

레버암 상태 추정을 이용한 IMU의 자세 결정 알고리즘

Enhanced Attitude Determination with IMU using Estimation of Lever Arms

황태현, 오재용, 박세길, 박병재, 조득재*
(Tae Hyun Fang¹, Jaeyong Oh¹, Sekil Park¹, Byoun-Jae Park¹, and Deuk-Jae Cho¹)

¹Maritime Safety Research Division, Korea Institute of Ocean Science and Technology (KIOST)

Abstract: In this paper, an enhanced method for attitude determination is proposed for systems using an IMU (Inertial Measurement Unit). In attitude determination with IMU, it is generally assumed that the IMU can be located in the center of gravity on the vehicle. If the IMU is not located in the center of gravity, the accelerometers of the IMU are disturbed from additive accelerations such as centripetal acceleration and tangential acceleration. Additive accelerations are derived from the lever arm which is the distance between the center of gravity and the position of the IMU. The performance of estimation errors can be maintained in system with a non-zero lever arm, if the lever arm is estimated to remove the additive accelerations from the accelerometer's measurements. In this paper, an estimation using Kalman filter is proposed to include the lever arm in the state variables of the state space equation. For the Kalman filter, the process model and the measurement model for attitude determination are made up by using quaternion. In order to evaluate the proposed algorithm, both of the simulations and the experiments are performed for the simplified scenario of motion.

Keywords: attitude determination, IMU, lever arm, quaternion, Kalman filter

1. 서론

현대의 많은 선박, 항공기, 그리고 이동형 로봇 등과 같은 운동체는 관성측정장치(IMU: Inertial Measurement Unit)를 이용한 자세결정(attitude determination) 시스템을 구성하고 있다. 관성측정장치는 가속도계(accelerometer)와 각속도계(gyroscope)로 구성되어 있으며, 운동체의 무게중심에 장착되어 값을 측정하는 것으로 가정한다[1]. 따라서 자세결정 시스템은 운동체 무게중심의 가속도와 각속도를 바탕으로 알고리즘을 구성한다. 그러나 몇가지 이유에 의하여 관성측정장치를 무게중심에 장착하기 어려운 상황이 발생한다. 첫째 무게중심의 위치를 정확히 확인하기 어렵거나, 둘째 구조적 및 전자적 간섭에 의하여 무게중심 위치에 설치하기 어려울 수 있다.

무게중심의 위치와 관성측정장치의 위치 사이의 거리를 레버암(lever arm)이라고 할 때, 레버암은 관성측정장치에 추가적인 각속도를 발생시킨다[2,3]. 그림 1은 운동체의 무게중심에 대한 레버암을 나타내며, 여기서는 단일축에 대한 레버암을 나타낸다. 자세결정 시스템은 운동모델, 가속도계 측정값 그리고 각속도계 측정값을 융합하여 자세를 추정한다[1,4,5]. 레버암에 의한 추가적인 각속도가 가속도 운동모델과 일치하지 않으면 이것은 자세 결정 오차를 증가시킨다. 운동체에 IMU를 장착하기 전에 레버암의 크기 및 방향을 미리

결정하기는 어려우므로 가속도 운동모델은 레버암을 고정된 값으로 포함할 수는 없다. 자세결정을 위한 추정 필터를 구성할 때 상태변수에 레버암을 포함시키면 레버암에 의한 오차를 보상할 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

본 연구에서는 레버암을 포함하는 가속도 운동방정식(dynamic equation)을 구성하고 이를 바탕으로 측정방정식(measurement equation) 구성한다. 자세결정을 위한 상태 방정식(state equation)은 쿼터니언(quaternion) 미분방정식을 이용하여 구성한다. 쿼터니언은 회전 운동체의 회전을 표현하는데 사용되며 4차의 벡터로 구성된다. 벡터의 요소는 각각 회전량과 회전축으로 구성되며 전통적인 Euler 각에 의한 표현에 비하여 짐벌락(gimbal lock) 현상을 발생시키지 않는다. 쿼터니언에 대한 자세한 내용은 참조문헌 [6-8]을 참조하기 바란다. 제안한 알고리즘의 검증에 위하여 단순한 회전운동을 구성하고 주어진 각변위에 대한 자세결정 알고리즘을 비교하였다. 자세결정 결과의 비교를 위하여 시뮬레이션과 실험을 각각 시행하였다. 실험에서는 정확한 각변위 재현을 위하여 단일축 레이트 테이블(rate table)을 사용하였다.

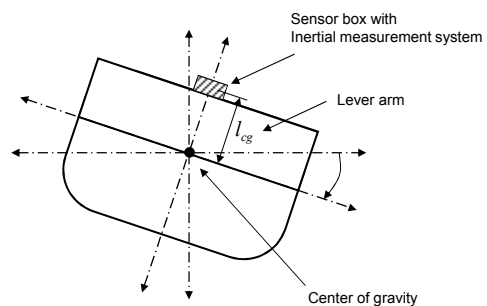


그림 1. 운동체의 무게중심에 대한 레버암.

Fig. 1. Center of gravity and lever arm in vehicle.

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received April 12, 2013 / revised August 19, 2013 / accepted September 2, 2013

황태현, 오재용, 박세길, 박병재, 조득재: 한국해양과학기술원 해양안전기술연구부

(thfang@kiost.ac/ojyong@kiost.ac/skpark@kiost.ac/byoungjae@kiost.ac/djcho@kiost.ac)

※ 본 연구는 기초기술연구회의 지원으로 수행 중인 연구개발과제(PGS2630)와 한국해양과학기술원의 지원으로 수행 중인 연구개발과제(PES1580)의 연구결과 중 일부임.

※ 이 논문은 2013 제 28회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음.

본 연구는 IMU의 비무계중심 장착 문제를 고려하고 있으며, GPS의 장착 문제를 다루는 연구[9]와는 구분된다. 본 연구는 2013년 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었다[10].

II. 상태 방정식 구성

자세결정을 위한 상태 방정식은 쿼터니언을 이용하여 구성할 수 있다. 쿼터니언을 \mathbf{q} 라고 하고 자이로드립트(gyro drift)를 $\boldsymbol{\mu}$ 라고 할 때 쿼터니언 상태 방정식은 다음과 같이 주어질 수 있다[1,11,12].

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{W}\mathbf{q} + \mathbf{B}\boldsymbol{\mu}$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -p & -q & -r \\ p & 0 & r & -q \\ q & -r & 0 & p \\ r & q & -p & 0 \end{bmatrix} \mathbf{q} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_1 & q_2 & q_3 \\ -q_0 & q_3 & -q_2 \\ -q_3 & -q_0 & q_1 \\ q_2 & -q_1 & -q_0 \end{bmatrix} \boldsymbol{\mu} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T \in \mathfrak{R}^{4 \times 1}$ 은 쿼터니언의 요소를 나타내고 p, q, r 은 각각 롤(roll), 피치(pitch), 요(yaw)의 각속도(angular rate)를 나타낸다. 위첨자 T 는 전치행렬(transpose matrix)를 나타낸다.

식 (1)의 자이로드립트는 각속도계 고유의 잡음으로서 유색잡음(colored noise)의 특성을 가진다[8]. 간략화를 위하여 자이로드립트는 1차 Markov 프로세스로 모델링을 구성할 수 있다[1]. 간략한 표현을 위하여 벡터 및 행렬을 나타내는 굵은체를 생략하였다.

$$\dot{\boldsymbol{\mu}} = F_1 \boldsymbol{\mu} + G_1 w_{drift} \quad (2)$$

여기서 w_{drift} 은 단위크기의 영평균 정규백색잡음(white Gaussian noise with zero mean)을 나타낸다. F_1 과 G_1 은 자이로드립트 모델의 시스템행렬(system matrix)과 입력행렬(input matrix)을 각각 나타내며, 다음과 같이 주어진다.

$$F_1 = - \begin{bmatrix} \beta_{g,x} & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{g,y} & 0 \\ 0 & 0 & \beta_{g,z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} \sigma_x \sqrt{2\beta_{g,x}} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y \sqrt{2\beta_{g,y}} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_z \sqrt{2\beta_{g,z}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 β_g 은 자이로 시상수(time constant)의 역수를 나타내며 각속도계 계측 데이터의 자기상관지수(autocorrelation)을 계산함으로써 확인할 수 있다. 아래첨자 x, y, z 는 각각 동체좌표계 상의 각축을 나타낸다. σ 는 3축에 대한 자이로의 분산(variance)을 나타낸다.

쿼터니언 상태 방정식 (1)과 자이로드립트 상태 방정식 (2)를 이용하여 백색잡음을 가지는 상태 방정식을 구성할 수 있다. 확장된 상태벡터에 의한 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} \\ \dot{\boldsymbol{\mu}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & F_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{q} \\ \boldsymbol{\mu} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ G_1 \end{bmatrix} w_{drift} \quad (5)$$

식 (5)는 일반적으로 고려되는 쿼터니언 상태 방정식이다. 본 연구에서는 레버암에 의한 가속도 효과를 고려하기 위하여 레버암에 대한 상태 방정식을 도입한다. 관성측정장치가 장착된 이후에는 레버암이 시간에 따라 변하지 않는다. 따라서 레버암에 대한 상태 방정식은 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\dot{l}_{cg} = w_{lever} \quad (6)$$

여기서 w_{lever} 은 w_{drift} 와 독립적인 영평균 정규백색잡음을 나타낸다. l_{cg} 는 그림 1과 같이 동체좌표계(body frame)의 수직축에 대한 레버암을 나타내는데, 단지 수직축에 대한 레버암을 고려하는 이유는 다음 장에서 설명한다.

전체 상태 방정식을 구성하기 위하여 확장된 상태벡터를 정의할 수 있다. 식 (5)와 (6)을 이용하여 확장된 상태 방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{W} & \mathbf{B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & F_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ G_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \mathbf{w} \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}\mathbf{w} \quad (8)$$

$$\mathbf{x} = [q^T \ \boldsymbol{\mu}^T \ l_{cg}]^T \in \mathfrak{R}^{8 \times 1} \quad (9)$$

$$\mathbf{w} = [w_{drift}^T \ w_{lever}^T]^T \in \mathfrak{R}^{4 \times 1} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{x} 는 4차의 쿼터니언 벡터, 3차의 자이로 드리프트 벡터, 그리고 레버암 길이를 포함하여 8차의 벡터로 구성된다. \mathbf{w} 는 확장된 프로세스 잡음을 나타낸다.

III. 측정치 모델 구성

관성측정장치(IMU)가 그림 1과 같이 운동체의 임의의 지점에 설치되는 경우를 가정하면, 임의의 지점에서 발생하는 가속도 a_{b_s} 는 무게중심에서 발생하는 가속도 $a_{b_{cm}}$ 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다[2,3].

$$a_{b_s} = a_{b_{cm}} + ([\boldsymbol{\omega}_b \times][\boldsymbol{\omega}_b \times] + [\dot{\boldsymbol{\omega}}_b \times]) \Delta L_b \quad (11)$$

여기서 $\boldsymbol{\omega}_b = [p \ q \ r]^T$ 를 동체좌표계에서 정의된 각속도 벡터라고 할 때, $[\boldsymbol{\omega}_b \times]$ 는 동체좌표계의 각속도 벡터의 외대칭 행렬(skew-symmetric matrix)을 나타내고, ΔL_b 는 무게중심에서 IMU가 장착된 임의의 지점까지의 위치 벡터로서 동체좌표계에서 표현된 레버암 벡터를 나타낸다. 무게중심에서 계측되는 가속도는 중력을 포함하고 있으며, 또한 회전하는 기준 프레임(rotating reference frames)에서 절대속도 벡터의 도함수 표현식을 이용하여 IMU에서 계측되는 가속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{b_s} = \dot{\mathbf{v}}_b + [\boldsymbol{\omega}_b \times] \mathbf{v}_b - C_n^b \mathbf{g}_n + ([\boldsymbol{\omega}_b \times][\boldsymbol{\omega}_b \times] + [\dot{\boldsymbol{\omega}}_b \times]) \Delta L_b \quad (12)$$

$$C_n^b = \begin{bmatrix} (q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2) & 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & (q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) & (q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 C_n^b 는 항법좌표계(navigation frame)와 동체좌표계 변환을 위한 방향코사인행렬(direction cosine matrix)를 나타낸다.

완만한 이동(moderate movement)을 가정하면 (12)에서 $\dot{v}_b + [\omega_b \times] v_b$ 을 무시할 수 있다. 또한 만일 IMU가 정확히 무게중심에 장착되어 레버암의 길이 ΔL 가 0이 된다면 가속도계의 센서 측정방정식은 $a_{b_s} = -C_n^b g_n$ 이 된다. 본 연구에서는 레버암의 길이가 0이 아닌 임의의 상수로 고려하므로 측정방정식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$a_{b_s} = -C_n^b g_n + ([\omega_b \times][\omega_b \times] + [\dot{\omega}_b \times]) \Delta L_b + n \quad (14)$$

여기서 n 은 프로세스 잡음 w 과 독립(independent)이며 공분산행렬(covariance matrix) R 을 가진다. g_n 은 항법좌표계에서 나타낸 중력가속도 벡터를 나타내며, 간략화를 위하여 $g_n = [0 \ 0 \ g_{cont}]^T$ 로 가정한다. 여기서 g_{cont} 은 지구중심 방향에 대한 중력상수(gravitational constant)를 나타낸다.

운동체에 장착하는 IMU는 고정하여 설치하므로 무게중심에서 IMU 부착지점까지의 레버암 벡터는 고정된 상수로 고려할 수 있다. 그러나 무게중심과 IMU 위치 사이의 상대위치를 확인할 수 없다면, 레버암 벡터는 미지수로 고려된다. 일반적인 선박, 자동차, 그리고 항공기와 같은 운동체는 방향안정성 확보를 위하여 동체좌표계의 종방향(longitudinal) 축과 수직방향 축이 이루는 평면에 대하여 좌우대칭으로 구성된다. 따라서 횡방향(lateral)의 무게중심을 확인하여 레버암 벡터의 횡방향축 요소를 0으로 설정하는 것은 어렵지 않다. 또한 동체좌표계 종방향에 대한 무게중심의 위치는 미리 정해진 종방향의 임의의 두지점에서 무게를 계측함으로써 결정할 수 있다. 이와 같이 레버암벡터에서 종방향축과 횡방향축의 요소가 모두 0이 되도록 IMU를 장착하는 것은 상대적으로 용이하다. 그러나 무게중심의 위치 결정의 어려움이나 설치를 위한 구조적인 공간 확보의 어려움으로 인하여 레버암 벡터의 수직축 요소를 0으로 하는 것은 어려울 수 있다. 따라서 레버암 벡터에서 수직축에 대한 요소만을 미지수로 가정하여 $\Delta L_b \approx [0 \ 0 \ l_{cg}]^T$ 로 간략화할 수 있다. 레버암 벡터에 대한 가정과 외대칭행렬에 대한 정의를 이용하여 (14)를 다시 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{b_s} = -C_n^b g_n + \begin{bmatrix} (rp + \dot{q})l_{cg} \\ (rq - \dot{p})l_{cg} \\ (-q^2 - p^2)l_{cg} \end{bmatrix} + n \quad (15)$$

식 (13)과 중력가속도 벡터에 대한 가정을 이용하여 (15)를 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$a_{b_s} = \begin{bmatrix} -2g_{cont}(q_1q_3 - q_0q_2) + (rp + \dot{q})l_{cg} \\ -2g_{cont}(q_2q_3 + q_0q_1) + (rq - \dot{p})l_{cg} \\ -g_{cont}(q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) + (-q^2 - p^2)l_{cg} \end{bmatrix} + n \quad (16)$$

식 (16)으로부터 가속도계의 측정치에 대한 측정방정식(measurement equation)을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$y = h(x) + n \quad (17)$$

IV. 자세결정 Kalman 필터 구성

Kalman 필터를 이용하여 자세결정 시스템을 구성할 수 있다. 식 (8)의 상태 방정식과 (17)의 측정 방정식을 이용하여 Kalman 필터를 구성할 수 있다. Kalman 필터를 구성하기 위해서는 (7)과 (16)의 각 계수들을 결정할 필요가 있다. 식 (7)에서 W 는 각속도계에서 계측된 각속도로 구성되며 B 는 이전시간에서 추정된 쿼터니언으로 구성된다[11]. 프로세스 잡음은 자이로드리프트의 잡음과 레버암의 잡음으로 구성되며 공분산 행렬은 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$Q = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & \lambda \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서 $I \in \mathcal{R}^{3 \times 3}$ 는 단위행렬(identity matrix)를 나타내며 (2)에서 자이로 드리프트를 유도하는 정규백색잡음에 해당한다. 스칼라 λ 는 (6)에서 레버암의 정규백색잡음에 해당하며 레버암 추정오차를 조정하기 위한 필터의 튜닝 파라미터로 활용될 수 있다.

측정 방정식은 (17)와 같이 비선형 방정식(nonlinear equation)으로 구성되어 있으므로 확장 Kalman 필터를 이용하여 필터를 구성할 필요가 있다. 확장 Kalman 필터의 공분산 전과 방정식을 구성하기 위하여 측정치 행렬(measurement matrix)를 결정할 필요가 있다. 측정치 행렬 H 는 측정 방정식에 대한 상태벡터의 자코비언 행렬(Jacobian matrix)로서 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$H = \frac{\partial h(x)}{\partial x} \quad (19)$$

$$= \begin{bmatrix} 2g_{cont}q_2 & -2g_{cont}q_3 & 2g_{cont}q_0 & -2g_{cont}q_1 & rp + \dot{q} \\ -2g_{cont}q_1 & -2g_{cont}q_0 & -2g_{cont}q_3 & -2g_{cont}q_2 & 0_{3 \times 3} & rq - \dot{p} \\ -2g_{cont}q_0 & 2g_{cont}q_1 & 2g_{cont}q_2 & -2g_{cont}q_3 & -q^2 - p^2 \end{bmatrix}$$

V. 시뮬레이션 및 실험 결과

IMU를 이용하여 자세결정 시스템을 구성할 수 있다. 본 연구에서는 IMU가 운동체의 무게중심이 아닌 임의의 지점에 장착되는 경우에 대한 자세결정 시스템의 알고리즘을 제안하였다. 이러한 알고리즘을 위하여 각속도계의 계측값을 기반으로 하는 상태 방정식을 구성하고 가속도계의 계측값을 기반으로 하는 측정 방정식을 구성하였다. 각각의 모델은 동체좌표계 상에서 수직축에 대한 레버암의 길이를 미지수로 가정하여 상태변수로 포함하고 있다.

레버암 길이를 상태변수로 포함하는 자세결정 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 단일축 레이트테이블(single axis rate table)을 이용한 실험을 시행한다. 알고리즘 검증을 위한 시뮬레이션은 운동체가 외력에 의하여 자세 변동이 연속적으로 발생하는 환경을 가지며 임의의 레버암을 가지는 상황에서 시행된다. 시뮬레이션을 위하여 약 7ton 무게의 선박을 가정하고 5~15초 사이에 롤 방향으로 임의의 모멘트 외력을 가하여 선박의 동요를 유발하였다. 그림 2는 시간에 따른 롤각의 궤적 곡선을 나타낸다.

운동체에 장착된 IMU의 가상 계측값을 생성하기 위하여 특정한 센서를 가정하였다. 즉 현재 산업적 용도로 실제 적

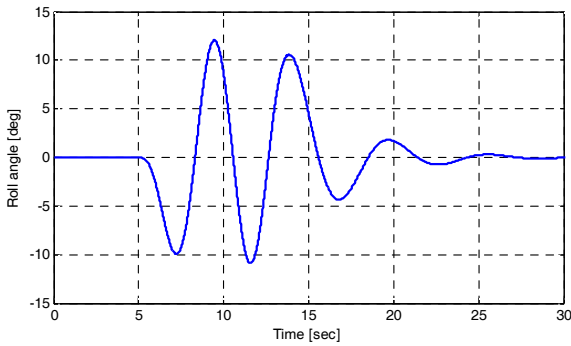


그림 2. 운동체의 롤각의 궤적.
Fig. 2. Trajectories of roll angle.

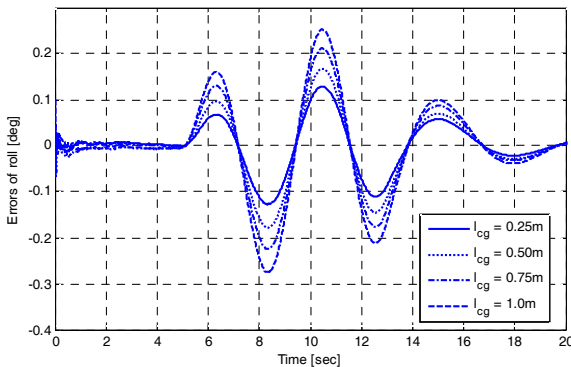


그림 3. 레버암 추정 없이 알고리즘에 의한 롤각의 추정 오차.
Fig. 3. Estimation errors of roll angle by algorithm without estimation of lever arm.

용되는 센서를 기준으로 가상의 계측값을 생성하였다. 이를 통하여 각속도계와 가속도계의 현실적인 잡음을 고려하는 시뮬레이션을 구성할 수 있다. IMU는 Gladiator Tech.사의 LandMark30 모델을 적용하였다. 이러한 IMU 모델은 라이트 테이블을 이용한 실험에서 사용할 IMU 모델과 동일하다.

운동체가 그림 2와 같은 롤각의 궤적을 가질 때, 가상의 IMU를 동체좌표계의 수직축에 대하여 레버암 길이를 가지도록 설정하였다. 레버암의 길이는 수직축의 윗쪽 방향으로 0.25m, 0.5m, 0.75m, 그리고 1.0m와 같이 4가지 종류의 길이를 가지도록 설정하고 각각에 대하여 시뮬레이션을 시행하였다. 제안된 알고리즘의 검증을 위하여 레버암 길이를 상태변수로 포함하지 않는 알고리즘에 의한 추정 결과를 비교한다. 그림 2와 같은 롤운동이 발생하는 상황에서 레버암을 고려하지 않은 알고리즘으로 자세결정을 시행하는 경우에 롤각을 추정할 수 있다. 이때, 그림 2와 같은 참값과 추정값의 차이를 추정오차라고 한다면, 그림 3은 기존의 자세결정 알고리즘(conventional algorithm)에 의한 추정오차를 나타낸다. 그림에서 레버암의 길이가 길어질수록 추정오차가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

그림 4는 제안하는 자세결정 알고리즘에 의하여 결정된 롤각의 추정오차를 나타낸다. 그림 3과 비교하면 레버암의 길이가 증가함에 따라 불구하고 추정오차의 증가는 거의 보이지 않는다. 또한 모든 레버암에 의한 추정오차가 그림 3의 최소의 추정오차보다 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

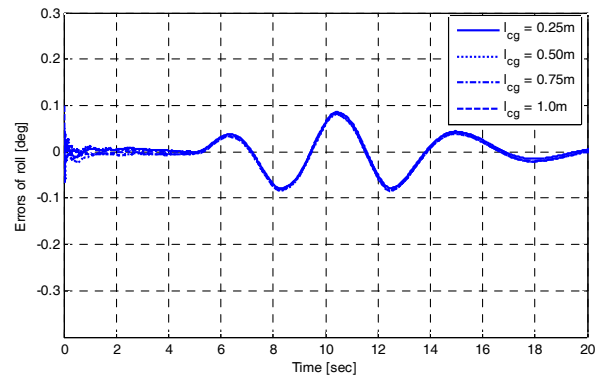


그림 4. 레버암 추정이 있는 알고리즘에 의한 롤각의 추정 오차.
Fig. 4. Estimation errors of roll angle by algorithm with estimation of lever arm.

표 1. 레버암 길이에 따른 롤각 최대 추정 오차.

Table 1. Maximum errors in roll angle according to lever arm.

Length of lever arm [m]	Maximum errors [m]	
	Conventional algorithm	Proposed algorithm
0.25	0.1289	0.0856
0.50	0.1677	0.0811
0.75	0.2119	0.0842
1.00	0.2539	0.0871

그림 3과 그림 4에서 10초에서 12초 사이에 발생한 롤각의 최대 추정오차를 확인하여 정리하면 표 1과 같다. 그림에서 확인한 경향과 동일하게 기존의 알고리즘이 레버암의 크기가 증가함에 따라 추정오차가 비례적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이때, 레버암의 길이가 1.0m인 경우의 추정오차는 레버암의 길이가 0.25m인 경우에 비하여 96.9% 증가하는 것을 알 수 있다. 제안하는 알고리즘은 전체적으로 작은 추정오차를 가짐을 확인할 수 있다. 이때, 레버암의 길이가 1.0m인 경우의 추정오차는 레버암의 길이가 0.25m인 경우에 비하여 단지 1.8% 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 가장 작은 추정 오차가 발생하는 0.25m 인 경우에 제안된 알고리즘은 기존의 알고리즘에 비하여 33.6%가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 단일축 라이트 테이블을 이용한 실험을 시행하였다. 관성데이터 계측을 위하여 시뮬레이션에서 언급한 IMU와 동일한 모델을 사용하였다. LandMark30 모델은 3축에 대한 Euler 각을 제공하며 가속도계와 각속도계의 계측값도 동시에 제공한다. 본 실험에서는 단지 가속도계와 각속도계의 계측값을 이용하여 자세결정 실험을 진행하였다. 정확한 각변위(angular displacement)를 구현하기 위하여 라이트테이블을 이용하였다. 본 실험에서는 단일축 라이트테이블인 iXMotion 사의 EVO10 모델을 사용하였다. 롤각에 대한 각변위를 구현하기 위하여 그림 5와 같이 수평으로 설치하였고 회전원반이 지면에 대하여 수직이 되도록 설치하였다.

실험을 위하여 IMU를 회전중심에서 18cm 떨어진 위치에 설치하였고 이는 레버암의 길이가 된다. 선정된 레버암의 길

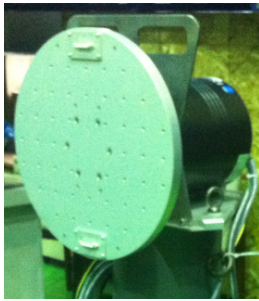


그림 5. 수평 설치된 레이트테이블.
Fig. 5. Rate table with horizontal mount.

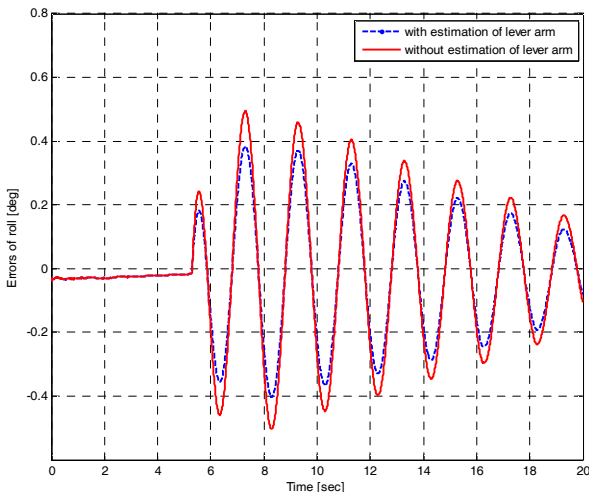


그림 6. 롤각의 추정오차.
Fig. 6. Estimation errors of roll.

이는 회전원반의 크기가 제약되어 있는 상황에서 가능한 최대 거리를 나타낸다. 실험을 위한 롤각의 거동은 5초의 시간이 지난후부터 진폭 30deg와 주기 2초의 사인파를 가지도록 하였다. 레이트테이블의 롤각 궤적은 작동장치에 저장되며 롤각 궤적의 기준값으로 사용된다. 그림 6은 실험에서 획득된 롤각의 추정오차를 나타낸다. 여기서 실선은 레버암 추정이 없는 알고리즘에 의하여 획득된 값이고 점선은 레버암 추정이 있는 알고리즘에 의하여 획득된 값을 나타낸다. 점선으로 표시되는 추정오차가 모든 영역에서 개선된 추정오차를 가지는 것을 확인할 수 있다.

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 시행하였으며, 제안한 알고리즘이 개선된 추정오차를 가지는 것을 확인하였다.

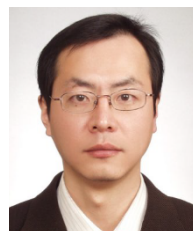
VI. 결론

본 연구에서는 IMU를 통하여 자세결정을 하는 시스템에서 자세결정 추정오차를 개선하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 알고리즘은 IMU가 무게중심에 장착이 되지 못하는 경우에 대한 오차를 보상할 수 있도록 구성되었다. 이를 위하여 IMU가 무게중심에서 동체좌표계의 수직축 방향으로 벗어난 곳에 위치하는 것으로 간략화를 시행하였다. 무게중심과 IMU 위치 사이의 거리를 상태변수로 추가하는 필터를 구성하였다. 쿼터니언에 기반한 자세결정을 위한 추정 필터

는 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증되었다. 시뮬레이션에서는 임의의 롤각 방향 변위에 대하여 제안된 알고리즘과 기존 알고리즘의 추정오차를 비교하였다. 제안된 알고리즘이 개선된 추정오차를 가지며 레버암의 길이가 길어질수록 추정오차의 개선은 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 실험에서는 단일축 레이트테이블을 이용하여 정밀한 각변위를 구현하였다. 제안한 알고리즘과 기존의 알고리즘의 추정오차가 사인파로 구현된 각변위 상황에서 비교되었다. 제안한 알고리즘의 추정오차가 개선된 성능을 가지는 것을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] D. Gebre-Egziabher, R. C. Hayward, and J. D. Powell, "Design of multi-sensor attitude determination systems," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, no. 2, pp. 622-649, 2004.
- [2] D. T. Greenwood, *Principles of Dynamics*, Prentice Hall, 1988.
- [3] R. F. Stengel, *Flight Dynamics*, Princeton University Press, 2004.
- [4] H.-J. Kwak, J.-M. Hwang, J.-H. Kim, and G.-T. Park, "Development and application of three-axis motion rate table for efficient calibration of accelerometer and gyroscope," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 7, pp. 632-637, 2012.
- [5] Y. S. Suh and Y. Chee, "Foot motion estimation smoother using inertial sensors," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 5, pp. 471-478, 2012.
- [6] M. S. Hwang and W. J. Park, "Flight dynamics modeling using quaternion," *Proc. of Korea Automatic Control Conference (in Korean)*, pp. 1114-1117, Oct. 2000.
- [7] C. K. Jack, "Quaternion kinematic and dynamic differential equations," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 1, pp. 53-64, 1992.
- [8] A. Gelb, *Applied Optimal Estimation*, The MIT Press, 1974.
- [9] S. Hong, M. H. Lee, S.-H. Kwon, and H.-H. Chun, "Estimation of Errors in the Integration of GPS and INS," *Proc. of the Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2774-2779, 2004.
- [10] T. H. Fang, J. Oh, S. Park, B.-J. Park, and D.-J. Cho, "Enhanced attitude determination using estimation of lever arms considering mounting position of IMU," *Proc. of 2013 28th ICROS Annual Conference (in Korean)*, pp. 377-378, May 2013.
- [11] I. Y. Bar-Itzhack and Y. Oshman, "Attitude determination from vector observations: quaternion estimation," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 128-136, 1985.
- [12] D. Choukroun, I. Y. Bar-Itzhack, and Y. Oshman, "Novel quaternion Kalman filter," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronics*, vol. 42, no. 1, pp. 174-190, 2006.



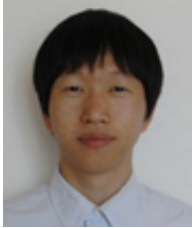
황 태 현

1994년 부산대학교 기계공학부 졸업. 1999년 동 대학원 능동기계공학과 석사. 2003년 동 대학원 박사. 2004년 미국 MIT 박사후연구원. 2005년~현재 한국해양과학기술원 책임연구원. 관심분야는 관성항법시스템, 표적추적, 센서융합.



오재용

2000년 전남대학교 컴퓨터공학과 졸업.
2002년 동 대학원 컴퓨터공학과 석사.
2008년~현재 한국해양과학기술원 선임
연구원. 관심분야는 컴퓨터비전, 컴퓨터
그래픽스, 증강현실.



박세길

2001년 전남대학교 컴퓨터공학과 졸업.
2006년 ICU 공학부 석사 졸업. 2010년~
현재 카이스트 전산학과 박사과정. 2006
년~현재 한국해양과학기술원 선임연구
원. 관심분야는 컴퓨터그래픽스, 모델링
및 시뮬레이션.



박병재

2003년 충남대학교 선박해양공학과 졸
업. 2005년 동 대학원 선박해양공학 석
사. 2007년~현재 한국해양과학기술원 연
구원. 관심분야는 M&S (Modeling &
Simulation), 선박구조.



조득재

1999년 충남대학교 전자공학과(공학사).
2001년 동 대학원 전자공학과(공학석사).
2005년 동 대학원 전자공학과(공학박사).
2005년~현재 한국해양과학기술원 선임
연구원. 관심분야는 GNSS, 정밀측위 알
고리즘, 무결성 감시.