

論文

링레이저 자이로의 각진동 센서신호 미분에 의한 dither-stripping

심규민*, 정태호*, 임후장**

Dither-stripping with the differential of dither rate signal for a ring laser gyroscope

Kyu-Min Shim*, Tae-Ho Chung* and Hoo-Jang Lim**

ABSTRACT

It is required for getting the ring laser gyro output purely related to the input rotation to eliminate the output of the modulated angular vibration from the ring laser signal. In this paper we discuss the dither stripping methods of compensating the ring laser signal by converting the rate signal of dither detector from voltage to frequency for a dither type ring laser gyro. We discuss the differential methods for getting rid of the offset of the V-F signal. And we develop the methods of compensating the phase differences between the ring laser signals and the V-F differential signals by using analog integrator and digital time delays. And also, we develop the gain calculation method by comparing the standard deviations of the ring laser signals with V-F differential signals. We implemented these methods and analyzed the effectiveness of these methods by comparing the dither trapping methods.

초 록

공진기 진동형 링레이저 자이로가 외부에서 입력되는 각도변화만을 검출하여 출력하기 위해서는 링레이저 출력으로부터 공진기의 각진동 운동에 의한 출력을 제거하는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 공진기 진동형 링레이저 자이로에서 공진기의 각진동을 검출하는 각속도 센서 출력을 V-F 변환하여 링레이저 출력을 보상하는 dither-stripping에 대하여 논의하였다. 우리는 V-F 신호의 offset을 제거하기 위하여 V-F 신호의 미분값을 취하고 또한 미분값을 취함으로써 변화되는 위상을 보상하기 위하여 아날로그 적분기로 위상을 보정하는 방법과 링레이저 신호 또는 V-F 신호의 검출 시점을 지연시키는 방법을 개발하였다. 그리고 링레이저 출력과 V-F 신호 사이의 환산을 위하여 분산을 이용하여 이득을 산출하는 방법을 개발하였다. 우리는 이와 같은 방법을 적용하고, dither trapping 방법과 비교하는 실험을 통하여 효과를 분석하였다.

Key Words : Ring Laser Gyro(링레이저 자이로), Dither-stripping

I. 서 론

링레이저 자이로는 고성능 관성항법장치에서 회전 각속도를 측정하는 센서로서 기존의 기계식 자이로를 대체하여 점차 일반화 되어가고 있다. 링레이저 자이로는 링레이저 공진기 내부를 서로 반대

† 2005년 1월 7일 접수 ~ 2005년 4월 28일 심사완료

* 정희원, 국방과학연구소 기술연구본부 1부
연락처, E-mail : kmshim@add.re.kr

대전 유성우체국 사서함 35호

** 두산인프라코어 정밀센서팀

방향으로 진행하는 레이저 빛의 주파수가 회전에 의하여 서로 달라지는 형상을 이용한 회전점출 센서이다[1][2][3]. 그런데 이 링레이저 자이로에는 입력되는 회전 각속도가 어느 한정된 값 이하에서 두 빛의 주파수가 결합되어 회전 각속도를 알 수 없는 lock-in 현상이 발생한다[4][5]. 그러므로 입력 각속도가 없을 때에도 두 주파수가 일정한 크기 이상 차이가 나도록 하는 광학적인 방법과 항상 큰 각속도에서 동작되도록 하는 기계적인 방법을 이용하여 lock-in 지역을 피해가는 기술이 개발되었으며 그 가운데에서 공진기를 각진동 시키는 기계적인 방법이 가장 성공적인 결과를 가져왔다[6][7]. 각진동의 방법은 레이저 공진기를 비틀림 스프링을 이용하여 케이스에 부착하고 정현파의 주기적인 비틀림 운동을 인가하는 것이다. 그러므로 링레이저 출력에는 항상 각진동이 변조되어 있기 때문에 외부 입력 각속도를 정확히 알기 위해서는 이 각진동 운동에 의한 출력을 제거해야하며 그 방법으로는 dither-trapping과 dither-stripping 등이 있다[8].

Dither-trapping 방법은 공진기에 인가된 정현파 각진동 운동에 의한 링레이저 출력을 각진동 주기에 맞추어 적분함으로써 상쇄시키고, 외부에서 입력된 회전에 의한 효과만을 자이로 출력으로 나타나게 하는 방법이다[9][10]. 그러므로 이 방법에 의하면 공진기의 각진동 주기가 완료되는 시점에는 정확한 자이로 출력을 얻을 수 있으나 그 외의 시점에서는 출력을 알 수 없으므로 공진기 진동주기보다 빠른 샘플링이 불가능하고, 3개의 서로 다른 각진동 주파수를 갖는 링레이저 자이로로 구성된 관성항법장치에서 3개 자이로의 샘플링 시점을 일치시킬 수 없다는 단점이 있다. 이러한 문제점으로 인하여 기동성이 크거나 진동이 비교적 많은 비행체에 이 방법을 적용할 경우에는 고속 샘플링에 의한 coning 오차 보상이 어렵고 속도오차가 비교적 크게 발생할 수 있다.

Dither-stripping은 이러한 문제점을 보완하기 위한 것으로서 광학적인 방법과 전기적인 방법이 있다.

광학적인 dither-stripping은 링레이저 출력인 맥놀이 간섭무늬의 이동을 검출하는 광다이오드를 자이로 케이스에 부착하여 레이저 공진기의 각진동 방향이 맥놀이 간섭무늬의 이동방향과 항상 반대가 되도록 정렬함으로써 레이저 공진기의 케이스에 대한 상대운동이 검출되지 않도록 하는 기구적광로보상(Opto-mechanical compensation) 방법이다[11]. 이 방법의 적용을 위해서는 레이저 주파수를 검출하기 위한 검출부의 굴절율로 인하

여 삼각형 자이로는 공진기의 구조가 이등변 삼각형이 되어야 하고, 사각형의 자이로에는 적용이 어렵다. 그러므로 이 방법은 삼각형의 링레이저 자이로를 생산하는 제작사의 자이로에 주로 적용되고 있다.

전기적인 dither-stripping 방법은 공진기의 각진동을 검출하는 센서를 이용하여 링레이저 출력으로부터 공진기의 진동에 의한 출력을 제거하는 방법이다. 공진기의 각진동을 검출하는 센서로는 각도센서와 각속도 센서가 있다. 각도 센서는 레이저 공진기의 비틀림 스프링에 압전소자를 부착하여 레이저 공진기가 각진동 할 때 비틀림 크기에 비례하는 출력을 검출하는 피에조 센서가 주로 사용되고 있으며, 각속도 센서는 레이저 공진기에 부착된 자석과 자이로 케이스에 부착된 코일로 구성되어 서로간의 상대운동을 측정하는 전자기센서가 주로 사용된다.

전기적인 dither-stripping은 레이저 공진기의 각진동 검출센서의 출력을 V-F(Voltage to Frequency) 변환하여 링레이저 출력으로부터 공진기의 각진동에 의하여 발생한 링레이저 출력을 제거하는 것이다. 여기서 링레이저 출력과 V-F 출력간의 위상을 일치시키고, 펄스간의 환산을 위한 이득을 정확히 산출하는 문제와 V-F 출력의 offset을 정확히 측정하여 보상하는 문제 등을 해결하는 것이 매우 중요하다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 V-F 출력을 검출하여 링레이저 출력과 비교하면서 이득이나 위상을 제어하는 closed-loop 시스템이 주로 연구되었다[12][13][14]. 그런데 이러한 것들은 하드웨어나 소프트웨어 적으로 복잡하여 오차를 낼 가능성이 높으므로 우리는 좀 더 실현가능성이 있는 방법에 대하여 연구하게 되었다.

본 논문에서는 레이저 공진기 각진동 검출센서로서 각속도 센서를 사용하고 있는 자이로의 dither-stripping에 있어서 이러한 이득과 offset을 정확히 측정하고 보상하는 방안에 대하여 논의하였다. 그런데 V-F 출력의 offset을 링레이저 자이로 성능에 건주어 비교적 적용 가능할 정도로 정밀하게 검출하여 보상하는 것은 매우 어려운 문제이다. 여러 가지의 소프트웨어적인 시도 끝에 우리는 V-F 출력의 미분을 취해서 offset을 제거하는 방안을 고안하여 적용하고 이에 따라서 발생하는 문제점을 해결하고자 하였다. V-F 출력의 미분값은 본래의 신호에서 위상이동이 발생되므로 펄스간의 이득을 산출하는데 있어서 링레이저 출력과 V-F 출력 미분값의 적분 구간을 일치시키기 어려우므로 우리는 분산을 비교하는 방법을

개발하여 적용하였다. 그리고 V-F 출력 미분값의 위상과 링레이저 출력의 위상을 일치시키기 위한 효과적인 방법을 연구하였다. 그 방법으로서는 우리는 아날로그 회로에서 각속도 센서 출력의 위상을 미리 변화시킨 다음 V-F 변환하는 방법과 링레이저 출력의 검출 시점을 뒤로 미루어서 위상을 조정하는 방법, 그리고 V-F 출력의 검출 시점을 뒤로 미루어서 위상을 조정하는 방법에 대하여 연구하였다. 그리고 링레이저 자이로에 적용하여 구현가능성을 확인하고 dither-trapping과 비교하는 실험을 통하여 기능 및 성능을 확인하였다.

II. 각진동 센서신호 미분에 의한 dither-stripping 설계 및 실험

2.1 설계 개념

링레이저 자이로는 lock-in으로 인하여 지구자전 각속도와 같은 작은 입력을 측정하지 못한다. 이러한 현상을 제거하기 위하여 링레이저 공진기에 약 100deg/sec, 400Hz의 정현파 각진동 운동을 인가함으로써 자이로가 lock-in 보다 작은 영역에서 동작하는 시간을 최소화하기 위한 교번바이어스 인가방법을 많이 사용한다. 그런데 이 각진동 운동의 진폭이 일정하면 자이로 출력에 바이어스 변화가 심하게 발생하므로 각진동의 진폭을 불규칙하게 변화시켜야 한다. 이렇게 불규칙적인 진동의 진폭을 제어하고 자이로 출력으로부터 각진동 운동에 의하여 발생된 출력을 제거하기 위해서는 각진동의 진폭을 측정해야 한다. 이러한 목적의 센서는 각도센서로서 주로 피에조센서가 사용되고 각속도 센서로서 주로 전자기적인 센서가 사용된다.

전기적인 dither-stripping의 목적은 이러한 센서 출력을 이용하여 링레이저 공진기의 자이로 케이스에 대한 상대 운동인 각진동 운동에 의하여 발생하는 맥놀이 펄스의 크기를 측정하고 링레이저 출력으로부터 이를 제거함으로써 자이로가 순수하게 외부에서 입력된 각속도만 출력하도록 하기 위한 것이다.

전기적인 dither-stripping을 위해서는 먼저 V-F 변환을 통하여 각도 또는 각속도 센서의 출력 전압을 펄스 형태로 변환해야 한다.

이상적인 경우에 링레이저 출력과 각속도 센서의 출력은 동위상이다. 그러므로 각속도 센서의 V-F 출력펄스를 펄스간의 이득 K 로 보상하고 링레이저 출력에서 직접 빼주면 링레이저 자

이로 출력을 얻을 수 있다. 펄스간의 이득 K 는 V-F 출력을 링레이저 출력과 같은 단위가 되도록 하는 계수이다.

$$K = \frac{\int_0^{nr} \Delta N dt}{\int_0^{nr} \Delta D dt} \tag{1}$$

여기서 ΔN 은 링레이저 출력펄스, ΔD 는 V-F 출력펄스, nr 은 정수, 그리고 τ 는 각진동 주기가 다.

그리고 공진기의 각진동 운동은 구속된 정현파 운동이므로 V-F 출력에 대하여 다음과 같은 조건이 성립되어야 한다.

$$\int_0^{nr} \Delta D dt = 0 \tag{2}$$

그러나 일반적으로 아날로그 신호처리과정과 V-F 소자의 offset으로 인하여 이 조건을 만족할 수 없다. 그러므로 다음과 같은 방법으로 보정계수 K_d 를 계산하여 식(2)가 만족되도록 보상해주어야 한다.

$$K_d = \frac{\int_0^{nr} \Delta D^+ dt}{\int_0^{nr} \Delta D^- dt} \tag{3}$$

여기서 ΔD^+ 와 ΔD^- 는 각각 양과 음의 부호를 갖는 V-F 출력이다.

그러나 V-F 펄스의 offset을 자이로 성능에 유사한 수준으로 측정하여 보상해줄 수 있는 적당한 방법을 찾기 어렵다. 그러므로 우리는 이 offset를 제거하기 위하여 V-F 출력의 미분을 취한 후에 링레이저 출력에서 각진동 운동에 의한 펄스를 제거하는 방법을 적용하였다. 이 과정에 의하여 정현파의 offset이 제거되므로 보정계수 K_d 가 1이 되고 ΔD^+ 와 ΔD^- 를 별도로 측정할 필요가 없게 되었다. 그리고 V-F 출력의 미분값은 본래의 각진동 센서 출력과 위상이 90도 달라지므로 각진동 센서가 각도센서인 경우에는 V-F 출력 미분값은 링레이저 출력의 위상과 일치하게 되고 각속도 센서인 경우에는 90도 위상차이가 발생하게 된다. 이 위상의 보정방법은 다음절에서 논하기로 한다. 위상이 보정되고 나면 Fig. 1과 같이 링레이저 출력에서 링레이저 자이로 출력을 얻을 수 있다.

임의의 샘플링시간 Δt 동안에 누적된 링레이저 출력펄스가 ΔN ; 이면 미분값을 취함으로써

stripping 출력 ΔN_i^{out} 은 다음과 같은 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\Delta N_i^{out} = \Delta N_i - K \cdot \delta D_i \quad (4)$$

여기서 δD_i 는 V-F 출력의 미분값이고, V-F 출력펄스 ΔD_i 와는 다음과 같은 관계가 있다.

$$\delta D_i = \Delta D_i - \Delta D_{i-1} \quad (5)$$

그리고 링레이저 출력펄스 ΔN_i 는 펄스가 만들어질 때의 조건에 의해서 부호가 결정되므로 양방향과 음의 방향 각각의 펄스를 누적시키는 카운터 출력 ΔN_i^+ 와 ΔN_i^- 에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta N_i &= \Delta N_i^+ - \Delta N_i^- \\ \Delta N_{i-1} &= \Delta N_{i-1}^+ - \Delta N_{i-1}^- \end{aligned} \quad (6)$$

그리고 V-F 출력의 미분값 크기를 링레이저 출력과 같은 단위를 갖도록 하기 위한 이득은 다음과 같이 V-F 출력의 미분 출력펄스에 대한 분산과 링레이저 펄스의 분산과의 비율로서 계산할 수 있다.

$$K = \frac{\sigma(\Delta N_i)}{\sigma(\delta D_i)} \quad (7)$$

이러한 이득의 산출 방법은 공진기 각진동 운동이 정현파 운동이므로 가능할 수 있으며 자이

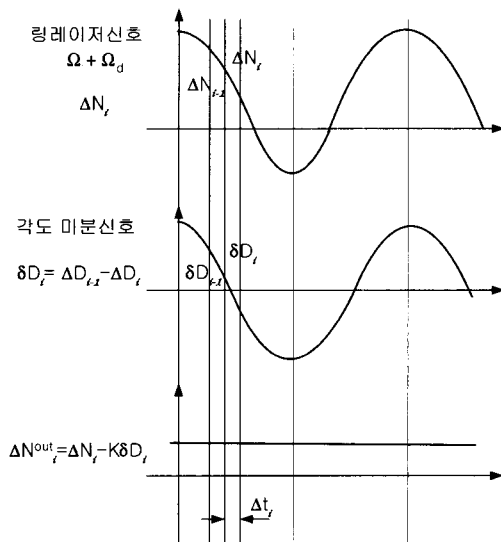


Fig. 4. 각도센서 신호의 미분에 의한 dither-stripping 개념

로에 진동 등의 입력이 인가되지 않는 안정된 상태에서 측정하여 산출할 수 있다. 그리고 각진동 운동이 정현파 운동이므로 V-F 출력의 분산의 크기는 V-F 최대값의 약 70%가 되지만 V-F 출력의 미분값에 대한 분산의 크기는 각진동 주파수와 샘플링 주파수의 비율에 따라서 달라지게 된다. 샘플링 주파수가 각진동 주파수의 6배인 경우에는 V-F 출력의 미분값도 V-F 출력과 같은 정현파 형태를 유지하므로 두 값의 분산의 크기가 같다. 그런데 샘플링 주파수가 각진동 주파수의 6배 이상인 경우에 V-F 출력을 미분하면 미분값의 크기가 감소하여 이득이 증가하고 그 반대의 경우에는 이득이 감소한다. 그리고 V-F 신호의 미분값을 구하는 과정에서 90도 위상변환 외에 샘플링 시간 $\Delta t/2$ 에 의한 위상변화가 발생한다. 그러므로 이 샘플링 시간이 각진동 주기보다 상대적으로 클 경우에는 이로 인하여 발생하는 위상차를 무시할 수 없다.

2.2 링레이저 신호와 V-F 신호간의 위상보정 방법

2.2.1 아날로그회로에 의한 위상 보정

각속도 신호의 V-F 변환 출력의 미분값은 링레이저 신호와 90도 위상차이가 발생한다. 그리고 90도 위상변환 된 각속도 센서신호를 V-F 변환하여 미분하면 $\Delta t/2$ 만큼의 위상변화가 추가로 발생한다. 본 절에서는 이것을 보상하기 위하여 각진동 검출 센서의 출력을 아날로그 적분기를 통하여 위상이동 시키는 방법을 연구하였다. 적분기를 통하여 90도 위상 변화된 각진동 검출 센서 출력을 V-F 변환하여 링레이저 출력펄스의 위상과 비교하면서 적분기의 위상을 추가로 조정하거나 다음과 같이 S/W를 통하여 링레이저 출력펄스의 위상을 조정함으로써 두 신호간의 위상을 맞출 수 있다.

$$\Delta N_i^{com} = (\Delta N_i + \Delta N_{i-1}) / 2 \quad (8)$$

여기서 ΔN_i^{com} 은 $\Delta t/2$ 만큼 위상이동된 링레이저 출력이다.

그러므로 위의 식(1)에서 링레이저 출력펄스의 위상 보상을 고려하면 dither-stripping 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta N_i^{out} = \Delta N_i^{com} - K \cdot \delta D_i \quad (9)$$

그리고 펄스간의 환산계수는 위상 보정한 링레이저 출력펄스와 V-F 출력의 미분값의 표준편차의 비율로서 계산할 수 있다.

$$K = \frac{\sigma(\Delta N_i^{com})}{\sigma(\delta D_i)} \quad (10)$$

Fig. 2는 아날로그 회로에 의한 위상보정 방법의 dither-stripping 회로의 구성을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 각진동 센서 출력

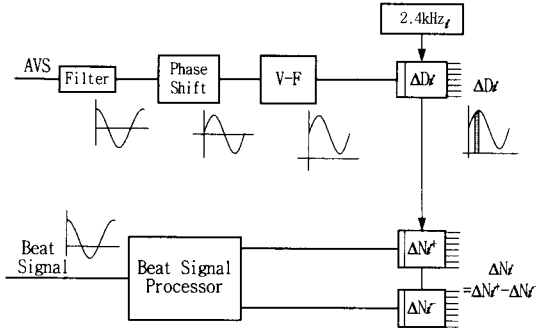


Fig. 2. 아날로그 회로에 의한 위상보정 dither-stripping 방법의 블록선도

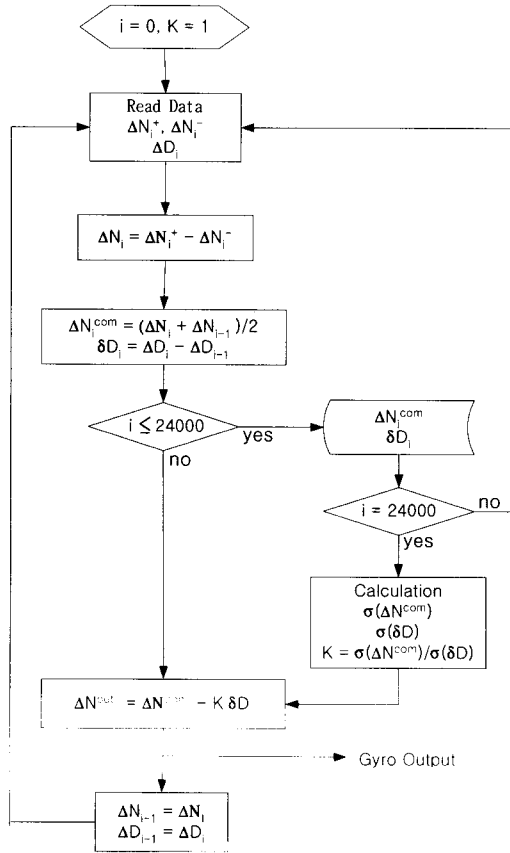


Fig. 3. 아날로그 회로에 의한 위상보정 dither-stripping 방법의 신호처리 알고리즘

신호 AVS를 Phase Shift 과정을 통하여 90도 위상 이동시킨 후 V-F를 통하여 펄스로 변환시켜서 카운터에 저장한다. 그리고 링레이저 출력인 맥놀이신호는 Beat Signal Processor에서 펄스로 변환하여 카운터에 저장한다. 두 펄스 신호는 2400Hz로 샘플링하여 자이로 출력을 계산하도록 되어 있다.

Fig. 3은 링레이저 출력펄스와 V-F 출력펄스를 이용하여 환산계수를 구하고 자이로 출력을 만들어 내는 과정을 나타낸 흐름도이다. 그림에서 보는바와 같이 초기 10초 동안 ΔN_i^{com} 와 δD_i 를 기록하여 이들을 계산한 뒤에 정상적인 stripping 값을 출력하도록 설계하였다.

2.2.2 링레이저 신호 검출시점 지연

본 절에서는 각진동 센서출력을 직접 V-F 변환하고 이때 발생하는 위상차이를 보상하기 위해 링레이저 출력의 검출 시점을 지연시키는 방안에 대하여 논의하기로 한다.

각진동 주기 τ 인 자이로의 V-F 출력을 샘플링 시간 Δt 로 측정하여 미분값을 취하면 본래의 위상으로부터 90도($\tau/4$) 만큼의 위상변화가 발생한다. 그리고 i 번째와 $i-1$ 번째의 V-F 출력을 미분할 경우에 계산된 미분값은 i 번째 데이터로 기록되므로 기록하는 시점이 $\Delta t/2$ 만큼의 시간지연이 발생한다. 그러므로 이러한 위상이동을 모두 합하면 약 120도이다. 이를 보상하기 위해서 링레이저 출력펄스의 측정시점은 다음과 같이 샘플링 시간 Δt 의 n 배 만큼 이동되어야 한다.

$$n = \frac{\tau}{4\Delta t} + \frac{1}{2} \quad (11)$$

그러므로 공진기의 각진동 주파수가 400Hz인 경우에는 $n=2$ 가 된다. 이 경우에는 현재 $i-1$ 과 i 번째 V-F 펄스로서 δD_i 를 구하여 $i-2$ 번째 링레이저 펄스 ΔN_{i-2} 와 stripping 출력을 계산할 수 있다.

$$\Delta N_{i-2}^{out} = \Delta N_{i-2} - K \cdot \delta D_i$$

$$\delta D_i = \Delta D_{i-1} - \Delta D_i \quad (120 \text{ deg phase delay}) \quad (12)$$

이와 같은 방법으로 400Hz 부근의 각진동 주파수를 갖는 자이로는 링레이저 출력을 샘플링 2 주기만큼 지연시켜서 stripping 출력을 계산하면 되며, 공진기의 각진동 주파수가 400Hz와 다르므로서 발생하는 작은량의 위상차이는 추가적인 시간 α 만큼 시간을 지연시켜서 보상한다.

추가적인 지연시간 α 의 크기는 다음과 같다.

$$\alpha = (2 - n)\Delta t \quad (13)$$

각진동 주파수가 400Hz 보다 클 때는 α 가 양의 값을 가지며 이때는 ΔN_{i-2} 의 위상이 δD_i 의 위상보다 빠르므로 ΔN_{i-2} 를 지연시키고, 각진동 주파수가 400Hz 보다 작으면 반대로 δD_i 의 위상을 지연시킨다. 예를 들어서 각진동 주파수가 430Hz인 경우에는 링레이저 펄스를 $43.6\mu s$ 지연시키고 370Hz인 경우에는 V-F 출력을 $50.7\mu s$ 지연시켜서 신호를 검출한다. 시간지연 α 값은 정적인 상태에서 α 값을 변화시켜가면서 stripping 출력의 잡음수준을 측정하는 실험에 의하여 잡음수준이 최소값이 되는 지점으로 설정하면 된다.

그리고 링레이저 펄스와 V-F 펄스간의 이득은 10초간의 측정값으로 하여 다음과 같이 계산한다.

$$K = \frac{\sigma(\Delta N_{i-2})}{\sigma(\delta D_i)} \quad (14)$$

이 방법에 의하면 자이로의 출력은 약 $2\Delta t$ 만큼 지연된 출력을 얻게 되므로 샘플링 주파수가 2400Hz인 시스템의 경우에는 약 $833\mu s$ 지연된 반응을 나타낸다.

Fig. 4는 링레이저 출력을 시간지연하여 처리하는 알고리즘에 대한 흐름도이다. 여기서 초기 링레이저 출력 데이터를 읽어오는 시점에 미리 α 만큼의 시간지연이 있도록 하였다.

2.2.3 V-F 신호 검출시점 지연

외부에서 입력된 각속도에 직접적인 영향을 받는 링레이저 펄스를 지연하여 검출하면 자이로 출력 전체가 지연되는 것과 같다. 그러나 V-F 신호는 외부에서 입력된 각속도와 무관하므로 이 신호를 지연시켜서 링레이저 펄스와 위상을 일치시키는 것이 보다 효과적일 수 있다.

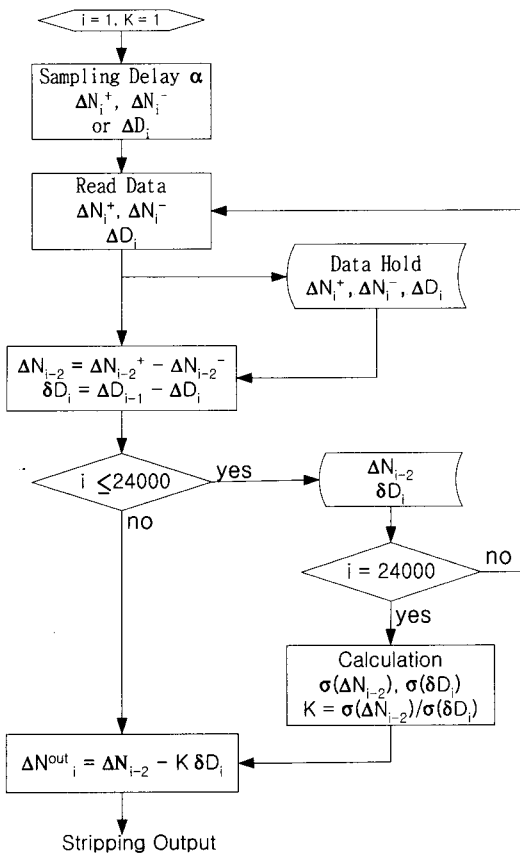


Fig. 4. 링레이저 신호 검출시간지연에 의한 위상보정 방법의 dither-stripping 신호처리 흐름도

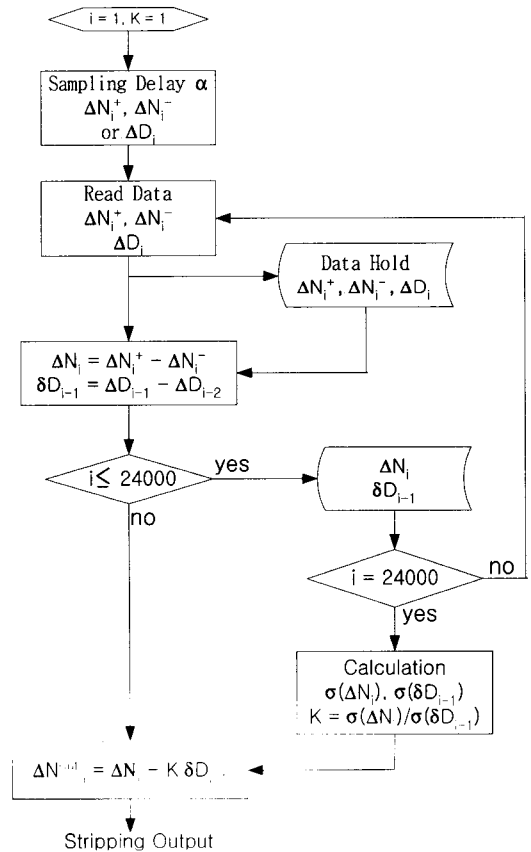


Fig. 5. V-F 신호 검출시간지연에 의한 위상보정방법의 dither-stripping 신호처리 흐름도

먼저 V-F 출력의 미분에 의하여 위상이 90도 전진되고, 미분 계산과정에서 $\Delta t/2$ 만큼의 위상이 지연되므로 이를 모두 고려하면 δD_i 의 위상이 ΔN_i 위상보다 약 60도 빠르다. V-F 출력을 이동시켜서 이를 보상하려면 측정시점은 다음과 같이 샘플링 시간 Δt 의 n 배 만큼 이동되어야 한다.

$$n = \frac{r}{4\Delta t} - \frac{1}{2} \quad (15)$$

그러므로 공진기의 각진동 주파수가 400Hz인 경우에는 $n=1$ 이 되므로 V-F 펄스의 $i-1$ 과 $i-2$ 번째 데이터로서 δD_{i-1} 을 구하여 i 번째 ΔN_i 와 stripping 계산하면 된다. 따라서 약 400Hz 부근의 각진동 주파수를 갖는 자이로는 V-F 출력을 샘플링 1주기만큼 지연시켜서 stripping 출력을 계산하면 된다.

$$\Delta N_i^{out} = \Delta N_i - K \cdot \delta D_{i-1} \quad (16)$$

$$\delta D_{i-1} = \Delta D_{i-1} - \Delta D_{i-2} \text{ (60 deg advance)}$$

그리고 공진기의 각진동 주파수가 400Hz와 다른 경우에는 다음과 같은 α 만큼의 시간지연을 추가시킨다.

$$\alpha = (1-n)\Delta t \quad (17)$$

그러므로 각진동 주파수가 430Hz인 경우에는 링레이저 출력을 $43.6\mu s$ 지연시키고, 370Hz인 경우에는 V-F 출력을 $50.7\mu s$ 지연시킴으로서 두 펄스간의 위상을 일치시킬 수 있다.

그리고 링레이저 펄스와 V-F 펄스간의 이득은 10초간의 측정값으로 하여 다음과 같이 계산한다.

$$K = \frac{\sigma(\Delta N_i)}{\sigma(\delta D_{i-1})} \quad (18)$$

이 방법에 의하면 링레이저 출력의 시간지연이 각진동 주파수가 400Hz 미만일 때 수십 μs 정도이고 그 외의 요인에 의한 지연은 없으므로 자이로 출력에 시간지연에 의한 오차는 무시할 수 있을 정도로 작게 된다. Fig. 5는 V-F 출력 검출 시점을 지연시켜서 위상보정하는 stripping 알고리즘에 대한 흐름도이다.

2.3 실험 및 결과 분석

본 절에서는 공진기 각진동 센서출력 신호의 미분 및 위상조정 방법의 dither stripping에 대한 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 dither-stripping 방법에 대한 평가를 하였다. 앞에서 제시한 위상

보정을 위한 세 가지 방법은 구현하는 과정에서 차이가 있을 뿐 결과적으로 같은 출력형태를 보인다. 다만 아날로그 회로를 통하여 각진동 센서 출력을 90도 위상이동 시키는 방법에 의하면 온도 등 주변 환경이 변화될 때 적분기를 구성하고 있는 소자들의 특성변화에 의하여 위상이 달라지는 단점을 볼 수 있었다. 본 절에서는 링레이저 출력펄스 검출 시점을 지연시켜서 위상을 보정하는 dither stripping 방법과 기존에 많이 쓰이고 있던 dither trapping 방법을 동시에 구현함으로써 이 두 가지 방법에 대한 잡음수준을 비교하고 진동 및 충격 등의 환경 조건에서 출력 특성을 비교하기로 한다. 실험은 공진기 각진동 주파수가 약 430Hz이고 환산계수가 0.93arcsec/pulse인 링레이저 자이로를 이용하였고 데이터 샘플링 속도는 2400Hz이다.

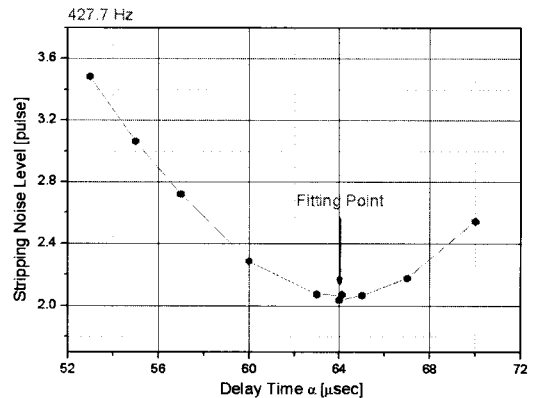


Fig. 6. 링레이저 신호 검출시간지연 방법에서 지연시간에 따른 stripping 출력의 잡음수준

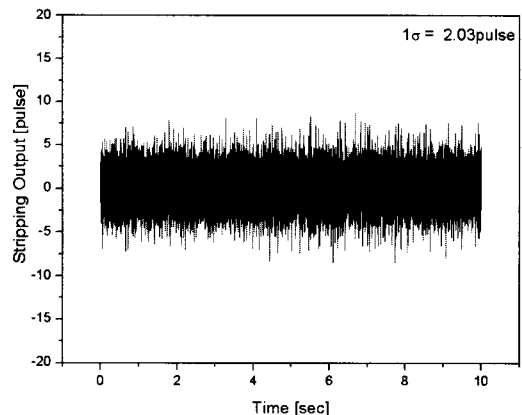


Fig. 7. 링레이저 신호 검출시간지연 방법에서 Fitting Point에서의 stripping 출력

Fig. 6은 링레이저 출력펄스 지연시간 α 를 변화시키면서 식(12) 및 식(14)에 따라서 dither stripping 출력을 계산하고 각 경우의 잡음수준을 계산하여 나타낸 그래프이다.

그림에서 보는 바와 같이 링레이저 신호 검출 시간 지연 α 가 약 $64\mu\text{s}$ (총 $769.3\mu\text{s}$)인 점에서 dither-stripping 출력의 잡음수준이 최소가 되는 점(Fitting Point)을 가짐을 알 수 있고, 그러므로 이때가 링레이저 출력과 V-F 출력의 위상이 일치한다고 볼 수 있다. 이론적으로 계산한 α 는 약 $43\mu\text{s}$ 이나 아날로그 및 V-F 신호 처리과정에서 $10\sim 20\mu\text{s}$ 정도의 추가적인 시간 지연이 발생한 것으로 판단된다. 이때의 2400Hz dither-stripping 출력은 Fig. 7에 나타낸 바와 같이 약 2펄스(1.24deg/sec)의 잡음수준을 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 샘플링 시간을 변화시키면서 trapping 출력과 stripping 출력의 잡음수준을 계산하여 비교한 그래프이다. 실험에서 stripping 데이터는 2400Hz로 기록되도록 하였으며, trapping 출력은 2400Hz로 모니터를 할 수 있으나 각진동 주기가 완료되는 시점에서 적분된 출력이 한번 출력되므로 각진동이 완료되는 시점 이외의 시점에는 0이 기록된다. 그리고 잡음수준의 계산방법은 샘플링된 데이터를 $1/2400\text{sec}$ 로 길이로부터 약 10sec 길이까지의 cluster로 묶어서 각 길이마다의 분산을 계산하는 방법으로 하였다. 그림에서 보는 바와 같이 잡음수준에 있어서는 stripping 출력이 trapping 출력에 비하여 약 1.5~2배의 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9와 Fig. 10은 자이로를 임의의 각속도로

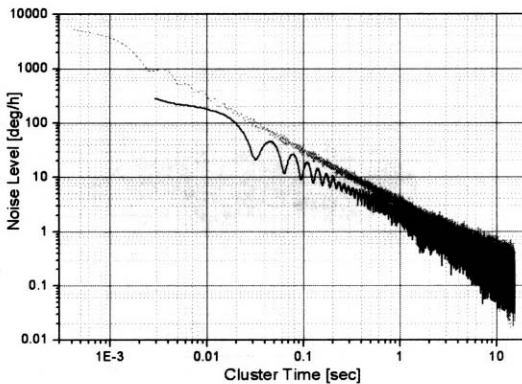


Fig. 8. 링레이저 신호 검출시간지연 방법에 의한 stripping 출력과 trapping 출력의 잡음수준 비교

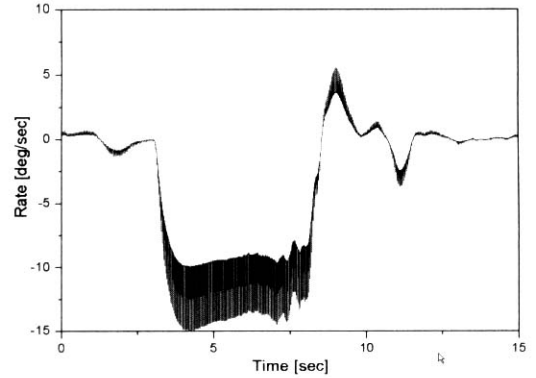


Fig. 9. Trapping에 의한 200Hz 샘플링 출력 각속도

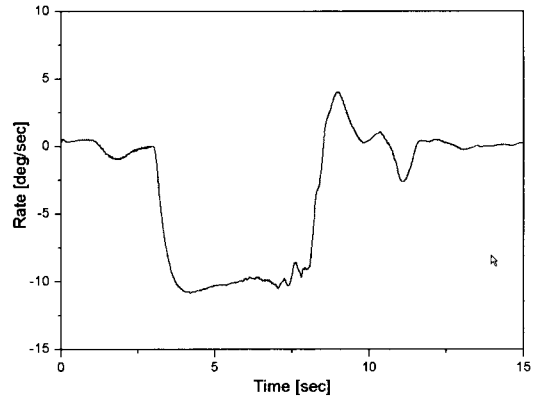


Fig. 10. Stripping에 의한 200Hz 샘플링 출력 각속도

움직이면서 trapping 방법과 stripping 방법으로 샘플링 주파수 200Hz의 각속도출력 결과 그래프이다. 자이로의 각진동 주파수가 샘플링 주파수와 일치하지 않음으로서 입력 각속도가 큰 영역에서 trapping에 의한 각속도 출력은 매우 큰 불확정도를 가짐을 알 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위해서는 trapping 출력에 소프트웨어적인 계산을 추가하거나 자이로의 샘플링 주파수를 각진동 주파수와 일치시키는 방법이 있을 수 있으나, 서로간의 기계적인 커플링을 방지하기 위하여 3개의 각진동 주파수가 각각 서로 다른 링레이저 자이로로 구성된 항법시스템에서는 문제가 될 수 있다. 이에 비하여 stripping 출력은 공진기의 각진동 주파수와 관계없이 비행체의 각속도를 비교적 정확히 출력함을 알 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 약 50Hz의 정현파 각진동이 인가되는 상황과 약 10ms의 충격이 인가되는 상황에서 trapping과 stripping 출력을 동

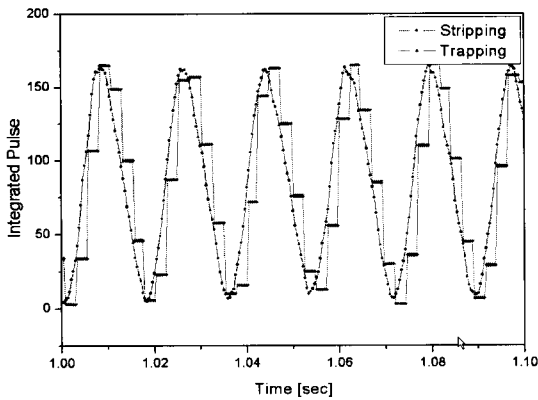


Fig. 11. 진동입력에 대한 stripping과 trapping 출력 비교

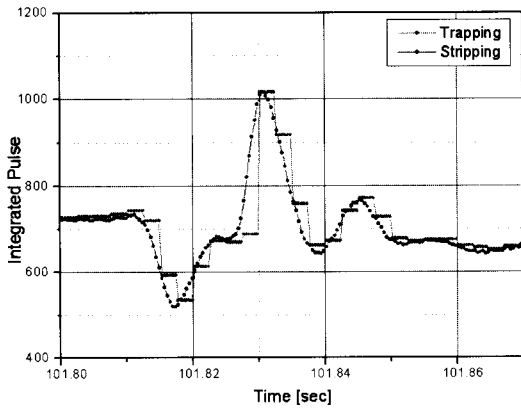


Fig. 12. 충격입력에 의한 trapping과 stripping 출력 비교

시에 측정하여 비교한 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이 외부에서 입력된 정현파 형태의 운동에 대하여 trapping에 의하면 계단 형태의 출력을 나타내지만 stripping은 정현파 형태의 출력을 비교적 실시간으로 나타냄을 알 수 있다. 이러한 현상으로부터 비행체가 coning 운동을 하거나 급격한 각운동을 하는 경우에 이를 보상하는 알고리즘 적용을 위해서는 stripping이 필수적으로 요구됨을 알 수 있다.

III 결 론

링레이저 자이로의 출력을 공진기의 각진동 주파수와 관계없이 고속으로 샘플링하고, 관성항법장치에서 3개 자이로의 샘플링 주파수를 일치 시킴으로서 속도오차를 줄이고 coning 오차를 보상하기 위하여 dither stripping이 요구된다. 우리는 각진동 센서의 출력을 V-F 변환하고 다시 미

분을 취함으로써 V-F 출력의 offset을 제거하는 방법을 연구하였다. 미분 과정에서 발생하는 위상 차이는 아날로그 회로에서 적분기를 이용하여 보정하거나 또는 디지털 회로에서 링레이저 출력이나 V-F 출력의 검출 시점을 지연시키는 방법에 의하여 보정하였다. 정확한 지연시간을 알기 위하여 지연시간을 변화시키면서 stripping 출력의 잡음수준을 비교하여 최소가 되는 지점으로 설정하였다. 그리고 링레이저 펄스와 V-F 펄스간의 환산을 위하여 두 펄스간의 분산비율로서 이득을 계산하는 방법을 적용하였다.

개발된 dither stripping 방법을 자이로에 적용한 결과 잡음수준이 dither trapping보다 약 1.5배 크기는 하지만 고 각속도 환경에서 추가적인 계산 없이 각속도를 보다 정확히 측정할 수 있으며, 진동 및 충격에 대해서 보다 실시간적인 출력을 얻을 수 있었다.

참고문헌

- 1) E.O. Schulz, "Alternative Interpretation of Rotation Rate sensing by Ring Laser", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. QE-2 No8, August 1966, pp. 299-305.
- 2) J. E. Killpatrick, "The Laser Gyro", IEEE Spectrum Vol.4 1967, p.44-55.
- 3) E.J. Post, "Sagnac Effect", Review of Modern Physics, vol.39, Number2, April 1967, pp. 475-493.
- 4) F. Aronowitz, R.J. Collins, "Mode Coupling due to Backscattering in a He-Ne Traveling-Wave Ring Laser", Applied Physics Letters Vol.9 Number 1 July 1966, pp. 55-58.
- 5) R.A. Patterson, B. Ljung and D.A. Smith, "Reduction of Beam Coupling in a Ring Laser Gyro by Doppler Shifting of Scattered Light", SPIE vol.487 Physics of Ring Laser Gyros, 1984. pp. 78-84.
- 6) Thomas J. Hutchings, Daryl C. Stjern, "Scale Factor Nonlinearity of a Body Dither Laser Gyro", IEEE 1978. pp. 549-555.
- 7) J. E. Killpatrick, "Laser Gyro Dither Random Noise", SPIE Vol.487 Physics of Ring Laser Gyros, 1984. pp. 85-93.
- 8) L.W. Richardson, "Ring Laser Gyro Application for High Accuracy Position and Tracking in Space", Symposium Gyro Technology 1993 pp.7.0-7.14.

9) J. Feldman, S. Helfant, "A Laser Gyro Evaluation Plan and Test Results", SPIE Vol. 157 Laser Inertial Rotation Sensors, 1978, pp. 196-204.

10) A.R. Malvern, M.T. Ottway, D.H. Titterton, "The Development of Small Ring Laser Gyroscope", Symposium Gyro Technology 1996 pp. 10.0-10.25.

11) Hansli, W., "Einrichtung zum Messen einer Drehbewegung", European Patent

No.0133609 BI, 28.09.1983.

12) B.G. Ljung, G.F. Schroeder, "Ring Laser Gyro Dither Pulse Eliminator", US Patent, No.4,433,706, Aug. 17. 1982.

13) S. Ferriss, N.J. Park, "Electronic Dither Compensator for a Ring Laser Gyro", US Patent, No.4,610,543, Sep. 9. 1986.

14) K.R. Fritze, J.E. Killpartrick, D.F. Berndt, "Ring Laser Gyro Dither Stripper", US Patent, No. 5,249,031, Sep. 28. 1993.