

## 케이블을 사용한 드론용 공중 포획 메커니즘의 설계 및 테스트

정상훈<sup>1</sup> · 응위엔 시<sup>1</sup> · 김병규<sup>2,†</sup> · 안태영<sup>2</sup><sup>1</sup>한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과<sup>2</sup>한국항공대학교 항공우주 및 기계공학부

## Design and test of cable based airborne capture mechanism for drone

Sanghoon Jung<sup>1</sup> · Nguyen Van Sy<sup>1</sup> · Byungkyu Kim<sup>2,†</sup> · Taeyoung An<sup>2</sup><sup>1</sup>Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University<sup>2</sup>School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University

## Abstract

We propose a capture mechanism based on the principles of fishing nets that can be mounted on the drone using cable. The gripper mechanism, mainly proposed for the drone is heavy, and is limited to catch standardized objects. In contrast, the proposed capture device in this paper is light, flexible, and can capture various types of objects from a long distance. The theoretical relationships between cables and mechanisms were analyzed. Finally, the capture device was designed and manufactured to be installed in the drone (DJI S900) to conduct capturing experiments for various objects and verify the validity.

## 초 록

어망의 원리를 기반으로 케이블을 사용한, 드론에 탑재할 수 있는 포획 메커니즘을 제안하였다. 최근 제안되고 있는 드론용 포획장치로 주를 이루고 있는 그리퍼(Gripper) 메커니즘은 자중이 무겁고 정형화된 물건만을 잡을 수 있다는 한계를 가지고 있다. 본 논문에서 제안하는 포획 메커니즘은 가볍고, 유연하며, 원거리에서 다양한 형태의 물건을 포획할 수 있다. 케이블과 기구장치에 대한 역학관계를 이론적으로 분석하였으며 그에 따라 기구를 설계하고 모터와 제어를 선정하였다. 최종적으로 포획장치를 제작하고 이를 검증하기 위해 드론(DJI S900)에 설치하여 다양한 형태의 물건에 대한 포획실험을 차례로 지상과 야외 환경에서 수행하여 타당성을 입증하였다.

**Key Words** : Unmanned Aerial Vehicle(무인항공기), Capture Mechanism(포획 메커니즘), Kevlar Wire(케블러 와이어), Anchor(닻), Drone(드론)

## 1. 서 론

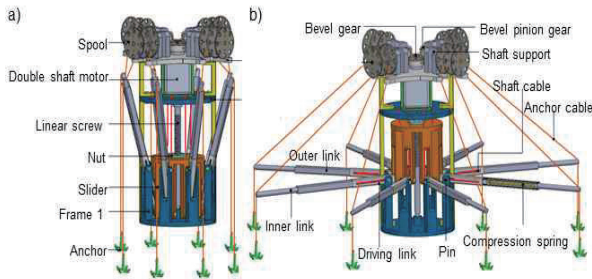
드론의 연구개발은 최근 몇 년 사이에 급속히 증가하고 있다[1]. 드론은 이동성이 우수하며 원격조정을 통해 접근 불가능한 위치에서 임무(mission) 수행이 가능하다. 따라서, 원하는 물체를 포획할 수 있는 드론용 포획장치를 개발하기 위한 다양한 연구가 진행되고

있다. 붉은 솔개와 독수리 같은 동물에 기반을 둔 포획장치에 관련한 연구[2,3]와 함께 포획 조작기를 비행체 밑에 장착하여 수동 조작하는 형태[4-7]의 연구가 진행되고 있다. 또한 1자유도의 메커니즘[8,9]과 2개 이상의 자유도를 갖는 정교한 로봇팔의 구조를 활용한 그리퍼(Gripper)와 같은 형태도 꾸준히 연구되어 왔다.[10-12] 하지만 이러한 포획장치는 방법과 적용에 따라 다르지만 몇 가지 한계가 있다. 첫째로, 짧거나 좁은 포획범위로 인해 화재와 같은 위험한 상황에서는 드론이 손상될 수 있으므로 목표물에 가까이 접근하지 못할 수 있다. 둘째로는 메커니즘의 자유도와

형태에 따라 포획 가능한 물체의 형상이 제한적이다. 조작기(manipulator) 말단장치(end effector)의 정해진 형상 외에 크기가 다르거나 다양한 형상의 물건을 포획하기에 한계가 있다. 높은 자유도를 갖는 메커니즘 경우에는 작동범위가 비교적 늘어나는 반면에 포획할 수 있는 대상의 형상이 제한적이다. 뿐만 아니라 조작기의 움직임에 의해 생성되는 반발력이 포획과 비행, 모두에 불안정성을 야기할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는, 오직 하나의 모터로 구동되는 케이블 기반 포획 메커니즘을 고안했다. 모터 하나로 메커니즘 전개, 앵커 투하, 대상 물체 포획, 전개 후 접음까지 가능하며 우수한 전개비를 토대로 포획 가능한 대상의 범위가 넓다. 물고기의 크기와 형상과 무관하게 포획하는 어망에서 영감을 얻어 메커니즘을 설계하고 케이블 끝에 닳과 같은 역할을 하는 앵커를 달아 대상을 포획하기 위한 가능성을 높였다. 제안하는 모델의 프로토타입을 제작하여 산업용 드론(DJI S900)[13]에 장착하여 포획실험을 수행했다.

## 2. 포획 메커니즘

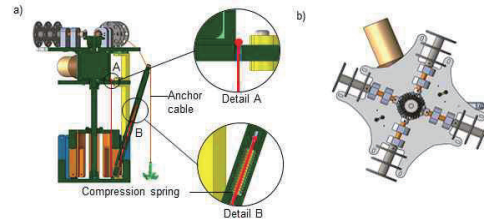
### 2.1 포획 메커니즘 설계



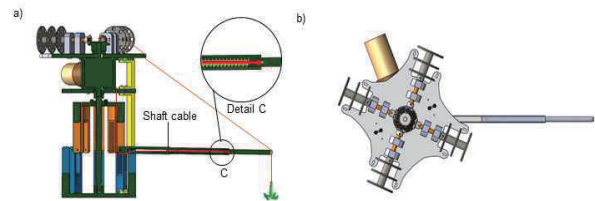
**Fig. 1** Schematic of the capture mechanism  
a) Folded configuration  
b) Deployed configuration

Fig. 1과 같이 케이블을 이용한 드론용 포획 메커니즘은 선형 나사, 슬라이더, 링크 암 8개, 앵커 8개, 스푼 4개, 베벨 기어, 프레임, 더블 샤프트 모터와 케이블로 구성된다. 더블 샤프트 모터의 회전 방향과 속도에 의해 포획 메커니즘은 전개되거나 접히는 방식을 통해 지상의 물체를 포획한다. 더블 샤프트 모터의 상부 샤프트는 스푼을 회전시켜 앵커 케이블을 감거나

룬다. 동시에 하부 샤프트는 Frame1이 선형 나사를 따라 상하로 움직이도록 하여 앵커 케이블과 링크 암 8개를 전개하거나 접는다.



**Fig. 2** Sectional view of folded configuration  
a) Front view b) Top view



**Fig. 3** Sectional view of deployed configuration  
a) Front view (b) Top view

드론의 탑재체로서 설계한 포획 메커니즘은 비행 안전성 및 효율 제고를 위해 일정한 전개비를 갖는다. 이를 위해 링크 암 내부에 탄성에너지를 저장한 압축 스프링(compression spring)을 설치하였다. Fig. 2,3과 같이 더블 샤프트 모터의 구동에 의한 Frame1의 위치변화에 따라 압축됐던 스프링이 복원되는 방식으로 링크 암이 전개된다. 전체 구동부의 전개비는 3.13으로 전개 전·후 포획 메커니즘의 사양은 Table 1과 같다.

**Table 1** Specification of cable based capture device

	드론용 포획 메커니즘 상세 사양	
	전개 전(Folded)	전개 후(Deployed)
가로	150 mm	470 mm
세로	150 mm	150 mm
높이	220 mm	220 mm
전체 무게	1.4 kg	1.4 kg

선형 나사, 너트, 스푼은 포획대상 하중의 영향을 받아 변형이 발생할 우려가 커 강성을 고려하여 알루미늄으로 제작하였다. 앵커 케이블과 축 케이블은 1mm 직경의 케블러 와이어(Kevlar Wire)를 사용하였으며 이외 부품들은 아크릴과 ABS 플라스틱으로 제작했다.

## 2.2 작동 원리

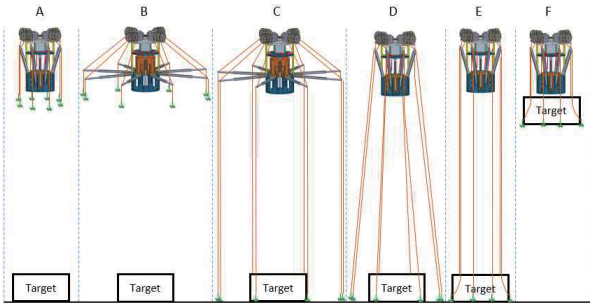


Fig. 5 Working process of proposed mechanism

Fig. 5와 같이 제안된 메커니즘은 아래의 절차를 따라 작동한다.

A - 이동 전 접힌 상태 : 드론이 목표물에 도달하기 전까지 포획장치를 접은 상태로 비행하여 항력을 줄이고 포획장치로 인한 드론의 흔들림을 최소화한다.

B - 링크 암 전개 상태 : 목표 지점에 접근한 후 일정 고도에서 B 단계에 진입한다. 더블 샤프트 모터를 시계 방향으로 작동시켜 상부 샤프트 구동 베벨 기어가 작동을 시작함에 따라 동시에 스플도 풀리기 시작한다. 하부 샤프트는 선형 나사를 구동하여 아래에 있던 슬라이더를 Fig. 1의 Frame 3으로 이동시킨다. 슬라이더가 위로 이동함에 따라 링크 암 내부에 압축 스프링에 의해 구속되어 있던 샤프트 케이블이 풀리면서 8개의 링크 암들이 전개된다.

C - 앵커 케이블 전개 상태 : 링크 암이 완전히 전개된 후에는 모터를 작동하여 상부 샤프트에 연결된 베벨 기어를 통해 앵커 케이블이 지면에 닿을 때까지 내려가게 한다. (이때 모터의 동작에 따라 선형 나사가 시계 방향으로 회전하나, 이는 전개 완료 이후 메커니즘의 작용과 무관하다) 물체 주위에 앵커 케이블이 전개된 최종 범위는 포획하고자 하는 물체보다 넓게 하여 모든 앵커가 지상에서 대상을 에워쌀 수 있다.

D - 포획 상태 : 모든 앵커가 대상 주위로 잘 배치된 것을 확인한 후, 더블 샤프트 모터를 반시계방향으로 회전시킨다. 그에 따라 선형 나사가 반시계방향으로 돌고, Frame1은 다시 아래로 내려오며 구속 해제

된 압축 스프링을 다시 압축하여 링크 암이 접힌다.

E - 포획대상 근처로의 앵커 접근 : 포획대상보다 넓은 범위에 배치된 앵커 모터가 반시계방향으로 회전함에 따라 스플도 감아지며 앵커 케이블의 길이가 줄어들어 앵커가 물체 주위에 위치할 수 있게 된다.

F - 포획 완료 상태 : E단계를 확인한 후, 반시계방향으로 계속 모터를 작동시키면 앵커 케이블이 계속 감기며 앵커와 같이 올라가 그물(어망)의 원리로 물체를 포획할 수 있게 된다. 포획 이후에도 항력 감소와 본체의 흔들림 방지할 수 있도록 모터를 반시계방향으로 회전시켜 드론의 무게중심 위치에 가까이 배치될 수 있도록 한다.

## 3. 분석 및 시뮬레이션

### 3.1 질량 결정 및 구조 분석

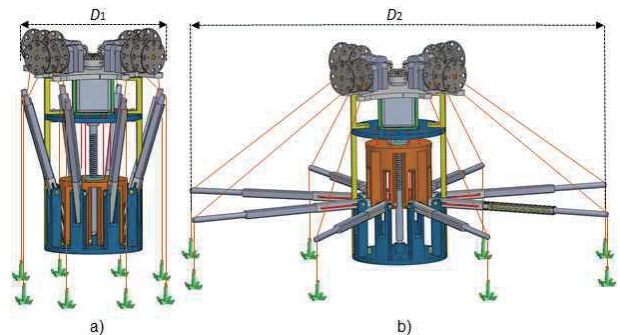


Fig. 6 Schematic diagrams for shape change and load analysis according to the condition  
a) Folded configuration  
b) Deployed configuration

하중 분석을 위해 Fig. 6과 같이 한 개의 모터와 케이블러 와이어로 구성된 드론 탑재체로서의 포획 메커니즘을 설계하여 나타내었다. 실험에 활용한 드론(DJI S900)의 제원을 살펴보면 포획할 대상의 최대 탑재 가능 무게는 4.9kg이다. 설계한 프로토타입의 무게가 1.034kg, 모터(IG-32RGM 03TYPE)의 무게가 0.366kg인 점을 바탕으로 구동의 신뢰성 제고를 위해 포획할 대상의 무게를 3kg으로 설계하였다. 포획 가능한 최소 폭( $D_1$ )을 지니는 물체를 포획하고 끌어올리는

데 소요될 힘( $\vec{F}_1$ )과 포획 가능한 최대 폭인 전개 완료된 상태( $D_2$ )로 정하고 이때  $\vec{F}_1$ 와 비교하여 발생할 사잇각( $\alpha$ )에 따라 소요되는 힘( $\vec{F}_2$ )을 Fig. 7과 같이 나타내었고 계산하였다.

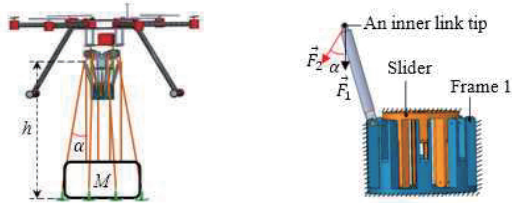


Fig. 7 Force diagram for Frame1 under folded condition

$$\vec{F}_1 = Mg/8 \quad (1)$$

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_1 / \cos(\alpha) = \vec{F}_1 / \cos(\tan^{-1}((D_2 - D_1)/2h)) \quad (2)$$

포획 가능한 최대 폭의 물체를 끌어올릴 때 구조에 가해지는 힘( $\vec{F}_2$ )은  $M=3kg$ ,  $\alpha=0.04rad$ ,  $D_1=150mm$ ,  $D_2=470mm$ ,  $h=4000mm$  일 때  $3.68N$ 이다. 하지만 이때 드론에 장착된 포획 메커니즘과 지상 사이에 높이차( $h=4000mm$ )가 크고  $\alpha$ 가 작아 두 힘( $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ )의 크기가 거의 같은 것을 확인할 수 있다.

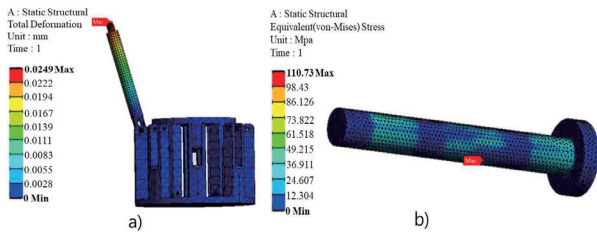


Fig. 8 Static structural analysis for Frame 1  
a) Distribution of material deformation  
b) Distribution of stress

가정한 조건에서 메커니즘에 가장 큰 힘( $\vec{F}_2$ )이 구조에 가해질 때 구조물에 가해지는 변형과 응력분포를 Fig. 8에 나타냈다. 링크 암의 최대 변위는 0.02mm이고, 내부 링크가 받는 최대 응력은 110MPa이다. 알루미늄(6061)의 한계 응력인 276MPa이므로 약 2.5의 안전계수를 확보했다. 자체 중량이 작은 케블러 와이어와 8개의 전개된 링크 암을 활용하여 힘을 분산함으로써 탑재체에 걸리는 하중의 영향을 최소화했다. 따

라서 드론의 제원에 안내된 포획 가능한 최대 무게를 반복적으로 20회 포획했으나 파손이나 변형이 발생하지 않았다.

얇은 케블러 와이어를 사용함으로써 탑재 중량 한계 개선에는 유리한 점이 있지만, 동시에 드론의 이동이나 외란(disturbance) 등에 영향을 받기 쉽다는 단점도 있다. 메커니즘의 구현에 악영향을 초래할 수 있는 조건들에 대해 작동 신뢰성을 확보하기 위해 포획 임무에 어떠한 영향을 끼칠지를 계산했다.

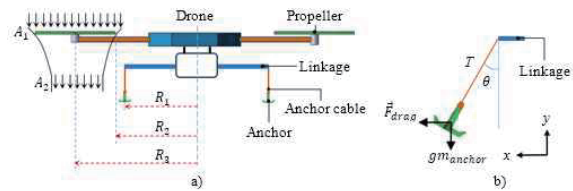


Fig. 9 Diagrams of values reflected for anchor design  
a) Airflow visualization in deployed state  
b) Load diagram for an anchor

드론의 모터와 프로펠러에 의해 포획 메커니즘 장치가 영향받지 살피기 위해 Fig. 9a에  $A_1$ 은 모터와 프로펠러의 회전에 의해 발생하는 바람장(wind field)의 면적이고  $A_2$ 는 모터와 프로펠러의 회전에 의해 바람의 영향을 받는 임의 공간의 바람장 면적으로 나타났다.

포획 메커니즘의 전개 과정이 드론이 자세 유지하는 상태(호버링 상태)에서 이뤄지는 점을 감안하면  $R_1=235mm$ ,  $R_2=265mm$ ,  $R_3=450mm$ 로 설계하고 제작한 포획 메커니즘 프로토타입은 모터와 프로펠러의 회전에 의해 발생하는 내리흐름(downwash)의 영향을 받지 않는다.[14]

캡처 메커니즘에 적용될 앵커의 이상적인 무게( $m_{anchor}$ )는 앵커 케이블이 얇고 가벼우며 비탄성의 재질인 점을 감안하여 Fig. 9b와 같이 나타내어 계산했다. 실제 야외 환경에서는 바람의 방향과 세기가 다양하나 상하 방향의 바람은 드론의 비행 안전성과 포획 메커니즘의 운용 각각에 미치는 영향이 적다. 다만  $x$ 축 방향으로 부는 드론의 비행 안전성에 영향을 줄만큼의 갑작스러운 돌풍은 고려해야 할 대상이다. 실험 지역의 1년 평균 기상 데이터를 활용하여 이상적인 앵커의 형태와 무게를 설계하였다. 기온이  $20^\circ C$ 일 때를

가정하여 포획할 때 바람의 직접적 영향을 받는 앵커의 항력계수 계산에 필요한 각 상수는 Table 2에 나타내었다. [15-18]

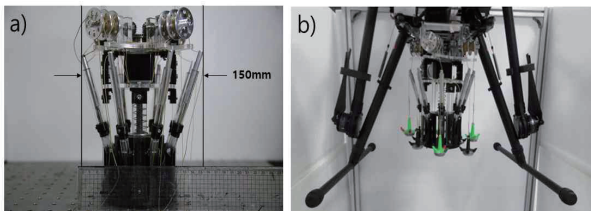
**Table 2** Variable settings required for calculation of drag coefficients

공기 밀도( $\rho$ )	항력계수( $c_d$ )	기압( $P$ )	속도( $V$ )
$\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$	1.3	101312 Pa	$V = 5 \text{ m/s}$

설계한 앵커 카드 모델이 바람에 닿는 면적  $A_{anchor} = 3.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ 을 적용하면 식 (3)의  $m_{anchor}$ 의 힘 평형 방정식을 통해 이상적인 무게 값을 얻을 수 있다. 이론값을 토대로 앵커를 제작하여 실험하여 지상 물체 포획을 성공적으로 수행함으로써 타당성을 입증하였다.

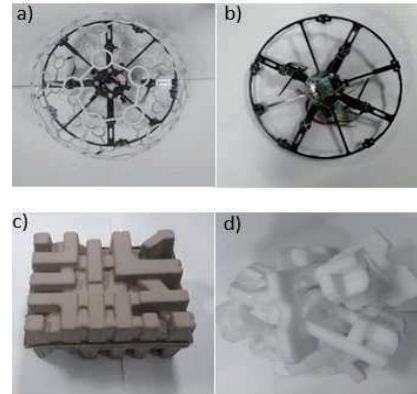
$$m_{anchor} = F_{drag} / g \tan(\theta) = 0.0043 \text{ kg} \quad (3)$$

#### 4. 실험과 결론



**Fig. 10** Final prototype of capturing mechanism  
 a) Assembled prototype  
 b) Mounted prototype

Fig. 10과 같이 설계 내용 검증을 위해 제작한 프로토타입은 드론에 탑재하였다. 제안하는 메커니즘은 전개(D2:470mm)되면서 기존의 접혀있는 상태(D1:150mm)에 비교해 3.13배 전개되는 방식으로, 150mm와 470mm 이하의 치수를 갖는 임의의 형태의 물체를 Fig. 11의 물체로 선정하여 포획하였다.



**Fig. 11** The arbitrary targets for outdoor experiment

실제 상황에 대한 적용 가능성 검토를 위해 야외에서 비행이 합법적으로 가능한 공터에서 야외실험을 Fig. 12과 같이 진행하였다. 각 실험은 실제로 물체와 지면이 닿아있는 부분과 드론과 메커니즘의 결합부를 기준으로 설계한 높이 4m 상공에서 진행했다.

케이블의 꼬임을 염두에 두고 초기 단계부터 설계하여 실제 비행시험을 진행한 결과, 5m/s 이내의 돌풍이나 갑작스러운 바람에 케이블이 꼬이는 현상은 설계적으로 방지할 수 있었다. 이는 링크 간 간격이 적절하고 앵커의 무게와 케이블의 길이가 적절히 산정되었기 때문이다. 다만 ‘접힌 상태’의 메커니즘을 전개해 대상을 포획할 때 8개의 모든 앵커가 포획하고자 하는 물체 주위에 고르게 분포되게 하는 데 바람 등의 외란이 불리한 조건으로 작용하는 예도 있었다. 이를 해결하기 위해 hook을 갖는 앵커를 제작하여 8개의 앵커 중 일부라도 지상의 물체의 구조적 공간(公間)에 도달하여 포획에 유리한 안정된 고정점(fixed point)으로서 작용할 수 있도록 하였다.





**Fig. 12** Field test of the drone with capturing device

목표 지점까지는 접힌 채로 비행하여 목표 지점에서 전개하는 케이블과 앵커를 이용한 새로운 방식의 드론용 포획 메커니즘을 제시하였다. 기존에 논의된 적 없는 유연한 케이블을 활용하여 지상의 물체를 성공적으로 포획하였으며 꼬임의 문제를 특정 조건 내에서 해결하였다. 한 개의 모터를 사용하여 작동 원리를 간단하게 구성하여 고장 발생율을 최소화하였고 접힌 형태로 드론에 탑재하고 이동하여 비행 안정성을 확보한 채 목표 지점에 도달하여 전개할 수 있도록 하였다. 또 드론에 알맞은 탑재체로써 적재 중량 한계를 극복하기 위해 단순화된 메커니즘을 활용해 자체 무게를 최소화하였다. 향후 연구에서는 케이블의 꼬임을 보완하고 예측 못 하는 바람이 부는 실제 외부 환경에서의 적용에 대한 어려움을 극복하고자 한다. 나아가서는 전방위적인 군수지원이 필요할 것으로 예측되는 미래 군수지원환경을 염두에 두어 대두되고 있는 군 장비유지비 증가와 인력의 감축이라는 문제를 드론용 포획 메커니즘을 통해 효과적으로 군수지원능력을 높이는 데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.[19]

## 후 기

본 연구는 2019 한국항공대학교 교비 연구비 지원 과제로 수행되었습니다.

<sup>1</sup> 저자들은 이 논문에 똑같이 기여했습니다.

## References

- [1] Liew, C. F., DeLatte, D., Takeishi, N., & Yairi, T.: Recent Developments in Aerial Robotics: An Survey and Prototypes Overview. arXiv preprint arXiv:1711.10085 (2017)
- [2] Thomas, J., Polin, J., Sreenath, K., & Kumar, V.: Avian-inspired grasping for quadrotor micro UAVs. In ASME 2013 international design engineering technical conferences and computers and information in engineering conference (pp. V06AT07A014-V06AT07A014). American Society of Mechanical Engineers (2013, August)
- [3] Thomas, J., Loianno, G., Sreenath, K., & Kumar, V.: Toward image based visual servoing for aerial grasping and perching. In Robotics and Automation (ICRA), 2014 IEEE International Conference on (pp. 2113-2118). IEEE (2014, May)
- [4] Doyle, C. E., Bird, J. J., Isom, T. A., Johnson, C. J., Kallman, J. C., Simpson, J. A., ... & Minor, M. A.: Avian-inspired passive perching mechanism for robotic rotorcraft. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 4975-4980). IEEE (2011, September)
- [5] Mellinger, D., Lindsey, Q., Shomin, M., & Kumar, V.: Design, modeling, estimation and control for aerial grasping and manipulation. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on (pp. 2668-2673). IEEE (2011, September)
- [6] Fiaz, U. A., Toumi, N., & Shamma, J. S.: Passive aerial grasping of ferrous objects. IFAC-PapersOnLine, 50(1), 10299-10304 (2017)
- [7] Kessens, C. C., Thomas, J., Desai, J. P., & Kumar, V.: Versatile aerial grasping using self-sealing suction. In Robotics and Automation (ICRA), 2016 IEEE International Conference on (pp. 3249-3254). IEEE (2016, May)
- [8] Pounds, P. E., Bersak, D. R., & Dollar, A. M.: Practical aerial grasping of unstructured objects. In Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2011 IEEE Conference on (pp. 99-104). IEEE (2011, April)

- [9] Pounds, P. E., Bersak, D. R., & Dollar, A. M.: Grasping from the air: Hovering capture and load stability. In Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on (pp. 2491-2498). IEEE (2011, May)
- [10] Orsag, M., Korpela, C., & Oh, P.: Modeling and control of MM-UAV: Mobile manipulating unmanned aerial vehicle. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 69(1-4), 227-240 (2013)
- [11] Lin, S., Wang, J., Yang, W., & Xia, G.: Toward autonomous rotation-aware unmanned aerial grasping. arXiv preprint arXiv:1811.03921 (2018)
- [12] Ramon Soria, P., Arrue, B. C., & Ollero, A.: Detection, location and grasping objects using a stereo sensor on UAV in outdoor environments. Sensors, 17(1), 103 (2017)
- [13] <https://www.dji.com/kr/spreading-wings-s900>
- [14] Lemieux, J.: DJI S-1000 Spreading Wings Octocopter: Determination of Rotor Downwash Slipstream Size (2016)
- [15] Blevins, R. D.: Applied fluid dynamics handbook. New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1984, 568 p (1984)
- [16] Hoerner, S. F., & Borst, H. V.: Fluid-Dynamic Lift, Practical Information on Aerodynamic and Hydrodynamic Lift. BORST (HENRY V) AND ASSOCIATES WAYNE PA (1975)
- [17] [https://www.engineeringtoolbox.com/pressure-d\\_587.html](https://www.engineeringtoolbox.com/pressure-d_587.html)
- [18] <https://www.climate-charts.com/World-Climate-Maps.html#wind-speed>
- [19] <http://www.kida.re.kr/firt/board/firtNormalBoardDetail.do?do?sidx=382&idx=1679&depth=4://>