2011년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2011. 7. 20 - 22

자율이동로봇 이동음원 추적센서 개발을 위한 의사선형 도래각 추정기법

임재일, 나원상
한동대학교 기계제어공학부

Acoustic Source Tracker Based on Pseudo-Linear DOA Estimator for Autonomous Robots

Jae-Il Lim, Won-Sang Ra
Handong Global University

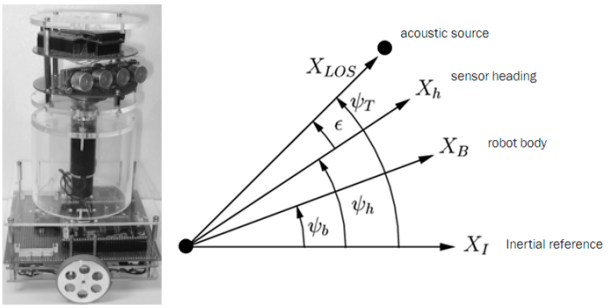
Abstract - In order to develop a one-axis gimbaled acoustic source tracker for mobile robots, a pseudo-linear direction of arrival(DOA) estimator is proposed using a linear ultrasonic sensor array. Under the assumption that the sensor measurement errors are negligible, a linear measurement model is derived using the linear prediction relation of the received sinusoidal acoustic signals. Applying the Kalman filtering technique for this model, the linear recursive DOA estimator is designed. For its linear recursive filter structure, it is preferable for real-time implementation on a commercial DSP. Through the experiments, the effectiveness of the suggested method is demonstrated.

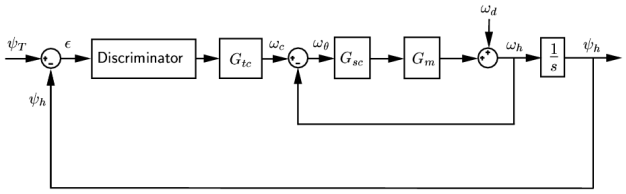
1. 서 론

음원 추적 시스템(acoustic sources tracker)은 다수의 센서로부터 측정된 음향신호를 이용하여 음원의 도래각(DOA: direction of arrival)을 추적하는 것을 목적으로 한다 [1,2]. 음원추적 시스템의 종류는 음원신호 수신을 위한 음향센서가 장착되어 있는 플랫폼의 운동여부에 따라 구분된다. 항만감시 소나와 같이 플랫폼이 이동하지 않는 경우에는 수신신호 정보만을 이용하여 광범위한 영역에 대해 만족할만한 수준의 도래각 추정성능을 얻을 수 있어야 하므로, 많은 센서가 선배열 되는 것이 일반적이다. 반면, 자율이동로봇의 음원추적센서와 같이 플랫폼이 이동하는 경우에는 공간적 제약으로 인해 많은 센서를 장착할 수 없고 플랫폼의 운동에 의해 수신신호의 비정적 특성이 두드러질 수 있으므로, 통상적인 신호처리 기법에만 의존하여 음원 추적시스템을 구성하는 것이 매우 어렵다. 이러한 문제점을 극복하기 위해, 그림 1과 같이 김발구조를 이용하여 음향센서를 표적 방향으로 회전시킴으로써 신호처리에 의한 도래각 추정범위를 줄이는 방법이 사용될 수 있다.

음원의 도래각 추정을 위한 기존의 방법은 크게 주파수영역 설계기법과 시간영역 설계기법으로 구분된다. 대표적인 주파수영역 도래각 추정기법인 MUSIC(multiple signal classification) 알고리즘은 고유벡터분해에 기반하여 비교적 정확한 도래각 추정 성능을 제공하지만 잡음환경이 정적이라는 가정을 필요로 하므로, 이동음원 도래각 추적을 위해서는 매우 짧은 주기로 음향신호를 샘플링해야 한다 [3]. 한편, 최대 우도 추정(MLE: maximum likelihood estimation) 및 GCC(generalized cross corelation) 기법은 가장 널리 사용되는 시간영역 도래각 추정기법이다 [4,5]. 시간영역 기법은 주파수영역 기법에 비해 상대적으로 느린 음향신호 샘플링 속도로도 광대역 신호를 다룰 수 있기 때문에 이동음원 추적 문제 해결에 보다 적합한 특성을 지니고 있다. 그러나, MLE 기법의 경우, 도래각 추정치 산출을 위해 수치해석적 방법을 사용하므로 실시간 구현이 용이하지 않고, 초기치 선정방법에 따라 전역 최적 상태 추정치의 획득을 보장할 수 없다는 단점을 지니고 있다. 이와 달리 GCC 기법은 구현이 매우 용이하지만, 비정적 잡음환경 하에서 도래각 추정의 신뢰성이 저하되는 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 현존하는 시간영역 도래각 추정기법들의 한계를 극복하기 위해, 선배열 초음파 센서 어레이를 이용한 의사선형 도래각 추정기법을 제안한다. 제안된 도래각 추정기법은 궁극적으로 자율이동로봇에 사용되는 김발형 음원추적센서의 각도 검출기(angle discriminator)를 구현하기 위한 것이다. 새로운 선형 도래각 추정기법의 개발을 위해, 센서의 정현파 신호로 근사되는 음향신호가 선형 예측(linear prediction) 관계를 만족한다는 사실에 착안하여 선형 측정방정식을 유도한다. 측정행렬의 통계적 파라미터 불확실성으로 작용하는 음향센서 측정잡음의 영향이 크지 않다는 가정 하에 의사선형 선형 측정방정식을 얻고, 칼만 필터에 기반하여 선형 순환 도래각 추정기를 설계한다. 제안된 도래각 추정기는 순환필터구조를 가지므로 상용 DSP 상에서 손쉽게 실시간 구현 가능하다. 실제 실험을 통해 제안된 의사선형 칼만필터 기반 도래각 추정기법의 적용 가능성을 타진하고, 음원 추적기의 성능을 확인한다.





<그림 1> 1축 김발형 자율이동로봇 이동음원 추적센서 구조

2. 이동음원 추적센서 개발을 위한 의사선형 도래각 추정기법

2.1 1축 김발형 이동음원 추적센서 개요

본 논문에서는 초음파 음원 방향으로 유도되는 자율주행 이동로봇의 개발을 위해 그림 1과 같이 2개의 선배열 초음파 수신기가 1축 김발에 장착된 음원 추적시스템을 고려한다. 제안된 1축 김발형 음원 추적시스템은 이동음원 추적 시 자율주행 이동로봇의 각운동 여부와 상관없이 공간상에서 음원 표적방향을 지속적으로 지향하기 위한 목적으로 도입되었다. 따라서 이동로봇 각운동 분리 기능이 없는 통상적인 김발형 센서와는 분명한 차이가 있다 [2].

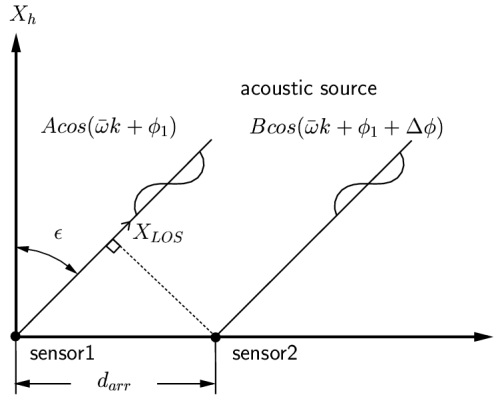
공간 안정화 제어루프는 이동로봇의 각운동을 외란으로 간주하여 감쇄시키고 음향센서를 관성 공간상에서 안정화하는 역할을 한다. 공간 안정화를 위해 김발에 장착된 MEMS 각속도계 측정치를 되먹임 하도록 제어루프를 구성하였다. 한편, 음향센서를 이동음원 방향으로 지향하기 위한 제어루프를 표적추적루프로 명명한다. 이동음원 방향과 김발에 장착된 음향센서의 지향방향 사이의 표적지향 오차각을 각도 검출기에 의해 획득하고, 오차각을 0으로 줄이기 위한 제어기를 구성한다. 각도 검출기에서 출력되는 표적지향 오차각은 김발에 장착된 음향센서 측정치를 이용하여 음원 도래각을 추정함으로써 산출된다.

2.2 의사선형 칼만 도래각 추정기

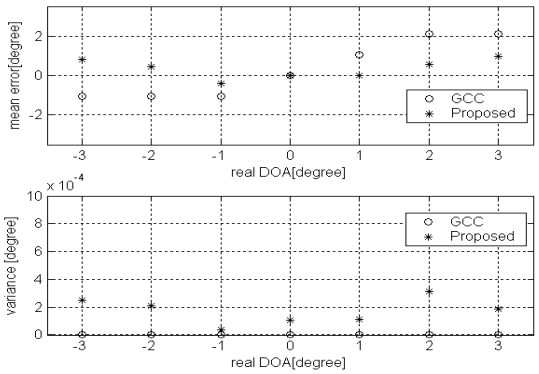
도래각은 그림 2와 같이 일렬로 초음파 센서 간을 연결하는 기준선에 수직한 법선벡터와 1번 센서와 음원을 잇는 시선벡터가 이루는 각도 ϵ으로 정의된다. 이 때, 음원이 초음파 센서로부터 충분히 멀리 떨어져 있고 음원신호를 정현파로 근사할 수 있다면, 2번 센서에서 수신된 음향신호 $s_2(k)$는 1번 센서에서 수신된 음향신호 $s_1(k)$의 위상지연 형태로 쓸 수 있다.

$$s_1(k) = A\sin(\bar{\omega}k+\phi_0) \qquad (1)$$
$$s_2(k) = B\sin(\bar{\omega}k+\phi_0+\Delta\phi)$$

여기서 A, B는 각 센서에서 수신된 음향신호의 크기를 $\Delta\phi$는 음향신호의 위상편차를 나타낸다. 초음파 음원의 주파수를 f, 샘플링 주파수를 f_s를 샘플링 주파수라하면, 정규화된 음향신호의 주파수는 $\bar{\omega}=2\pi f/f_s$로 정의된다.



〈그림 3〉 선배열 초음파 센서 배치 기하



〈그림 4〉 도래각 추정오차 평균 및 분산

그림 3의 센서 배치기하에 따라, 위상편차로부터 도래각·을 다음과 같이 산출할 수 있으므로, 도래각 추정문제가 수신신호의 위상편차 추정문제와 같은 문제임을 유추할 수 있다.

$$\epsilon = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta\phi}{\bar{\omega}/T_s}\cdot\frac{c}{d_{arr}}\right) \tag{2}$$

여기서, 음속은 편의상 $c=340[m/s]$로 정의한다.

한편, 식 (1)로부터 2번 센서에서 수신된 음향신호 $s_2(k)$를 $s_1(k)$에 관한 식으로 다시 쓸 수 있다.

$$s_2(k)=\frac{B}{A}s_1(k)\cos(\Delta\phi)+\frac{B}{A}\left(\frac{s_1(k+1)-s_1(k-1)}{2\sin(\bar{\omega})}\right)\sin(\Delta\phi) \tag{3}$$

김발형 이동음원 추적 시스템에 대해 도래각 $\Delta\phi$가 미소각이라 가정해도 무방하므로, 식 (3)으로부터 다음 근사식을 얻을 수 있다.

$$s_2(k)\approx s_1(k)\frac{B}{A}+\left(\frac{s_1(k+1)-s_1(k-1)}{2\sin(\bar{\omega})}\right)\frac{B}{A}\Delta\phi \tag{3}$$

실제 수신된 음향신호에는 측정 잡음이 포함되어 있으므로, 초음파 수신센서의 측정치를 다음과 같이 재정의한다.

$$\begin{aligned} d_1(k) &= s_1(k)+\bar{v}_1(k) \\ d_2(k) &= s_2(k)+\bar{v}_2(k) \end{aligned} \tag{4}$$

위의 식에서 측정잡음 v_1, v_2는 분산이 각각 $\bar{R}_1$, $\bar{R}_2$인 영평균 백색잡음이며, 상호 비상관되어 있다고 가정한다.
식 (4)를 식 (3)에 대입하여 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$y_k=[\tilde{H}_k-\Delta H_k]x+v_k \tag{5}$$

여기서

$$x\equiv\begin{bmatrix}x_1\\x_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{B}{A}\Delta\phi\\ \frac{B}{A}\end{bmatrix},\quad y\equiv d_2,\quad v\equiv\bar{v}_2,$$

$$\tilde{H}\equiv\left[\frac{1}{2\sin(\bar{\omega})}\left(d_1(k+1)-d_1(k-1)\right)\quad d_1\right],$$

$$\Delta H\equiv\left[\frac{1}{2\sin(\bar{\omega})}\left(\bar{v}_1(k+1)-\bar{v}_1(k-1)\right)\quad \bar{v}_1\right]$$

기준 음향센서의 측정오차가 충분히 작은 경우 통계적 파라미터 불확실성 ΔH_k를 무시할 수 있으므로, 식 (5)로부터 다음과 같은 의사 선형 측정방정식을 유도할 수 있다.

$$y_k\approx\tilde{H}_kx+v_k,\quad E\{v_k\}=0,\ var\{v_k\}=R=R_2 \tag{6}$$

매 N개의 음향신호 샘플에 대해 의사 선형 측정방정식 (6)을 이용하여 선형 칼만필터를 구성함으로써 선형 도래각 추정기를 구성할 수 있다. 음향신호 샘플링 구간에서의 도래각 변화는 크지 않은 것으로 가정한다.

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \hat{x}_{k-1}+P_k\tilde{H}_k^TR_k^{-1}(y_k-\tilde{H}_k\hat{x}_{k-1}) \\ P_k^{-1} &= P_{k-1}^{-1}+\tilde{H}_k^TR_k^{-1}\tilde{H}_k \end{aligned} \tag{7}$$

추정치 $\hat{x}_N$와 식 (2)로부터 도래각 추정치 $\hat{\epsilon}$을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\epsilon=\sin^{-1}\left(\frac{\Delta\hat{\phi}}{\bar{\omega}/T_s}\cdot\frac{c}{d_{arr}}\right),\quad \Delta\hat{\phi}=\frac{\hat{x}_{N,1}}{\hat{x}_{N,2}} \tag{8}$$

3. 실험결과

제안된 기법의 유용성을 검증하기 위해 의사선형 칼만 도래각 추정기법을 상용 DSP를 이용하여 구현하고 실제 실험을 수행하였다. 사용된 DSP는 TMS320f2812 모델로 32비트 고정소수점 연산을 지원하며, 150[MHz 의 연산속도를 가진다. 실험 조건은 다음과 같다.

$$f\approx 40[kHz],\quad f_s=800[kHz],\quad d_{arr}=2.3[cm]$$

도래각 추정기법의 성능을 확인하기 위해, 음원을 각도 방향으로 1° 씩 이동시키며 실험을 30회씩 반복하였다. 실험 결과는 그림 4에 도시된 바와 같다. 실험결과에서 확인할 수 있듯이, GCC 기법은 도래각이 커질수록 추정오차가 급격히 증가하는 반면, 제안된 의사선형 칼만필터의 경우, 보다 넓은 영역에서 상대적으로 우수한 추정성능을 제공한다. 제한된 성능을 가지는 저가형 모터가 김발 구동을 위해 사용되는 경우, 각도 추적루프의 이득을 증가시키는 데 한계가 있으므로, 등속 이동음원에 대한 정상상태 각도추적오차가 커질 수 있다. 따라서, 상대적으로 넓은 도래각 범위에 대해 만족할 만한 도래각 추정성능을 보이는 의사선형 칼만 도래각 추정기가 이동로봇 응용에 보다 적합한 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

이동하는 초음파 음원 방향으로 유도되는 자율이동로봇의 1축 김발형 음원 추적센서를 구현하기 위해 의사선형 도래각 추정기법이 제안되었다. 기존의 비선형 추정기법 및 GCC 기법의 단점을 극복하기 위해, 음향신호의 측정잡음에 의한 영향이 크지 않다는 가정 하에 정현파 신호로 모델링되는 음향신호의 선형 예측 특성을 이용하여 의사선형 측정방정식이 유도되었다. 공간안정화 및 각도추적이 가능한 김발형 음원 추적센서의 경우, 추정치 산출 주기 내에서는 음원의 이동에 의한 도래각 변화를 무시할 수 있으므로, 선형 칼만필터를 의사선형 측정방정식에 적용함으로써 손쉽게 도래각을 추정하는 방안이 제시되었다. 제안된 의사선형 도래각 추정기는 추정치의 일관성 측면에서 기존 기법들에 비해 보다 나은 성능을 제공할 수 있다. 또한 순환 필터 구조를 가지므로 실시간 구현에 매우 적합하다는 장점이 있다. 상용 DSP 상에서 의사선형 도래각 추정 기법을 구현하고, 이를 실제 실험에 적용함으로써 그 유용성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] E. Foxlin, "Inertial head tracker sensor fusion by a complementary separate-bias Kalman filter", *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 185-194, 1996.

[2] D.H. Kim, and Y.J. Park, "Development of moving sound source localization system", *Technical Acoustics*, pp. 1-12, 2006.

[3] P. Stoica and A. Nehorai, "MUSIC, Maximum Likelihood, and Cramer-Rao Bound," *IEEE Trans. ASSP*, vol. 37, no. 5, pp. 720-741, May, 1989.

[4] J. Li, and R. T. Compton, "Maximum likelihood angle estimation for signals with known waveforms," *IEEE Trans. Signal Processing*, pp. 2850-2862, Sept., 1993.

[5] C.H. Knapp and G.C. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," *IEEE Trans. ASSP*, pp. 320-327, 1976.