

에너지 하베스팅을 위한 쿼드로터의 퍼칭 메커니즘 연구

A Perching Mechanism of a Quadrotor for Energy Harvesting

최홍철¹·신내호[†]Hong-Cheol Choi¹, Nae-Ho Shin[†]

Abstract: Quadrotor with limited flight time due to battery level can have the extended mission life by applying energy harvesting technology. Bio-inspiration from the birds' locomotion of flight and perch-and-stare can make energy consumption efficient, and energy harvesting technology can generate energy. In order to charge the battery with solar power, the drones are required to be in a position without shade. In the mountainous terrain, a novel mechanism is required in order to be located stably at the top of the tree or the inclined rock. In this study, we propose an analysis of the origami structure and the concept design of the perching mechanism with two stable equilibrium states. The origami structure composed of compliant material can be applied to the perching mechanism that can be locked passively. Moreover, the experimental results of the trajectory and perching test are discussed.

Keywords: Perching mechanism, Origami, Quadrotor

1. 서 론

4개의 날개를 갖는 쿼드로터는 전기 배터리를 사용함으로써 소음을 줄일 수는 있으나, 비행시간이 30분 이내로 매우 제한적이다¹⁾. 새와 같이 날 수 있는 동물들은 항상 비행을 유지하는 것이 아니라 필요와 상황에 따라 비행(flight)과 걸터앉기(perch-and-stare)를 교대로 행동한다. 생체모방 기술을 기반으로 이 거동을 쿼드로터에 적용함으로써 에너지를 더 효율적으로 사용할 수 있다.

동시에 광전을 활용하는 에너지 하베스팅 기술²⁾을 쿼드로터에 접목하면 걸터앉은 상태에서 충전할 수 있다. 이를 위해서는 그늘이 없는 나무의 꼭대기나 거친 표면의 암석 위에서 안정적으로 착륙할 수 있는 새로운 개념의 퍼칭 메커니즘이 요구된다. 이를 통해 정찰 및 감시용 쿼드로터는 임무수명(mission life)을 연장할 수 있을 뿐 아니라 기체의 소음 없이 착륙하여 감시함으로써 임무에 더 효과적일 수 있다. 본 연구에서 제시하고자 하는 모습은 [Fig. 1]과 같다.

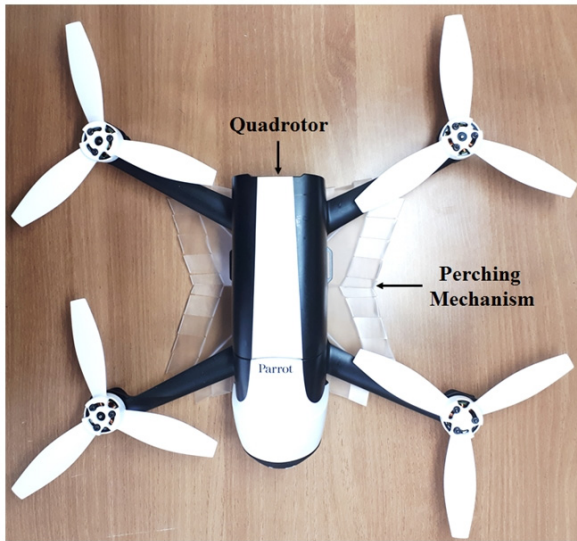
새가 나뭇가지나 헛대에 앉아서 휴식을 취하거나 주변을 살피는 활동으로부터 영감을 받아, 드론의 퍼칭 메커니즘에 대한 많은 연구가 진행되었다. 소형 글라이더가 다양한 재질의 벽면에 퍼칭할 수 있는 가벼운 메커니즘에 대한 연구가 진행되었는데, 기체의 앞부분이 벽면과 충격할 때의 높은 임팩트 힘을 이용하고자 하였다³⁾. 퍼칭을 위해 드론의 하단부에 발톱(claw)이 결합된 그리퍼(gripper)를 부착하고 제어할 수 있는 알고리즘에 대한 연구가 진행되었다⁴⁾. 또한 기존의 퍼칭 메커니즘이 굉장히 정확한 동역학 제어가 요구될 뿐 아니라 높은 에너지 충격에도 견고한 메커니즘이 필요하다는 문제점을 해결하기 위해, 유연하게 전개하고 스스로 정렬하는 메커니즘에 기존의 발톱(claw)이 아니라 섬유 기반의 접착제를 활용한 연구가 제시되었다⁵⁾. 새로운 시도로서 형상기억합금(Shape Memory Alloy)을 이용하여 새와 같이 다양한 표면에 대해 다재다능하게 착륙할 수 있는 퍼칭 메커니즘이 제시되었는데, 생체모방의 접착제와 결합되어 거친 암석이나 나무에 거꾸로도 퍼칭이 가능하였다⁶⁾. 나뭇가지나 로드(rod)에 퍼칭이 가능하며 최적화를 통해 움켜쥐는 힘(grasping force)을 최대화하고자하는 연구 역시 진행되었다⁷⁾. 마지막으로 벽면에 착륙 및 이륙할 뿐 아니라 등반을 통해 위치를 재조정할 수 있는 로봇이 제시되었고, 임무 수명을 획기적으로 증가시켜줄 것으로 기대된다⁸⁾.

Received : Aug. 6. 2018; Revised : Aug. 21. 2018; Accepted : Aug. 21. 2018

※ This work was supported by 18-MS-28 research fund of Korea Military Academy

1. Lecturer, KMA, Seoul, Korea (choihc32@gmail.com)

† Professor, Corresponding author: Physics and Chemistry, Korea Military Academy, Seoul, Korea (nhshin@kma.ac.kr)



[Fig. 1] A Quadrotor with proposed perching mechanism

로봇이나 동물이 마주칠 수 있는 환경은 매우 다양하고 쿼드콥터가 이·착륙하는 방법 역시 다양하다⁹⁾. 그 중에서 에너지 하베스팅을 위해 쿼드콥터가 안착해야 하는 목표 장소(target)는 그들이 없어야하므로 나뭇가지와 잎이 풍성한 나무 꼭대기(tree bank) 또는 거칠고 경사진 암석과 바위 등이다. 이 목표 장소에 안착하기 위해 기존의 연구와 달리 다음과 같은 사항이 요구된다.

- 경량 재료를 사용한 간단한 메커니즘
- 별도의 구동 없이 수동적으로 잠가지는(locking) 메커니즘
- 임의지형에 유연하게 부착하는 적응형 메커니즘
- 임의의 나뭇가지에 걸리지 않는 구조(structural) 메커니즘
- 직접 아래로(direct descent) 착륙하는 메커니즘

본 연구에서는 위와 같은 특징을 구현하여 소형 쿼드콥터에도 적용할 수 있는 퍼칭 메커니즘을 구현하고자 하였다. 이를 위해 본 논문에서는 쌍안정 구조를 갖는 종이접기 메커니즘을 활용하였다. 이를 퍼칭 메커니즘에 적용하기 위해 먼저 종이접기 구조를 수학적으로 정의하고 접힌 정도에 따른 궤적을 분석한다. 이를 바탕으로 유연한 재료를 활용하여 쌍안정 구조를 갖는 종이접기 형태를 구현하고 이때의 궤적을 분석한다. 이어서 퍼칭 확률을 증대시킬 수 있는 접촉 길이를 증대시키고, 수동 잠김(passive locking)을 위한 적정 구조를 결정하기 위해 초기 각도와 모서리 사이의 거리 등의 변수를 고려하여 종이접기 구조를 분석한다. 종이접기 구조를 퍼칭 메커니즘으로 구현하기 위해 구동부, 관절 그리고 유연한 발톱의 설계를 제시한다. 마지막으로 모델링 궤적과 실제 궤적을 비교 분석하고, 퍼칭 메커니즘의 다양한 표면에서의 테스트 결과를 제시하고 이에 대해 논의한다.

2. 메커니즘 디자인

2.1 쌍안정 종이접기 구조

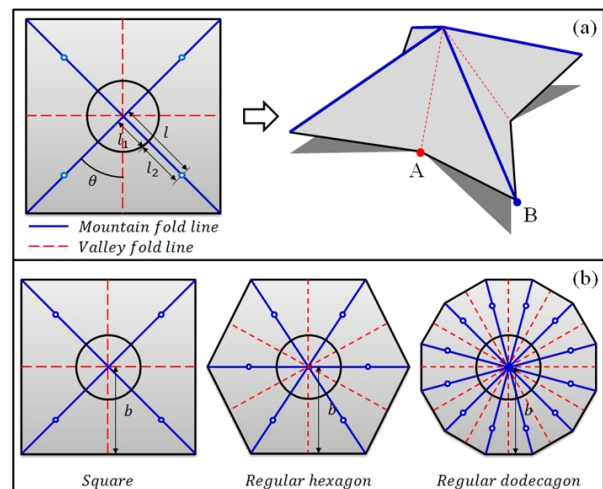
종이접기를 통해 2차원에서 3차원의 구조로 만들어 메커니즘으로 활용한 연구가 진행되었다¹⁰⁾. [Fig. 2 (a)]에는 종이접기를 위한 패턴과 접은 후의 초기 구조가 나타나있다. 패턴에서 파란색 실선은 바깥쪽으로 나오는 산접기 선(mountain fold line)이고, 빨간색 점선은 안쪽으로 들어가는 계곡접기 선(valley fold line)이다. 사각형 뿐 아니라 여러 다각형에 대해서도 종이접기가 가능하며, [Fig. 2 (b)]에는 정사각형과 계곡접기 선 길이가 b 로 같은 정육각형과 정십이각형이 나타나있고, 각이 많을수록 복잡성이 점점 증대되는 것을 확인할 수 있다.

정사각형의 패턴을 접었을 때 꼭짓점의 궤적을 수학적으로 정의하기 위해 패턴의 일부를 3차원 상에 표현하면 [Fig. 3 (a)]과 같다. 각 점선은 점 A와 점 B의 궤적을 의미하며 이를 정의하기 위한 변수가 표현되어 있다. 이를 통해 위치벡터를 정의할 수 있는데, 점 A의 위치벡터는 파란색 실선과 빨간색 실선의 롤 각(roll angle) α, β 로도 표현할 수 있다.

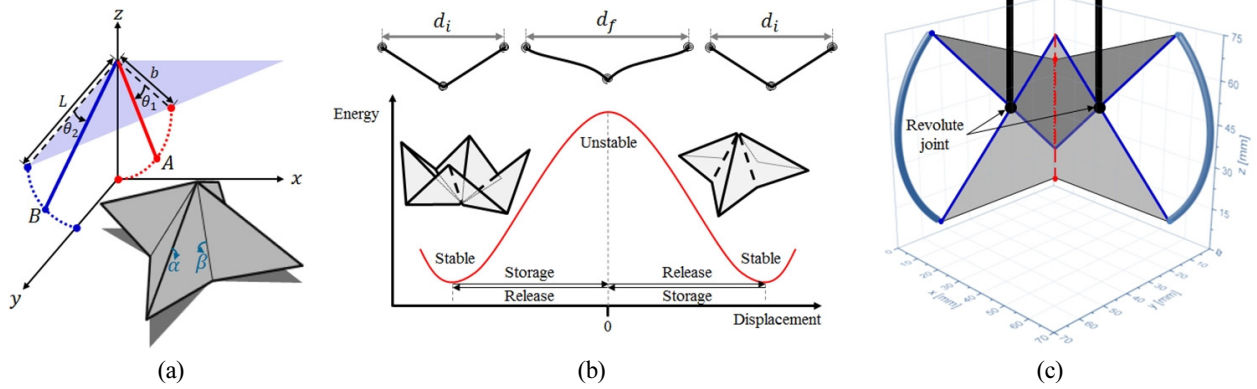
$${}^B P = \begin{pmatrix} 0 \\ L \cos \theta_2 \\ b - L \sin \theta_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$${}^A P = \begin{pmatrix} b \sin \theta \cos \theta_1 \\ b \cos \theta \cos \theta_1 \\ b(1 - \sin \theta_1) \end{pmatrix} = b \sin \theta \begin{pmatrix} \cos \alpha \\ \sin \alpha \sin \beta + \cos \beta \\ \sin \alpha \cos \beta - \sin \beta \end{pmatrix} \quad (2)$$

위의 식으로부터 α, β 와 θ_1, θ_2 가 같다는 관계를 도출할 수 있을 뿐 아니라 제한조건인 아래의 식으로부터 α 와 β 의 관계를 수치적으로 도출할 수 있다. 이를 통해 일정한 각으로 접었



[Fig. 2] (a) A square pattern and origami structure. (b) The patterns of various n-gons.



[Fig. 3] (a) Coordinates, points, and variables of the origami. (b) Energy states of the bistable structure. (c) Trajectory of the vertex when the revolute joints are inserted.

을 때 종이접기 구조의 초기 상태뿐 아니라 면(facet) 사이의 각을 쉽게 정의할 수 있다.

$$\cos \frac{\pi}{n} = \sin \alpha \sin \beta + \cos \alpha \cos \beta \cos \frac{\pi}{n}, n \text{은 각의 개수} \quad (3)$$

쌍안정 구조는 두 개의 안정된 상태를 가지는데 하나의 상태에서 다른 안정된 상태로 빠른 반응속도로 상호 전환이 가능하다. 이전 연구에서는 이를 활용하여 파리지옥 로봇¹¹⁾과 점핑 메커니즘이 개발되었다¹²⁾. 앞서 설명한 종이접기 패턴을 페트 필름(PET film)과 같은 유연한 소재에 적용하여 구조를 만들게 되면, 접힌 선(fold line)이 링크(link)의 역할을 하고 면(facet)과 접힌 선이 비틀림 용수철(torsion spring)의 역할을 하게 된다.

[Fig. 3 (b)]에서 초기 상태가 결정되었을 때 가질 수 있는 두 개의 안정된 상태가 나타나 있다. 각 상태에서 외력을 받게 되면 각각의 선(link)이 회전하면서 각 꼭짓점 사이의 간격이 달라지면서 유연한 소재가 휘게 된다. 따라서 안정된 상태에 점 접 불안정한 상태가 되는데, 계속 외력을 받게 되면 가장 불안정한 상태를 지나게 되고 빠른 반응속도로 다른 안정된 구조로 바뀌게 된다. 반대 방향으로 외력을 받게 되면 구조에 에너지가 저장되었다가 방출되는 과정이 반복되면서 다시 원래의 상태로 돌아오게 된다.

두 개의 안정된 구조 간 전환이 기계적으로 가능하기 위해서는 [Fig. 2]의 패턴에서 검정색 원을 제거하고 파란색 원에 회전관절(revolute joint)을 추가해야하며, 검은색 원과 파란색 원 사이의 관계는 아래의 조건을 만족해야 한다.

$$l \cos \beta_0 \geq l_1, \beta_0 \text{는 접힌 초기 각도} \quad (4)$$

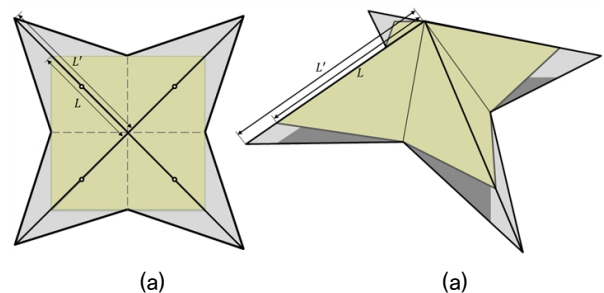
위의 조건을 만족해야 불안정한 상태에서 구조적인 충돌 없이 다른 상태로의 전환이 이루어질 수 있다. 정사각형 패턴에서 지지대의 끝부분에 연결된 회전관절이 결합되면 파란색

선(mountain fold line)은 마치 지렛대처럼 움직이게 된다. 따라서 패턴의 중심에서 1/3지점에 지지대를 삽입하고 회전하게 되면 꼭짓점의 위치벡터는 아래와 같고 [Fig. 3 (c)]와 같은 궤적이 되는 것을 확인할 수 있다.

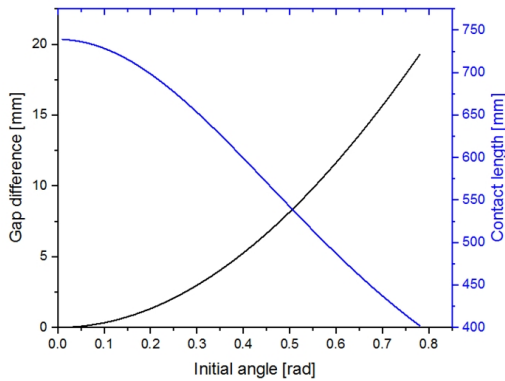
$${}^B P' = \begin{pmatrix} 0 \\ l \cos \beta_0 + (L-l) \cos \beta \\ b - l \sin \beta_0 + (L-l) \sin \beta \end{pmatrix}, -\frac{\pi}{6} \leq \beta \leq \frac{\pi}{6} \quad (5)$$

2.2 구조 분석

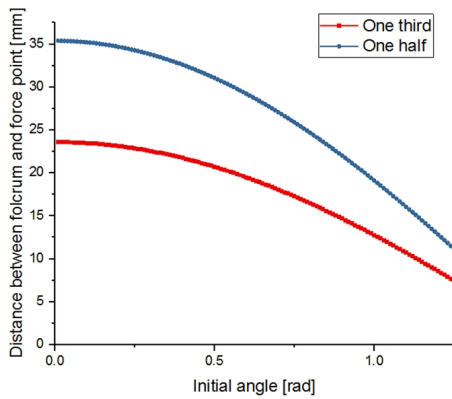
[Fig. 3]에서 점 A와 점 B의 궤적을 보면, 두 점의 z축 좌표가 완전히 퍼지거나 접혔을 때를 제외하고는 다르다는 것을 알 수 있다. 즉, [Fig. 2 (a)]에서 빨간색 점 A와 파란색 점 B가 동일 평면상에 존재하지 않게 된다. 구조의 아래 부분에 퍼칭을 위한 발톱이 부착된다고 했을 때, 서로 다른 높이로 인하여 평평한 지형에 대해 표면을 잡을(engage asperities) 가능성이 떨어지게 된다. 따라서 아래의 모서리가 동일 평면상에 있기 위해 기존 반경의 길이(L)를 수정하고, 수정된 꼭짓점으로부터 점 A까지 연결하여 [Fig. 4 (a)]와 같이 패턴을 수정할 수 있다. 이때, 수정된 반경(L')은 정사각형의 패턴을 접을 각도(beta_0)가



[Fig. 4] (a) Modified square pattern and (b) all the edges are on the same plane after folding process.



[Fig. 5] Gap difference and contact length graph for initial angle.



[Fig. 6] Distance between revolute joint and actuation part with regard to initial angle.

결정되면 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$L' = \frac{b \sin \alpha_0}{\sin \beta_0} \tag{6}$$

이를 적용하여 패턴을 수정하고 구조를 만들게 되면 모든 모서리가 동일한 평면상에 위치할 수 있게 되고, 발톱이 표면을 잡을 가능성 역시 증가하게 된다.

구조 분석에서 고려해야할 중요 요소는 꼭짓점 간의 거리와

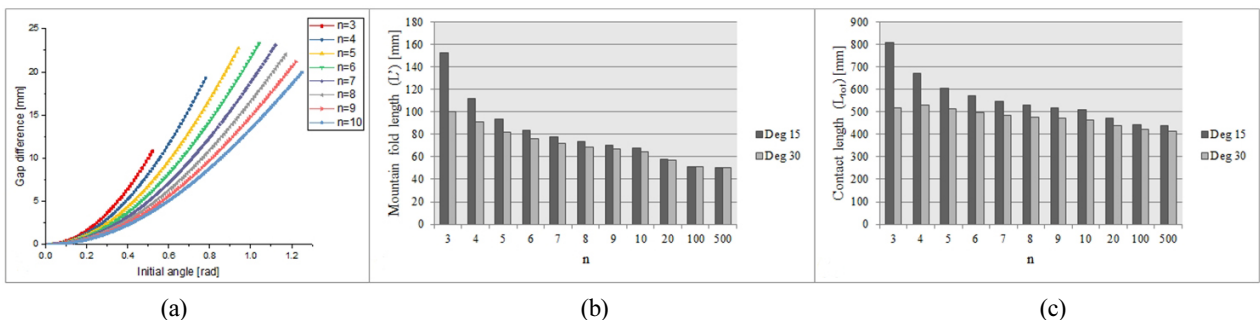
구조가 표면과 접촉하는 모서리 길이이다. 꼭짓점 간의 거리 변화량은 비틀림 용수철 역할을 하는 선과 면에 저장되는 에너지의 양을 나타내는 척도가 되며, 표면과 접촉하는 모서리 길이는 부착할 수 있는 발톱의 수와 연관이 되므로 표면을 잡을 확률과 관련이 있다. 두 요소는 아래의 식과 같이 도출이 가능하며 [Fig. 5]에서 초기 접히는 각도에 따라 변화하는 것을 확인할 수 있다.

$$\Delta d = d_f - d_i = 2(L-l) \sin \frac{\pi}{n} (1 - \cos \beta_0) \tag{7}$$

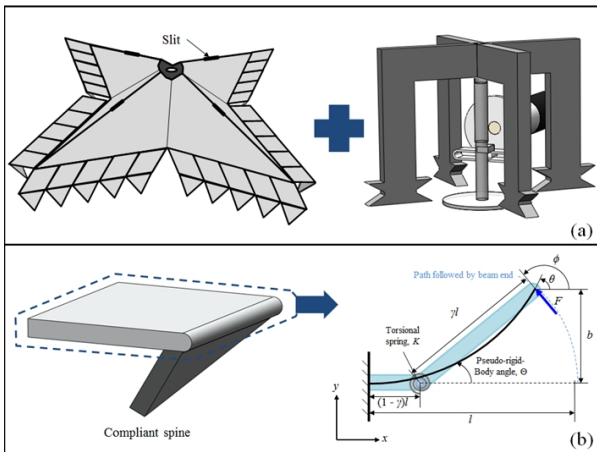
$$L_{tot} = \frac{2nb}{\sin \beta_n} \sqrt{\sin^2 \alpha_0 + \sin^2 \beta_0 - 2 \sin \alpha_0 \sin \beta_0 \cos \frac{\pi}{n}} \tag{8}$$

따라서 둘 모두 적정 수준으로 결정되어야 하며, 정사각형의 경우는 약 30도에서 두 요소가 교차하는 것을 알 수 있다. 여기서 간과하면 안 되는 추가 요소는 회전관절이 삽입되는 위치이다. 회전관절은 지렛대의 받침점(fulcrum) 역할을 하게 되는데 [Fig. 6]에서와 같이 초기 각도가 커지면 식 (4)를 만족하기 위해 힘점까지의 거리(l_2)가 짧아지게 되므로 다른 구조로 전환시키기 위해 요구되는 힘이 커지게 된다. 따라서 설계시 구동기의 출력과 연계하여 고려되어야 한다.

앞서 언급한 바와 같이 사각형 뿐 아니라 다양한 다각형으로도 종이접기 구조를 제작할 수 있으므로 어떤 다각형을 선택할 것인지에 대한 구조 분석 역시 필요하다. [Fig. 7 (a)]에는 각의 개수(n)가 주어질 때, 초기각도에 대한 꼭짓점 간의 거리 변화량을 보여준다. 각의 개수가 많아질수록 초기 각도에 따른 기울기가 점차 감소하는 것을 알 수 있고, 육각형과 칠각형까지 간격 변화량이 증가하여 최댓값이 나타났다가 이후 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 [Fig. 7 (b)와 (c)]에는 각의 개수가 달라짐에 따라 수정된 산접기 선(L')의 길이와 표면과 접촉하게 되는 모서리의 전체 길이(L)가 나타나 있다. 짙은 회색은 초기 접은 각도가 15도 일 때를, 옅은 회색은 30도 일 때를 보여준다. 두 경우 모두 각의 개수가 많아짐에 따라 반경(L')은 점차 작아져 길이 b 에 근접하고, 원과 유사한 형태가 되며, 이에 따라 전체 모서리 길이도 각의 개수가 많아짐에 따



[Fig. 7] (a) Gap difference, (b) mountain fold length and (c) total contact length of various polygons for initial angle.



[Fig. 8] (a) Origami structure and mechanical components for perching mechanism. (b) Pseudo-rigid-body model of the compliant spine.

라 점차 감소하게 된다. 따라서 각의 개수는 표면접촉 길이나 구조의 복잡성을 고려했을 때 작은 것이 더 유리하다고 할 수 있다. 초기각도(β_0) 30도가 삼각형은 완전히 접힌 상태이기 때문에 사각형에 비해 접촉 길이가 짧은 것을 확인할 수 있다.

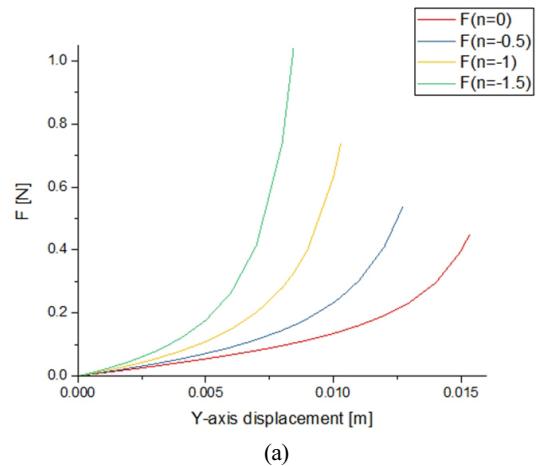
2.3 기계요소 설계

앞서 분석한 구조를 바탕으로 퍼칭 메커니즘을 구현하기 위해서는 추가적인 기계요소가 요구된다. [Fig. 8 (a)]에는 정사각형 종이접기 구조에 바닥과 접촉하는 모든 모서리에 유연한 발톱이 결합되어 있는 것을 볼 수 있고, 우측에는 이를 구동하기 위한 지지대, 슬라이더(slider) 메커니즘 그리고 수동적으로 작동하기 위한 트리거(trigger)를 볼 수 있다. 구조의 슬릿(slit)에 회전 관절 역할을 하는 지지대가 결합되는데, 지지대의 아랫부분에는 구조접기 각도(β_0)를 고려하여 구조가 범위를 벗어나지 않게 막는 역할(stopper)을 할 수 있도록 설계하였다. 슬라이더 메커니즘은 이륙 전 퍼칭 메커니즘을 준비상태로 되돌리기 위해 필요하다.

퍼칭해야 할 표면은 지형에 따라 달라지므로 유연하게 적응할 수 있어야 한다. 따라서 [Fig. 8 (b)]에는 하단 모서리에 결합되어 있는 하나의 유연한 발톱이 제시되어 있고, 그 설계를 위한 수치해석적 접근인 유사강체모델이 제시되어 있다¹³⁾. 한 쪽이 고정되어 있는 보(cantilever)에 대해 y축 변위(b)에 따른 힘의 크기와 휘었을 때의 각도를 도출하여 설계 시 고려하고자 하였다. 이를 위해 모델에 적용하여 수식으로 표현하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{K_\theta \Theta EI}{l^2 \sin(\phi - \Theta)} \tag{9}$$

$$\theta_o = c_\theta \Theta \tag{10}$$



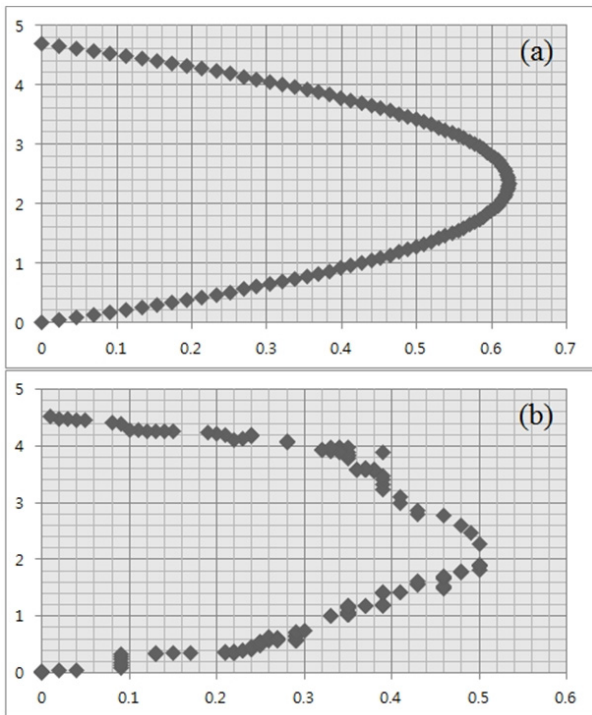
[Fig. 9] (a) Force and (b) curved angle results with regard to y-axis displacement.

여기에 수치해석 데이터(numerical data)를 대입하여 계산하게 되면 [Fig. 9] (a)와 (b)와 같이 y축 변위에 대한 힘과 각도(θ_o)의 변화를 구할 수 있다. n은 가해지는 힘의 수직요소에 대한 수평요소의 비율을 의미하며, θ_o 는 보가 점점 휘면서 수평방향에 대해 이루고 있는 각도를 의미한다. 보가 휘어질 때 아래에 부착된 발톱 역시 회전하게 되므로, 이를 고려하여 특정 상태에서의 변위와 힘을 도출할 수 있다.

3. 실험 및 결과

3.1 실제 메커니즘 궤적 확인

앞서 분석한 결과를 바탕으로 종이접기 구조를 페트필름으로 제작하여 두 개의 안정된 상태를 반복할 때의 궤적을 확인하고자 하였다. 이를 위해 비디오를 분석하는 오픈 소스 프로그램 키노베아(Kinovea)를 사용하여 꼭짓점의 수직 및 수평방향의 궤적을 확인하였다.



[Fig. 10] Trajectory of the vertex. (a) Modeling data and (b) experimental data.

[Fig. 10]에 모델링 결과와 비디오 분석 결과를 비교할 수 있으며, 거의 유사한 궤적을 갖는 것을 확인할 수 있다. 쌍안정구조에서 하나의 안정된 상태에서 다른 안정된 상태로 전환될 때는 가장 불안정한 지점을 지나야 하는데, 이 때 빠른 속도로 전환되면서 마커의 추적(tracking)에 오차가 있었던 것으로 추정된다. 또한 유연한 구조의 휨으로 인하여 실제 궤적의 x축 방향 이동거리가 모델링 결과에 미치지 못한 것으로 예상된다.

3.2 퍼칭 테스트

상용 쿼드콥터에 제작한 퍼칭 메커니즘을 부착하여 다양한 지형에 안착할 수 있는지 확인하였다. 먼저 [Fig. 11 (a)]는 암석에서 발톱이 표면을 잡고 있는 모습을 보여준다. 불규칙적인 표면을 따라 유연한 발톱의 휘어있는 정도가 다르며, 일부 발톱은 표면에 닿지 않은 경우도 있었다. (b)처럼 2층 난간에 앉은 경우에는 제한적인 면적으로 인해 표면에 닿지 못한 발톱이 상당히 많았으나 퍼칭하는데 크게 제한되지 않았다. (c)처럼 암석 뿐 아니라 자갈의 불규칙적으로 분포하는 경우에도 유연한 발톱으로 안정적으로 표면을 잡을 수 있었다. (d), (e)는 나무에 착륙하여 퍼칭하는 모습을 보여준다. 쿼드콥터의 무게를 버틸 수 있는 나뭇가지에서 제한적으로 착륙이 가능했다. 퍼칭이 된 상태에서는 표면을 잡은 힘으로 인해 최대



[Fig. 11] Perching test on the different surfaces. (a) Compliant spine on the rock and quadrotor with perching mechanism on (b) the rooftop and (c) a gravelly field. (d) Landing and (e) perching process on the tree bank.

출력으로도 이륙이 불가능하였고, 구조를 접은 후에 이륙이 가능했다.

4. 결론

도입부에서 쿼드콥터의 임무 수명(mission life)을 연장할 수 있는 방법으로 에너지 하베스팅 기술을 적용하는 방안에 대해 제시하였다. 새와 같은 동물이 나무 위나 헛대에 앉는 거동(perching locomotion)을 생체모방을 통해 기계적으로 구현하면, 광전(Photoelectricity)을 통해 에너지를 발생시킬 수 있고, 비행을 계속 유지하지 않으므로 에너지를 효율적으로 사용할 수 있다.

본 논문에서는 이를 위해서 그늘이 없고 태양이 잘 보이는 위치에 퍼칭할 수 있는 메커니즘의 설계를 제시하였다. 특히 산악지형에서 만나는 나무 꼭대기(Tree bank)나 거친 표면의 암석과 바위에 안착할 수 있는 요구조건을 제시하고, 이를 만족하는 개념 설계(concept design)와 시제품(prototype)을 제시하였다. 핵심이 되는 내용은 쌍안정 구조를 갖는 종이접기 구조의 정의 및 분석이며, 이를 고려한 퍼칭 메커니즘을 쿼드코

터에 부착하여 착륙 시 빠르게 구조가 전환되면서 퍼칭이 가능하였다. 추후 발전시키기 위해 유연한 구조체에 저장되는 에너지에 대한 정량적인 분석과 퍼칭 시 발톱이 튕겨져 나오는 현상(bounce off)에 대한 보완이 요구된다.

References

- [1] UAV coach, *Top RC Drones With a Camera Updated With New Drone Models for 2018*, [Online], <https://uavcoach.com/drone-with-camera-2018/>, Accessed: August 5, 2018.
- [2] J. A. Paradiso and T. Starner, "Energy Scavenging for Mobile and Wireless Electronics," *IEEE Pervasive Computing*, vol. 4, no. 1, pp. 18-27, Jan.-March, 2005.
- [3] M. Kovač, J. Germann, C. Hürzeler, R. Y. Siegwart, and D. Floreano, "A perching mechanism for micro aerial vehicles," *Journal of Micro-Nano Mechatronics*, vol. 5, no. 3-4, pp. 77-91, Dec., 2009.
- [4] D. Mellinger, M. Shomin, and V. Kumar, "Control of quadrotors for robust perching and landing," *International Powered Lift Conference*, Oct., 2010.
- [5] L. Daler, A. Klaptocz, A. Briod, M. Sitti, and D. Floreano "A perching mechanism for flying robots using a fibre-based adhesive," *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4433-4438, Karlsruhe, Germany, 2013.
- [6] A. Peyvandi, P. Soroushian, and J. Lu, "A versatile perching mechanism employing shape memory wires and bio-inspired adhesives," *Journal of Micro-Bio Robotics*, vol. 10 no. 1-4, pp. 55-67, Oct., 2015.
- [7] W. Chi, K. H. Low, K. H. Hoon, and J. Tang, "An optimized perching mechanism for autonomous perching with a quadrotor," *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 3109-3115, Hong Kong, China, 2014.
- [8] M. T. Pope, C. W. Kimes, H. Jiang, E. W. Hawkes, M. A. Estrada, C. F. Kerst, W. R. T. Roderick, A. K. Han, D. L. Christensen, and M. R. Cutkosky, "A multimodal robot for perching and climbing on vertical outdoor surfaces," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 33, no. 1, pp. 38-48, Feb., 2017.
- [9] W. R. T. Roderick, M. R. Cutkosky, and D. Lentink, "Touchdown to take-off: at the interface of flight and surface locomotion," *Interface Focus*, vol. 7, no. 1, Feb., 2017, doi: 10.1098/rsfs.2016.0094.
- [10] D.-Y. Lee, S.-R. Kim, J.-S. Kim, and J.-J. Park, and K.-J. Cho, "Origami wheel transformer: A variable-diameter wheel drive robot using an origami structure," *Soft Robotics*, vol. 4, no. 2, pp. 163-180, 2017.
- [11] S.-W. Kim, J.-S. Koh, J.-G. Lee, J. Ryu, M. Cho, and K.-J. Cho, "Flytrap-inspired robot using structurally integrated actuation based on bistability and a developable surface," *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 9, no. 3, 036004, 2014.
- [12] S.-P. Jung, G.-P. Jung, J.-S. Koh, D.-Y. Lee, and K.-J. Cho, "Fabrication of Composite and Sheet Metal Laminated Bistable Jumping Mechanism," *Journal of Mechanisms and Robotics*, vol. 7, no. 2, 021010, 2015.
- [13] Lary L. Howell, *Compliant Mechanisms*, John Wiley & Sons, pp. 135-449, 2001.



최홍철

2012 육군사관학교 응용물리과(이학사)
2016 서울대학교 기계공학과(공학석사)
2016~현재 육군사관학교 강사

관심분야: Bio-inspired robots, Origami-inspired robots



신내호

1985 육군사관학교 물리학과(이학사)
1989 Minnesota주립대 물리학(이학석사)
1996 Purdue University 물리학(이학박사)
2009~현재 육군사관학교 교수

관심분야: Mesoscopic Structure, Robotics