

생체 모방 나비 비행을 위한 변형 가능한 날개 모델링*

¹이유민⁰, ²장이권, ¹이윤상[†]

¹한양대학교 컴퓨터소프트웨어학과, ²이화여자대학교 에코과학부

¹{yum0315, yoonsanglee}@hanyang.ac.kr, ²jangy@ewha.ac.kr

Deformable Wing Modeling for Biomimetic Butterfly Flight

¹Yumin Lee⁰, ²Yikweon Jang, ¹Yoonsang Lee[†]

¹Department of Computer Science, Hanyang University,

²Division of EcoScience, Ewha Womans University

요약

나비의 비행에서 날개의 유연한 변형은 공기역학적 효율성과 비행 안정성에 본질적인 영향을 미친다. 이러한 변형을 재현하기 위해서는 실제 나비 날개의 구조적 특성을 반영한 모델링이 필수적이다. 본 연구에서는 나비 날개의 시맥 구조를 다중 강체와 관절로 근사하고, 실제 나비 날개의 운동 메커니즘과 유사하게 날개 기부에만 주기 입력을 적용함으로써 시맥별 강성에 따른 수동적 변형이 날개 전체에 자연스럽게 전파되는 flexible wing 기반의 나비 모델을 제안한다.

1. 서론

곤충 비행 시뮬레이션 연구는 그동안 비행 동역학의 정교화에 집중되어 왔다. Chen 등 [2]은 미리 정의된 규칙에 따라 나비의 속도에 맞춰 날갯짓 주기와 진폭을 조절하는 방식으로 실시간 나비 비행 동작을 생성하였다. 본 연구의 선행 연구인 정은호 등 [1]은 [2]의 단순화된 공기역학 식과 Ortega Ancel 등 [3]을 참고한 공기역학 계수 설정을 활용하여, 강화학습 기반으로 나비의 비행 동작을 재현하였다. 이후 Vaxenburg 등 [4]은 초파리의 걷기와 비행을 진신 물리 모델에서 통합한 강화학습 프레임워크를 제시하였다. 다만 이들 연구 [1,4]는 날개를 단일 강체로 모델링하여 날개의 변형은 다루지 않는다. Lu 등 [5]은 비정상(unsteady) 공기역학 효과까지 반영한 강화학습 프레임워크를 제시한 바 있으나, 이 역시 실제 나비 날갯짓에서 나타나는 변형을 재현하지는 못하였다.

Chen 등 [6]은 곤충 날개의 유연한 변형을 골격기반(skeleton-driven) 모델로 시뮬레이션하였다. 날개 골격의 모든 관절에 미리 정의된 주기 함수로부터 역산된

힘과 공기역학력을 직접 가해 파동 형태의 날개의 변형을 인위적으로 생성하였다. 또한 이 모델은 앞날개와 뒷날개 사이의 물리적 상호작용은 다루지 않는다. 정은호 등 [1]은 메시 충돌(mesh collision)기반으로 앞·뒷날개 결합을 모델링한 바 있으나, 단일 강체 기반 날개 모델이었다는 한계점이 있었다.

본 연구에서는 실제 나비의 시맥 구조를 다중 강체와 관절 구조로 근사한 유연 날개 모델을 제안한다. 실제 나비 날개의 변형 메커니즘과 동일하게, 날개 기부의 움직임만으로 파동 형태의 변형이 날개에 생성되도록 구성하였으며, 프록시 충돌체 기반의 부분적 충돌 구조를 통해 앞·뒷날개 간 상호작용을 근사하였다.

2. 나비 날개 모델

2.1. 실제 나비 날개의 구조적 특징

곤충 날개는 얇은 막과 이를 지지하는 시맥 구조로 이루어져 있다. 특히 앞전(leading edge) 부근의 시맥은 두껍고 강성이 높아, 날개 구조 전체를 지지하며 변형 양상을 이끈다고 볼 수 있다 [7]. 나비의 날개 운동은 흉부에 위치한 간접비행근(DLM/DVM)이 흉부를 변형시키고, 이 변형이 액실러리 경판(axillary sclerite)을 매개로 날개 기부(wing base)로 전달되는 방식으로 발생한다 [8]. 즉, 근육은 날개 기부에만 입력을 가하며, 날개 후반부는 공기역학적 및 관성력에 의해 수동적으로 변형된다. 또한 앞날개와 뒷날개는 포착형 결합(amplexiform coupling)을 통해 결합 운동을 형성하며, 이 결합이 사라지면 날개 간 연동성이 떨어지는 것으로 보고되었다 [9].

2.2. 실제 구조를 반영한 유연 날개 모델링

본 모델은 머리, 꼬리, 몸통, 4개의 날개 기부, 그리고 시맥을 표현하는 강체들로 구성된다. 각 날개 기부는 몸통과 3자유도 회전 관절로 연결되는 강체로 표현되며, 이 관절의 회전이 관절 구조를 따라 시맥 강체들로 전파된다. monarch butterfly 날개의 대표 시맥과 axillary 구조 [8]를 참고하여, 앞날개는 4개, 뒷날개는 3개의 강체와 이들을 잇는 관절 구조로 구성된다. 앞전에 가까운 강체일수록 더 높은 질량, 강성값을 부여하여 실제

* 구두발표논문, 요약논문 (Extended Abstract)

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

* 본 연구는 문화체육관광부 및 한국콘텐츠진흥원의 2024년도 문화체육관광 연구개발사업 (RS-2024-00399136) 및 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 가상융합지능화해심기술개발사업 (RS-2026-25508404)의 지원을 받아 수행되었음.

† 교신저자

날개의 비균일한 분포 특성을 표현하였다. 흉부의 간접 비행근 힘 전달 메커니즘은 날개 기부 관절이라는 매개 관절을 통해 모방하였다. 기존의 날개 변형 시뮬레이션 연구 [6]는 모든 관절에 주기 함수를 적용하고 관절별로 서로 다른 phase를 설정하여 날개 변형을 인위적으로 생성하였다. 반면 본 연구에서는 실제 나비 날개의 운동 메커니즘과 유사하게 날개 기부 관절에만 단순한 주기 입력을 적용하였으며, 파동 형태의 날개 변형은 시맥별로 상이한 강성 등의 물성값에 의해 자연스럽게 유도되도록 하였다. 날개 기부의 회전 운동은 관절 구조를 따라 날개 전체로 전달되며, 날개 후반부는 관절 간 연결, 공기역학적력, 그리고 강성의 상호작용에 의해 수동적으로 변형된다. 앞·뒷날개 결합은 프록시 충돌체 기반의 부분적 충돌 구조를 통해 근사하였다. 각 부위의 질량은 Davis 등 [10]이 측정한 monarch butterfly의 부위별 무게에 기반하여 설정하였으며, 시뮬레이션 안정성을 확보하기 위해 10배 스케일링하여 적용하였다.

2.3. 힘 모델링

날개의 변형 특성을 보완하기 위해 날개 끝단에는 끝단 스프링 힘(end spring force)을 추가적으로 적용하였다. 두 끝단 사이의 현재 거리(L)와 초기 길이(L_{rest})의 차에 비례하는 탄성 복원력과, 거리 변화율($\dot{L}$)에 비례하는 점성 감쇠력의 합으로 정의된다:

$$F_{spring} = k(L - L_{rest}) + b\dot{L}$$

여기서 k 는 스프링 강성, b 는 감쇠 계수이며, 이 힘은 날개의 적절한 변형을 허용하면서도 안정적인 날갯짓 운동을 유지하는 역할을 수행한다.

공기역학적력은 선행 연구인 정은호 등 [1]을 따라, Chen 등 [2]의 단순화된 식을 날개 메시의 삼각형 단위로 적용하여 계산하였다:

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

여기서 ρ 는 공기 밀도, A_i 는 i 번째 삼각형의 면적, V_i 는 i 번째 삼각형의 속도, $C_l(\alpha)$ 와 $C_d(\alpha)$ 는 받음각(angle of attack)에 따른 양력 계수와 항력 계수이다. 기존 연구들이 단일 강체 날개를 가정 한 것과 달리, 본 연구의 날개는 매 시점 변형되므로 각 삼각형의 면적 A_i 와 속도 V_i 또한 변형 상태에 따라 동적으로 갱신된다. 이를 통해 날개 메시의 변형이 공기역학적력에 직접 반영된다. 계산된 힘은 무게중심 좌표(barycentric coordinate)를 이용하여 인접 시맥 강체에 분배하였다.

3. 실험 결과

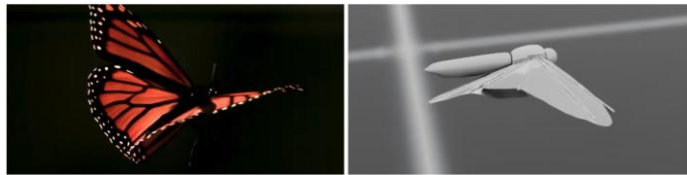


그림 1: (a)실제 나비 날갯짓 영상 [11], (b)본 모델의 시뮬레이션 결과

그림 1는 실제 monarch butterfly의 날갯짓 영상(a)과 본 모델의 시뮬레이션 결과(b)를 비교한 것이다. 두 경우 모두에서 앞전 시맥을 따라 발생한 변형이 날개 후반부로 전파되며, 날개 면이 단순한 평면 회전이 아닌 곡면 형태로 휘어지는 양상이 관찰된다.

특히 본 모델에서는 날개 기부 관절에 flapping축 주기 함수만을 입력하였음에도, 날개가 flapping뿐 아니라 feathering과 deviation방향으로도 함께 휘어지는 3축 변형이 나타났다. 이는 날개 기부 관절의 단일 축 입력이 골격 구조를 따라 전파되는 과정에서, 공기역학적력과 관성력, 그리고 시맥 강체 간의 비균일한 질량·강성 분포에 의해 수동적으로 3축 변형으로 확장됨을 보여준다. 즉, 실제 나비에서 근육이 날개 기부에만 입력을 가하고 날개 후반부는 수동적으로 변형된다는 생물학적 관찰 [8]과 일치함을 확인할 수 있다.

참고문헌

- [1] 정은호 등, "강화학습을 이용한 나비의 비행 동작 생성," 한국컴퓨터그래픽스학회 학술대회 논문집, pp. 88–89, 2024.
- [2] Q. Chen et al., "A practical model for realistic butterfly flight simulation," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 41, no. 3, pp. 1–12, 2022.
- [3] A. Ortega Ancel et al., "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*, vol. 7, no. 1, p. 20160087, 2017.
- [4] R. Vaxenburg et al., "Whole-body physics simulation of fruit fly locomotion," *Nature*, vol. 643, no. 8074, pp. 1312–1320, 2025.
- [5] T. Lu et al., "Data-driven control of insect flapping flight via deep reinforcement learning," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, early access, 2026.
- [6] Q. Chen et al., "Real-time wing deformation simulations for flying insects," *ACM SIGGRAPH 2024 Conference Papers*, 2024.
- [7] R. J. Wootton, "Support and deformability in insect wings," *Journal of Zoology*, vol. 193, no. 4, pp. 447–468, 1981.
- [8] P. R. Ehrlich, "The integumental anatomy of the monarch butterfly *Danaus plexippus* L. (Lepidoptera: Danaidae)," *The University of Kansas Science Bulletin*, vol. 38, no. 18, pp. 1315–1350, 1958.
- [9] Y. Ma et al., "Wing coupling mechanism in the butterfly *Pieris rapae* (Lepidoptera, Pieridae) and its role in taking off," *Journal of Insect Physiology*, vol. 131, p. 104212, 2021.
- [10] A. K. Davis and M. 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.
- [11] life in a Blink – Art of High Speed Photography, "Healing flight of butterflies – 1000 fps slow motion", YouTube, Available: <https://www.youtube.com/watch?v=keP4zHb1C5M>