

관성센서를 사용한 발의 움직임 추정용 평활기

Foot Motion Estimation Smoother using Inertial Sensors

서 영 수*, 지 영 준
(Young Soo Suh¹ and Youngjoon Chee¹)

¹University of Ulsan

Abstract: A foot motion is estimated using an inertial sensor unit, which is installed on a shoe. The inertial sensor unit consists of 3 axis accelerometer and 3 axis gyroscopes. Attitude and position of a foot are estimated using an inertial navigation algorithm. To increase estimation performance, a smoother is used, where the smoother employs a forward and backward filter structure. An indirect Kalman filter is used as a forward filter and backward filter. A new combining algorithm for the smoother is proposed to combine a forward indirect Kalman filter and a backward indirect Kalman filter. Through experiments, the estimation performance of the proposed smoother is verified.

Keywords: gait analysis, motion tracking, inertial navigation algorithm, smoother

I. 서론

보행분석 시스템은 사람의 걸음걸이를 분석하는 시스템이다[1]. 걸음걸이를 분석함으로써 피관찰자의 상태 등을 분석하는 의료목적으로 주로 사용된다. 보행분석 시스템으로는 피관찰자의 몸에 마커를 부착하고, 마커를 카메라로 추적하는 시스템이 가장 많이 사용되고 있다. 범용 모션 캡처인 vicon 등이 이 목적으로 많이 사용되고 있다. 또한 [2]에서는 저가형 비전시스템을 사용한 보행분석시스템이 제안되었다. 비교적 정확하고 빠른 움직임의 측정이 가능하지만, 측정가능한 범위가 비교적 짧은 단점을 가지고 있다. 보행경로에 카메라 또는 랜드마크를 많이 설치함으로써 측정가능 범위를 길게 할 수 있지만, 가격이 상승하고 시스템이 복잡해지는 단점을 가지고 있다.

최근에는 관성센서를 신발에 부착하여, 발의 움직임을 추적하는 시스템이 많은 주목을 받고 있다. 발의 움직임을 자세추정 알고리즘 또는 관성항법 알고리즘 [3]을 사용하여 추정하는데, 보행경로에 특별한 장치 등을 설치할 필요가 없어서, 사용이 편리한 점이 있다. 따라서 측정가능 범위의 제약이 없다는 것이 큰 장점이다. 이러한 관성센서 기반 시스템에는 의료목적으로 발의 자세 및 위치를 추적하는 시스템이 있다[4,5]. GPS 신호가 없는 실내 등에서 개인의 위치를 추정하는 개인용 항법장치[6,7]와 관련하여서도 많은 연구결과 등이 보고되고 있다.

본 논문에서는 관성센서 (가속도계와 자이로스코프)를 신발에 부착하여 발의 움직임 (위치와 자세)를 추정하는 시스템을 다룬다. 이미 [4-7]에서 관성항법 알고리즘을 사용하여 발의 위치와 자세를 추정하는 방법이 제시되고 있다. 일

반적인 소형의 관성센서로는 수초 이상의 시간동안 의미 있는 위치를 추정하는 것이 힘들다. 발에 관성센서를 설치하면, 보행 시 발이 거의 주기적으로 발이 땅에 닿고 이 때 발의 속도는 순간적으로 영이 된다. [4-7]의 알고리즘들은 이 영속도 구간(zero velocity interval)을 통해 주기적으로 위치 및 자세 오차를 보정함으로써 수분 이상의 시간동안 위치를 추정하는 것이 가능하다.

[4-7]의 알고리즘은 약간의 차이는 있지만, 거의 비슷한 형태를 가지고 있고, 모두 Kalman filter를 사용하고 있다. 따라서 자세 및 위치의 정밀도는 관성센서의 정밀도 및 관성센서가 보정정도에 의존하게 된다. 본 논문에서는 자세 및 위치 정밀도를 높이기 위하여 필터 대신에 평활기(smoother)를 사용한다[8]. 보행 시 발이 움직이는 부분은 두 개의 영속도 구간(발에 땅에 닿아있는 구간) 사이에 항상 있게 된다. 이 두 개의 영속도 구간을 각각 전방향 필터(forward filter) 및 역방향 필터(backward filter)의 시작점으로 두고, 전방향 필터와 역방향 필터를 결합한 평활기를 사용한다. [9]에서는 자세 추정을 위한 평활기가 제시되었고, [10]에서는 외부 위치 센서를 사용한 경우에 자세 및 위치 추정을 위한 평활기가 제시되었고, [11]에서는 자세 평활기를 구한 후 다시 속도 평활기를 구하는 방법이 제안되었다. 본 논문에서는 영속도 구간에서 속도가 영이고 발이 다시 땅에 닿는다는 가정 (즉, z축의 위치가 영속도구간에서 0이 됨) 아래 [10] 및 [11]과는 다른 새로운 형태의 평활기를 제안한다.

II. 시스템 구성

신발에 그림 1과 같이 관성센서 (XSens MTi)를 설치하였다. 본 논문에서는 항법 좌표계(navigation coordinate frame)와 동체 좌표계(body coordinate frame)의 두 개의 좌표계가 사용된다. 항법 좌표계는 z축이 중력가속도의 방향과 일치하도록 설정된다. 발의 위치 및 속도는 항법 좌표계로 표시

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 12. 13., 수정: 2012. 3. 22., 채택확정: 2012. 4. 3.

서영수, 지영준: 울산대학교 전기공학부

(yssuh@ulsan.ac.kr/yjchee@ulsan.ac.kr)

※ 이 논문은 2011년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.



그림 1. 신발에 설치된 관성센서.
Fig. 1. An inertial sensor unit installed on a shoe.

된다. 동체 좌표계의 세 축은 관성센서의 x, y, z 세 축과 일치한다. 보행분석을 행하는 곳은 경사지지 않는 실내 또는 평지로 가정하였다.

III. 관성항법 알고리즘과 영속도 검출

항법 좌표계와 동체 좌표계 사이의 회전은 쿼터니언 $q \in R^4$ 으로 표시한다. 항법 좌표계에서 발의 위치 및 속도를 각각 r_n 및 v_n 로 표시한다. 관성항법의 가장 기본적인 방정식은 다음과 같다[3]:

$$\begin{aligned} \dot{q} &= \frac{1}{2} \Omega(\omega)q \\ \dot{v}_n &= a_n = C(q)' a_b \\ \dot{r}_n &= v_n \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 ω 는 동체 좌표계에서 회전속도 벡터이고, $a_n(a_b)$ 는 항법좌표계(동체좌표계)에서 본 움직임에 의한 가속도이고, $C(q)$ 는 쿼터니언 q 에 해당하는 회전행렬이다[12]. 행렬 $\Omega(\omega)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Omega(\omega) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}$$

식 (1)에서 q, v_n, r_n 은 가속도계 y_a , 자이로스코프 y_g , 자기센서 y_m 을 사용해서 구한다. 각 센서의 출력을 다음과 같이 모델링한다.

$$\begin{aligned} y_a &= C(q)\tilde{g} + a_b + v_a \\ y_g &= \omega + v_g \\ y_m &= C(q)\tilde{m} + v_m \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 \tilde{g} 는 중력가속도를 나타내는 벡터이고 \tilde{m} 은 지자기를 나타내는 벡터이다. 센서 노이즈 v_a, v_g, v_m 는 서로 비상관(uncorrelated) 영평균 가우시안 백색 잡음이고, 각각의 공분산 행렬은 $q_a I, q_g I, q_m I$ 으로 표시한다. 센서의 바이어스 등은 [13]의 방법으로 미리 보정한 것으로 가정한다. 보행 실험의 경우 실험이 길어야 수집초 정도임으로 이 기간 동안

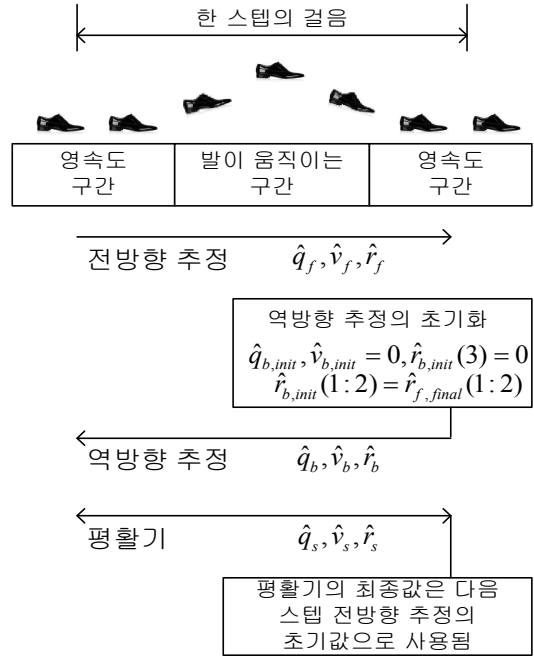


그림 2. 제안하는 평활기의 개요.
Fig. 2. Overview of the proposed smoother .

안의 바이어스의 변동 등은 없는 것으로 가정해도 큰 무리가 없다.

자가형관성센서를 사용한 경우 식 (1)을 사용해 계산한 위치(r_n)는 오차가 10초 이내에 수십 m 이상으로 매우 크게 된다[14]. 보행분석의 경우 발이 거의 주기적으로 지면에 닿고, 이 때에 속도가 0이 되는 것을 이용해 영속도 보정을 행할 수 있다. 발의 속도의 직접적인 측정은 어렵기 때문에, 자이로스코프의 값이 작고, 가속도계 값의 변화가 작을 때 영속도라고 간접적으로 판별한다. 자세한 영속도 검출 알고리즘은 [11]에 주어져 있다.

한 스텝의 걸음은 그림 2와 같이 두 개의 영속도구간 사이에 존재한다. 본 논문에서는 한 스텝의 걸음을 한 영속도구간의 중간에서부터 다음 영속도구간의 중간까지로 정의한다. 각 걸음에 대해서 전방향 및 역방향으로 자세, 속도, 위치를 추정하고, 평활기를 사용하여 자세, 속도, 위치의 추정값을 구한다. 그림 2에서 아래첨자 f, b, s는 각각 전방향(forward direction), 역방향(backward direction), 평활기(smoother)에 의한 추정값임을 표시한다. 예를 들어, $\hat{q}_s, \hat{v}_s, \hat{r}_s$ 은 평활기에 의한 쿼터니언, 속도, 위치의 추정값임을 나타낸다.

전방향 추정의 초기 자세값은 이전 걸음스텝의 평활기의 최종값을 사용한다. 이전 걸음스텝이 없는 첫 번째 걸음의 경우에는 [15]의 TRIAD 알고리즘을 사용하여 y_a 와 y_m 로부터 구한다. TRIAD 알고리즘에서는 피치 (pitch) 및 롤(roll) 각도는 가속도계로부터 구하고, 요(yaw) 각도는 자기센서로부터 구한다. 즉, 자기센서 값에 포함된 피치 및 롤 각도 정보를 사용하지 않아서, 자기센서에 외란이 있더라도 피치 및 롤 각도에는 영향을 주지 않는다.

전방향 계산시 자세 쿼터니언의 추정값 \hat{q}_f 는 (1)의 첫

번째 식을 이산화해서 사용한다. 센서의 샘플링 주기가 T 이고, 이산시스템의 시간 인덱스를 k 라고 할 때, 첫 번째 식은 다음과 같이 근사가 가능하다[11].

$$\hat{q}_{f,k+1} = (I + \frac{3}{4}\Omega_k T - \frac{1}{4}\Omega_{k-1} T - \frac{1}{6}\|\omega_k\|_2^2 T^2 - \frac{1}{24}\Omega_k \Omega_{k-1} T^2 - \frac{1}{48}\|\omega_k\|_2^2 \Omega_k T^3) \hat{q}_{f,k} \quad (3)$$

위 식의 계산에서 각속도 ω 을 알 수 없으므로, 대신에 자이로스코프 출력 y_g 를 사용한다. 쿼터니언의 계산 후 놈(norm)이 1이 되도록 정규화한다. 전방향 추정의 속도 및 위치의 추정값 \hat{v}_f, \hat{r}_f 은 적분의 사다리꼴 근사를 사용하여 구하였다.

$$\begin{aligned} \hat{r}_{f,k+1} &= \hat{r}_{f,k} + 0.5T(\hat{v}_{f,k+1} + \hat{v}_{f,k}) \\ \hat{v}_{f,k+1} &= \hat{v}_{f,k} - T\tilde{g} + 0.5T(C(\hat{q}_{k+1})'y_{a,k+1} + C(\hat{q}_k)'y_{a,k}). \end{aligned} \quad (4)$$

식 (3) 및 (4)의 관성센서값만을 이용해 한 걸음 동안의 자세, 속도 및 위치를 계산한 것이다. 관성센서의 잡음 및 수치적분에 의한 오차 등으로 인해, (3) 및 (4)의 계산값은 오차를 포함하고 있다. 관성항법 알고리즘은 시간이 지남에 따라 오차가 증가하는 경향이 있다. 따라서 (3) 및 (4)의 자세, 속도 및 위치의 계산값은 걸음구간의 초기에는 정확하나, 걸음구간의 마지막단계로 갈수록 오차가 커지는 경향이 있다. 이 오차값은 IV 장의 전방향 필터를 이용해 보정한다.

역방향 추정은 그림 2와 같이 걸음구간의 마지막단계에서 초기단계로 시간을 역방향으로 가면서, 자세, 속도 및 위치를 계산하는 것이다. 이 경우에는 자세 및 위치의 오차는 걸음구간의 마지막 단계에서 초기단계로 감에 따라 점점 커지는 경향이 있다. 따라서 V 장에서 전방향 및 역방향 추정값을 결합하면 전체적인 오차를 줄이는 효과를 가져온다.

역방향 추정의 초기 자세값 (역방향의 경우 초기자세값이 최종값임)은 y_a 와 y_m 로부터 TRIAD 알고리즘을 사용하여 구한다. 속도 초기값은 0이고, 위치의 경우 z 축 값만 0으로 설정한다. 위치의 경우 거의 평평한 바닥을 걷는다는 가정을 사용하였고, 신발이 지면에 닿았을 때의 z 축 위치가 0으로 가정하였다. 역방향 추정의 경우 위치의 x 및 y 축 값은 알 수 없으므로, 전방향 추정의 최종값을 사용하였다 (IV 장의 전방향 필터를 사용한 후의 최종값). 식 (1)을 역방향으로 전개하면, 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= -\frac{1}{2}\Omega(\omega)q \\ \dot{v}_n &= -a_n = -C(q)'a_b \\ \dot{r}_n &= -v_n \end{aligned} \quad (5)$$

전방향 추정과 비슷하게 (5)의 근사식을 구하여 역방향 추정값을 구한다. 자세 쿼터니언 추정값 \hat{q}_b 는 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{aligned} \hat{q}_{b,k} &= (I - \frac{3}{4}\Omega_k T + \frac{1}{4}\Omega_{k-1} T - \frac{1}{6}\|\omega_k\|_2^2 T^2 - \frac{1}{24}\Omega_k \Omega_{k-1} T^2 + \frac{1}{48}\|\omega_k\|_2^2 \Omega_k T^3) \hat{q}_{b,k+1}. \end{aligned} \quad (6)$$

역방향 추정의 속도 및 위치의 추정값 \hat{v}_b, \hat{r}_b 은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \hat{r}_{b,k} &= \hat{r}_{b,k+1} - 0.5T(\hat{v}_{b,k+1} + \hat{v}_{b,k}) \\ \hat{v}_{b,k} &= \hat{v}_{b,k+1} + T\tilde{g} - 0.5T(C(\hat{q}_{k+1})'y_{a,k+1} + C(\hat{q}_k)'y_{a,k}). \end{aligned} \quad (7)$$

역방향 추정의 경우 관성센서값을 저장한 후에 계산해야 함으로, 실시간 계산은 할 수 없다.

IV. 전방향 및 역방향 필터

이 장에서는 전방향 필터(forward filter)와 역방향 필터(backward filter)를 사용하여 전방향 및 역방향 추정값에 포함된 오차를 추정한다. 이 시스템에서는 관성센서 외에는 다른 센서를 사용하고 있지 않으므로 IV 장에서 계산된 자세, 속도 및 위치값을 보정할 물리적인 측정값이 존재하지 않는다. 걸음 단계의 영속도구간 (발이 땅에 닿아 있는 구간)에서는 속도가 0이라는 사실과 평지를 걷고 있다는 사실 (즉, 영속도구간에서 z 축의 값이 0)을 가상의 측정값으로 사용한다.

전방향 자세 쿼터니언 추정값에 포함된 오차 $q_{e,f} \in R^4$ 는 다음과 같이 정의된다[16].

$$q = \hat{q}_f \otimes q_{e,f} \quad (8)$$

여기서 \otimes 는 쿼터니언 곱셈을 나타낸다. 오차가 작다는 가정아래, $q_{e,f}$ 는 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$q_{e,f} = \begin{bmatrix} 1 \\ -q_f \end{bmatrix} \in \begin{bmatrix} R^1 \\ R^3 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

속도 및 위치의 오차 v_e 및 r_e 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} v_{e,f} &= v - \hat{v}_f \\ r_{e,f} &= r - \hat{r}_f. \end{aligned} \quad (10)$$

전방향 필터의 상태 x_f 는 다음과 같이 정의된다.

$$x_f = \begin{bmatrix} \hat{q}_f \\ r_{e,f} \\ v_{e,f} \end{bmatrix} \in R^9 \quad (11)$$

전방향 필터의 상태는 식 (3),(4)에서 계산된 자세, 속도, 위치 추정값에 포함된 오차를 나타낸다. 이 오차를 칼만 필터(Kalman filter)를 이용해 추정한다.

상태 x_f 의 상태방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{x}_f = \begin{bmatrix} [-y_g \times] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I \\ -2C(\hat{q}_f)'[y_a \times] & 0 & 0 \end{bmatrix} x_f + \begin{bmatrix} -0.5v_g \\ 0 \\ -C(\hat{q}_f)'v_a \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기에서 벡터 $p \in R^3$ 에 대해서, $[p \times]$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$[p \times] = \begin{bmatrix} 0 & -p_3 & p_2 \\ p_3 & 0 & -p_1 \\ -p_2 & p_1 & 0 \end{bmatrix}$$

시스템 (12)를 이산화 한 후, 이산칼만필터(를 전방향 필터로 사용한다. 영속도 구간에서는 z 축 위치가 0이고 속도가 0이라는 정보를 측정값처럼 사용한다. 즉, 측정치 z_f 는 다음과 같이 정의된다.

$$z_f = \begin{bmatrix} 0 - \hat{r}_f(3) \\ 0 - \hat{v}_f \end{bmatrix} \in \begin{bmatrix} R^1 \\ R^3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

식 (13)을 사용하여 영위치 및 영속도 보정을 한 후 자기센서 y_m 의 값을 이용해 요(yaw) 각도의 보정을 행한다. 자기센서 y_m 이 피치 및 롤 각도에는 영향을 미치지 않고, 요 각도 보정에만 사용되도록 [17,18]의 방법을 사용하였다. 측정방정식은 상태 x_f 의 정의에서 다음과 같이 주어진다.

$$z_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_f + v_f \quad (14)$$

여기서 v_f 는 가상적인 잡음으로 공분산 Q_f 는 다음과 같이 정의한다.

$$Q_f = \begin{bmatrix} q_r & 0 \\ 0 & q_v I \end{bmatrix}$$

공분산 q_r 및 q_v 는 각각 발이 땅에 닿아 있을 때, z 축 위치 및 속도가 0이라는 가정에 대한 신뢰도를 나타낸다. 예를 들어, $q_r = 0$ 이라고 설정하는 것은, 발이 땅에 닿았을 때의 z 축 위치가 항상 0이 된다고 가정하는 것과 동일하다. 실제로는 z 축 위치가 항상 0이 아닐 수 있으므로 아주 작은 값의 q_r 을 사용한다. q_v 도 마찬가지로 0 대신에 아주 작은 값을 사용한다.

전방향 필터에서 $\hat{x}_{f,k}$ 를 구하면, 이 값들을 $\hat{q}_{f,k}, \hat{r}_{f,k}, \hat{v}_{f,k}$ 에 반영하고, $\hat{x}_{f,k}$ 를 0으로 만든다. 전방향 필터의 오차공분산 $P_{f,k}$ 은 칼만필터로 보정하고 난 뒤의 자세, 속도 및 위치 추정값 ($\hat{q}_{f,k}, \hat{r}_{f,k}, \hat{v}_{f,k}$)이 얼마나 정확한지를 나타내는 지표이다.

식 (13)의 측정값을 사용하여 보정을 한 뒤의, $\hat{q}_{f,k}, \hat{r}_{f,k}, \hat{v}_{f,k}$ 값은 보정전과 비교해서 오차가 현저히 감소한다. 위치의 최종값만이 필요한 기존의 개인용 항법관련 논문 [6,7]에서는 전방향필터만을 사용하였다. 보행분석의 경우에는 위치의 최종값과 함께 중간에 발이 어떻게 움직이는지를 정확하게 아는 것도 중요하다. 식 (13)의 측정정보정에서는 영속도구간 이전 (즉, 발이 움직이는 구간)의 $\hat{q}_{f,k}, \hat{r}_{f,k}, \hat{v}_{f,k}$ 는 보정되지 않는다. 이를 보정하기 위하여

평활기가 필요하다.

역방향 필터의 상태 x_b 는 전방향 필터 상태 x_f 와 똑같이 구성된다.

$$x_b = \begin{bmatrix} \bar{q}_b \\ r_{e,b} \\ v_{e,b} \end{bmatrix} \in R^9. \quad (15)$$

역방향 필터의 상태는 식 (5),(7)에서 계산된 역방향 계산값의 자세, 속도, 위치 추정값에 포함된 오차를 나타낸다.

상태 x_b 의 상태 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{x}_b = \begin{bmatrix} [y_g \times] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -I \\ 2C(\hat{q}_f)' [y_a \times] & 0 & 0 \end{bmatrix} x_b + \begin{bmatrix} 0.5v_g \\ 0 \\ C(\hat{q}_f)' v_a \end{bmatrix}. \quad (16)$$

역방향 필터로는 전방향 필터와 마찬가지로, 식 (16)을 이산화하고 이산칼만필터를 적용하였다. 측정치 z_b 와 측정방정식은 전방향 필터와 동일하게 다음과 같이 주어진다.

$$z_b = \begin{bmatrix} 0 - \hat{r}_b(3) \\ 0 - \hat{v}_b \end{bmatrix} \in \begin{bmatrix} R^1 \\ R^3 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$z_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x_b + v_b$$

여기서 v_b 는 v_f 와 동일하게 정의되고, Q_b 도 Q_f 와 동일하게 정의된다.

전방향 필터와 마찬가지로 역방향 필터에서 $\hat{x}_{b,k}$ 를 구하면, 이 값들을 $\hat{q}_{b,k}, \hat{r}_{b,k}, \hat{v}_{b,k}$ 에 반영하고, $\hat{x}_{b,k}$ 를 0으로 만든다. 역방향 필터의 오차공분산 $P_{b,k}$ 는 역방향 필터로 보정하고 난 후의 추정값들의 정확도를 나타내는 지표이다. V장에서 사용되는 평활기에는 전방향 필터의 오차공분산 $P_{f,k}$ 과 역방향필터의 오차공분산 $P_{b,k}$ 을 이용하여, 전방향 및 역방향 추정값을 결합한다.

전방향 필터와 역방향 필터를 사용한 $x_{f,k}$ 와 $x_{b,k}$ 의 추정치를 각각 $\hat{x}_{f,k}$ 와 $\hat{x}_{b,k}$ 로 표시한다 (k 는 이산시간 인덱스를 나타냄). 역방향 필터에서 칼만필터의 표준적인 표시법과 같이 측정 업데이트를 하기 전의 추정값을 $\hat{x}_{b,k}^-$ 로 표시한다. 측정 업데이트가 없을 때에는 $\hat{x}_{b,k} = \hat{x}_{b,k}^-$ 이다. 또한 측정 업데이트 전의 역방향 필터의 오차공분산을 $P_{b,k}^-$ 로 표시한다.

V. 평활기

이 장에서는 평활기를 사용하여 전방향 추정치 ($\hat{q}_{f,k}, \hat{r}_{f,k}, \hat{v}_{f,k}$)와 역방향 추정치($\hat{q}_{b,k}, \hat{r}_{b,k}, \hat{v}_{b,k}$)를 결합하여 보다 정확한 추정값을 구한다(그림 3 참조). 기본적인 아이디어는 전방향필터에서 전방향 추정치와 역방향 추정치의 차이를 가상측정값으로 추가하는 것이다. 영속도구간이 아닌 경우에는 이 가상측정값만을 이용해 측정 업데이트를

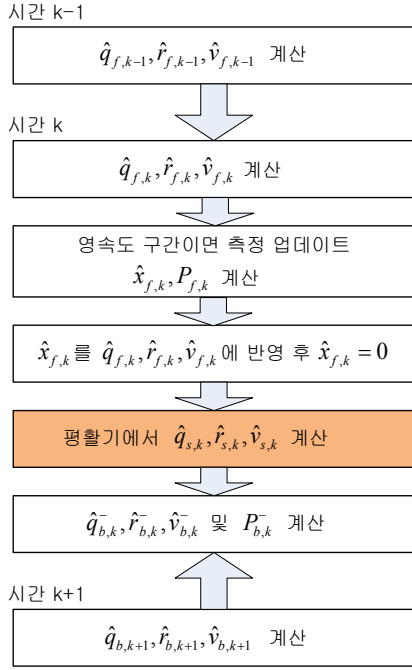


그림 3. 전방향 및 역방향 추정값과의 결합.
Fig. 3. Fusion of forward and backward estimation.

하고, 영속도구간에는 식 (13)과 이 가상측정값을 모두 이용해 측정 업데이트를 하는 것이다.

전방향 추정치와 역방향 추정치를 이용하여 가상 측정값 z_s 를 유도한다. 가정에서 자세 쿼터니언은 다음 식을 만족한다.

$$q = \hat{q}_f \otimes q_{e,f} = \hat{q}_b^- \otimes q_{e,b} \quad (18)$$

위 식에서 쿼터니언 q 의 벡터 부분 식만을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \hat{q}_f + (\hat{q}_{f,0}I + [\hat{q}_f \times]) \bar{q}_{e,f} \\ & = \hat{q}_b^- + (\hat{q}_{b,0}I + [\hat{q}_b^- \times]) \bar{q}_{e,b} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 $\hat{q}_{f,0}$ 및 \hat{q}_f^- 은 각각 \hat{q}_f 의 스칼라 부분과 벡터 부분에 해당한다. (19)를 정리하면, 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \hat{q}_b^- - \hat{q}_f = \\ & (\hat{q}_{f,0}I + [\hat{q}_f \times]) \bar{q}_{e,f} - (\hat{q}_{b,0}I + [\hat{q}_b^- \times]) \bar{q}_{e,b} \end{aligned} \quad (20)$$

다음은 $\hat{r}_{f,k}$ 와 $\hat{r}_{b,k}^-$ 에 대한 식을 유도한다.

$$\begin{aligned} & \hat{r}_{b,k}^- - \hat{r}_{f,k} \\ & = (r_k - \hat{r}_{f,k}) - (r_k - \hat{r}_{b,k}^-) \\ & = r_{e,f,k} - r_{e,b,k} \end{aligned} \quad (21)$$

마찬가지로 $\hat{v}_{f,k}$ 와 $\hat{v}_{b,k}^-$ 에 대한 식을 유도한다.

$$\begin{aligned} & \hat{v}_{b,k}^- - \hat{v}_{f,k} = (v_k - \hat{v}_{f,k}) - (v_k - \hat{v}_{b,k}^-) \\ & = v_{e,f,k} - v_{e,b,k} \end{aligned} \quad (22)$$

z_s 를 다음과 같이 정의하면

$$z_s = \begin{bmatrix} \hat{q}_b^- - \hat{q}_f \\ \hat{r}_{b,k}^- - \hat{r}_{f,k} \\ \hat{v}_{b,k}^- - \hat{v}_{f,k} \end{bmatrix},$$

식 (20)-(22)에서 다음 식이 주어진다.

$$z_s = Hx_f + Jx_b \quad (23)$$

여기서 H 와 J 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} H &= \begin{bmatrix} (\hat{q}_{f,0}I + [\hat{q}_f \times]) & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \in R^{9 \times 9} \\ J &= \begin{bmatrix} -(\hat{q}_{b,0}I + [\hat{q}_b^- \times]) & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & -I \end{bmatrix} \in R^{9 \times 9}. \end{aligned}$$

전방향 필터에서 추정된 $\hat{x}_{f,k}$ 는 이미 $\hat{q}_{f,k}$, $\hat{r}_{f,k}$, $\hat{v}_{f,k}$ 에 반영된 후 $\hat{x}_{f,k} = 0$ 으로 되어 있다. 식 (23)에서 $x_{f,k}$ 는 영평균이고, 공분산이 $P_{f,k}$ 의 가우시안 분포를 가지는 확률변수(random variable)로 생각할 수 있다. 마찬가지로 $x_{b,k}$ 도 영평균이고, 공분산이 $P_{b,k}^-$ 인 확률변수로 생각할 수 있다. 본 논문에서는 식 (13)을 칼만필터의 측정식처럼 이용해 다시 한번 $x_{f,k}$ 를 추정한다. 영속도 구간일 때에는 식 (13)에서 한 번 측정 업데이트를 행하고, (23)를 이용해 다시 한 번 측정 업데이트를 행하는 것과 같다. 영속도 구간이 아닐 때에는 (13)에 의한 업데이트는 없으므로, (23)만을 측정 업데이트에 이용한다. 이 때 Jx_b 는 측정 잡음으로 취급된다. 전방향 추정의 x, y 위치 추정값의 최종값을 역방향 추정값의 x, y 위치 추정값의 초기치로 사용하여, 엄밀하게는 Jx_b 와 Hx_f 와 비상관관계에 있지 않다. 측정 업데이트에서는 상관관계를 무시하고 계산을 하였다.

식 (23)를 이용한 측정 업데이트는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} K_{s,k} &= P_{f,k}H(HP_{f,k}H + JP_{b,k}^-J)^{-1} \\ \hat{x}_{f,k} &= K_{s,k}z_{s,k} \end{aligned} \quad (24)$$

(24)에서 구한 $\hat{x}_{f,k}$ 를 $\hat{q}_{f,k}$, $\hat{r}_{f,k}$, $\hat{v}_{f,k}$ 에 반영한 값이 $\hat{q}_{s,k}$, $\hat{r}_{s,k}$, $\hat{v}_{s,k}$ 이다.

VI. 실험

제한한 평활기의 성능을 테스트하기 위하여 두가지 실험을 하였다. 첫 번째 실험에서는 화이트보드에 반경 0.36 m의 반원을 그리고, 관성센서를 반원을 따라서 움직였다. 그림 4에서 평활기에 의해서 추정된 궤적과 전방향 필터에 의해서 추정된 궤적이 표시되어 있다. 비교를 위해서 반경 0.36 m의 반원(참값)이 함께 표시되어 있는데, 시작점의 초기 위치는 0이다 (즉, $r_n = 0$). 전방향필터의 경우 시간이 지남에 따라 오차가 누적되어 감을 볼 수 있다. 또한 최종

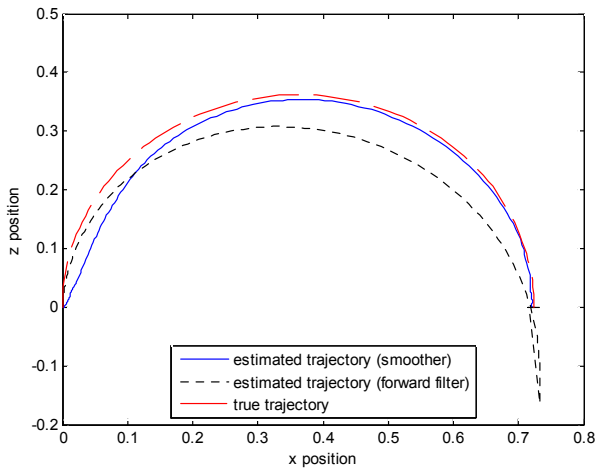


그림 4. 관성센서의 반원 궤적 움직임.
Fig. 4. Half circle trajectory movement of an inertial sensor unit.

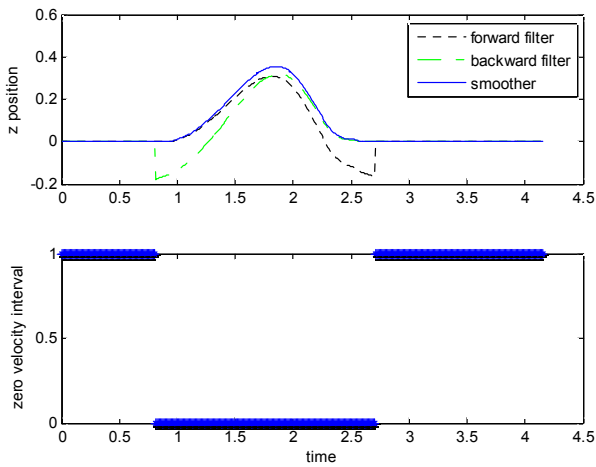


그림 5. 관성센서의 반원 궤적 움직임.
Fig. 5. Half circle trajectory movement of an inertial sensor unit.

위치에서 오차가 갑자기 줄어드는 것을 볼 수 있는데, 이는 최종 위치에서의 영속도 보정을 통해서 오차가 줄어 든 것이다.

전방향 필터, 역방향 필터, 평활기의 비교를 위해 각각의 방법에 의한 z 축 위치 추정값을 그림 5에 표시하였다. 그림 4의 그래프와는 다르게 그래프의 x 축이 시간을 나타내고 있다. 그림 5의 하단의 그림은 영속도 구간 추정을 나타내고 있다. 값이 1인 구간은 영속도 구간을 나타내고, 0인 구간은 영속도 구간이 아님을 나타낸다. 평활기의 추정값이 거의 참값과 동일하다고 보면, 전방향 필터의 추정값은 시간이 지남에 따라 오차가 점점 커짐을 알 수 있다. 역방향 필터의 추정값은 2.7초에서 시간의 역방향으로 계산해 나가는데, 오차가 점점 커짐을 알 수 있다. 따라서, 평활기를 사용함으로써 전체적인 추정오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

두 번째 실험에서는 발의 움직임을 추정할 수 있는지 테스트하기 위하여, 50 m의 직선 보행을 실시하였다. 그림 6에서 제안한 평활기에 의한 x, y, z 축 위치 추정값이 주어

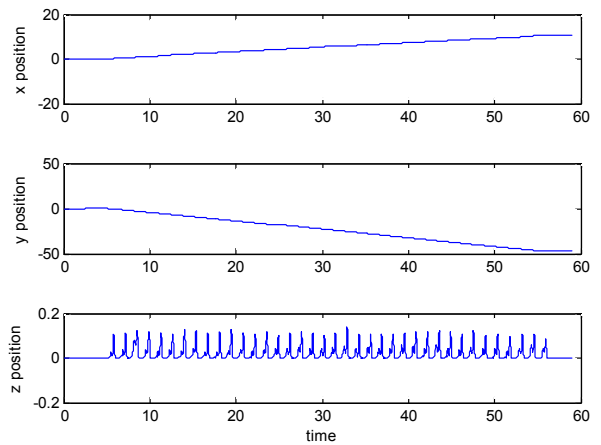


그림 6. 50 m 보행시 위치 추정값.
Fig. 6. Estimated position (50 m walking).

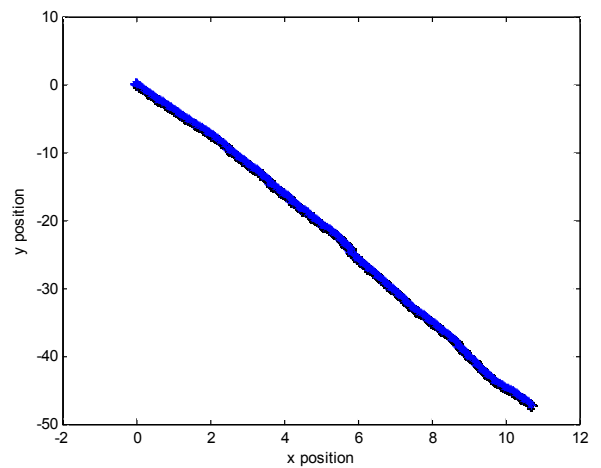


그림 7. 50 m 보행시 x, y 위치 추정값.
Fig. 7. Estimated x, y position (50 m walking).

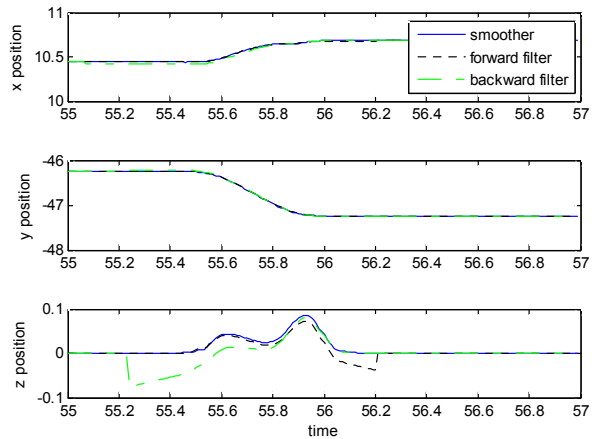


그림 8. 위치 추정값 (55초에서 57초 사이).
Fig. 8. Estimated position (between 55 and 57 seconds).

져 있다. 그림 7에서는 x, y 위치값을 평면에 표시하였다. 그림 7에서 평면상에서 추정된 거리는 48.5 m로 50 m 보행시 약 1.5 m (3%)오차가 있음을 알 수 있다.

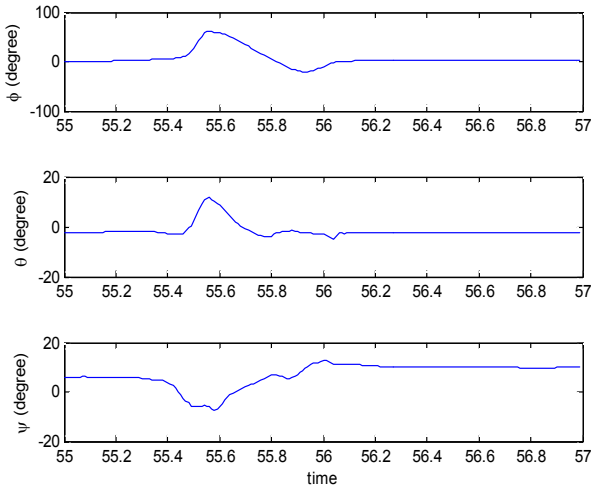


그림 9. 발의 Euler 각도.

Fig. 9. Foot Euler angle.

그림 8에서는 그림 6의 위치 추정값을 자세히 보기 위하여, 55초와 57초 사이의 값만을 따로 표시하였다. 비교를 위해서 전방향 필터와 역방향 필터에 의한 추정값도 같이 표시하였다. 55.4초에서 56.2초 사이가 발이 움직이는 구간임을 알 수 있다. 55.4초 바로 이전과 56.2초 이후는 발이 땅에 닿아 있는 영속도 구간이다. 첫 번째 실험과 마찬가지로, 전방향 필터의 오차는 시간이 지남 (55.4초에서 56.2초로 감에 따라)에 따라 점점 커짐을 알 수 있다. 역방향 필터도 시간이 56.2초에서 55.4초로 감에 따라 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 평활기를 사용함으로써 보다 정확한 발의 움직임의 추정이 가능함을 알 수 있다.

그림 9에서는 발의 자세값을 Euler 각도로 표시하였다. 제안하는 알고리즘에서 자세값은 쿼터니언으로 표시되는데, 이를 Euler 각도로 변환하여 표시한 것이다.

VII. 결론

본 논문에서는 발의 움직임을 추정하기 위한 평활기를 제안하였다. 보행 시 발은 거의 주기적으로 땅에 닿고, 이때 발의 속도가 0이 되고 이 구간을 영속도구간이라고 한다. 발이 움직이는 구간은 두 개의 영속도 구간 사이에 존재하게 된다. 전방향 필터는 앞 부분의 영속도 구간에서 시작하여 자세, 속도, 위치를 추정하고, 역방향 필터에서는 뒷 부분의 영속도 구간에서 시작하여 자세, 속도, 위치를 추정하였다. 평활기에서는 이 두 추정값을 결합하여 보다 정확한 발의 움직임을 계산할 수 있음을 실험을 통하여 보였다. 제안하는 알고리즘은 의료용 또는 스포츠 분석 등의 용도로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] M. W. Whittle, *Gait Analysis: An Introduction*, Elsevier, New York, 2008.
 [2] D. T. Nhut and Y. S. Suh, "Gait analysis system using infrared LED landmarks," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 7, pp.

641-646, 2011.
 [3] D. H. Titterton and J. Weston, *Strapdown Inertial Navigation Technology*, AIAA, 2005.
 [4] A. M. Sabatini et al, "Assessment of walking features from foot inertial sensing," *IEEE Tran. on Biomedical Engineering*, vol. 52, no. 3, pp. 486-494, 2005.
 [5] A. M. Sabatini, "Quaternion based attitude estimation algorithm applied to signals from body-mounted gyroscopes," *Electronics Letters*, vol. 40, no. 10, pp. 584-586, 2004.
 [6] L. Ojeda and J. Borenstein, "Personal dead-reckoning system for GPS-denied environments," *Proc. of IEEE International Workshop on Safety, Security and Rescue Robotics*, pp. 1-6, 2007.
 [7] E. Foxlin, "Pedestrian tracking with shoe-mounted inertial sensors," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, no. 6, pp. 38-46, 2005.
 [8] R. G. Brown and P. Y. C. Hwang, *Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering*, John Wiley & Sons, 1997.
 [9] Y. S. Suh, T. N. Do, Y. S. Ro, and H. J. Kang, "A smoother for attitude estimation using inertial and magnetic sensors," in *Proc. of 2010 IEEE Sensors*, pp. 743-746, 2010.
 [10] S. I. Roumeliotis, G. S. Sukhatme, and G. A. Bekey, "Smoother based 3D attitude estimation for mobile robot localization," in *Proc. of the 1999 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, vol. 3, pp. 1979-1986, 1999.
 [11] Y. S. Suh, "A smoother for attitude and position estimation using inertial sensors with zero velocity intervals," *IEEE Sensors Journal*, to appear.
 [12] J. B. Kuipers, *Quaternions and Rotation Sequences: A Primer With Applications to Orbits, Aerospace, and Virtual Reality*, Princeton Univ. Press, 1999.
 [13] S. P. Won and F. Golnaraghi, "A triaxial accelerometer calibration method using a mathematical model," *IEEE Tr. on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 8, pp. 2144-2153, 2010.
 [14] O. Woodman, "Pedestrian localisation for indoor environments," Ph.D. thesis, University of Cambridge, Computer Laboratory, Sep. 2010.
 [15] M. D. Shuster and S. D. Oh, "Three-axis attitude determination from vector observations," *Journal of Guidance and Control*, vol. 4, no. 1, pp. 70-77, 1981.
 [16] F. L. Markley, "Multiplicative vs. additive filtering for spacecraft attitude determination," 6th Cranfield Conference on Dynamics and Control of Systems and Structures in Space, Cranfield, Bedford, UK, pp. 467-474, 2004.

- [17] Y. S. Suh, "Orientation estimation using a quaternion-based indirect Kalman filter with adaptive estimation of external acceleration," *IEEE Tran. on Instrumentation and Measurement*, vol. 59, no. 12, pp. 3296-3304, 2010.
- [18] O. Shin and C. G. Park, "Pose estimation of ground test bed using ceiling landmark and optical flow based on single Camera/IMU Fusion," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 1, pp. 54-61, 2012.



서영수

1990년 서울대학교 제어계측과 졸업.
1992년 동 대학원 석사. 1997년 동경대학교 공학박사. 2000년~현재 울산대학교 전기공학부 교수. 관심분야는 모션트래킹 및 네트워크기반 제어시스템.



지영준

1991년 서울대학교 제어계측과 졸업.
1993년 서울대학교 의용생체공학 석사.
2005년 동 대학원 박사. 2009년~현재 울산대학교 전기공학부 조교수. 관심분야는 생체신호 측정 및 분석.