3개 작동기를 갖는 로터의 콜렉티브 우선 제어기설계

Design of Collective Priority Controller on the rotor system with 3 actuators.

강영신*, 유창선, 이명규, 구삼옥(한국항공우주연구원)

1. 서론

스마트 무인기 기술개발사업은 산업자원부의 '21세기 프론티어 연구개발 사업'의 일환으로서 수직이착륙과 고속비행을 수행할 수 있도록 틸트로터 형상으로 개발되고 있다. 틸트로터 형상은 수직이착륙이 가능한 회전익모드와 고속비행이 가능한 고정익모드의 장점을 모두 갖고 있으며, 이들 두 가지 비행모드를 효율적으로 운용하기위해 보편적인 회전익기 로터시스템인 관절형이나 무힌지 허브시스템 대신 짐발 형태를 사용하게 된다.[1]

스마트무인기의 틸트로터 시스템은 120° 간격으로 분리된 3개의 작동기에 의해 스와시판을 제어하도록 그림 1과 같이 설계되었다.[1][2]

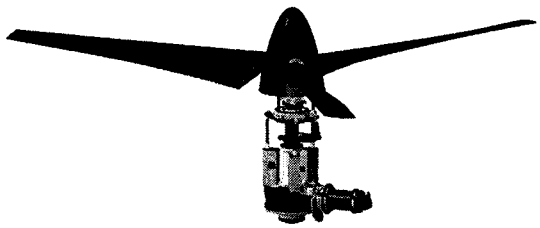

그림 1 스마트 무인기의 로터시스템

그림 1에 도시된 세 개의 작동기는 세로축 및 가로축 싸이클릭 변위와 콜렉티브 변위를 동시에 수행해야 한다. 로터의 작동범위가 충분한 경우에는 싸이클릭 변위와 콜렉티브 변위의 크기에 관계없이 모든 명령을 수행가능하지만, 작동기의 변위제한에 가까울수록 콜렉티브 변위가 우선권을 갖도록 제어기의 설계가 요구되었다.

본 논문에서는 기계적인 시스템을 수치적으로 모델링 하기위해서 로터 작동기의 변위제한 근처에서 콜렉티브 명령이 우선권을 갖도록 싸이클릭 변위를 감소시키는 알고리듬에 대해 고찰하고 그 결과를 기술하였다.

2. 로터 작동기의 모델링

로터 조종시스템은 그림 2와 같이 3개의 작동기를 구동하여 비회전 스와시판을 움직이면 내부의 Spherical Plain Bearing 과 Ball Roller Bearing을 통해 회전 스와시판이 구동된다. 회전 스와시판은 세 개의 피치 Link와 연결되어 있어 블레이드의 피치를 조절할 수 있다.[2][3]

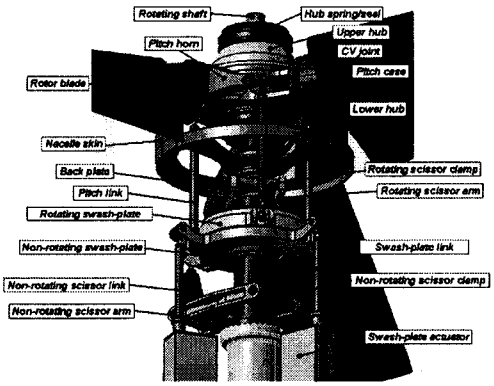

그림 2 로터 시스템의 세부형상

로터 작동기의 모델링을 위해서 비행제어명령은 싸이클릭과 콜렉티브 피치각을 제공하도록 그림 3과 같이 설계하였다. 실제로 항공기를 제어하기위해서는 이들 싸이클릭과 콜렉티브 피치각을 3개의 작동기의 선형변위명령으로 변환해서 제어해야 하며, 변환된 3 개의 작동기 변위가 각각 주어진 싸이클릭과 콜렉티브각을 제대로 만들어 내는지에 대한 검증이 필요하다.

2.1. 로터 작동기 Mixer 의 모델링

그림 3의 로터 작동기 Mixer의 설계를 위한 부호규약은 아래 표1과 같다.

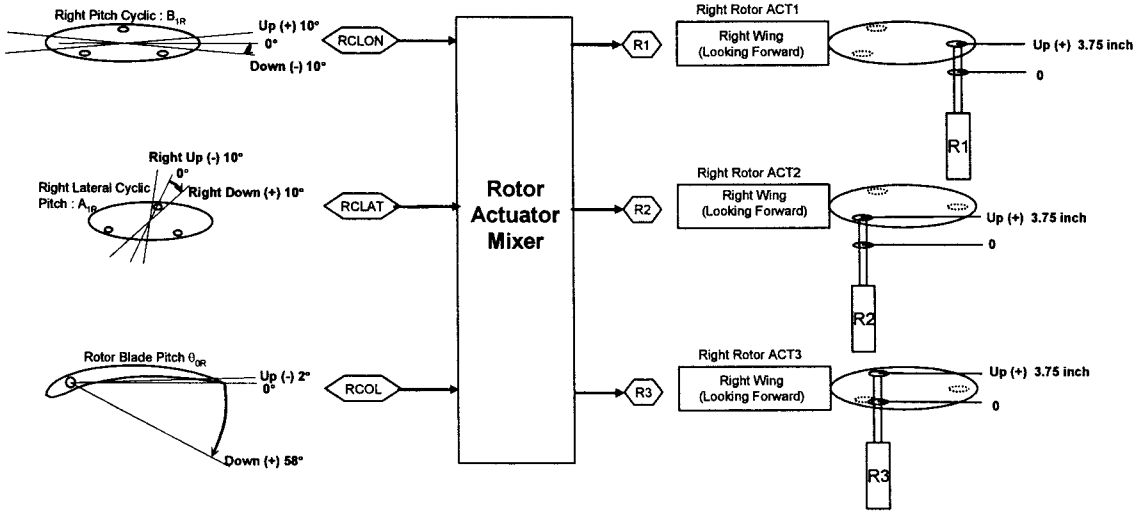

그림 3 우측 로터의 싸이클릭/콜렉티브 명령에 대한 작동기의 Mixer 구조

표 1 로터의 부호규약

로터제어 명령	(+)변위	작동제한
세로축 싸이클릭	앞쪽 Down	-10°~10°
가로축 싸이클릭	우측 Down	-10°~10°
콜렉티브 피치	뒤쪽 Down	-2°~58°
작동기 선형변위	Extension	0~3.75 in

가로축 싸이클릭 변위와 우측 로터 작동기 (R1,R2,R3) 변위관계를 그림 4에 도시하였고, 세로축 싸이클릭을 그림 5에 도시하였다. 참고로 그림 5에 도시된 세로축 싸이클릭 변위에서는 R1작동기의 변위가 요구되지 않는다.

그림 4와 그림 5의 관계에서 싸이클릭 변위와 작동기의 변위는 대체적으로 선형적인 관계를 가짐을 알 수 있다. 선형화시 가장 오차가 작게 나타나도록 선형기울기를 구해서 그림 6과 같은 로터 작동기의 Mixer를 모델링하였다.

여기서 콜렉티브 피치의 경우 작동기의 최대 변위인 -2°~8° 사이에서 선형기울기가 변화하므로, 표 2와 같은 부분 선형성으로 모델링하였으며, 최대 변위를 초과하지 못하도록 제한하였다.

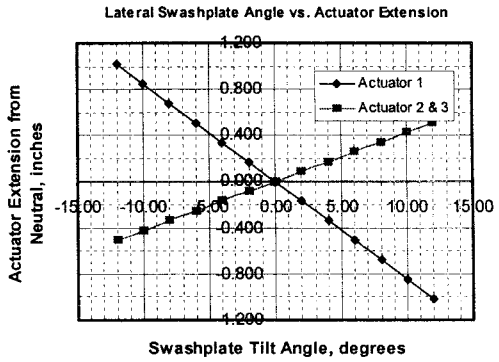

그림 4 가로축 싸이클릭과 작동기 변위관계

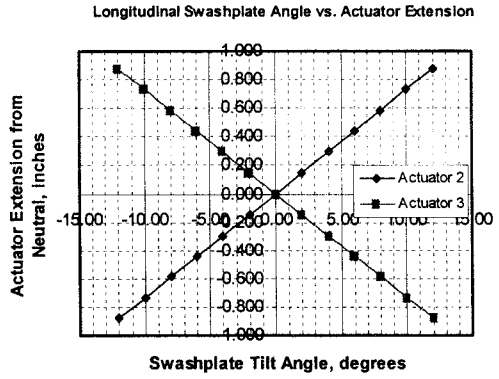

그림 5 세로축 싸이클릭과 작동기 변위관계

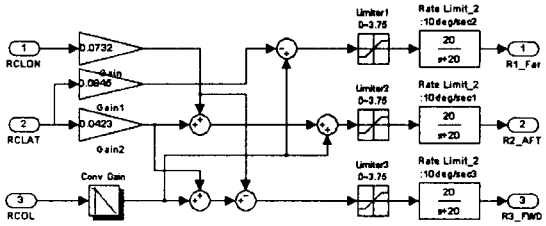

그림 6 로터작동기의 Mixer 제어기

표 2 콜렉티브 피치의 부분선형성

콜렉티브피치각(°)	-2	8	58
작동기 변위(in)	3.75	3.17	0

2.2. 로터 작동기 Mixer의 역변환 모델링

앞 절의 로터작동기 Mixer가 주어진 싸이클릭 명령과 콜렉티브 명령을 제대로 수행하는지 검증하기위해서 그림 6의 로터작동기 Mixer에 대한 역변환이 필요하다. 이때 표 2에 도시된 콜렉티브 피치의 부분선형성을 무시하고 8°~58°의 기울기를 적용하였다.

그림 6에 도시된 로터 Mixer의 선형모델은 다음과 같은 선형행렬로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -0.0845 & -0.0634 \\ 0.0732 & 0.0423 & -0.0634 \\ -0.0732 & 0.0423 & -0.0634 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ A_1 \\ \Theta_0 \end{bmatrix}$$

여기서 B_1은 가로축 싸이클릭, A_1은 세로축 싸이클릭, Θ_0는 콜렉티브를 나타낸다. 이 로터 Mixer 행렬을 역변환하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ A_1 \\ \Theta_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0000 & 6.8306 & -6.8306 \\ -7.8864 & 3.9432 & 3.9432 \\ -5.2618 & -5.2556 & -5.2556 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R1 \\ R2 \\ R3 \end{bmatrix}$$

역변환 행렬을 이용하여 로터작동기의 변위에 의한 싸이클릭, 콜렉티브 변위를 계산할 수 있는 Mixer 역변환기를 그림 7과 같이 모델링 할 수 있다. 주의할 점은 그림 7에서 콜렉티브 변위의 경우 최대변위인 58°로 부터의 오차값이므로 이를 위해서 콜렉티브 변위의 끝단에 58°를 더해 주어야 한다.

좌측로터에 대해서는 다음과 같은 선형행렬을 사용하였다.

$$\begin{bmatrix} L1 \\ L2 \\ L3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0845 & -0.0634 \\ 0.0732 & -0.0423 & -0.0634 \\ -0.0732 & -0.0423 & -0.0634 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ A_1 \\ \Theta_0 \end{bmatrix}$$

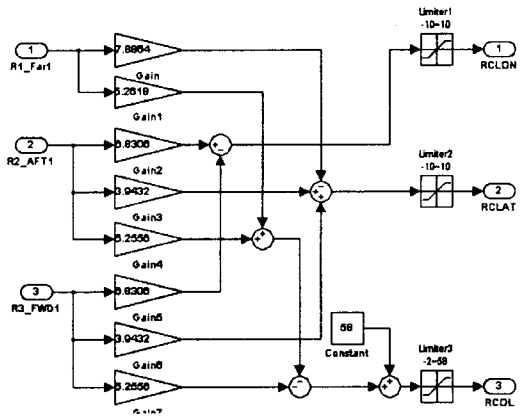

그림 7 로터작동기 Mixer의 역변환기

2.3. 로터작동기 Mixer의 시뮬레이션결과

그림 6과 그림 7의 결과를 이용해서 그림 8과 같은 로터 Mixer의 검증모델을 구성하였다. 참고로 그림 8에는 좌측로터에 대한 모델링도 포함되었다.

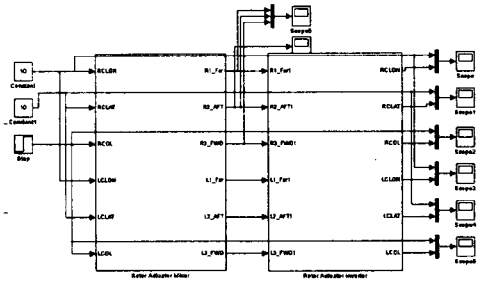

그림 8 로터작동기 Mixer의 검증

시뮬레이션 방법은 로터작동기 Mixer에 싸이클릭 명령과 콜렉티브 명령를 동시에 입력해서 역변환기를 거쳐서 나온 출력이 입력과 동일한지 비교하였다.

시뮬레이션 결과를 표 3에 정리하였다. 표 3에서 로터작동기의 변위제한값 근처인 콜렉티브 피치각 -2°~8°와 48°~58°에서 싸이클릭과 콜렉티브 값이 주어진 명령에 대해 서로 상쇄되면서 제대로 추종하지 못한다. 또한 콜렉티브 피치각 -2°에서는 싸이클릭 명령이 없더라도 표 2에 도시된 부분선형성으로 인해 입력값과 오차가 있는 -1.15°만큼만 반응하였다.

표 3 로터작동기 모델링의 검증결과

input			output		
Θ_0	A_1	B_1	Θ_0	A_1	B_1
-2	10	10	4.92	2.11	5.45
-2	10	0	2.7	5	-2.89
-2	0	10	3.29	0	6.67
-2	0	0	-1.15	0	0
18	10	10	18	10	10
18	10	0	18	10	0
18	0	10	18	0	10
18	0	0	18	0	0
58	10	10	51.93	7.89	4.55
58	10	0	54.15	5	2.89
58	0	10	53.56	0	3.34
58	0	0	58	0	0

콜렉티브 변위 제한으로 부터 여유가 있는 콜렉티브 피치각 18°에서는 싸이클릭과 콜렉티브 변위가 모두 정상적으로 수행되었다.

그림 8의 모델링이 선형성을 이용한 것이므로 이러한 결과는 정상적으로 판단되나, 콜렉티브 변위제한 근처에서 싸이클릭 명령을 적절히 소거하여 콜렉티브 명령이 100% 수행될 수 있는 콜렉티브 우선 제어기의 설계가 필요하다.

3. 콜렉티브 우선제어기의 설계

콜렉티브 피치각의 제한기 범위인 -2°~8°, 48°~58°사이에서 콜렉티브명령에 영향을 미치는 싸이클릭 명령을 적절히 소거해서 콜렉티브 명령이 우선적으로 수행되도록 그림 9와 같은 제어기를 세로축 싸이클릭명령과 가로축 싸이클릭 명령 입력단에 각각 추가하였다.

그림 9의 콜렉티브 우선 제어기는 -2°~8°, 48°~58° 사이에서만 작동하며 이들 범위에서 cos함수를 적용하여 설계하였으며, 이를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 표 4에 수록하였다. -2°와 58°에서는 싸이클릭 피치변위가 완전히 소거되므로, 제한치로부터 5°의 여유가 있는 콜렉티브 피치각 3°와 53° 에서 가로축/세로축 싸이클릭 명령 5°를 동시에 입력하였다.

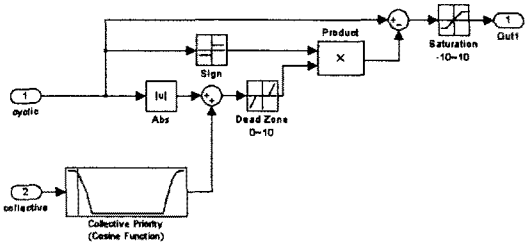

그림 9 콜렉티브 우선 제어기

표 4 콜렉티브 우선 제어기 적용결과

input			output		
Θ_0	A_1	B_1	Θ_0	A_1	B_1
3	5	5	3.68	2.6	2.74
53	5	5	53	3	3

표 4는 설계된 콜렉티브 우선 제어기가 잘 작동하고 있음을 보여주며, 표 2의 부분선형성으로 인해 -2°~8°사이에서 오차를 갖는다. 참고로 그림 9의 콜렉티브 우선 제어기를 cos함수가 아닌 선형함수를 사용하게 되면 표4의 결과에서 5°의 싸이클릭 명령여유로 인해 선형 우선제어기가 없는 경우와 동일한 결과를 보이게 된다.

4. 결론

본 논문은 스마트 무인항공기에 적용된 로터 작동기의 수치적 모델링과 콜렉티브 우선 제어기의 설계결과를 수록하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원으로 수행하는 21세기 프론티어 기술개발사업(스마트무인기기술개발사업)의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

[1] 김도형*, 이주영, 김유신, 이명규, 황창전, 김재무, "스마트무인기 로터 동특성 해석", 2004 추계 항공운항학회.

[2] 심정욱, 이명규, 이정훈, 김승범, "VLM을 이용한 스마트무인기 로터조종시스템 구성부품의 예비하중 분석",2004춘계항공우주학회.

[3] 김도형, 이주영, 김유신, 이명규, "스마트무인기 TRS3 모델 휠플러터 안정성 해석", 2005 추계 항공우주학회.