

누적형 자이로 센서 데이터의 최대측정영역 확장 방법

오시환*, 김진희**

한국항공우주연구원

Extension of Measurement Range of Gyro Sensor Data

Shi-Hwan Oh* and Jin-Hee Kim**

Korea Aerospace Research Institute

Abstract

In case a measurement output of gyro sensor is an accumulated angle counts, it is usually provided as a binary bit counter which is allowed to roll-over at its maximum or minimum value. And it is a well known fact that the roll-over behavior restricts the measurement range of the processed sensor output below the actual measurable range of sensor hardware itself. In this study, a conventional sensor data processing method for a gyro with an accumulated angle output is introduced. And also, an improved method which can extend the processed output range over the conventional one is proposed. It is also derived that the increased range depends on the variation speed of an input signal. Finally, the derived equations and the performance of the proposed algorithm are verified using a computer simulation.

초 록

인공위성에 사용되는 자이로 센서는 출력 형태에 따라 누적형, 증분형, 각속도 제공형 등으로 나눌 수 있다. 이들 중 누적각을 제공하는 자이로는 보통 이진 카운터를 사용하며 누적각이 카운터의 최대값을 넘어서는 경우는 롤오버(Roll-over) 하도록 설계되어 있다. 이로 인해 각속도를 계산하는 과정에 제한 사항이 발생하며 계산할 수 있는 각속도는 센서 자체가 측정할 수 있는 영역보다 작은 영역으로 제한된다. 본 연구에서는 누적각을 제공하는 자이로 센서의 일반적인 각속도 계산 방법을 소개하고 일반적인 방법이 가지는 최대측정영역의 한계를 넘어서는 각속도를 계산할 수 있는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 입력 각속도의 변화에 제한이 있는 경우에만 적용이 가능하며 입력 각속도의 변화와 확장 가능한 영역의 범위를 정량적으로 유도하였다. 마지막으로 모의실험을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

키워드 : 인공위성(Satellite), 자이로 센서(Gyro Sensor), 누적각(Accumulated Angle), 롤오버(Roll-Over), 에일리어징 효과 (Aliasing Effect), 신호처리(Signal Processing)

접수일(2012년 9월 14일), 수정일(1차 : 2012년 10월 15일, 2차 : 2012년 10월 29일, 게재 확정일 : 2012년 11월 1일)

* 다목적실용위성5호체제팀/oshysh@kari.re.kr

** 다목적실용위성5호체제팀/kimjh@kari.re.kr

1. 서 론

자이로 센서는 인공위성의 자세 결정 및 자세 제어를 위해 위성 동체의 각속도 정보를 제공하는 중요한 센서 중의 하나이며 대부분의 위성에 장착되어 사용된다. 위성의 임무에 따라 각기 다른 성능 및 분해능을 가지는 자이로가 장착된다. 위성용 자이로센서의 출력은 각속도(angular rate)를 직접 제공하는 형태, 증분각(incremental angle)을 제공하는 형태, 또 누적각(accumulated angle)을 제공하는 형태로 나뉠 수 있다. 이 중 누적각을 제공하는 자이로는 연 이은 두 샘플 데이터의 차이를 측정 시간 간격으로 나누어야만 정확한 각속도를 추정할 수 있다[1]. 보통 누적형 자이로 센서는 누적각 데이터와 시간 정보 데이터를 제공하기 위해 이진 카운터를 사용하며 누적각과 시간 데이터가 카운터의 최대값 또는 최소값을 넘어서게 되면 롤오버(Roll-over)하도록 설계되어 있다. 이로 인해 누적형 자이로는, 측정하고자 하는 각속도가 특정값을 넘어서는 경우에 일리어징 현상이 발생하여 정확한 각속도의 계산이 안 되므로, 측정 가능한 각속도 범위에 제한이 있게 된다.

본 연구에서는 누적형 자이로를 사용할 때 일반적으로 알려져 있는 측정 가능한 최대 각속도 범위를 넘어서는 각속도 입력이 존재하는 경우에도 왜곡 없이 정확하게 입력 각속도를 계산할 수 있는 방법을 제안하였고 제안된 방법이 계산할 수 있는 최대 각속도 크기를 유도하였으며 모의 실험을 통하여 이를 검증하였다.

2. 누적형 자이로 데이터를 이용한 각속도 계산 원리

2.1 롤오버가 없을 때의 각속도 계산

누적각(accumulated angle)을 제공하는 자이로 센서는 보통 이진카운터 값을 그 출력으로 사용한다. 누적각 출력이 M-비트 카운터(M-bit counter)라고 가정할 때 이 출력이 가지는 값은

$0 \sim 2^M - 1$ 사이가 된다. t_{i-1} 시간의 누적각 출력을 C_{i-1} 라 하고 t_i 시간의 출력을 C_i 라 할 때 한 샘플 시간($\Delta t = t_i - t_{i-1}$) 동안의 평균 각속도 ω_i 는 다음과 같이 계산될 수 있다[2].

$$\omega_i = S \frac{C_i - C_{i-1}}{\Delta t} = S \frac{\Delta C_i}{\Delta t} \quad (1)$$

이 때, S 는 증분각에 대한 스케일 인자 (scale factor)이다. t_i 시간에서의 각속도 출력 ω_i 를 계산하기 위한 누적각 카운터를 그림으로 도시하면 다음과 같다.

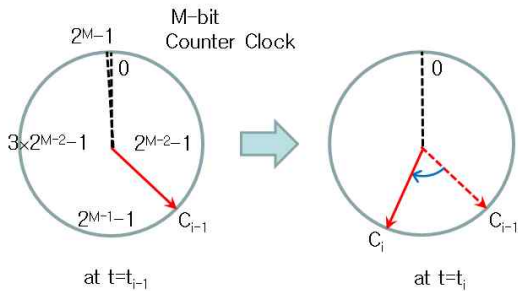


Figure 1. Calculation of Measured Rate from M-bit binary Counter Clock

이 때, 누적각의 차이로 계산된 증분각 카운터 (ΔC_i)는 입력 각속도의 변화에 따라 그 크기가 계속 변할 수 있으나 증분시간(Δt)은 샘플링 주파수 (또는 주기)가 변하지 않는 한 일정한 값을 가진다.

2.2 롤오버가 발생할 때의 각속도 계산

만약 t_{i-1} 과 t_i 사이에 Figure 2와 같이 양의 롤오버(Positive roll-over)가 발생한다면 이때의 정확한 각속도는 다음과 같이 보정 계산될 수 있다.

$$\omega_i = S \frac{C_i - C_{i-1} + 2^M}{\Delta t} = S \frac{\Delta C'_i}{\Delta t} \quad (2)$$

한편 음의 롤오버(Negative roll-over)가 발생할 때의 각속도는 다음과 같이 보정되어야 하며 이는 Figure 3에 나타나 있다.

$$\omega_i = S \frac{C_i - C_{i-1} - 2^M}{\Delta t} = S \frac{\Delta C'_i}{\Delta t} \quad (3)$$

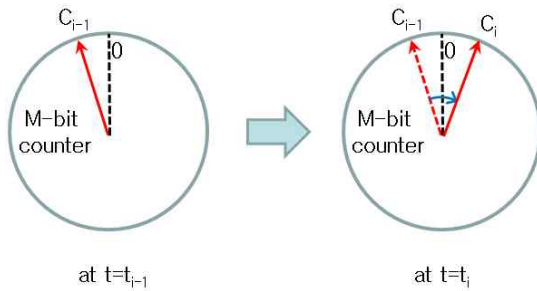


Figure 2. Calculation of Measured Rate for Positive Roll-Over Case

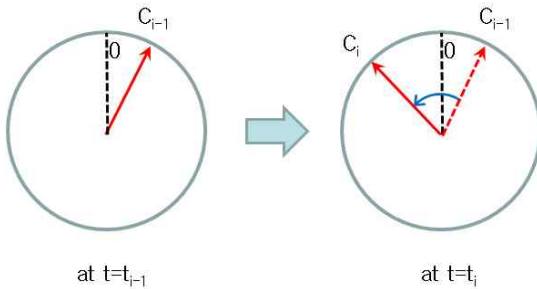


Figure 3. Calculation of Measured Rate for Negative Roll-Over Case

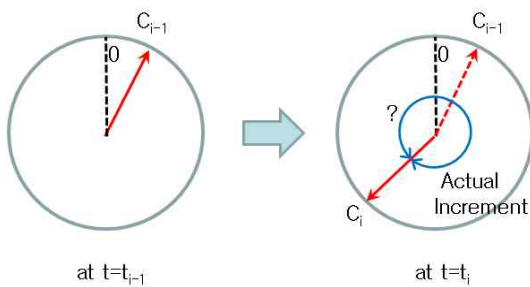


Figure 4. First Example of Wrong Calculation of Incremental Angle Count in Case of Positive Rotation

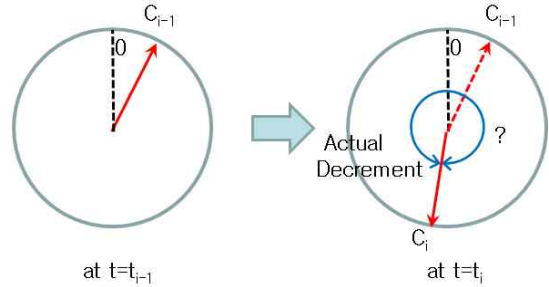


Figure 5. Second Example of Wrong Calculation of Incremental Angle Count in Case of Negative Rotation

2.3 최대측정영역

이진 카운터를 누적 출력값으로 제공하는 센서는 필수적으로 발생하는 데이터의 롤오버로 인해 최대측정영역에 제한이 있게 된다. 또한, 카운터의 비트수(M)와 샘플링 주파수에 따라 이 최대측정영역이 변하게 되며 카운터 비트수와 샘플링 주파수가 크면 클수록 더 큰 영역을 측정할 수 있고 작아질수록 측정 범위가 줄어들게 된다.

만약 식 (1)에서 계산되는 증분각 카운터(ΔC)의 크기가 Figure 4와 같은 경우, 즉 증분각(ΔC)이 카운터 시계(Counter Clock)의 절반인 2^{M-1} 이상으로 커질 경우, 양의 방향으로 카운터가 증가한 것인지 음의 방향으로 감소한 것인지 구분하지 못하게 된다. 또한 Figure 5와 같이 -2^{M-1} 이하로 작아질 경우도 카운터가 증가한 것인지 감소한 것인지 구분하지 못한다. 이로 인해 센서에 인가되는 입력 각속도를 정확히 측정하기 위한 증분각 카운터(ΔC)는 다음과 같은 제한을 가지게 된다.

$$|\Delta C_i| < \Delta C_{\max} = 2^{M-1} \quad (4)$$

이러한 제한을 두지 않는다면 자이로를 통해 측정 계산된 각속도는 특정 각속도 영역에서 실제 입력 각속도와는 달리 그 부호가 뒤집히는 에일리어징 현상(Aliasing effect)이 발생할 수 있다.

이를 방지하기 위해 측정 가능한 입력 각속도 영역에 제한을 두게 되는 것이다[3].

만약, 센서의 스케일 인자 S 는 변함이 없고 데이터의 샘플링 주파수가 커진다면 Δt 는 작아지고 동일한 크기의 각속도 입력에 대한 증분각 카운터(ΔC) 역시 작아지므로 더 큰 각속도를 측정할 수 있다. 또, 카운터 비트수 M 이 커지는 경우에도 ΔC_{\max} 가 커져 더 넓은 영역의 각속도를 측정할 수 있다.

결과적으로 M -비트 카운터를 가지는 누적각 제공 자이로 센서의 최대 측정 각속도의 절대값은 ω_{\max} 보다 작으며 이는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\omega_{\max} = S\Delta C_{\max}/\Delta t = S \cdot 2^{M-1}/\Delta t \quad (5)$$

3. 누적형 자이로 데이터의 롤오버 및 최대측정영역을 고려한 각속도 계산 방법

2장에서 소개된 롤오버를 보상하는 각속도 계산 방법 및 최대측정영역의 제한 등을 모두 고려할 때 다음과 같은 절차를 통하여 각속도를 계산해 낼 수 있다. 단, 자이로에 인가되는 각속도 입력은 항상 최대측정영역을 벗어나지 않는다고 가정한다.

먼저 연속된 두 자이로 데이터를 이용하여 증분각 카운터를 계산한다.

$$\Delta C_i = C_i - C_{i-1} \quad (6)$$

계산된 증분각 카운터(ΔC)를 다음의 조건에 따라 보상한다.

$$i) \Delta C_i > 2^{M-1} \quad (7)$$

인 경우

$$\Delta C'_i = C_i - C_{i-1} - 2^M \quad (8)$$

$$ii) \Delta C_i < -2^{M-1} \quad (9)$$

인 경우

$$\Delta C'_i = C_i - C_{i-1} + 2^M \quad (10)$$

iii) i) 과 ii)를 모두 만족하지 않는 경우

$$\Delta C'_i = \Delta C_i \quad (11)$$

로 보정한다.

자이로센서에 인가되는 각속도는 항상 최대측정영역 안에 존재하므로 식 (6)에 의해 계산된 증분각은 항상 식 (4)를 만족해야 한다. 그러나 이를 만족하지 않았다면 이는 카운터의 롤오버가 일어난 경우이다. 증분각이 2^{M-1} 이상으로 커진 경우는 음의 롤오버가 일어난 경우이므로 식 (3)과 같이 원래의 값에서 2^M 을 빼주어야 하고 증분각이 -2^{M-1} 이하로 작아진 경우는 양의 롤오버가 일어난 경우이므로 식 (2)와 같이 원래의 값에 2^M 을 더해주어야만 한다. 마지막으로 보정된 증분각 카운터($\Delta C'$)를 이용하여 다음과 같이 각속도를 계산할 수 있다.

$$\omega_i = S \frac{\Delta C'_i}{\Delta t} \quad (12)$$

4. 최대측정영역 확장 방법

누적각을 제공하는 자이로 센서를 이용할 때는 센서 데이터의 샘플링 주파수, 출력 데이터의 카운터 비트수(M) 등을 확인하여 센서의 측정 범위가 시스템에 적합한지를 사용 전에 항상 확인해야만 한다. 그러나 사용 중인 센서의 샘플링 주파수가 부득이하게 낮아지거나 시스템에서 발생하는 최대 각속도가 예상외로 큰 경우에는 상대적으로 입력 각속도가 센서의 최대측정영역

보다 커서, 센서를 사용하지 못하는 상황이 발생할 수 있다. 이 경우 시스템에서 발생하는 각속도가 급격하게 변하지 않는다면 이 조건을 이용하여 식 (5)에서 표현된 최대 각속도 영역을 넘어서는 센서 입력을 정확히 계산할 수 있다.

먼저 자이로 센서로 측정하고자 하는 실제 각속도 ω_{actual} 이 센서의 최대측정영역을 넘어서 다음의 범위를 가질 수 있다고 가정한다.

$$|\omega_{actual}| < (1 + \epsilon)\omega_{max}, \quad (0 < \epsilon < 1) \quad (13)$$

식 (13)을 증분각 카운터(ΔC)에 대한 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$|\Delta C_{actual,i}| < (1 + \epsilon) \cdot 2^{M-1} \quad (14)$$

그러나 2, 3장에서 이미 언급한 바와 같이, 일반적인 각속도 계산방법으로는 보정된 증분각 카운터($\Delta C_i'$)의 절대값이 항상 2^{M-1} 을 넘을 수 없으므로 Figure 6과 같이 잘못 계산된다. 즉, $0 < \delta < \epsilon$ 를 만족하는 δ 에 대해 $C_i = (1 + \delta)2^{M-1}$, $C_{i-1} = 0$ 인 경우에 $\Delta C_i' = (1 + \delta)2^{M-1}$ 로 계산되지 않고 $\Delta C_i' = (1 - \delta)2^{M-1}$ 로 계산된다.

이 때, ω_{actual} 에 다음과 같은 제한 조건이 존재한다면 추가적인 2차 보정을 통하여 증분각을 실제의 물리량에 대응하는 값으로 다시 복구시킬 수 있다.

$$|\omega_{actual,i} - \omega_{actual,i-1}| < (1 - \epsilon)\omega_{max} \quad (15)$$

이는 연이은 두 각속도의 차이가 2장에서 기술한 일반적인 최대측정값 ω_{max} 의 $(1 - \epsilon)$ 배 보다 작음을 의미한다. 원래 측정하고자 하는 외부 입력 각속도는 $-\omega_{max} \sim \omega_{max}$ 의 범위 안에서 임의의 값을 가질 수 있으나 식 (15)는 외부 입력 각속도의 변화가 급격하지 않고 각속도의 변화에 제한이 있는 경우를 표현한다. 인공위성과 같은 시스템은 기동성능이 좋다 하더라도 빠른 동적 거동을 요구하지 않는 경우가 많으므로 이러한 제한 조건을 적용할 수 있는 경우가 많다.

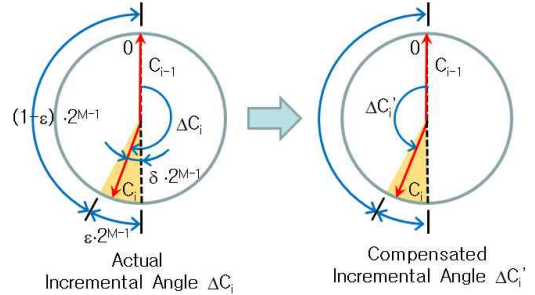


Figure 6. Wrong Computation of Compensated Incremental Angle Using the Conventional Method described in Chapter 3

식 (13)과 (15)를 만족하는 각속도 입력이 센서에 인가될 때의 2차 보정은 다음과 같다. 단, 2차 보정은 식 (16)의 조건을 만족하는 경우에만 수행한다. 편의상 3장에서 기술된 보정식을 1차 보정식, 4장에서 제안하는 보정식을 2차 보정식이라고 부르기로 한다.

$$\Delta C_i' \cdot \Delta C_{i-1}'' < 0 \quad (16)$$

인 경우에 한하여

$$i) (1 - \epsilon)2^{M-1} < \Delta C_i' < 2^{M-1} \quad (17)$$

인 경우

$$\Delta C_i'' = \Delta C_i' - 2^M \quad (18)$$

$$ii) -2^{M-1} < \Delta C_i' < -(1 - \epsilon)2^{M-1} \quad (19)$$

인 경우

$$\Delta C_i'' = \Delta C_i' + 2^M \quad (20)$$

iii) i) 과 ii)를 모두 만족하지 않는 경우

$$\Delta C_i'' = \Delta C_i' \quad (21)$$

와 같이 추가로 보정한다. 이 때, $\Delta C_i'$ 은 t_i 시간에서 1차 보정식에 의해 계산된 증분각 카운터이고 $\Delta C_{i-1}'$ 은 t_{i-1} 시간에서 2차 보정식에 의해 계산된 증분각 카운터이다.

식 (16)은 현재의 각속도 부호($\Delta C_i'/\Delta t$)가 바로 이전의 각속도($\Delta C_{i-1}'/\Delta t$)와 달라질 때를 의미한다. 이렇게 부호가 달라지는 경우는 크게 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫 번째는 각속도가 최대측정영역인 $-\omega_{\max} \sim \omega_{\max}$ 안에서 연속적으로 변할 때이고 두 번째는 각속도의 절대값이 ω_{\max} 를 넘어서는 순간이다. 첫 번째는 정상적인 경우이므로 부호가 바뀌는 것을 그대로 허용해야 한다. 그러나 두 번째의 경우는 각속도가 ω_{\max} 보다 커지거나 $-\omega_{\max}$ 보다 작아지는 순간에 1차 보정식에 의해 에일리어징(aliasing)이 일어나 불연속적으로 부호가 뒤집히는 경우이므로 부호가 뒤집히는 것을 방지해야 만 정확한 각속도를 계산할 수 있다. 1차 보정식은 최대측정영역을 넘어서는 각속도 입력이 들어온다 하더라도 이를 항상 최대측정영역 내의 각속도로만 환산하기 때문에 에일리어징 현상이 일어날 수 밖에 없다.

식 (17)~(20)은 불연속적으로 부호가 뒤집히는 두 번째의 경우에 한해, 각속도의 부호를 정상적으로 환원시키는 조건 및 방법을 나타내고 있다.

먼저, 식 (17)~(18)은 $-\omega_{\max}$ 보다 작은 음의 각속도가 인가될 때 각속도 부호를 보정하는 조건이다. Figure 7에서 보이는 1차 보정 증분각 카운터 $\Delta C_i'$ 은 실제 입력 각속도 $\omega_{\text{actual},i}$ 가 $(1-\delta)\omega_{\max}$ 인 경우 뿐 아니라 $-(1+\delta)\omega_{\max}$ 인 경우에도 3장의 계산 방법에 의하여 동일하게 $(1-\delta)2^{M-1}$ 로 계산된다. 이 때, $0 < \delta < \varepsilon$ 이다. 양의 각속도 입력, $(1-\delta)\omega_{\max}$ 에 대해서는 시계 방향으로 회전한 결과이고(Case A) 음의 각속도 입력, $-(1+\delta)\omega_{\max}$ 에 대해서는 반시계방향으로 회전한 결과이다(Case B). 하지만 양의 각속도, $(1-\delta)\omega_{\max}$ 가 인가된 Case A의 경우는 입력 각속도의 제한 조건인 식 (15)에 의하여

$$\omega_{\text{actual},i-1} > (\varepsilon - \delta)\omega_{\max} > 0 \quad (22)$$

가 성립한다. 여기서 (i-1) 시간에서의 2차 보정 증분각 카운터 $\Delta C_{i-1}'$ 은 실제 입력 각속도에 해당하는 정확한 증분각을 표현한다고 가정하면 $\Delta C_i'$ 뿐 아니라 $\Delta C_{i-1}'$ 도 양수가 되어 식 (16)이 만족되지 못한다. 그러므로 2차 보정된 증분각 카운터 $\Delta C_i'$ 은 $\Delta C_i'$ 와 동일하게 $(1-\delta)2^{M-1}$ 로 유지되어 정상적인 각속도를 계산하게 된다. 반면, 음의 각속도, $-(1+\delta)\omega_{\max}$ 가 인가된 Case B의 경우는 제한 조건 식 (15)에 의하여

$$\omega_{\text{actual},i-1} < -(\varepsilon + \delta)\omega_{\max} < 0 \quad (23)$$

가 성립하므로 (i-1) 시간에서의 2차 보정 증분각 카운터 $\Delta C_{i-1}'$ 가 음수가 되어 식 (16)을 만족하게 되고 조건 (17)에 부합하는 1차 보정 증분각 카운터 $\Delta C_i'$ 은 식 (18)에 의하여 2차 보정되어 $\Delta C_i' = -(1+\delta)2^{M-1}$ 의 값으로 환원된다. 그러므로 센서에 의해 측정, 계산되는 각속도는 실제와 동일하게

$$\omega_i = S \frac{-(1+\delta)2^{M-1}}{\Delta t} = -(1+\delta)\omega_{\max} \quad (24)$$

의 값을 가지게 된다.

식 (19)~(20)은 ω_{\max} 보다 큰 양의 각속도가 인가될 때 각속도 부호를 보정하는 조건이다. 이 경우는 Figure 8에서 보는 바와 같이 1차 보정 증분각 카운터 $\Delta C_i'$ 이 $-(1-\delta)2^{M-1}$ 의 값을 갖는다. 1차 보정 증분각 카운터가 $-(1-\delta)2^{M-1}$ 의 값을 갖는 경우도 $\omega_{\text{actual},i}$ 가 $(1+\delta)\omega_{\max}$ 인 경우 뿐 아니라 $-(1-\delta)\omega_{\max}$ 인 경우의 두 가지가 있다. $(1+\delta)\omega_{\max}$ 의 경우는 보정된 증분각을 한 번 더 롤 오버 시켜주어야 하며 $-(1-\delta)\omega_{\max}$ 의 경우는 보정된 증분각을 그대로 유지해주어야만 한다.

양의 각속도, $(1+\delta)\omega_{\max}$ 가 인가된 Case C의 경우는 식 (15)에 의하여

$$\omega_{\text{actual},i-1} > (\varepsilon + \delta)\omega_{\max} > 0 \quad (25)$$

가 되어 $\Delta C_{i-1}'$ 가 양수가 되므로 $\Delta C_i'$ 은 조건

(16)을 만족하게 되고 다시 조건 (19)에 의하여 롤오버되어 2차 보정 증분각 카운터 $\Delta C_i'$ 은 $(1+\delta)2^{M-1}$ 의 값으로 환원된다. 그러므로 각속도는

$$\omega_i = S \frac{(1+\delta)2^{M-1}}{\Delta t} = (1+\delta)\omega_{\max} \quad (26)$$

와 같이 정확한 값을 계산하게 된다. 음의 각속도, $-(1-\delta)\omega_{\max}$ 가 인가되는 Case D의 경우는 조건 (15)에 의하여 다음과 같은 부호를 갖는다.

$$\omega_{actual, i-1} < -(\epsilon - \delta)\omega_{\max} < 0 \quad (27)$$

한 스텝 이전의 각속도가 음의 각속도를 가지게 되므로 $\Delta C_{i-1}'$ 도 음수가 되어 식 (16)이 만족되지 못하고 $\Delta C_i' = -(1-\delta)2^{M-1}$ 의 값으로 유지되어 여전히 정확한 입력 각속도를 계산할 수 있게 된다.

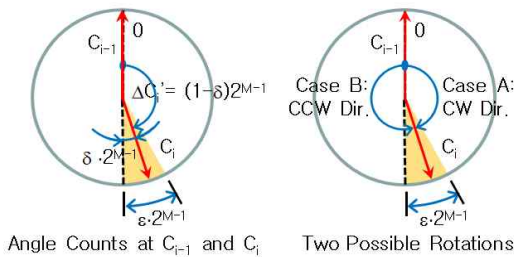


Figure 7 First Example of Two Different Rate Inputs Which Have Same Incremental Angle Count Using the Conventional Method

이와 같은 2차 보정이 정확하게 수행되기 위해서는 한 스텝 이전인 (i-1) 시간에서의 2차 보정 증분각 카운터 $\Delta C_{i-1}'$ 에는 에일리어징 현상이 존재하지 않는다는, 다시 말해, (i-1) 시간에서 측정, 계산된 각속도는 부호의 뒤집어짐 없이 실제 각속도를 잘 표현한다는 가정이 필요하다. 그러나 이러한 가정은 쉽게 만족될 수 있다. 센서에 인가되는 각속도 입력이 작은 상태에서 센서가

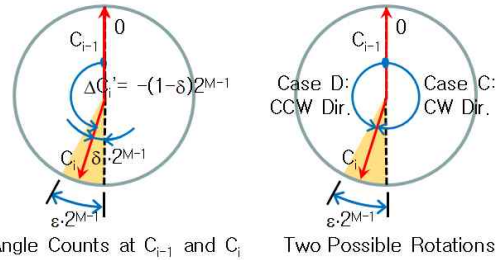


Figure 8 Second Example of Two Different Rate Inputs Which Have Same Incremental Angle Count Using the Conventional Method

한 번 정확한 값을 출력하기 시작하면 입력의 크기가 식 (13)을 만족하는 한 계속적으로 정확한 각속도를 계산해 내기 때문이다.

5. 모의실험을 통한 검증

3장에서 정리된 일반적인 각속도 계산 방법과 4장에서 제안된 최대측정영역을 확장시킬 수 있는 각속도 계산 방법의 성능을 비교, 분석하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 이 때, 자이로 센서의 누적각을 표현하는 이진 카운터는 16-비트이며 샘플링 주파수는 4Hz, 센서의 스케일 인자는 0.1 arcsec/LSB 라고 가정하였다. 그러므로 2~3장에서 기술된 일반적인 방법을 사용할 경우 센서의 최대측정 각속도는 다음과 같다.

$$\omega_{\max} = S \Delta C_{\max} / \Delta t = \frac{0.1}{3600} 2^{15} / 0.25 \quad (28)$$

$$= 3.6409 \text{ deg/sec}$$

센서의 최대측정 각속도를 넘어서는 입력에 대한 증분각 카운터의 거동을 관찰하기 위해 크기가 4.0 deg/sec, 주기 0.055Hz의 정현파 입력일 들어올 때의 누적형 각속도 센서출력을 Figure 9에 나타내었다.

입력 각속도의 크기가 최대측정값인 3.64 deg/sec 이하일 때는 센서의 출력이 정상적이지만 이를 넘어갈 때에는 비정상적인 값을 출력함을 확인할 수 있다. 이 때의 누적각 카운터 및 1

차 보정 증분각 카운터를 각각 Figure 10과 Figure 11에 나타내었다.

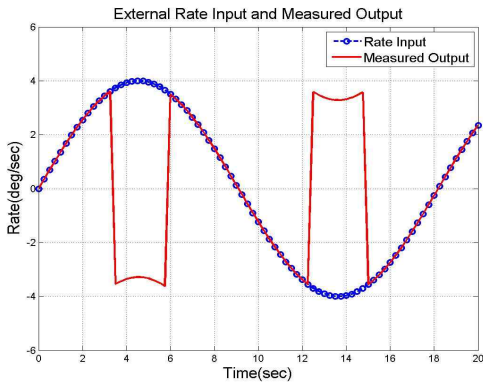


Figure 9 External Rate Input (Sinusoidal of 0.055Hz with 4 deg/sec) and Measured Output Using the Conventional Method

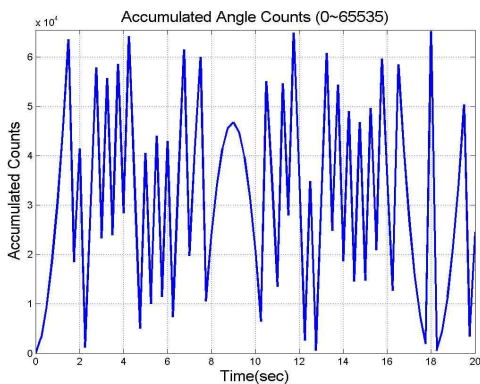


Figure 10 Accumulated Angle Counts for Sinusoidal Rate Input of 0.055Hz with 4 deg/sec Magnitude

Figure 11에 보이는 1차 보정 증분각 카운터의 절대값은 그 크기가 항상 $2^{15}=32768$ (Figure 11의 위아래 실선) 미만이어야 하므로 실제 입력 각속도가 이를 넘어서는 경우에는 에일리어징 현상이 발생하여 정확한 각속도 측정이 불가능하게 된다.

동일한 입력 각속도에 대하여 본 연구에서 제안된 방법을 적용한 결과는 Figure 12~Figure

14에 나타나 있다. 모의실험에서는 ε 을 0.15로 선정하였으며 이에 따라 제안된 방법이 갖는 최대측정영역은 식 (13)에 의해 4.187 deg/sec 까지 확장된다. 그 결과 Figure 12에서 보이는 바와 같이 4 deg/sec의 크기를 갖는 입력각속도를 왜곡 없이 정상적으로 잘 출력하는 것을 알 수 있다. Figure 13에서 보면 2차 보정 증분각 카운터는 32768을 넘어서는 값도 잘 표현하는 것을 확인할 수 있다.

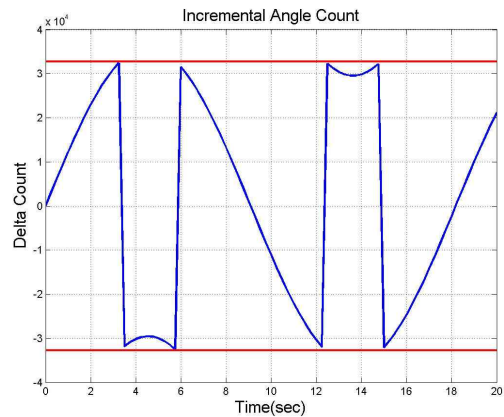


Figure 11 Compensated Incremental Angle Counts for Sinusoidal Rate Input of 0.055Hz with 4 deg/sec Magnitude Using the Conventional Method

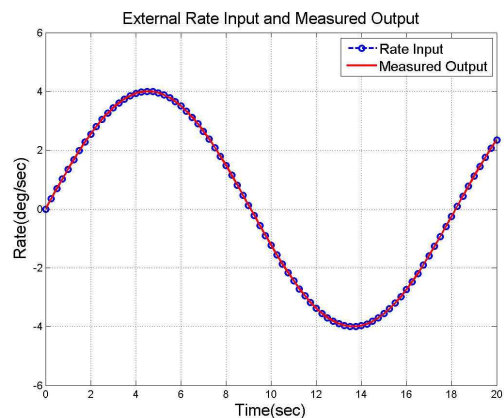


Figure 12 External Rate Input (Sinusoidal of 0.055Hz with 4 deg/sec) and Measured Output Using the Proposed Method

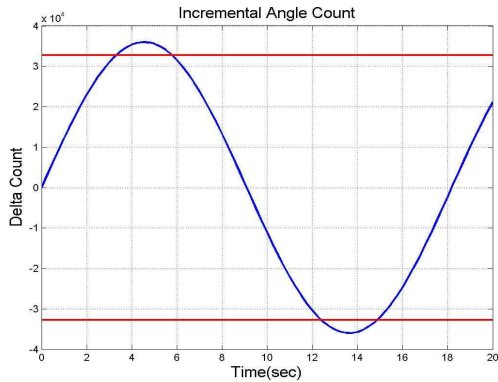


Figure 13 Compensated Incremental Angle Counts for Sinusoidal Rate Input of 0.055Hz with 4 deg/sec Magnitude Using the Proposed Method

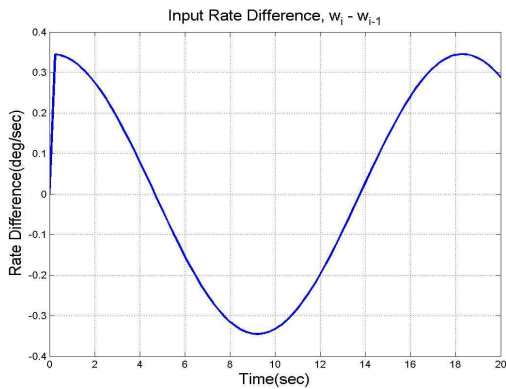


Figure 14 Input Rate Difference for Sinusoidal Rate Input of 0.055Hz with 4 deg/sec Magnitude

ε 을 0.15인 경우, 제안된 방법은 식 (15)에 의해 연이은 두 각속도의 차이가 3.0948 deg/sec 미만인 경우에만 적용할 수 있다. Figure 14에서 보이는 바와 같이 모의실험에서 사용한 0.055Hz 주기의 정현파는 각속도 차이가 0.35 deg/sec 보다 작아 조건을 충분히 만족하므로 센서가 정상적인 출력력을 내고 있으나 만약 주기가 빨라져 연이은 두 각속도의 차이가 3.0948 deg/sec을 넘게 되면 제안된 방법을 적용하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 이를 확인하기 위해 입력 각속도의 주기를 0.055Hz에서 0.66Hz까지 증가시켜 보았고 그 결

과를 Figure 15와 Figure 16에 나타내었다.

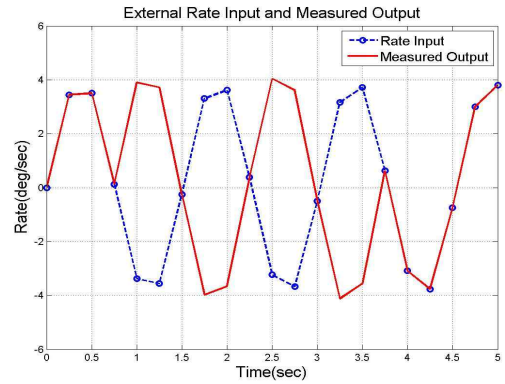


Figure 15 External Rate Input (Sinusoidal of 0.66Hz with 4 deg/sec) and Measured Output Using the Proposed Method

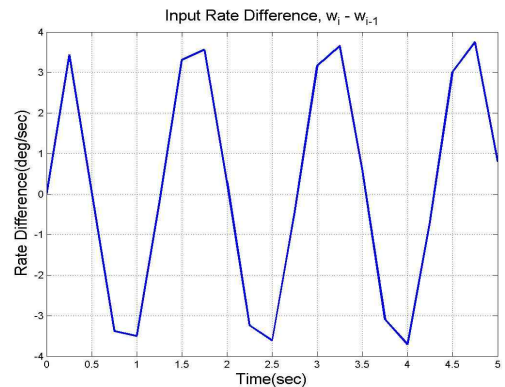


Figure 16 Input Rate Difference for Sinusoidal Rate Input of 0.66Hz with 4 deg/sec Magnitude

Figure 16을 보면 알 수 있듯이 주기 0.66Hz의 정현파에는 연이은 두 각속도의 차이가 3.0948 deg/sec을 넘어서는 구간이 존재한다. 이 구간의 입력에 대해서는 제안된 방법이 경우에 따라 정상인 각속도를 계산하지 못하고 있음을 Figure 15에서 확인할 수 있다. 만약 ε 을 0.15보다 더 키운다면 센서가 측정할 수 있는 각속도 영역은 더 증가하지만 입력 각속도의 변화에 대한 제한이 더 커지게 된다. 예를 들어 ε 이 0.3이 되면 센서는 4.7332 deg/sec 까지 측정할

수 있으나 연이은 두 각속도의 변화가 2.5486 deg/sec 이상인 입력 각속도에 대해서는 측정이 불가능해진다. 그러므로 입력 각속도의 최대 크기 및 변화에 대해 적절히 ε 을 선정하는 것이 바람직하다.

추가적으로, 정현파가 아닌 임의의 입력 각속도에 대한 일반적인 방법과 제안된 방법의 각속도 계산 결과는 각각 Figure 17과 Figure 18에 나타나 있다.

이상의 모의실험 결과를 통해서 볼 때, 제안된 방법은 일반적인 방법이 갖는 측정영역의 제한을 넘어서는 입력 신호를 왜곡 없이 정확히 계산해냄을 확인할 수 있었고 4장에서 유도된 수식들 - 확장된 측정영역과 제안된 방법이 갖는 한계를 표현한 수식이 정확히 일치함을 확인할 수 있었다.

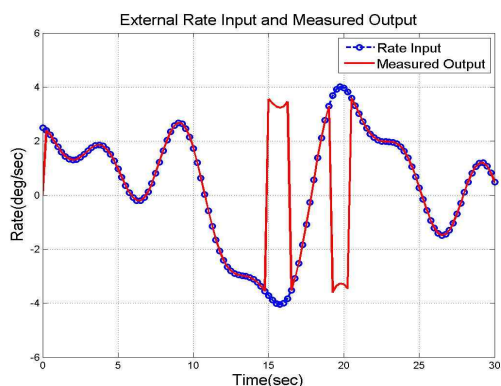


Figure 17 Arbitrary External Rate Input and Measured Output Using the Conventional Method

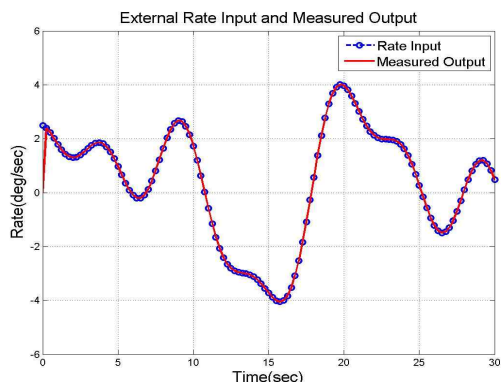


Figure 18 Arbitrary External Rate Input and Measured Output Using the Proposed Method

6. 결 론

본 연구에서는 누적형 자이로 센서 데이터의 일반적인 신호처리 방법과 이 방법이 가지는 측정영역의 한계를 기술하였다. 그리고 이 한계를 넘어서 출력 범위를 확장시키는 신호처리 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 입력 각속도 신호의 크기 변화가 특정값 이하로 작다는 가정이 있을 경우에 적용가능하며 각속도의 크기 변화에 따른 확장 가능 영역을 수학적으로 유도하였다. 모의 실험을 통하여 일반적인 방법과 제안된 방법을 비교하였으며 제안된 방법의 효율성을 확인하였고 입력 각속도의 변화에 따른 확장 가능 영역을 정량적으로 검증하였다.

REFERENCE

1. G. Siouris, *Aerospace Avionics Systems*, Academic Press, 1993
2. G. Natanson, Effect of Variations in IRU Integration Time Interval On The Accuracy of Aqua Attitude Estimation, Memo, CSC, 2003
3. Shi-Hwan Oh, Analysis of Roll-over Phenomenon of GRA Output and an Anti-Aliasing Logic Design, KARI-SCT-TN-2009-008, 2009