

논문 2012-49SC-2-8

# 다중 무인 항공기의 협동 작업을 위한 무 충돌 비행 계획

## ( Collision-free Flight Planning for Cooperation of Multiple Unmanned Aerial Vehicles )

박 재 병\*

( Jae Byung Park )

### 요 약

본 논문에서는 3차원 공동 작업 공간에서 다중 무인항공기의 협동 작업을 위한 확장 충돌 지도 기반 무 충돌 비행 계획 기법을 제안한다. 먼저 무인항공기는 회전과 같은 3차원 움직임을 고려해 구로 모델링하였다. 공동 작업 영역에 진입 후 진출할 때까지 무인 항공기는 직선 경로를 따라 이동하고 모든 무인 항공기의 우선순위는 미리 정해져 있다고 가정한다. 가정에 따라 3차원에서 정의된 구와 구 사이의 충돌 검출 문제를 2차원에서 정의된 원과 직선 사이의 충돌 검출 문제로 축소할 수 있다. 원과 직선 사이의 충돌영역은 계산의 편의성과 안전성을 위해 충돌사각형으로 근사화 하였다. 이렇게 정의된 충돌사각형을 이용하여 무인 항공기들 간의 충돌을 회피할 수 있도록 각 무인 항공기의 공동 작업 공간 진입 시간을 조율한다. 이와 같은 방법으로 모든 무인 항공기는 공동 작업 공간에 진입해서 진출할 때까지 서로 간에 충돌 없이 이동 할 수 있게 된다. 제안된 무 충돌 비행 계획의 효율성을 증명하기 위해 12대의 무인 항공기를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다.

### Abstract

The collision-free flight planning method based on the extended collision map is proposed for cooperation of multiple unmanned aerial vehicles (UAVs) in a common 3-dimensional workspace. First, a UAV is modeled as a sphere, taking its 3-D motions such as rolling into consideration. We assume that after entering the common workspace, the UAVs move along their straight paths until they depart from the workspace, and that the priorities of the UAVs are determined in advance. According to the assumptions, the collision detection problem between two spheres in  $R^3$  can be reduced into the collision detection problem between a circle and a line in  $R^2$ . For convenience' sake and safety, the collision regions are approximated by collision boxes. Using the collision boxes, the entrance times of the UAVs are scheduled for collision avoidance among the UAVs. By this way, all UAVs can move in the common workspace without collisions with one another. For verifying the effectiveness of the proposed flight planning method, the simulation with 12 UAVs is carried out.

**Keywords :** Collision-free flight planning, multiple unmanned aerial vehicles, entrance time scheduling

## I. 서 론

최근 무인 항공기의 응용분야가 정찰, 감시, 전투 등을 위한 군사용에서부터 농약 살포 등을 위한 농업용에 이르기까지 매우 광범위해지면서 관련 연구가 활발하게

진행되고 있다. 대부분의 무인 항공기 임무는 넓은 작업 공간에서 수행되기 때문에 다수의 무인 항공기의 협동 작업을 통해 작업의 효율성을 높일 수 있다. [1]과 [2]에서는 다중 무인 항공기의 협동 작업을 통해 미지의 영역을 탐색하는 기법을 제안하였다. 하지만 이 경우 공동 작업 공간 내에서 다수의 무인 항공기가 비행하기 때문에 서로간의 충돌이 발생할 위험이 매우 커짐에도 불구하고 무인 항공기 간의 충돌을 고려하지 않았다. 충돌이 발생할 경우 고가의 무인 항공기의 파손으로 인한 경제적 손실뿐만 아니라 주어진 임무의 실패라

\* 정회원-교신저자, 전북대학교 전자공학부  
(Div. of Electronic Engineering, Chonbuk National University)

※ 이 논문은 2007년 전북대학교 신입교수 연구비 지원에 의하여 연구되었음  
접수일자: 2011년9월1일, 수정완료일: 2012년2월28일

는 심각한 문제가 발생하게 된다. 따라서 다중 무인 항공기 협동 작업을 위해서는 서로간의 충돌 회피가 반드시 선행되어야만 한다.

다 개체의 충돌 회피 문제는 2차원 공간에서 이동하는 다중 이동 로봇에서부터 3차원 공간에서 이동하는 다중 무인 항공기에 이르기까지 매우 다양하게 연구되고 있다. [3]에서는 동적으로 변화하는 2차원 공간에서 이동하는 다중 이동로봇의 충돌회피 문제를 해결하기 위해 퍼지시스템과 포텐셜 필드를 이용하였다. [4]에서는 비례항법 기반 충돌 회피 기법을 2대의 무인 항공기에 대해서 적용하였다. 그러나 이 경우에도 3차원이 아닌 2차원 평면상에서 이동하는 무인 항공기 간의 충돌 문제를 다루었다. [5]에서는 기하학적 접근 방법을 이용하여 3차원 공간에서 무인 항공기 간의 충돌 회피 문제를 다루지만 여전히 무인 항공기 2대 사이의 충돌 문제에 그치고 있다.

본 논문에서는 확장 충돌 지도를 이용하여 3차원 다중 무인 항공기에 대한 충돌 회피 기법을 제안한다. 원래 충돌 지도 개념은 2대의 매니플레이터의 협동 작업을 위한 충돌 회피를 위해 제안되었다<sup>[6]</sup>. 그 후 다중 이동로봇의 충돌 회피 문제를 해결하기 위해 확장 충돌 지도 개념이 제안되었다<sup>[7]</sup>. 충돌 지도의 경우 충돌 검출 시 계산적 접근 방법을 이용해왔기 때문에 3차원에도 2차원과 동일한 방법을 적용하여 충돌 검출이 가능하다. 즉, 3차원으로 직접적인 확장이 가능하다. 하지만 계산적 접근 방법을 이용할 경우 이동 경로를 이산화 하여 모든 점들에 대한 충돌을 검출하게 되므로 로봇 개체의 수가 증가할수록 계산량이 기하급수적으로 많아지고 이산화 정도에 따라 해상도의 저하를 가져올 수 있다. 본 논문에서는 충돌 검출을 위해 계산적 접근 방법이 아닌 기하학적 접근을 이용한다. 이를 위해 먼저 모든 무인 항공기의 우선순위는 미리 정해져 있으며, 공동 작업 영역 내에서는 직선 경로를 통해 일정한 속도로 이동한다고 가정한다. 이 가정에 의해 3차원 공간에서의 충돌 검출 문제를 2차원 공간의 충돌 검출 문제로 축소할 수 있다. 이와 같은 과정을 통해 검출된 충돌을 회피하기 위해 확장 충돌 지도 개념을 적용하여 모든 무인 항공기의 공동 작업 영역 진입 시간을 조율하게 된다. 결과적으로 모든 무인 항공기는 공동 작업 영역 내에서 주어진 경로를 따라 정찰 임무 등을 성공적으로 수행할 수 있게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 공동 작업

영역에서 협동 작업을 수행하는 다중 무인 항공기 충돌 문제를 정의하고 확장 충돌 지도 개념을 3차원에 적용하였다. 이 때 기하학적 접근 방법을 이용해 3차원 문제를 2차원으로 문제를 축소하는 방법을 제안하였다. III장에서는 12대의 무인 항공기를 이용한 모의실험을 통해 제안한 기법의 효율성을 보이고 IV장에서 결론을 맺는다.

## II. 다중 무인 항공기 충돌 회피

### 1. 다중 무인 항공기 협동 작업 문제 정의

다중 무인 항공기를 이용한 특정 영역의 정찰, 감시 임무의 경우 이를 효율적으로 완수하기 위한 최적경로 및 속도는 항공기의 이동 성능이나 부착된 센서 특성을 고려하여 미리 결정할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 최적경로 생성에 대한 문제는 다루지 않고 임무를 완수하기 위한 최적경로가 주어진 상태에서 무인 항공기 간 충돌 회피 문제를 다룬다. 이를 위해 먼저 다음과 같이 2가지를 가정한다.

**가정1.** 모든 무인 항공기의 우선순위는 미리 정해져 있다. 그림 1에서  $UAV_i$ 는  $i$ 번째 우선순위를 갖는 무인 항공기를 의미한다. 모든 무인 항공기는 자신보다 우선순위가 높은 무인 항공기를 방해하지 않는다. 즉, 우선순위가 낮은 무인 항공기가 우선순위가 높은 무인 항공기와 충돌하지 않도록 피해가야 한다.

**가정2.** 공동 작업 영역 내에서 모든 무인 항공기는 그림 1과 같이 직선 경로를 따라 각각 일정한 속도로 이동한다. 이 때  $UAV_i$ 는 공동 작업 영역에  $S_i$ 를 통해 진입하여  $G_i$ 로 진출하게 된다.

그림 1과 같이 다수의 무인 항공기가 공동 작업 영역 내에 동시에 진입할 경우 각 무인 항공기의 속도에 따라 충돌이 발생할 수 있다. 이 때 가정에 의해 모든 무인 항공기의 경로 및 속도가 정해져 있기 때문에 다중 무인 항공기 충돌 회피 문제를 공동 작업 영역 진입 시간 조율 문제로 정의할 수 있다. 본 논문에서는 확장 충돌 지도 개념을 이용하여 무인 항공기의 공동 작업 영역 진입 시간을 결정한다.

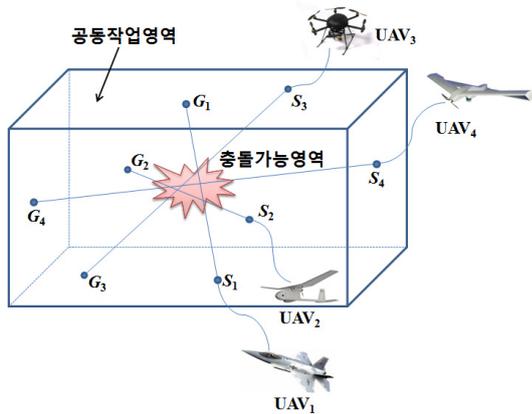


그림 1. 다중 무인 항공기의 협동 작업 문제 정의  
 Fig. 1. Definition of cooperation problem among multiple unmanned aerial vehicles (UAVs).

2. 충돌 지도 기반 무인 항공기 충돌 검출 및 회피

3차원 공간에서 이동하는 무인 항공기는 직선 경로를 따라 이동한다고 해도 경로 상에서 회전이 가능하기 때문에 본 논문에서는 구로 모델링하였다. 반지름이  $R_1$  과  $R_2$ 인 구로 모델링 된 2대의 무인 항공기 UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub>는 그림 2와 같이  $R_{1,2} (=R_1+R_2)$ 를 반지름으로 갖는 하나의 구와 점으로 바뀌어 생각할 수 있다. 이 경우 2장 1절 가정1에 의해 우선순위가 높은 UAV<sub>1</sub>은 UAV<sub>2</sub>와 관계없이 주어진 속도에 따라  $S_1$ 에서  $G_1$ 으로 이동하게 된다. 그리고 우선순위가 낮은 UAV<sub>2</sub>는 UAV<sub>1</sub>의 움직임을 방해하지 않고 충돌을 회피하기 위해 이동하는 UAV<sub>1</sub>의 구 내부에 위치해서는 안 된다. 즉, 시간  $t$ 에서  $P_1(t)$ 에 위치한 UAV<sub>1</sub>의 구 모델 내부에 UAV<sub>2</sub>가 들어가면 충돌이 발생하게 된다. 이렇게 시간  $t$ 에서 충돌이 발생하는 UAV<sub>2</sub>의 경로상의 점들의 집합을 충돌길이  $CL(t)$ 라 정의한다. 다시 말해 시간  $t$ 에서 UAV<sub>2</sub>는  $CL(t)$

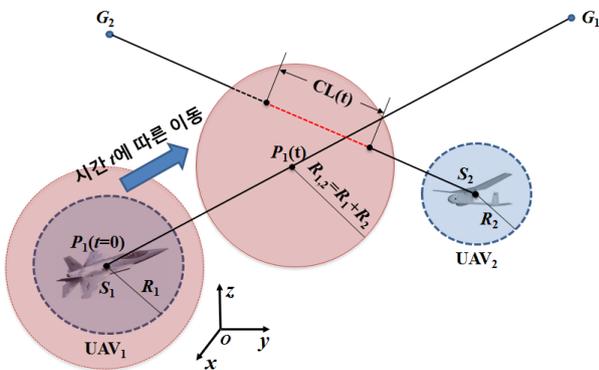


그림 2. 무인 항공기의 구 모델링  
 Fig. 2. Sphere modeling of UAVs.

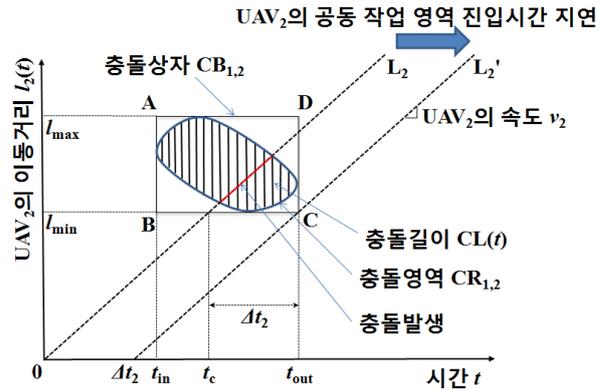


그림 3. UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub> 사이의 충돌 검출 및 회피를 위한 충돌 지도  
 Fig. 3. Collision map for collision detection and avoidance between UAV<sub>1</sub> and UAV<sub>2</sub>.

위를 지나가서는 안 된다.

UAV<sub>1</sub>이  $S_1$ 에서  $G_1$ 까지 이동하는 동안 시간  $t$ 에 따른 UAV<sub>2</sub>의 충돌 길이  $CL(t)$ 를 병합해 그림 3과 같이 UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub> 사이의 충돌영역  $CR_{1,2}$ 를 구할 수 있다. UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub>가 공동 작업 영역에 동시에 진입했다 하면 시간에 따른 UAV<sub>2</sub>의 이동 거리 그래프는  $L_2$ 와 같다. 이 때  $L_2$ 가  $CR_{1,2}$ 를 지나게 되므로 UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub>는 충돌이 발생하게 된다. 본 논문에서는 충돌 검출 시간의 단축을 위해 충돌영역  $CR_{1,2}$ 를 충돌 상자  $CB_{1,2}$ 로 근사화 하였다. 그 결과 충돌 회피를 위해서는  $L_2$ 를  $CB_{1,2}$ 와 교차하지 않도록  $L_2'$ 까지 양의 시간 축 방향으로  $\Delta t_2$ 만큼 평행이동 시키면 된다. 이것은 UAV<sub>2</sub>의 공동 작업 영역 진입 시간을 UAV<sub>1</sub>보다  $\Delta t_2$ 만큼 지연시키는 효과가 있다. 이와 같은 방법을 통해 UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub> 사이의 충돌을 검출하고 회피할 수 있다.

3. 충돌 상자 및 충돌 방지 지연 시간 획득

II장 2절에서 기술한 충돌 상자는  $t_{in}$ ,  $t_{out}$ ,  $l_{min}$ ,  $l_{max}$  값에 의해 정의된다. 이 때  $t_{in}$ 과  $t_{out}$ 은 UAV<sub>1</sub>의 구 모델이 UAV<sub>2</sub>의 경로와 접하는 시간을 의미한다.  $l_{min}$ 과  $l_{max}$ 는 UAV<sub>2</sub>의 경로상에서 UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub>가 충돌이 일어나는 가장 짧은 길이와 가장 긴 길이를 의미한다. 하지만 이 값들을 구하는 문제는 시간에 따라 움직이는 구와 직선 사이의 방정식을 풀어야 하기 때문에 계산적 접근방법을 이용하지 않고 직접 계산하기가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 이 문제를 2차원 공간의 원과 직선 사이의 문제로 축소하여 충돌 상자를 구하는 방법을 제안한다.

앞에서는 UAV<sub>1</sub>의 구가 시간  $t$ 에 따라  $\overrightarrow{S_1 G_1}$  방향으로 이동하며 UAV<sub>2</sub>의 경로  $\overrightarrow{S_2 G_2}$ 와의 충돌 길이를 구하였으나, 지금부터는 정지 상태인 구에 대해  $\overrightarrow{S_2 G_2}$ 가  $\overrightarrow{G_1 S_1}$  방향으로 이동하며 충돌 길이를 구하는 문제로 바꿔 생각하도록 하겠다. 이 때 II장 1절 가정2에 의해 UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub>는 주어진 직선 경로를 일정한 속도로 움직이므로,  $\overrightarrow{G_1 S_1}$  방향으로 이동하는  $\overrightarrow{S_2 G_2}$ 에 의한 구의 절단면은 원이 된다. 따라서 주어진 문제는 원과 직선 사이의 문제로 정의할 수 있다.

먼저 계산의 편의성을 위해  $x$ - $y$ - $z$  좌표계를  $S_1$ 을 원점으로 하는  $x'$ - $y'$ - $z'$  좌표계로 그림 4와 같이 변환한다. 이 때  $y'$ 축은 UAV<sub>1</sub>의 경로 방향인  $\overrightarrow{S_1 G_1}/|\overrightarrow{S_1 G_1}|$ 로 정의하고,  $z'$ 축은  $\overrightarrow{S_1 G_1}$ 과  $\overrightarrow{S_2 G_2}$ 에 동시에 수직인  $\vec{n}$ 으로 정의하였다. 여기서  $\vec{n}$ 은  $\overrightarrow{S_1 G_1}$ 과  $\overrightarrow{S_2 G_2}$ 의 외적을 이용해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\vec{n} = \frac{\overrightarrow{S_1 G_1} \times \overrightarrow{S_2 G_2}}{|\overrightarrow{S_1 G_1} \times \overrightarrow{S_2 G_2}|} \quad (1)$$

$x'$ 축은  $\overrightarrow{S_1 G_1}/|\overrightarrow{S_1 G_1}|$ 과  $\vec{n}$ 의 외적  $\overrightarrow{S_1 G_1}/|\overrightarrow{S_1 G_1}| \times \vec{n}$ 로 정의된다. 따라서  $x$ - $y$ - $z$  좌표계에서  $x'$ - $y'$ - $z'$  좌표계의 변환은 다음의 추이행렬을 통해 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overrightarrow{S_1 G_1}/|\overrightarrow{S_1 G_1}| \times \vec{n} & \overrightarrow{S_1 G_1}/|\overrightarrow{S_1 G_1}| & \vec{n} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에 의한 변환 결과 UAV<sub>2</sub>의 경로  $\overrightarrow{S_2' G_2'}$ 은  $x'$ - $y'$ - $z'$  좌표계에서  $x'$ - $y'$  평면과 평행한 평면상에서  $y'$ 축과 평행하게 이동한다. 이와 같이 이동하는  $\overrightarrow{S_2' G_2'}$ 과 UAV<sub>1</sub>의 구 사이의 교차하는 원도 같은 평면에서 정의되므로  $z'$  축을 생략하고  $x'$ - $y'$  2차원 좌표계에서 나타낼 수 있다. 이 때  $\overrightarrow{S_2' G_2'}$ 과 교차하는 원이 포함된 평면은  $x'$ - $y'$ - $z'$  좌표계에서  $(0,0,1)$ 을 수직 벡터로 하고  $S_2'$ 을 포함하는 평면으로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$z' - z_{s2}' = 0 \quad (3)$$

여기서  $S_2'$ 은  $(x_{s2}', y_{s2}', z_{s2}')$ 이다. 식 (3)의 평면과 원점  $O$  사이의 거리  $l$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l = |z_{s2}'| \quad (4)$$

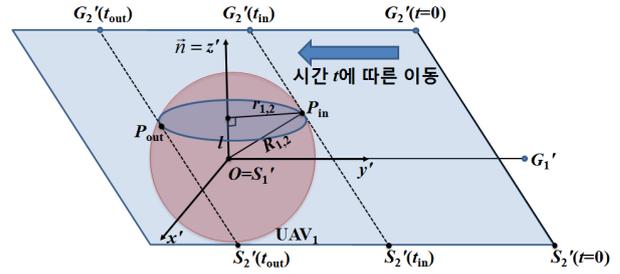


그림 4. 3차원에서 2차원 문제로 축소하기 위한 좌표계 변환

Fig. 4. Coordinate transformation for problem reduction from 3D to 2D.

따라서 교차하는 원의 반지름  $r_{1,2}$ 는 피타고라스 정리에 의해  $\sqrt{R_{1,2}^2 - l^2}$  이 된다. 결과적으로 교차하는 원의 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x'^2 + y'^2 = r_{1,2}^2 \quad (5)$$

여기서 원의  $z'$  값은 상수  $l$ 이다.

교차하는 원과  $\overrightarrow{S_2' G_2'}$ 이 모두 식 (3)의 평면상에서 정의되므로  $z'$ 축을 생략하고 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 이 때 식 (5)의 원과  $\overrightarrow{S_2' G_2'}$ 의 접점을 구하기 위해 먼저 원의 순간기울기와  $\overrightarrow{S_2' G_2'}$ 의 기울기가 같은 점을 다음과 같이 구한다.

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{x'}{y'} = \frac{y_{g2}' - y_{s2}'}{x_{g2}' - x_{s2}'} = a \quad (6)$$

여기서  $G_2'$ 은  $(x_{g2}', y_{g2}')$ 이고  $a$ 는  $\overrightarrow{S_2' G_2'}$ 의 기울기이다. 식(6)과 식 (5)를 연립하여 풀면 접점의 좌표는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{in} = \left( -a \sqrt{\frac{r_{12}^2}{1+a^2}}, \sqrt{\frac{r_{12}^2}{1+a^2}} \right) \quad (7)$$

$$P_{out} = \left( a \sqrt{\frac{r_{12}^2}{1+a^2}}, -\sqrt{\frac{r_{12}^2}{1+a^2}} \right) \quad (8)$$

여기서  $P_{in}$ 은  $y' > 0$ 이고  $P_{out}$ 은  $y' < 0$ 일 때 값이다. UAV<sub>2</sub>의 경로  $\overrightarrow{S_2' G_2'}$ 의 직선 식은  $y'$ 절편을 시간에 대한 함수로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$y' = ax' + b(t) \quad (9)$$

여기서  $b(t)$ 는 UAV<sub>1</sub>의 속도  $v_1$ 에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b(t) = b(0) - v_1 t \quad (10)$$

여기서  $b(0)$ 는  $t=0$ 일 때  $\overline{S_2'G_2'}$ 의  $y'$ 절편이므로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b(0) = y_{s_2'} - ax_{s_2'} \quad (11)$$

따라서  $\overline{S_2'G_2'}$ 이  $P_{in}$ ,  $P_{out}$ 과 접할 때의 시간  $t_{in}$ ,  $t_{out}$ 은 식 (7)-(10)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$t_{in} = \frac{1}{v_1} (y_{s_2'} - ax_{s_2'} - \sqrt{r_{1,2}^2(1+a^2)}) \quad (12)$$

$$t_{out} = \frac{1}{v_1} (y_{s_2'} - ax_{s_2'} + \sqrt{r_{1,2}^2(1+a^2)}) \quad (13)$$

다음으로 충돌이 일어나는 UAV<sub>2</sub>의 경로상 가장 긴 거리  $l_{max}$ 와 가장 짧은 거리  $l_{min}$ 은 그림 5에 보이는 것과 같이  $\overline{S_2'G_2'}$ 가 교차하는 원 위의  $P_{max}(-r_{1,2},0)$ 와  $P_{min}(r_{1,2},0)$ 을 지날 때의 값이다. 이 때  $S_2'(t_{max})$ 와  $S_2'(t_{min})$ 은  $S_2'(0)$ 을 각각 음의  $y'$ 축 방향으로  $b(0)-b(t_{max})$ 와  $b(0)-b(t_{min})$ 만큼 평행 이동한 값이므로  $l_{max}$ 와  $l_{min}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$l_{max} = \frac{\|s_2'(t_{max}) - P_{max}\|}{\sin \theta} = \frac{\sqrt{(x_{s_2'} + r_{1,2})^2 + (y_{s_2'} - b(0) + ar_{1,2})^2}}{\sin \theta} \quad (14)$$

$$l_{min} = \frac{\|s_2'(t_{min}) - P_{min}\|}{\sin \theta} = \frac{\sqrt{(x_{s_2'} - r_{1,2})^2 + (y_{s_2'} - b(0) - ar_{1,2})^2}}{\sin \theta} \quad (15)$$

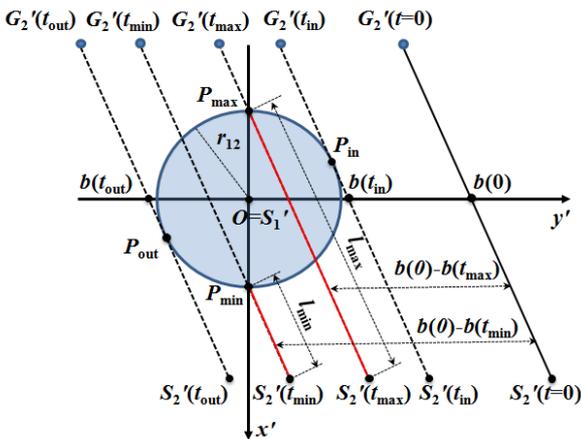


그림 5. UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub>사이의 충돌상자 CB<sub>1,2</sub>의 파라미터  $t_{in}$ ,  $t_{out}$ ,  $l_{min}$ ,  $l_{max}$  계산

Fig. 5. Computation of parameters  $t_{in}$ ,  $t_{out}$ ,  $l_{min}$ , and  $l_{max}$  of collision box CB<sub>1,2</sub> between UAV<sub>1</sub> and UAV<sub>2</sub>.

식 (12)-(15)로부터 UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub> 사이의 충돌상자 CB<sub>1,2</sub>를 정의할 수 있다.

다음으로 충돌상자 CB<sub>1,2</sub>로부터 UAV<sub>1</sub>과 UAV<sub>2</sub>의 충돌회피를 위해 그림 3과 같이 UAV<sub>2</sub>의 공동 작업 영역 진입 지연 시간  $\Delta t_2$ 를 구해야 한다. 이 때 UAV<sub>2</sub>는 공동 작업 영역 내에서  $v_2$ 의 속도로 움직이므로 UAV<sub>2</sub>의 시간-거리 그래프  $L_2$ 는  $l_2(t)=v_2t$ 와 같이 원점을 지나는 1차 직선으로 정의할 수 있다.  $L_2$ 와 CB<sub>1,2</sub>가 만나는 경우는 Case1:  $L_2$ 가 선분  $\overline{AB}$ 를 지나는 경우와 Case2:  $L_2$ 가 선분  $\overline{BC}$ 를 지나는 경우이다. Case1의 조건은  $l_{min} \leq l_2(t_{in}) \leq l_{max}$ 이며, Case2의 조건은  $L_2$ 와 선분  $\overline{BC}$ 에 평행한 직선  $l=l_{min}$ 과의 교점에서의 시간  $t_c=l_{min}/v_2$ 가 개구간  $(t_{in}, t_{out})$ 에 포함될 경우이다. 이 두 경우를 제외하고  $L_2$ 와 CB<sub>1,2</sub>가 만나지 않는다. 따라서 UAV<sub>2</sub>의 지연 시간  $\Delta t_2$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta t_2 = \begin{cases} t_{out} - t_c, & \text{Case1 or Case2} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

식 (16)에 의해 UAV<sub>1</sub>과의 충돌회피를 위한 UAV<sub>2</sub>의 시간-거리 그래프  $L_2'$ 은  $\Delta t_2$ 만큼 지연된  $l_2'(t)=v_2(t-\Delta t_2)$ 가 된다.

두 대의 무인 항공기의 충돌 회피를 위한 공동 작업 영역 진입 지연 시간 계산을 반복적으로 적용함으로써 다중 무인 비행체의 충돌 회피에 적용할 수 있다. 예를 들어 우선순위가  $i$ 번째인 무인 항공기 UAV <sub>$i$</sub> 와 이보다 우선순위가 높은  $i-1$ 대의 무인 항공기 사이의 충돌 상자는 그림 6과 같이 표시할 수 있다. 이 경우 UAV <sub>$i$</sub> 와 충돌 위험이 있는 무인 항공기는 UAV<sub>1</sub>, UAV<sub>3</sub>, UAV<sub>5</sub>

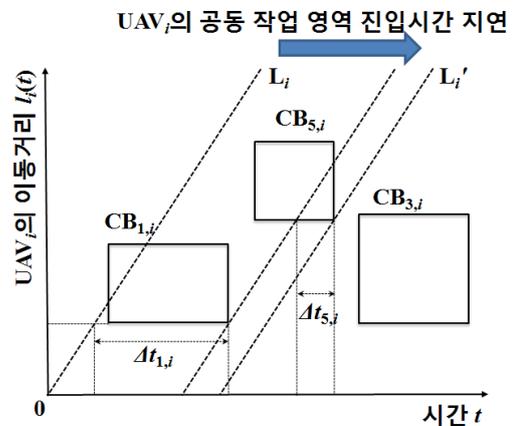


그림 6. UAV <sub>$i$</sub> 의 충돌 회피를 위한 진입 시간 지연  
Fig. 6. Entrance time delay for collision avoidance of UAV <sub>$i$</sub> .

이다. UAV<sub>i</sub>가 시간 지연 없이 공동 작업 영역에 진입할 경우 UAV<sub>1</sub>과 충돌이 발생하므로 Δt<sub>1,i</sub>만큼 진입 시간을 지연시킨다. 하지만 이 경우 UAV<sub>1</sub>과의 충돌은 회피할 수 있지만 UAV<sub>5</sub>와의 충돌이 발생하게 되므로 Δt<sub>5,i</sub>만큼 진입 시간을 다시 지연시킨다. 그 결과 L<sub>i</sub>'은 어떤 충돌 상자와도 만나지 않게 되고 이는 UAV<sub>i</sub>가 자신보다 우선순위가 높은 모든 무인 항공기와 충돌하지 않는 것을 의미한다. 이 경우 UAV<sub>i</sub>의 최종 진입 지연 시간 Δt<sub>i</sub>는 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\Delta t_i = \Delta t_{1,i} + \Delta t_{5,i} \tag{17}$$

UAV<sub>1</sub>은 최우선순위를 가지므로 진입 시간을 지연시킬 필요가 없으며 UAV<sub>2</sub>에서 UAV<sub>N</sub>까지 순차적으로 진입 지연 시간을 계산해 적용함으로써 모든 무인 항공기 간의 충돌을 회피할 수 있다.

### III. 모의실험 및 토의사항

3차원 공동 작업 영역에서의 다중 무인 항공기의 협동 작업을 위해 본 논문에서 제안된 무 충돌 비행 기법을 검증하기 위해 12대의 무인 항공기에 대한 모의실험을 그림 7과 같이 수행하였다.

여기서  $i=1,2,\dots,12$ 에 대해 S<sub>i</sub>, G<sub>i</sub>는 i번째 무인 항공기의 진입점과 진출점을 의미한다. 12대의 무인 항공기의 속도, 반지름, 진입점, 진출점은 표 1과 같이 정의하였다.

모든 무인 항공기가 공동 작업 영역에 동시에 진입할 경우 각 무인 항공기 간 상대 거리는 그림 8과 같다. 이 중 붉은 실선은 상대거리가 음수가 되는 부분이 발생하

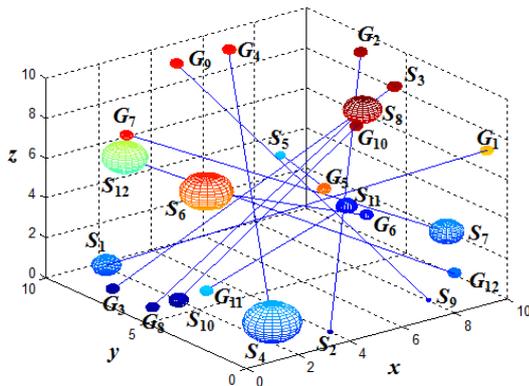


그림 7. 무인 항공기 12대 사이의 충돌 회피 모의실험을 위한 환경 설정

Fig. 7. Simulation setup for collision avoidance among 12 UAVs.

표 1. 12대의 무인 항공기의 속도 v<sub>i</sub>, 반지름 R<sub>i</sub>, 진입점 S<sub>i</sub>, 진출점 G<sub>i</sub>, 반지름 R<sub>i</sub>

Table 1. Velocity v<sub>i</sub>, radius R<sub>i</sub>, entrance point S<sub>i</sub>, and leaving point G<sub>i</sub>, of 12 UAVs.

	v <sub>i</sub>	R <sub>i</sub>	S <sub>i</sub>	G <sub>i</sub>
UAV <sub>1</sub>	0.5	0.45	(0,7,2)	(10,1,7)
UAV <sub>2</sub>	0.7	0.08	(4,1,0)	(9,6,10)
UAV <sub>3</sub>	0.3	0.22	(8,3,10)	(1,8,0)
UAV <sub>4</sub>	0.1	0.91	(1,0,2)	(7,10,9)
UAV <sub>5</sub>	0.8	0.15	(9,10,3)	(3,0,8)
UAV <sub>6</sub>	1.2	0.82	(0,2,8)	(10,7,1)
UAV <sub>7</sub>	0.6	0.53	(10,3,2)	(0,6,9)
UAV <sub>8</sub>	0.3	0.59	(6,2,10)	(1,6,0)
UAV <sub>9</sub>	0.3	0.07	(7,0,1)	(5,10,9)
UAV <sub>10</sub>	0.7	0.30	(2,6,0)	(5,1,10)
UAV <sub>11</sub>	0.4	0.32	(10,8,1)	(0,2,3)
UAV <sub>12</sub>	0.2	0.70	(3,10,5)	(8,0,2)

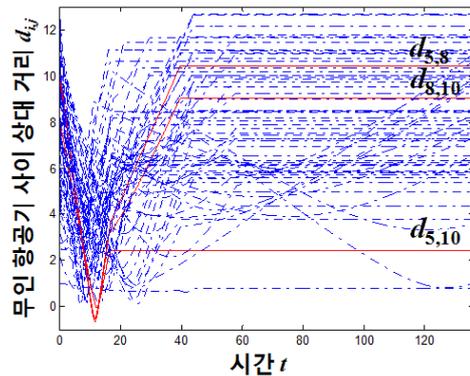


그림 8. 무인 항공기가 공동 작업 영역에 동시 진입할 때 서로간의 상대 거리 d<sub>ij</sub>.

Fig. 8. Relative distance d<sub>ij</sub> between UAV<sub>i</sub> and UAV<sub>j</sub> when all UAVs come into the common workspace.

는 경우로 충돌이 발생하는 것을 의미한다. 여기서는 UAV<sub>5</sub>와 UAV<sub>8</sub>, UAV<sub>5</sub>와 UAV<sub>10</sub>, UAV<sub>8</sub>과 UAV<sub>10</sub>이 서로 충돌함을 의미한다.

이 경우 UAV<sub>1</sub>에서 UAV<sub>7</sub>까지는 서로 충돌 없이 이동이 가능하므로 진입 시간 조율이 필요 없다. 그러나 UAV<sub>5</sub>와 충돌하는 UAV<sub>8</sub>의 경우 진입 지연 시간을 조율해야 한다. 이를 위해 그림 9 (a)와 같이 UAV<sub>8</sub>보다 우선순위가 높은 무인 항공기와의 충돌 상자를 구한다. 진입 시간 조율을 하기전의 L<sub>8</sub>은 CB<sub>5,8</sub>을 지나므로 UAV<sub>5</sub>와 충돌함을 알 수 있다. 그러나 L<sub>8</sub>'과 같이 1.1369초 진입 시간을 지연한 후에는 충돌을 회피하게 된다. 이렇게 진입 시간이 지연된 UAV<sub>8</sub>과 이후의 우선순위를 갖는 무인 항공기의 충돌 상자는 지연된 진입

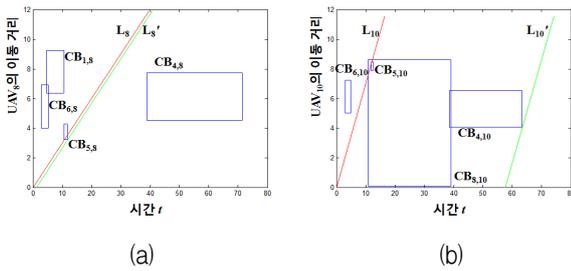


그림 9. UAV<sub>8</sub>과 UAV<sub>10</sub>의 진입 시간 조율.  
Fig. 9. Entrance time scheduling of UAV<sub>8</sub> and UAV<sub>10</sub>.

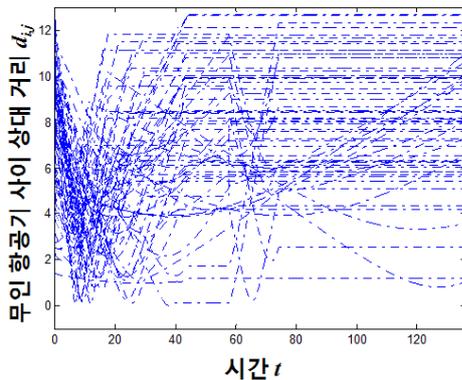


그림 10. 진입 시간 조율 후 무인 항공기 간의 상대 거리.  
Fig. 10. Relative distance between each two UAVs after applying entrance time scheduling.

시간만큼 시간 축 방향으로 평행이동하게 된다. 다음으로 충돌이 발생하는 UAV<sub>10</sub>에 대한 충돌 상자는 그림 9 (b)에 나타나 있다. 초기 상태에서 UAV<sub>10</sub>은 UAV<sub>5</sub>, UAV<sub>8</sub>과 충돌함을 알 수 있다. 충돌 회피를 위해 57.6초 진입 시간을 지연한 결과 L<sub>10</sub>'은 충돌상자와 교차하지 않음을 알 수 있다. 나머지 무인 항공기는 충돌이 발생하지 않아 진입 시간 조율이 필요 없었다. 시간 지연 조율 결과 무인 항공기 사이의 거리는 그림 10과 같이 모두 양수가 되어 충돌 발생 없이 공동 작업 영역을 통과하는 것을 확인 할 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 확장 충돌 지도 개념을 3차원 무인 항공기의 협동 작업에 확장하여 공동 작업 영역에서 충돌 없이 정찰, 탐사 등의 작업을 할 수 있는 기법을 제안하였다. 기존의 반복적 계산 방법에 의한 충돌 상자 계산을 기하학적 변환을 통해 수학적으로 직접 계산하였다. 즉, 시간에 따라 움직이는 3차원 구와 구 사이의 충돌

문제를 고정 원과 움직이는 직선 사이의 충돌 문제로 정의하여 문제를 해결하였다. 제안한 기법의 효율성을 증명하기 위해 12대의 무인 항공기에 대한 모의실험을 수행한 결과 모든 무인 항공기의 충돌을 회피할 수 있는 진입 지연 시간을 구할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 방법은 무인 항공기뿐만 아니라 공동 작업 영역에서 작업하는 무인 잠수정 등에도 활용 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P. B. Sujit, R. Beard, "Cooperative path planning for multiple UAVs exploring and Unknown Region," in Proc. of American Control Conference, pp.347-352, New York City, USA, July 2007.
- [2] H. Peng, F. Su, Y. Bu, G. Zhang, L. Shen, "Cooperative area search for multiple UAVs based on RRT and decentralized receding horizon optimization," in Proc. of Asian Control Conference, pp.298-303, Hong Kong, China, August 2009.
- [3] 이종호, 김동원 "퍼지시스템과 포텐셜 필드를 이용한 다중 이동로봇의 충돌회피 최적경로 연구," 전자공학회 논문지, 제47권 IE편, 제2호, 66-72쪽, 2010년 6월
- [4] 한수철, 방효충, "비례항법을 이용한 무인 항공기의 최적 충돌 회피 기동," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제10권 제11호, 1065-1070쪽, 2004년 11월
- [5] J. W. Park, H. D. Oh, M. J. Tahk, "UAV collision avoidance based on geometric approach," in Proc. of SICE Annual Conference, pp.2122-2126, Japan, August 2008.
- [6] B. H. Lee, C. S. G. Lee, "Collision-free motion planning of two robots," IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol.17, No.2, pp.21-32, January 1987.
- [7] S. H. Ji, J. S. Choi, B. H. Lee, "A computational interactive approach to multi-agent motion planning," International Journal of Control, Automation, and Systems, Vol.5, No.3, pp.295-306, June 2007.

---

 저 자 소 개
 

---



박 재 병(정회원)-교신저자

2000년 성균관대학교 전기·전자  
및 컴퓨터공학부 학사  
졸업.

2002년 서울대학교 전기·컴퓨터  
공학부 석사 졸업.

2006년 서울대학교 전기·컴퓨터  
공학부 박사 졸업.

2006년~2007년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부  
BK21 박사후연구원.

2007년~현재 전북대학교 전자공학부 조교수.

<주관심분야 : 다중 로봇 제어, 이동 로봇 제어,  
원격 로봇 제어, 로봇 비전>