

論文

고속회전 감지 광섬유자이로 설계

도재철*, 정경호*, 조민식*, 송기원*, 문홍기*

Design of Fiber Optic Gyroscope for Sensing High Rotation

Jae-Chul Do*, Kyoung-Ho Chong*, Min-Sik Jo*, Ki-Won Song* and Hong-Key Moon*

ABSTRACT

We studied the design of fiber optic gyroscope that enables to sense high rotation by extending the limit of rotation sensibility of fiber optic interferometer. Based on the digital serrodyne modulation technique, the signal processing of fiber optic gyroscope was designed and the prototype fiber optic gyroscope showed the high rotation sensibility up to $\pm 3000[\text{deg/sec}]$ and scale factor performance of about $150[\text{ppm}]$ by the experiments. Accordingly, we confirmed that the design of fiber optic gyroscope was valid for high rotation.

초 록

본 논문은 광섬유 간섭계의 제한된 회전 측정범위($\pi/2[\text{radian}]$) 확장을 통하여 고속 회전입력을 감지할 수 있는 광섬유자이로 설계에 관한 연구 결과를 기술하였다. 디지털 세로다인 변조 기법을 바탕으로 광섬유자이로 신호처리 회로를 설계하였으며, 제작된 프로토타입 광섬유자이로의 시험결과 약 $\pm 3000[\text{deg/sec}]$ 의 고속 회전측정 성능과 약 $150[\text{ppm}]$ 의 환산계수 성능을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 고속회전 감지를 위한 광섬유자이로 설계의 유효성이 검증되었다.

Key Words : High rotation sensibility(고속회전 감지능), Digital serrodyne modulation(디지털 세로다인 변조), Fiber optic gyroscope(광섬유자이로)

1. 서 론

광섬유자이로는 레이트를 측정하는 관성센서로서 링레이저 자이로(RLG)와 더불어 대표적인 광학식자이로에 해당된다[1]. 광섬유자이로는 1970년도 중반에 Sagnac 효과의 원리를 바탕으로 개발이 시작되었으며, 광원이나 광섬유 등 부품 소자의 성능 개선이 이루어지면서 본격적인 기술발전이 이루어져 왔다[2]. 광섬유자이로의 장점으로는 기존 기계식 자이로에 비해 제작공정이 단순하고 소형이며 움직이지 않는 구성품들로

구성되어 있다. 또한 적용되는 대부분의 광학부품들이 장시간 동안 높은 신뢰도를 갖고, 통신용 부품으로 이루어짐으로써 비교적 저비용으로 생산이 가능하다. 광섬유자이로는 신호처리 방식에 따라 개루프 방식과 폐루프 방식으로 나뉜다. 개루프 방식은 일반적으로 전광섬유 구조(All Fiber Configuration)를 갖고, 저급 자이로에 주로 쓰이는 방식이다[3]. 이 방식은 회전 측정 범위가 제한적일 뿐만 아니라 환산계수 비선형도가 수 퍼센트에 이른다. 반면 폐루프 방식은 중급이나 고급 자이로에 널리 쓰이는 방식으로 높은 회전에 도 비선형 오차가 작은 장점을 갖는다[1].

특히 유도탄(Missile Guidance), 레이더 안정화(Radar Stabilization), 무인기 유도제어(UAV Guidance and Control) 등에 다양하게 적용되는

† 2008년 12월 2일 접수 ~ 2009년 5월 28일 심사완료

* 정희원, 국방과학연구소

교신저자, E-mail : lenardo@add.re.kr

대전시 유성구 유성우체국 사서함 35호

자이로는 수 [deg/hr] 이하 바이어스 성능 및 1000[deg/sec] 이상의 높은 회전 감지 능력을 요구한다. 그러나 광섬유자이로는 회전 입력에 대한 코사인 응답을 하기 때문에 회전 감지 영역이 $\frac{\pi}{2}$ [radian]으로 제한되어 있다. 예를 들어 길이 200[m], 직경 40[mm]를 갖는 광섬유자이로의 경우 $\frac{\pi}{2}$ [radian]은 약 800[deg/sec]에 해당된다. 따라서 회전 감지 각속도 범위를 증가시키기 위해서는 광섬유 길이와 직경을 줄이는 방법이 있으나 이는 부피가 커지고 진동에 취약해 줄 수 있으며 제작공정을 복잡하게 만들 뿐만 아니라 바이어스 성능을 저하시킨다.

본 논문에서는 $\frac{\pi}{2}$ [radian]으로 제한되어 있는 최대 회전 감지 각속도를 π [radian] 이상으로 확장 가능한 신호처리 회로를 설계하였다.

II. 기본원리 및 설계

2.1 광섬유자이로의 동작원리

광섬유자이로는 광섬유 고리를 시계방향과 반시계방향으로 통과한 두 빛이 회전으로 인하여 서로 다른 광경로(Optical Path Length)를 거치면서 광 위상차(Optical Path Difference)를 유발하는 사낙 효과에 의해 동작한다.

이렇게 동작하는 간섭계를 사낙 간섭계(Sagnac Interferometer)라 부른다[4]. 사낙 간섭계의 광세기는 입력 각속도에 대해 코사인 함수 관계이다. 그림 1에서 광섬유 고리를 통과하여 광검출기에 입사된 광출력(Optical Power)이 P_0 라면, 광검출기를 통과한 신호는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다. 즉 식 (2)에서처럼 회전 감지

각속도의 척도인 광학환산계수는 광섬유길이와 직경에 비례하고 파장에 반비례하므로 광섬유길이 길수록 직경이 클수록 감도는 증가한다.

$$P_d = \frac{P_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi_R)] \quad (1)$$

$$\Delta\phi_R = \frac{2\pi LD}{\lambda c} \cdot \Omega = K_{sf} \cdot \Omega \quad (2)$$

Ω : 입력각속도[deg/sec]

$\Delta\phi_R$: Sagnac 위상차[rad]

K_{sf} : 광학환산계수[rad/deg/sec]

L : 광섬유 길이[m]

D : 광섬유 고리의 직경[m]

λ : 광원의 중심파장[m]

c : 진공중에서 광속[m/sec]

페루프 광섬유자이로는 위상변조기를 통해 회전 정보를 피드백 함으로써 항상 '0'인 지점에서 동작이 유지되도록 한다. 즉 광위상 신호에 피드백 신호가 인가되면 회전 각속도 값이 항상 '0' 부근에서 동작한다. 그림 2는 광섬유자이로의 페루프 동작원리를 나타낸다[4].

광섬유자이로가 페루프 동작을 하기 위해서는 항상 '0'인 지점에서 선형성을 가져야 한다. 그러나 출력은 회전 입력 각속도에 대해 코사인 응답을 가지므로 작은 회전 입력에서 민감도(Sensitivity)는 매우 낮기 때문에 자이로의 각속도 변화에 대한 신호응답은 불규칙적이고 선형성이 떨어진다. 이 문제로 인하여 $\pm \frac{\pi}{2}$ [radian] 만큼 위상 바이어스를 인가시킴으로써 자이로 출력을 사인응답으로 변환

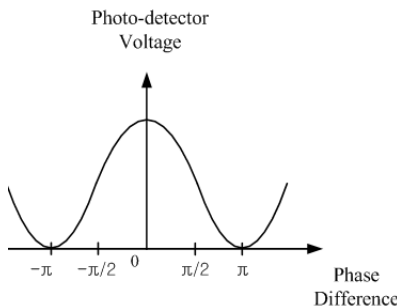


Fig. 1. Photo Detector Output vs. Phase Difference

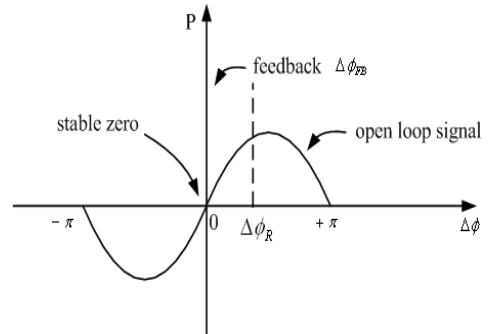


Fig. 2. Principle of the Closed-loop Fiber Optic Gyroscope

$\Delta\phi_R$: Sagnac 위상차[rad]

$\Delta\phi_{FB}$: 피드백 위상차[rad], $\Delta\phi_{FB} = -\Delta\phi_R$

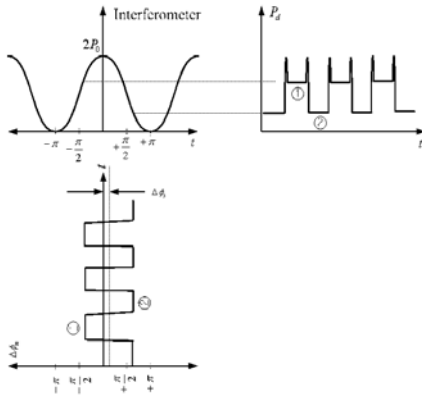


Fig. 3. Interferometer Responses to Square-wave Bias Modulation

시킨다. 즉 $\pm \frac{\pi}{2}$ [radian]의 주기적인 구형파 신호를 인가하고 그 차이를 이용하여 회전 입력에 대한 감지 각속도 정보를 얻는다. 일단 감지 각속도 정보가 얻어지면 페루프 시스템의 오차를 줄이기 위한 적분기를 통과한 후 위상 변조기로 피드백된다. 구형파를 인가할 때의 신호응답은 그림 3과 같다. 그림에서 P_{d1} (①)과 P_{d2} (②)의 차이 값이 회전 각속도 변화량(P_{rate})이며, 식(3)~(5)와 같이 표현된다.

$$P_{d1} = P_0[1 + \cos(\Delta\phi_R + \phi_b)] \quad (3)$$

$$P_{d2} = P_0[1 + \cos(\Delta\phi_R - \phi_b)] \quad (4)$$

$$P_{rate} = P_{d1} - P_{d2} = 2P_0 \sin\phi_b \sin\Delta\phi_R \quad (5)$$

$$\approx 2P_0 \phi_b, (\phi_b = \frac{\pi}{2})$$

본 논문에서 위상변조기에 인가되는 신호는 입력 각속도에 비례하는 복조 신호(P_{rate})를 누적함으로써 생성된다.

2.2 광섬유자이로의 구성

페루프 광섬유자이로는 광학부 및 전자부로 구성된다. 광학부의 대표적인 소자는 광원, 집적광학소자, 광섬유고리, 광검출기 등이고, 전자부는 광검출 신호를 증폭해주는 증폭부, 디지털 데이터로 변화해주는 AD 변환기, 디지털 톱니파인 세로다인 신호를 발생해주는 세로다인 신호발생기, 아날로그 신호로 변환시키는 DA 변환기 등으로 구성되어 있다. 또한 최종 자이로 출력을 보정하고 센서를 교정하는 마이크로 콘트롤러(또는 DSP)가 포함된다.

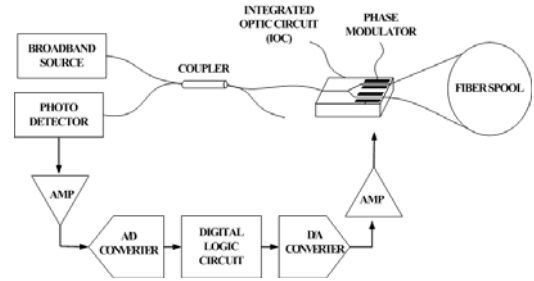


Fig. 4. Configuration of the Closed-loop Fiber Optic Gyroscope

III. 감지 각속도 확장 설계 및 검증

3.1 디지털 세로다인 변조신호

위상변조기에 인가되는 변조신호는 광경로에 의한 시간지연(τ) 차이에 해당되는 신호로 출력된다.

위상변조기에 가해지는 디지털 세로다인 변조신호는 전압 범위의 제한 때문에 한계 진폭 이상에 이르면 오버플로(또는 리셋)로 인하여 반복성을 가지게 된다. 예를 들어 위상변조기의 변조진

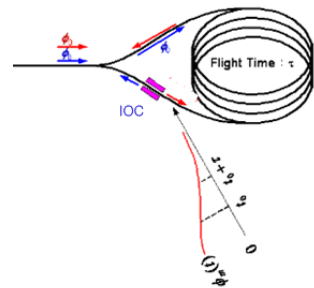


Fig. 5. IOC Response

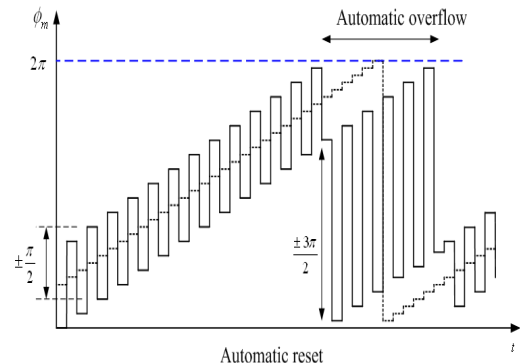


Fig. 6. Digital Serrrodyne Signal

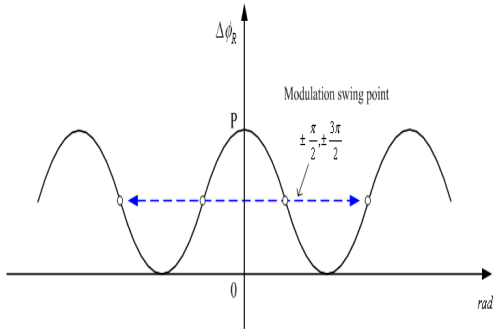


Fig. 7. Sagnac Interferometer Operating Point

폭(V_π)이 2.5V로 설정되면, $+\pi \sim -\pi$ [radian] 위상차는 $-2.5V \sim +2.5V$ 전압 범위에 해당되고 이 입력점을 벗어나는 영역에 대해서는 $V_{2\pi}$ 만큼 오버플로되면서 리셋된다.

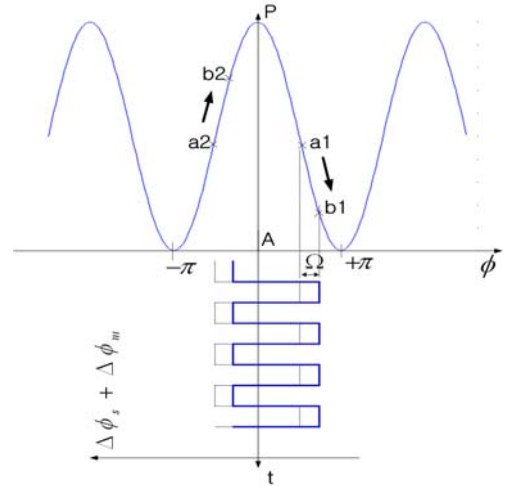
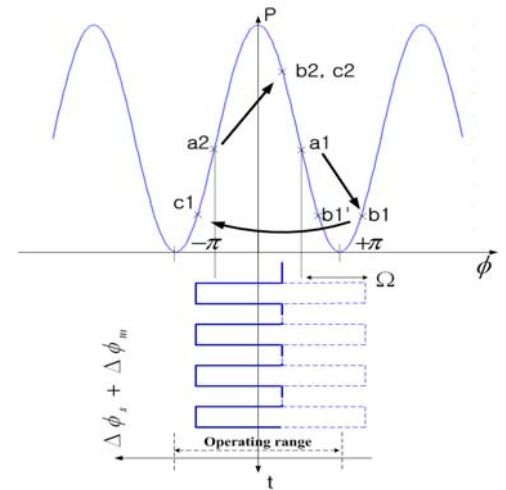
따라서 감지 각속도 확장을 위해 2π [radian] 이상의 입력 위상차가 인가되었을 경우, 변조신호도 2π [radian] 범위에서 이루어지도록 변조 패턴을 생성되어야 한다. 즉 2π [radian]마다 리셋이 발생되므로 모든 신호는 2π [radian] 범위 내에서 발생되어야 한다.

3.2 감지 각속도 확장을 위한 위상변조

위상변조기에 세로다인 변조신호가 인가되면 광경로에 의한 시간지연(τ) 때문에 $\Delta\phi_m$ 신호가 코사인 위상에 입력된다. [그림 7] 이 입력 신호에 의하여 광섬유 간섭계 출력은 회전입력에 대하여 2π [radian] 간격으로 동일하게 나타낸다. 그림 8에서 점 A는 위상차(ϕ)에 대한 기준점(Zero Reference)으로써 개루프의 정지 상태 동작점은

a_1, a_2 이다. 여기에 $\Omega < \pm \frac{\pi}{2}$ [radian/sec]인 회전입력(Ω)이 발생할 경우, 위상변조 신호 레벨은 Ω 만큼 이동되므로 동작점은 $a_1 \rightarrow b_1, a_2 \rightarrow b_2$ 로 변환된다. 즉 $\pm \frac{\pi}{2}$ [radian/sec] 이내의 회전입력이 발생하면 a_1, a_2, b_1, b_2 가 $\pm\pi$ [radian] 범위 내의 값을 갖게 되므로 회전 정보를 쉽게 획득할 수 있다.

그러나 $\Omega > \pm \frac{\pi}{2}$ [radian/sec]인 회전입력(Ω)이 발생했을 경우, 동작점은 2π [radian] 한계치 범위를 벗어나므로 변조신호를 $\pm\pi$ [radian] 범위내로 이동시켜야 한다. 즉 그림 9에서 회전입력이 $\pm \frac{\pi}{2}$ [radian/sec]를 넘어서면 동작점 a_1 이 b_1 으로 이동하게 되는데 이때 b_1 의 위상이 π [radian]을 넘

Fig. 8. Interferometer Responses to Input Rotation under $\pm\pi$ Fig. 9. Interferometer Responses to Input Rotation exceeding $\pm\pi$

어서게 된다. 이 경우 b_1 은 b_1' 지점과 사냥 간섭계의 동일한 코사인 함수 출력을 갖기 때문에 실제 입력이 b_1 에 해당하는지 b_1' 에 해당하는지 구분을 못하는 모호성(Ambiguity)에 직면하게 된다. 이러한 모호성을 방지하기 위해 동작점을 $\pm\pi$ 이내로 제한해야 하고 만약 큰 회전입력에 의해 동작점이 π [radian]을 넘어 설 경우 -2π 만큼 이동시키므로써 차이로가 정상적으로 회전을 감지하도록 할 수 있다. 이때 a_1, a_2 의 동작점은 각각 $a_1 \rightarrow b_1 \rightarrow c_1, a_2 \rightarrow b_2 \rightarrow c_2 (b_2 = c_2)$ 로 이동한다. 수식적으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 &\text{if}(\Delta\phi_m > +\pi) \text{ then} \\
 &\quad \Delta\phi_m = \Delta\phi_m - 2\pi \\
 &\text{else if}(\Delta\phi_m < -\pi) \text{ then} \\
 &\quad \Delta\phi_m = \Delta\phi_m + 2\pi \\
 &\text{end}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

또한 신호처리는 동작점이 2π 만큼 이동될 때 이동 시점 및 횟수를 레지스터에 저장하여 회전 정보에 반영함으로써 실제 회전량을 정확히 출력할 수 있다.

$$\Omega_{new} = \Omega_{\frac{\pi}{2}} \times N + \Omega_{old}
 \tag{7}$$

Ω_{new} : 확장된 입력각속도[deg/sec]

$\Omega_{\frac{\pi}{2}}$: $\frac{\pi}{2}$ 에 해당하는 입력각속도[deg/sec]

N : 2π 만큼 이동된 횟수

Ω_{old} : 2π 만큼 이동된 입력각속도[deg/sec]

3.3 성능 시험 및 결과

앞에서 설계한 회전입력 감지영역 확장을 적용한 디지털 페루프 광섬유자이로의 최대 감지 각속도를 측정하기 위해서 그림 10과 같이 광섬유자이로 프로토타입을 제작하였다. Sagnac 위상차로 최대 감지할 수 있는 기본적인 감지 영역

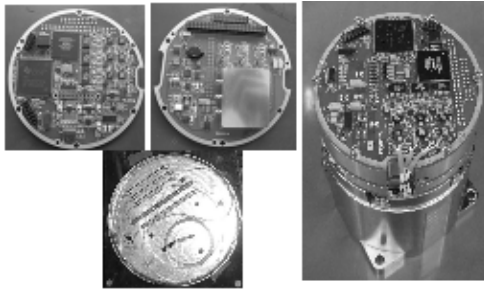


Fig. 10. Prototypical Fiber Optic Gyroscope

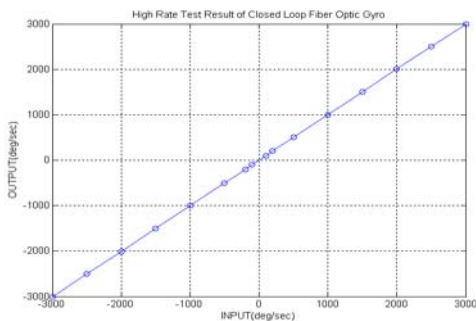


Fig. 11. Test Results of the Maximum Sensibility

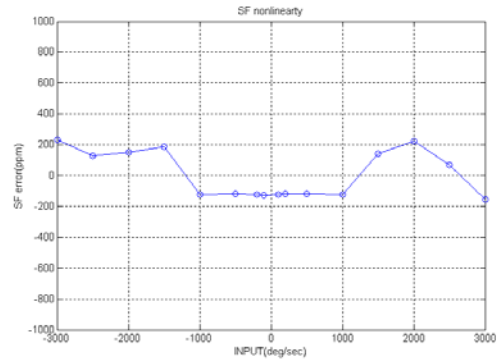


Fig. 12. Test Results of the Scale-Factor Error

을 감지 각속도 확장을 통하여 ± 3000 [deg/sec] 까지 안정되게 출력됨을 확인하였다[그림 11]. 한편 환산계수 비선형도 오차는 151[ppm](1 σ)으로 양호하게 나타났다[그림 12].

IV. 결 론

본 논문에서는 고속회전 감지 각속도를 요구하는 시스템에 적용 가능한 광섬유자이로의 신호처리에 관한 연구에 대하여 기술하였다. 프로토타입 광섬유자이로를 제작하여 실험한 결과, 감지 각속도 $\pm \frac{\pi}{2}$ [radian] 영역을 $\pm \pi$ [radian] 까지 확장하는 알고리즘 적용함으로써 ± 3000 [deg/sec] 범위까지 확장된 감지 각속도 및 약 151[ppm](1 σ)의 비선형 오차를 얻었다. 향후 비선형 오차를 더욱 개선하기 위해서는 위상변조기의 선형성에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 도재철 외, "디지털 페루프 신호처리를 적용한 광섬유자이로 설계 및 성능평가", 한국항공우주학회지 제 34권 제 9호, pp. 97~103, 2006. 9.
- 2) 정경호 외, "페루프 광섬유자이로 변조진폭 정밀제어", 제13차 광전자 및 광통신 학술회의, 2006. 5.
- 3) 정경호 외, "페루프 광섬유자이로의 디지털 세로다인 신호처리기 모델링 시뮬레이션", 한국군사과학기술학회, pp. 355~358, 2004. 8.
- 4) H. C. Lefevre, "Fiber Optic Gyroscope", Artech House, 1993.