

# 도킹-포메이션을 이용한 쿼드로터 무인기의 창문 통과 알고리즘

\*권지욱, \*\*김우현, \*\*김진효, \*\*서지원

\*연세대학교 글로벌융합기술원, \*\*연세대학교 글로벌융합공학부, 글로벌융합기술원  
e-mail : bluemichael, crimy00, jinhyo.kim, and jiwon.seo@yonsei.ac.kr

## Docking-Formation-Based Quadrotor UAV Flight Passing Through a Window

\*Ji-Wook Kwon, \*\*Woohyun Kim, \*\*Jin Hyo Kim, \*\*Jiwon Seo  
\*Yonsei Institute of Convergence Technology,  
\*\*School of Integrated Technology, Yonsei University, and Yonsei  
Institute of Convergence Technology

### Abstract

This paper proposes a docking-formation algorithm for the quadrotor UAV flight passing through a window. The docking-formation generates the desired waypoints passing through the window with respect to the position and orientation of the window. In addition, the UAV tracks the generated waypoints using a back-stepping-like feedback linearization control algorithm.

### I. 서론

최근 드론 시스템을 정찰, 배달, 방송, 오락, 농축산 등의 다양한 분야에 적용함에 따라 멀티콥터 무인기에 대한 관심이 폭발적으로 증대되었다 [1]. 이에 따라, 관련된 멀티콥터 무인기의 제어와 동작들에 대한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. [2-4]. 특히, 멀티콥터 무인기를 실제 application에 적용하기 위해 사용되는 다양한 동작들 중에 창문 통과 동작은 무인기의 충돌회피와 실내 진입을 위해 꼭 연구되어야 하는 동작으로 관심을 받고 있다. [1]

UPenn의 V. Kumar 그룹에서는 쿼드로터 무인기를 이용한 기동성이 높은 다양한 동작들을 선보였으며 [5.] 이 중에서 창문통과에 대한 연구 결과를 보여주었다 [1]. [1]에서는 기동성이 높은 쿼드로터 무인기의 장점을 살려 다양한 창문통과 결과들을 보여주었으나 추가적인 무인기 경로생성이 필요하다. 이 외에 창문통과 동작에 대한 수요가 많음에도 불구하고, 높은 난이도와 안정성을 요구에 따라 연구결과가 거의 없다.

따라서, 본 논문에서는 도킹-포메이션을 이용한 쿼드로터 무인기의 창문통과 알고리즘을 제안한다. 도킹-포메이션은 [6]에서 이동로봇의 정지 및 이동 플랫폼으로의 동시 도킹을 위하여 제안되었으며, [7]에서는 무인 자동차의 자율주차에 사용되었다. 본 논문에서는 도킹-포메이션을 3차원 환경에서 구성하고 이를 이용하여 추가적인 무인기의 경로생성 없이 창문통과 동작을 구현한다. 창문통과 동작에 도킹-포메이션을 적용함으로써 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다. a) 창문으로 접근하는 추가적인 경로생성이 필요 없다. b) 창문을 통과하기 위한 진입각으로 무인기가 진입하기 위한 추가적인 제어기법을 사용하지 않는다. c) 무인기 제어는 창문의 위치와 진입각을 고려하지 않고 오로지 도킹-포메이션에 의해 생성되는 목표위치만을 따라 이동한다.

## II. 본론

### 2.1 쿼드로터 무인기 모델

쿼드로터 무인기의 제어법칙을 설계하기 위하여 본 논문에서는 [4]에서 사용된 쿼드로터 무인기 모델을 적용한다. 그림 1에서 쿼드로터 무인기 모델을 보여준다.

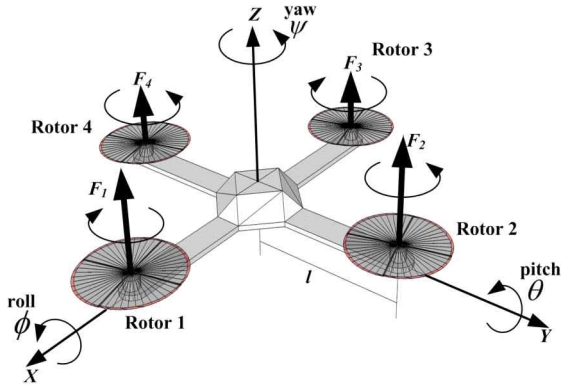


그림 1. 쿼드로터 무인기 모델

그림 1의 쿼드로터 무인기를 간략화된 기구학 모델로 표현하면 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\ddot{x} = u_1 \sin \theta, \quad (1a)$$

$$\ddot{y} = -u_1 \sin \phi, \quad (1b)$$

$$\ddot{z} = u_1 \cos \phi \cos \theta - g, \quad (1c)$$

$$\ddot{\phi} = u_2 l, \quad (1d)$$

$$\ddot{\theta} = u_3 l, \quad (1e)$$

$$\ddot{\psi} = u_4. \quad (1f)$$

여기서,  $(x, y, z)$ 는 쿼드로터 무인기의 위치,  $\phi, \theta, \psi$ 는 각각 롤, 피치, 요 자세각,  $g$ 는 중력가속도, 각각  $u_1 - u_4$ 는  $Z, \phi, \theta, \psi$  방향들에 대한 제어입력들을 나타내고,  $l$ 은 쿼드로터 무인기의 무게중심과 로터까지의 거리를 의미한다. 이때 그림 1의  $\psi$ 를 항상 0으로 수렴됨을 가정하였다. 이로부터, 각 로터에서 발생하는 힘  $F_1 - F_4$ 와 제어입력  $u_1 - u_4$ 은 다음과 같이 변환 가능하다.

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ 0 & \frac{1}{J_1} & 0 & -\frac{1}{J_1} \\ -\frac{1}{J_2} & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 \\ \frac{\rho}{J_3} & -\frac{\rho}{J_3} & \frac{\rho}{J_3} & -\frac{\rho}{J_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $m$ 은 쿼드로터 무인기의 무게,  $J_1 - J_3$ 는  $\phi, \theta, \psi$  방향들에 대한 이너서 모멘트(moment of inertia)

를 의미한다.

식 1과 2을 통하여 알 수 있듯이, 쿼드로터 무인기의 위치 이동을 위해서는  $\phi, \theta, \psi$  값을 제어해야 함을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 특성을 바탕으로 [6-8]에서 제안된 유사 역보행 궤환선형화 제어기법을 간략화 하여 쿼드로터 무인기를 제어한다.

### 2.2 쿼드로터 무인기 제어

서론에서 언급한 것과 같이 창문통과 동작에 도킹-포메이션을 적용하였을 때 무인기의 제어법칙은 목표 위치 만을 추종하는 동작만을 수행한다. 즉, 창문으로의 진입각이나 위치를 제어기 설계 시 고려하지 않아도 된다. 따라서 본 절에서는 목표점 추종 제어기법을 설계한다.

쿼드로터 무인기의 목표점 추종 제어기 설계를 위하여 다음의 위치추종 오차를 정의한다.

$$e_x = x_d - x, \quad e_y = y_d - y, \quad e_z = z_d - z. \quad (3)$$

여기서,  $(x_d, y_d, z_d)$ 는 목표점의 위치이고 (3)의 시미분은 다음과 같다.

$$\dot{e}_x = \dot{x}_d - \dot{x}, \quad \dot{e}_y = \dot{y}_d - \dot{y}, \quad \dot{e}_z = \dot{z}_d - \dot{z}. \quad (4)$$

(3)과 (4)의 위치 추종 오차를 0으로 수렴시키기 위하여 쿼드로터 무인기의 속도가 다음과 같이 되도록 설계한다.

$$\begin{aligned} p_x &= \dot{x}_d + k_x e_x, \\ p_y &= \dot{y}_d + k_y e_y, \\ p_z &= \dot{z}_d + k_z e_z. \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,  $p_x, p_y, p_z$ 는 각각  $x, y, z$  방향으로의 목표 속도 값이고,  $k_x, k_y, k_z > 0$ 는 상수이다. (1)의 기구학 모델로부터 (5)를 구현하기 위하여  $u_1 - u_4$ 는 다음과 같이 PD 제어기로 설계된다.

$$\begin{aligned} u_1 &= k_p \epsilon_x + k_d \dot{\epsilon}_x, \\ u_2 &= k_p \epsilon_y + k_d \dot{\epsilon}_y, \\ u_3 &= k_p \epsilon_z + k_d \dot{\epsilon}_z. \end{aligned} \quad (6)$$

여기서,  $k_p$ 와  $k_d$ 는 0보다 큰 상수이며,  $\epsilon_x = p_x - \dot{x}$ ,  $\epsilon_y = p_y - \dot{y}$ ,  $\epsilon_z = p_z - \dot{z}$ 이다. 앞서 언급한 것과 같이,  $u_4$ 는 요 자세각을 제어하기 위한 제어기로 설계된다. 이때, 주의해야 할 것은  $u_1 - u_4$ 가  $\phi, \theta, \psi$ 를 제어하는 입력으로 사용되기 때문에 위치 이동시 무인기의 자세 제어에 영향을 줄 수 있다. 따라서, (6)은 다음과 같이 입력 제한을 고려한 형태로 변환 가능하다.

$$\begin{aligned} u_1 &= k_p \tanh(\epsilon_x/k_p) + k_d \tanh(\dot{\epsilon}_x/k_d), \\ u_2 &= k_p \tanh(\epsilon_y/k_p) + k_d \tanh(\dot{\epsilon}_y/k_d), \\ u_3 &= k_p \tanh(\epsilon_z/k_p) + k_d \tanh(\dot{\epsilon}_z/k_d) \end{aligned} \quad (7)$$

### 2.3 도킹-포메이션 생성

본 절에서는 쿼드콥터 무인기의 창문통과 동작을 위한 도킹-포메이션을 제안한다. 그림 2에 3차원 공간에서의 창문통과를 위한 도킹-포메이션이 나타나 있다.

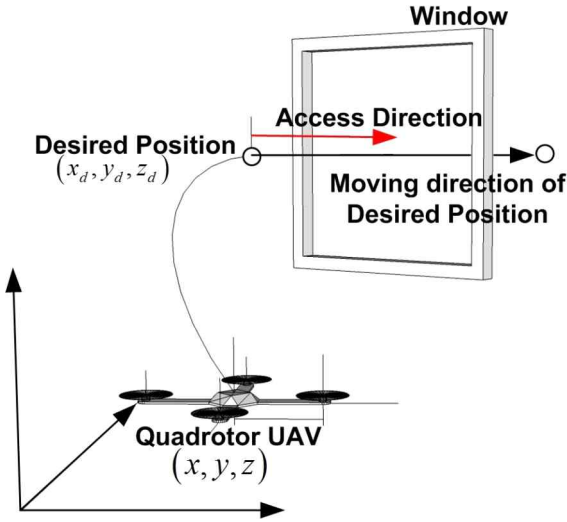


그림 2. 창문통과를 위한 도킹-포메이션 개괄도

그림 2에서 볼 수 있듯이, 창문과 수직인 방향으로 목표 진입각을 생성하고 이를 유지하면서 창문의 중앙을 통과할 수 있는 도킹-포메이션을 생성한다. [6, 7]에서 제안된 2차원의 도킹-포메이션을 바탕으로 그림 3과 같은 3차원의 도킹 포메이션을 생성한다.

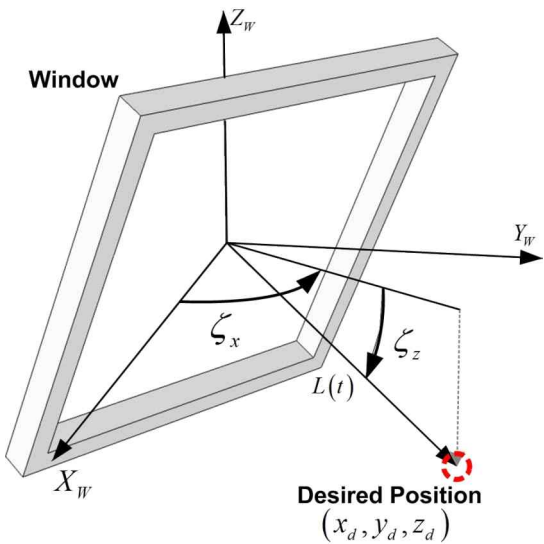


그림 3. 3차원 공간에서의 창문통과를 위한 도킹-포메이션

그림 3에서  $(X_w, Y_w, Z_w)$ 는 글로벌 좌표계를 의미하고 이를 기준으로  $\zeta_x$  와  $\zeta_z$ 는 각각  $x-y$ 평면과 수직인 방

향으로의 각도위치를 나타낸다. 그림 3에서  $L(t)$ 는 초기값  $L(0)$ 에서 최종값  $L_f$ 로 변화하는 함수이다. 그림 3으로부터 다음의 목표위치를 정할 수 있다.

$$\begin{cases} x_d = x_w + L(t)\cos\zeta_z\cos\zeta_x \\ y_d = y_w + L(t)\cos\zeta_z\sin\zeta_x \\ z_d = z_w + L(t)\sin\zeta_z \end{cases}$$

여기서,  $(x_w, y_w, z_w)$ 는 창문의 중심 위치이고, 본 논문에서  $\dot{L}(t)$ 은 상수로 고려한다.

### III. 모의실험 결과

본 논문에서 제안하는 도킹-포메이션 기반의 창문통과 알고리즘을 검증하기 위하여 다음의 시나리오를 적용한다.

$$\begin{aligned} (x(0), y(0), z(0)) &= (0(m), 0(m), 0(m)), \\ (x_w, y_w, z_w) &= (3(m), 3(m), 3(m)), \\ \zeta_x &= \pi \text{ (rad)}, \zeta_z = 0 \text{ (rad)}, \\ \dot{L}(t) &= -0.15 \text{ (m/s)}, L(0) = 2(m). \end{aligned}$$

여기서,  $L(t)$ 는 쿼드콥터 무인기와 목표점 사이의 거리가 0.3m가 되었을 때부터 줄어들기 시작하도록 설정하였다.

주어진 시나리오의 쿼드콥터 무인기에 본 논문에서 제안하는 도킹-포메이션 기반의 창문통과 알고리즘을 적용한 결과가 그림 4에 나타나 있다.

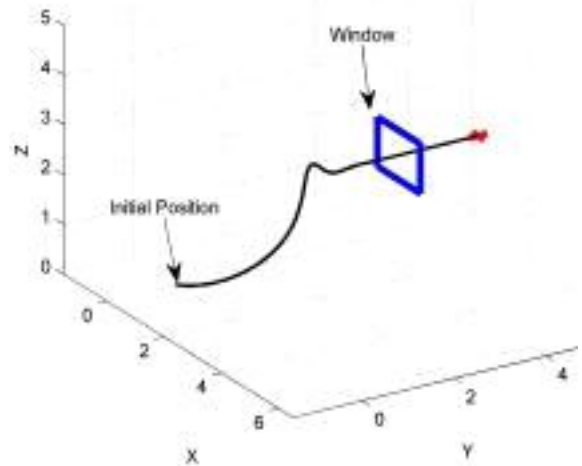
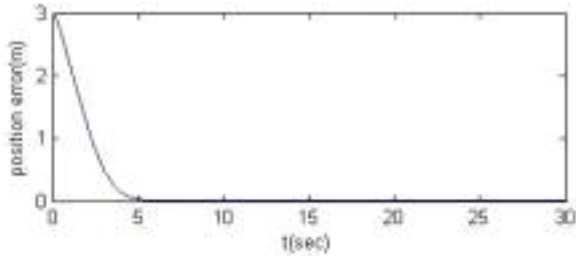
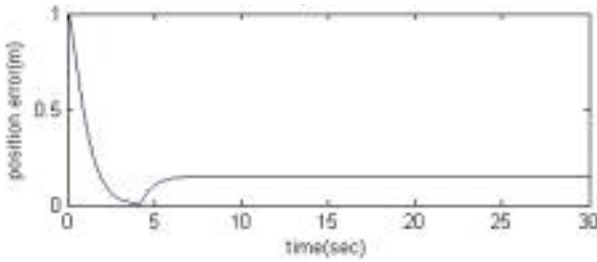


그림 4. 모의실험 결과

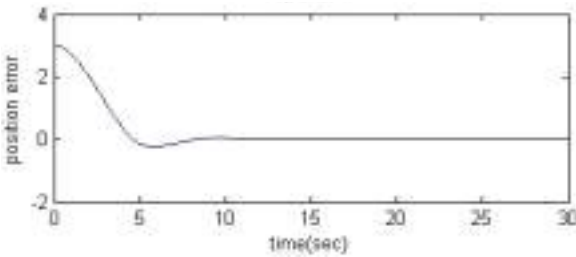
그림 4를 통하여 쿼드콥터 무인기는 초기위치를 출발하여 도킹-포메이션에 의하여 생성된 목표위치에 도달한 후 변화하는  $L(t)$ 에 의하여 창문을 통과하는 것을 볼 수 있다. 그림 4의 쿼드콥터 무인기의 상세한 거리 오차 정보는 그림 5에 나타나 있다.



(a) x 거리 오차



(b) y 거리 오차



(c) z 거리 오차

그림 5. 거리 오차

그림 5에서 볼 수 있듯이 쿼드콥터 무인기는 식 (5)와 (6)의 제어 알고리즘에 의하여 도킹-포메이션을 통하여 생성된 목표점을 충분히 추적하고 있음을 알 수 있다.

그림 4와 5를 통하여, 본 논문에서 제안하는 3차원 공간에서의 도킹-포메이션을 이용하여 쿼드콥터 무인기가 창문의 진입각을 유지하면서 통과할 수 있음을 확인하였고, 이를 구현하기 위한 유사 역보행 궤환선형화 기법을 적용 가능함을 알 수 있다.

#### IV. 결론

본 논문은 도킹-포메이션 기반의 쿼드콥터 무인기의 창문통과 알고리즘을 제안하고, 이를 모의실험을 통하여 그 유효성과 성능을 검증하였다. 도킹-포메이션을 통하여 창문으로의 진입각과 위치를 3차원 공간에서 표현할 수 있고, 유사 역보행 궤환선형화 제어기법을 적용함으로써 무인기를 제어하는데 창문의 상태정보를 제외한 위치 추종 제어기만으로 창문통과가 가능함을 확인하였다.

#### 사 사

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT명품인재양성사업의 연구결과로 수행되었음" (NIPA-2014-H0201-14-1002)

#### 참고문헌

- [1] 이경수, 전용국, 손영주, 이해영, "하늘을 지배하는 소형 무인 항공기 드론," 국방과 기술, 제 425호, pp. 76-85, 2014.
- [2] D. Mellinger, N. Michael, and V. Kumar, "Trajectory generation and control for precise aggressive maneuvers with quadrotors," The Intern. Jour. of Robo. Res., vol. 53, no. 5, pp. 664-674, 2012.
- [3] 김유단, 김현진, "영상정보를 이용한 무인항공기 자동이착륙 유도제어 시스템 설계," 제어로봇시스템 학회지, 제 14권, 4호, pp. 28-41, 2008.
- [4] D. Lee, H. Kim, S. Sastry, Feedback linearization vs. adaptive sliding mode control for a quadrotor helicopter," Inter. Jour. of Cont., Autom., and Syst., vol. 7, no. 3, pp. 419-428, 2009.
- [5] <https://youtu.be/MvRTALJp8DM>.
- [6] J.-W. Kwon and J. Seo, "Docking control of both stationary and moving stations based on docking formation," Elect. Letters, vol. 50, no. 6, pp. 426-438, 2014.
- [7] 권지욱, 김진효, 서지원, "도킹 포메이션을 이용한 차량형 이동 로봇의 자율 주차," 대한전자공학회논문지, vol. 51, no. 10, 2014.
- [8] D. Chwa, "Tracking control of differential-drive wheeled mobile robot using a backstepping-like feedback linearization," IEEE Trans. on Syst. Man Cybern., Part A. vol. 40, no. 6, pp. 1285-1295.