

# 비전 센서와 자이로 센서의 융합을 통한 보행 로봇의 자세 추정

## Attitude Estimation for the Biped Robot with Vision and Gyro Sensor Fusion

박진성\*, 박영진, 박윤식, 홍덕화  
(Jinseong Park<sup>1</sup>, Youngjin Park<sup>1</sup>, Youn-Sik Park<sup>1</sup>, and Deokhwa Hong<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Korea Advanced Institute of Science and Technology

**Abstract:** Tilt sensor is required to control the attitude of the biped robot when it walks on an uneven terrain. Vision sensor, which is used for recognizing human or detecting obstacles, can be used as a tilt angle sensor by comparing current image and reference image. However, vision sensor alone has a lot of technological limitations to control biped robot such as low sampling frequency and estimation time delay. In order to verify limitations of vision sensor, experimental setup of an inverted pendulum, which represents pitch motion of the walking or running robot, is used and it is proved that only vision sensor cannot control an inverted pendulum mainly because of the time delay. In this paper, to overcome limitations of vision sensor, Kalman filter for the multi-rate sensor fusion algorithm is applied with low-quality gyro sensor. It solves limitations of the vision sensor as well as eliminates drift of gyro sensor. Through the experiment of an inverted pendulum control, it is found that the tilt estimation performance of fusion sensor is greatly improved enough to control the attitude of an inverted pendulum.

**Keywords:** sensor fusion, vision sensor, gyro sensor, Kalman filter, attitude control, biped robot

### 1. 서론

군사용 로봇이 경사지대, 험지와 같은 불규칙한 노면에 적용되기 위해서는 주행 로봇 보다 2족 보행 로봇이 더 효율적이다. 반면, 보행 로봇은 주행 로봇 보다 자세를 제어하기 어려운 점이 있다. 보행 로봇의 자세제어를 위해서는 로봇이 중력 방향을 기준으로 기울어진 경사각을 알아야 하며, 이를 측정하기 위하여 자이로 센서(gyro sensor), 가속도계(accelerometer), 기울기 센서(inclinometer) 등의 관성 센서(inertial sensor)를 사용한다. 각각의 센서는 모두 장단점을 가지고 있다. 가속도계와 기울기 센서의 경우 중력 방향에 대하여 기울어진 경사각 즉, 절대좌표계에서의 경사각을 측정할 수 있다. 하지만 두 센서 모두 선형 가속도(translational acceleration)에 영향을 받는 단점이 있고, 특히 기울기 센서의 경우 로봇의 움직임에 비해 주파수 대역폭(bandwidth)이 작은 한계가 있다[1]. 일반적으로 경사각 측정에 가장 많이 사용되는 자이로 센서는 초기 위치(initial position)를 정확히 알 때 로봇의 자세를 각속도를 적분하여 선형 가속도의 영향을 받지 않고 정확히 추정할 수 있다. 자이로 센서는 주파수 대역폭이 기울기 센서에 비해서 높은 장점을 가지고 있지만 저 주파수 잡음(low frequency noise)을 적분함으로써 발생하는 드리프트(drift) 현상이 발생하기 때문에 장시간 동안 사용하기에는 한계가 있다[1]. 시간이 지나면 저 주파수 잡음의 적분에 따른 누적 오차가 발생하여 경사각 추정 값이 발산하게 된다. 따라서 정확한 보행 로봇의 자세제어를 위해서는 앞서 언급한 단일 센서

의 단점을 보완하기 위해 두 가지 이상의 센서를 함께 사용하는 것이 바람직하다. 대표적인 2족 보행 로봇인 ASIMO의 경우 자세제어를 위하여 자이로 센서와 가속도계를 사용하며 [2], HUBO의 경우 자이로 센서와 기울기 센서를 사용한다[3].

사람의 경우 자세를 유지하기 위해 관성 센서와 같은 역할을 하는 전정 기관의 정보뿐만 아니라, 외부의 환경으로부터 자신의 경사각을 추정할 수 있는 센서인 눈의 정보를 함께 사용한다. 최근 로봇과 인간의 상호 작용을 위해 비전에 대한 관심이 높아지면서 대부분의 인간형 로봇이나 군사용 로봇이 카메라를 장착하고 있다. 무인화 군사용 로봇은 감시, 정찰, 전투 등의 임무를 수행 할 시에 로봇 스스로 모든 임무를 수행하기에는 한계가 있으므로, 사용자의 모니터링 및 원격 조종이 필요하고 이를 위해서는 카메라의 탑재가 필수적이다. ASIMO의 경우 사람의 눈의 위치와 같이 비전 센서를 머리 부분에 장착하였으며, 로봇이 사람을 인식하거나 최적의 길을 선택하기 위한 장애물 감지 용도로 사용한다[2].

비전 센서는 외부의 환경으로부터 경사각을 측정할 수 있으며, 자이로 센서를 이용한 경사각 추정 방법과 달리 적분 방법을 사용하지 않기 때문에 오차가 누적되지 않는 장점이 있다. 하지만 비전 센서를 로봇의 자세를 측정하는 용도로 사용하기에는 많은 문제점들이 있다. 비전 센서를 이용하여 보행 로봇의 자세를 측정하기 위해서는 현재 영상과 이전 영상을 비교해야 하므로 많은 계산시간을 필요로 하고 실시간으로 로봇을 제어하기에는 무리가 있다[4].

비전 센서 단독으로 로봇의 자세를 측정하여 자세제어를 하기에는 문제점이 있지만, 비전 센서의 정보를 이용하여 자이로 센서의 드리프트 문제를 보상해줄 수 있다면 기울기 센서나 가속도계를 이용하지 않아도 로봇의 자세를 정확하게 측정할 수 있다. 즉, 모니터링, 원격 조정, 얼굴 인식, 장애물 감지 등을 위해 필수적으로 사용해야 하는 비전 센서로부터

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 2. 20., 수정: 2011. 3. 10., 채택확정: 2011. 3. 29.

박진성, 박영진, 박윤식, 홍덕화: KAIST 기계공학과

(kai-js@kaist.ac.kr/yjpark@kaist.ac.kr/yspark0117@kaist.ac.kr/hdh@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 한국과학기술원 국방무인화기술평화연구센터를 통한 국방과학연구소 연구비 지원과 두뇌 한국(BK)21 사업의 협력으로 수행되었음.

자이로 센서의 문제점을 보상해주는 정보를 얻을 수 있다면 추가적인 센서를 사용하지 않아도 된다.

로봇의 자세제어를 위해 비전 센서를 이용하여 로봇의 자세를 측정하는 방법은 R. Kurazume의 방법이 있다[5]. Kurazume는 SAD 템플릿 매칭(Sum of Absolute Difference template matching)방법을 이용하여 카메라로부터 얻는 영상의 안정화 기법을 제안하였으며, 비전 센서를 이용하여 로봇의 자세 추정도 가능한 것을 실험적으로 보였다. 하지만 Kurazume의 방법은 로봇의 움직임이 작은 범위에서만 가능하고 영상의 이동을 회전 운동으로만 가정하기 때문에 병진 운동에 강건하지 못하다는 단점이 있다. Rehbrinder의 특징선(line features)을 이용한 방법은 이론적으로 강건한 방법이지만, 일반적인 영상에서 특징선을 항상 구할 수 없다는 한계가 있으며, 영상 처리를 위한 계산 시간이 템플릿 매칭 방법 등에 비하여 길다는 단점이 있다[6]. An과 Kim의 경우도 특징선을 이용하여 위치 추정을 하였지만, 보행 로봇에 바로 적용하기에는 어려움이 있다[15,16]. Hong은 특징점 추출(feature point extraction)방법을 이용하여 병진 운동에 강건한 자세 추정 방법을 제안하였다[7]. 하지만 Hong의 방법 또한 계산 시간이 길어 샘플링 주파수가 낮고 추정 시간 지연이 발생하는 단점이 있다. 증강 현실(augmented reality)분야에서도 비전 센서를 이용한 자세 추정을 하지만 미리 정의된 영상을 토대로 자세를 추정하기 때문에 정찰 로봇과 같이 주변 환경이 미리 정의되지 않은 시스템에는 적용하기 어렵다[4].

Song [9]은 비전 센서의 계산시간에 따른 문제점을 해결하기 위해 자이로 센서와 함께 융합하는 퓨전 필터(fusion filter)를 제안하였다. Song의 퓨전 필터는 비전 센서와 자이로 센서를 융합하여 비전 센서의 계산시간에 따른 문제점과 자이로 센서의 드리프트를 상호 보완할 수 있도록 제안된 필터이다. 하지만 아직까지 실제 비전 센서를 이용하여 성능을 검증하지 않았다.

본 연구에서는 Hong의 특징 점 추출 방법과 Song의 퓨전 필터(fusion filter)를 실제 비전 센서와 자이로 센서에 적용한 퓨전 센서를 제안하고자 한다. 퓨전 센서가 병진 운동에 강건하며, 샘플링 주파수가 보행 로봇의 자세제어를 할 수 있을 만큼 높고, 추정 시간 지연이 보행 로봇의 자세제어에 영향을 미치지 않을 만큼 작은 것을 실험을 통해 보이고자 한다. 본 연구는 퓨전 센서를 통해 얻은 보행 로봇의 자세 정보를 이용하여 보행 로봇의 자세제어가 가능한지 확인하는 것이 목표이므로 알고리즘은 3축에 대해서 유도하되, 실험의 편의성을 위해 실험은 보행 로봇을 1축 운동으로 간략하게 모사하여 수행하겠다.

## II. 비전 센서의 자세 추정 방법

Hong [7]의 방법을 통해 카메라로부터 얻은 영상을 이용하여 자세를 추정하는 과정은 다음과 같다. (1) 연속적으로 얻어진 영상 간의 변화를 탐지하기 위해 Harris corner detector 방법을 이용하여 초기 영상으로부터 corner 점들을 검출한다 [10]. (2) Lucas-Kanade 방법을 이용하여 앞서 구한 특징점들을 다음 영상 내에서 추적한다[11]. (3) RANSAC 알고리즘을 이용하여 초기 영상과 현재 영상의 특징점의 유사성을 찾는다 [12]. (4) 초기 영상과 현재 영상 사이의 fundamental 행렬을

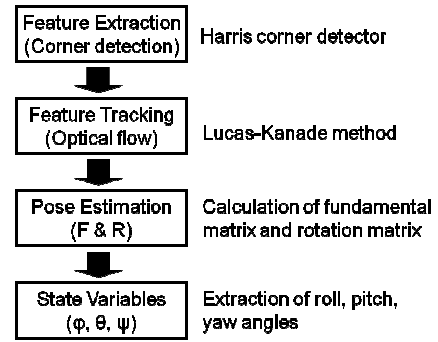


그림 1. 비전 센서의 자세 추정 과정.

Fig. 1. Attitude estimation procedure of vision sensor.

찾는다. (5) fundamental 행렬로부터 회전 행렬(rotation matrix)를 찾는다. (6) 회전 행렬로부터 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw) 각을 계산한다.

특징점 추출 방법을 이용하여 로봇의 자세를 추정할 경우, 비전 센서의 영상 전송 시간과 계산 시간으로 인해 샘플링 주파수가 최대 25Hz까지만 가능하고 항상 일정하지도 않다. 추정 시간 지연 또한 불규칙적으로 발생하며 최대 0.1초까지 나타난다. Hong의 방법은 자세 추정을 위해 사용하는 특징점을 항상 일정한 개수로 사용하지 않아 비전 센서의 계산시간이 불규칙적이기 때문이다.

보행 로봇의 자세제어를 위해서는 센서로부터 최소한 1초에 100개 이상의 자세정보를 얻어야 하는 것이 잘 알려져 있으므로 비전 센서로부터 보행 로봇의 자세를 측정해 자세제어를 하기 위해서는 비전 센서의 성능을 개선할 필요가 있다. 비전 센서의 한계를 확인하기 위해 실험한 결과는 4절에 나타내었다.

## III. 센서 융합

로봇 분야에서 센서를 융합하는 경우는 여러 사례가 있다. 자이로 센서, 가속도계, 기울기 센서 등 경사각 센서는 각각의 장단점이 있기 때문에 2개 이상의 센서를 사용하여 서로의 단점을 보완하여 사용한다. 본 연구에서는 비전 센서와 자이로 센서를 융합 하기 위하여 Song의 퓨전 필터(fusion filter)를 실제 센서의 융합이 가능하도록 수정하고자 한다.

### 1. 센서 융합 알고리즘(Sensor Fusion Algorithm)

자이로 센서는 아날로그 센서(analog sensor)이므로 샘플링 주파수를 원하는 만큼 조절할 수 있지만, 드리프트와 같은 누적오차가 발생하고, 비전 센서는 누적오차가 없지만 긴 계산시간으로 인해 샘플링 주파수가 낮고 추정 시간 지연이 발생한다. Song의 퓨전 필터는 자이로 센서와 비전 센서의 문제점을 상호 보완 할 수 있는 필터이다. 비전 센서와 자이로 센서를 융합하기 위한 퓨전 필터의 구조는 [9]에 나타나 있으며 간단히 요약하면 아래와 같다.

퓨전 필터는 확장형 칼만 필터를 기반으로 하며, 상태방정식과 관측방정식은 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$x_{k+1} = A_k x_k + w_k \quad (1)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2)$$

여기서  $x_k$ 는 운동모델의 상태변수,  $A_k$ 는 모델의 천이행렬

(state Transition Matrix),  $H$ 는 관측 행렬,  $z_k$ 는 출력 변수, 그리고  $w_k, v_k$ 는 영평균(zero-mean)이고 각각 공분산  $Q, R$ 로 표시되는 서로 연관이 없는(uncorrelated) 백색잡음 백터들이다.

오일러 각(Euler angle)인 롤, 피치, 요와 각각의 각속도 성분을 이용하여 상태 변수를 식 (3)과 같이 정의 할 수 있다.

$$x_k = [\psi_k \ \theta_k \ \phi_k \ \omega_{xk} \ \omega_{yk} \ \omega_{zk}]^T \quad (3)$$

자이로 센서에서 측정된 각속도와 오일러 각은 식 (4)와 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \dot{\Theta}(t) &= W(\Theta(t)) \cdot \omega(t) \\ \Theta(t) &= [\psi(t) \ \theta(t) \ \phi(t)]^T, \ \omega(t) = [\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T \quad (4) \\ W(\Theta(t)) &= \begin{bmatrix} 1 & \sin\psi(t)\tan\theta(t) & \cos\psi(t)\tan\theta(t) \\ 0 & \cos\psi(t) & -\sin\psi(t) \\ 0 & \sin\psi(t)/\cos\theta(t) & \cos\psi(t)/\cos\theta(t) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

샘플링 시간  $T$ 가 짧고 이 시간 동안 로봇이 천천히 움직여 회전 속도가 일정하다고 가정하면 상태방정식은 아래와 같이 쓸 수 있다[14].

$$\begin{bmatrix} \Theta_{k+1} \\ \omega_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & T \cdot W(\Theta) \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T^2/2 \cdot W(\Theta) \\ T \end{bmatrix} \dot{\omega}_k \quad (5)$$

상태방정식에서 공정 잡음(process noise)은 각속도로 고려되었고, 이때 공정 잡음 분산  $Q_k$ 는 식 (6)와 같다.

$$Q_k = E \left[ \begin{bmatrix} T^2/2 \cdot W(\Theta) \cdot \dot{\omega}_k \\ T \cdot \dot{\omega}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T^2/2 \cdot W(\Theta) \cdot \dot{\omega}_k & T \cdot \dot{\omega}_k \end{bmatrix} \right] \quad (6)$$

공정 잡음을 아래와 같은 분산 값을 갖는다고 가정하면

$$E[\dot{\omega}_k \dot{\omega}_k^T] = q \quad (7)$$

공정 잡음 분산  $Q_k$ 는 식(8)과 같이 표현 할 수 있다.

$$Q_k = q \begin{bmatrix} T^4/4 \cdot W^2(\Theta) & T^3/2 \cdot W(\Theta) \\ T^3/2 \cdot W(\Theta) & T^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

자이로 센서와 비전 센서 각각에 대한 관측방정식은 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$z_{k+1}^m = H^m x_{k+1} + v_{k+1}^m \quad (9)$$

여기서  $m=1,2$  이며,  $H^1 = [0 \ I_{3 \times 3}]$ ,  $H^2 = [I_{3 \times 3} \ 0]$  이다.  $m=1$  인 경우 자이로 센서,  $m=2$  인 경우 비전 센서를 의미한다.

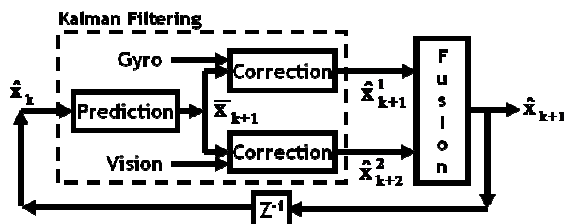


그림 2. 센서 융합 필터 구조.  
Fig. 2. Sensor fusion Filter structure.

센서 융합 구조는 그림 2와 같이 수정된 개별 융합 모델(modified track to track fusion model)을 적용한다[14]. 드리프트가 있는 자이로 센서와 샘플링 시간이 긴 비전 센서를 융합하는 경우, 칼만 필터 기반의 융합 방법들 중 수정된 개별 융합 모델이 성능 및 계산 시간 면에서 가장 효율적인 방법인 것이 Song에 의해 알려져 있다[8]. 자이로 센서와 비전 센서를 융합할 때와 같이 서로 다른 샘플링 시간을 갖는 센서들을 융합하기 위한 필터 구조는 그림 2와 같다. 샘플링 주파수가 낮은 비전 센서의 신호가 갱신(update) 되지 않는 동안에는 자이로 신호만을 이용하여 칼만 필터링을 통해 각도를 구하고, 비전 센서가 갱신 되는 순간에는 자이로 센서와 비전 센서를 융합한다. 두 센서의 신호는 식 (10)과 같은 공통의 예측(prediction) 과정을 거치며 식 (11)와 같이 각각의 독립된 개정(correction) 과정을 거친다.

$$\begin{cases} \bar{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k \\ \bar{P}_{k+1} = A_k P_k A_k^T + Q_k \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} K_{k+1}^m = \bar{P}_{k+1} (H^m)^T [H^m \bar{P}_{k+1} (H^m)^T + R_{k+1}]^{-1} \\ P_{k+1}^m = (I - K_{k+1}^m H^m) \bar{P}_{k+1} \\ \hat{x}_{k+1}^m = \bar{x}_{k+1} + K_{k+1}^m (z_{k+1}^m - H^m \bar{x}_{k+1}) \end{cases} \quad (11)$$

비전 센서 신호가 갱신 되는 경우에는 각각의 개정 과정을 거친 두 신호가 식 (12)과 같은 융합 과정을 거쳐 최종의 각도 값을 추정한다.

$$\begin{aligned} P_{k+1} &= P_{k+1}^1 - [P_{k+1}^1 - P_{k+1}^{12}] [P_{k+1}^1 + P_{k+1}^2 - P_{k+1}^{12} \\ &\quad - P_{k+1}^{21}]^{-1} [P_{k+1}^1 - P_{k+1}^{21}] \\ P_{k+1}^{12} &= [P_{k+1}^{21}]^T = [I - K_{k+1}^1 H_{k+1}^1] \bar{P}_{k+1} [I - K_{k+1}^2 H_{k+1}^2]^T \\ \hat{x}_{k+1} &= \hat{x}_{k+1}^1 + [P_{k+1}^1 - P_{k+1}^{12}] [P_{k+1}^1 + P_{k+1}^2 - P_{k+1}^{12} - P_{k+1}^{21}]^{-1} \\ &\quad \times (\hat{x}_{k+1}^2 - \hat{x}_{k+1}^1) \end{aligned} \quad (12)$$

또한 비전 센서의 추정 시간 지연을 해결하기 위해 그림 3과 같은 방법을 사용한다. 두 센서로부터 나오는 신호를 융합할 때 현재 시간에서의 자이로 센서 신호와 융합 하는 것이 아니라, 비전 센서 신호가 나타내는 시간과 동일한 시간에서의 자이로 센서 신호를 융합한다. 즉, 동일한 시간에서의 비전 센서와 자이로 센서의 신호를 융합하는 것이다. 그리고 비전 센서의 추정 시간 지연 양만큼의 자이로 센서 신호 값을 적분하여 융합된 값에 더해줌으로써 추정 시간 지연을 보상한다. 이 때 비전 센서의 추정 시간 지연의 양이 얼마인지 매 순간 정확히 알아야 보상이 가능하다.

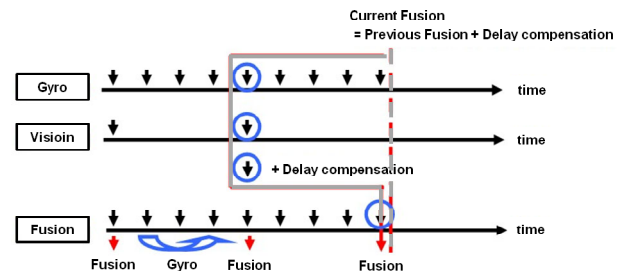


그림 3. 비전 센서의 추정 시간 지연 보상 방법.  
Fig. 3. Estimation time delay compensation method of vision sensor.

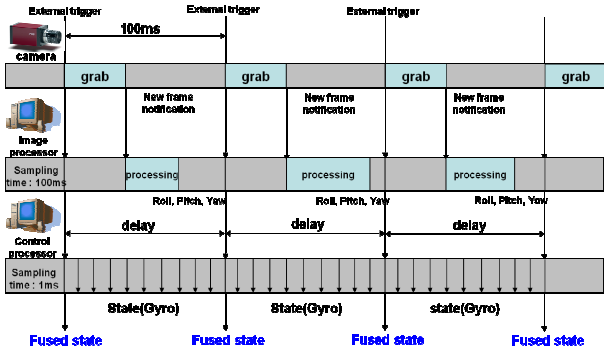


그림 4. 외부 트리거 신호를 이용한 추정 시간 지연의 일정화 방법.

Fig. 4. Estimation time delay equality method by external trigger.

표 1. 이론적으로 비전 센서와 퓨전 센서의 성능 비교.

Table 1. Theoretical performance comparison of vision sensor and fusion sensor.

	Vision sensor	Modified vision sensor	Fusion sensor
Sampling frequency	Up to 25Hz	10Hz	1kHz
Estimation time delay	Up to 0.1sec	0.1sec	-

2. 비전 센서의 추정 시간 지연 일정화

Song의 퓨전 필터의 경우 비전 센서의 샘플링 주파수와 추정 시간 지연의 양을 정확히 알 때 보상할 수 있는 방법이다. 따라서 Hong의 비전 센서의 계산시간을 일정하게 할 필요가 있다. 추정 시간 지연을 일정화 하기 위해 그림 4와 같이 외부 트리거(trigger) 신호를 사용한다. 비전 센서는 영상을 추출 하기 위한 과정(grabbing)과 추출한 영상으로부터 자세 정보를 계산 하는 과정(processing)과정으로 나눌 수 있으며, 영상 추출 과정은 소요 시간이 일정하지만 자세 정보를 계산 하는 시간은 일정하지 않다. 따라서 영상 추출과 자세 정보 계산에 소요되는 시간이 가장 긴 경우를 경험적으로 파악한 다음, 외부 트리거 신호를 이용해 항상 일정하게 비전 센서로부터 신호를 받고, 추정 시간 지연의 양도 일정하게 한다. 실험을 통해서 확인한 결과 비전 센서의 영상 추출 시간과 자세 정보 계산 시간이 가장 긴 경우가 0.1초를 넘지 않았으므로 보존적으로 0.1초마다 외부 트리거 신호를 주는 것으로 결정하였다. 수정된 비전 센서의 샘플링 주파수는 10Hz, 추정 시간 지연 양은 0.1초로 일정하다.

결과적으로 Hong과 Song의 방법을 응용한 퓨전 센서는 이론적으로 추정 시간 지연이 없고, 샘플링 주파수를 사용자가 원하는 만큼 조절 할 수 있다. 비전 센서와 퓨전 센서의 성능을 요약하면 표 1과 같다. 본 연구에서는 퓨전 센서의 샘플링 주파수를 로봇의 자세제어에 필요한 요구사항인 100Hz 보다 큰 1kHz로 결정 하였다.

IV. 비전 센서와 퓨전 센서의 자세제어 성능 비교

본 연구에서는 비전 센서와 자이로 센서의 융합 알고리즘의 성능을 실험적으로 확인하는 것이 목표 이므로 1축 운동 즉, 피치 운동에 대해서 실험을 수행했다. 센서 융합 알고리즘을 1축 운동으로 간략화 하면 상태 변수, 상태 방정식, 관측 방정식 그리고 공정 잡음 분산은 아래와 같이 나타난다.

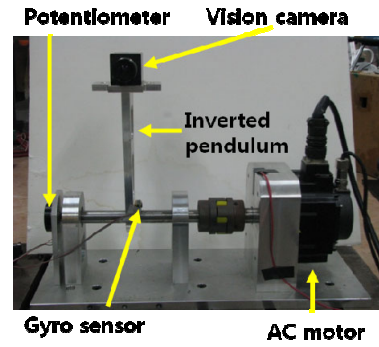


그림 5. 도립 진자 하드웨어.

Fig. 5. Inverted pendulum hardware.

$$x_k = [\theta_k \ \omega_k]^T \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_{k+1} \\ \omega_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_k \\ \omega_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T^2/2 \\ T \end{bmatrix} \dot{\omega}_k \tag{14}$$

$$\begin{cases} z_{k+1}^1 = [0 \ 1]x_{k+1} + v_{k+1}^1 \\ z_{k+1}^2 = [1 \ 0]x_{k+1} + v_{k+1}^2 \end{cases} \tag{15}$$

$$Q = q \begin{bmatrix} T^4/4 & T^3/2 \\ T^3/2 & T^2 \end{bmatrix} \tag{16}$$

비전 센서와 퓨전 센서의 자세 추정 성능을 비교하기 위하여 그림 5와 같이 실험 장치를 구성하였다. 도립 진자와 AC motor가 직접 연결되어 토크 제어를 하는 시스템으로 보행 로봇이 자세제어를 수행하기 위해 발목의 모터를 이용하여 토크 제어를 하는 것과 같은 원리이다. 따라서 도립 진자의 제어를 통해 비전 센서와 퓨전 센서가 보행 로봇의 자세제어에 적용이 가능한지 알아 볼 수 있다.

비전 센서는 모션 블러링(motion blurring)의 영향이 적도록 촬영 속도가 최대 200fps인 카메라(AVT PIKE F-032B)와 디스토션이 거의 없는 렌즈(Lensagon CMFA0420ND)를 사용하였다. 자이로 센서는 측정 범위가 +/-300deg/sec인 저가형 MEMS 자이로 센서(ADXRS300)를 사용하였다. 비전 센서는 일반적으로 보행 로봇이 카메라를 설치하는 위치인 도립 진자의 끝 부분에 설치하였다. 자이로 센서의 위치는 중요하지 않으며 본 실험 장치에서는 선형운동이 가장 작은 위치인 도립 진자의 가장 아래에 설치하였다. 센서의 성능은 도립 진자 제어시 일반적으로 사용되는 기계적 위치 센서인 전위차계(Potentiometer, CPP-45)와 비교하였다. 전위차계는 전위차를 이용하여 각도를 측정하는 아날로그(analog) 센서이다. 본 실험에서 제어기(controller)와 전위차계, 자이로 센서, 퓨전 센서의 샘플링 주파수를 모두 1kHz로 하였다.

1. 비전 센서의 자세제어

비전 센서를 이용하여 도립 진자가 -4도의 초기 위치에서 0도로 돌아오도록 제어를 수행하였다. 이 경우 외부 트리거 신호를 사용하지 않은 비전 센서를 사용하였다. 비전 센서가 보는 영상과 추출된 특징점은 그림 6에 나타난다. 자세제어는 각도와 각속도 값을 각각 비전 센서와 자이로 센서로부터 피드백 받아 최적 제어 기법을 사용하여 수행하였다. 비전 센서를 이용한 자세제어 결과는 그림 7에 나타나며, 비전 센서를 이용했을 때 도립 진자를 제어하지 못하고 발산하는 것

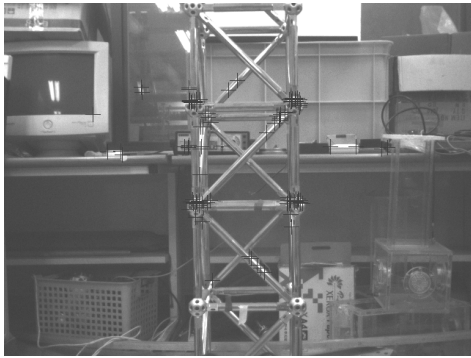


그림 6. 비전 센서의 영상과 특징점.  
Fig. 6. Image of vision sensor and feature points.

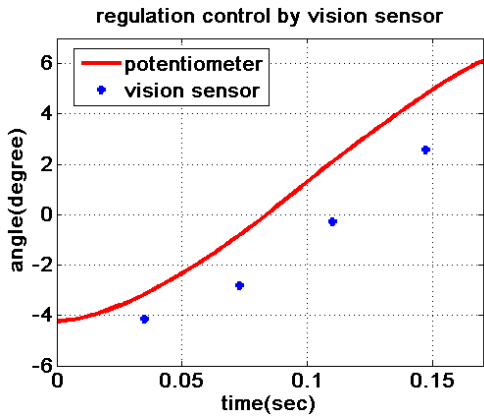


그림 7. 비전 센서의 자세제어 결과.  
Fig. 7. Attitude control results of inverted pendulum by vision sensor.

을 알 수 있다. 비전 센서의 샘플링 주파수가 도립 진자를 제어 하기에 충분히 높지 않고, 추정시간 지연 양 또한 크기 때문에 도립 진자의 실제 자세를 제대로 측정하지 못하여 도립 진자를 제어하지 못하고 발산한다.

2. 퓨전 센서의 자세제어

센서 융합을 위한 퓨전 필터의 튜닝 파라미터(tuning parameters)는 각각  $q=1000, R^1=0.1, R^2=0.0001$ 이다.

퓨전 센서의 경우 도립 진자를 0도로 다시 돌아오도록 제어 가 가능한 것을 그림 8을 통해 알 수 있다. 퓨전 센서가 추정 시간 지연이 거의 없고 전위차계와 유사한 값을 가지므로 도립 진자의 자세를 잘 추정하는 것을 알 수 있다.

또한 보행 로봇의 경우 걷거나 뛸 때 진동을 하게 되므로 도립 진자가 일정한 주파수로 진동하도록 제어 할 수 있어야 한다. 현재 아시모와 같은 보행 로봇이 뛸 때 최대 2Hz정도로 진동을 한다. 그림 9로부터 도립 진자가 2Hz의 기준값을 추종하도록 제어가 가능한 것을 알 수 있다. 전위차계와 퓨전 센서의 최대 오차 값은 약 1.2도 정도인데 이는 자이로 센서가 저가형 MEMS 자이로 센서이기 때문에 추정 시간 지연(time delay)이 약 30msec정도 발생하여 나타나는 오차이다. 본 연구에서의 퓨전 필터는 비전 센서의 추정 시간 지연만을 보상할 수 있고, 자이로 센서의 추정 시간 지연 양은 보상할 수 없기 때문에 이론적으로는 없는 퓨전 센서의 추정 시간 지연이 발생 하였다. 추정 시간 지연이 없는 성능이 좋

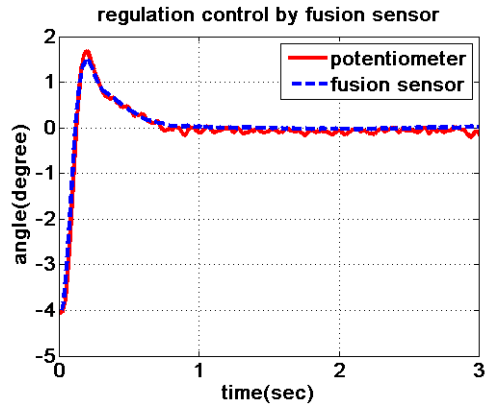


그림 8. 퓨전 센서의 자세제어 결과 - Regulation.  
Fig. 8. Attitude control results of inverted pendulum by fusion sensor - Regulation.

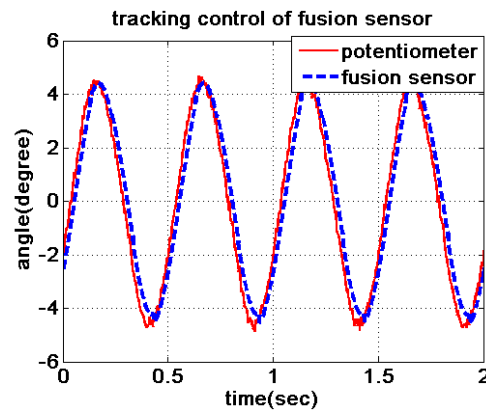


그림 9. 퓨전 센서의 자세제어 결과.  
Fig. 9. Attitude control results of inverted pendulum by fusion sensor - Tracking.

은 자이로 센서를 사용한다면 자세 추정 오차는 줄어들 수 있다. 하지만 도립 진자 실험에 있어서, 비전 센서만 사용하는 경우 추정 시간 지연이 100msec까지 발생하지만, 퓨전 센서의 경우 30msec만 나타나고, 샘플링 주파수 또한 비전 센서에 비해서 최소 40배 증가 했기 때문에 도립 진자를 제어 하기에는 충분하다.

V. 결론

본 연구에서는 기존의 다중 샘플링 시간을 갖는 두 센서의 융합 알고리즘을 실제 비전 센서와 자이로 센서의 융합에 적용할 수 있도록 수정하였다. 비전 센서는 샘플링 주파수가 낮고 추정 시간 지연의 양 또한 크기 때문에 보행 로봇의 자세를 제어하기에 성능이 충분하지 않다. 이를 해결하기 위하여 비전 센서를 저가형 MEMS 자이로 센서와 융합하였다. 센서 융합 알고리즘은 비전 센서의 낮은 샘플링 주파수와 추정 시간 지연 문제 뿐만 아니라 자이로 센서의 드리프트 문제를 상호 해결할 수 있다. 퓨전 센서의 성능 검증을 실험의 편의성을 위해 1축 운동 즉, 피치 운동에 대해서 수행하였다. 보행 로봇의 피치 운동을 표현 할 수 있는 도립 진자의 자세 제어를 하는 실험을 수행하였고, 비전 센서와 퓨전 센서의 자세 추정 성능을 기계적 위치 센서인 전위차계와 비교하였

다. 그 결과, 비전 센서를 단독으로 사용할 경우 도립 진자의 자세제어를 수행하기에는 그 성능이 충분하지 않아 발산하였다. 하지만 퓨전 센서의 경우 비전 센서만을 사용하였을 때와 비교하여 샘플링 주파수가 최소 40배 증가하고(비전 센서의 최대 샘플링 주파수: 25Hz) 추정 시간 지연이 1/3 이상 제거된 것을 확인하였다. 추정 시간 지연의 경우 자이로 센서의 성능에 의존하게 되므로, 성능이 좋은 자이로 센서를 사용하면 추정 시간 지연은 사라지게 된다. 결과적으로 퓨전 센서가 보행 로봇의 자세제어 가능성이 있음을 실험적으로 확인하였다.

**참고문헌**

[1] H. Rehlinger and X. Hu, "Nonlinear pitch and roll estimation for walking robots," *Proc. of the 2000 IEEE international Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, vol. 3, pp. 2617-2622, Apr. 2000.

[2] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura, "The intelligent ASIMO: System overview and integration," *Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robotics and Systems EPFL*, pp. 2478-2483, Oct. 2002.

[3] J. Kim, "A study on the realization of dynamic gait for a biped humanoid robot," Ph.D. Thesis, KAIST, 2004.

[4] S. You and U. Neumann, "Fusion of vision and gyro tracking for robust augmented reality registration," *Proc. of the Virtual Reality 2001 Conference*, pp. 71-78, March 2001.

[5] R. Kurazume and S. Hirose, "Development of image stabilization system for remote operation of walking robots," *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, San Francisco, CA, pp. 1856-1861, Apr. 2000.

[6] H. Rehlinger and B. K. Ghosh, "Pose estimation using line-based dynamic vision and inertial sensor," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 48, no. 2, pp. 186-199, Feb. 2003.

[7] D. Hong, H. Lee, H. Cho, Y. Park, and J. Kim, "Visual gyroscope: integration of visual information with gyroscope for attitude measurement of mobile platform," *International Conference on Control, Automation and Systems 2008*, pp. 503-507, Oct. 2008.

[8] M. Song and Y. Park, "Multi-sensor data fusion methods based on the Kalman filter for attitude and vibration control of the biped robot," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 25, no. 4, Apr. 2008.

[9] M. Song, "Fusion filter of multi sampling rate sensors for the attitude control," Master Thesis, KAIST, 2008.

[10] C. Schmid, R. Mohr, and C. Bauckhage, "Evaluation of interest point detectors," *International Journal of Computer Vision*, vol. 37, no. 2, pp. 151-172, 2000.

[11] E. Trucco and A. Verri, *Introductory Techniques for 2-D Computer Vision*, Prentice Hall, NJ, 1998.

[12] R. Hartley and A. Zisserman, "Multiple view geometry in computer vision," Cambridge University Press, Cambridge, 2000.

[13] G. Welch and G. Bishop, "An introduction to the Kalman filter," *UNC-Chapel Hill*, TR95-041, July 2006.

[14] J. B. Gao and C. J. Harris, "Some remarks on Kalman filters for the multisensor fusion," *Information Fusion*, vol. 3, no. 3, pp. 191-201, Sep. 2002.

[15] S. An, J. Kang, L. Lee, and S. Oh, "SLAM with visually salient line features in indoor hallway environments," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 1, pp. 40-47, Jan. 2010.

[16] M. Kim, S. Ahn, and H. Cho, "Bayesian sensor fusion of monocular vision and laser structured light sensor for robust localization of a mobile robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 4, pp. 381-390, Apr. 2010.



**박진성**

2008년 한국과학기술원 기계공학과 졸업. 2010년 동 대학원 석사 졸업. 2010년~현재 동 대학원 박사 과정. 관심분야는 자동제어, 제어이론, 신호처리.



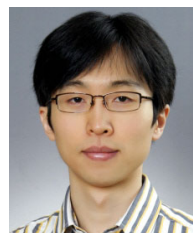
**박영진**

1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1982년 동 대학원 석사. 1987년 University of Michigan 박사. 1987년~1988년 University of Michigan Research Fellow. 1988년~1990년 New Jersey Institute of Technology Assistant Professor. 1990년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 관심분야는 자동제어, 3차원 입체음향, 능동 소음 및 진동제어, MR 유체, 차량의 안정성 제어, 차량의 고장진단, 제어이론, 강인제어, 시스템 규명.



**박윤식**

1972년 서울대학교 기계공학과 졸업. 1979년 Iowa State University 석사. 1981년 동 대학원 박사. 1981년~1984년 한국과학기술원 선임연구원. 1984년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 관심분야는 동역학, 진동 및 소음 제어, 구조물 동특성 변경법, 기계 및 매니퓰레이터의 동역학, 모달해석, 시스템 규명.



**홍덕화**

2005년 서울대학교 기계항공공학부 졸업. 2010년 한국과학기술원 기계공학과 박사 졸업. 2010년 8월~현재 동 대학원 연수연구원. 관심분야는 광기전공학, 컴퓨터 비전, 영상처리, 광학시스템 설계.