루는 방법은 크게 오일러각을 이용한 방법, 방향 코사인 행렬을 이용한 방법, 쿼터니언을 이용한 방법등으로 분류될 수 있으며, 이러한 연구는 주로 항공기의 INS 혹은 AHRS(Attitude Heading Reference System)에서 많은 연구가 진행되어 왔다[4]. H. Rehbinder와 X. Hu[5,6], 서영수[7], J. Vaganay, M. J. Aldon과 A. Fournier[8], 박상경[9]은 좌표계의 변환을 다루는 방법은 각각 쿼터니언이나 오일러 각 방법등으로 다르지만, 결과적으로 칼만 필터를 사용해 센서 출력을 퓨전하는 방식으로 자세를 추정하였다. H. Rehbinder와 X. Hu, 박상경은 외부 가속도의 유무에 따른 스위칭 구조를 사용하여 외부 가속도 존재시 측정 노이즈 공분산 행렬의 파라미터 수치를 변화시켜 외부 가속도 영향에 대처하였다.

본 논문에서도 기본적으로 확장 칼만 필터를 사용하여 센서 출력을 퓨전하여 자세를 추정하였으나, 외부 가속도(로봇의 자체 움직임에 의한 가속도) 성분의 유무를 확률적으로 판단하고, 외부 가속도의 영향을 받지 않은 가상의 가속도계 출력 예측기를 새로이 설계하여 확장 칼만 필터의 좌표변환을 수행하는 가속도 예측 스위칭 알고리즘을 제안하여 외부 가속도의 영향에도 강인한 자세 추정을 도모하였다.

제안된 알고리즘의 성능은 외부 가속도의 유무에 따른 여러 상황을 가상하고, 이의 정밀한 검증을 위하여 특별히 제작된 실험 장치를 통해 실험하였고, 가속도계만으로 추정된 자세, 일반적인 확장 칼만 필터로 추정된 자세, 본 논문

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 5. 27., 채택확정 : 2007. 12. 20.

이아람, 김정한 : 서울산업대학교 기계설계자동화공학부 정밀기계기술연구소

(aramstyle@snut.ac.kr/hankim@snut.ac.kr)

※ 본 논문은 정보통신부와 삼성전자가 지원(지능형로봇사업)하여 연구하였음.

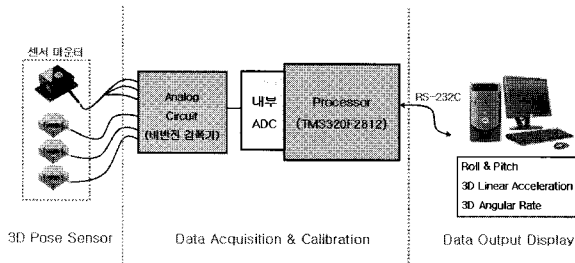


그림 1. 센서 전체 시스템 개념도.

Fig. 1. Block diagram of the 3D pose sensor.

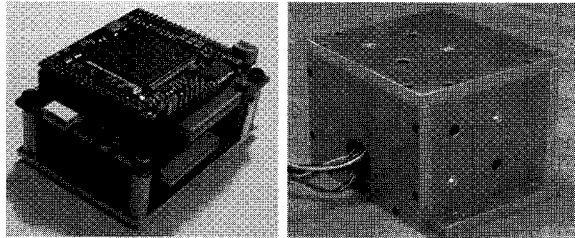


그림 2. DSP 모듈과 센서 마운터.

Fig. 2. DSP module and sensor mounter.

에서 제안한 가속도 예측 스위칭 알고리즘으로 추정된 자세의 결과를 비교함으로써 검증하였다.

II. 센서 시스템

1. 관성 센서

본 논문에 사용한 가속도계는 Crossbow사의 CXL02TG3 모델로서 정전용량형 MEMS 타입의 3축 가속도계이다. 측정 범위는 ±2g이고, 0~5V의 Single-ended Analog DC 출력을 가진다. 그리고 각속도계는 Silicon Sensing사의 CRS03-02 모델로서 링 구조 MEMS 타입의 1축 각속도계이다. 3개를 사용함으로써 3축의 각속도 측정을 가능하게 하였다. 측정 범위는 ±100deg/sec이고, 0~5V의 Single-ended analog DC 출력을 낸다. DSP는 TI사의 범용 DSP인 TMS320F2812를 사용하였고, 빠른 연산속도를 위하여 IQ Math를 사용하였다.

2. 센서 시스템 구성

선정된 관성 센서들과 센서 마운터를 사용하여 3축 자세 센서를 구성하고, 센서 출력에 이산 데이터를 획득하여 데이터의 필터링과 연산을 통해 원하는 3축 자세 정보(롤각/피치각, 3축 선형가속도, 3축 각속도)를 출력하는 센서 시스템을 구성하였다.

센서 마운터는 3축 가속도계 1개와 1축 각속도계 3개를 고정하여 3축의 관성 측정이 가능하도록 직각의 구조로 설계·제작하였다. 센서 마운터는 휴머노이드 로봇의 가슴부에 장착되도록 설계하였다. 좌표축의 정의는 일반적인 관성 시스템의 NED 좌표계를 따른다.

III. 알고리즘

자세 추정 시에 적용될 자세 계산 알고리즘은 오일러 각을 이용한 자세 계산 알고리즘으로 정의하였다. 좌표축에 정렬되어 있는 각속도를 오일러 각으로 변환하는 오일러

각 변환 행렬은 다음과 같다[9,11].

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

φ은 롤각, θ는 피치각, ψ는 요각을 나타내고, ω_i는 i축의 각속도를 나타낸다.

1. 확장 칼만 필터(extended Kalman filter) 설계

휴머노이드 로봇의 자세 추정 시스템은 비선형 시스템으로서 이에 적합한 확장 칼만 필터를 사용해 자세 추정을 한다[9,10]. 먼저, 확장 칼만 필터 설계를 위해 시스템 모델링을 수행한다. (2)는 필터에 사용될 상태 벡터(state vector) x(t)와 센서 측정 벡터(sensor measurement vector) z(t)는 다음과 같이 정의한다.

$$x(t) = \begin{bmatrix} \theta \\ \phi \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}, \quad z(t) = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ g_x \\ g_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

a_i는 i축의 가속도계 출력, g_i는 i축의 각속도계 출력을 의미한다. (2)에서 볼 수 있듯이 z축에 해당하는 요소인 요각은 휴머노이드의 자세 균형시 필수적인 정보가 아니고, 또 요각 센서로 많이 사용되는 지자기 센서의 경우 휴머노이드의 모터의 영향으로 사용이 매우 힘들기 때문에 자세 추정 파라미터에서 제외하였다. 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(t)x(t) + w(t) \\ z(t) &= f\{x(t)\} + v(t) \end{aligned} \quad (3)$$

(3)에서,

$$A(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cos\phi(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \sin\phi(t)\tan\theta(t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad f\{x(t)\} = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \sin\phi \\ \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

A(t)는 상태 천이 행렬, w(t)는 프로세스 노이즈, v(t)는 측정 노이즈를 나타낸다. 여기서 A(t)에 탄젠트 함수가 있어 ±90도가 될 경우 짐벌 잠김 현상이 발생하는데, 따라서 본 논문에서는 로봇의 작동 및 측정 범위를 ±90도 미만으로 정의하였다.

w(t), v(t)가 화이트 가우시안 노이즈이고 각 성분에 대해 독립적이라는 것을 가정하면 (5)를 만족한다. 여기서, q₁은 적용 대상 시스템의 운동 특성으로 정해지고, r₁, r₂, r₃는 각 센서 출력의 분산을 측정하여 정하는데, 물리적으로 센서간의 특성차이를 반영하게 된다. 상기의 수식을 디지털 시스템에 적용 가능하도록 이산화를 수행한 결과는 수식 (6)과 같다.

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_1 \end{bmatrix} = E\{w(t)w(t)^T\} \quad (5a)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_3 \end{bmatrix} = E\{v(t)v(t)^T\} \quad (5b)$$

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= F_k x_k + w_k \\ z_k &= f(x_k) + v_k \end{aligned} \quad (6)$$

(6)에서,

$$F_k = \exp(A(kT)T) = I + TA(kT) + \frac{T^2}{2!}A(kT)^2 + \dots \cong \begin{bmatrix} I & B(kT)T \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$B(kT) = \begin{bmatrix} 0 & \cos\phi(kT) \\ 1 & \sin\phi(kT)\tan\theta(kT) \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서 T는 샘플링 주기, k는 스텝수를 나타낸다.

$$Q_k = E\{w_k w_k^T\} \approx \int_0^T \exp(A(kT)s) Q \exp(A(kT)^T s) ds = \begin{bmatrix} \frac{1}{3}q_1 T^3 B(kT)B(kT)^T & \frac{1}{2}q_1 T^2 B(kT) \\ \frac{1}{2}q_1 T^2 B(kT)^T & q_1 T I \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$R_k = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

최종적으로 시스템 모델링에 따른 확장 칼만 필터의 방정식은 (11)에서 (16)과 같다.

* Time update

$$\hat{x}_{k/k-1} = F_{k-1} \hat{x}_{k-1/k-1} \quad (11)$$

$$P_{k/k-1} = F_{k-1} P_{k-1} F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (12)$$

* Measurement update

$$C_k = \frac{df(\hat{x}_{k/k-1})}{dx} = \begin{bmatrix} \cos\hat{\theta}(kT) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\hat{\phi}(kT) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$K_k = P_{k/k-1} C_k^T (C_k P_{k/k-1} C_k^T + R_k)^{-1} \quad (14)$$

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + K_k (z_k - f(\hat{x}_{k/k-1})) \quad (15)$$

$$P_{k/k} = (I - K_k C_k) P_{k/k-1} \quad (16)$$

여기서 P_k 는 오차 공분산, K_k 는 칼만 게인, Q_k 는 프로세스 노이즈를 나타내고, $\text{hat}(\cdot)$ 은 예측치를 나타낸다. 그리고 아래 첨자의 슬래쉬(/)로 나뉘어져 있는 부분의 앞쪽의 의미는 시간 축의 스텝 수를 나타내고, 뒤쪽의 의미는 time update(k-1)와 measurement update(k)를 나타낸다.

2. 가속도 예측 스위칭 알고리즘

2.1 전체 알고리즘의 개요

본 논문에서 제안하는 가속도 예측 스위칭 알고리즘은 기본적으로 로봇의 자세 움직임에 의한 외부 가속도의 유

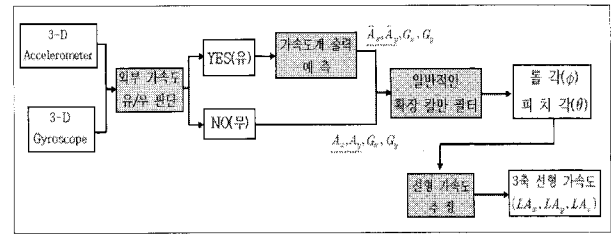


그림 3. 가속도 예측 스위칭 알고리즘 개념도.

Fig. 3. Block diagram of the proposed 3D pose algorithm.

무에 따라 각각 다른 모드로 동작하는 스위칭 구조를 사용하였다. 외부 가속도의 유무 판단은 3축의 가속도계의 출력의 합 벡터를 사용하여 설계하였다.

그림 3은 본 연구에서 제안한 가속도 예측 스위칭 알고리즘의 전체 블럭선도이다. 3축 가속도 센서를 통해 획득된 데이터를 통해 먼저 외부 가속도의 유무를 판단하고 모드를 스위칭한다. NO mode에 경우 실제 가속도계와 각속도계 출력치를 확장 칼만 필터에 적용하는 일반적인 방법으로 자세 추정을 한다.

외부 가속도가 검출된 YES mode에 경우에는 오차 요인(외부 가속도 성분)이 포함되어 있는 실제 가속도계 출력 대신에 중력 가속도 성분만을 가지는 가상의 가속도계 출력을 예측하여 이 예측치를 확장 칼만 필터에 측정 벡터에 적용하여 자세를 추정한다. 외부가속도 값의 추정은 최종적으로 추정된 자세(롤각과 피치각)를 바탕으로 중력 가속도 성분을 보상하여 추정한다.

본 알고리즘에 의하면 확장 칼만 필터의 측정 벡터에 입력되는 값은 항상 외부 가속도를 제외한 값이 들어오기 때문에 확장 칼만 필터의 Q값을 결정할 때 좀 더 시스템에 최적화된 값으로 설계가 가능한 것 또한 장점이며, 그림 3에서 3축 각속도 출력은 각속도계 출력을 단위 환산만을 수행하여 출력하기 때문에 알고리즘 개념도에서는 제외하였다.

2.2 외부 가속도의 유무 판단

외부 가속도 유무에 따른 스위칭 구조를 이루기 위해 현재 외부 가속도 존재의 여부를 판단하여야 한다. 본 논문에서 사용한 가속도계는 직각 구조인 3축(a_x, a_y, a_z)의 출력을 낸다. 따라서 외부 가속도가 존재 하지 않을 때는 중력 가속도 성분만이 측정됨으로 (17)을 만족하게 된다[5].

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} = 1g \quad (17)$$

따라서 이를 만족하면 외부 가속도가 없다고, 만족하지 못하면 외부 가속도가 존재한다고 판단한다.

하지만, 가속도계 자체에 노이즈와 측정 노이즈는 항상 존재하기 때문에 허용 오차 임계치(ρ)를 (18)을 사용하여 실험을 통해 결정한다.

$$\left| \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} - 1 \right| = \alpha \leq \rho \quad (18)$$

2.3 가상(pseudo) 가속도계 출력 예측

외부 가속도가 존재 할 경우, 자세 추정시 외부 가속도

가 가속도계 출력에 오차 요소가 된다. 이 경우 오차 요소를 가지고 있는 실제 가속도계 출력을 대신하여 현 스텝의 각속도계(gyroscope) 출력과 이전 스텝에 추정된 자세를 가지고 예측한 가상의 가속도계 출력을 자세 추정 시에 확장 칼만 필터의 측정 벡터에 적용함으로써 원천적으로 외부 가속도 성분을 배제한다. 가상 가속도계 출력 예측기의 설계는 다음과 같다.

(1)에서 z축의 성분을 제외하고 표현해 보면 (19)와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} \quad (19)$$

(19)를 풀어 쓰고, 이산화 시켜 식을 유도한 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\phi} &= \omega_x + \sin \phi \cdot \tan \theta \cdot \omega_y \\ \dot{\theta} &= \cos \phi \cdot \omega_y \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{\phi_k - \phi_{k-1}}{T} &= \omega_{x_k} + \sin \phi_{k-1} \cdot \tan \theta_{k-1} \cdot \omega_{y_k} \\ \frac{\theta_k - \theta_{k-1}}{T} &= \cos \phi_{k-1} \cdot \omega_{y_k} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} \phi_k &= \phi_{k-1} + (\omega_{x_k} + \sin \phi_{k-1} \cdot \tan \theta_{k-1} \cdot \omega_{y_k}) \cdot T \\ \theta_k &= \theta_{k-1} + \cos \phi_{k-1} \cdot \omega_{y_k} \cdot T \end{aligned} \quad (22)$$

(22)에서 ω_x, ω_y 는 동체 좌표계의 각속도를 의미하는데, 센서가 동체에 스트랩 다운으로 고정되므로 각속도계의 출력 g_x, g_y 로 치환이 가능하다.

$$\begin{aligned} \phi_k &= \phi_{k-1} + (g_{x_k} + \sin \phi_{k-1} \cdot \tan \theta_{k-1} \cdot g_{y_k}) \cdot T \\ \theta_k &= \theta_{k-1} + \cos \phi_{k-1} \cdot g_{y_k} \cdot T \end{aligned} \quad (23)$$

최종적으로, (23)을 보면 전 스텝의 자세(롤각, 피치각)와 현재 스텝의 각속도계 출력으로 현재 스텝의 자세를 추정할 수가 있다. 이 결과에 사인함수를 취하면 중력 가속도 성분만을 가지는 가속도계 출력의 예측치를 구할 수 있다.

$$\hat{a}_{x_k} = \sin(\theta_k), \quad \hat{a}_{y_k} = \sin(\phi_k) \quad (24)$$

따라서 상기 알고리즘의 결과를 외부 가속도 유무에 따라서 확장 칼만 필터에 적용하여 스위칭 하여 준다. 확장 칼만 필터의 (15)가 (25)와 (26)과 같이 측정 벡터(z_k)가 스위칭 되어 적용된다.

$$z_k = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ g_x \\ g_y \end{bmatrix} (No\ mode), \quad z_k = \begin{bmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ g_x \\ g_y \end{bmatrix} (Yes\ mode) \quad (25)$$

$$\hat{x}_{k/k} = \hat{x}_{k/k-1} + K_k (z_k - f(\hat{x}_{k/k-1})) \quad (26)$$

2.4 선형 가속도의 추정

가속도 센서의 출력값은 전술한 바와 같이 중력 가속도 성분과 외부 가속도 성분이 혼합되어 있다. 로봇의 자체 움직임에 의한 외부 가속도의 추정은 자세 추정 시와는 반대

로 중력 가속도 성분을 보상함으로써 외부 가속도 성분만을 추출하는 것이다. 보상의 방법은 구해진 자세 정보(롤각, 피치각)를 가지고 이에 역으로 회전 변환시키는 것이다. 구해진 자세 정보는 오일러 각이므로 다음과 같은 순서로 좌표축의 회전변환을 시킨다[8].

(1) 롤각(ϕ)으로 가속도계 y축 출력치 계산한다.

$$\sin(\phi) = a_y \quad (27)$$

(2) 구한 a_y 와 피치각(θ)을 사용해 변환용 오일러 롤각(ϕ_T)을 계산한다.

$$\phi_T = \sin^{-1} \frac{a_y}{\cos \theta} \quad (28)$$

(3) ϕ_T 와 θ 의 순서로 가속도계 출력을 역회전 변환한다.

$$\begin{bmatrix} a_x^L & a_y^L & a_z^L & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi_T & \sin \phi_T & 0 \\ 0 & -\sin \phi_T & \cos \phi_T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

a_i^L 는 i축의 선형 가속도(좌표변환된 외부가속도)를 나타낸다.

IV. 실험 및 결과

본격적인 알고리즘 검증에 앞서 시스템의 오차 보상과 센서 특성 파악 실험을 먼저 수행하였다. 오차 보상 실험으로 다위치 실험과 장시간 영입력 실험을 수행하여 가속도계 오차 보상과 각 센서 분산치를 구해 공분산 행렬 파라미터를 결정하였고[11], 센서의 드리프트 양 또한 확인하였다. 이 부분은 알고리즘 검증을 위한 기본적인 준비실험으로 논문의 양을 고려하여 그 자세한 내용은 생략하였다.

알고리즘의 검증실험에서 3D자세센서를 실제 휴머노이드 로봇에 장착해서 실험하면 현재의 기울어짐 양과 외부 가속도의 값을 정확히 알 수 없으므로, 보다 정확한 실험을 위하여 측정용 실험 장비를 특별히 제작하였다. 리니어 모터에 회전형 테이블을 추가로 장착하여, 정확한 각도와 외부 가속도를 측정할 수 있도록 하였다. 알고리즘의 검증 실험은 외부 가속도의 유무에 따라 몇 가지 상황을 가상하여 실험하였으며, 결과의 비교는 가속도계만으로 추정한 결과, 일반적인 확장 칼만 필터로 추정한 결과, 본 논문에서 제안된 가속도 예측 스위칭 알고리즘으로 추정한 3개의 결과를 각각 비교하여 제안된 알고리즘의 성능을 검증하였다. 실험 시 제한 조건으로 첫째, 각 관성 센서의 측정 범위를 넘지 않는 것과 둘째, 추정하는 경사각의 범위는 ± 90 deg 미만으로 하는 것 두 가지를 모든 실험에 적용하였다. 각 실험은 통신 최대 주파수인 200Hz의 샘플링을 가지고 측정되었다.

1. 외부 가속도 유무 판단 임계치 결정 실험

외부 가속도의 유무를 판단하기 위한 임계치를 결정하기 위한 실험이고, 센서를 고정하고 (18)을 사용하여 α 값을 구한다. 데이터의 수집은 60초간(12000개) 수행하였다.

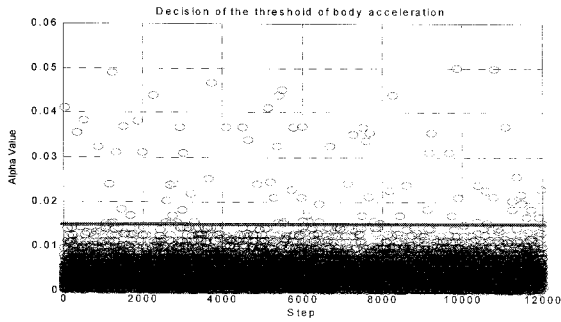


그림 4. 외부 가속도 유무 판단 임계치 결정 실험 결과.
Fig. 4. Decision of the threshold for external acceleration.

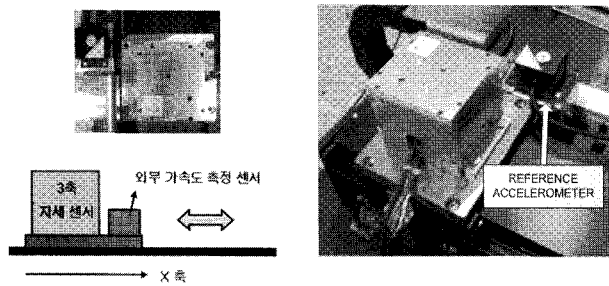


그림 5. 가속도 인가 고정각 실험 개념도 및 실험 장치.
Fig. 5. Experiment of rotation-fixed and linear acceleration.

실험 결과 정규 분포도의 약 99.3%를 차지하는 α 값인 0.015를 임계치(ρ)로 결정하였는데, 이는 추정오차 및 반응 속도를 고려하여 선정하였다.

2. 가속도 인가 고정각 실험

가속도인가 고정각 실험은, 그림 5와 같이 3D센서 모듈의 x축에 가속도가 인가 될 수 있도록 측정 장비에 고정하고, 회전 없이 임의의 외부 가속도만을 주었을 때 3D센서의 피치 출력값이 고정각(0deg.)을 유지하는 성능을 검증하기 위한 실험이다. 이 실험은 만약 휴머노이드 로봇이 자체 가속도를 내면서 전진할 때 몸체의 피칭추정의 오차에 관련된 실험으로 3D 자세 센서의 가장 중요한 성능인 중력가속도 성분과 자체 가속도를 얼마나 잘 분리해 내는가를 알아볼 수 있다.

또한 본 실험에서는 별도의 외부 가속도 측정 센서를 추가하여 제안된 알고리즘의 선형 가속도 추정 성능도 같이 검증하였다. 외부 가속도는 휴머노이드 로봇의 자체 움직임과 유사한 2~4Hz 사이 정도의 x축 외부 가속도(그림 9)를 랜덤으로 30초간 가하여 결과를 측정하였다. 각 결과 그래프는 피치각을 표현하고 있으며 이때 실제 피치각은 움직이지 않았으므로 피치각 추정 결과 자체가 에러치가 된다.

상기한 바와 같이 각 실험은 가속도계만으로 추정한 결과, 일반적인 확장 칼만 필터로 추정한 결과, 본 논문에서 제안된 가속도 예측 스위칭 알고리즘으로 추정한 3개의 결과를 각각 비교함으로써 알고리즘의 성능을 검증하였다.

그림 6, 7, 8은 동일한 외부 가속도(그림 9참조)를 가했을 때의 상기한 3가지 알고리즘을 사용하여 얻은 결과이다. 외부 가속도를 무시하고 가속도계의 출력 값만 가지고 몸체의 기울어

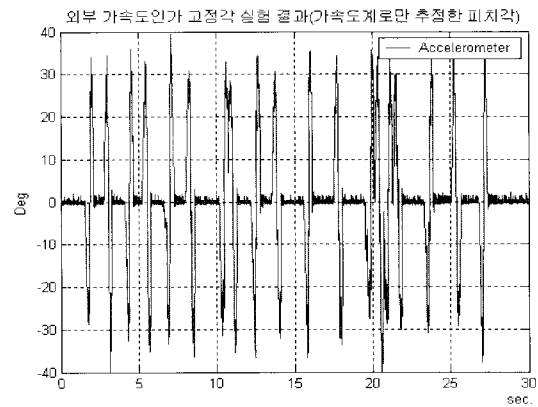


그림 6. 가속도계만으로 추정한 피치각 오차.
Fig. 6. Pitch error of the g-slave estimation.

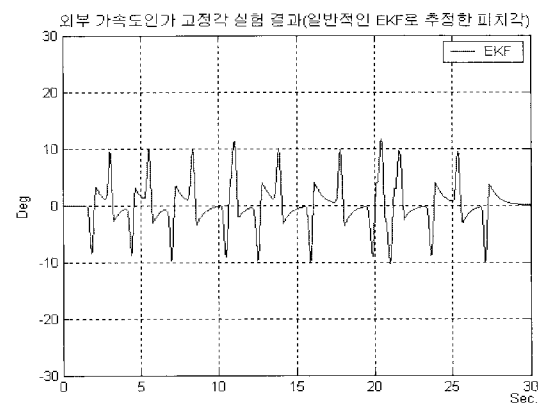


그림 7. 일반적인 확장 칼만필터로 추정한 피치각 오차.
Fig. 7. Pitch error of the extended Kalman filter.

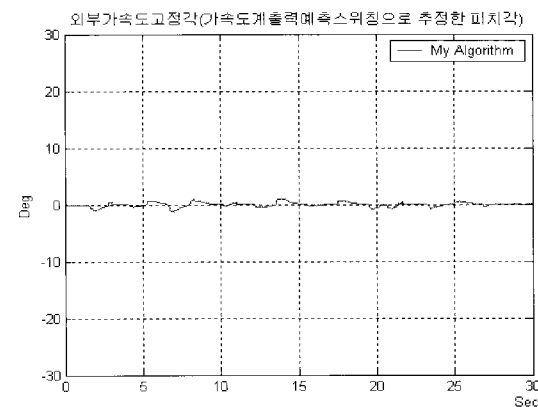


그림 8. 가속도 예측 스위칭 알고리즘으로 추정한 피치각 오차.
Fig. 8. Pitch error of the proposed algorithm.

짐을 추정하는 방법을 G-slave 모드로 하고 알고리즘이 매우 간단하므로 일반적으로 많이 사용하고 있으나, 그림 6에서 보는 것처럼 이러한 방식은 중력가속도 이외에 다른 가속도 성분에 매우 취약함을 알 수 있다. 그림 6과 그림 7에서 볼 수 있듯이 진술한 두 알고리즘의 경우 외부 가속도 인가 시에 에러치가 커지는 에러 특성을 볼 수 있지만 제안된 알고리즘의 결과인 그림 8에서는 에러 특성이 매우 좋으며 에러치가 확연히 줄어든 것을

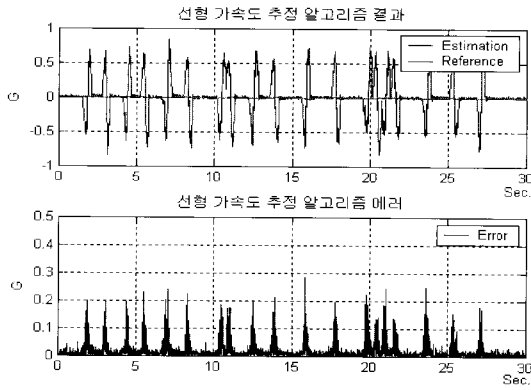


그림 9. 선형 가속도 추정 결과(x축).

Fig. 9. Estimation of the linear acceleration.

표 1. 가속도 인가 고정각 실험의 평가 함수 결과값.

Table 1. Evaluation function of the three algorithms(acc. only).

실험 비교군	ES	EM
가속도계만으로 추정 결과	45623.49	40.07
일반적인 확장 칼만 필터 추정 결과	14840.14	11.75
가속도 예측 스위칭 알고리즘 추정 결과	1652.98	1.26

볼 수 있다.

그림 9는 상기의 가속도인가 고정각 실험시 사용한 가속도 값과, 본 연구에서 제시한 가속도 예측 알고리즘의 결과를 도시한 것이다. 외부가속도의 예측치 또한 좋은 결과를 보여준다.

자세 추정 성능의 정량적 비교를 위해 평가 함수를 여러 합과 최대치를 사용하여 (30)과 같이 정의 하였다.

$$ES = \sum_{k=1}^n (|\theta_k - \hat{\theta}_k|), \quad EM = \max(|\theta_k - \hat{\theta}_k|) \quad (30)$$

수치적 비교 결과 제안된 알고리즘이 다른 실험 비교군 보다 각각 약 40배, 약 10배 정도 좋은 성능을 보여주었다. 또한 저가의 가속도센서 일수록 축간의 연관오차(cross axis sensitivity)가 큰 경향이 있는데, 이 연관 오차가 클수록 상기의 실험 결과에 큰 오차를 유발하므로 양산을 염두에 둔 저가센서 사용시 제안된 알고리즘은 더 좋은 결과를 내리라 예측된다.

3. 가속도 인가 피칭 실험

본 실험은 외부 가속도 인가와 동시에 피치각의 변화까지 주었을 때 자세 추정 성능을 검증하기 위한 실험이다. 실험 장치는 그림 10과 같이 리니어 스테이지에 회전형 턴 테이블로 구성하고, 자세 추정의 기준값은 모터 엔코더의 값으로 하였고, 30초간 데이터를 수집하였다. 실험 시 가속도 인가 후 자세 변화와 가속도 인가 중 자세 변화 두 가지 상황을 가상하여 실험하였다.

그림 11, 12 13의 첫 번째 그래프는 실제 피치각(엔코더로 측정) 및 추정 결과를 나타내고, 두 번째는 에러값을 도시 하였다. 본 실험에서는 회전테이블(피치축)이 상기와 같이 앞뒤로 회전하면서 동시에 외부 가속도값 또한 인가하

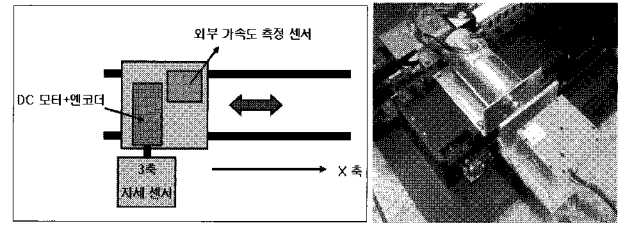


그림 10. 가속도 인가 피칭 실험 개념도 및 실험 장치.

Fig. 10. Experiment of rotation and linear acceleration.

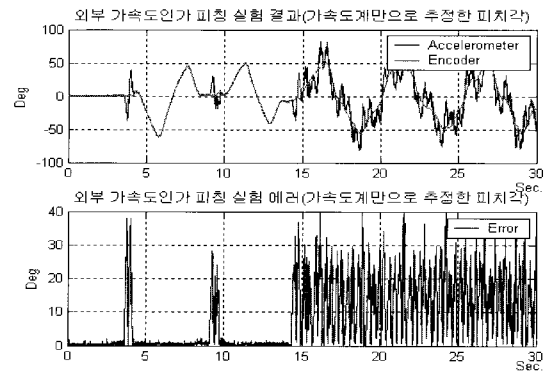


그림 11. 가속도계만으로 추정한 피치각과 에러.

Fig. 11. Pitch estimation and error(g-slave algorithm).

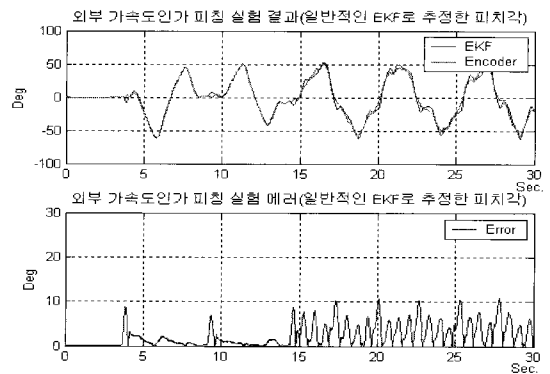


그림 12. 확장 칼만 필터로 추정한 피치각과 에러.

Fig. 12. Pitch estimation and error(extended Kalman filter).

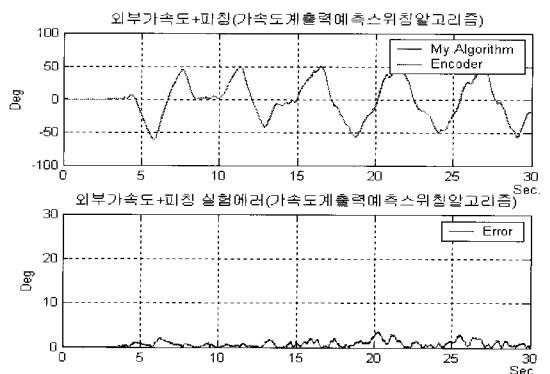


그림 13. 제안된 알고리즘으로 추정한 피치각과 에러.

Fig. 13. Pitch estimation and error(proposed algorithm).

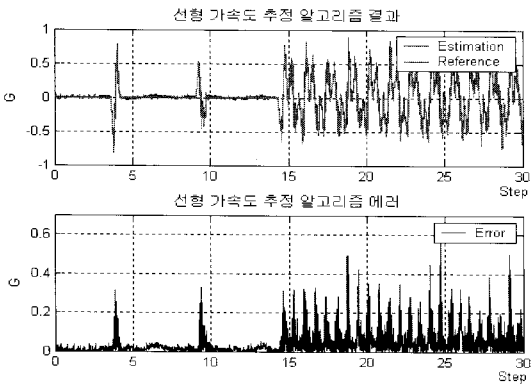


그림 14. 선형 가속도 추정 결과 (x축).

Fig. 14. Estimation result of the linear acceleration.

표 2. 가속도 인가 피칭 실험의 평가 함수 결과.

Table 2. Evaluation function of the three algorithms(roation + acc.).

실험 비교군	ES	EM
가속도계만으로 추정 결과	51392.88	42.048
일반적인 확장 칼만 필터 추정 결과	14757.34	10.799
가속도 예측 스위칭 알고리즘 추정 결과	4634.35	3.664

였는데, 이는 휴머노이드 로봇이 실제 움직일 때와 유사한 상황이 된다. 사용된 실제 외부 가속도 패턴과 본 알고리즘에 의한 추정치는 그림 14에 도시하였는데, 가속도값의 특성상 순간적인 가속도 추정 에러는 존재하지만 그림 13에서 알 수 있는 것처럼 피치각 자체의 에러는 매우 양호한 결과를 보여주었다.

그림 11과 12의 결과에서 알 수 있듯이 기존의 2개 알고리즘은 외부 가속도가 인가된 시점에 오차가 커지는 오차 특성을 보이고 있다. 하지만 제안된 알고리즘의 결과에서는 오차 특성이 좋아지고 약 3.5도 이하의 에러를 유지하며 자세를 잘 추정하고 있는 것을 볼 수 있다. 상기의 실험에서 정량적으로는 제안된 알고리즘이 다른 비교군 보다 각각 약 10배, 약 3배 좋은 성능을 보였다.

V. 결론

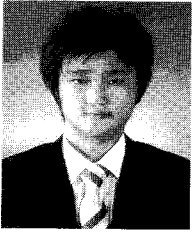
본 논문에서는 휴머노이드 로봇의 안정성과 균형성을 도모하기 위하여 롤, 피치, 좌표변환된 가속도 및 각속도의 출력을 가지는 휴머노이드 로봇용 3축 자세 센서 개발에 관한 연구를 수행하였다. 휴머노이드 로봇은 이동시 특성상 로봇의 자세 변화뿐만 아니라 자체 운동에 의한 외부가속도 성분도 함께 유발 하는데, 이러한 외부 가속도의 영향은 가속도계 출력에 영향을 주어 자세 추정시 오차를 유발한다. 본 논문에서는 이를 극복하기 위해, 외부 가속도의 존재 여부를 판단하고, 존재시 외부 가속도의 영향을 받지 않는 가속도계 출력을 이용해 외부 가속도 성분을 배제한 가상의 가속도계의 출력 예측치를 구하고, 이를 확장 칼만 필터 측정 벡터에 대입함으로써 외부 가속도 영향에도 강인

한 자세 추정을 할 수 있는 가속도 예측 스위칭 알고리즘을 제안하였다.

제시한 알고리즘의 검증을 위하여 외부 가속도 인가 여부에 따른 여러 상황을 가상하여 실험을 수행하였다. 그 결과, 비교 대상 알고리즘의 결과는 외부 가속도가 인가되는 구간과 정확히 일치하여 오차가 커지는 특성을 보이고 있지만 제안된 가속도 예측 스위칭 알고리즘으로 추정한 결과는 외부 가속도가 인가된 구간에도 오차 특성이 좋은 자세 추정 결과를 보이고 있다. 이를 수치적으로 환산해보면 제안된 알고리즘이 가속도계와 일반적인 확장 칼만 필터로 추정한 결과보다 각각 에러의 누적 값 기준으로 약 10배, 3배 정도 결과가 좋게 나온 것을 확인 할 수 있었다.

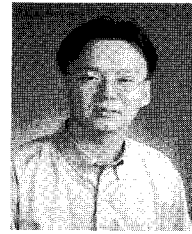
참고문헌

- [1] S. P. N. Singh and K. J. Waldron, "Attitude estimation for dynamic legged locomotion using range and inertial sensors," in *Proceedings of the ICRA*, Spain, pp. 1663-1668, 2005.
- [2] B. Barshan and H. F. Durrant-Whyte, "Inertial navigation systems for mobile robots," *IEEE transactions on Robotics and Automation* vol. 11, no. 3, pp. 328-342, 1995.
- [3] Kionix, "Tilt-sensing with kionix MEMS accelerometers," Kionix, U.S, Application Note, no. 5, 2005.
- [4] 박찬국, 이장규, 박홍원, "관성항법장치기술," 제어·자동화·시스템공학회지, 제 3 권, 제 2 호, pp. 52-57.
- [5] H. Rehbinder and X. Hu, "Drift-free attitude estimation for accelerated rigid bodies," in *Proceeding of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 4244-4249, May 2001.
- [6] H. Rehbinder and X. Hu, "Nonlinear pitch and roll estimation for walking robots," in *Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 2617-2622, April, 2000.
- [7] Y. S. Suh, "Attitude estimation using low cost accelerometer and gyroscope," in *Proceeding of the 7th Korea-Russia International Symposium*, pp. 423-427, 2003.
- [8] J. Vaganay and M. J. Aldon and A. Fournier, "Mobile robot attitude estimation by fusion of inertial data," In *Proceeding IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol. 1, pp. 277-282, 1993.
- [9] 박상경, "관성센서를 이용한 3차원 자세 추정," 울산대학교 대학원 석사 학위 논문, 2004.
- [10] R. Brown and P. Hwang, *Introduction to Random Signal and Applied Kalman Filtering*, 2nd Ed., Wiley, New York, 1992.
- [11] 김종철외, 관성항법 및 위성항법시스템 기술연구개발, 항공우주연구소, 한국, 보고서, 2000.



이 아 람

2005년 서울산업대 기계설계·자동화 공학부 졸업. 2007년 동대학원 메카트로닉스학과 석사. 관심분야는 관성 센서, 모션 제어 및 네트워크, 디지털 제어, 제어 시스템 설계.



김 정 한

1993년 연세대학교 기계공학과 졸업. 1995년 KAIST 기계공학과 석사. 1999년 KAIST 기계공학과 박사. 2004년~현재 서울산업대학교 기계설계자동화 공학부 조교수. 관심분야는 관성센서, 디지털제어 및 센서 네트워크.