

강화학습을 이용한 나비의 비행 동작 생성*

¹정은호⁰, ²장이권, ¹이윤상

¹한양대학교 컴퓨터·소프트웨어학과, ²이화여자대학교 에코과학부

¹{jho6394, yoonsanglee}@hanyang.ac.kr, ²jangy@ewha.ac.kr

Butterfly Flight Generation Using Deep Reinforcement Learning

¹Eunho Jung⁰, ²Yikweon Jang, ¹Yoonsang Lee

¹Dept. of Computer Software Engineering, Hanyang University,

²Division of EcoScience, Ewha Womans University

요약

나비의 비행은 다른 곤충의 비행과 비교하여 훨씬 역동적이면서 독특한 모습을 보인다. 이러한 나비의 비행을 재현하기 위해서는 생물학적인 특성을 고려하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 나비의 생물학적인 특성을 반영한 나비 모델과 심층강화학습 설계를 통해 사실적인 나비의 비행 동작을 재현할 수 있음을 보이고자 한다.

1. 서론

인간 외의 동물의 움직임을 컴퓨터로 재현하려는 시도는 상당히 오래전부터 이어져왔다. 근래 들어서는 모션 캡처 데이터의 확보가 상대적으로 용이한 네발 동물의 움직임을 생성하는 연구 결과들이 발표된 바 있다 [1, 2]. 이에 비해 곤충의 움직임은 상대적으로 많이 다루어지지 않았는데, 특히 비행 곤충인 나비는 불규칙적이고 역동적인 움직임을 보이지만 크기가 작아 모션 캡처에 어려움이 있다는 특성이 있다. Qiang [3] 등은 미리 정의된 규칙에 의해 나비의 날갯짓 커브의 주기와 진폭을 나비의 속력에 따라 조절하고, 목표 경로를 따르도록 가상의 힘을 나비에 가하는 방식으로 실시간으로 나비 비행 동작을 생성하는 연구 결과를 발표한 바 있다.

우리는 비교적 단순화된 공기역학을 포함한 물리 시뮬레이션과 생물학적인 근거에 기반하여 설계된 강화학습 모델을 이용하여 실시간 나비 애니메이션을 생성할 수 있는 시스템을 제안한다. 우리가 제안하는 방법론에는

인위적인 힘과 가속도가 필요치 않고, 강화학습을 사용해 변화를 즉각적으로 반영할 수 있다는 점에서 기존 연구와 차별점이 있다. 또한 생물학 연구들에 근거한 나비의 특성을 학습에 반영함으로써 더욱 자연스러운 움직임을 생성해 낼 수 있었기에, 생물학적으로도 큰 의미를 지닌다.

2. 나비의 역학적 특성 및 생물학적 특성 반영

2.1. 공기역학적 특성

공기역학을 계산할 때는 Qiang [3] 등의 연구와 같이 아래의 단순화된 공기역학 식을 사용하였다.

$$F_{lift} = \frac{1}{2} \rho A_i |V_i|^2 C_l(\alpha), \quad F_{drag} = \frac{1}{2} \rho A_i |V_i|^2 C_d(\alpha)$$

ρ 는 공기의 밀도, A_i 는 나비의 날개 단면을 구성하는 삼각형들 중 i 번째 삼각형, V_i 는 i 번째 삼각형의 속도, $C_l(\alpha)$ 과 $C_d(\alpha)$ 는 α (angle of attack)에 따른 양력 계수와 항력 계수이다. 우리는 조금 더 정확한 값을 활용하기 위해, 나비와 같은 크기의 모형으로 양력 계수와 항력 계수를 측정된 Ortega 등의 연구 [4]를 참고하여 함수식을 구성하여 사용하였다.

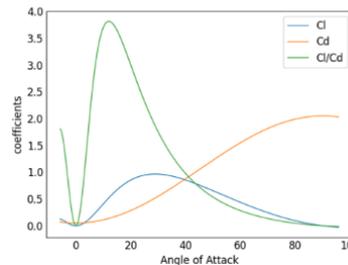


그림 1: 시뮬레이션에 사용된 나비의 공기역학계수 또한, 나비가 공기 역학으로 인해 발생하는 돌림힘을 활용해 방향전환을 학습할 수 있도록, 계산된 양력과 항력이 가해진 위치를 활용해 각 관절부를 기준으로 돌림힘을 계산하여 시뮬레이션에 적용하였다.

* 구두 발표논문, 요약논문 (Extended Abstract)

* 본 논문은 요약논문 (Extended Abstract) 으로서, 본 논문의 원본 논문은 현재 타 학술대회 (논문지)에 제출 준비중임.

* 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(RS-2023-00222776) 및 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2024년도 문화체육관광 연구개발사업 지원을 (RS-2024-00399136) 받아 수행되었음.

2.2. 생물학적 특성

곤충의 날개에는 앞날개와 뒷날개의 움직임을 연동시키는 다양한 커플링 메커니즘이 존재한다. 그 중 나비의 커플링 메커니즘은 포착형 결합(amplexiform coupling)으로, 앞날개와 뒷날개의 일부분이 겹쳐짐으로써 힘이 전달되는 메커니즘을 가지고 있다. Ma [5] 등은 포착형 결합이 사라지면 비행은 가능하지만 날개 간 연동성이 확연하게 떨어진다는 실험 결과를 보여, 자연스러운 날갯짓에 포착형 결합의 영향이 크다는 것을 입증하였다. 우리는 시뮬레이션에서 메시 간 충돌을 활성화하여 앞날개와 뒷날개가 서로에게 힘을 전달할 수 있도록 함으로써 포착형 결합을 재현할 수 있었다.

나비는 상승 비행에서 가장 격렬한 날갯짓을 보이는데, 상승 비행시의 날개 관절의 움직임에 대한 Camille [6] 등의 연구를 참고하여 각 관절의 가동 범위를 설정하였다. 물리 시뮬레이션에 큰 영향을 주는 각 부위의 무게 또한 말린 표본을 기준으로 무게를 측정하여 Andrew [7] 등의 연구에 기반하여 설정하였다. 다만 살아 있을 때와 말린 표본 간의 무게 차이가 체액의 유무로 인해 다를 수 있다는 점, 측정되지 않은 부위들이 있다는 점을 고려하여, 실험적으로 일부 조정하여 사용하였다.

3. 강화학습 설계

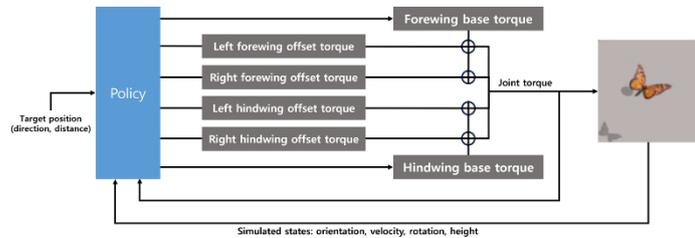


그림 2: Base Action Model

나비의 날갯짓은 대칭을 이루고, 약간의 날개 각도 조절과 배 관절의 움직임만으로 방향을 바꿀 수 있다는 점에서 착안하여, 그림 2와 같은 Base Action Model을 제안한다. 해당 모델은 Policy의 출력을 그대로 사용할 때에 비해 보상 함수 설계를 단순화할 수 있게 하였고, 학습 파라미터 튜닝 또한 쉽게 할 수 있었다.

Policy는 입력으로 목표 지점과의 상대적인 거리와 방향벡터, 현재 높이, 공기역학으로 인한 힘과 돌림힘, 이전 프레임에서의 action과 6D rotation representation을 받는다. 입력으로 받는 값들은 나비의 local 좌표계를 xy평면에 사영한 좌표계로 표현하였다.

학습에 이용되는 보상함수는 목표 지점과의 거리에 따른 거리 보상, 속도가 정면 방향이도록 하는 비행 방향

보상, 각 관절에 가하는 힘이 클수록 페널티를 주는 에너지 페널티, 떨림을 방지하는 규제 보상으로 구성하였다.

4. 실험결과

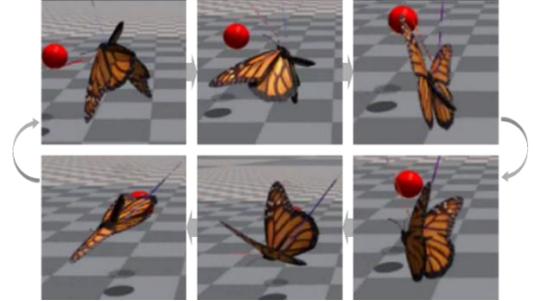


그림 3: 학습된 Model로 재현한 나비의 날갯짓
그림3과 같이 나비의 비행 간 생물학적 특징인 날개와 배의 움직임의 주기성, 그리고 앞날개와 뒷날개 간의 포착형 결합을 잘 보이는 나비 비행 정책 학습 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- [1] Zhang, He, Sebastian Starke, Taku Komura and Jun Saito. "Mode-adaptive Neural Networks for Quadruped Motion Control". *ACM Trans. Graph.* 37, 호 4: 145:1-145:11. 2018.
- [2] Taesoo Kwon, Hoimin Kim, Yoonsang Lee. Control of an Iguana Character Using Soft-Body Simulation. *IEEE Access*, Volume 6, 77931-77939, December 2018.
- [3] Qiang Chen, Tingsong Lu, Yang Tong, Guoliang Luo, Xiaogang Jin, and Zhigang Deng. A practical model for realistic butterfly flight simulation. *ACM Trans. Graph.*, 41(3), mar 2022.
- [4] Ortega Ancel, A., Eastwood, R., Vogt, D., Ithier, C., Smith, M., Wood, R., & Kovač, M. Aerodynamic evaluation of wing shape and wing orientation in four butterfly species using numerical simulations and a low-speed wind tunnel, and its implications for the design of flying micro-robots. *Interface focus*, 7(1), 20160087. 2017.
- [5] Ma, Y., Zhao, H., Ma, T., Ning, J., & Gorb, S. Wing coupling mechanism in the butterfly *Pieris rapae* (Lepidoptera, Pieridae) and its role in taking off. *Journal of insect physiology*, 131, 104212. 2021.
- [6] Camille Le Roy, Nicolas Silva, Ramiro Godoy-Diana, Vincent Debat, Violaine Llaurens, Florian Titus Muijres; Divergence of climbing escape flight performance in *Morpho* butterflies living in different microhabitats. *J Exp Biol*, 225 (15), August 2022.
- [7] Andrew K. Davis, Michael T. Holden, Measuring Intraspecific Variation in Flight-Related Morphology of Monarch Butterflies (*Danaus plexippus*): Which Sex Has the Best Flying Gear? *Journal of Insects*, vol. 2015, Article ID 591705, 6 pages, 2015.