

역동적 스포츠 분야 응용을 위한 IMU 기반 관절각 추정에서의 표류 오차 감소

Drift Reduction in IMU-based Joint Angle Estimation for Dynamic Motion-Involved Sports Applications

이정근^{1,#}, 이창준¹

Jung Keun Lee^{1,#} and Chang June Lee¹

¹ 국립한경대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hankyong National University)
Corresponding Author / E-mail: jkleee@hknu.ac.kr, Tel: +82-31-670-5112
ORCID: 0000-0003-0288-157X

KEYWORDS: Drift reduction (표류오차 감소), IMU (관성 측정 장치), Joint angle estimation (관절각 추정), Dynamic motion-involved sports (역동적 스포츠), Joint constraint (관절 구속 조건), Complementary filter (상보 필터)

In the case of dynamic sports activities such as skiing and sprints, it is difficult to apply optical motion capture systems because of measurement volume limitation. Alternatively, the use of inertial measurement unit (IMU) as a motion sensor has gained attention. This paper proposes a drift reduction method in the IMU-based joint angle estimation for dynamic motion-involved sports applications. To resolve the problem of conventional IMU-based methods significantly reducing performance under highly dynamic conditions, the proposed method applies a correction method using joint constraint. The proposed method is the complementary filter based on the previous drift reduction technique using the joint constraint, but performs in real time. The proposed method was validated by comparing the estimation accuracy with conventional methods under various dynamic conditions. The results showed that the proposed method was superior to the methods that did not use the constraint. While the proposed method was 0.19° less accurate than the non-realtime method of the reference, it is more practical due to its realtime correction capability.

Manuscript received: October 17, 2019 / Revised: April 2, 2020 / Accepted: April 17, 2020

1. 서론

스포츠, 재활, 생체역학 등의 다양한 분야에서 신체 분절 간의 관절각 추정이 요구된다. 관절각 추정에 있어 일반적으로 사용되는 계측장비는 광학식 모션 캡처 시스템이다.¹⁻³ 예를 들어, 다수의 마커를 국제 생체역학회 ISB의 추천^{4,5}에 따라 신체 분절의 지정 위치에 부착하고 인접한 신체 분절 간의 상대 자세를 계산함으로써 관절각을 추정할 수 있다.⁶ 이러한 광학식 모션 캡처 시스템은 매우 높은 정밀도를 보장하지만, 카메라가 포착 가능한 공간에서만 제한적으로 사용 가능하다는 단점을 지닌다.

웨어러블 센서 기술의 발달과 함께, 공간의 제약은 받으면 안되는 다양한 인간동작 분석 분야에 있어 IMU (Inertial Measurement

Unit)의 사용이 활발히 이루어지고 있다.⁷⁻¹⁰ 특히, 스키나 육상과 같은 야외 스포츠 분야의 경우 광학식 모션 캡처 시스템의 적용이 불가하므로, 모션 센서로서의 IMU 활용이 각광받고 있다.^{11,12}

IMU 기반 관절각 추정에 있어서 일반적인 방법은 인접한 두 개의 신체 분절에 부착된 IMU를 통해 분절 각각의 자세를 추정하고, 이 두 자세를 이용하여 상대 자세를 구하는 방식이다. 하지만 IMU를 구성하는 자이로스코프와 가속도계는 각각 각속도와 가속도를 추정할 뿐, 직접적으로 자세 정보를 제공하지 않으므로 칼만 필터나 상보 필터(Complementary Filter)와 같은 다양한 방식의 센서 신호 융합 알고리즘이 제안되어 왔다.¹³⁻¹⁷

IMU 기반 자세 추정의 기본개념은 다음과 같다. 우선 자이로

스코프 신호를 적분하여 자세를 예측한다.^{18,19} 이때 적분 과정에 동반되는 누적 표류오차(Drift)를 보정하기 위하여 가속도계 신호가 포함하는 중력가속도 성분을 이용하여 자세의 수직 방향 성분을 보정한다. 이에 더하여 수평 방향 성분을 보정하기 위해서는 자기장 벡터를 감지하는 지자기센서가 추가되게 된다.²⁰⁻²² 하지만 동적 조건에서 가속도계 신호는 외부가속도와 중력가속도의 합이며 이 둘을 분리할 수 없다. 따라서 가속 조건에서는 외부가속도로 인해 보정에 필요한 중력가속도를 신뢰성 있게 확보하지 못하며, 이에 따라 자세 추정 성능이 크게 감소하게 된다.¹⁴

본 논문이 다루는 관절각의 경우에는 관절 자체가 갖는 구속 조건이 활용될 수 있으며, 이에 대한 연구가 다음과 같이 진행된 바 있다. Favre 등²³은 동일한 고정 좌표계에서의 관절각 추정을 위해 특정 동작을 취하게 함으로써 두 센서의 고정 좌표계를 정렬하는 기법을 제안하였다. Jakob 등²⁴은 보행 중 무릎의 굴곡각 추정을 위해 IMU 기반 자세 추정 확장형 칼만 필터에 좌표계 정렬 기법을 적용하였다. Luinge 등²⁵은 위팔에 대한 아래팔의 상대적인 자세 추정을 위해서 팔꿈치에 의해 회전하는 팔의 구속 조건을 이용하였고, Cooper 등²⁶과 Seel 등²⁷은 무릎을 경첩 관절(Hinge Joint)로 단순화하여 관절이 가지는 회전축에 대한 각도를 추정하였다. El-Gohary와 McNames²⁸는 어깨와 팔꿈치의 각도를 추정하기 위해 인간의 팔을 로봇의 팔과 같이 모델링하였으며, Alonge 등²⁹은 엉덩이와 무릎의 각도의 추정에 다리의 기구학 모델을 기반하는 가속도 전파 방법과 상보 필터를 사용하였다. 상기의 방법들은 구속 조건 결합을 통해 추정 성능의 향상을 이루었으나, 고속의 동적 조건에서는 여전히 추정 성능이 저하되는 한계점을 가지고 있다.

Fasel 등⁶은 빠른 동적 조건을 가지는 알파인 스키에서 표류오차를 감소시키기 위해 관절의 기구학적 구속 조건을 이용하는 IMU 기반의 표류오차 감소법을 제안하였다. 관절각에서 상대적인 표류오차를 감소시키기 위해, 한 링크의 자세는 예측을 통해 구한 후, 구속 조건식으로부터 보정 쿼터니언을 추정하여 다른 한 링크의 자세만을 보정하는 방식이다. 이 과정에서 Ref. 6에서 적용하고 있는 보정 방법은 불안정하지만, 가용한 정보로 적용 가능한 방법이라는 점에서 매우 흥미롭다. 두 좌표계를 일치시키는 자세를 찾기 위해서는 좌표계마다 최소 두 개 이상의 벡터 관측이 요구된다. 이는 좌표계를 정의하기 위하여 두 개 이상의 벡터가 필요한 것과 마찬가지로 이유이다. 하지만 Ref. 6에서는 관절 구속 조건을 구성하는 관절 중심 가속도라는 한 개의 벡터만을 활용하여 3차원 자세를 성공적으로 보정하고 있다. Ref. 6의 참신한 보정개념과 우수한 성능에도 불구하고, 그 방법은 후처리(Post Processing) 과정을 적용하여 표류오차를 감소시키는 비실시간(Non-Real-Time) 알고리즘으로 실시간 적용이 불가능하다는 한계점을 가진다. 이는 웨어러블 센서인 IMU는 시공간의 제약 없는 동작 추정을 가능케 한다는 특징을 고려한다면, 큰 단점이라 할 것이다. 예를 들어 트레이닝 과정에서 운동

선수의 동작에 대한 실시간 피드백은 당연히 실시간 동작 추정을 전제로 한다.

본 논문은 역동적인 움직임이 많은 스포츠 분야에서의 적용을 위해 역동적 조건에서도 효과적으로 표류오차를 감소시키는 IMU 기반 관절각 추정 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 Ref. 6의 표류오차 감소법을 기반으로 하되, 높은 정확도의 보정을 위해 기존 방법에서 적용되었던 후처리 과정을 사용하는 대신 예측값과 보정값을 융합하는 상보 필터를 적용하여 실시간으로 표류오차의 보정이 이루어지도록 한다. 제안된 관절각 추정 방법은 다양한 동적 조건에서 기존 방법들과의 추정 성능 비교를 통해 검증하였다.

2. 표류오차 보정 상보 필터

2.1 쿼터니언과 스트랩다운 적분 예측

고정 관성 좌표계(Inertial Reference Frame, I)에서 바라본 센서 좌표계(Sensor Frame, S)의 자세는 쿼터니언의 형태로 다음 식(1)과 같이 표현 가능하다.

$$\mathbf{q}_s = [q_0 \quad \mathbf{e}^T]^T \quad (1)$$

여기서, q_0 는 쿼터니언의 스칼라 부분을, $\mathbf{e} = [q_1 \quad q_2 \quad q_3]^T$ 는 벡터 부분을 의미한다. 본 논문은 구면 관절(Spherical Joint)로 연결된 두 링크 사이의 관절각 추정을 주제로 한다. 이때, 공통 관성 좌표계에서 관찰된 두 링크(즉, i 와 j 링크)의 자세를 각각 \mathbf{q}_i 와 \mathbf{q}_j 라고 하면, 두 링크의 상대적인 자세, 즉 관절각은 다음 식(2)와 같다.

$$\mathbf{q}_{ij} = \mathbf{q}_i^* \otimes \mathbf{q}_j \quad (2)$$

여기서 \otimes 는 쿼터니언의 곱셈 연산자(Product Operator)이며, 위첨자 *는 해당 쿼터니언의 쥘레(Conjugate)이다.

3×1 벡터 $[x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$ 를 쿼터니언의 형태로 $\mathbf{x} = [0 \quad x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T$ 와 같이 나타낼 때, \mathbf{x} 의 관찰 좌표계를 센서 좌표계 S 에서 관성 좌표계 I 로 변환하는 식은 다음 식(3)과 같이 표현 가능하다.

$${}^I\mathbf{x} = \mathbf{q}_s \otimes {}^S\mathbf{x} \otimes \mathbf{q}_s^* \quad (3)$$

강체의 회전운동은 강체 각속도 $\boldsymbol{\omega} = [\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]^T$ 를 이용한 다음 식(4)의 쿼터니언 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\mathbf{q}_s(t) = \boldsymbol{\Omega}[\boldsymbol{\omega}(t)]\mathbf{q}_s(t) \quad (4)$$

여기서

$$\boldsymbol{\Omega}[\boldsymbol{\omega}] = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\boldsymbol{\omega}^T \\ \boldsymbol{\omega} & -[\boldsymbol{\omega} \times] \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(5)에서 $[\boldsymbol{\omega} \times]$ 는 벡터 $\boldsymbol{\omega}$ 의 외적 행렬(Product Matrix)로 다음 식(6)과 같이 정의된다.

$$[\boldsymbol{\omega} \times] = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(4)를 통해, 자세 쿼터니언의 이산시간(Discrete-Time)에 대한 스트랩다운(Strapdown) 적분식은 다음 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{q}_{S,t} = \exp(\Omega[\boldsymbol{\omega}_{t-1}]\Delta t) \mathbf{q}_{S,t-1} \quad (7)$$

여기서 $\mathbf{q}_{S,t}$ 는 이산시간 t 에서의 자세 쿼터니언을, Δt 는 샘플링 간격 시간을 의미한다.

식(7)의 구현에 있어 각속도 $\boldsymbol{\omega}$ 는 자이로스코프 신호를 사용하였다. 이때 자이로스코프 신호는 각속도에 더하여 잡음 오차 등을 포함하고 있으므로, 식(7)을 통해 구한 $\mathbf{q}_{S,t}$ 에는 적분에 따른 표류오차가 발생한다. 이러한 표류오차를 포함한 자세 쿼터니언을 예측(Predicted) 쿼터니언 $q_{S,t}$ 로 정의한다.

2.2 기구학적 구속 조건을 이용한 표류오차 보정

본 논문은 관절각 추정에서 두 링크 간에 상대적인 표류오차를 감소시키기 위해 구면 관절의 기구학적 구속 조건을 이용한다. 구면 관절로 연결된 두 링크에 있어, i 링크로부터 그리고 j 링크로부터 계산된 관절 중심에서의 가속도 \mathbf{f}_i 와 \mathbf{f}_j 는 각각 식(8)과 식(9)와 같다.⁶

$$\mathbf{f}_i = \mathbf{a}_i + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i \times \mathbf{p}_i + \boldsymbol{\omega}_i \times (\boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{p}_i) \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_j = \mathbf{a}_j + \dot{\boldsymbol{\omega}}_j \times \mathbf{p}_j + \boldsymbol{\omega}_j \times (\boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{p}_j) \quad (9)$$

여기서, 예를 들어 \mathbf{a}_i 는 센서 부착 위치에서의 가속도이며, $\dot{\boldsymbol{\omega}}_i$ 는 자이로스코프 신호값의 수치 미분을 통해 구한 각가속도이다. 또한, \mathbf{p}_i 는 센서에서 관절 중심까지의 위치 벡터로서 Ref. 31에 소개된 캘리브레이션 과정을 통해 미리 결정된다.³¹ 이때, \mathbf{f}_i 와 \mathbf{f}_j 는 모두 자신의 좌표계에서 관찰되어진 채 구해지며 즉, \mathbf{f}_i 와 \mathbf{f}_j 이다. 관절 중심의 가속도 \mathbf{f}_i 와 \mathbf{f}_j 는 관성 좌표계에서 관찰된다면 동일하므로, 식(3)을 적용하여 다음 식(10)과 같은 구속 조건식을 도출할 수 있다.

$$\mathbf{q}_i \otimes \mathbf{f}_i \otimes \mathbf{q}_i^* = \mathbf{q}_j \otimes \mathbf{f}_j \otimes \mathbf{q}_j^* \quad (10)$$

식(10)의 구현에 있어, 식(8)과 식(9)의 외부가속도 \mathbf{a} 는 가속도계 신호를 사용한다. 가속도계 신호는 외부가속도와 중력가속도를 모두 포함하고 있지만, 양변에 동일하게 적용된 채 관성 좌표계에서 관찰되면 동일한 중력이 양변에 더해진 셈이 되므로 등식이 성립한다.

본 논문은 \mathbf{q}_i 와 \mathbf{q}_j 각각이 아닌, 관절각, 즉 상대 자세 $\mathbf{q}_{ij} (= \mathbf{q}_i^* \otimes \mathbf{q}_j)$ 를 추정하는 것이다. 따라서, \mathbf{q}_i 는 예측값인 $\tilde{\mathbf{q}}_i$ 로 확정시킨 후, 이에 맞는 \mathbf{q}_j 를 구함으로써 관절각을 추정한다. 구속 조건 식(10)을 만족하는 \mathbf{q}_j 를 구하기 위하여, 우선 예측 자세에

의해 좌표 변환된 관절 중심 가속도를 다음 식(11)과 같이 설정한다.

$$\tilde{\mathbf{f}}_S = \mathbf{q}_S^- \otimes {}^S \mathbf{f}_S \otimes (\mathbf{q}_S^-)^* \quad (11)$$

식(10)의 구속 조건을 만족시키기 위해 두 가속도 $\tilde{\mathbf{f}}_i$ 와 $\tilde{\mathbf{f}}_j$ 의 방향을 일치시키는 보정 쿼터니언 $\boldsymbol{\delta}$ 는 다음 식(12)와 같다.⁶

$$\boldsymbol{\delta} = \left[\cos\left(\frac{\beta}{2}\right), \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \mathbf{u}^T \right]^T \quad (12)$$

여기서 보정 쿼터니언 $\boldsymbol{\delta}$ 의 회전각 β 와 축 \mathbf{u} 는 각각 식(13)과 식(14)와 같다.

$$\beta = \text{acos}\left(\frac{\tilde{\mathbf{f}}_i \cdot \tilde{\mathbf{f}}_j}{|\tilde{\mathbf{f}}_i| \cdot |\tilde{\mathbf{f}}_j|}\right) \quad (13)$$

$$\mathbf{u} = \frac{\tilde{\mathbf{f}}_j \times \tilde{\mathbf{f}}_i}{|\tilde{\mathbf{f}}_j \times \tilde{\mathbf{f}}_i|} \quad (14)$$

식(12)의 보정 쿼터니언을 이용하여, 표류오차가 감소된 j 링크의 자세 쿼터니언 $\hat{\mathbf{q}}_j$ 은 다음 식(15)와 같이 표현된다.⁶

$$\hat{\mathbf{q}}_j = \boldsymbol{\delta} \otimes \mathbf{q}_j^- \quad (15)$$

여기서 $\hat{\mathbf{q}}_j$ 는 구속 조건식을 이용하여 두 링크로부터 각각 구한 관절 중심 가속도벡터를 일치시키는 쿼터니언을 추정한 것이지, 각 링크에 포함된 표류오차를 감소시키는 것은 아니라는 점을 주의해야 한다. 앞서 언급한 바와 같이, 제안 방법은 구속 조건을 만족시킴으로써 두 링크의 상대적인 표류오차를 감소시키는 것이다.

2.3 쿼터니언 상보 필터

식(10)과 식(15)를 통해 구속 조건을 만족하도록 보정 과정을 거치지만, 보정된 쿼터니언 $\hat{\mathbf{q}}_j$ 역시 다음과 같은 부정확의 요인을 지니고 있다. 식(8)과 식(9)를 통해 구해진 \mathbf{f}_i 와 \mathbf{f}_j 는 1) \mathbf{a} 와 $\boldsymbol{\omega}$ 에 관련된 가속도계와 자이로스코프 신호의 정확성, 2) $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ 와 관련된 수치 미분에 의한 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio) 감소, 3) \mathbf{p} 와 관련된 캘리브레이션의 정확성 등에 민감하다. 그리고 무엇보다도 관절 중심의 가속도가 크지 않은 경우, $\tilde{\mathbf{f}}_i$ 와 $\tilde{\mathbf{f}}_j$ 의 방향을 일치시키는 보정 방법은 큰 오차를 발생시킬 수 있다.

제안 방법은 이러한 부정확성의 문제를 보완하기 위해서, 상보 필터를 사용하여 예측된 자세와 표류오차를 감소시킨 자세를 조합함으로써 최적의 자세를 추정한다. 상보 필터를 통해 보정된 j 링크의 자세 쿼터니언 $\mathbf{q}_{j,t}^+$ 는 다음 식(16)과 같다.

$$\mathbf{q}_{j,t}^+ = \mu \hat{\mathbf{q}}_{j,t} + (1 - \mu) \mathbf{q}_{j,t}^- \quad (0 \leq \mu \leq 1) \quad (16)$$

여기서, μ 는 가중 계수이다.

두 링크의 최종적 자세 \mathbf{q}_i^- 와 \mathbf{q}_j^+ 가 추정된 후에 식(2)를 이용하여 두 링크의 상대적인 자세 \mathbf{q}_{ij}^+ 를 다음 식(17)과 같이 구할 수 있다.

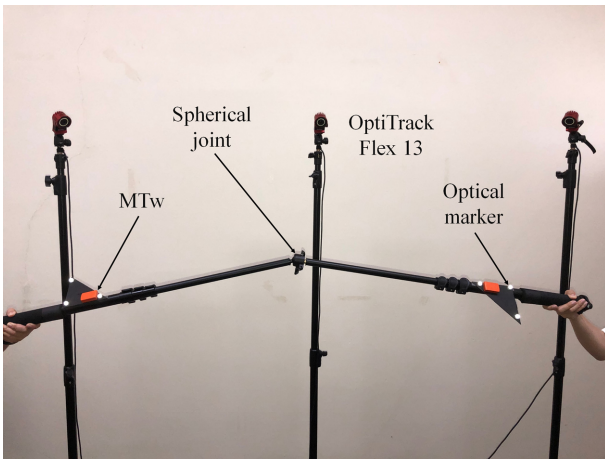


Fig. 1 Experimental setup

$$\mathbf{q}_{ij}^+ = (\mathbf{q}_i^-)^* \otimes \mathbf{q}_j^+ \quad (17)$$

3. 제안 방법 검증 및 고찰

3.1 검증 실험

제안하는 표류오차 감소 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 6축 IMU와 3축 지자기센서를 포함하는 9축 IMMU (Inertial and Magnetic Measurement Unit)인 MTw (Xsens Technologies B.V.)가 사용되었다. 뚜렷한 표류오차의 감소 효과를 확인하기 위해 자이로스코프 신호는 편향(Bias)오차를 포함한 상태에서 사용되었다. 성능 검증에 필요한 참조값(Truth Reference)은 OptiTrack Flex13(Natural Point) 광학식 모션 캡처 시스템을 통해 얻었으며 MTw와 Flex 13의 샘플링 주기는 100 Hz로 설정하였다. 관절각 추정을 위해 구면 관절로 연결된 2-링크 시스템으로 두 개의 모노포드(FX-3460A, Horusbenu)가 사용되었으며, 각 링크에 고정된 삼각자에 MTw와 광학식 모션 캡처를 위한 세 개의 마커를 부착하였다(Fig. 1 참조). i 와 j 링크에 부착된 두 개의 센서에서 구면 관절의 중심을 향하는 위치 벡터는 각각 $\mathbf{p}_i = [51.8 \ 1.7 \ -2.2]^T \text{ cm}$, $\mathbf{p}_j = [53.9 \ 1.5 \ -2.4]^T \text{ cm}$ 였다. 식 (12)에서의 μ 는 적합한 추정 결과를 보이는 0.1로 설정하였다.

실험은 다양한 관절각이 나타나도록 Fig. 1에서와 같이 양쪽에서 각 링크의 말단을 손으로 잡고 다양한 방향으로 회전시키며 진행되었다. 제안 방법은 상대 표류오차를 감소시키기 위해 기구학적 구속 조건을 사용하므로, Tests 1-3은 동적 조건에 따른 추정 성능의 검증을 위해 각각 다른 가속도에서 진행되었다(Table 1 참조). 검증 실험에서의 최대 평균 가속도는 3.88 m/s^2 로, 유명 육상선수인 우사인 볼트의 경우 최대 가속도가 3.09 m/s^2 인 점을 고려하였을 때 대부분의 역동적 스포츠 동작에 대해서도 적용 가능한 것으로 판단된다.³⁰ Test 4는 지자기센서를 사용하는 알고리즘과 비교하기 위하여 실험 중에 주기적인 자기교란을 주었으며 평균 외부가속도 2 m/s^2 로 진행되었다. Test 5는 동적 조건이 변화할 때 제안 알고리즘의 추정 성능을 확인하기

Table 1 Averaged external acceleration (unit: m/s^2)

	Test 1	Test 2	Test 3
Acceleration	0.56	2.57	3.88

Table 2 RMSEs of joint angle estimation (unit: $^\circ$)

		Roll	Pitch	Yaw	Average
Test 1	Method 1	11.91	6.50	32.85	17.09
	Method 2	0.84	1.35	5.41	2.53
	Method 3	0.82	1.18	6.03	2.68
	Proposed	1.40	2.35	9.19	4.31
Test 2	Method 1	12.33	11.55	35.97	19.95
	Method 2	1.00	1.77	6.52	3.10
	Method 3	0.40	0.60	2.27	1.09
	Proposed	1.09	1.10	1.42	1.20
Test 3	Method 1	10.79	7.50	50.20	22.83
	Method 2	1.49	2.27	9.01	4.26
	Method 3	1.24	0.78	2.51	1.51
	Proposed	2.14	1.22	1.76	1.71
Test 4	Method 2	1.93	3.34	8.32	4.53
	Proposed	1.41	0.85	1.52	1.26
Test 5	w/o CF	3.01	4.25	11.37	6.21
	with CF	1.59	1.91	8.50	4.00

위해 3분의 동적 조건과 1분의 정적 조건으로 실험을 진행하였으며 동적 조건에서 중간의 1분은 평균 외부 가속도가 0.62 m/s^2 인 저속 조건을, 나머지 2분은 2.93 m/s^2 인 고속 조건을 유지하였다. Tests 1-4는 180초 동안 진행되었고, Test 5는 240초 동안 진행되었다.

제안 방법의 성능은 기존의 세 가지 방법들과 추정 오차를 비교함으로써 검증되었다. Method 1은 식(7)의 스트랩다운 적분으로 예측된 두 링크의 자세를 이용하여 식(2)를 통해 관절각을 구하는 방법이다. Method 2는 함수 최적화 방법 중 하나인 경사 하강법(Gradient Descent)을 이용하여 자세를 추정한 후에 상보 필터를 적용하여 예측된 자세와 추정된 자세를 조합하는 IMMU 기반의 자세 추정 방법이다.²⁰ Method 3은 제안 알고리즘의 기반이 되는 Ref. 6의 표류오차 감소법으로 관절 구속 조건을 이용하여 두 링크 사이의 상대 표류오차를 보정하는 비실시간 알고리즘이다. 표류오차 감소를 위한 후처리 과정으로 두 링크의 자세 추정 과정에서의 고정 좌표계의 수직 방향 성분에 대한 보정과 보정 쿼터니언의 평균화 및 보간 등의 과정이 포함된다. Method 2의 파라미터 β 는 해당 논문에서 사용된 0.033으로 설정되었다.²⁰

3.2 검증 결과 및 고찰

추정 결과의 성능 검증을 위해, 관절각을 의미하는 식(17)의 상대적인 자세 쿼터니언 \mathbf{q}_{ij}^+ 로부터 Z-Y-X 오일러각들인 롤(Roll),

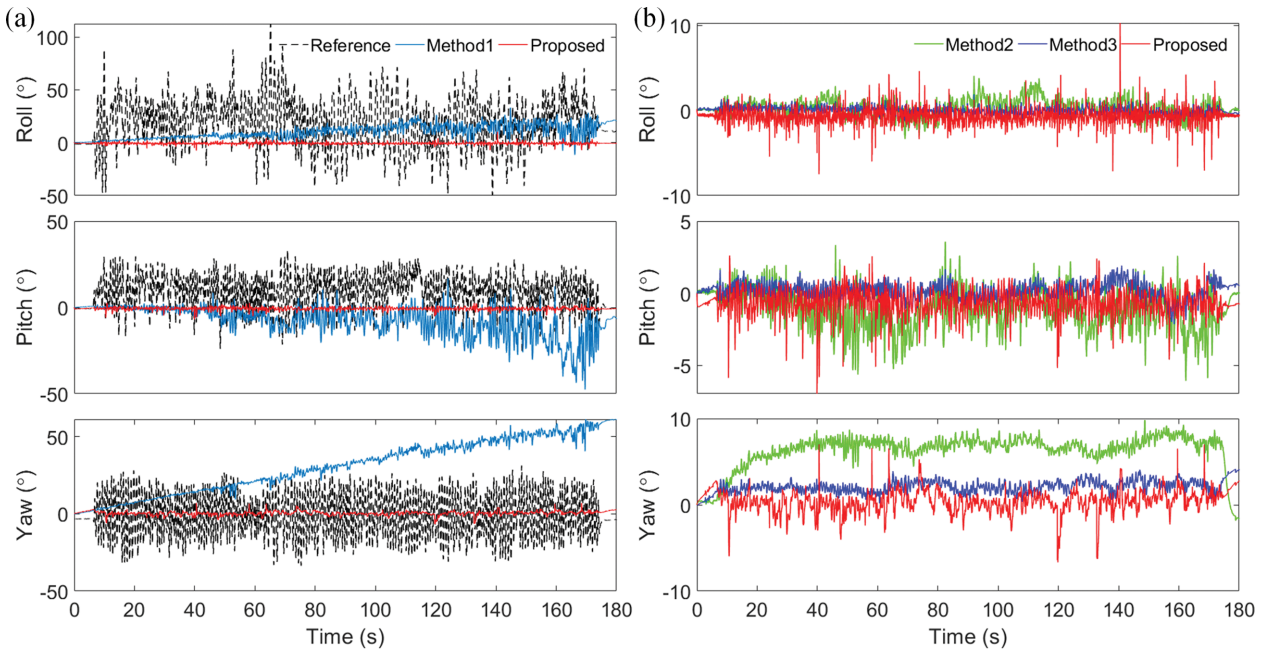


Fig. 2 Results of Test 1: (a) Estimation errors of Method 1(Blue) and the proposed method (Red) with respect to the reference (Black dashed) and (b) Estimation errors of Method 2(Green), Method 3(Blue) and the proposed method (Red)

피치(Pitch), 요(Yaw)를 추출하였다. 이들의 참조값과의 오차를 RMSE (Root Mean Squared Error)로 분석하였는데, Table 2는 Tests 1-5의 결과이다. 한편, Fig. 2는 Test 2에 대한 각 비교 방법의 추정 결과이다.

저속 조건의 Test 1에서 IMMU 기반의 Method 2가 가장 우수한 추정 성능을 보였으며 지구학적 구속 조건을 사용하는 Method 3과 제안 방법은 저하된 추정 성능을 보였다. 특히 요 성분의 RMSE는 각각 6.03과 9.19°로 큰 오차를 나타냈다. 반면, 고속 조건의 Tests 2와 3에서 Method 3과 제안 방법은 모두 현저한 추정 성능의 향상을 보였으며 Method 2의 경우에 저하되었다.

보정 과정이 없는 Method 1은 고속 조건의 Test 2에서 평균 RMSE가 19.95°로 큰 오차가 나타나는 반면에 표류오차 감소 상보 필터가 적용된 제안 방법은 1.20°로 우수한 성능을 보였다. Fig. 2(a)에서 볼 수 있듯이 Method 1은 시간의 경과에 따라 오차가 증가하지만 제안 방법은 높은 정확도로 추정이 이루어졌다. IMMU 기반의 Method 2와 제안 방법을 비교하였을 때 Method 2는 저속 조건의 Test 1에서 평균 RMSE가 2.53°로 제안 방법에 비해 1.78° 우수한 성능을 보였으나 고속 조건의 Tests 2와 3에서는 제안 방법의 추정 성능이 우수하였다. Method 2의 경우, 고속의 시험 조건이 요 추정 성능을 저하시키는 것으로 판단된다.

Fig. 3에서 보이는 바와 같이 Test 4에서는 자기교란으로 인해 Method 2에 주기적인 요 성분의 표류오차가 발생하였으며 요 성분의 RMSE는 8.32°로 큰 오차를 보였다. Method 2는 지자기센서를 사용하고 있는데, 자기교란은 센서 주위의 자기장에 영향을 주어 정확한 방향의 자기장을 측정하지 못하게 되므로 자세 추정의 정확성이 저하된다. 반면에 제안 방법은 IMU 기반

으로 지자기센서를 사용하지 않기 때문에 자기교란과는 무관한 성능을 보이고 있다. Method 3은 고속 조건의 Tests 2와 3에서 가장 높은 추정 성능을 보였으며 평균 RMSE는 각각 1.09와 1.51°로 제안 방법에 비해서 0.11과 0.19° 우수한 성능을 보였다. 반면에 저속 조건의 Test 1에선 2.68°로 고속 조건에 비해서 저하된 추정 성능을 보였다. Fig. 2(b)에서 확인할 수 있듯이 제안 방법은 비교적 급격한 오차가 발생하며 발생 오차의 폭은 최대 11.67°로 넓게 나타난 반면에 Method 3은 최대 5.46°의 비교적 좁은 오차 폭을 나타냈다. 비실시간 알고리즘인 Method 3은 모든 시간에 대해 예측된 자세를 기반으로 표류오차를 보정하는 후처리 과정을 이용하였기 때문에 실시간으로 보정하는 제안 방법에 비해 근소하지만 우수한 추정 성능이 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Test 5에서 실시간 표류오차 감소법에 상보 필터를 적용하지 않은 경우와 적용한 경우의 추정 결과를 보여준다. 동적 조건에 따른 추정 성능을 확인하기 위해 Fig. 4(a)는 관절 중심의 가속도 크기를 나타내고 있다. 저속 및 정적 구간에서 두 경우 모두 시간의 경과에 따른 요 성분의 표류오차가 발생하였다. 상보 필터를 적용하지 않은 경우 고속 구간으로 바뀌면서 표류오차가 감소되는 경향을 보였으나 여전히 큰 오차가 나타났다. 반면에 상보 필터를 적용한 경우, 정적 과정에서 발생한 표류 오차가 동적 조건에서 즉각적으로 감소하였으며 추정 성능의 향상을 통해 상보 필터의 효과를 확인하였다.

Ref. 6에서의 보정은 식(8)과 식(9)의 두 링크의 관절 중심 가속도만을 이용하므로 주어진 \mathbf{q}_f 에 부합하는 유일한 \mathbf{q}_j 를 결정할 수 없다. 여기서 주의할 점은 식(15)를 통해 구한 $\hat{\mathbf{q}}_j$ 는 식(10)을 만족시키는 쿼터니언일 뿐이며 정확한 관절각을 만족하는

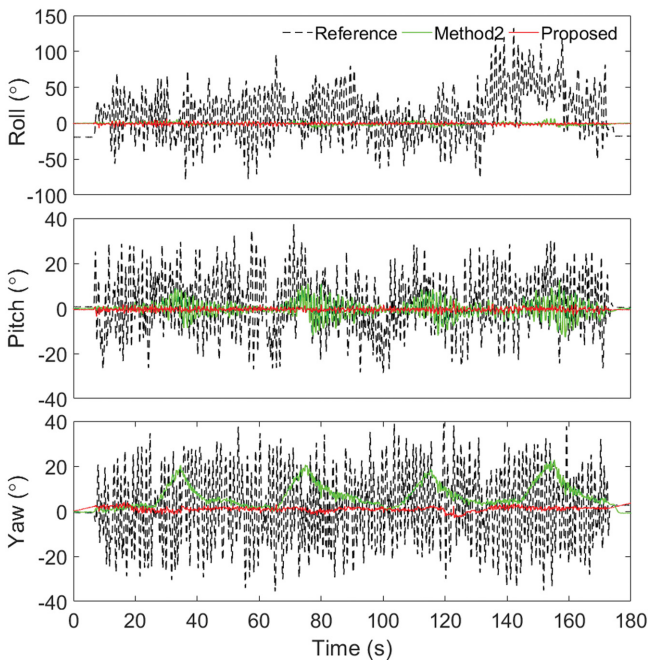


Fig. 3 Results of Test 4: estimation errors of Method 2(Blue) and the proposed method (Red) with respect to the reference (Black dashed)

쿼터니언이 아니라는 점이다. 즉, 불완전한 보정이 이뤄지게 된다. 하지만 가용한 관측벡터 정보가 한 개밖에 없는 상황에서 불안정할지라도 보정을 거치는 것의 효과를 Ref. 6과 본 논문은 보여주고 있다. 이때 상기해야 할 점은 상대적인 자세의 추정인 반복적인 예측 및 보정 과정을 통해 이뤄진다는 점이다. 즉 예측을 통해 추정하고자 하는 자세는 참 자세의 근처에 위치하며, 보정을 통해 오차의 누적을 지속적으로 제한하고 있다. 보정의 과정 없이 예측만을 의지하여 추정이 이뤄진다면 표류오차의 증가는 불가피하지만, 지속적인 보정이 이뤄지는 경우에 표류를 방지하여 추정 성능이 확보될 수 있는 것이다.

제안 방법은 비실시간 표류오차 감소법인 Method 3에 비해서는 다소의 성능 열세를 보였다. 그 차이는 Tests 2와 3의 추정 결과에 대해서 각각 0.11과 0.19°의 수준이다. Method 3은 후처리 과정에서 설정되는 다수의 파라미터에 따라서 추정 성능이 달라질 수 있기 때문에 측정 데이터에 적합한 파라미터를 설정해야 하는 어려움이 있다. 반면에 제안 방법은 실시간으로 표류오차를 감소시킨다는 점에서 보다 많은 적용가능성을 지닌다.

4. 결론

본 논문은 동적 조건에서 정확한 관절각을 추정하기 위해 표류오차를 감소하는 IMU 기반의 표류오차 감소 상보 필터를 제안한다. 제안 방법은 동적 조건에서의 표류 오차 감소를 위하여 Ref. 6구속 조건 기반의 관절각 보정 방법을 이용한다. 하지만, 구속 조건 적용에 따른 부작용을 보완하기 위하여, 표류오차를

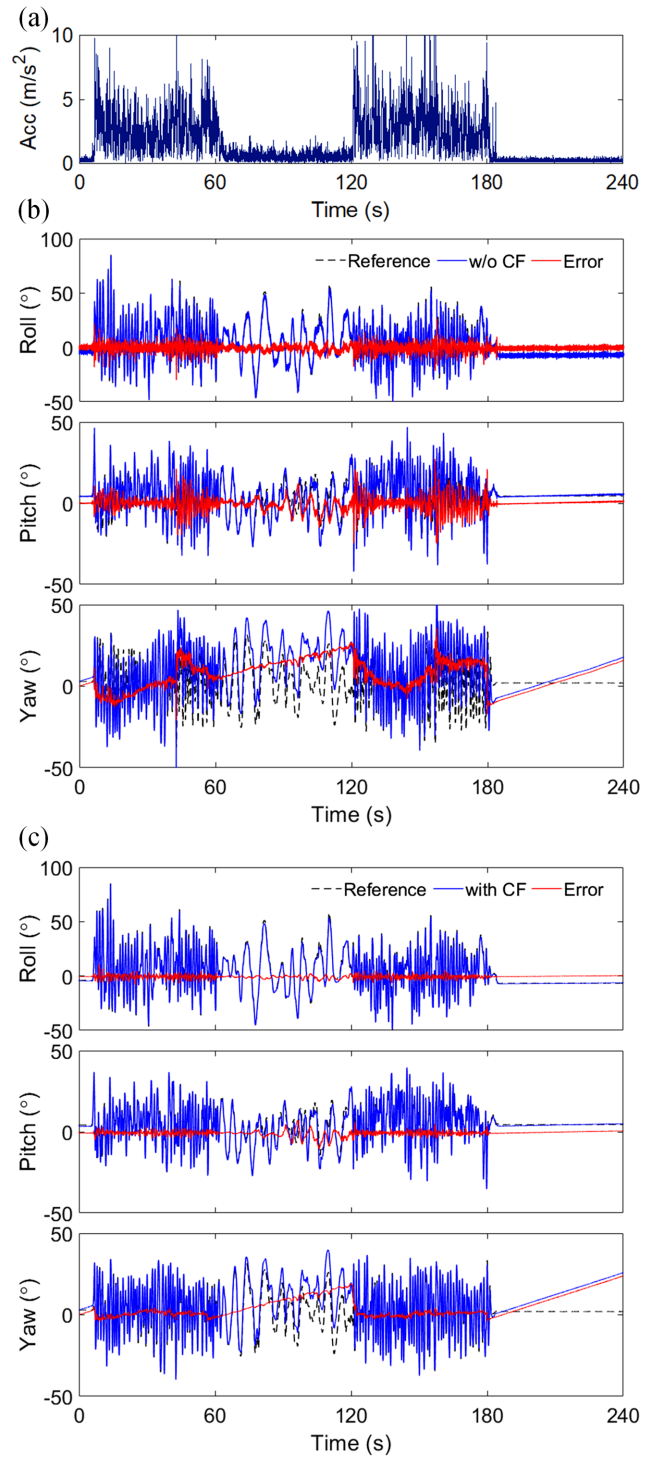


Fig. 4 Results of Test 5: (a) Magnitude of joint center acceleration, and (b) and (c) are estimation results of the drift reduction method without and with the CF, respectively

보정한 자세와 예측된 자세를 조합하는 상보 필터를 적용하였다. 즉, Ref. 6의 표류오차 감소 방법에 사용되던 후처리 방식이 아닌, 실시간 추정을 제안 방법의 차별성으로 한다.

제안 방법의 관절각 추정 성능은 다양한 동적 조건의 실험에서 비교 방법들의 추정 결과를 비교 분석하여 검증하였다. 제안

하는 알고리즘은 각각의 평균 외부 가속도가 2.57과 3.88 m/s²인 고속 조건의 Tests 2와 3에서 추정 결과의 RMSE가 각각 1.20과 1.71°로 우수한 추정 성능을 보였으며, Test 3에서는 Method 1에 비해서 21.12°, Method 2에 비해서 2.55°의 우수한 성능을 보였다. 비실시간 방법인 Method 3에 비해서는 0.19° 열세한 성능을 보였으나, 실시간 보정이라는 장점을 고려할 때 Method 3 대비 실용성이 우수하다고 판단된다.

하지만 상기 결과는 기계관절 시스템에서의 실험 결과이며, 신체의 경우 분절이나 관절의 위치에 대한 변형이 존재한다는 점을 고려해야 한다. 따라서 신체 관절각의 추정 성능을 보다 향상시키기 위해서는 이러한 신체의 변형 요소를 반영하는 추정 방법에 대한 연구가 요구된다.

제안하는 표류오차 감소 상보 필터는 일반적으로 자세 추정 성능이 저하되는 동적 조건에서 우수한 관절각 추정 성능을 유지하므로 역동적인 움직임을 포함하는 스포츠 분야에서 효율적으로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2019년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(No. NRF-2018R1D1A1B07042791)의 지원을 받아 수행됨.

REFERENCES

- Corazza, S., Muendemann, L., Chaudhari, A., Demattio, T., Cobelli, C., et al., "A Markerless Motion Capture System to Study Musculoskeletal Biomechanics: Visual Hull and Simulated Annealing Approach," *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 34, No. 6, pp. 1019-1029, 2006.
- Schmitz, A., Ye, M., Boggess, G., Shapiro, R., Yang, R., et al., "The Measurement of in Vivo Joint Angles during a Squat Using a Single Camera Markerless Motion Capture System as Compared to a marker Based System," *Gait & Posture*, Vol. 41, No. 2, pp. 694-698, 2015.
- Fernandez-Baena, A., Susin, A., and Lligadas, X., "Biomechanical Validation of Upper-Body and Lower-Body Joint Movements of Kinect Motion Capture Data for Rehabilitation Treatments," *Proc. of the 4th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems*, pp. 656-661, 2012.
- Wu, G., Siegler, S., Allard, P., Kirtley, C., Leardini, A., et al., "ISB Recommendation on Definitions of Joint Coordinate System of Various Joints for the Reporting of Human Joint Motion-Part I: Ankle, Hip, and Spine," *Journal of Biomechanics*, Vol. 35, No. 4, pp. 543-548, 2002.
- Wu, G., Van der Helm, F. C., Veeger, H. D., Makhsous, M., Van Roy, P., et al., "ISB Recommendation on Definitions of Joint Coordinate Systems of Various Joints for the Reporting of Human Joint Motion-Part II: Shoulder, Elbow, Wrist and Hand," *Journal of Biomechanics*, Vol. 38, No. 5, pp. 981-992, 2005.
- Fasel, B., Spörri, J., Schütz, P., Lorenzetti, S., and Aminian, K., "Validation of Functional Calibration and Strap-Down Joint Drift Correction for Computing 3D Joint Angles of Knee, Hip, and Trunk in Alpine Skiing," *PLoS ONE*, Vol. 12, No. 7, pp. 1-17, 2017.
- Sabatini, A. M., Martelloni, C., Scapellato, S., and Cavallo, F., "Assessment of Walking Features from Foot Inertial Sensing," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 52, No. 3, pp. 486-494, 2005.
- Favre, J., Jolles, B., Aissaoui, R., and Aminian, K., "Ambulatory Measurement of 3D Knee Joint Angle," *Journal of Biomechanics*, Vol. 41, No. 5, pp. 1029-1035, 2008.
- Jeon, T. H. and Lee, J. K., "IMU-Based Joint Angle Estimation under Various Walking and Running Conditions," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 35, No. 12, pp. 1199-1204, 2018.
- Lee, D. and Han, S., "Study on the Reliability of Smartphone-Based Measurements of Leg Segment and Joint Angles during Gait," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 36, No. 3, pp. 293-300, 2019.
- Chardonens, J., Favre, J., Cuendet, F., Gremion, G., and Aminian, K., "A System to Measure the Kinematics during the Entire Ski Jump Sequence Using Inertial Sensors," *Journal of Biomechanics*, Vol. 46, No. 1, pp. 56-62, 2013.
- Bergamini, E., Picerno, P., Pillet, H., Natta, F., Thoreux, P., et al., "Estimation of Temporal Parameters during Sprint Running Using a Trunk-Mounted Inertial Measurement Unit," *Journal of Biomechanics*, Vol. 45, No. 6, pp. 1123-1126, 2012.
- Favre, J., Jolles, B. M., Siegrist, O., and Aminian, K., "Quaternion-Based Fusion of Gyroscopes and Accelerometers to Improve 3D Angle Measurement," *Electronics Letters*, Vol. 42, No. 11, pp. 612-614, 2006.
- Lee, J. K., Park, E. J., and Robinovitch, S. N., "Estimation of Attitude and External Acceleration Using Inertial Sensor Measurement during Various Dynamic Conditions," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 61, No. 8, pp. 2262-2273, 2012.
- Euston, M., Coote, P., Mahony, R., Kim, J., and Hamel, T., "A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed-Wing UAV," *Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 340-345, 2008.
- Jang, T. H., Kim, Y. S. and Jang, T. S., "The Comparison of Attitude Estimation Method based on Kalman Filter with Considering External Acceleration and Bias Effect," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 35, No. 8, pp. 745-752, 2018.
- Lee, J. K. and Choi, M. J., "Robust Inertial Measurement Unit-Based Attitude Determination Kalman Filter for Kinematically Constrained Links," *Sensors*, Vol. 19, No. 4, pp. 768, 2019.

18. Sabatini, A. M., "Quaternion-Based Strap-Down Integration Method for Applications of Inertial Sensing to Gait Analysis," *Medical and Biological Engineering and Computing*, Vol. 43, No. 1, pp. 94-101, 2005.
19. Lee, J. K. and Choi, M. J., "Effect of Strapdown Integration Order and Sampling Rate on IMU-Based Attitude Estimation Accuracy," *Sensors*, Vol. 18, No. 9, pp. 2775-2785, 2018.
20. Madgwick, S. O., Harrison, A. J., and Vaidyanathan, R., "Estimation of IMU and MARG Orientation Using a Gradient Descent Algorithm," *Proc. of the IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, pp. 1-7, 2011.
21. Lee, J. K., "A Parallel Attitude-Heading Kalman Filter without State-Augmentation of Model-Based Disturbance Components," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 68, No. 7, pp. 2668-2670, 2019.
22. Lee, J. K., "A Parallel Kalman Filter for Estimation of Magnetic Disturbance and Orientation based on Nine-Axis Inertial/Magnetic Sensor Signals," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 40, No. 7, pp. 659-666, 2016.
23. Favre, J., Aissaoui, R., Jolles, B. M., de Guise, J. A., and Aminian, K., "Functional Calibration Procedure for 3D Knee Joint Angle Description Using Inertial Sensors," *Journal of Biomechanics*, Vol. 42, No. 14, pp. 2330-2335, 2009.
24. Jakob, C., Kugler, P., Hebenstreit, F., Reinfelder, S., Jensen, U., et al., "Estimation of the Knee Flexion-Extension Angle during Dynamic Sport Motions Using Body-Worn Inertial Sensors," *Proc. of the 8th International Conference on Body Area Networks*, pp. 289-295, 2013.
25. Luinge, H. J., Veltink, P. H., and Baten, C. T., "Ambulatory Measurement of Arm Orientation," *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, No. 1, pp. 78-85, 2007.
26. Cooper, G., Sheret, I., McMillian, L., Siliverdis, K., Sha, N., et al., "Inertial Sensor-Based Knee Flexion/Extension Angle Estimation," *Journal of Biomechanics*, Vol. 42, No. 16, pp. 2678-2685, 2009.
27. Seel, T., Raisch, J., and Schauer, T., "IMU-Based Joint Angle Measurement for Gait Analysis," *Sensors*, Vol. 14, No. 4, pp. 6891-6909, 2014.
28. El-Gohary, M. and McNames, J., "Human Joint Angle Estimation with Inertial Sensors and Validation with a Robot Arm," *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol. 62, No. 7, pp. 1759-1767, 2015.
29. Alonge, F., Cucco, E., D'Ippolito, F., and Pulizzotto, A., "The Use of Accelerometers and Gyroscopes to Estimate Hip and Knee Angles on Gait Analysis," *Sensors*, Vol. 14, No. 5, pp. 8430-8446, 2014.
30. Lin, P., Ma, J., and Lo, S., "Discrete Element Crowd Model for Pedestrian Evacuation Through an Exit," *Chinese Physics B*, Vol. 25, No. 3, Paper No. 034501, 2016.
31. Seel, T., Schauer, T., and Raisch, J., "Joint Axis and Position Estimation from Inertial Measurement Data by Exploiting Kinematic Constraints," *Proc. of the IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 45-49, 2012.



Jung Keun Lee

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Hankyong National University. His research interests include inertial-sensing-based human motion tracking, bio-mechanics, wearable sensor applications, and system dynamics and control.

E-mail: jklee@hknu.ac.kr



Chang June Lee

M.Sc. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Hankyong National University. His research interests include IMU-based human motion tracking and joint torque estimation as well as wearable robotics.

E-mail: 2019563205@hknu.ac.kr