

무인기 충돌방지 레이더의 장애물 탐지와 회피모드 분석

Analysis of Obstacle Awareness and Collision Avoidance mode using UAV Radar Sensor

황광연*, 강정완, 곽영길(한국항공대학교)

1. 서론

최근 세계 각국에서 개발 중인 무인항공기는 운용이 용이하며 경제적이고, 비교적 저고도에서 비행하므로 필요한 시간과 장소에서 원하는 임무를 효율적으로 수행할 수 있다. 또한, 무인항공기는 유인항공기와 달리 적은 비용으로 특수한 위험 환경에서 조종사의 인명 위험 없이 임무를 수행할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 특히 군용으로 많이 개발 중에 있고 민수 응용분야에서도 그 필요성이 증대되고 있는 추세이다. 조종사가 없는 무인 항공기에서 필수 조건은 장애물에 대한 충돌회피 문제이다. 특히 과학기술부의 21세기 프론티어 사업으로 연구, 개발 중인 스마트 무인기는 저고도에서 자율비행 능력이 필수 요구사항이며 이 자율비행은 장애물에 대한 충돌회피 기능 없이는 구현될 수 없다. 현재 유인 항공기의 충돌회피는 조종사가 정해진 프로토콜 절차에 따라 상대항공기의 거리와 속도정보를 얻는 충돌회피 장치 (TCAS)를 사용하고 있으며 [1]. 향후 기술 추세는 ADS-B (Automatic Dependent Surveillance Broadcast)를 이용하여 GPS로부터 얻는 자신의 위치 및 비행정보를 주변 항공기에 전파하여 충돌을 방지하는 방식으로 국제 표준화 연구 중에 있다 [2]. 하지만 자율비행이 가능한 스마트 무인기 충돌회피 기술은 선진국에서도 아직 기술개발 단계에 있으며 [3], 최근 무인기 충돌회피를 위한 소형 경량의 밀리미터파 레이더를 이용하여 NASA에서 실시간 비행 탑재 실험을 수행하였다. [4]

본 논문에서는 무인기 충돌방지 시스템의 개념을 제안하고 충돌방지 레이더에 의한 장애물 탐지 성능을 분석하였으며 충돌시간 기준의 충돌

회피 모드를 설정하여 비행 시나리오에 따른 성능을 분석하였다.

2. 무인기 충돌방지 시스템 개념

레이더 센서 기반 무인기 충돌방지 시스템은 그림1과 같다. 레이더 센서에서는 무인기의 진행 방향으로 존재하는 장애물에 대한 거리와 방위 그리고 속도(상대속도)정보가 실시간으로 들어온다. 이 정보들은 장애물 감지 및 충돌회피 시스템 (Obstacle Awareness and Collision Avoidance)에서 무인기 자체의 속도 정보 및 방향정보와 비교하여 장애물과의 충돌여부 판단 및 회피기동 시 회피동작 명령을 비행제어 컴퓨터(DFCC)로 보내게 된다. 이 신호를 이용하여 항법 데이터에 명령신호를 주어 비행 방향을 미리 준비하고 조정하도록 한다.

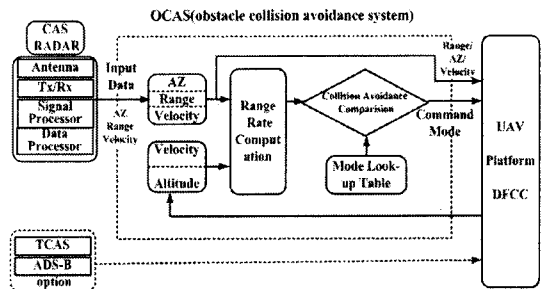


Fig. 1 무인기 충돌회피 시스템 (OCAS)개념도

무인기의 충돌회피는 유인기에서 조종사가 장애물을 보고 피하는 정도의 안전성을 확보해야 한다. FAA와 ICAO의 규정에 의하면 충돌위험이 있는 장애물과의 안전거리는 500ft 이상을 확보하여야 한다. 또한 실제 조종사가 장애물이 있음을 인지하고 비행경로를 바꾸기 위해 행동

하는데 까지 걸리는 시간은 12.5초이고, 실제 비행기가 회피기동을 시작해서 안전하게 회피하는데 까지 걸리는 시간은 11초가 된다. 즉, 무인기는 장애물의 탐지와 회피를 하는데 최소 23.5초의 시간이 확보되어야지만 안전하게 장애물과의 충돌을 회피할 수 있다. 위의 규정에 근거한 설정은 조종사가 보고 피하는 경우이고 무인기에서는 센서에 의해 탐지와 회피동작이 이루어지기 때문에 경보 및 추적모드를 23초, 회피모드를 11초로 설정하였다.

Table1. 접근속도에 따른 충돌회피 시간 기준
(무인기 440Km/h, 이동장애물 60-560Km/h)

시간(s) 속도 (Km/h)	5	11	17	23	25	30	35	40	45	sec
500	0.7	1.5	2.3	3.2	3.5	4.2	4.9	5.6	6.2	Km
600	0.8	1.8	2.8	3.8	4.2	5	5.8	6.7	7.5	Km
700	1	2.1	3.3	4.5	4.9	5.8	6.8	7.8	8.6	Km
800	1.1	2.4	3.8	5.1	5.6	6.7	7.8	8.9	1.0	Km
900	1.3	2.8	4.2	5.8	6.3	7.5	8.8	10	11.3	Km
1000	1.4	3.0	4.7	6.4	6.9	8.3	9.7	11.1	12.5	Km
비고		회피 모드		경보 모드						

무인기 충돌방지 시스템에서 사용되는 센서는 전방의 장애물에 대한 거리, 방위, 속도정보의 획득이 가능하고, 운영환경에 있어서 전천후 주야동작이 가능하며 무인기의 탑재 크기 및 무게를 감안했을 때 소형 경량의 밀리미터파 레이더가 가장 적합하다. [6] 신호처리 방식에 있어서는 coherent-on-receiver 방식의 펄스 레이더를 사용하여 장애물의 속도정보를 측정할 수 있으며 coherent 방식에 비해 저가이면서 시스템구성을 비교적 간단히 할 수 있다. 그 밖에 주요 레이더 파라미터는 표2와 같다.

3. 장애물 탐지성능 분석

저고도로 비행하는 UAV의 장애물은 건물이나 산, 전선 같은 고정 장애물과 유인항공기나 헬리콥터와 같은 이동 장애물로 분류할 수 있다. 이러한 장애물에 대한 탐지확률은 SNR과 오경보확률에 의해 영향을 받으며 SNR은 장애물의 RCS(Radar Cross Section)와 PRF(Pulse Repetition Frequency)에 의해 달라진다. RCS는 장애물의 표면상태나 신호의 입사각, 파장, 다중경로 등에 의해 변화하는데 단순한 모양의 장애물이라 할지라도 정확한 RCS값을 산출하기

Table 2. 레이더 센서 기본모델

Frequency	35GHz
Detection Range	6.4Km
PRF	2~18 KHz
Pulse Width	33ns
Peak power	3Kw
Scan Rate	150deg/sec
Antenna Beam Width	2.5 deg
Antenna Gain	38dB
Receiver Noise Figure	3.5dB
RCS	2~30 dBsm (limited by aspect angle)
Prob. of False Alarm	10e-6
Prob. of Detection	90%

란 쉬운 문제가 아니기 때문에 고정 장애물이나 이동 장애물의 RCS는 근사화 된 값을 사용한다. 움직이는 장애물의 경우에 RCS는 크기값이나 위상이 계속적으로 변화한다. 위상의 변화를 glint라 하고 크기값의 변화를 scintillation이라고 하는데 대부분의 레이더 응용에서 glint는 선형적인 에러 값을 갖기 때문에 큰 문제가 되지 않는다. 하지만 고해상도나 정확한 정밀도를 갖는 레이더의 경우에는 glint의 영향을 무시할 수 없게 된다. scintillation은 장애물의 크기, 모양, dynamics등에 의해 영향을 받는다. RCS는 random process처럼 변화하기 때문에 RCS scintillation 모델은 통계적인 모델을 사용하며, 본 논문에서는 swering 모델 I, II, IV, V [5]을 사용하였다. 또한 PRF와 SNR의 관계는 일정한 T_D (DwellTime) 동안 PRF가 증가할수록 integration되는 Pulse수가 증가하여 다음식의 관계로 SNR이 높아지게 된다.

$$SNR = \frac{P_i \rho_i T_D G^2 \lambda^4}{(4\pi)^3 R^4 k T_e F L}$$

표2에서 제시한 레이더 파라미터를 적용한 거리에 따른 SNR은 그림 2과 같다.

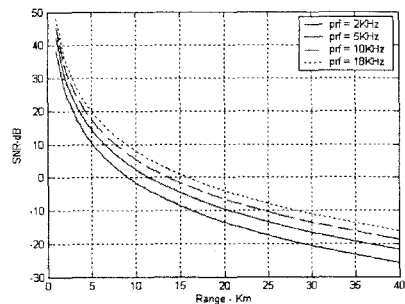


Fig. 2 거리에 따른 SNR (RCS=2m²)

이와같은 SNR을 바탕으로 거리에 따른 충돌방지용 레이더의 탐지확률을 swerling 모델별로 시뮬레이션 하였다.

무인기와 장애물간의 상대속도가 1000Km/h에서 경보모드가 되는 23초를 기준으로 충돌방지 레이더의 탐지거리는 6.4Km가 되고 이 거리는 충돌방지 레이더의 최소 탐지거리 된다. 결과를 보면 모든 swerling model에서 PRF가 5KHz일 때 6.4Km에서 90%이상의 탐지확률을 만족한다. 하지만 충돌방지 레이더를 이용한 장애물 회피에 있어서 이동 장애물의 경우 장애물의 거리정보 외에 빠르게 이동하는 장애물의 속도정보도 매우 중요하다. 만약 PRF가 5KHz가 되면 Ru(unambiguous range)는 30Km가 되지만 도플러 효과를 이용하여 38.7Km/h정도의 속도측정만이 가능하다. 또한 1000Km/h의 속도를 측정하기 위해서는 PRF가 130KHz이상 되어야 하며 이때의 Ru는 1.1Km정도가 된다. Ru를 적당한 거리까지 확보하면서 빠르게 움직이는 장애물을 탐지하기 위해서는 여러개의 PRF를 이용하는 multiple PRF 방식을 사용해야 한다.

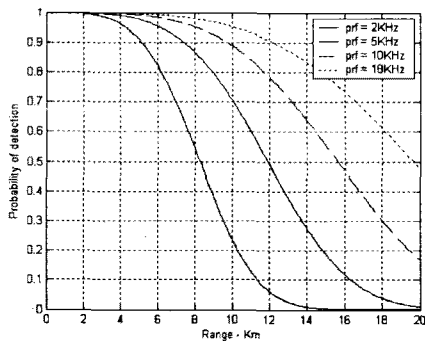


Fig. 3 거리에 따른 탐지확률 (swerling I, RCS=2m²)

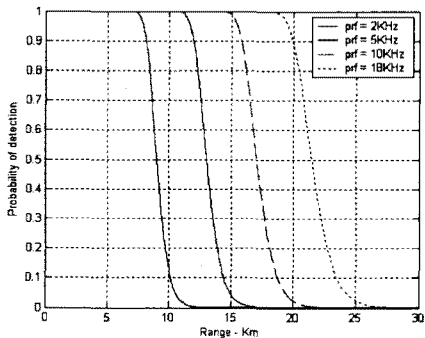


Fig. 4 거리에 따른 탐지확률 (swerling II, RCS=2m²)

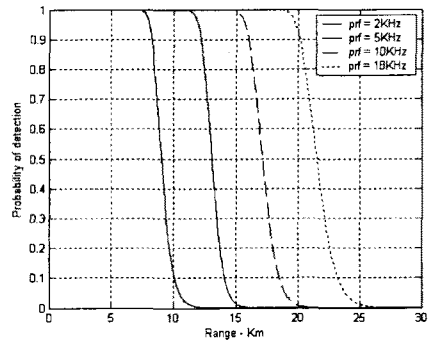


Fig. 5 거리에 따른 탐지확률 (swerling IV, RCS=2m²)

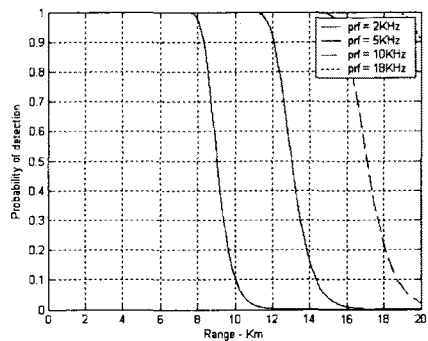


Fig. 6 거리에 따른 탐지확률 (swerling V, RCS=2m²)

4. 충돌회피 모드 분석

본 논문에서는 장애물과의 충돌까지 걸리는 시간을 기준으로 무인기는 탐지모드와 추적모드 그리고 회피모드로 비행을 한다. 충돌회피에 대한 절차는 아래 그림과 같다. [7]

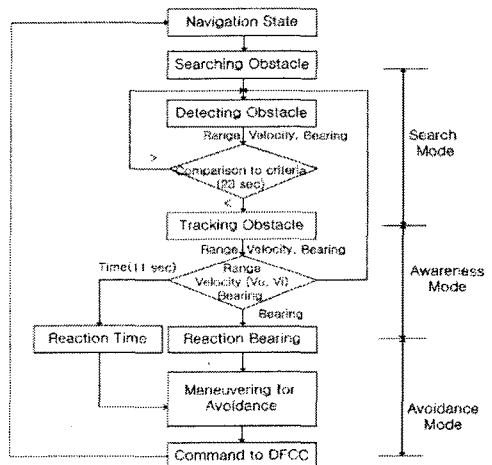


Fig. 7 충돌회피 개념도

탐지모드에서는 무인기가 정해진 목적지까지 항법 시스템을 이용하여 비행을 하는 항행모드이며 레이더를 통해 비행궤적에 있는 장애물을 탐지한다. 추적모드는 전방의 탐지된 장애물까지의 충돌시간이 23초가 되었을 때 전환되며 이 모드에서 역시 항법 시스템을 통해 비행을 한다. 추적모드에서는 장애물의 이동궤적을 추적하여 무인기 자체의 이동방향과 비교 후 충돌위험 및 충돌예상 위치를 계산하게 된다. 장애물이 충돌시간인 11초에 오면 앞선 추적모드에서 충돌위험의 여부에 따라 충돌위험이 있으면 충돌회피 모드로 전환되어 회피기동을 시작하고 그렇지 않은 경우에는 계속적으로 항법 시스템에 의한 비행을 하게 된다. 회피모드로 전환되었을 때는 항법 시스템에 의한 비행이 아닌 충돌회피 명령에 따라 무인기가 기동하게 되고 장애물을 안전하게 회피하여 충돌 위험이 사라지면 다시 항행모드로 전환한다.

충돌회피 성능은 다양한 비행 시나리오를 바탕으로 충돌방지 레이더로부터의 거리, 속도, 방위 정보에 따른 동작여부에 대한 분석이 이루어져야 한다. 첫 번째 시나리오는 방위각이 0도에서 오는 이동장애물에 대한 것으로 정확한 속도와 거리정보를 바탕으로 충돌까지 걸리는 시간을 계산하여 방위방향으로 회피기동이 가능하다. 두 번째 시나리오는 이동 장애물이 방위각 0도~90도까지 중 어느 한 방향에서 접근하는 상황으로 정확한 상대속도 측정이 중요하다. 만약 90도에서 이동 장애물이 접근해 오는 경우에는 도플러 측정이 불가능하기 때문에 도플러에 의한 속도정보 측정 이외에 정확한 거리정보의 변화율을 바탕으로한 속도측정이 이루어져야 한다. 세 번째 시나리오는 무인기가 이동 장애물의 후방에서 접근하고 무인기의 속도가 이동 장애물보다 빠를 경우에 충돌이 일어난다. 이 경우에는 접근속도와 거리정보를 바탕으로 방위방향으로의 회피가 가능하다. 네 번째 시나리오는 건물이나 철탑, 산과 같은 고정 장애물에 대한 것으로 거리정보와 clutter map 등의 정보를 이용하여 회피가 가능하다.

5. 결 론

저고도에서 비행하는 무인기는 비행경로상에 있는 고정/이동 장애물에 대한 정확한 탐지 및 충돌회피가 필수적이다. 본 논문에서는 이러한

충돌방지 시스템의 개념을 제안하였고 충돌방지 레이더의 탐지성능을 분석하였다. 또한 충돌시간을 기준으로한 충돌회피 모드를 설정하였다. 향후에는 시뮬레이션을 통해 충돌회피 시스템의 성능을 분석고 다양한 비행 상황에 적합한 알고리즘 개발을 통한 레이더 충돌회피 시스템의 성능을 분석할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Williamson, T., Spencer, N.A. "Development and operation of the Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS)", Proceedings of the IEEE, Volume: 77, Issue: 11, Nov. 1989 Pages:1735 - 1744
- [2] Robert Holdsworth, Jim Lambert, "Inflight path planning Replacinh Pure Collision Avoidance Using ADS-B", Aerospace and Electronic Systems IEEE, Volume: 16, Issue: 2, Feb. 2001 Pages:27 - 32
- [3] S.A. Hovanessian, "Introduction to Sensor Systems", Artech House, 1988
- [4] Russel Wolfe, "Non-Cooperative Collision Avoidance Flight Test Results & Analysis" UVS Tech 2003 Conference
- [5] Huntsville, Alabama, "Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB", CHAPMAN & HALL/CRC, 2000
- [6] 강정원,곽영길, "무인항공기 충돌방지를 위한 밀리미터파 레이더 센서 설계 성능분석", 한국항공대학교 전자정보통신공학논문지, 제9권 제2호 2003. Pages:53-58
- [7] Young K Kwag, "Obstacle Awareness and Collision Avoidance Radar sensor System for Low-Altitude Flying Smart UAV", Proceedings of the IEEE, 23rd DASC Oct., 2004, Pages:12.D.2-1~12.D.2-10