論文 J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(12), 975-985(2018)
DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.12.975
ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

마이크로폰 어레이를 이용한 드론의 비행경로 측정과 무향칼만필터를 이용한 성능 개선법에 대한 연구

이지원*, 고영주*, 김승균*, 최종수**

Flight Path Measurement of Drones Using Microphone Array and Performance Improvement Method Using Unscented Kalman Filter

Jiwon Lee*, Yeong-Ju Go*, Seungkeum Kim* and Jong-Soo Choi**
Department of Aerospace Engineering, Chungnam National University*,**

ABSTRACT

The drones have been developed for military purposes and are now used in many fields such as logistics, communications, agriculture, disaster, defense and media. As the range of use of drones increases, cases of abuse of drones are increasing. It is necessary to develop anti-drone technology to detect the position of unwanted drones using the physical phenomena that occur when the drones fly. In this paper, we estimate the DOA(direction of arrival) of the drone by using the acoustic signal generated when the drone is flying. In addition, the dynamics model of the drones was applied to the unscented kalman filter to improve the microphone array detection performance and reduce the error of the position estimation. Through simulation, the drone detection performance was predicted and verified through experiments.

초 록

드론은 군사적 목적으로 개발이 시작되어 현재에는 물류, 통신, 농업, 재난, 방위, 미디어 등 많은 분야에 활용되고 있다. 드론의 사용범위가 넓어짐에 따라 드론이 악용되는 사례도 증가하고 있다. 드론이 비행할 때 발생하는 물리적 현상들을 이용하여 원치 않는 드론의 위치를 탐지하는 안티 드론 기술 개발이 필요하다. 본 논문에서는 드론이 비행할 때 발생하는 음향신호를 이용하여 드론의 위치를 도래각으로 추정하였다. 또한 드론의 운동역학 모델을 무향 칼만 필터에 적용하여 마이크로폰 어레이 탐지 성능을 향상시켜 위치 추정의 오차를 저감하였다. 시뮬레이션을 통해 드론 탐지 성능을 예측하고 실험을 통해 증명하였다.

Key Words : Drone Detection(드론 탐지), Microphone Array(마이크로폰어레이), Unscented Kalman Filter(무향 칼만 필터), Acoustic Source Position Tracking(음원위치 추적)

† Received : October 17, 2017 Revised : October 5, 2018 Accepted : October 12, 2018
** Corresponding author, E-mail : jchoi@cnu.ac.kr

Ⅰ. 서 론

드론은 인간 조종사가 탑승하지 않는 항공기 또는 비행 로봇으로 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)이라고도 불린다. 드론은 최초 군사적 목적에 의해 개발되어 정찰, 감시, 폭격 임무를 수행하였으나 최근, 드론은 다양한 분야에서 다양한 형태로 활용되고 있다. 정부기관 및 대기업 위주로 개발되어온 군용 목적의 드론과 달리 많은 스타트업 기업들이 다양한 목적에 의해 드론을 개발 및 사용하고 있다[1]. 세계 드론 시장 성장에 주요 요인 중 하나는 유인항공기나 헬리콥터가 도달할 수 없는 지역에 드론이 접근할 수 있다는 것이다[2]. 드론의 뛰어난 이동성과 다양한 활용성은 드론을 통해 영상 및 데이터를 수집이 가능하게 되어 대량의 데이터를 수집, 분석 처리하는 데에 많은 관심과 투자가 이루어지고 있다. 중국의 DJI는 기업가치 100억 달러 이상을 넘볼 정도로 급성장을 하였고, 독인 DHL, 아마존, 구글, 그리고 페이스북 등과 같은 기업들은 택배, 통신 중계 등의 상업적 용도로 활용을 선언하였다. 현재 드론의 운용 범위는 사진 촬영용 소형 드론으로부터 정밀농업, 인프라 관리, 택배 및 화물 수송 등으로 확대되고 있다[3].

드론은 현재 물류, 통신, 농업, 재난, 방위, 미디어 등 많은 분야에 사용되고 있다. 이렇게 드론은 우리 실생활 전반에 사용되고 있으나, 언제라도 공격적인 목적으로 남용될 수 있으며, 이로 인한 위협은 상대적으로 소외되고 있다. 드론 품질에 대한 명확한 기준이 존재하지 않아 드론의 작동오류나 조종자의 조종 부주의로 발생하는 사고들이 발생할 수 있으며, 드론을 악의적으로 사용한 사생활 침해, 기밀 유출, 테러 등은 사전에 차단되어야한다. 드론에 의해 발생한 대표적은 사례들로는 독일 메르겔 총리 선거유세 침입사건, 런던에서 여객기와의 충돌사고 등이 있다. 미국 백악관에 드론이 침입하였을 때 대응하지 못했으며, 일본 총리 관저 옥상에서는 미량의 방사성 물질을 함유한 드론이 발견되기도 했다. 드론의 기술이 발전됨에 따라 안티 드론에 대한 기술도 함께 개발 및 사용되어야한다.

기존 유인 항공기에서 사용되어온 탐지기술은 드론을 탐지할 때에는 적용할 수 없다. 항공기를 추적하기 위해 개발되었던 시스템들은 대부분 크고 빠른 기체를 감지하도록 설계되었다. 하지만 드론은 작고 천천히 저공을 비행하기 때문에 새로운 탐지 기술이 필요하다. 드론 탐지 및 추적 시스템에는 레이더, 열 탐지, 영상 인식, 음향 탐지 등의 방법이 있다[4]. 레이더는 특정 펄스를 전송하고 반사되어 오는 전파의 에너지, 주파수 등을 가지고 물체의 위치, 속도 등을 판단한다[5]. 열 탐지 방법의 기본 원리는 열을 가진 물체가 그 열을 적외선으로 방출하는 성질을 이용하는 것이다. 다만, 드론이 전기모터를 사용할 경우 열 방출이 많지 않기 때문에 탐지에 어려움이 있을 수 있다. 음향 탐지는 드론에서 발생하는 모터와 프로펠러 소리를 이용하여 드론을 탐지하는 기술이다[6]. 본 논문에서는 음향 탐지를 이용하여 비행하는 드론의 위치를 추정하였다.

음향신호를 이용한 위치 추정은 음성인식, 로봇의 위치 추적, 저격수 위치 추적 등 활용도가 높아 다양한 분야에서 연구되고 있다[7-10]. 음향신호를 이용한 위치 추적 시스템은 전파 등의 특별한 신호 발생 장치를 장착하지 않고도 위치를 추적할 수 있으며 이에 따라 시스템이 구성이 간단한 장점이 있다[11]. 음향신호로 위치 추정 기술은 여러 가지가 있다. 그 중 많은 마이크로폰이 필요한 빔 형성 방법은 고전적인 방법이지만 다양한 분야에서 사용되고 있는 방법이다[12,13]. 그리고 음원에서 각 마이크로폰에 도달하는 시간 차이를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 기술이 있다. 도달시간차(Time Difference of Arrival)를 이용하여 음원의 위치를 추정하는 기술 중에 마이크로폰들의 배치와 도달시간차의 측정으로 한 방정식의 쌍곡선 교차로 음원의 위치를 추정한다[14,15]. 본 논문에서 드론이 비행할 때 방사하는 음원으로 드론의 위치를 찾는 기술은 도래각(Direction of Arrival)을 이용하여 드론의 위치를 추정한다[16,17]. 도래각은 방위각과 경사각으로 나타낼 수 있다.

도래각으로 음원의 위치를 추정하기 위해 마이크로폰 쌍의 도달시간차를 교차상관함수를 이용하여 계산하였다[11,18]. 또한 연속적이며 움직이는 신호를 잡음에 의해 발생하는 오차를 회귀분석을 통하여 저감하였다. 또한 마이크로폰 어레이 한 대를 이용하여 도래각을 계산하면 드론의 위치를 추정할 수 없다. 그래서 마이크로폰 어레이 2대를 배치하여 도래각의 교차점을 이용해 드론의 위치를 추정하였다. 두 개의 도래각의 교차점으로 드론의 위치를 추정할 때 수치오차가 발생한다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통해 교차점으로 발생하는 수치 오차를 예상하고, 이 오차를 실험을 통해 시뮬레이션과 같은 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 이 오차를 저감하기 위해 칼만 필터를 적용하였다.

칼만 필터는 현재 여러 연구에 수행되고 있다.

선형 칼만 필터는 상대 위치 및 속도, 가속도계 바이어스 오차를 추정하는 연구[19]와 대기속도를 추정하는 연구[20]에 사용되었다. 또한 확장 칼만 필터는 자코비안 행렬을 이용하여 비선형모델의 상태를 추정할 수 있는 기법으로, 인공위성이나 비행체의 위치나 자세 추정에 널리 적용되고 있다[21,22]. 하지만 선형화 과정이 복잡하고 특이성 문제가 발생할 수 있기 때문에 본 논문에서는 무향 칼만 필터를 적용하여 음원의 위치를 추정하였다[23,24]. 본 논문은 시뮬레이션을 통하여 마이크로폰 어레이 시스템에 성능 및 오차를 예측하고 실험을 통해 확인하였다. 또한 무향 칼만 필터를 마이크로폰 어레이 시스템에 도입을 시도하여 음원에 대한 마이크로폰 어레이 시스템의 탐지성능을 향상시키는 것에 주안을 두고 있다.

II. 도래각을 이용한 음원 위치 추정

2.1 도래각 추정 방법

도래각은 음원이 구형파로 진행한다고 가정하였을 때, 각 마이크로폰에 도달하는 시간차이와 각 마이크로폰의 위치의 상대적인 거리를 이용하여 계산할 수 있다. 이 때 Fig. 1에서처럼 한 어레이에는 네 개의 마이크로폰을 사용하며 i번째 마이크로폰의 좌표를 직교좌표계로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$p_i = [x_i, y_i, z_i]^T \quad (i = 1 \cdots 4) \tag{1}$$

Figure 1에서 빨간색별은 음원의 위치를 나타낸다. 음원에서 마이크로폰 어레이 중앙을 향하는 방향을 경사각(θ)과 방위각(ϕ)으로 나타낼 수 있다. 경사각과 방위각을 합쳐 도래각이라 할 때, 도래각을 이용하여 마이크로폰 어레이 중앙에서 음원까지의 벡터를 벡터의 크기가 1인 단위벡터로 나타내면 식 (2)처럼 쓸 수 있다.

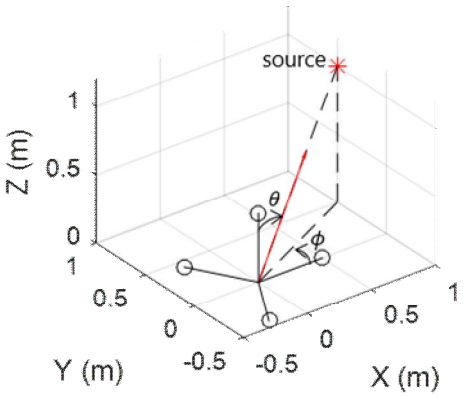


Fig. 1. Microphone Array and DOA

$$a_{\theta,\phi} = [\sin\theta\cos\phi,\ \sin\theta\sin\phi,\ \cos\theta]^T \tag{2}$$

각 마이크로폰에 도달하는 도달시간차는 음원에서 각 마이크로폰의 거리 차에서 음속을 나눈 값이다. 식 (3)은 음원에서 각 마이크로폰까지의 도달거리차이다. 그리고 식 (4)는 도달거리차를 음속으로 나누어 도달시간차를 계산한 식이다.

$$d_{ij} = a_{\theta,\phi}^T p_i - a_{\theta,\phi}^T p_j \tag{3}$$

$$\tau_{ij} = \frac{d_{ij}}{v_{sound}} = \frac{a_{\theta,\phi}^T p_i - a_{\theta,\phi}^T p_j}{v_{sound}} = a_{\theta,\phi}^T \triangle P_{ij} \tag{4}$$

이다. $\triangle P_{ij} = \frac{p_i - p_j}{v_{sound}}$ 이다.

$$C(N,2) = \frac{N(N-1)}{2} \tag{5}$$

최소제곱법(Least Squares Method)을 사용하고 N개의 마이크로폰을 사용하면 식 (5)에서 계산된 수만큼의 지연개수를 가질 수 있다. 이 때 다음 비용 함수를 최소화하면 올바른 도래각을 찾을 수 있다.

$$\xi(\theta,\phi) = (\bar{\tau}_{12} - \triangle p_{12}^T a_{\theta,\phi})^2 + \cdots + (\bar{\tau}_{(N-1)N} - \triangle p_{(N-1)N}^T a_{\theta,\phi})^2 \tag{6}$$

식 (6)에서의 $\bar{\tau}_{(N-1)N}$는 마이크로폰 어레이에서 취득한 음향신호를 이용하여 계산한 도달시간차이며 $\triangle p_{(N-1)N}^T a_{\theta,\phi}$은 마이크로폰과 음원의 거리를 이용하여 도달시간차를 계산한 값이다. $a_{\theta,\phi}$에 대해 식 (5)를 미분하고 그 결과가 0일 때, 다음을 얻을 수 있다.

$$A = \triangle p_{12} \triangle p_{12}^T + \cdots + \triangle p_{(N-1)N} \triangle p_{(N-1)N}^T \tag{7}$$

$$b = \bar{\tau}_{12} \triangle p_{12} + \cdots + \bar{\tau}_{(N-1)N} \triangle p_{(N-1)N} \tag{8}$$

식 (7)과 식 (8)을 이용하여 식 (9)를 도출할 수 있다.

$$a_{doa} = A^{-1} b = [a_x, a_y, a_z]^T \tag{9}$$

식 (9)에서의 a_{doa}는 음원의 위치가 아닌 마이크로폰 중심에서 음원을 향하는 크기가 1인 벡터이다. 그래서 식 (9)로 도래각을 추정할 수 있다. 마이크로폰에서 음원을 향한 도래각 중 방위각은 식 (10)과 같으며 경사각은 식 (11)이다.

$$\phi = \tan^{-1}\frac{a_y}{a_x} \tag{10}$$

$$\theta = \cos^{-1}a_z \tag{11}$$

2.2 다중 도래각을 사용한 음원 위치 추정

Figure 1에서 볼 수 있듯이 마이크로폰 어레이 하나에서는 마이크로폰 어레이에서 음원까지의 거리가 아닌 방향만을 알 수 있다. 그래서 하나 이상의 마이크로폰 어레이를 배치하였다. 각 마이크로폰 어레이에서 취득한 도래각을 이용하여 마이크로폰 어레이 중앙에서 음원까지의 방향벡터의 교차점으로 음원의 위치를 추정하였다. 3차원 공간에서 교차점을 계산할 경우에, 두 직선이 일치하거나 평행하지 않아도 Fig. 2(a)처럼 교점이 생기지 않는 경우가 존재한다. 그래서 각 방향벡터를 X-Y평면에 투영시켜 교차점을 계산한 것이 Fig. 2(b)이다. 음원의 X, Y 위치가 추정이 되면 각 마이크로폰 어레이 중앙에서 시작된 방향벡터와 추정된 위치에서의 Z축 위치를 계산한다. Fig. 2(c)에서 볼 수 있듯이 각 어레이에서 Z축 위치를 측정하기 때문에 Z축에서의 추정 위치는 두 점으로 계산된다. 이때에는 두 점의 평균으로 높이를 추정하였다.

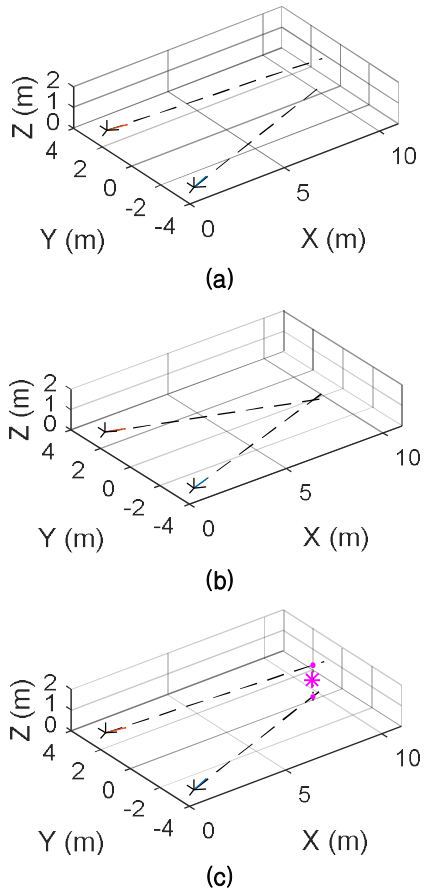


Fig. 2. Acoustic Source Localization Process

교차점은 서로 다른 두 점과 두 개의 벡터로 계산하였다. 서로 다른 두 점은 각 마이크로폰 어레이의 중앙이며, 두 개의 벡터는 2.1.1에서 추정한 도래각으로 설정하였다. 마이크로폰 어레이 두 개를 사용하였을 때, 각 마이크로폰 어레이 중심을 $[x_{m,1},y_{m,1}], [x_{m,2},y_{m,2}]$라 하고 두 개의 방향 벡터를 $[x_{d,1},y_{d,1}], [x_{d,2},y_{d,2}]$라 할 때 교차점을 계산하는 행렬식은 다음과 같다. 식 (12), 식 (13)의 S_x와 S_y는 음원의 X축과 Y축 좌표이다.

$$S_x = \frac{\begin{vmatrix}\begin{vmatrix} x_{m,1} & y_{m,1} \\ x_{d,1} & y_{d,1}\end{vmatrix} & \begin{vmatrix} x_{m,1} & 1 \\ x_{d,1} & 1\end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} x_{m,2} & y_{m,2} \\ x_{d,2} & y_{d,2}\end{vmatrix} & \begin{vmatrix} x_{m,2} & 1 \\ x_{d,2} & 1\end{vmatrix}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}\begin{vmatrix} x_{m,1} & 1 \\ x_{d,1} & 1\end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{m,1} & 1 \\ y_{d,1} & 1\end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} x_{m,2} & 1 \\ x_{d,2} & 1\end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{m,2} & 1 \\ y_{d,2} & 1\end{vmatrix}\end{vmatrix}} \tag{12}$$

$$S_y = \frac{\begin{vmatrix}\begin{vmatrix} x_{m,1} & y_{m,1} \\ x_{d,1} & y_{d,1}\end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{m,1} & 1 \\ y_{d,1} & 1\end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} x_{m,2} & y_{m,2} \\ x_{d,2} & y_{d,2}\end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{m,2} & 1 \\ y_{d,2} & 1\end{vmatrix}\end{vmatrix}}{\begin{vmatrix}\begin{vmatrix} x_{m,1} & 1 \\ x_{d,1} & 1\end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{m,1} & 1 \\ y_{d,1} & 1\end{vmatrix} \\ \begin{vmatrix} x_{m,2} & 1 \\ x_{d,2} & 1\end{vmatrix} & \begin{vmatrix} y_{m,2} & 1 \\ y_{d,2} & 1\end{vmatrix}\end{vmatrix}} \tag{13}$$

음원의 X, Y축의 위치를 추정하였으면, 높이를 추정해야한다. 식 (12)와 식 (13)은 각 마이크로폰 어레이의 중심을 두 점으로 계산하였는데 높이를 계산할 때에는 한 점은 마이크로폰 어레이의 중심이고 나머지 한 점은 식 (12)와 식 (13)에서 구한 점을 사용한다. 그렇게 높이를 두 번 계산한 뒤 평균을 통해 음원의 높이를 추정한다.

Figure 3은 각 마이크로폰 어레이에서 취득한 도래각의 교차점으로 위치 추정 시뮬레이션의 결

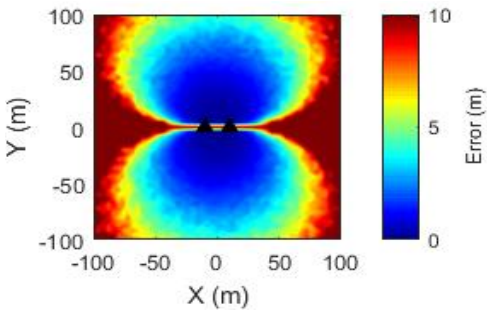


Fig. 3. Acoustic Source Localization Simulation

과이다. 가운데 삼각형이 마이크로폰 어레이의 위치이며 음원의 위치에 따른 거리 오차의 크기를 나타내었다. 도래각 오차가 일정한 값으로 존재할 때, 마이크로폰 어레이에서 음원이 멀어지거나 마이크로폰 어레이가 일직선상에 있을 때 거리 오차가 증가하는 것을 시뮬레이션에서 확인하였다. 같은 도래각 오차가 존재해도 음원의 위치와 마이크로폰 어레이의 위치에 따라 교차점을 계산할 때 수치 오차가 발생한다. 이러한 수치 오차를 줄이기 위해서 드론이 비행할 때의 운동역학적 모델을 칼만 필터에 적용하여 위치 오차의 감소를 시도하였다.

III. 무향 칼만 필터

칼만 필터를 비선형 시스템에 적용할 때는 비선형 시스템 동역학이나 비선형 측정식에 대한 선형화 과정이 필요하다. 확장 칼만 필터의 경우, 자코비안을 통한 연산 샘플링에 따른 선형화를 수행한다. 하지만 이러한 선형화 과정에서 센서와 대상체의 위치에 따른 특이성 문제가 발생할 수 있다. 무향 칼만 필터는 비선형 시스템 관계식에 대해서 선형화 작업을 요구하지 않고, 비선형 관계식을 사용하여 랜덤 변수의 평균과 분산을 추정하는 방법을 사용하기 때문에 선형화에 따른 오차를 배제하여 특이성 문제가 발생하지 않는다. 비선형 관계식을 적용하기 위해, 비선형 확률 분포 함수의 변환 식에 대하여 사전 확률 분포 함수의 평균과 분산을 추출하여 구한 표본들을 적용하여 사후 확률 분포의 평균과 분산을 근사치로 구하는 방법을 이용한다.

System Model

$$x_k = f(x_{k-1}, u_{k-1}) + \Gamma\omega_{k-1} \tag{14}$$

$$y_k = h(x_k) + \nu_k \tag{15}$$

여기에서 x_k는 추정 값이며 y_k는 센서에서 취득한 측정값이다. w_{k-1}는 시스템의 동역학적 오차이며, ν_k는 측정 오차이다. $f(x_{k-1}, u_{k-1})$와 $h(x_k)$는 비선형 동역학과 비선형 측정 방정식이다.

다음은 무향 칼만 필터를 수행하는 단계를 나타낸 것이다.

Step 1: Time Update

$$\chi_1 = \hat{x}_{k-1}(+) \tag{16}$$

$$\chi_i = \hat{x}_{k-1}(+) + u_i \tag{17}$$

$$\chi_{i+n+1} = \hat{x}_{k-1}(+) - u_i \tag{18}$$

$$U^T U = (n+\kappa) * P_{k-1}(+) \tag{19}$$

여기에서 u_i는 행렬 U의 행벡터이며 행렬 U는 식 (19)를 만족해야한다. n은 추정 대상의 개수이며 κ는 일반적으로 $n+\kappa=3$이다.

$$W_1 = \frac{\kappa}{n+\kappa} \tag{20}$$

$$W_{i+1} = \frac{1}{2(n+\kappa)} \tag{21}$$

$$W_{i+n+1} = \frac{1}{2(n+\kappa)} \tag{22}$$

$$\hat{x}_k(-) = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i \chi_i \tag{23}$$

$$P_k(-) = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i (f(\chi_i) - \hat{x}_{k-1}(+))(f(\chi_i) - \hat{x}_{k-1}(+))^T + \Gamma Q \Gamma^T \tag{24}$$

Step 2: Measurement Update

$$\hat{y}_k = \sum_{i=1}^{2n+1} = W_i f(\chi_i) \tag{25}$$

$$S_k = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i (f(\chi_i) - y_k)(f(\chi_i) - y_k)^T + R \tag{26}$$

$$\nu_k = y_k - \hat{y}_k \tag{27}$$

$$K_k = P_{xy} S_k^{-1} \tag{28}$$

$$P_{xy} = \sum_{i=1}^{2n+1} W_i (f(\chi_i) - \hat{x}_k(-))(h(\chi_i) - \hat{y}_k)^T \tag{29}$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + K_k\nu_k \tag{30}$$

$$P_k(+) = P_k(-) - K_kS_kK_k^T \tag{31}$$

무향 칼만 필터의 시스템 모델은 드론의 위치, 속도, 가속도 간의 운동역학을 기반으로 설정하였으며, 측정값은 각 마이크로폰 어레이에서 취득한 도래각이다. 추정 값을 식 (14)에 적용시키면 다음과 같다.

$$x_k = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ y \\ \dot{y} \\ \ddot{y} \\ z \\ \dot{z} \\ \ddot{z} \end{bmatrix}, f(\chi_i) = F\chi_i \tag{32}$$

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & T & \frac{T^2}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{33}$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \frac{T^3}{6} & 0 & 0 \\ \frac{T^2}{2} & 0 & 0 \\ T & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T^3}{6} & 0 \\ 0 & \frac{T^2}{2} & 0 \\ 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T^3}{6} \\ 0 & 0 & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 0 & T \end{bmatrix} \tag{34}$$

식 (33)과 식 (34)에서의 T는 샘플링 타임이다. 시스템 모델을 설정하였으면, 무향 칼만 필터 단계를 수행한다. 식 (19)에서 n은 추정 값의 개수이다. 본 논문에서 추정 값의 개수는 각 축마다 위치, 속도, 가속도로 9개이다. 식 (19)에서 $n+\kappa=3$을 만족해야 하므로 κ는 -6으로 설정하였다. 또한 식 (24)와 식 (26)에 Q는 동역학적 오차이며 R은 측정 오차이다. Q는 3x3 대각선 행렬이며 그 값은 $\begin{vmatrix} 10^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-6} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-6} \end{vmatrix}$ 이다. R은 드론이 호버링할 때의 음향신호를 이용하여 도래각을 측정하였다. 실험을 반복 수행하여 취득한 도래각 오차들의 분산을 측정 오차로 설정하였다.

Ⅳ. 실 험

4.1 실험 설정

실험은 가로 65 m, 세로 95 m인 운동장에서 수행하였다. 하나의 마이크로폰 어레이에는 네 개의 마이크로폰이 사용되었으며, 사면체 형상으로 제작하였으며 마이크로폰 어레이의 팔 길이는 0.5 m이다. Fig. 4는 마이크로폰 어레이형상이다. 마이크로폰 어레이 두 개를 약 20 m의 간격으로 배치하였다. 실험에 사용한 드론은 Fig. 5의 RC 헬리콥터를 사용하였다. 드론의 프로펠러는 약 1.8 m이며 무게는 약 6.5 kg이다. 드론은 직사각형의 궤적으로 비행하였으며 드론의 비행 궤적은 드론에 픽스호크를 부착해 GPS정보를 취득하였다.

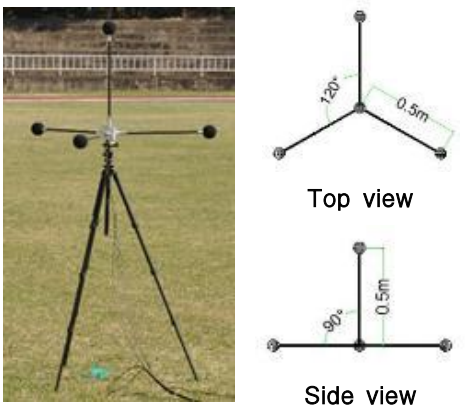


Fig. 4. Microphone Array Configuration

Fig. 5. RC Helicopter used in the Experiment

4.2 도래각을 이용한 음원 위치 추정 결과

Figure 6에서 삼각형은 마이크로폰 어레이의 위치를 나타내며, 빨간색 점선은 드론이 비행하였을 때 도래각의 교차점으로 위치를 추정한 결과이다. Fig. 7(a)는 첫 번째 어레이에서 첫 번째 마이크로폰의 스펙트로그램이다. Fig. 7(a)에서 2500Hz 근처의 주파수를 이용하기 위해 1500~3500Hz의 밴드패스필터를 사용하였다. 필터링이 된 신호로 도달시간차를 계산하였다. 도달시간차는 교차상관 함수를 사용하여 0.2 초마다 계산하였다. 그 결과가 Fig. 7(b)이다. Fig. 7(b)에서 파란색 점선은 교차 상관 함수를 사용하여 계산한 도달시간차이다. 도달시간차에서 오차가 큰 부분이 존재하는데 정확도가 낮은 도달시간차를 이용

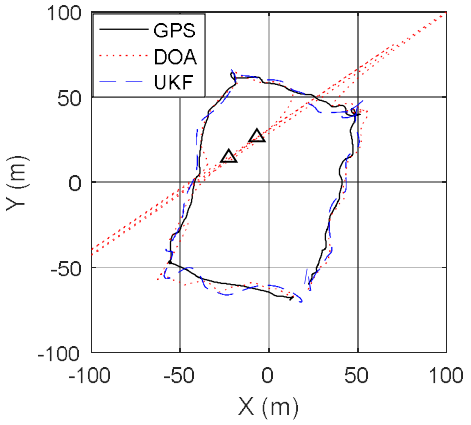
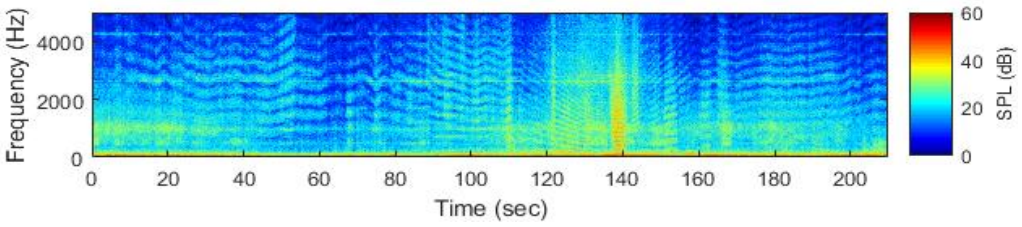
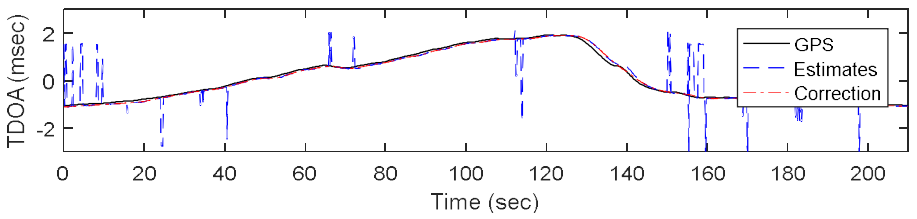


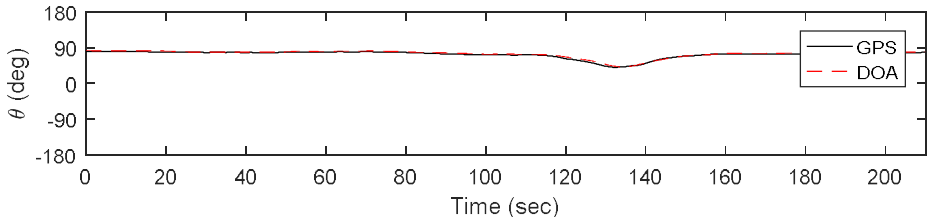
Fig. 6. Drone Localization Result



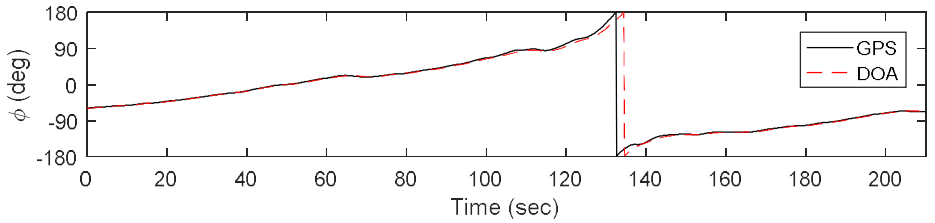
a) Spectrogram at MIC. 1



b) Time Difference of Arrival between MIC 1 and MIC 3



c) Comparison of theta between GPS and DOA in Array 1



d) Comparison of phi between GPS and DOA in Array 1

Fig. 7. Signal Process and DOA Results

해 도래각을 계산하면 도래각의 추정 정확도도 낮아진다. 그래서 이 문제를 회기분석을 사용하여 해결하였다. 회기분석은 가중치가 있는 선형 최소 제곱 및 2차 다항식 모델을 사용하였다. 가중치는 도달시간차의 데이터 중 여섯 개의 평균 절대 편차를 계산한 뒤 그 값을 벗어나는 데이터에는 제로 가중치를 할당하였다. 회기분석을 통하여 도달시간차의 오차가 개선되었으며, GPS의 도달시간차를 적절히 따라가고 있다. Fig. 6의 도래각의 교차점으로 추정한 드론의 위치결과는 빨간색 점으로 표시하였다. 교차점을 이용한 드론 위치 추정 결과는 GPS경로를 잘 따라가며 추정하는 듯이 보이나 두 개의 마이크로폰 어레이가 일직선상에 있는 곳에 드론이 지나가는 경우에는 추정 결과의 정확도가 떨어져 오차가 크게 발생하고 있다. Fig. 7(c)과 Fig. 7(d)는 첫 번째 마이크로폰 어레이에서 추정한 도래각이다. 도래각의 오차는 실제 도래각과 큰 차이 없는 결과를 보이고 있다. 이것으로 보아 Fig. 6에서 발생하는 오차는 도래각의 교차점을 계산할 때 발생하는 수치오차이다. 이 결과는 Fig. 3에서 확인한 시뮬레이션 결과와 일치한다.

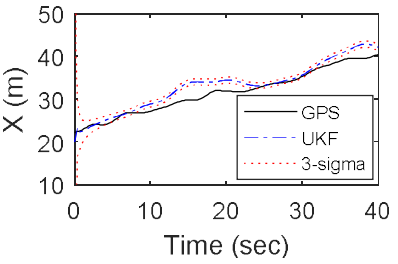
4.3 무향 칼만 필터를 이용한 위치 추정 결과

각 어레이에서 취득한 도래각의 교차점을 이용해 위치 추정을 하였다. 그 결과 두 개의 마이크로폰 어레이의 일직선상에 드론이 지나가면 위치 추정의 정확도가 떨어지는 것을 Fig. 6의 빨간점을 통해 확인하였다. 위치 추정의 정확도를 향상시키기 위하여 교차점 계산이 아닌 무향 칼만 필터를 이용하여 드론의 위치를 추정하였다. Fig. 6에서 파란색 점선이 무향 칼만 필터를 적용하여 드론의 위치를 추정한 결과이다. 기존 도래각의 교차점으로 음원의 위치추정을 하였을 때보다 칼만 필터를 적용하였을 때 오차가 저감되는 것을 볼 수 있다.

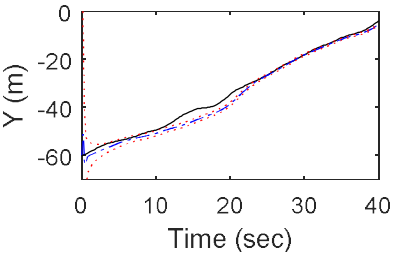
무향 칼만 필터의 오차 공분산을 식 (31)을 이용하여 계산하였다. Fig. 8은 0에서 40초까지의 무향 칼만 필터 추정 결과이다. 검정색 실선은 드론의 GPS이며 파란색 점선은 무향 칼만 필터 추정 결과이며 빨간색 점이 오차 공분산을 표시한 것이다.

4.4 분석

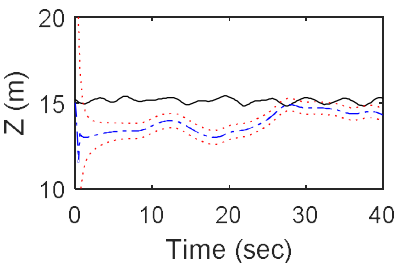
도래각의 교차점의 위치 추정 결과와 칼만 필터를 적용한 위치 추정의 결과를 Fig. 7에서 비교하였다. Fig. 9는 각 결과의 각 축에 대한 오차를 시간에 흐름에 따라 그린 그래프이다. DOA



a) UKF Result and Error Covariance at X axis



b) UKF Result and Error Covariance at Y axis

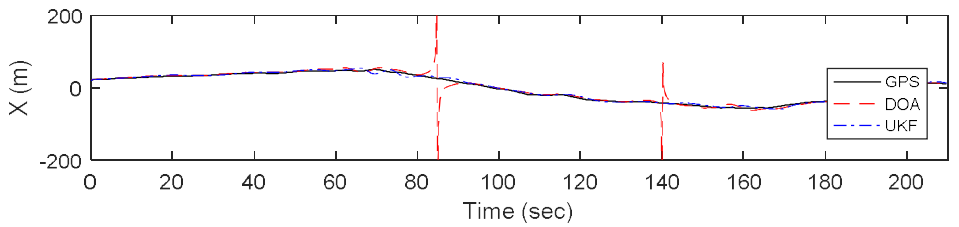


c) UKF Result and Error Covariance at Z axis

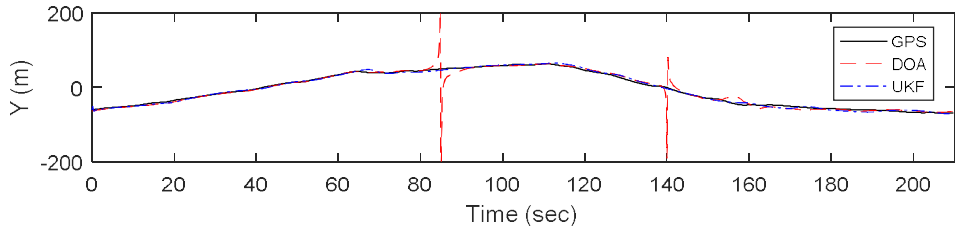
Fig. 8. UKF Results and Error Covariance

는 각 마이크로폰 어레이에서 취득한 도래각의 교차점으로 계산했을 때의 위치 추정에 대한 오차이며, UKF는 무향 칼만 필터를 적용한 후의 위치 오차이다. 기존 도래각의 교차점을 이용한 위치 추정의 오차는 마이크로폰 어레이와 드론이 일직선상에 있을 때 수치 오차가 발생하여 오차가 증가한다. 반면에 무향 칼만 필터를 이용하여 음원 위치 추정을 하였을 때 계산한 오차는 각 축별로 오차 크기에 대한 차이는 있지만 운동역학 모델의 활용으로 오차가 개선된 것을 볼 수 있다. 그리고 Fig. 9(d)는 Percentage Fit Error (PFE)를 계산한 결과이다.

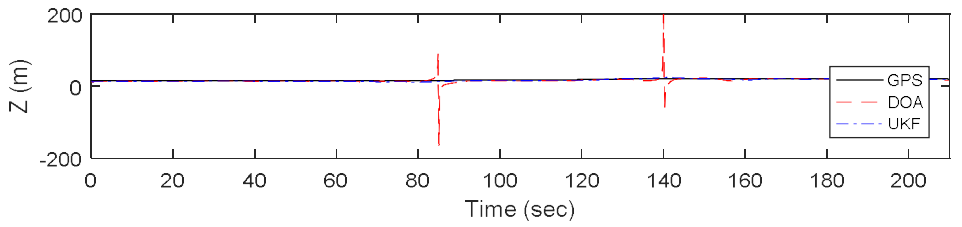
$$PFE = \frac{|GPS - Estimates|}{|GPS|} * 100(\%) \qquad (35)$$



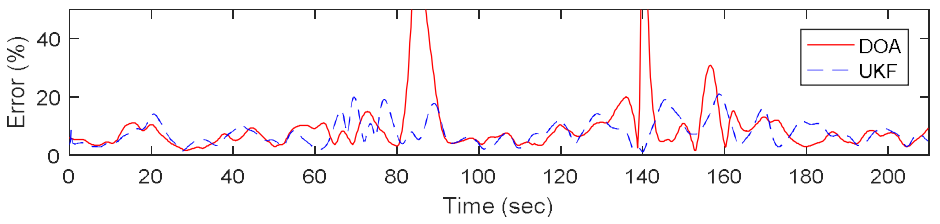
a) Distance Error on X axis



b) Distance Error on Y axis



c) Distance Error on Z axis



d) Percentage Fit Error

Fig. 9. Distance Error and Percent Fit Error

Table 1. Percentage Fit Error

	Percentage Fit Error (%)			
	X	Y	Z	Total
DOA	34.68	81.91	13.90	12.94
UKF	27.78	17.71	8.28	7.18

PFE는 식 (35)를 이용하여 계산하였다. PFE 결과 역시 교차점을 이용했을 때에는 일정 시간에 큰 오차가 발생하고 있다. Fig. 7과 Table. 1에서 무향 칼만 필터를 적용하였을 때 오차가 저감되는 것을 확인하였다.

Ⅴ. 결 론

드론의 수요가 많아짐에 따라 안티 드론에 대한 수요가 급증하였다. 본 논문은 여러 드론 위치 추정 기술 중에 시스템 크기가 작으며 운용이 편리하고 가격이 저렴한 마이크로폰 어레이 시스템을 이용하여 드론의 위치를 추정하였다. 하지만 마이크로폰 어레이와 음원의 위치에 따라 도래각의 교차점으로 음원의 위치를 계산할 때 수치 오차가 발생하여 위치 추정의 정확도가 낮아지는 구간이 발생하였다. 그래서 위치 추정 정확도 향상을 위하여 마이크로폰 어레이 시스템에 무향 칼만 필터를 적용하여 음원의 탐지 성능을

향상시키고 위치 오차를 저감하였다. 추후 마이크로폰 어레이 시스템의 위치 추정 정확도 향상을 위하여 적절한 마이크로폰 어레이 배치 간격을 설정하고, 마이크로폰 어레이 시스템의 최대 탐지 거리를 확인하여 마이크로폰 어레이 성능 파악이 필요하다. 또한 교도소나 발전소 같이 접근하는 불법적인 드론에 대한 경로를 특정 범위로 국한할 수 있다면, 추정 위치에 대한 정확도를 크게 향상시킬 수 있을 것이다.

후 기

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

References

1) Chae, S. H., and Hong, S. P., “The Opportunity and Risk Analysis of Commercial Drones,” *The Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 2015, pp.736~737.

2) Park, J., “World Commercial Drones Market Status and Outlook,” *Korea Aerospace Research Institute*, Aviation Issue No. 15, Korea, Jan, 2018.

3) Holland, M., “Counter-Drone System,” Center for the Study of the Drone at Bard College, Feb. 2018, https://dronecenter.bard.edu/counter-drone-systems/.

4) Gabriel, C. B., John, C. G., and Matthew, K. E., “UAS Detection, Classification, and Neutralization: Market Survey 2015,” *Sandia National Laboratories*, 2015, SAND2015-6365.

5) Lee, K., “Drone Detection Technology Trends at Home and Abroad,” Institute for Information and Communications Technology Promotion, Oct. 2016.

6) Jeon, W., H., and Lee, D., J., “Aircraft Noise Sources and its Prediction Method,” *Journal of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 25, No. 2, Apr. 1997, pp.175~182.

7) Minas, B., and Geoffrey, H., G., “Acoustic Detection and Tracking of a Class I UAS with a Small Tetrahedral Microphone Array,” ARL-TR-7089, US Army Research Laboratory, Sep. 2014.

8) Vitaliy, K., Marcos, T., Jafar, S., and Erdal. O., “Direction of Arrival Estimation and Localization Using Acoustic Sensor Array,” *Journal of Sensor Technology*, Vol. 1, Sep. 2011, pp.71~80.

9) Thyagaraju, D., Lance, M., K., and Gene, T., W., “Siniper Localiztion Using Acoustic Asynchronous Sensors,” *IEEE Sensors journal*, Vol. 10, No. 9, Sep. 2010, pp.1469~1478

10) Reiff, C., Pham, T., Scanlon, M., Noble, J., Landuyt, V., A., Petek, J., and Ratches, J., “Acoustic Detection from Aerial Balloon Platform,” Army Research Lab Adelphi MD, Dec. 2014.

11) Kee, C. D., Kim, G. H., and Lee, T. J., “Real-Time Sound Localization System For Reverberant And Noisy Environment,” *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 38, No. 3, 2010, pp.258~263.

12) Robert, P., D., “Advanced Time-domain Beamforming Techniques,” *10th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, 2004.

13) Don, J., T., “Statistical Theory of Passive Location System,” *IEEE TRANSACTIONS AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS*, Vol. AES-20, No. 2, Mar. 1984, pp.183~198

14) Wade, H. F., “Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation,” *IEEE TRANSACTIONS ON AEROSPACE AND ELECTRONIC SYSTEMS*, Vol. AES-12, No. 2, Mar. 1976, pp.187~194.

15) Robert, P., D., “Functional Beamforming for Aeroacoustic Source Distributions,” *20th Legacy AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Jun. 2014.

16) Izabela, L., F., and Jose, A., “DoA of Gunshot signals in a spatial microphone array: Performance of the interpolated Generalized Cross-Correlation method,” *IEEE*, Buenos Aires, Argentina, Aug. 2011.

17) Huawei, C., and Junwei, Z., “On locating low altitude moving targets using a planar acoustic sensor array,” *Applied Acoustics*, Vol. 64, Issue. 11, Nov. 2003, pp.1087~1101.

18) Brian, G., F., “Time-delay estimation techniques applied to the acoustic detection of jet aircraft transits,” *The journal of the*

acoustical society of america, Vol. 106, Issue. 1, Jan. 1999, pp.255~264

19) Dong, S., Fengqi, Z., and Jun, Z., "Relative Navigation Based on UKF for Multiple Spacecraft Formation Flying," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference Exhibit,* Aug. 2004.

20) Jin, J., Park, J., Kim, B, Kim, B. S., and Lee, E. Y., "Robust Airspeed Estimation of an Unpowered Gliding Vehicle by Using Multiple Model Kalman Filters," *Journal of Institute of Control*, Robotics and Systems, Vol. 15, No. 8, Aug. 2009, pp.859~866.

21) Sung, J., and Kim, B. S., "Airspeed Estimation of Course Correction Munitions by Using Extended Kalman Filter," *Journal of Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 43, No. 5, Apr. 2015, pp.405~412.

22) Tweddle, B. E., and Saenz-Otero, A., "Relative Computer Vision Based Navigation for Small Inspection Spacecraft," *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Aug. 2011.

23) Simon, J., J., and Jeffrey, K., U., "A New Extension of the Kalman Filter to Nonlinear Systems," *Int. symp. aerospace/ defense sensing, simulation and controls*, Vol. 3, No. 26, 1997, pp.182~193.

24) Eric, A. W., and Rudolfh, V., "The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation," *Adaptive System for signal processing, Communications, and Control Symposium 2000,* Oct. 2000.