

디더 운동 측정치 모델 기반 링레이저 자이로 스트리핑 방법

김천중^{*,1)} · 심규민¹⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제3기술연구본부

Stripping Method of Ring Laser Gyroscope Based on Measurement Model of Dither Motion

Cheon-Joong Kim^{*,1)} · Kyu-Min Shim¹⁾

¹⁾ The 3rd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 17 December 2013 / Revised 30 May 2014 / Accepted 13 June 2014)

ABSTRACT

There are trapping and stripping methods as the technique to remove the dither motion from RLG(Ring Laser Gyro) output. V/F converter output of angular sensor to measure the dither motion is used in stripping method. But bias and scale factor error is always included in V/F converter output and is a critical limiting factor for the wide application of stripping method to RLG. Therefore there have been many researches to solve this problem. The method to accurately estimate the bias and scale factor error of V/F converter using measurements of the angular sensor acquired at data sampling rate of INS is presented in this paper. To this end, stripping technique based on model of dither motion is newly applied.

Key Words : Ring Laser Gyroscope(링레이저 자이로), Stripping Method(스트리핑 방법), Dither(레이저 공진 각진동), Inertial Navigation System(관성항법장치)

1. 서론

광학식 자이로의 일종인 링레이저 자이로는 서로 반대 방향으로 진행하는 빛을 간섭시켜 발생한 간섭 주파수가 외부에서 인가된 회전에 의하여 서로 달라지는 원리를 이용하여 각속도를 측정하는 관성센서이다. 이와 같은 링레이저 자이로의 기본 동작원리를 사

낙 효과(Sagnac effect)라 하며 대부분의 광학식 자이로가 이 원리를 이용하여 각속도를 측정한다¹⁾. 그러나 링 형태의 폐쇄된 경로를 통하여 서로 반대 방향으로 레이저를 발진시키기 위해서는 반사경을 통하여 레이저의 방향을 바꾸어야 한다. 이 과정에서 반사경 산란에 의하여 작은 입력 각속도가 측정되지 않는 lock-in 현상이 발생한다. 그러므로 링레이저 자이로 설계시 lock-in을 피하기 위한 많은 방법이 제안되었다. Lock-in을 제거하는 방법으로써 광학 바이어스에 의하여 서로 반대 방향으로 발진하는 두 레이저의 주

* Corresponding author, E-mail: kcj3651@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

과수가 일정한 크기 이상의 차이를 갖도록 하는 광학적 방법과²⁾, 디더(dither)라 불리는 비틀림 스프링을 레이저 공진기와 케이스 사이에 부착하여 링레이저에 일정한 크기 이상의 정현파 진동을 인가하는 기계적 방법이 있다³⁾. 현재 가장 널리 사용되고 있는 방법은 기계적인 방법으로써 이 방법 적용시 링레이저 출력에는 항상 큰 정현파 디더 운동이 링레이저 자이로 출력에 포함되어 나타나기 때문에 외부에 인가된 입력 각속도를 정확히 알기 위해서는 디더 운동에 의한 출력을 제거하여야 한다. 디더 운동을 제거하기 위하여 널리 이용되는 방법으로 트래핑(trapping) 방법과 스트리핑(striping) 방법 등이 있다⁴⁻⁶⁾.

트래핑 방법은 링레이저 자이로에 인가된 디더 운동 주기에 맞추어 자이로 출력을 적분하여 디더 운동을 제거하여 외부에서 인가된 각속도 성분만을 출력하는 방법이다. 그러므로 디더 운동 주기마다 정확한 자이로 측정치가 획득 가능하나 다른 시점의 출력은 획득이 불가능하여 관성항법장치 구성시 3개의 서로 다른 디더 운동 주파수를 가지는 링레이저 자이로를 이용하기 때문에 자이로 측정치 획득 시점을 일치시킬 수 없다는 단점이 있다. 그러므로 항법 계산시 가속도계/자이로 측정시점 불일치에 의한 추가적인 항법 오차의 발생가능성이 존재하며 디더 운동 주파수가 낮은 경우 coning 및 sculling 오차와 같은 동적오차 보상이 어려워 항법 성능이 저하될 가능성이 존재한다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 관성항법장치 데이터 획득주기에 맞추어 트래핑 출력을 보간(interpolation)하여 관성항법장치의 성능을 개선하는 방법도 제안되었다.

스트리핑 방법은 이러한 문제점을 보완하기 위한 것으로서 광학적인 방법과 전기적인 방법이 있다. 광학적인 스트리핑 방법은 Bohm에 의해 연구되었다⁷⁾. 전기적인 스트리핑 방법은 디더 운동을 측정할 수 있는 센서를 추가적으로 링레이저 자이로에 부착하여 여기에서 측정된 데이터를 이용하여 디더 운동을 제거하는 방법이다. 디더 운동을 검출하는 센서로는 각 센서와 각속도 센서가 있으며 각 센서는 디더에 압전소자의 일종인 피에조 센서가 사용되며 각속도 센서는 링레이저 자이로 몸체에 부착된 자석과 자이로 하우징에 부착된 코일로 구성되어 서로간의 상대운동을 측정하는 전자기센서가 사용된다.

전기적인 스트리핑 방법은 센서를 이용하여 디더 운동을 계측하고 이를 VF(Voltage to Frequency) 변환하여

링레이저 자이로 출력에서 이를 빼줌으로써 디더 운동을 제거하는 방법이다. 정확한 스트리핑을 위해서는 링레이저 자이로 출력과 VF 출력의 위상 및 진폭이 일치하여야 디더 운동이 완전히 제거된다. 그러나 VF 출력의 위상 및 진폭은 링레이저 자이로 전 온도 운용구간에서 서서히 변한다. 특히 VF 출력에는 전기적인 offset 전압에 의하여 시간에 따라 변하는 바이어스 성분이 존재한다. 이와 같은 상황에서 스트리핑 방법을 적용하는 경우 매우 큰 항법오차가 발생되게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 위상이 변하지 않는다는 가정에서 바이어스 성분을 제거하기 위하여 VF 출력을 미분한 후 미분에 의하여 90도 위상 변환된 신호를 위상 보정하여 스트리핑 하는 방법이 제안되었다⁸⁾. 이 방법은 바이어스 성분이 상수인 경우에 유효한 방법이며 디더 주기마다 진폭이 변하는 디더 운동 특성상 미분을 하면 진폭 변화가 발생하여 추가적인 잡음이 발생한다. 그러므로 VF 출력의 미분없이 바이어스 성분을 실시간으로 보정할 수 있다면 이 방법이 보다 더 우수한 방법이 될 수 있다. 특히 VF 신호의 위상 및 진폭 변화는 VF 설계시 사용되는 소자를 온도에 따라 특성이 변하지 않는 소자를 선정하여 최소화 가능하기 때문에 VF 출력에 포함된 바이어스 성분의 완전한 제거가 가능하다면 스트리핑 방법의 성능개선이 가능하다.

본 논문에서는 각속도 센서를 이용하는 전기적인 스트리핑 방법에 있어서 VF 출력의 바이어스 성분을 정확하게 보상하고 VF 출력과 링레이저 자이로 출력간의 진폭을 일치시키기 위한 이득을 계산하는 방법을 제시한다. 이를 위하여 관성항법장치 데이터 획득 주기에 맞추어 고속으로 획득되는 디더 운동 측정치에 대한 모델링 결과를 제시하였으며 모델 기반으로 VF 바이어스를 정확하게 추정하는 방법을 제안하였다. 또한 모델기반으로 VF 출력의 이득을 계산하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서 제안된 방법의 성능을 검증하기 위하여 시험을 수행하였다. 시험결과 본 논문에서 제안한 디더 운동 측정치 모델 기반의 스트리핑 방법이 매우 우수한 성능을 가지고 있음을 확인하였다. 본 논문의 구성은 2장에서 본 논문에서 제시한 스트리핑 방법에 대하여 기술하였으며 3장에서 본 논문에서 제시한 스트리핑 방법의 성능을 검증하기 위한 시험 수행결과를 제시하고 4장에서 본 논문의 결론을 맺도록 한다.

2. 디더 운동 측정치 기반 스트리핑 설계

2.1 디더 운동 측정치 모델링

앞에서 언급한 바와 같이 스트리핑 방법은 전자기 센서를 이용하여 디더 운동에 해당하는 각속도를 측정하여 링레이저 출력을 보상함으로써 디더 운동을 제거하는 방식을 이용하기 때문에 스트리핑 전에 VF 출력과 링레이저 출력간의 진폭 및 위상을 동기시켜야 하며 VF offset 전압에 의해서 발생하는 바이어스 성분을 보상하여야 한다. 이러한 전자기 센서 출력의 오차는 자이로 내부온도의 상승으로 인하여 전자기 센서 및 VF와 같은 신호처리부의 특성 변화에 기인한다. 따라서 장시간 비행하는 항체에 적용시 주기적 또는 실시간으로 링레이저 출력과 전자기 센서 출력 상호간의 진폭 및 위상 불일치를 보상해주어야 하며 바이어스 성분은 실시간으로 연속적으로 보상하여야 한다.

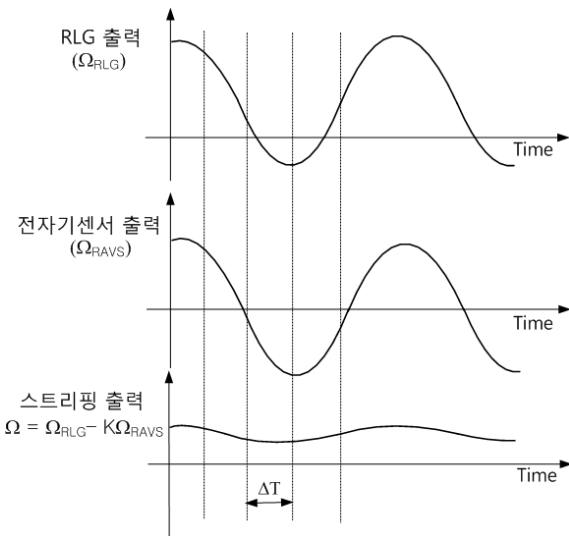


Fig. 1. The principle of stripping method

현재 스트리핑 방법을 사용하기 위해서 전자기 센서 출력과 링레이저 출력의 진폭을 맞추기 위하여 식 (1)과 같이 초기 정지상태에서 30초간의 측정치에 대한 표준편차를 이용하여 척도계수를 구하여 사용하며 위상은 링레이저 자이로 제작시 시험을 통하여 하드웨어적으로 동기시킨다. 또한 바이어스 성분은 VF 출력의 미분을 통하여 제거한 후 위상을 이동시켜 새로운 VF 출력을 생성하는 방법을 적용하고 있다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

$$\Omega = \Omega_{RLG} - K\Omega_{RAVS} \quad (1)$$

$$K = \frac{STD(\Omega_{RLG})}{STD(\Omega_{RAVS})}$$

식 (1)에서 K는 링레이저 출력과 전자기 센서 출력간의 진폭차이를 보정하기 위한 척도계수이며 STD(Ω_{RLG}), STD(Ω_{RAVS})는 디더 운동이 포함된 링레이저 및 전자기 센서 출력의 표준편차이다.

스트리핑 방법의 오차해석을 위하여 전자기 센서 출력의 위상, 진폭 및 바이어스가 변한다고 가정하여 링레이저 및 전자기 센서 출력을 모델링하면 식 (2), (3)과 같다. 식 (2), (3)에서 S_x , R_x 는 각각 전자기 센서 및 링레이저 출력이며 β_x 는 디더 운동의 주파수, A_x 는 디더 운동의 진폭, Ω_x 는 외부에서 인가된 각속도 성분, B_x 는 전자기 센서 출력의 진폭, δA_x 는 전자기 센서 출력의 진폭오차, ϕ_x 는 전자기 센서 출력의 위상오차, δS_x 는 전자기 센서 출력의 바이어스이다.

$$R_x = A_x \sin(\beta_x t) + \Omega_x \quad (2)$$

$$S_x = K \cdot B_x \sin(\beta_x t + \phi_x) + \delta S_x \quad (3)$$

$$= (A_x + \delta A_x) \sin(\beta_x t + \phi_x) + \delta S_x$$

위의 경우 두 측정치의 진폭 및 위상이 일치하며 전자기 센서의 바이어스 성분이 없다고 가정하면 외부에서 인가된 각속도 성분인 Ω_x 가 식 (2), (3)의 차 $\hat{\omega}_x$ 를 구하여 정확하게 측정된다. 그러나 두 측정치의 진폭 및 위상이 다르고 바이어스 성분이 존재하면 식 (4)와 같이 오차가 포함된 각속도 측정치가 계산되며 스트리핑 방법에 의해서 발생된 오차를 식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$\hat{\omega}_x = \omega_x + \delta\omega_x = R_x - S_x = \Omega_x + \delta A_x \sin(\beta_x t + \phi_x) - 2A_x \sin\left(\frac{1}{2}\phi_x\right) \cos\left(\beta_x t + \frac{1}{2}\phi_x\right) - \delta S_x \quad (4)$$

$$\delta\omega_x = \delta A_x \sin(\beta_x t + \phi_x) - 2A_x \sin\left(\frac{1}{2}\phi_x\right) \cos\left(\beta_x t + \frac{1}{2}\phi_x\right) - \delta S_x \quad (5)$$

식 (5)는 스트리핑 방법 적용시 발생하는 링레이저 자이로의 각속도 측정치 오차이다. 이를 이용하여 각

오차를 계산하기 위해서는 식 (5)를 적분하여야 한다. 식 (5)의 적분에서 디더 운동의 진폭 A_x 는 lock-in을 제거하기 위하여 약 100deg/sec 진폭을 가지는 디더 운동의 약 20% 정도에 해당하는 백색잡음 형태의 진폭을 디더 운동의 주기마다 혼합하여 인가한다. 그러므로 전자기 센서의 척도계수 K에 일정한 오차가 발생하여도 20%에 해당하는 진폭이 계속해서 주기에 따라 불규칙적으로 변하기 때문에 한 주기에 해당하는 시간동안에는 진폭의 20%에 해당하는 진폭오차 δA_x 를 랜덤상수로 모델링이 가능하며 이를 적분하면 정현파 운동의 특성에 의하여 영이 된다. 위상 오차 ϕ_x 에 의한 성분도 식 (5)에 나타난 바와 같이 정현파 운동의 형태로 표현되며 이를 한 주기에 대하여 적분하면 영이 된다. 이러한 사실을 고려하여 식 (5)를 디더 운동의 한 주기에 해당하는 시간에 대하여 적분하면 정현파 성분이 제거되고 아래와 같이 각 측정치 오차가 유도된다.

$$\delta\psi_x = \int_t^{t+\frac{1}{f_x}} \delta\omega_x dt = - \int_t^{t+\frac{1}{f_x}} \delta S_x dt \quad (6)$$

위 식에서 f_x 는 디더 운동의 주파수를 의미한다. 위 식에서 나타난바와 같이 스트리핑 방법을 이용하여 디더 운동을 제거하고 자이로 고유의 성능을 유지하기 위해서는 전자기 센서 출력에 바이어스가 없도록 설계하거나 이를 보상하는 방법의 개발이 요구된다.

2.2 디더 운동 측정치 바이어스 제거방법

2.1절에서 언급한 바와 같이 디더 운동을 측정하는 전자기 센서 출력의 바이어스 오차에 의하여 스트리핑 방법의 성능이 좌우됨을 확인하였다. 기존에는 바이어스 성분 제거를 위하여 전자기 센서 출력치를 미분하고 위상을 변경하는 방법을 적용하였으나 바이어스가 상수라는 가정에서 출발하였기 때문에 바이어스가 변하는 경우에는 적용이 불가능하다. 또한 미분 과정에서 진폭이 서로 다른 정현파 성분이 존재하기 때문에 두 성분을 미분하면 추가적인 잡음이 발생한다. 본 논문에서는 전자기 센서에서 출력되는 측정치를 가공하지 않고 스트리핑 방법에 적용하기 위하여 측정치 모델기반의 전자기 센서 바이어스 추정 및 보상 방법을 제시하고자 한다.

일반적으로 매우 느리게 변하는 바이어스와 정현파 성분이 복합적으로 존재하는 경우 이론적으로 평균

기법을 이용하여 실시간으로 바이어스의 추정이 가능하다. 그러나 디더 운동의 경우 진폭이 디더 주기마다 불규칙하게 변하고 연속신호가 아닌 샘플링된 측정치를 평균하여 정현파 운동을 제거하는 것은 불가능하다. 그러므로 새로운 방법을 통하여 전자기 센서의 바이어스를 추정하는 기법이 요구된다. 이를 위하여 먼저 디더 운동에 대한 모델링을 수행하면 다음과 같다.

디더 운동은 정현파 운동으로 식 (7)과 같이 모델링 된다. 식 (7)에서 A_i 는 디더 주기마다 변하는 성질을 가지는 진폭으로 링레이저 자이로 디더 운동의 고유한 특징이다. 식 (7)과 같은 디더 운동은 정현파 운동으로 한 주기를 적분하게 되면 정현파 운동의 성질에 의하여 영이 되며 이를 무한 구간에 대하여 적용하여도 동일한 결과가 산출된다. 이를 식으로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$R(t) = A_i(t)\sin(\omega t) \quad (7)$$

$$\int_{i=0}^{i=\infty} R(t) dt = 0 \quad (8)$$

디더 운동은 전자기 센서 측정치에 전혀 오차가 포함되지 않은 경우 식 (7)과 같이 실시간 측정된다. 그러나 앞에서 설명한 바와 같이 전자기 센서 측정치에 시간에 따라 서서히 변하는 바이어스 오차 $b(t)$ 가 포함되어 있고 일정한 측정주기 ΔT 마다 디더 운동이 측정되면 식 (9)와 같이 디더 운동이 모델링 된다. 식 (9)에서 z_n 은 전자기 센서에서 측정되는 값으로 측정주기 ΔT 마다 출력된다.

$$\begin{aligned} z_1 &= A(t)\sin(\omega(t_0 + \Delta T)) + b(t) \\ &= A(t)\sin(\omega t_0)\cos(\omega\Delta T) + A(t)\cos(\omega t_0)\sin(\omega\Delta T) + b(t) \\ &= [\cos(\omega\Delta T) \quad \sin(\omega\Delta T) \quad 1] \begin{bmatrix} A(t)\sin(\omega t_0) \\ A(t)\cos(\omega t_0) \\ b(t) \end{bmatrix} \\ z_2 &= A(t)\sin(\omega(t_0 + 2\Delta T)) + b(t) \\ &= A(t)\sin(\omega t_0)\cos(2\omega\Delta T) + A(t)\cos(\omega t_0)\sin(2\omega\Delta T) + b(t) \\ &= [\cos(2\omega\Delta T) \quad \sin(2\omega\Delta T) \quad 1] \begin{bmatrix} A(t)\sin(\omega t_0) \\ A(t)\cos(\omega t_0) \\ b(t) \end{bmatrix} \\ z_n &= A(t)\sin(\omega(t_0 + n\Delta T)) + b(t) \\ &= A(t)\sin(\omega t_0)\cos(n\omega\Delta T) + A(t)\cos(\omega t_0)\sin(n\omega\Delta T) + b(t) \\ &= [\cos(n\omega\Delta T) \quad \sin(n\omega\Delta T) \quad 1] \begin{bmatrix} A(t)\sin(\omega t_0) \\ A(t)\cos(\omega t_0) \\ b(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)는 n개의 전자기 센서 측정치를 모델링 한 것으로 이를 이용하여 $z = Hx$ 형태의 측정 방정식의 구성이 가능하다. 이를 식으로 나타내면 식 (10)과 같다.

$$z = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega\Delta T) & \sin(\omega\Delta T) & 1 \\ \cos(2\omega\Delta T) & \sin(2\omega\Delta T) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \cos(n\omega\Delta T) & \sin(n\omega\Delta T) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(t)\sin(\omega t_0) \\ A(t)\cos(\omega t_0) \\ b(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$= Hx$$

식 (10)에서 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 이며 LSE(Least Square Estimation) 방법을 이용하여 상태변수 x 를 구하면 식 (11)과 같다. 식 (10)에서 ω 는 디더 주파수이며 ΔT 는 전자기 센서의 데이터 측정주기이다.

$$\hat{x} = (H^T H)^{-1} H^T z \quad (11)$$

식 (11)에서 구한 상태변수 x 의 추정치에서 x_1, x_2 는 디더 운동의 진폭을 x_3 는 전자기 센서의 바이어스 오차를 나타내기 때문에 상태변수 x_1, x_2 을 이용하여 디더 운동의 진폭을 구하면 식 (12)와 같다.

$$A(t) = \sqrt{x_1^2 + x_2^2} \quad (12)$$

식 (12)을 이용하여 구한 전자기 센서의 진폭과 식 (11)에서 추정된 전자기 센서의 바이어스 오차를 실시간으로 자이로 출력에 보상하여 링레이저 자이로의 측정치의 획득이 가능하다. 이와 같이 디더 운동 모델 기반 추정기법을 적용한 스트리핑 방법은 측정치의 개수 n을 적절히 설정함으로써 실시간으로 전자기 센서의 진폭 및 바이어스 오차의 추정이 가능하기 때문에 기존 방법대비 추가적인 하드웨어의 요구 없이 소프트웨어적으로 구현이 가능한 장점이 있다.

3. 검증시험

본 장에서는 본 논문에서 제시한 새로운 스트리핑 방법의 성능을 확인하기 위하여 두 가지 시험을 수행하였다.

첫째로 스트리핑 적용의 목적인 동적 환경에서 탑재체의 운동을 실시간으로 추적하는지를 확인하였다. 이

를 위해서 짧은 시간동안에 자세를 급격히 변화시키면서 트래핑 출력과 스트리핑 출력을 비교하였다. 그 결과는 Fig. 2에서 보는데와 같이 트래핑 출력은 샘플링 주기가 길어서 자세가 실시간으로 업데이트 되지 않는데 반하여 스트리핑 출력에는 그러한 단점이 나타나지 않음을 알 수 있다.

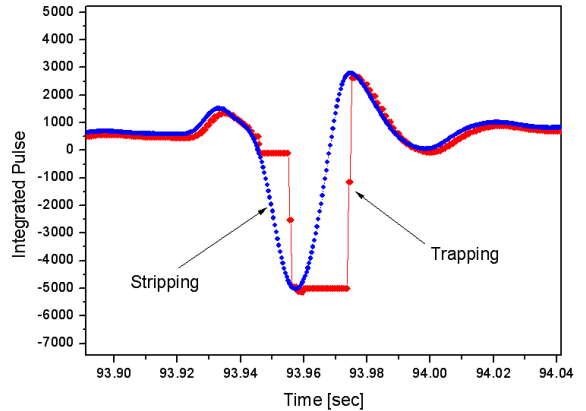


Fig. 2. The comparison results of outputs from trapping and stripping method in the case of rapidly-changing attitude for a short time

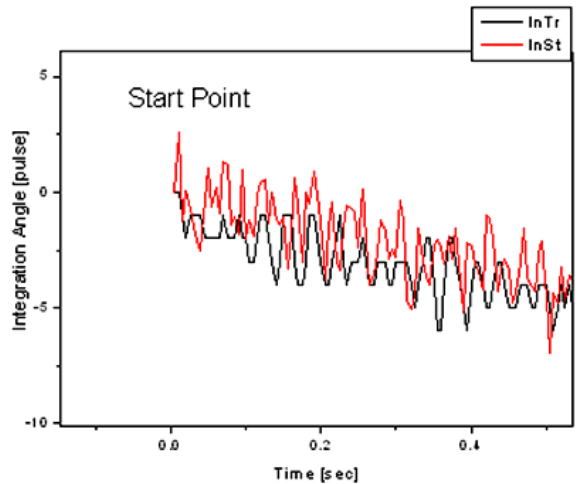


Fig. 3. The comparison results of long-time integral outputs from trapping and stripping method at a start point

둘째로 스트리핑 출력을 항법에 적용하기 위해서는 누적오차가 발생하지 않아야 하므로 이를 확인하는 시

험을 수행하였다. 이를 위해서 약 2000sec 이상 자이로를 동작시키면서 트래핑 출력과 스트리핑 출력을 동시에 받아 적분된 각도를 비교 하였다. 그 결과는 Fig. 3~4에서 보는바와 같이 적분된 스트리핑 출력과 적분된 트래핑 출력이 양자화오차 내에 있음을 알 수 있다.

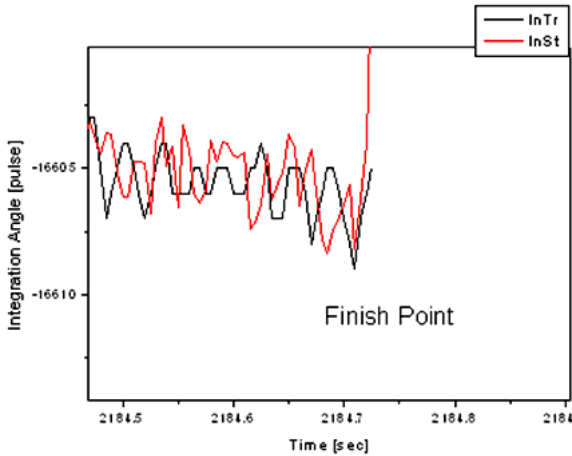


Fig. 4. The comparison results of long-time integral outputs from trapping and stripping method at a finish point

4. 결론

링레이저 자이로 출력에서 디더 운동을 제거하는 방법으로 스트리핑 방법과 트래핑 방법이 있다. 스트리핑 방법은 각 센서의 V/F 변환기에서 측정된 디더 운동을 이용하여 링레이저 출력에 포함된 디더 운동을 제거하는 방법이다. 그러나 V/F 변환기 출력에는 항상 바이어스 오차와 척도계수 오차가 포함되어 있어 스트리핑 방법을 사용하기 위해서는 이를 반드시 제거하여야 한다. 그러므로 이를 제거하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 본 논문에서는 V/F 변환기의 바이어스 및 척도계수 오차를 제거하는 방법으로 관성항법장치의 데이터 획득 주기에 동기되어 출력되는 V/F 출력에 대하여 디더 운동 모델 기반의 추정기법을 적용한 방법을 제안하였다. 이 방법은 추가적인 하드웨어의 요구 없이 소프트웨어적으로 구현이 가능한 장점을 가지고 있다.

본 논문에서 제시한 스트리핑 방법에 대하여 성능검증을 위하여 시험을 수행하였다. 시험 결과 본 논문에

서 제시한 스트리핑 방법을 이용하여 추정된 바이어스 및 척도계수 오차 보상 후 장시간 누적된 각 측정치를 트래핑 방법을 통하여 구한 각 측정치와 비교한 결과 동일한 성능을 보이는 것을 확인하였다. 이러한 결과로 판단할 때 본 논문에서 제시한 스트리핑 방법을 적용할 경우 가속도 측정치와 시각동기된 고속의 자이로 측정치 획득이 가능하여 가속도/각속도의 측정시점 불일치에 의한 항법오차 개선이 가능하고 또한 고속으로 획득된 각속도/가속도 측정치를 이용하여 관성항법장치 동적오차의 정밀 보상이 가능하기 때문에 트래핑 방법을 적용하는 관성항법장치 성능개선에 크게 기여할 것으로 판단된다.

향후에는 본 논문에서 제시한 스트리핑 방법을 적용한 경우와 트래핑 방법을 적용한 경우에 대하여 항법 성능 관점에서 성능비교를 수행할 예정이다.

References

- [1] J. E. Killpatrick, "The Laser Gyro," IEEE Spectrum, Vol. 4, pp. 44-55, 1967.
- [2] Weng W., "Theory of Multioscillator Laser Gyro," Physics of Optical Ring Gyros, Proceedings of SPIE, Vol. 487, pp. 30-32, 1984.
- [3] Killpatrick J. E., "Laser Gyro Dither Random Noise," Physics of Optical Ring Gyros, Proceedings of SPIE, Vol. 487, pp. 85-93, 1984.
- [4] B. G. Ljung, G. F. Schroeder, "Ring Laser Gyro Dither Pulse Eliminator," US Patent, No. 4433706, 1982.
- [5] K. R. Fritze, J. E. Killpatrick, D. F. Berndt, "Ring Laser Gyro Dither Stripper," US Patent, No. 5249031, 1993.
- [6] S. Ferriss, N. J. Park, "Electronic Dither Compensator for a Ring Laser Gyro," US Patent, No. 4610543, Sep. 9. 1986.
- [7] K. Bohm, R. Rudloff, "Optical Rotation Sensor," Sensor, Optical Sensor, Vol. 6, pp. 422-464, 1992.
- [8] K. M Shim, T. H. Chung and H. J. Lim, "Dither-stripping with the Differential of Dither Rate Signal for a Ring Laser Gyroscope," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 33, No. 8, pp. 65-74, 2005.