

3차원 조종면 변위센서 링크의 운동학적 해석을 통한 비선형 오차 영향 연구

이석천* · 김재은* · 이상종*

Study on Non-linear Error Effect of Three Dimensional Control Surface Linkage Using Kinematic Analysis

Sug-Chon Lee* · Jae-Eun Kim* · Sang-Jong Lee*

ABSTRACT

It is very important to correctly set control surface linkage. But a lot of bad setting case has been seen in especially remote controled airplanes and middle size UAVs. In this paper, a three dimensional linkage from control surface to deflection sensor was analyzed kinematically and a position analysis was simulated using algebraic algorithm in terms of nonlinear error of deflection angle. Three correct settings of the linkage came out of this research. One is two-dimensional motion, another is link ratio of 1 and the other is that effective lever of the control surface should be perpendicular to a pushrod in their neutral position.

Key Words: Kinematics, Four-Bar Linkage, Flight Control Surface

1. 서 론

무인기 설계 및 제작시 조종면 링크지의 올바른 세팅은 매우 중요하다. 그러나 RC 기체를 이용한 무인기와 중소기업에서 제작하는 중소형 무인기의 경우 조종면 링크지의 해석을 통한 상세설계가 생략되기 때문에 부적절한 링크지 형상이 많이 발견된다.

소형 RC 기체의 경우 서보의 장착공간, 방법, 개수 등의 이유로 Fig. 1과 같이 서보 축과 조

종면 축이 같은 평면상에 설치되지 않는 경우가 종종 있다. 이런 형상에서는 링크지가 3차원 운동을 하며 비선형 오차를 유발한다.

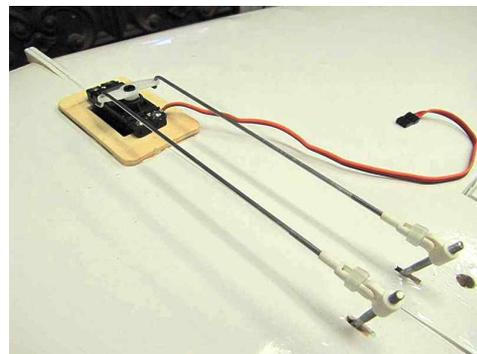


Fig. 1 Most Bad Case of Servo Linkage

†2011년 1월10일 접수 ~ 2011년 1월25일 심사완료

* 정회원, 한국항공우주연구원

연락처, E-mail: sugchon@kari.re.kr

링키지 세팅시 또 하나의 잦은 실수는 푸시로드에 대해서 조종면 레버가 직각이 되도록 세팅이 되어 있다는 것이다. 그러나 회전운동이 일어나는 클레비스 중심과 조종면 힌지축 중심을 연결하는 가상의 선이 푸시로드와 직각을 이루어야 한다. 그렇지 않을 경우 조종면의 변위가 비대칭으로 응답 또는 제한될 수 있다.

복합소재로 만들어지는 중소형 기체의 경우 조종면 힌지축이 날개 상부 표면에 위치한다. 이와 같은 형상에서는 Fig. 3의 예와 같이 조종면 레버의 길이를 오관하기 쉬운데, 4절링크는 입력레버와 출력레버의 길이가 다르면 입력각과 출력각 사이에 비선형 오차가 발생한다[1].

이들 비선형 오차는 비행체의 수학적 모델과 비행시험 결과의 불일치에 기여하며, 비행제어기의 성능을 저하시키는 데 영향을 미친다.

따라서, 링키지의 운동학적 거동특성을 수학적으로 해석하여 비행에 미치는 영향을 예측해 볼 필요가 있으며, 때로는 링키지의 운동학 모델을 비행모델에 반영하거나 역함수를 비행제어기에 반영할 필요도 있을 것이다.

조종면 링키지는 목적에 따라 다음의 두 가지로 구분할 수 있다.

- 서보(작동기) 링키지
- 변위센서 링키지

본 논문에서는 두루미II의 플랩 변위센서 링키지를 대상으로 링키지 장착형상을 3차원 4절링크로 해석하고 시뮬레이션을 통해서 비선형 오차가 변위센서 링크의 거동에 미치는 영향을 분석하였다.

2 본 론

2.1 조종면 변위센서의 장착형상

두루미II의 플랩 변위센서 링키지는 Fig. 2와 같이 서론에서 거론한 세 가지 예를 모두 포함하고 있어서 본 연구의 좋은 대상이 된다.



Fig. 2 Flap Linkage, Durumi II

변위센서 링크의 기하학적 형상은 Fig. 3과 같다. Fig. 3에서 변위센서 레버는 중립위치에서 푸시로드와 직각이 되도록 세팅되었으나, 연결구에 의해서 푸시로드의 회전중심 10mm 이격되어 있다. 따라서, 해석을 위한 유효레버를 Fig. 2와 같이 정의하여 해석을 수행하였다.

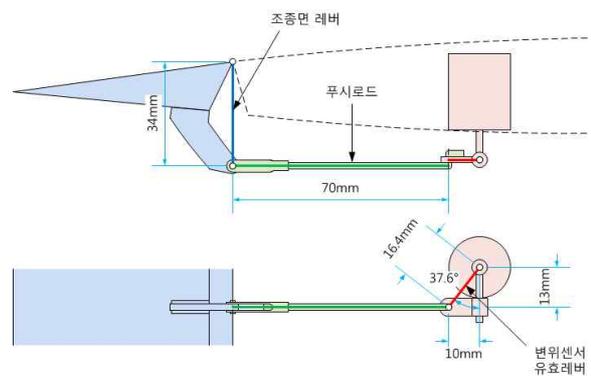


Fig. 3 Linkage Geometry

2.2 4절링크 해석

4절링크의 기하를 해석하는 수학적 방법은 다음의 네 가지 방법이 있다[2].

- 작도법 (Graphical position analysis)
- 대수 알고리즘 (Algebraic algorithm)
- 벡터루프 (Vector loop)

• 복소수 (Complex number)

본 논문에서는 부호 혼동의 여지가 없고 계산 결과가 풍부한 대수 알고리즘을 사용하여 링크 해석을 수행하였다. 대수 알고리즘은 점의 좌표를 계산하기 때문에 애니메이션이 용이한 장점이 있다.

또한 링크해석을 단순화하기 위해서 다음의 가정을 하였다.

- 모든 핀포인트들의 기계적인 유격은 무시
- 모든 핀포인트들의 기계적인 마찰은 무시
- 레버와 푸시로드의 기계적인 응력변형은 무시

2.3 3차원 위치해석

변위센서 링크해석을 위해 해석좌표계를 Fig. 4와 같이 정의하였다.

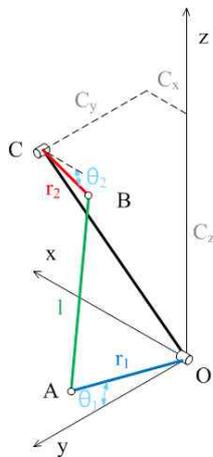


Fig 4 Analysis Frame

- 조종면 힌지축 상에 원점
- x축은 힌지축과 평행, y축은 입력레버 방향, z축은 오른손 법칙에 따라 변위센서 방향
- 입력레버는 중립위치에서 y축과 평행하고 입력각은 x축 중심 회전 (y-z 평면 운동)
- 출력레버 중심은 원점으로부터 C_x, C_y, C_z 만큼 이격
- 출력레버는 중립위치에서 x축에 평행하고 출력각은 y축 중심 회전 (x-z 평면 운동)

위의 정의에 따라 링크를 구성하는 4개 점들의 좌표는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= [0, A_y, A_z] \\ B &= [B_x, C_y, B_z] \\ C &= [C_x, C_y, C_z] \\ O &= [0, 0, 0] \end{aligned}$$

점 A의 위치는 입력각 θ_1 에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} A_x &= 0 \\ A_y &= r_1 \cos \theta_1 \\ A_z &= r_1 \sin \theta_1 \end{aligned} \quad (1)$$

피타고라스 정리에 의해 나머지 링크들의 길이는 다음과 같은 관계에 있다.

$$\begin{aligned} l^2 &= B_x^2 + (C_y - A_y)^2 + (B_z - A_z)^2 \\ r_2^2 &= (B_x - C_x)^2 + (B_z - C_z)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

식 2를 B_z 및 B_x 에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{-Q - \sqrt{Q^2 - 4PR}}{2P} \\ B_y &= C_y \\ B_z &= S + \frac{(B_x C_x - A_y C_y)}{(A_z - C_z)} \end{aligned} \quad (3)$$

B_x 계산을 위한 근의 공식에서 부호에 따라 출력레버의 위치가 반대방향으로 위치한다. 본 링크에서는 Fig. 1 및 2의 형상이 되도록 (-)부호를 사용하였다. 식 3에서 매개변수 P, Q, R, S 는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{C_x^2}{(A_z - C_z)^2} + 1 \\ Q &= 2C_x \left[\frac{(S - C_z)}{(A_z - C_z)} - \frac{A_y C_y}{(A_z - C_z)^2} - 1 \right] \\ R &= \left[(S - C_z) - \frac{A_y C_y}{(A_z - C_z)} \right]^2 + C_x^2 - r_2^2 \\ S &= \frac{r_1^2 + r_2^2 - l^2 - C_x^2 + C_y^2 - C_z^2}{2(A_z - C_z)} \end{aligned} \quad (4)$$

점 B 와 점 C 의 위치를 이용하여 출력각은 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{(B_z - C_z)}{(B_x - C_x)} \quad (5)$$

24 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 공간에서 변위센서 링크의 형상은 Fig. 5와 같다. 파란색 링크는 조종면에 수직한 레버를 의미하며, 초록색 링크는 푸시로드, 빨간색 링크는 변위센서의 유효레버를 의미한다.

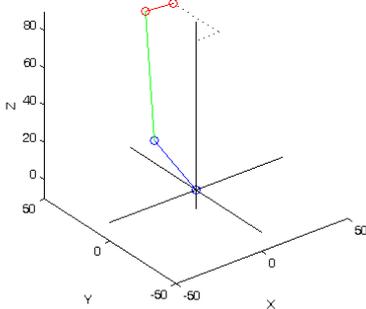


Fig. 5 3D Feature of Original Linkage

Fig. 6은 변위센서 링크의 시뮬레이션 결과이다. 실선은 링크비를 고려한 원하는 선형응답을 의미하며, 파선은 변위센서 레버의 시뮬레이션 응답을 의미한다. 시뮬레이션 결과 조종면 변위가 변위센서에 전달되는 과정에서 링크기구에 의해 크게 왜곡되는 것으로 나타났다. 전구간에 서 비선형 특성을 보이며 특히 조종면 변위 -10

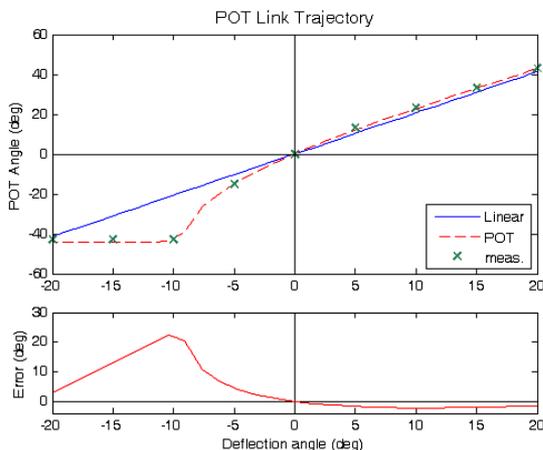


Fig. 6 Simulation Result of Original Linkage

도 이하에서는 변위센서의 변위가 제한되는 것을 볼 수 있는데, 이는 푸시로드와 변위센서 유효레버가 일직선 상태에 놓이면서 링크가 고정되기 때문이다.

3. 오차 식별

상기와 같이 수행한 시뮬레이션 결과는 중립직각 오류에 의한 오차, 링크비 영향 및 비평면 링크에 의한 비선형 오차를 모두 포함하고 있기 때문에 각각의 오류가 조종면 변위 오차에 미치는 영향 개별적으로 관찰할 필요가 있다. 따라서 본 절에서는 각각의 오류를 교정하여 오차의 영향을 정성적으로 관찰하였다.

3.1 중립직각 교정

Fig. 3의 변위센서 링크 형상을 Fig. 7과 같이 중립위치에서 유효레버가 푸시로드와 직각이 되도록 교정하였다. 시뮬레이션을 위해서 수학적으로 교정을 한 것이지만, 이러한 교정은 실제 비행체에서도 손쉽게 가능한 것이다.

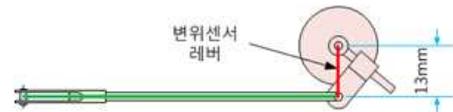


Fig. 7 Reset of Effective Lever

상기와 같이 교정한 링크의 3차원 시뮬레이션 형상은 Fig. 8과 같다. 중립위치에서 모든 레버와 푸시로드들이 직각을 이루고 있음을 알 수 있다.

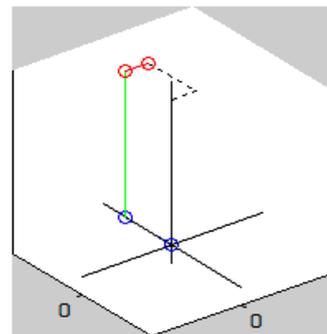


Fig. 8 Feature of Reset Linkage

Fig. 9은 중립직각 교정 후의 시뮬레이션 결과이다. 교정 전의 Fig. 6의 결과에 비해 링크 잠김현상이 해소되었으나 링크비 영향과 비평면 링크 형상에 의한 비선형 오차는 여전히 존재함을 알 수 있다.

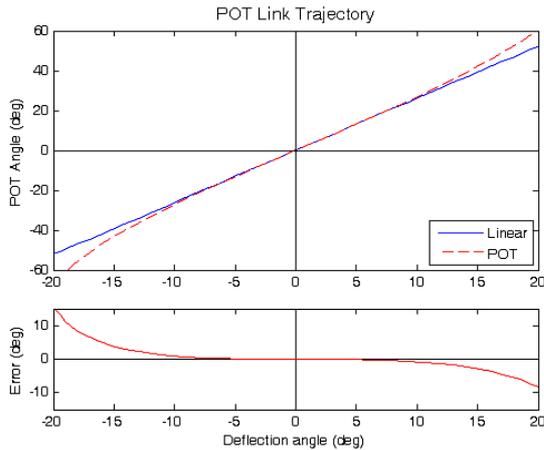


Fig. 9 Simulation Result after Reset to Neutral

3.2 링크비 교정

Fig. 7의 중립직각이 교정된 링크에 추가로 Fig. 10과 같이 링크비가 1이 되도록 변위센서 유효레버의 길이를 수정하였다. 실제 항공기에서 이와 같이 교정을 하기 위해서는 변위센서의 장착위치를 변경시켜야 하기 때문에 쉽지 않은 방법이다.

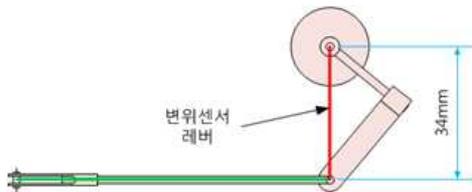


Fig. 10 Modification for Link Ratio

이와 같이 교정한 링크의 3차원 시뮬레이션 형상은 Fig. 11과 같다. 조종면 레버와 변위센서 유효레버의 길이가 동일함을 알 수 있다.

Fig. 12는 중립직각 교정 및 링크비가 1이 되도록 수정한 후의 시뮬레이션 결과이다. 교정 전의 Fig. 9의 결과에 비해 비선형 오차가 대폭

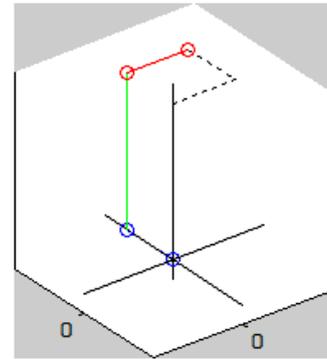


Fig. 11 Feature of Modified Linkage

감소하였음을 알 수 있다. 최대 0.1도의 비선형 오차는 실제 링크의 기계적인 유격이나 작동기 및 센서의 정밀도 등을 고려하면 무시할 만한 정도이다.

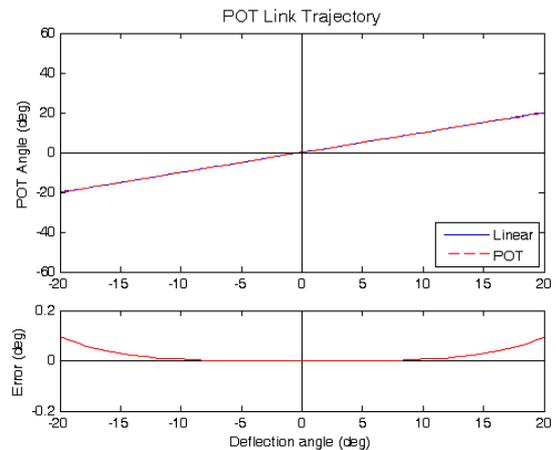


Fig. 12 Simulation Result after Modifying Link Ratio

3.3 평면링크

Fig. 10과 같이 중립직각 오류와 링크비 영향에 의한 비선형 오차를 제거한 링크 형상에 추가로 비평면 링크의 3차원 거동에 의한 비선형 오차를 원천적으로 제거하기 위해서 Fig. 13과 같이 평면링크로 교정하였다. 대상 링크를 실제로 이와 같이 교정하기 위해서는 변위센서 장착 구조물의 변경이 필요하기 때문에 사후 교정은 매우 어렵다.

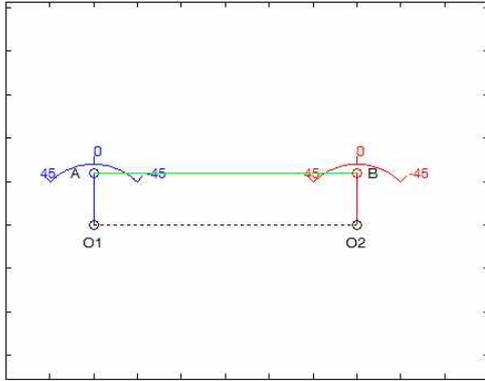


Fig. 13 2D Linkage

Fig. 14는 2차원 평면운동을 하는 링크의 시뮬레이션 결과이다. 변위센서 레버가 조종면 레버를 완벽하게 추종하며, 선형이고 오차가 발생하지 않는 것이 큰 장점이다. 이처럼 링크비가 1인 특수한 경우의 4절링크를 "Drag-follower" 라고 부른다[2].

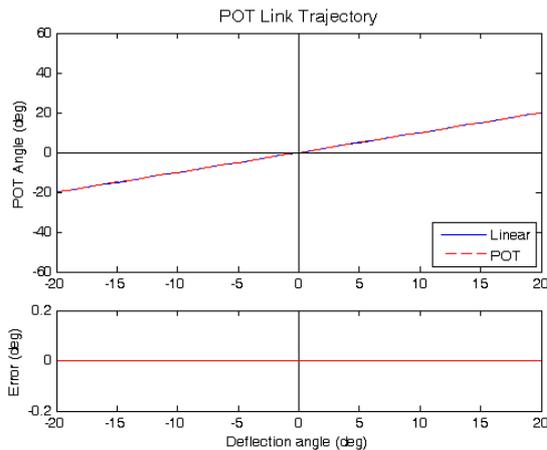


Fig. 14 Simulation Result of 2D Linkage

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 두루미II의 변위센서 링크의 기하학적 치수를 사용하여 3차원 4절링크의 각도응답을 기구학적으로 해석하여 링크기구에서 심한 왜곡이 발생함을 확인하였다. 이러한 왜곡은 변위센서를 스케일링하는 데에도 큰 어려움이 될 뿐만 아니라 비행제어기에서 사용하는 조

종면 변위값에도 비선형 오차를 유발하여 결국 모델링 오차를 증가시키는 데에도 영향을 미칠 것이다.

실제로 두루미 II의 플랩은 (+)방향(Flap down)만을 사용하며, 이 구간에서의 오차 특성은 거의 일정한 편차를 가지고 있기 때문에 선형화하여 사용하는 데에 큰 무리가 없었다.

그러나 1차 조종면에 대상 링크지와 같은 형상이 사용되는 것은 결코 바람직하지 않으며, 특히 정밀제어가 요구되는 응용분야라면 조종면 링크지는 반드시 검증이 이루어져야 할 것이다.

조종면 링크지의 운동학적인 관계가 해석되면 역함수를 이용한 선형화 기법으로 비선형 오차를 소거할 수도 있겠지만, 더 간편한 방법은 링크지 세팅을 물리적으로 교정하는 것이다. 3절에서 기술한 바를 요약하면 가장 좋은 조종면 링크지의 조건은 아래와 같다.

- 링크지가 2차원 평면상의 운동을 할 것
- 링크비가 1일 것
- 중립위치에서 레버와 푸시로드는 직각일 것

감사의 글

본 연구는 전문연구사업의 “전기비행체 자동비행 핵심기술연구”의 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1]이석천, 이상종, 성기정, “다중화 작동기의 배치에 따른 작동기 링크의 운동학적 해석,” 항공운항학회 2010년도 추계학술발표회, 2010.12.
- [2]John Uicker, Gordon Pennock, Joseph Shigley, “Theory of Machines and Mechanisms,” fourth edition. Oxford University Press., 2010.