

X8 전기추진 기체에서 단일 프로펠러 장애 발생 시 비행 연속성을 확보하기 위한 시스템 통합 설계 및 실증

유수호^{1,†}, 조범동¹, 정유진¹, 이창수¹, 김연준¹

¹주식회사 브이스페이스

Integrated System Design and Flight Demonstration for Ensuring Flight Continuity in an X8 Electric Propulsion Aircraft under Single Propeller Failure

Suho Yu^{1,†}, Bumdong Cho¹, Yujin Jung¹, Changsu Kim¹ and Yeonjune Kim¹

¹V-SPACE Inc.

Abstract : X8 구성의 전기추진 멀티로터 항공기는 단일 프로펠러에 장애(고장)가 발생하더라도 비행을 계속할 수 있는 추진 시스템으로 주목받는다. 본 논문에서는 총 중량 115 kg, 최대이륙중량 215 kg 규모의 X8 동축(coaxial) 옥토크터 기체를 대상으로, 단일 프로펠러 고장 시 비행 안정성을 유지하기 위한 시스템 통합 설계 기법과 실증 결과를 제시한다. 추진력 재분배 알고리즘과 고장 허용 제어전략을 수립하고 PID 기반의 대응 기법을 구현하였다. 세계적으로 연구된 멀티로터 고장 허용 제어(Fault-Tolerant Control) 및 추진력 재분배 기법을 광범위하게 검토하여 본 설계에 반영하였고, 실제 기체에 대한 안전줄 기반 시험비행을 통해 단일 프로펠러 고장 상황에서의 제어 응답과 안정성 확보를 확인하였다. 논문의 마지막에서는 제안된 접근 방법의 한계점을 논의하고, 모델 기반 제어나 인공지능 기반 기법 등 향후 개선 방향을 제안한다.

Key Words : Fault-Tolerant Control, Propeller Failure, X8 Octocopter, Thrust Redistribution, PID Control

Acknowledgement : 본 연구는 X8 기체의 비행 시험을 통한 실증 결과를 바탕으로 하였으며, 시스템 구현 및 시험비행을 함께한 개발팀과 비행 안전 확보를 위해 협조해주신 관계자분들께 깊은 감사를 드립니다.

본 연구는 과학기술정보통신부의 및 정보통신기획평가원의 지원으로 수행되었습니다.

본 연구에 포함된 내용은 연구자의 견해이며, 소속기관 또는 지원기관의 공식 입장을 대변하지 않습니다.

1. 서론

멀티로터 드론은 프로펠러나 모터에 이상이 발생하면 즉각적인 추력 불균형으로 인한 추락 위험이 있다.

특히 일반적인 쿼드콥터는 하나의 모터만 고장나도 자세 제어가 불가능해지는 반면, 헥사콥터나 옥토크터와 같이 여분의 프로펠러를 가진 구성은 일부 프로펠러 상실 시에도 일정 수준의 제어력을 유지할 수 있다.

X8 구성은 네 개의 붐(boom) 각각에 상하 한 쌍의 프로펠러를 장착한 동축 옥토크터 형태로, 추가적인 모터의 중복(redundancy)을 통해 단일 프로펠러 고장에

대비할 수 있는 장점을 제공한다. 그러나 프로펠러 고장 발생 시 남은 모터들로 어떻게 추력을 재분배하고 불균형한 토크를 보정할지에 대한 체계적인 설계가 필요하다. 본 연구의 목적은 X8 전기추진 기체에서 한 개의 프로펠러가 작동불능에 빠지더라도 안전하게 호버링을 지속하거나 제어된 비상착륙을 수행할 수 있는 고장 허용 제어 시스템을 개발하는 것이다. 이를 위해 추진력 재분배 설계, 고장 허용 제어 전략, PID 제어 기반의 대응 기법을 통합적으로 설계하였다. 또한, 국내 외에서 진행되어온 관련 연구들을 조사하여 다양한 접근 방법(예: 제어 할당, 고장 검출 및 재구성, 강인 제어, 지능형 제어 등)의 장단점을 비교하고 본 설계에 활용하였다. 마지막으로 실제 X8 기체에 대한 실증 시험비행을 통해 제안한 시스템의 효과를 검증하였다.

†교신저자 (Corresponding Author)

E-mail: ABCD@sase.or.kr

Copyright © The Society for Aerospace System Engineering

II. 본 론

A. 기체 개요: X8 구성 및 비행 제어 구조



Fig. 1. X8 실증비행 기체 사진
(동축 구조로 한 붐당 상/하 2개의 프로펠러 장착)

본 연구에 사용된 X8 멀티로터 기체는 동축으로 배열된 8개의 프로펠러를 갖는 옥토크opter 플랫폼이다. 기체는 X자 형태의 4개 암(arm)에 상부/하부 한 쌍의 모터-프로펠러가 장착되어 총 8개의 추력원을 가지며, 이는 단일 프로펠러 고장 시에도 여전히 7개의 추력원이 남아 비행을 지속할 수 있는 구성이다. 해당 기체의 자중(공차 중량)은 약 115 kg이고 최대이륙중량(MTOW)은 215kg에 이르는 대형 드론 플랫폼으로, 전기 모터 기반의 멀티콥터로서는 높은 중량을 견딜 수 있도록 설계되었다. 다만 동축 프로펠러 구성은 상하 로터 사이의 간섭 유동으로 인해 단일 로터 대비 약 10~20%의 유효추력 손실이 발생하는 것으로 알려져 있다.

이를 감안하여 해당 기체는 호버링시 모터 출력 여유(margin)를 충분히 두고 운용되며, 프로펠러 고장 상황에서도 잔여 추력으로 기체를 지지할 수 있도록 설계되었다. 비행 제어 구조는 일반적인 멀티로터의 계단식 PID 제어를 채택하였다. 자세 안정화 및 위치 제어를 위해 이중 루프 구조로 내부 고각속도 제어(PID)와 외부 자세각/고도 제어(PID)를 구성하고, 필요시 위치 제어(PID)를 추가하여 구현하였다. 평상시(정상 상태)에는 8개의 모터가 모두 동등하게 제어 명령에 참여하여 롤(Phi), 피치(Theta), 요(psi) 각속도 및 고도(추력)를 제어한다. 동축 구성의 특성상 각 암의 상부/하부 프로펠러는 반대 방향으로 회전하여 정토크(net torque)를 상쇄함으로써 정지비행에서 요 방향의 안정성을 확보한다. 조종 입력 또는 자동 비행 제어에 의해 요 각속도 명령이 발생하면, PID 제어가 각 프로펠러 쌍의 상대 출력 차이를 조정하여 전체 토크 불균형을 만들어 요 운동을 유발한다. 이러한 방식으로 X8 기체는 쿼드콥터와 유사한 거동을 보이면서도 여분의 모터를 통한 이중화된 추력 분배가 가능한 플랫폼을 제공한다. 또한 비행 제어 컴퓨터(FCU)에는 모터 상태 감시 기능이 포함되어 있어, 모터 속도계(RPM 센서)나 전류 센서 값

을 통해 각 모터의 출력 이상 여부를 실시간 진단할 수 있다. 이러한 계측을 활용하여 만일의 추진 장치 고장 시 신속히 인지하고 대비 알고리즘을 작동시키도록 시스템을 구성하였다.

B. 시스템 통합 설계: 단일 프로펠러 장애 대응

본 장에서는 단일 프로펠러 고장 상황을 가정한 X8 기체의 추진력 재분배 설계, 고장 허용 제어 전략, PID 제어 기반 대응 기법을 순차적으로 설명한다. 제안하는 시스템은 기존 비행 제어 구조에 고장 감지 및 재분배 알고리즘을 추가하는 통합 설계를 통해 구현되었다.

C. 추진력 재분배 설계

단일 모터/프로펠러가 고장나서 추력을 상실하면 즉시 기체에 걸리는 양력(총 추력)이 감소하고, 아울러 고장난 프로펠러의 회전 방향에 따라 잔여 모터들의 토크 불균형이 발생한다. 이를 보상하기 위해서는 남아있는 7개 프로펠러의 출력 재분배가 필요하다. 가장 직관적인 대응은 고장난 프로펠러와 같은 축에 있는 쌍둥이 프로펠러(dual rotor)의 출력을 증가시켜 잃어버린 추력을 보충하는 것이다. 예를 들어, 상부 프로펠러가 고장난 경우 하부 동축 프로펠러에 두 프로펠러 몫의 추력을 맡기는 방식이다. 이를 통해 전체적인 양력 손실을 최소화하여 기체가 급격히 낙하하지 않도록 한다. 그러나 이 접근만으로는 요(yaw) 토크 불평형 문제가 남는다. 기존에는 한 쌍의 상/하부 프로펠러가 반대방향으로 회전하며 각자의 토크를 상쇄시켰지만, 한쪽이 상실되면 해당 암(one arm)에서 발생하는 순토크가 0이 아니게 된다. 앞의 예시에서 상부 프로펠러(CW 회전)가 정지되고 하부 프로펠러(CCW 회전)만 동작하면, 그 암은 CCW 방향의 잔류 토크를 기체에 가하게 되어 드론은 한쪽 방향으로 회전하려는 경향이 생긴다. 이를 해결하기 위한 토크 균형 제어 전략으로서, 전체 남은 모터들의 출력분배 비율을 조정한다. 구체적으로, 고장난 모터와 동일한 회전 방향의 모터들은 출력 비율을 다소 높이고, 반대 회전 방향의 모터들은 출력 비율을 낮추는 방식으로 총 토크 균형을 맞춘다. 이렇게 하면 요 방향으로 발생하는 불균형 토크를 상쇄하면서도, 총추력은 필요한 만큼 유지할 수 있다. 추진력 재분배는 결국 다수의 모터 출력 값을 동시에 조정하는 제어 할당(Control Allocation) 문제로 볼 수 있으며, 본 연구에서는 비교적 간단한 한 개 고장 시나리오이므로 수작업으로 결정된 재분배 비율 테이블을 적용하였다. 예를 들어, 프로펠러 한 개 고장 시 각 남은 모터의 출력 스케일 팩터를 미리 정의해 두고, 고장 상황에서 해당 팩터를 곱하여 모터 명령을 재산출하도록 설계하였다. 이때 재분배 비율은 정상 호버링시 여유 추력과 토크 밸런스를 고려하여 결정되었다.

D. 고장 허용 제어 전략

추진력 재분배 설계가 마련되었더라도, 이를 언제 어떻게 적용할지에 대한 제어 전략이 필요하다. 본 연구에서는 능동형 고장 허용 제어기(Active Fault-Tolerant Controller)를 구현하여, 정상 상태에서는 일반 제어를 하다가 고장이 감지되는 즉시 고장 대응 모드로 전환하도록 하였다. 이를 위해 다음과 같은 절차를 갖는 제어

전략을 수립하였다.

- [1] 고장 감지 및 식별: 모터 RPM 센서 및 전류 센서의 데이터를 모니터링하여 특정 모터의 비정상 상태(회전 수 급감 혹은 전류 이상)를 실시간으로 감지한다. 설정된 임계치보다 출력이 떨어지면 0.1초 이내에 해당 모터 고장으로 판단하고 그 모터 인덱스를 식별한다. 하나의 모터만 고장났다고 가정하고 있으므로 추가적인 다중고장 판정 로직은 생략하였다.
- [2] 제어 모드 전환: 고장이 확정되면, 즉시 추력 재분배 모드로 제어를 전환한다. 전환과 동시에 고장난 모터에는 출력을 명령하지 않으며(출력값 0으로 유지), 나머지 모터들에 대해서는 앞서 설계된 재분배 스케일 팩터를 기존 명령에 곱하여 수정한다. 이때 재분배 명령은 수 밀리초 내에 적용될 수 있도록 FCU 내부에서 고속으로 실행된다.
- [3] 이러한 전략은 고장 감지부터 재분배 적용까지의 알고리즘이 별도의 개입 없이도 자동으로 비상대응이 이뤄지도록 설계되었다. 특히 프로펠러 쌍 제어 개념을 활용하여, 고장난 프로펠러의 동축 쌍은 하나의 가상 프로펠러처럼 취급하고 해당 쌍의 총 추력을 유지함으로써 비행체의 연속적인 제어가 가능하게 한다.
- [4] 또한, 고장 상황에서 일반적인 회적의 비행체는 모든 축을 동시에 제어하기 어렵기 때문에 비행연속성 확보를 위해 필요시 요(yaw)축 제어를 희생하고자 한다.
- [5] 이는 멀티로터의 요 자유도가 일정 시간 제어되지 않고 기체가 천천히 회전하더라도, 롤/피치 자세만 안정적으로 유지되면 추락을 방지할 수 있다는 판단에 따른 것이다.
- [6] 본 연구에서도 만약 재분배 제어로도 요 방향 잔류 토크를 완전히 상쇄하기 어려운 경우, 요 축의 PID 제어 이득을 낮춰 기체가 천천히 회전하도록 허용함으로써 대신 롤/피치 안정성을 확보하는 전략을 병행하였다.

E. 실증 시험: 단일 프로펠러 고장 비행 테스트

설계된 고장 허용 시스템의 성능을 확인하기 위해 실제 X8 기체를 활용한 실증 비행 시험을 수행하였다. 시험은 안전을 고려하여 기체 상부에 안전줄을 설치한 상태에서 정지비행(hover) 중 고장을 모사하는 방식으로 진행되었다. 고장 모사는 특정 모터의 출력 신호를 비행 중에 강제로 0으로 만드는 방법으로 이루어졌으며, 본 시험에서는 기체의 오른쪽 앞쪽에 위치한 상부 프로펠러(모터)를 고장나는 시나리오를 구현하였다. 해당 모터는 고장 시 즉시 회전을 정지하였고, 제어기는 이를 50ms 이내에 감지하여 앞서 제안한 추진력 재분배 및 PID 보상 알고리즘을 실행하였다. 그 결과 기체는 추력 손실에도 불구하고 안정적인 호버링을 유지할 수 있었다. 고장 직후 약 10cm 가량 기체가 순식간에 내려앉았으나, 나머지 모터들의 출력을 보상하여 곧 목표 고도를 회복하였다. 자세 각도 응답을 보면, 고장 발생 순간 요(yaw) 방향으로 약 ±5°의 작은 진동이 관찰되었으나 2초 이내에 거의 0°로 수렴하여 요 운동 안정화가 이루어졌다. 롤 및 피치 각도는 고장 시 일시적으로 3° 이내의 오차를 보였으나 PID 제어에 의해 빠르게 보정되었고, 전반적으로 기체는 수평을 유지하였다. 조종 입력이 없는 상태에서 자율 호버링 중 진행된 시험이었으며, 고장 발생 후에도 기체는 지정된 고도와 위치를 크게 벗어나지 않고 연속 비행이 가능했다. 이는 제어기가 의도대로 잔여 7개 프로펠러를 활용하여 불균형 추력을 재분배하고 자세를 안정화했음을 의미한

다. 한편, 고장난 모터의 동축쌍인 하부 프로펠러는 즉시 출력이 상승하여 기존 대비 약 1.8배의 전류를 소모함이 확인되었다. 이는 해당 프로펠러가 상부 프로펠러 뒤편까지 추력을 분담한 결과로 해석된다. 그에 따라 다른 모터들(특히 대각선 반대편 모터)의 출력은 약간 줄었고, 전체적으로는 기체를 지탱하는 데 충분한 순추력이 유지되었다. 만약 이러한 재분배가 이루어지지 않았다면 한쪽으로 큰 요우 회전이 발생하거나 기체가 급격히 추락했을 가능성이 높다. 실제 시험을 통해 제안된 시스템 통합 설계의 **고장 복원력(resilience)**을 확인할 수 있었다고 평가한다. 본 시험에서는 단일 프로펠러 고장 상황만을 다루었으며, 고장 모터를 지정하여 강제하는 방식으로 진행되었다. 다양한 모터(예: 다른 위치나 하부 프로펠러 고장 등)에 대해서도 동일한 알고리즘으로 시험한 결과 유사한 안정화 성능을 나타냈다. 또한, 2개 이상의 동시 고장은 고려하지 않았는데, 이는 확률적으로 매우 드물고 X8 구성에서는 2개 고장 발생 시 잔여 추력으로 호버링이 어려울 것으로 판단되기 때문이다. 시험 중 안전줄을 사용함으로써 최악의 경우 추락 사고를 방지하였으나, 결과적으로 제안된 고장 허용 제어 시스템이 기체의 비행 연속성을 확보해줄 수 있음을 실험적으로 검증하였다. 이러한 실험 결과는 동축 12프로펠러 시스템 등에서 보고된 유사 연구와도 궤를 같이한다.



Fig. 2 X8 기체 안전줄 비행 사진 (동축 구조로 한 붐당 상/하 2개의 프로펠러 장착)

III. 결론

본 연구에서는 8개 프로펠러를 갖는 X8 전기추진 드론 플랫폼을 대상으로 단일 프로펠러 고장 시에도 안전한 비행을 지속하기 위한 시스템 통합 설계와 실증 결과를 제시하였다. 제안한 방식은 추력 재분배 알고리즘, 고장 감지 및 제어 모드 전환 논리, PID 제어 기반의 보상 기법을 아우르며, 복잡한 최적화 없이도 실시간으로 고장에 대응할 수 있는 실용적인 접근이다. 실제 115 kg급 시험 기체에 대한 고장 모사 비행 실험을 통해 해당 시스템이 프로펠러 고장 후에도 기체의 자세와 고도를 안정적으로 유지함을 확인하였다. 문헌 리뷰를 통해 고찰한 바와 같이 멀티로터의 고장 허용 제어 분야는 다양한 기법들이 발전하고 있으며, 향후에는 모델 기반 제어, AI 학습 제어 등을 접목하여 더욱 향상된 성능과 신뢰성을 갖춘 시스템으로 발전시킬 수 있을 것이다. 본 연구가 대형 멀티콥터의 안전성 향상에 기여하기를 기대하며, 향후 더욱 복잡한 고장 시나리오에 대한 연구와 검증으로 나아가고자 한다.

Minimization in Coaxial Multirotors via Optimized Control Allocation.” *Drones*, 8(9):446, 2024

IV. 참고문헌

- [1] Majd Saied et al., “Fault diagnosis and fault-tolerant control strategy for rotor failure in an octorotor.” *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation (ICRA)*, 2015
- [2] Hassan Shraim et al., “Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control of an Octorotor UAV using motors speeds measurements.” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49-17, pp. 55-60, 2016
- [3] Aiden Marks et al., “Control allocation for fault tolerant control of a VTOL octorotor.” *UK Automatic Control Conf.*, 2012
- [4] Dain Yoon et al., “Practical fault-tolerant control allocation based on attainable control set analysis for a coaxial dodecacopter.” *Control Eng. Practice*, vol. 156, 106235, 2025
- [5] Fu-Hsuan Wen et al., “Analysis and Management of Motor Failures of Hexacopter in Hover.” *Actuators*, 10(3), 48, 2021
- [6] Kenji F. A. Okada et al., “Fault-Tolerant Control for Quadcopters Under Actuator and Sensor Faults.” *Sensors*, 24(22):7299, 2024
- [7] Michael O’Connell et al., “Learning-Based Minimally-Sensed Fault-Tolerant Adaptive Flight Control.” *IEEE RA-L*, 9(6):5198-5205, 2024
- [8] Andrea Berra et al., “Aerodynamic Interaction