

생체모사를 통한 보행로봇의 균형감에 관한 연구

김 종 진¹⁾ · 정 성 엽^{2)*}

(주) 엠앤디¹⁾ · 한국교통대학교 기계공학과²⁾

Biomimetic Balancing Mechanism for Walking Robot

Jong Jin Kim¹⁾ · Seong Youb Chung^{2)*}

¹⁾R&D Center, M&D Corp., Digital Empire B/D, Yeongtong-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do 443-813, Korea,

²⁾Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation,

50 Daehak-ro, Chungju-si, Chungbuk 380-702, Korea

(Received 2014. 11. 07 / Accepted 2014. 11. 24)

Abstract : A cat is able to quickly recover balance from unstable posture. To observe the balance recovery procedure of the cat, an impulse is applied to the cat while walking on a narrow bridge. We find that it rotates its tail toward the falling direction. In our previous research, the balance recovery procedure is analyzed based on the law of the angular momentum conservation and then a key equation is derived to maintain the balance. However, it did not consider the gravity, so the performance is not good. In this paper, a new dynamic model is proposed using the Lagrangian mechanics. In the method, the gravity is included in the potential energy. Through the proposed dynamic model, controlling the balance of a walking robot is possible.

Key words : biomimetics, balancing mechanism, walking robot, multi-body dynamics, cat-like robot

Nomenclature

K, P : kinetic and potential energy, Nm

L : Lagrangian function, Nm

I : mass moment of inertia, kgm^2

m : mass, kg

l : length, m

v : velocity, m/sec

$\dot{\theta}$: angular velocity, rad/sec

$\ddot{\theta}$: angular acceleration, rad/sec^2

τ : torque, Nm

g : acceleration of gravity, m/sec^2

O, C : center of rotation of body, center of rotation of tail

G : center of gravity

Subscripts

B, T : body, tail

1. 서론

기술이 발전함에 따라 다양한 형태의 보행로봇이 연구되고 있다. 연구를 통하여 개발된 보행로봇을 군용물자 수송, 오락 및 여가생활, 재난지역에서 인명구조 및 탐색 등 다양한 분야에 적용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁾ 보행로봇은 일반적인 평지뿐만 아니라 불특정한 표면에 지형, 경사면 등 다양한 환경에서도 안정적인 보행이 가능해야 한다.

초기 보행로봇에 관한 연구는 보행방법과 걸음새의 최적화에 관한 연구가 주를 이루었으며,^{2,3)} 최근에는 불규칙한 지형에서도 안정적인 보행을 위해 다양한 보행 제어알고리즘에 관한 연구가 수행되고 있

*Corresponding author, E-mail: sychung@ut.ac.kr

다.^{4,6)} 특히 말, 강아지와 같은 동물의 걷는 모습을 관찰하여 효과적인 걸음새 제안하고 자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.⁷⁻¹¹⁾

보행 로봇이 불규칙한 지형에서 움직이기 위해서는 균형을 잃더라도 빠르게 회복하는 방법이 필수적이다. Boston Dynamics사에서 제작된 BigDog은 개를 모방하여 만든 로봇으로 측면에 외력이 가해져 균형을 잃게 되면 센서를 통하여 현재 자세를 감지하고 다리를 교차하여 외력이 가해진 방향으로 이동하면서 균형을 잡게 된다.¹²⁾ 하지만 이러한 방법은 로봇의 폭보다 넓은 크기에 공간을 필요로 하기 때문에 폭이 좁은 지형에서 이 방법을 적용하는데 어려움이 있다. 따라서 좁은 공간에서도 균형을 잃지 않으며 안정적으로 보행이 가능하고 균형을 잃더라도 최소한의 움직임으로 균형을 회복할 수 있는 방법에 관한 연구가 필요하다.

수많은 동물 중에서 고양이는 높은 균형감각을 가지고 있다. 본 논문에서는 이전 연구¹³⁾와 같이 고양이가 균형을 잃었을 때 회복하는 모습을 관찰하여 보행 로봇을 위한 균형 회복 메커니즘을 연구하였다. 특히 이전 연구에서는 고려하지 않았던 중력을 새롭게 고려하여 균형 회복 메커니즘을 고찰하였다.

2. 고양이의 균형 회복 관찰

2.1 고양이의 골격 구조

고양이는 Fig. 1과 같이 경추, 흉추, 요추, 천추를 각각 7, 13, 7, 3개씩 가지며 22개 또는 23개의 미추를 가지고 있다. 여분의 요추와 천추로 인해 척추의 운동성이 좋아 다른 동물에 비해 높은 유연성을 가지며, 꼬리를 형성하는 미추는 빠른 운동을 하는 고양이의 균형을 유지하는 데 이용된다.¹⁴⁾ 고양이가 폭이 좁은 지형에서 안정적으로 움직이고 또한 높은 곳에서 떨어질 때 안정적인 착지가 가능한 것은 꼬리를 이용하기 때문이다. Walker는 고양이의 운동을 관찰하여 실제 꼬리가 균형을 잡는 데 중요한 역할을 한다는 것을 알아내었다.¹⁵⁾

2.2 고양이의 균형 회복 모습 관찰

고양이가 폭이 좁은 지형에서도 균형을 잡으며 보행을 하는 모습을 관찰하기 위하여 알루미늄 프로파일을 이용하여 길이 2m, 높이 1m의 평균대를 제작하

였다. 관찰 대상인 고양이는 수컷이며 3년생이다. 전방에서 먹이로 유인하는 방법을 이용하여 고양이가 평균대 위에서 걷는 것에 익숙해지도록 하였다. 훈련은 2주 동안 하루 30분간 진행하였으며, 처음에는 폭이 10cm인 평균대를 이용하였고, 고양이가 평균대에 익숙해진 후에는 실제 관찰을 위해 사용할 폭 4cm의 평균대를 이용하였다. Fig. 2는 평균대에서 고양이를 훈련하는 것이며, 시계 방향으로 고양이가 이동하는 모습을 나타낸 것이다.

고양이를 훈련하며 관찰한 결과 고양이는 경계심이 강한 상태에서는 꼬리를 내리고 보행하는 경우도 있었지만 대부분의 경우 꼬리를 수직하게 세우고 보행하는 것을 알 수 있었다. 고양이가 평균대에 익숙해진 이후에, 좁은 평균대에서 순간적으로 균형을 잃은 고양이가 어떻게 균형을 회복하는 지 관찰하였다. 이를 위하여 고양이가 평균대 위를 보행할 때 외력을

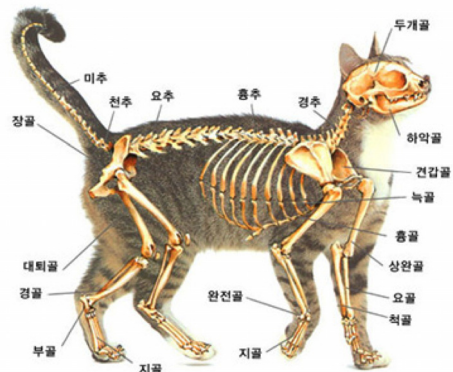


Fig. 1 The skeleton of a cat¹⁴⁾

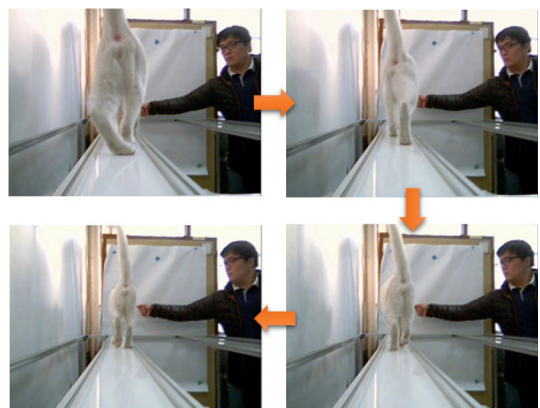


Fig. 2 Scenes of training a cat walking on the balance beam¹³⁾

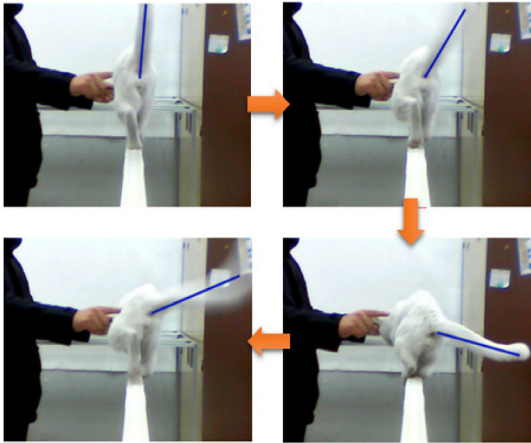


Fig. 3 Scenes of cat's response for instantaneous lateral force¹³⁾

보행방향과 수직한 방향으로 짧은 시간동안 가하여 균형을 잃도록 하였으며, 고양이 후면에 카메라를 설치하여 전 과정을 녹화하였다. Fig. 3은 시간의 흐름에 따라 고양이의 모습을 시계 방향으로 나타낸 것이다.

관찰 결과 Fig. 3에서 보듯이 외력을 가하여 균형을 잃게 하였을 때, 순간적으로 자세가 낮아지며 넘어지는 방향으로 꼬리가 회전되는 것을 확인할 수 있다. 다시 말하면, 자세를 낮추는 것은 무게중심을 낮춰 좀 더 안정된 자세를 갖기 위한 것이며, 꼬리를 빠르게 회전시키는 것은 회전모멘트를 발생하여 작용과 반작용에 의해 몸을 반대쪽으로 비틀어 자세를 회복하기 위해서라고 판단된다.

3. 동역학 모델링

관찰을 통하여 고양이가 균형을 잡는데 있어서 꼬리가 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다. 고양이가 균형을 잃고 다시 자세를 회복하기 위한 동작을 수학적으로 규명하기 위하여 Fig. 4와 같이 고양이를 몸체와 꼬리의 2개의 강체로 가정하고 동역학 모델링을 수행하였다. Fig. 4에서 F 는 고양이의 횡방향 힘을 나타내며, 점 O 는 외력 F 가 고양이에게 가해졌을 때, 고양이가 중심을 잃고 회전하는 회전축을 의미한다. 점 C 가 꼬리의 회전축이라 하면, l_B , l_C , l_T 는 각각 O 에서 몸체의 무게 중심 G_B 까지의 거리, O 에서 꼬리의 회전축 C 까지의 거리, C 에서 꼬리의 무게 중심 G_T 까지의 거리를 의미한다.

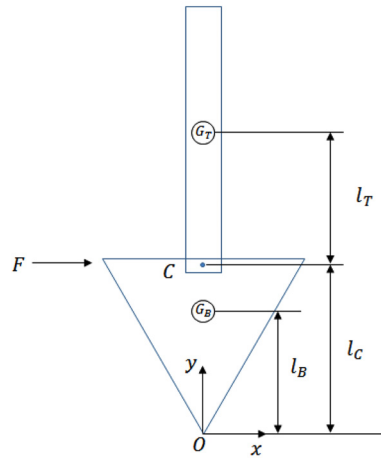


Fig. 4 Simplified model of cat's body and tail

θ_1 과 θ_2 를 x 축에 대한 몸체의 각도와 몸체에 대한 꼬리의 각도라 하고, 라그랑지안 역학을 이용하여 동역학 모델링을 수행하였다. 모델링 과정에서 삼각함수는 편의상 $\sin(\theta_1)$ 와 $\cos(\theta_1)$ 은 s_1 과 c_1 으로 표기하였으며, $\sin(\theta_1 + \theta_2)$ 와 $\cos(\theta_1 + \theta_2)$ 은 s_{12} 과 c_{12} 으로 나타내었다. 우선 단순화된 고양이 모델의 운동에너지 K 는 몸체의 운동에너지 K_B 와 꼬리의 운동에너지 K_T 의 합으로 식 (1)과 같다.

$$K = K_B + K_T = {}^B I_{O_1} \dot{\theta}_1^2 / 2 + {}^T I_C (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 / 2 + m_T {}^T v_G^2 / 2 \quad (1)$$

여기서 ${}^B I_O$ 와 ${}^T I_C$ 는 몸체의 원점 O 에 대한 질량 관성 모멘트와 꼬리의 무게 중심에 대한 질량 관성 모멘트를 나타내며, ${}^T v_G$ 는 꼬리의 무게 중심의 속도이다. 시스템의 위치에너지 P 는 각도 θ_1 과 θ_2 에 따라 몸체의 위치에너지 P_B 와 꼬리의 위치에너지 P_T 의 합으로 식 (2)와 같다.

$$P = P_B + P_T = m_B g l_B s_1 + m_T g (l_C s_1 + l_T s_{12}) \quad (2)$$

${}^T v_G^2$ 는 G_T 점의 x 와 y 위치를 각도에 따라 식 (3)과 (4)와 같이 구한 후 시간에 대해 미분하여 제공하면 식 (5)과 같다.

$$x = l_C c_1 + l_T c_{12} \quad (3)$$

$$y = l_C s_1 + l_T s_{12} \quad (4)$$

$$T v_G^2 = (l_C^2 + 2l_C l_T c_2 + l_T^2) \dot{\theta}_1^2 + l_T^2 \dot{\theta}_2^2 + (2l_C l_T c_2 + 2l_T^2) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \quad (5)$$

라그랑지안 L 은 $K-P$ 와 같고, 식 (6)와 (7)과 같이 L 의 도함수를 구하여 운동방정식을 유도하면 각각 식 (8)과 (9)와 같다.

$$\tau_B = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_1} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta \theta_1} \right) \quad (6)$$

$$\tau_T = \frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}_2} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta \theta_2} \right) \quad (7)$$

식 (6)와 (7)에서 τ_B 는 0에서 생성되는 몸체의 토크이며, τ_T 는 꼬리에서 생성되는 토크를 의미한다. 실제 고양이는 꼬리에서만 토크를 생성할 수 있기 때문에 본 논문에서 τ_B 는 0으로 모델링하였다.

$$0 = [{}^T I_O + {}^T I_G + m_T(l_C^2 + 2l_C l_T c_2 + l_T^2)] \ddot{\theta}_1 + [{}^T I_G + (2l_C l_T + 2l_T^2)] \ddot{\theta}_2 - m_T l_C l_T s_2 \dot{\theta}_2^2 - 2m_T l_C l_T s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_B g l_B c_1 + m_T g (l_C c_1 + l_T c_{12}) \quad (8)$$

$$\tau_T = [{}^T I_G + m_T(l_C l_T c_2 + l_T^2)] \ddot{\theta}_1 + ({}^T I_G + m_T l_T^2) \ddot{\theta}_2 - m_T l_C l_T s_2 \dot{\theta}_1^2 - 2m_T l_C l_T s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 - m_T g l_T c_{12} \quad (9)$$

식 (8)과 (9)을 이용하여, θ_1 과 θ_2 를 90° 와 0° 에 대해서 선형화하여 상태방정식을 구할 수 있으며, 선형화된 상태방정식에 대해 고전적인 제어 기법을 적용하면 고양이가 균형을 유지할 수 있도록 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 고양이가 균형을 회복하는 메커니즘을 관찰을 통해 살펴보았으며, 동역학 모델링을 통해 균형회복을 위한 꼬리의 이용방법을 확인하였다. 이전 연구에서는 각운동량 보존 법칙을 이용하여 균형을 회복하기 위한 꼬리의 각속도를 제한하였으나, 균형을 잃고 회복하는 시간이 짧다고 가정하여 중력을 고려하지 않았다.¹³⁾ 본 논문에서는 중력을 새롭게

고려하였으며, 라그랑지안 역학을 이용하여 동역학 모델링을 제안하였다.

기존의 보행로봇들은 보행 중 균형을 잃거나 정지 상태에서 균형을 잃게 되면 균형을 회복하기 위해 많은 공간이 필요하여 좁은 공간에서는 균형을 회복하기 어렵지만, 본 논문에서 제안한 방법을 이용하면 제자리에서 균형을 회복할 수 있다. 따라서 제안된 방법은 좁은 통로를 이동하는 보행 로봇의 균형 회복 메커니즘으로 유용하게 사용될 수 있다.

향후, 본 논문에서 제안한 동역학 모델링을 통해 시뮬레이션 및 실제 로봇을 이용하여 검증할 예정이다.

Acknowledgement

이 논문은 2014년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- 1) B. H. Kim, "On multi-legged walking robots", Journal of Research Institute of Engineering & Technology, 15, p.99-105, 2008.
- 2) R. B. McGhee, "Some finite state aspect of legged locomotion", Mathematical Biosciences, 2, p.67-74, 1968.
- 3) R. B. McGhee and A. K. Jain, "Some properties of regularly realizable gait matrices", Mathematical Biosciences, 13, p.179-193, 1972.
- 4) R. B. McGhee, A. A. Framk, "On the stability properties of quadruped Creeping Gaits", Mathematical Biosciences, 3, p.331-351, 1968.
- 5) S. Hirose, H. Kikuchi, and Y. Umetani, "The standard circular gait of a quadruped walking vehicle", Advanced Robotics, 1(2), p.143-164, 1986.
- 6) Y. Fukuoka, H. Nakamura, and H. Kimura, "Biologically-inspired adaptive dynamic walking of the quadruped on irregular terrain", Proceedings of the IEEE Int. Conf. on Control Application, p.490-495, 1999.
- 7) R. M. Alexander, "The gaits of bipedal and quadrupedal animals", Int. Journal of Robotics Research, 3, p.49-59, 1984.
- 8) B. Klaassen., R. Linnemann, D. Spenneberg, and F. Kirchner, "Biomimetic walking robot SCORPION : Control and modeling", Robotics and autonomous systems, 41(2-3), p. 69-76, 2002.
- 9) R. Altendorfer, N. Moore, H. Koms uoglu, M. Buehler, Jr H.B. Brown, D. McMordie, U. Saranli, R.

- Full, and D.E. Koditschek, "Rhex: A biologically inspired hexapod runner", *Autonomous robots*, 11(3), p.207-214, 2001.
- 10) T. Ho, S. Choi, and S. Lee, "development of a Biomimetic Quadruped Robot", *Journal of bionics engineering*, 4(4), p. 193-199, 2007.
 - 11) S. Makita, N. Murakami, M.. Sakaguchi, and J. Furusho, "Development of horse-type quadruped robot", *IEEE Int. Conf. systems, Man and Cybernetics*, 6, p.930-935, 1999.
 - 12) M. Raibert, K. Blankespoor, G. Nelson, and R. Playter, "Bigdog, the rough-terrain quadruped robot", *Proc. of the Int. Federation of Automation Control*, p.10822-10825, 2008.
 - 13) J. J. Kim, "A study on walking robot mimicking cat's sense of balance," [master] thesis, Korea National University of Transportation, 2014.
 - 14) K. Takano, "Cat: type and selection encyclopedia", *Greenhome*, p.6-8, 2004.
 - 15) C. Walker, Jr. Vierck, C. J., L. A. Ritz, "Balance in the cat: role of the tail and effects of sacrocaudal transection", *Behavioural brain research*, Vol.91 No 1-2, pp. 41-47, 1998.