

관성센서를 이용한 도립진자의 제어를 위한 상보필터 설계 및 성능평가

Design and Performance Evaluation of a Complementary Filter for Inverted Pendulum Control with Inertial Sensors

나카시마 토시타카*, 장문제**, 홍석교***

Toshitaka Nakashima*, Mun-Che Chang**, Suk-Kyo Hong***

Abstract - This paper designs and evaluates a complementary filter for fusion of inertial sensor signals. Specifically, the designed filter is applied to inverted pendulum control where the pendulum's angle information is obtained from low-cost tilt and gyroscope sensors instead of an optical encoder. The complementary filter under consideration is a conventional one which consists of low- and high-pass filters. However, to improve the performance of the filter on the gyroscope, we use an integrator in the filter's outer loop. Frequency responses are obtained with both tilt and gyroscope sensors. Based on the frequency response results, we determine appropriate parameter values for the filter. The performance of the designed complementary filter is evaluated by applying the filter to inverted pendulum control. Experiments show that the performance of the designed filter is comparable to that of an optical encoder and low-cost inertial sensors can be used for inverted pendulum control with the help of sensor fusion.

Key Words: Complementary filter, inertial sensor, sensor fusion, inverted pendulum control

1. 서론

관성센서는 물체의 관성량을 측정하는 센서로, 기준 좌표계가 움직일 때도 이용할 수 있는 센서다. 그 동안 관성센서는 보행 로봇의 자세제어 [1], 항법시스템 [2, 4], 무인헬리콥터 제어 [3] 등 폭넓은 분야에서 기울기, 위치 및 운동 등을 측정할 때 이용되어 왔다.

일반적으로 도립진자 시스템에서 진자 각도는 포텐서미터 혹은 엔코더센서를 이용하여 측정한다. 특히, 엔코더는 잡음이 적고 구현이 용이하여 많은 제어응용에 이용되고 있다. 그러나 포텐서미터나 엔코더는 비관성센서이기 때문에 기준 좌표계가 움직일 경우 이를 반영하지 못한다. 기준 좌표계가 움직일 경우 관성센서가 필요하다. 특히, 관성센서 중 각속도형 자이로스코프는 회전운동을 측정할 때 유용하나 각도를 측정할 경우 적분시 드리프트에 의한 바이어스 오차가 발생하는 단점이 있어 그 동안 이러한 오차를 보상하는 방법들이 많이 연구되어 왔다 [3, 4, 8].

이 논문에서는 기준 좌표계가 움직일 수 있는 도립진자 시스템 제어를 위하여 저가형 관성센서인 Analog Devices사의 ADXL-202 가속도센서[5]와 Silicon Sensing System사의 CRS03-02 각속도형 자이로스코프[6]를 이용하는 방법을 고찰한다. 특별히, 두 가지 센서의 주파수 응답특성에 따라 신호를 융합할 수 있는 상보필터를 설계하는 방법을 고찰하고 그 성능을 평가한다.

최적의 상보필터를 설계하기 위하여 두 관성센서의 주파수 특성을 분석하고 이를 근거로 적절한 설계 변수를 얻는다. 또한 상보필터 외부 루프에 적분기를 추가하여 자이로스코프의 드리프트에서 기인하는 바이어스 오차를 보상한다. 실험을 통하여 설계된 필터의 성능이 양호함을 확인하고 이를 도립진자 시스템 제어에 적용하여 제안된 방법론의 타당성을 보인다.

2. 상보필터 설계

2.1 상보필터의 기본 개념

상보필터는 주파수 특성이 서로 다른 센서 신호를 융합하는데 사용하는 필터로 저역통과 및 고역통과 필터로 구성된다. 이러한 상보필터는 그 동안 관성센서를 이용하는 항법 시스템에 많이 이용되어 왔다 [4].

상보필터의 기본 개념은 그림 1과 같은 블록선도를 보면 이해할 수 있다. 그림 1에서, 원하는 최종 출력이 증력장에 대한 기울기 각도라고 하고 입력을 자이로스코프의 각속도 측정값과 기울기센서(가속도센서)의 기울기 각도 측정값으로 하자. 그러면, 이 블록선도는 자이로스코프 각속도를 입력으로 하고 기울기센서 신호를 출력 측정값으로 하는 관측기 시스템으로 볼 수 있다. 즉, 기울기센서의 각도 정보를 근거로 하여 자이로스코프 각속도의 적분 값을 추정하는 관측기 시스템이라는 것이다.

또한, 각 입력과 출력에 대한 전달함수를 구해보면 이는 저역통과 필터와 고역통과 필터가 결합된 상보필터로도 볼 수 있다. 이 블록선도의 전달함수를 구하면,

저자 소개

* 準會員 : 亞洲大學校 電子工學科 碩士課程

** 準會員 : 亞洲大學校 電子工學科 碩士課程

*** 正會員 : 亞洲大學校 電子工學科 教授

$$\alpha(s) = \frac{k_1}{s+k_1} \cdot \alpha_a(s) + \frac{s}{s+k_1} \cdot \frac{w_g(s)}{s} \quad (1)$$

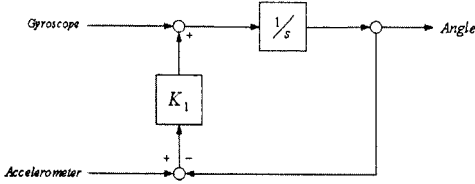


그림 1. 상보필터
Fig. 1 Complementary filter

$$= T_1(s)\alpha_a(s) + T_2(s)\alpha_g(s) \quad (2)$$

여기서, α_a 는 기울기센서로부터 얻은 각도, w_g 는 자이로스코프로부터 얻은 각속도, α_g 는 w_g 를 적분하여 얻은 기울기각도이고, $T_1(s) = k_1/(s+k_1)$ 는 저역통과 필터에 대한 전달함수이고, $T_2(s) = s/(s+k_1)$ 는 고역통과 필터에 대한 전달함수이며, 두 전달함수 사이에는 $T_1(s) + T_2(s) = I$ 의 관계가 성립한다. 또한 k_1 은 저역통과 및 고역통과 필터의 영역을 구분하는 차단주파수를 의미한다.

일반적으로 자이로스코프는 고주파영역에서 신호가 양호하지만 드리프트가 발생하여 각도센서로 이용할 때 오차가 누적된다. 반면에 기울기센서는 누적되는 오차가 없이 저주파에서 양호한 각도 정보를 얻을 수 있다. 상보필터의 기본 개념은 주파수 특성이 이렇게 다른 센서 신호를 융합하여, 각 센서에서 얻는 개별 신호보다 양호한 신호를 얻는 것이다. 즉, $T_1(s) + T_2(s) = I$ 의 관계가 성립하기 때문에 센서의 양호한 주파수영역을 반영하도록 차단주파수를 잘 선택하면 양 센서의 단점을 보완하는 상보성을 얻을 수 있다.

2.2 자이로스코프 바이어스 오차를 고려한 상보필터

2.1절의 상보필터를 이용할 때, 시간이 지남에 따라 자이로스코프에 드리프트 오차가 발생하며 이 드리프트 오차 때문에 융합된 출력 신호에 바이어스 오차가 발생한다. 이 문제를 해결하기 위한 방법으로 상보필터의 외부루프에 적분기를 이용해 이러한 오차를 보상하는 방법이 있다 [4].

위의 그림 2에 자이로스코프의 바이어스 오차를 고려한 블록선도를 나타낸다. 이 블록선도를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\alpha(s) = \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + k_1 s + k_2} \cdot \alpha_a(s) + \frac{s^2}{s^2 + k_1 s + k_2} \cdot \frac{w_g(s)}{s} \quad (3)$$

$$= T_1(s)\alpha_a(s) + T_2(s)\alpha_g(s) \quad (4)$$

이 식에서 사용된 변수들은 식 (2)에서 정의한 것과 같다. 다만, 상보필터가 2차이고 설계변수가 2개라는 점이 다르다. 여기에서도 식 (2)와 같이 $T_1(s) + T_2(s) = I$ 의 관계가 성립

한다. 참고로 T_1 과 T_2 는 각각 2차 저역통과 필터와 2차 고역통과 필터로 볼 수 있다.

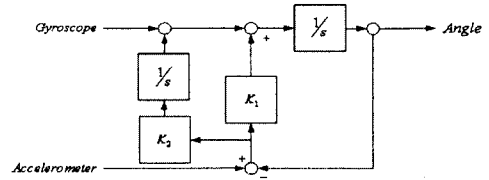


그림 2. 자이로스코프의 바이어스 오차를 고려한 상보필터
Fig. 2 Complementary filter with bias estimation

2.3 관성센서의 주파수 응답특성

상보필터의 설계 변수를 결정하기 위하여 실험을 통해 정현파 기울기각도 입력에 대한 관성센서의 주파수 응답을 얻었다. 주파수 응답으로부터 얻은 데이터를 그림 3에 나타내었다. 기울기센서(가속도센서)는 저주파영역에서 평탄한 이득 곡선(이득: 1)을 보이고, 자이로스코프는 상대적으로 고주파영역에서 평탄한 이득곡선(이득: 1)을 보인다. 이 때, 자이로스코프의 값은 적분기를 통과한 값 (즉, 각도 정보)이다.

그림 3에서, 약 0.3 rad/s 지점을 기점으로 두 곡선의 평탄한 영역이 나누어짐을 볼 수 있다. 이 평탄한 영역들은 모두 이득이 1이 되는 부분이다. 따라서 상보필터를 이용하여 이 영역을 취하여 융합하면 (즉, 차단주파수를 0.3 rad/s로 결정하면) 개별 센서로부터 얻는 정보보다 더 신뢰성 있는 정보를 얻을 수 있을 것이다.

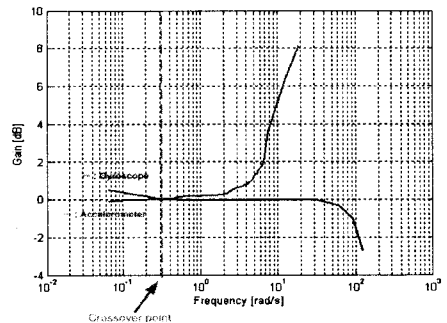


그림 3. 관성센서의 주파수 특성
Fig. 3 Frequency characteristics of inertial sensors

2.4 상보필터 설계변수 결정

상보필터 설계에서는 차단주파수 값을 결정하는 것이 가장 중요하다. 이 차단주파수는 센서의 주파수 응답특성을 근거로 하여 상보필터에 있는 저역통과 및 고역통과 필터의 변수를 통해 결정한다.

상보필터는 저역통과 및 고역통과 필터로 구성되어 있고 이들은 서로 상보관계에 있으므로 차단주파수를 공유한다. 따라서 하나의 차단주파수를 결정하면 이는 두 필터의 차단주파수로 사용된다.

2.2절에 제시한 바이어스 오차를 고려한 상보필터는 2차 저역통과 및 고역통과 필터를 갖는다. 일반적으로 2차 시스

삼았다.

이 연구를 통해서 실험에서 사용된 상보필터는 저역통과

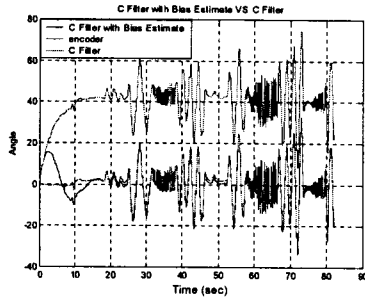


그림 4. 2개의 상보 필터 성능 비교
Fig. 4 Comparison of two complimentary filters

템은 전달함수 분모 표준형으로 $s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2$ 를 갖는다. 이 때, ω_c 는 고유주파수인데, 필터의 경우 차단주파수로 볼 수 있다. 이를 식 (3)과 비교하면

$$k_1 = 2\zeta\omega_c \quad (5)$$

$$k_2 = \omega_c^2 = \left(\frac{k_1}{2\zeta}\right)^2 \quad (6)$$

의 관계가 성립된다. 따라서 이 식을 이용하면 상보필터의 설계변수를 결정할 수 있다.

이 논문에서는 감쇄율 ζ 를 1로 하고 차단주파수 ω_c 를 0.3 rad/s으로 하여 설계변수 값 $k_1 = 0.6$, $k_2 = 0.09$ 를 얻었다.

3. 실험 결과

실험에 사용된 센서는 저가형 관성센서인 Analog Devices사의 ADXL-202 가속도센서[5]와 Silicon Sensing System사의 CRS03-02 각속도형 자이로스코프[6]이다. 도립진자 시스템은 Quanser Rotary Inverted Pendulum [7]이다. 데이터를 얻는데 사용된 샘플링 속도는 1KHz이다.

실험은 두 가지 경우에 대하여 행하였다. 첫 번째는 자이로스코프의 드리프트 오차가 발생할 때의 이를 고려한 상보필터와 그렇지 않은 상보필터의 성능을 비교하는 실험이다. 실험을 위해 임의로 센서에 진동을 가하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 2.2절에서 제시한 자이로스코프의 드리프트 영향을 고려한 상보필터의 결과가 엔코더와 비슷하다.

그림 5는 상보 필터를 이용한 도립진자 제어 결과이다. 제어기법은 LQR을 사용하였고, 동역학 모델은 [7]에 주어진 값을 이용하였다. 그림 5의 결과는 시작 후 2시간 후의 결과이며, 바이어스 오차 없이 양호하게 진자의 평형을 잘 유지함을 보여준다.

4. 결론

이 논문은 도립진자 제어에 관성센서를 이용하기 위하여 상보필터를 설계하고 실험을 통하여 그 성능을 평가하였다. 이용한 관성센서로는 각속도형 자이로스코프와 가속도센서를 사용하였으며 회전형 도립진자 시스템을 제어 대상으로

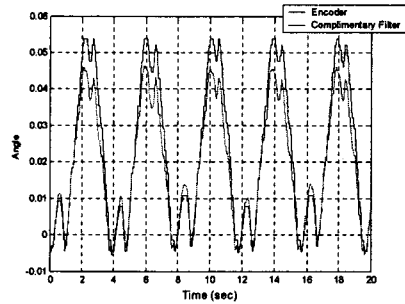


그림 5. 도립진자 제어 실험결과
Fig.5 Inverted pendulum control results

및 고역통과 필터로 구성된 일반적인 상보필터를 기반으로 한다. 그러나 자이로스코프의 드리프트에서 기인하는 바이어스 오차 보상이 필요하여 적분기가 추가된 개량된 형태의 상보필터를 사용하였다. 최적의 상보필터를 설계하기 위하여 두 관성센서의 주파수 특성을 분석하였고 이를 근거로 적절한 상보필터의 설계변수를 얻어내었다.

설계된 필터의 성능을 확인하기 위하여 자이로스코프 드리프트가 존재하는 경우의 실제 각도 추정성능을 알아보고, 도립진자 제어 실험을 통하여 설계된 상보필터가 기울기센서 및 자이로스코프를 이용한 제어응용에 이용될 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] T. Emura and A. Arakawa, "Attitude control of a quadruped robot during two legs supporting," *Int. Conf. Advanced Robotics (ICAR)*, pp. 711-716, 1991.
- [2] C. Yoo and Li Ahn, "Low cost GPS/INS sensor fusion system for UAV navigation," *Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, vol. 2, pp. 8.A.1.1-8.A.1.9, Oct. 2003.
- [3] G. Buskey, J. Roberts, P. Corke, and G. Wyeth, "Helicopter automation using a low-cost sensing system," *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 8-9, April-May, 2004.
- [4] A. Pascoal, I. Kaminer, and P. Oliveira "Navigation system design using time-varying complimentary filters", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 36, no. 4, October 2000.
- [5] Analog Devices, Inc., *Low Cost $\pm 2g/\pm 10g$ Dual Axis iMEMS Accelerometers with Digital Outputs*, Datasheet, 1999.
- [6] Silicon Sensing Systems Ltd., *CRS03 Single Axis Angular Rate Sensor*, Datasheet, 1999.
- [7] Quanser Consulting Inc., *SRV02 Serieese - Rotary Experiment #7: Rotary Inverted Pendulum*, Student Handout, 2003.
- [8] 최호준, 홍석교, *관성센서를 이용한 이동 로봇형 역진자 시스템 제어*, 아주대학교 공학 석사학위 논문, 2003.