한국군사과학기술학회지 제16권 제1호, pp. 27~33, 2013년 2월

학술논문 항공기 부문

고주파 맥놀이 신호의 포락선 위상차를 이용한 음향식 헬멧자세추정 기법

Helmet Tracking Techniques Using Phase Difference between Acoustic Beating Envelope which Wave Length is Longer than Audio Frequency

최 경 식* 김 상 석* 박 찬 흠* 양 준 호*
Kyong-Sik Choi Sang-Seok Kim Chan-Heum Park Jun-Ho Yang

Abstract

Helmet Mounted Display(HMD) has great advantages on the navigation and mission symbologies for the pilot's forward looking display and, therefore, has been remarkably drawing attention as the up coming display of the next generation aircraft. The essential technology to process the Line of Sight-Foward(LOS-F) data in real-time is to estimate exact helmet situation and position. In this paper, we research a acoustic helmet tracking technique. For the reason that mechanical acoustic noises might interfere with Helmet Tracking System(HTS) and unnecessary acoustic noises are inevitable when using acoustic technique, this approach has not been adapted. In order to overcome this problem. We propose that acoustic wave of which the wave length is longer than audio frequency and, especially, we used beating signal envelope which is composed of two close high frequency.

Keywords : HMD(Helmet Mounted Display), HTS(Helmet Tracking System), Beating Signal(맥놀이 신호), Acoustic(음향), Envelope(포락선)

1. 서 론

HMD는 차세대 항공기 시현장치로써, HUD가 기존 항공기 동체의 전방에 대한 비행정보만 시현하던 것이 비하여, HMD는 조종사 응시방향에 대한 비행정보를 실시간 시현하게 된다[1]. 조종사 응시방향에 대한 가시선 데이터를 실시간 처리하기 위한 핵심 기술은 정확한 헬멧자세추정 기술이라 할 수 있다. 헬멧자세추정 정확도가 낮은 경우 조종사 응시 방향에 대한 정확한 정보를 제공해 줄 수가 없으며, 심각한 비행사고로 이어질 수 있다. 헬멧자세추정 기법으로는 전자기 방식, 광학 방식, 그리고 음향식 등이 있다[2~4]. 전자기 방식이 가지는 문제점은, 이미 한국형 기동헬기인 수리온에 장착되어 시운전에 있으나 타 기기에 전자기 간섭을 일으키기 쉬우며, 반대로 타 기기에서 발생하는 전자기파에 의해 간섭을 받기도 한다. 광학방식의 경우, 연산 량이 많아 하드웨어 부하가 많이 발생하며 실시간 구현이 쉽지 않은 문제와, 항공기 내,외부에서 발

† 2012년 11월 20일 접수~2013년 1월 11일 게재승인
* 한국항공우주산업(주)
책임저자 : 최경식(cks@koreaaero.com)

생하는 다른 가시광선 혹은 적외선으로 인해 노이즈 처리가 필요하며 광원 핸들링이 쉽지 않은 단점이 있다. 반면 음향방식의 헬멧자세추정은 장치구성이 쉬우며, 신호처리에 대한 하드웨어 부하가 적고, 음향신호의 굴절 특성으로 인해 헬멧 자세 추정 가능한 사각지역이 거의 존재하지 넓은 범위에 대해 자세 추정이 가능한 장점을 가진다. 반면 이러한 장점에도 불구하고 기존의 음향식 헬멧자세추정 기법은 항공기 내에 발생하는 기계, 진동 소음의 간섭과 조종사에게 불필요한 음향 소음을 유발한다는 측면에서 많은 연구가 진행되지 않았다. 본 논문에서는 음향식 헬멧자세추정이 가지는 이러한 문제점들을 극복하기 위하여 사람이 듣지 못하고, 기계 진동 소음이 대부분 가청주파수대의 저주파 영역에서 형성된다는 점에 착안하여 가청주파수 이상의 고주파 음향 신호의 위상지연차를 이용한 헬멧자세 추정 기법에 대해 연구하였다. 또한, 고주파 신호는 파장이 짧아지는 문제는 극복하기 위하여, 인접한 두 고주파 신호에 의해 생성되는 맥놀이 신호의 포락선이 형성하는 파형의 위상지연차를 이용하는 방법을 적용하였다.

2. 기본 이론

가. 헬멧자세추정 기본 개념

가청주파수 이상의 고주파를 이용한 음향식 헬멧자세추정 기법은 송, 수신기 각 각 3개 이상의 음향 센서를 이용하여 수신된 음향 신호의 위상지연차를 이용하는 것을 특징으로 한다. Fig. 1은 본 논문에서는 제시하는 음향식 헬멧자세추정 방법의 개념도이다.

위의 방법을 이용하는 경우 두 가지 제한 사항이 있다. 첫 번째, 위상지연차를 이용하고자 하는 신호는 조종사에게 불필요한 소음을 유발하지 않아야 한다. 두 번째는 위상지연차에 이용되는 신호의 파장은 두 음향 수신기 사이의 거리 차이보다 2배 이상 커야 한다[4]. 그렇지 않은 경우 시간지연 만큼 반복된 횟수를 합산해 주어야 하나, 반복된 횟수를 구하기가 쉽지 않다. 첫 번째의 경우 가청주파수 이상의 고주파를 이용함으로써 해결될 수 있다. 다행히 기계적 마찰과 진동으로 유발되는 소음은 가청주파수대의 저 주파수 영역에서 대부분 형성되므로, 가청주파수 이상의 고주파 영역에서는 기계적인 진동과 마찰에 의해 발생되는 소음, 진동은 작다고 할 수 있다[5]. 예로, Fig. 2는 강구 5g을 평판에 충격을 가했을 때 가속도계 센서와 음향방출 센서를 이용하여 취득한 신호의 시간-주파수 분석[6] 결과이다. 질량이 작을수록 고주파가 발생하나, 5g의 작은 질량임에도 가청주파수 이상의 영역에서는 신호가 거의 잡히지 않는다. 두 번째는 고주파를 이용하는 경우 필연적으로 발생하는 문제로써, 주파수가 높아질수록 파장은 짧아지게 되며, 음향 수신기는 더욱더 짧은 거리를 두고 배치되어야 한다. 위의 두 가지는 서로 상충되는 조건으로써, 고주파일수록 헬멧자세 추정 가능한 영역이 좁아지게 됨을 의미한다. 예를 들어, 음속을 340m/s라고 한다면, 가청주파수 이상인 20kHz 신호의 파장은 1.7cm가 되며, 두 수신기 사이의 거리는 1cm 이하로 배치되어야 한다.

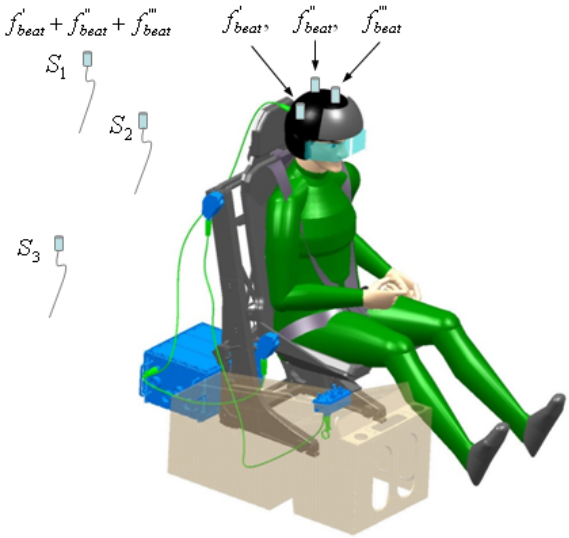
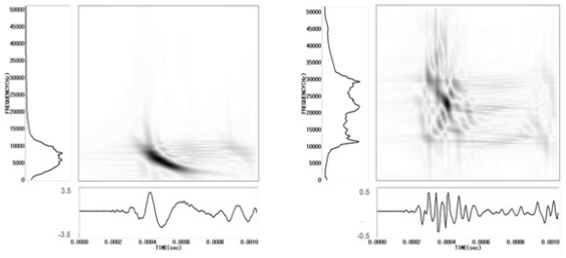


Fig. 1. Helmet tracking technique used in this paper



(a) (b)

Fig. 2. The result of time-frequency analysis for 5g impact ball, (a) is the result of accelerator, (b) is the result of acoustic emission

본 논문에서는 가청주파수 이상의 고주파 신호에서 파장이 긴 신호를 얻기 위해 인접한 두 신호는 맥놀이 신호를 생성하고, 맥놀이 신호의 포락선은 원신호의 파장보다 길어지는 점에 착안 하였다.

나. 맥놀이 신호 생성

맥놀이 신호는 주파수 파장이 서로 인접한 두 개의 신호에 의해 발생시킬 수 있다. Fig. 3은 인접한 두 고주파 신호를 생성하기 위한 개략도 이다. Fig. 3 (a)는 주파수 혼합기를 이용하여 가청주파수를 넘는 두 고주파 신호를 생성하는 방법이며, Fig. 3 (b)는 주파수 합산기를 이용한 방법에 대해 나타내었다.

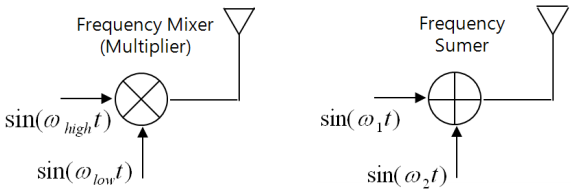


Fig. 3. (a) is the frequency mixer, (b) is the frequency sumer

Fig. 3 (a)를 수식으로 표현하면, 높은 주파수를 ω_{high}, 낮은 주파수를 ω_{low}라고 정하고, $\omega_{high} \gg \omega_{low}$ $(abs(\omega_{high}-\omega_{low}) > 20\text{kHz})$이면, 두 인접한 고주파에 의해 생성되는 맥놀이 신호는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sin(\omega_{high}t)\times\sin(\omega_{low}t) = \frac{1}{2}\cos((\omega_{high}-\omega_{low})\times t)-\frac{1}{2}\cos((\omega_{high}+\omega_{low})\times t) \quad (1)$$

또한, 두 인접한 고주파 음향 신호를 각 각 $\omega_1 = \omega_{high}+\omega_{low}$, $\omega_2 = \omega_{high}-\omega_{low}$라고 하면, (단, $\omega_1 \approx \omega_2 > 20\text{kHz}$) 주파수 합산기를 통해 합산되어 나타나는 맥놀이 신호는 두 고주파 음향 신호의 단순 합산으로 나타나게 된다.

다. 두 맥놀이 신호의 위상차 구하기

두 인접한 주파수 신호에 의해 생성되는 맥놀이 신호의 포락선은 단순히 절대치 값을 취하거나, 힐버트 변환 기법[7]으로 구할 수 있다.

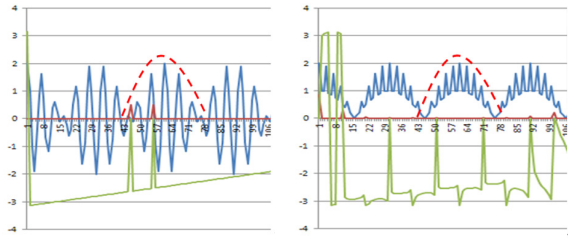


Fig. 4. Envelope of beating signal (a) denotes the beating signal, (b) denotes correspond envelope

맥놀이 신호를 형성하는 인접한 두 주파수를 $\omega_1(=\omega_{high}+\omega_{low})$, $\omega_2(=\omega_{high}-\omega_{low})$ 그리고 이 주파수 신호에 대한 위상을 각 각 $\Phi(\omega_1)$, $\Phi(\omega_2)$ 그리고, ω_1, ω_2 두 주파수 신호가 형성하는 맥놀이 신호의 포락선에 대한 주파수를 ω_{beat}, 이 포락선의 위상을 Φ_{beat}라고 한다면 ω_{beat}, Φ_{beat}는 (2) 식과 같다.

$$\omega_{beat} = \omega_1-\omega_2(\omega_1 > \omega_2) \quad (2)$$
$$\Phi_{beat} = \Phi(\omega_1)-\Phi(\omega_2)$$

또한, 주파수 혼합기를 통과한 맥놀이 신호는 (3) 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sin(\omega_{high}(t-\tau_{high})\times\sin(\omega_{low}(t-\tau_{low})) = \frac{1}{2}\cos((\omega_{high}-\omega_{low})t-(\omega_{high}\tau_{high}-\omega_{low}\tau_{low})) - \frac{1}{2}\cos((\omega_{high}+\omega_{low})t-(\omega_{high}\tau_{high}+\omega_{low}\tau_{low})) \quad (3)$$

위의 관계식에서 포락선 주파수와 위상 관계는 (4) 식과 같다.

$$\omega_{beat} = \omega_1-\omega_2 = 2\omega_{low} \quad (4)$$
$$\Phi_{beat} = \Phi(\omega_1)-\Phi(\omega_2) = -2\omega_{low}\tau_{low}$$

또한 두 개의 음향센서 수신기에 수신된 맥놀이 신호의 포락선에 대한 위상지연차는 두 맥놀이 신호의 위상지연차로 구할 수 있다. 즉, 첫 번째 채널을 p라 하고 이때 맥놀이 신호의 포락선 위상을 Φ_{p_beat} 두 번째 채널을 q라하고 이때 맥놀이 신호 위상을 Φ_{q_beat}라고 한다면, 두 맥놀이 신호의 포락선 위상지연차는

단순히 감산된 값인 $\Phi_{p_beat} - \Phi_{q_beat}$가 된다. 이를 수식으로 나타내 보면,

$$\Phi_{p_beat} - \Phi_{q_beat} = \Phi_p(\omega_1) - \Phi_q(\omega_1) - (\Phi_p(\omega_2) - \Phi_q(\omega_2)) \quad (5)$$

위의 관계식으로부터, 두 맥놀이 신호 포락선의 위상지연차는 동일 주파수 위상지연차의 감산 값으로 나타난다. 두 채널의 동일 주파수에 대한 위상지연차는 상호 스펙트럼 분석 기법으로 쉽게 구할 수 있고, 두 주파수의 위상지연차에 대한 감산 값을 구함으로써, 맥놀이 신호의 포락선 주파수 ω_{beat}에 대한 위상지연차를 구할 수 있게 된다.

라. 고주파 음향신호 취득

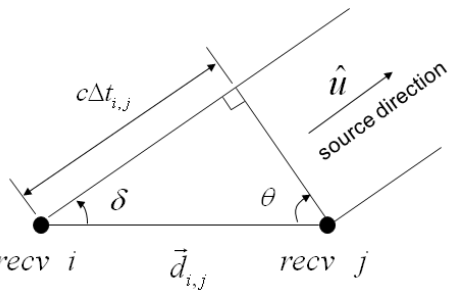


Fig. 5. Computing source direction from TDOA (Time Difference Of Arrival)

$$\vec{d}_{i,j} \cdot \hat{u} = \| \vec{d}_{i,j} \| \cos\delta = (x_j - x_i)u + (y_j - y_i)\nu + (z_j - z_i)w = c\Delta t_{i,j} \quad (6)$$

Fig. 5와 (6) 식에서 두 개의 음향센서 수신기에 전달되는 음향 신호의 최대 시간지연 차이는 음향신호 발생기와 수신기 센서들이 나란히 일직선상에 놓인 경우이며, 이때 음향신호 주파수의 반 파장이 두 수신기 센서간 거리 차이보다 커야 한다[7]. 즉, 음향신호 발생기에서 전달된 두 센서 신호의 최대 시간지연 차이가 선택된 주파수의 반주기 보다 짧아야 한다. 그렇지 않은 경우, 반복된 횟수만큼 보상을 해 주어야 하는데, 수회 반복하는 경우 반복횟수를 구하는데 어려움이 있다. 선택된 주파수의 파장을 λ, 두 센서 간 거리를 d라면, $d < \frac{\lambda}{2}$이고 아래 관계식을 만족해야 한다.

$$d_{i,j} < \frac{c}{2 \times f} = \frac{c \times T}{2} \quad (7)$$

두 센서신호의 시간지연차를 구하기 위해서는 상호상관함수법과 상호 스펙트럼 분석기법 등이 있다[8]. 그러나 상호상관함수법의 경우 채널 잡음이 많이 포함되는 경우 두 센서 신호의 상관관계가 줄어들게 되어 오차가 커지게 된다. 따라서 본 논문에서는 상호스펙트럼 분석기법으로 위상지연차를 먼저 구한 후, 펄스폭의 주기를 곱하여 시간지연차를 구하는 방법을 적용하였다. 모든 신호는 정현파 함수의 조합으로 이루어져 있다. 본 논문에서는 맥놀이 신호의 포락선 위상지연차를 이용하여 TDOA를 구하여 헬멧 자세를 추정하는 것이 목표이므로, 맥놀이 신호의 포락선 주파수를 f_{beat}(=1/T)라고 하고, 먼저 도달한 신호를 x_i, 시간지연 τ_0을 가지고 도달한 신호를 x_j라고 하면 두 신호는 아래와 같이 표현할 수 있다.

(V_P : 최대치, α < 1)

$$x_1(t) = V_P \sin(2\pi f_{beat}\, t + \theta) \quad (8)$$

$$x_2(t) = \alpha\, x_1(t - \tau_0) = \alpha\, V_P \sin(2\pi f_{beat}(t - \tau_0) + \theta) \quad (9)$$

(8) 식과 (9) 식 신호의 상관함수를 구하면 아래와 같다.

$$R_{x_1 x_2}(\tau) = E[x_1(t)x_2(t+\tau)] = \alpha E[x_1(t)x_1(t+\tau-\tau_0)] = \alpha R_{x_1 x_1}(\tau - \tau_0) \quad (10)$$

(10) 식에서 시간지연 τ_0을 가지는 두 신호의 상호상관함수는 시간지연 τ_0에서 최대치를 갖는 자기상관함수의 형태로 나타난다[9]. 이 관계를 주파수 도메인으로 변환하면, 두 신호에서 특정 주파수의 시간지연은 주파수 도메인에서 위상지연차로 구할 수 있다. x_1에 대한 푸리에 변환 결과를 $X_1(f)$, x_2에 대한 푸리에 변환 결과를 $X_2(f)$, 그리고 상호스펙트럼 함수를 $S_{X_1 X_2}(f)$라고 하면,

$$S_{X_1X_2}(f) = X_1^*(f) \times X_2(f) = |X_1(f)||X_2(f)|e^{j\{\theta_{X2}(f)-\theta_{X1}(f)\}} \quad (11)$$

(11) 식에서 주파수 도메인에서 상호 스펙트럼 함수의 크기는 두 신호 진폭의 곱으로 나타나고 위상은 두 신호의 위상차로 나타난다. 흥미로운 것은 곱으로 인하여 두 신호에 공통으로 존재하는 주파수 성분만 남고 한 신호에만 존재하는 주파수 성분은 감쇄되어 잡음성분은 제거 된다. 주기 T와 주파수 f 사이에는 $T=\frac{1}{f}$인 관계가 있으므로, 두 신호사이 위상차를 이용하여 시간지연차를 구하기 위해서는 주기에 위상지연 비를 곱한다. 즉, 시간 지연을 $\triangle t_{i,j}$라고 하면

$$\triangle t_{i,j}(f) = \frac{1}{f} \times \frac{\theta_{X_i}(f) - \theta_{X_j}(f)}{2\pi} \quad (12)$$

이다. (12) 식에 얻은 시간지연차에 음속을 곱하여 음향신호 발생기에서 두 수신기에 전달된 거리지연차를 구할 수 있다. 음속을 v라고 하면 음향신호 발생기에서 두 음향 수신기에 도달한 거리 차이는 다음과 같다.

$$\Delta l_{i,j} = l_i - l_j = v \times \triangle t_{i,j}(f) \quad (13)$$

(13) 식에서와 같이 두 센서로부터 거리 차가 일정한 지점은 쌍곡선을 이룬다. 다수 개의 센서 N개 존재하는 경우 ${}_NC_2$개의 쌍곡선을 얻을 수 있고, 쌍곡선이 교차되는 지점을 음향신호 발생기 위치로 잡을 수 있다. 스캐닝 지점에서 각 각의 센서까지 거리를 $l_{s,i}$, $l_{s,j}$라 하면, 거리 차인 $l_{s,i}$ - $l_{s,j}$ 값에서 센서로부터 측정된 거리지연차 $v\triangle t_{i,j}$를 감산한 값이 최소가 되는 지점이 레이더 펄스 발생원 지점이 된다[7]. 즉, 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\min\{(l_{s,j} - l_{s,i}) - c\triangle t_{i,j}\} \quad (14)$$

N개의 센서가 연결된 경우,

$$\min\left\{\sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j>i}^{N}[(l_{s,i} - l_{s,j}) - c\triangle t_{i,j}]\right\} \quad (15)$$

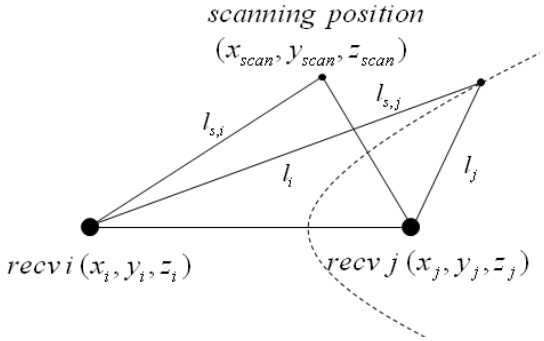


Fig. 6. Scanning for the interest area for 2 sensors

마. 컴퓨터 모사

본 연구 내용을 검증하기 위한 컴퓨터 모사 환경은 아래와 같다. 그림에서와 같이 각 센서는 항공기의 Head Motion Box(HMB)를 고려하여, 600mm × 600mm (이하 모든 단위는 mm) 영역 내에서 Fig. 7 (a)에서와 같이 삼각구도로 배치하였다. 첫 번째 음향 발생기를 통해 방출되는 맥놀이 신호의 주파수는 각 각 25,000 Hz와 25,500Hz이며, 또한 두 번째 맥놀이 신호의 주파수는 27,000Hz와 27,500Hz 이다.

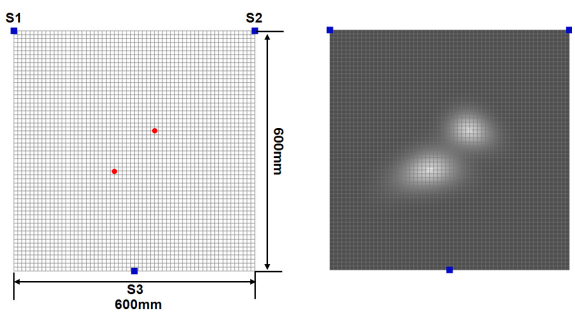


Fig. 7. Simulation conditions which head motion box size is 600mm × 600mm, (a) red circle denotes the beating signal source position, (b) is the result of localization

Fig 8은 모사된 신호이며, Fig 9는 모사된 신호에 대한 상호 스펙트럼 분석 결과이다. 두 채널 간의 맥놀이 신호의 위상지연차는 상호 스펙트럼 분석 기법을 통해 구할 수 있으며 상호 스펙트럼 분석결과 위상지연차는, S1&S2, S1&S3, S2&S3의 결과가 아래와 같다.

첫 번째 맥놀이 신호의 위상차,

$$\Phi_{1,2}(25{,}000) = 0.594,\ \Phi_{1,2}(25{,}500) = 0.0$$
$$\Phi_{1,3}(25{,}000) = 0.0,\ \Phi_{1,3}(25{,}500) = 1.615$$
$$\Phi_{2,3}(25{,}000) = -0.594,\ \Phi_{2,3}(25{,}500) = 1.615$$

두 번째 맥놀이 신호의 위상차,

$$\Phi_{1,2}(27{,}000) = 0.0,\ \Phi_{1,2}(27{,}500) = 0.701$$
$$\Phi_{1,3}(27{,}000) = 0.0,\ \Phi_{1,3}(27{,}500) = 0.713$$
$$\Phi_{2,3}(27{,}000) = 0.0,\ \Phi_{2,3}(27{,}500) = 0.021$$

또한, 맥놀이 신호의 포락선에 대한 위상차는 (5) 식에 의해,

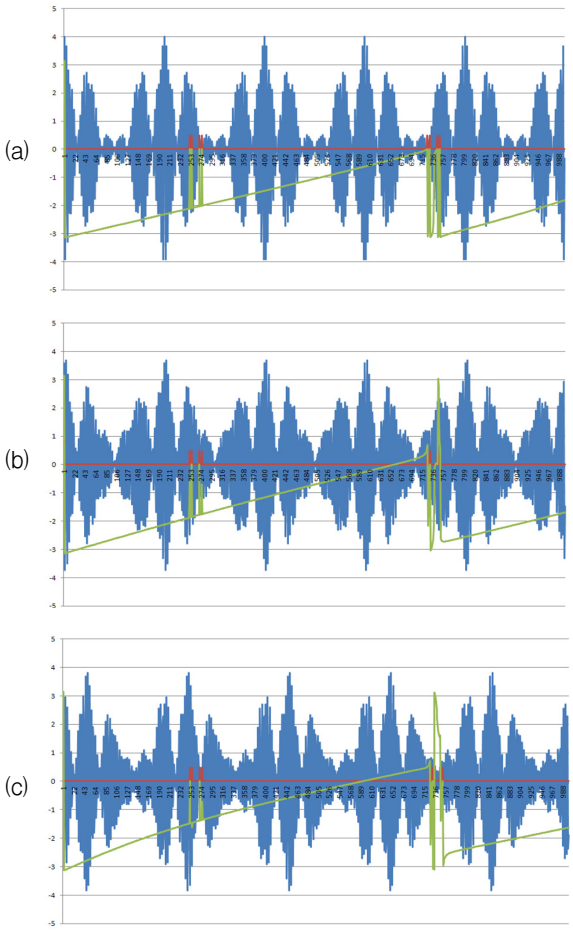


Fig. 8. Measured beating signal for each acoustic sensors, (a) is of the S1, b) is of the S2, (c) is of the S3

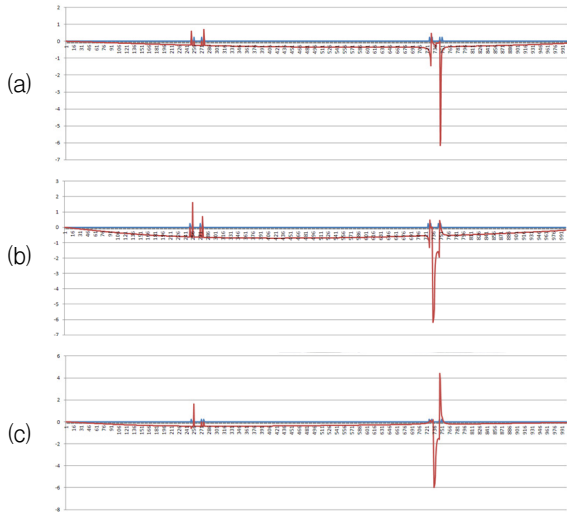


Fig. 9. The result of cross power spectrum (a) is for S1&S2 (b) is for S1&S3, (c) is for S2&S3. Blue line denote it's frequency and, red line denote correspondent phase difference

첫 번째 맥놀이 신호,

$$\Phi_{1,2}(25{,}500) - \Phi_{1,2}(25{,}000) = -0.594$$
$$\Phi_{1,3}(25{,}500) - \Phi_{1,3}(25{,}000) = 1.615$$
$$\Phi_{2,3}(25{,}500) - \Phi_{2,3}(25{,}000) = 2.209$$

두 번째 맥놀이 신호,

$$\Phi_{1,2}(27{,}500) - \Phi_{1,2}(27{,}000) = 0.701$$
$$\Phi_{1,3}(27{,}500) - \Phi_{1,3}(27{,}000) = 0.713$$
$$\Phi_{2,3}(27{,}500) - \Phi_{2,3}(27{,}000) = 0.012$$

위의 결과에 (12) 식에 대입하여 시간지연차를 구하면,

첫 번째 맥놀이 신호,

$$\triangle t_{1,2} = -0.000189$$
$$\triangle t_{1,3} = 0.000514$$
$$\triangle t_{2,3} = 0.000703$$

두 번째 맥놀이 신호,

$$\triangle t_{1,2} = 0.000223$$
$$\triangle t_{1,3} = 0.000227$$
$$\triangle t_{2,3} = 0.000004$$

위의 시간지연차에 음속도 340m/s를 곱하여, 거리 지연차를 구할 수 있으며, 쌍곡선이 교차되는 지점으로 음향 신호 소스 위치를 구하면 Fig. 7 (b)와 같다.

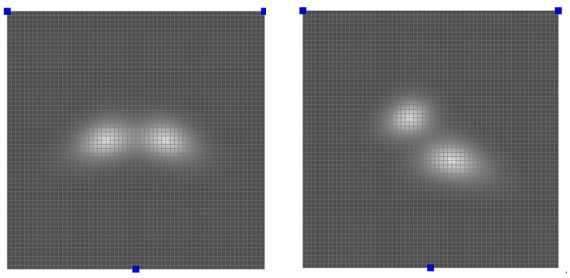


Fig. 10. The result of source localization for 3 sensors. brighter area denotes higher possibility

Fig. 10은 Fig. 7과 같이 동일한 순서로 컴퓨터 모사를 실시한 결과이다. 3가지 실험에서 모두에서 음향 소스의 위치는 140mm로 동일하며, 보다 정확한 검증을 위해 45도 각도로 음향소스를 회전해가며 모사를 하였다. 컴퓨터 모사 결과 3가지 경우 모두에서 정확하게 음향 소스를 찾을 수 있음을 확인하였다.

3. 결 론

항공기에 적용되는 헬멧자세추정 기술과 관련하여 그동안, 음향을 이용한 기법은 항공기 내의 가청주파수 대의 소음원에 의한 간섭 문제와 조종사에게 불필요한 소음을 유발한다면 측면에서 많은 연구가 되지 않았으며, 또한 상용화 성공 사례가 현재까지 보고되지 않고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 가청주파수 이상의 제어 가능한 고주파 영역을 이용함으로써 기존의 음향식 헬멧자세 추정기술이 가지는 문제를 해결할 수 있음을 보였다. 고주파를 이용함으로써 파장이 짧아지는 문제를 본 논문에서는 맥놀이 신호의 포락선에 대한 위상차를 이용하여 해결 가능함을 보였다. HMD는 항공기뿐만 아니라 게임기, 의료기, 교육목적 등의 민수 시장에서도 적용 분야가 다양할 것으로 예상되며, 본 논문에서 제시한 방법은 기존의 광학식 혹은 전자기식에 비해 시스템 구성과 비용 측면에서 많은 장점을 가지고 있으므로, 많은 분야에 활용이 가능할 것으로 예상된다.

References

[1] Sisodia, A, Riser, A., and Roger, J. R., “Design of an Advanced Helmet Mounted Display(AHMD). Cockpit and Future Displays for Defence and Security”, Proceedings of SPIE, Vol. 5801, pp. 304～315, 2005.

[2] Tawada, K. and Hirooka, K., “A New Optical HMT System Based on Image Processing”, Proc. SPIE 6955, 69550A1-11, 2008.

[3] Rash, C. E., “Helmet Mounted Displays : Design Issues for Rotary Wing Aircraft”, SPIE Press PM : Bellingham, 2001.

[4] J. P. Rolland, L. Davis, and Y. Baillot, “A Survey of Tracking Technology for Virtual Environments”, in Fundamentals of Wearable Computers and Augmented Reality. M. Barfield and T. Caudell, eds. (Mahwah, NJ, 2000).

[5] Viktorov, I, A., “Rayleigh and Lamb Waves”, Plenum Press, pp. 67～102.

[6] Cohen, L., “Time-frequency Distribution”, Prentice Hall PTR, Engle-wood Cliffs, New Jersey, 1995.

[7] Young-Chul Choi, Jin-Ho Park, and Kyoung-Sik Choi, “An Impact Source Localization Technique for a Nuclear Power Plant by Using Sensors of Different Types”, ISA Transactions 50, pp. 111～118, 2011.

[8] Randall, R. B., “Frequency Analysis”, 3rd Edition, pp. 19～31, pp. 58～62, 1987.

[9] Julius S. Bendat and Allan G. Piersol, “RANDOM DATA, Analysis and Measurement Procedures”, 2nd Edition, pp. 109～159, 1986.