

타코 펄스 불균일성이 존재하는 반작용휠의 속도측정 방법 오차 분석

오시환*, 용기력**

Error Analysis of Reaction Wheel Speed Detection Methods Due to Non-uniformity of Tacho Pulse Duration

Shi-Hwan Oh*, Ki-Lyuk Yong**

Abstract

Two conventional speed detection methods (Elapsed-time method and Pulse-count method) are analyzed and compared for a high speed motor with digital tacho pulse with non-uniformity. In general, the elapsed-time method usually has better performance than a pulse-count method in case sufficiently high speed clock is used to measure the time difference. But if a tacho pulse non-uniformity exists in the reaction wheel - most of reaction wheel has a certain amount of non-uniformity - the accuracy of the elapsed-time method is degraded significantly. Thus the performance degradation is analyzed with respect to the level of non-uniformity of tacho pulse distribution and an allowable bound is suggested.

초 록

인공위성 반작용휠의 속도측정은 크게 펄스 개수 측정 방법과 펄스 간 시간 측정 방법으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 반작용휠의 타코 펄스에 불균일성이 존재할 때 두 가지 방법들에 대한 오차 분석이 이루어졌다. 펄스 간 시간 측정 방법은 고속에서는 시간 측정에 사용되는 고주파 클럭에, 저속에서는 시간 측정에 사용되는 펄스 개수에 크게 영향을 받지만 이 값들을 잘 선택함으로써 분해능 및 정밀도가 펄스개수 측정 방법보다 항상 더 좋도록 설계할 수 있다. 그러나 반작용휠의 타코 펄스 간격에 불균일성이 존재할 때에는 측정 정확도가 저하된다. 본 연구에서 저하되는 측정 정확도를 정량적으로 분석하였으며 그 결과 시간 측정에 사용되는 펄스 개수를 늘림으로써 저하 되는 성능을 향상시킬 수 있음을 해석적으로 검증하였다.

키워드 : 인공위성(Satellite), 반작용휠(Reaction Wheel), 속도측정(Speed Detection), 불균일성(Non-uniformity)

접수일(2008년12월17일), 수정일(1차 : 2009년 9월 7일, 2차 : 2009년 9월 17일, 게재 확정일 : 2009년 11월 1일)

* 위성제어팀/oshysh@kari.re.kr

** 위성제어팀/klyong@kari.re.kr

1. 서 론

반작용휠의 회전 속도를 측정하는 방법은 펄스 개수 측정 방법 (M-method or Pulse-count method), 펄스 간 시간 측정 방법 (T-method or Elapsed-time method), M/T method, CSDT를 이용한 방법, Double-Buffered method 등이 있다. 이들 방법에 대한 분해능, 정밀도 등은 이미 여러 문헌[1~3]들을 통하여 해석된 바 있고 모터의 비선형성 (Non-linearity) 및 부정확성 (Non-ideality)을 고려한 성능 분석도 수행되었다.

본 연구에서는 이러한 방법들 중 펄스 간 시간 측정 방법과 펄스 개수 측정 방법의 속도 측정 오차에 대하여 기술하였다. 먼저 타코 펄스의 불균일성이 없을 때 즉, 타코 펄스가 일정한 간격으로 배열되어 있을 때 두 가지 방법의 측정 속도와 분해능을 간단히 요약하였다. 그리고 불균일성이 존재할 때 추가적으로 발생하는 오차를 간단한 불균일 타코 펄스 모델을 이용하여 해석적으로 구하였다.

2. 불균일성이 없는 타코 펄스에 대한 속도 측정 및 분해능

2.1 펄스 개수 측정 방법

반작용휠의 속도측정 방법 중 위성에서 가장 많이 사용되는 펄스 개수 측정 방법(M-method or Pulse-count method)[4]은 정해진 시간 안에 반작용휠에서 발생하는 펄스의 개수를 측정하여 이를 속도로 환산하는 방법이다. 이의 측정 원리를 간단하게 그림으로 표현하면 그림 1과 같다. P는 한 바퀴 회전 시 발생하는 펄스의 개수, T는 측정 주기, m_1 은 측정주기 동안 발생하는 펄스의 개수라 할 때 펄스 개수 측정 방법의 회전 속도 ω_m 은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\omega_M = \frac{60m_1}{PT} \text{ (rpm)} \quad (1)$$

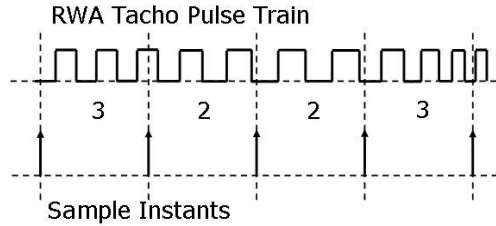


그림 1. 펄스 개수 측정 방법의 원리

이 방법의 분해능은 측정 주기 동안 발생하는 펄스의 개수를 한 개 놓칠 때 발생하는 속도측정 오차와 같으므로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$R_M = \frac{60m_1}{PT} - \frac{60(m_1 - 1)}{PT} \quad (2)$$

$$= \frac{60}{PT} \text{ (rpm)}$$

$P=108$, $T=0.25$ 초일 때 펄스 개수 측정 방법의 분해능은 그림 2와 같다. 펄스 개수 측정 방법에서는 반작용휠의 회전 속도에 관계없이 분해능이 일정하며 이는 한 바퀴 당 발생하는 펄스의 개수가 많을수록, 펄스 개수를 측정하는 시간 간격(측정 주기)이 길수록 향상된다.

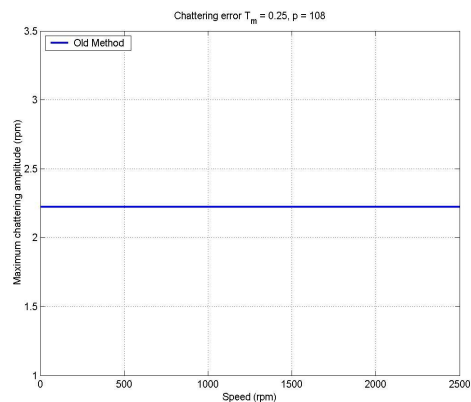


그림 2. 펄스 개수 측정 방법의 회전속도에 따른 분해능의 변화

2.2 펄스 간 시간 측정 방법

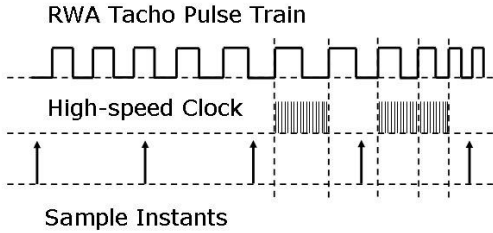


그림 3. 펄스 간 시간 측정 방법의 원리

펄스 간 시간 측정 방법(T-method, Elapsed-time method)[4]은 반작용휠의 펄스가 미리 정해 놓은 개수만큼 발생할 때까지 걸리는 시간을 측정하여 속도를 계산하는 방법이며 그 원리는 그림 3에 나타나 있다. 이 방법에서는 시간 간격을 측정하기 위하여 고주파 클럭이 추가로 사용된다. 이 방법으로 측정되는 회전 속도 ω_T 는 식 (3)과 같이 계산되며

$$\omega_T = \frac{60fN}{Pm_2} \text{ (rpm)} \quad (3)$$

이 방법의 분해능은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$R_T = \frac{\omega^2 P}{60fN + \omega P} \text{ (rpm)} \quad (4)$$

이 때, f 는 시간측정을 위해 사용되는 고주파 클럭의 주파수이고, N 은 시간이 측정될 반작용휠 펄스의 간격이고 m_2 는 N 개의 반작용휠 펄스가 발생하는 동안 생성되는 고주파 클럭 펄스의 개수이다. $f=20\text{MHz}$ 일 때 다양한 펄스 간격(N)에 대한 펄스 간 시간 측정 방법의 분해능은 그림 4에 나타나 있고 $N=1$ 일 때 다양한 고주파 클럭(f)에 대한 펄스 간 시간 측정 방법의 분해능은 그림 5에 나타나 있다. 이 방법은 펄스 개수 측정 방법과 달리 반작용휠의 회전 속도에 따라 분해능이 달라진다는 특징이 있다. 속도가 커질수록 분해능이 저하되며 이유는 속도가 커질수록

펄스가 발생하는 시간 간격이 짧아지기 때문이다. 또한, 시간 측정에 사용되는 펄스 개수(N)가 커질수록 측정 시간이 길어져 분해능이 향상되며 고주파 클럭의 주파수가 증가할수록 측정되는 시간의 정밀도가 향상되어 속도 측정의 분해능도 함께 향상된다.

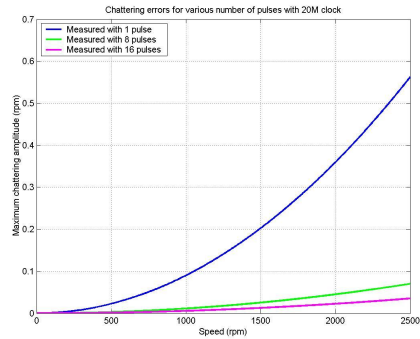


그림 4. 펄스 간 시간 측정 방법의 회전속도에 따른 분해능의 변화 ($f=20\text{MHz}$, $N=1,8,16$)

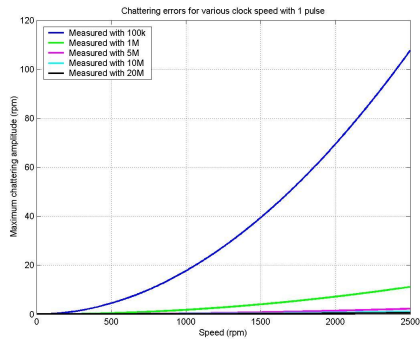


그림 5. 펄스 간 시간 측정 방법의 회전속도에 따른 분해능의 변화 ($N=1$, $f=0.1,1,5,10,20\text{MHz}$)

3. 불균일성이 존재하는 타코 펄스에 대한 속도 측정 오차

3.1 타코 펄스의 불균일 모델

실제 반작용휠이 한 바퀴 회전하는 동안 발생하는 타코 펄스의 개수가 P 일 때 이 타코 펄스

의 간격(각도)은 평균적으로 $2\pi/P$ 이다. 이상적인 경우에는 펄스 간의 간격이 균일하지만 실제는 약간의 편차가 존재한다. 이러한 불균일의 영향이 각각의 속도측정 방법에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 반작용휠에 존재하는 대한 타코 펄스의 불균일 모델을 그림 6과 같이 구성하였다.

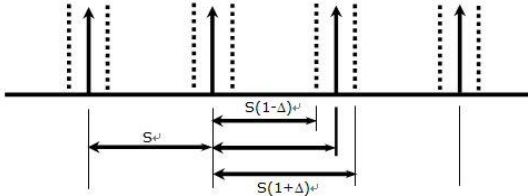


그림 6. 타코 펄스의 불균일 모델

이 때,

$$S = \frac{2\pi}{P} \quad (5)$$

이다. 각각의 타코 펄스는 타코 펄스는 최대 Δ 만큼의 불균일성(불균일 비율)을 가질 수 있다고 가정하므로 위치 오차가 $\pm\Delta S$ 가 되며 이어지는 타코 펄스 간에 발생할 수 있는 최대 간격 오차는 $2\Delta S$ 가 된다. 이 때 Δ 는 최대 0.5의 값을 가질 수 있다. 이 모델에서 볼 때, 시간 측정을 위해 사용되는 펄스 사이의 최대 간격 오차는 N 에 상관없이 $2\Delta S$ 가 된다.

3.2 타코 펄스의 불균일성이 존재할 때 펄스 개수 측정 방법의 측정 오차

펄스 개수 측정 방법에서는 일정한 시간동안 발생하는 펄스의 개수를 측정하므로 펄스 발생에 불확실성이 존재하더라도 큰 영향을 받지 않는다. 분해능(측정 오차) 계산 시 이미 한 개의 펄스를 놓치거나 더했을 때의 영향이 고려되어 있으므로 불확실성으로 인해 추가적으로 발생하는 오차의 크기는 미미하다.

타코 펄스에 불균일성이 존재할 때 각 펄스의

위치 오차는 $\pm\Delta S$ 를 벗어나지 않아 최대 한 펄스 이상의 오차가 발생할 수 없으므로 펄스개수 측정 방법으로 측정된 속도는 타코 펄스의 불균일성에 대해 크게 영향을 받지 않는다.

3.3 타코 펄스의 불균일성이 존재할 때 펄스 간 시간 측정 방법의 측정 오차

반작용휠의 불균일성은 미세한 타코 펄스의 위치 변화를 발생시켜 측정되는 펄스 간 시간을 변화시키므로 펄스 간 시간 측정 방법은 타코 펄스의 불균일성에 대해 큰 영향을 받게 된다. 펄스 간 시간 측정 방법에서 불균일성 Δ 에 대해 추가적으로 발생하는 오차는 다음과 같이 유도된다. 불균일성으로 인해 고주파 클럭의 개수 m_2 는 다음과 같이 변화된다.

$$m_2' = \frac{(N+2\Delta)}{N} m_2 \quad (6)$$

즉, 불균일 비율만큼 고주파 클럭의 개수도 변화된다. 이 때, 시간 측정에 사용되는 펄스 개수 N 에 상관없이 불균일성은 항상 2Δ 만큼의 영향만을 미치게 됨을 알 수 있다. 이 불균일성은 각각의 펄스의 위치 변화만이 반영된 값이며, 앞, 뒤의 펄스의 위치 변화와는 무관하므로 펄스 개수 N 이 증가하더라도 불균일성으로 인한 오차는 누적되지 않는다. 그러므로 N 이 커질수록 불균일성이 미치는 영향은 상대적으로 작아지게 된다.

그러므로 불균일성이 존재할 때 발생하는 추가적인 속도 측정 오차는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\begin{aligned} R_T' &= \frac{60fN}{Pm_2'} - \frac{60fN}{Pm_2} \\ &= \frac{60fN}{Pm_2} \left(1 - \frac{N}{N+2\Delta}\right) \\ &= \omega_T \frac{2\Delta}{N+2\Delta} \text{ (rpm)} \end{aligned} \quad (7)$$

타코 펄스의 불균일성으로 인해 추가적으로 발생하는 오차는 고주파 클럭에는 무관하며 시간 측정에 사용되는 펄스 개수 N 과 불균일성 Δ 만의 함수가 된다. $P=108$, $T=0.125$ 초, $f=1$ MHz, $\Delta=5\%$ 일 때 발생하는 오차를 그림 7에 그려 보았다.

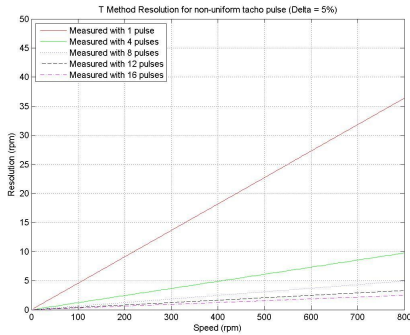


그림 7. 불균일성 존재 시 펄스 간 시간 측정 방법에서 추가적으로 발생하는 속도 측정 오차 ($\Delta=5\%$)

$N=1$ 일 때 800 rpm에서 최대 36rpm의 측정 오차가 발생하며 반작용휠의 회전 속도가 낮아질수록 추가적으로 발생하는 오차는 줄어든다. 그러므로 펄스 간 시간 측정 방법은 타코 펄스의 불균일성으로 인해 측정 속도가 심각한 영향을 받는다는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 N 을 점점 증가시킬수록 펄스의 불균일성으로 인해 추가적으로 발생하는 오차는 현저하게 감소한다. 이는 역시 그림 7에 나타나 있다. N 이 증가할수록 오차가 현저하게 감소하는 이유는 다음과 같다. N 에 상관없이 속도 측정에 사용되는 펄스 간 간격의 최대 오차는 $2\Delta S$ 이나 N 이 클수록 측정되는 시간이 크므로 상대적으로 측정 시간에 대한 오차의 비율이 점점 줄어들게 되어 전체적인 속도 추정의 오차가 줄어드는 것이다. 대략적으로 $N=10$ 이상일 때 펄스개수 측정 방법보다 좋은 성능을 가진다.

$\Delta=10\%$ 일 때 발생하는 오차는 그림 8에 나타나 있다. $\Delta=5\%$ 인 경우 보다 전체적으로 오차가 커졌으며 16개의 펄스 간격을 측정해야만 펄스개

수 측정 방법의 오차와 유사한 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

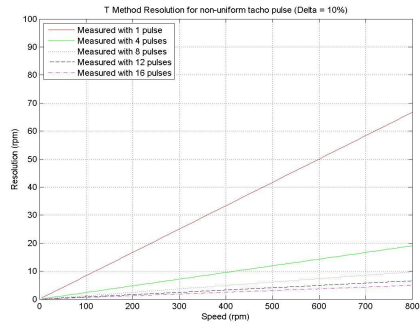


그림 8. 불균일성 존재 시 펄스 간 시간 측정 방법에서 추가적으로 발생하는 속도 측정 오차 ($\Delta=10\%$)

불균일성의 변화에 대한 발생 오차를 그림 9에 나타내었다. 불균일성이 커짐에 따라 이에 의해 발생하는 정밀도는 거의 비례적으로 커진다. 분해능과 마찬가지로 정밀도 역시 N 에 반비례하므로 펄스 간 시간 측정 방법은 N 을 크게 하여 측정하는 것이 불균일성에 의한 속도 측정의 오차를 줄이는 데 유리하다. 그러나 N 을 증가시키면 저속에서의 가감속 시 속도 측정 오차가 커지므로[5] 반작용휠의 개수, 운용 속도 범위 등 여러 가지 요인들을 파악하여 N 을 적절히 선정하는 것이 바람직하다.

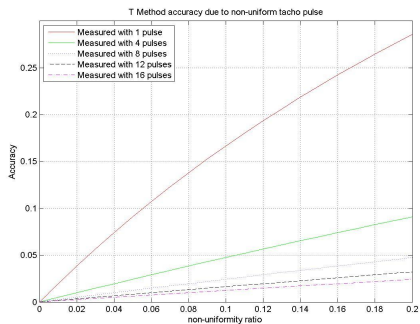


그림 9. 불균일성에 따른 펄스 간 시간 측정 방법에서의 속도 측정 오차의 변화

5. 결 론

반작용휠에 존재하는 타코 펄스의 위치(또는 간격) 불균일성이 존재할 때 펄스개수 측정 방법은 그 영향이 무시할 만큼 작으나 펄스 간 시간 측정 방법은 심각한 영향을 받음을 해석적으로 증명하였다. 이를 해결하기 위해서는 시간 측정에 사용되는 펄스 개수를 늘려야 하며 불균일성 (Δ)이 5% 이고 샘플링 주파수($1/T$)가 8Hz 일 때 10개 이상의 펄스 개수(N)를 시간 측정에 사용해야만 800Hz 미만의 회전 속도에서 펄스개수 측정 방법보다 나은 성능을 가지게 된다. 그러나 펄스 개수(N)를 늘리면 가속 또는 감속 시 저속에서의 속도 측정 오차가 증가하므로 0 rpm 근처에서의 구동이 없는 4개의 반작용휠을 모두 사용할 때에 적용하는 것이 유리하다.

참 고 문 헌

1. T. Ohmae, T. Matsuda, A Microprocessor-Controlled high-Accuracy Wide-Range Speed Regulator for Motor Drives, IEEE Trans on Ind. Elec. Vol IE29, No 3, pp. 207~211, 1982
2. R. Kavanagh, Improved Digital Tacho-meter with Reduced Sensitivity to Sensor Non-ideality, IEEE Trans on Ind. Elec. Vol 47, No 4, pp. 890~897, 2000
3. K. Fujita, K. Sado, Instantaneous Speed Detection with Parameter Identification for ac Servo Systems, IEEE Trans on Ind. App. Vol 28, No 4, pp. 864~872, 1992
4. 오시환, 이혜진, 이선호, 용기력, 반작용휠 속도측정방법의 오차 분석, 한국우주과학회지, 제25권 4호, pp. 481~490
5. 이혜진, 오시환, 임조령, 최홍택, 용기력, 각속도 및 각가속도에 의한 반작용휠의 속도측정 오차 분석, 항공우주시스템공학회 2007 추계 학술대회논문집