

데이터 기반 보행 제어를 위한 다리 간 충돌 회피 기법

이윤상

광운대학교

yoonsang@kw.ac.kr

Avoiding Inter-Leg Collision for Data-Driven Control

Yoonsang Lee

Kwangwoon University

요약

본 논문에서는 기존에 발표되었던 데이터 기반 보행 제어 기법의 단점을 보완하는 다리 간 충돌 회피 기법을 제안한다. 2010년에 제안된 Lee et. al.의 데이터 기반 이족 보행 제어 기법 [1]은 경우에 따라 보행 중 두 다리가 서로 교차하는 동작을 만들어나가기도 하는데, 이는 실제 사람 혹은 이족 보행 로봇의 보행에서는 실현될 수 없는 동작이다. 본 논문에서는 스윙 힙 (swing hip)의 각도를 변경하는 피드백 규칙에 스탠스 레그 (stance leg)와의 충돌을 피할 수 있는 추가적인 각도 조절을 도입하여 스윙 풋 (swing foot)이 스탠스 풋 (stance foot)을 지난 이후에만 스탠스 풋보다 안쪽으로 움직일 수 있도록 하는 알고리즘을 제안한다. 이를 통해 기존의 제어기 동작 방식에 최소한의 변경과 추가적인 계산만을 더하여 두 다리가 교차하지 않는 안정적인 보행 결과를 만들어 낼 수 있다.

Abstract

We propose an inter-leg collision avoidance method that compensates the disadvantage of the data-driven biped control method. The data-driven biped control technique proposed by Lee et. al [1] sometimes generates the movement that the two legs intersect with each other while walking, which can not be realized in walking of a real person or a biped robot. The proposed method changes the angle of the swing hip so that the swing foot can move inward only after passing the stance foot. This process introduces an additional angle adjustment algorithm to avoid collisions with the stance leg to the original feedback rule of the stance hip. It generates a stable walking simulation without any inter-leg collisions, by adding minimal changes and additional calculations to the existing controller behavior.

키워드: 물리 기반 캐릭터 애니메이션, 이족 보행 제어, 보행 제어, 데이터 기반 제어, 다리 간 충돌 회피, 다리 간 교차 회피, 자체 충돌 회피

Keywords: Physically Based Character Animation, Biped Control, Locomotion Control, Data Driven Control, Inter-Leg Collision Avoidance, Inter-Leg Crossing Avoidance, Self-Collision Avoidance

1. 서론

컴퓨터그래픽스 분야에서는 오랫동안 보다 사실적으로 가상의 움직임을 만들고자 하는 노력들이 있어 왔다. 사실적인 움직임을 위해 가장 중요한 요소 중의 하나는 물리적인 사실성으로, 가상의 세계에서 만들어지는 움직임 역시 실세계에서와 마찬가지로 물리 법칙을 따라야 사용자에게 있어 사실적인 움직임으로 느껴지게 된다. 이를 위해 근래 들어 물리 기반 캐릭터 애니메이션이 많은 주목을 받고 있으며, 최근 몇 년간 이족 보행 캐릭터의 보행 및 기타 동작의 제어 알고리즘에 대한 성공적인 연구결과들이 많이 발표되고 있다.

이족 보행 제어 알고리즘은 컴퓨터 게임이나 영화와 같은 디지털 콘텐츠에서 캐릭터의 사실적인 움직임을 만들기 위해 사용될 뿐만 아니라, 로봇틱스 분야에서 이족 보행 로봇의 제어에 활용되거나 의학 분야에서 보행 관련 분석에 활용될 수 있는 등 여러 분야에 걸쳐 많은 적용 가능성을 가지고 있다. 하지만 이러한 적용을 위해서는 컴퓨터그래픽스 분야의 이족 보행 제어 연구에서 자주 간과되고 있는 부분 중 하나인 보행 시 두 다리의 교차 문제를 짚고 넘어갈 필요가 있다. 지금까지의 컴퓨터그래픽스 분야의 연구에서는 두 다리에 대한 충돌 검출을 하지 않은 채 서로 교차하며 보행을 진행하는 시뮬레이션을 보여주는 경우도 많았다. 이는 연구자들이 이족 보행 문제를 연구할 때 균형 제어를 가장

*corresponding author: Yoonsang Lee/Kwangwoon University (yoonsang@kw.ac.kr)

핵심적으로 주목하고, 두 다리의 교차 회피의 중요성은 상대적으로 작게 평가했기 때문으로 생각된다. 하지만 실제 사람이나 로봇의 경우 보행 중에 두 다리가 서로를 엇갈리며 지나치려 하는 경우 당연히 충돌이 발생하며 넘어져버릴 수밖에 없다는 점에서, 두 다리의 충돌을 피하는 제어 알고리즘의 중요성은 결코 작지 않다고 말할 수 있다.

본 논문에서는 2010년에 발표된 Lee et. al.의 데이터 기반 이족 보행 제어 기법 [1]에 기반하여 두 다리의 충돌을 방지하여 엇갈림 없이 보행이 가능한 충돌 회피 알고리즘을 제안한다. 기존의 제어기가 참조 모션 (reference motion)을 입력으로 받아, 엉덩이, 무릎, 발목의 주요 관절에 대하여 예정된 참조 각도 경로를 변경하는 피드백 규칙에 기반하고 있다는 점에 착안하여, 기존의 피드백 규칙 중 스윙 힙 (swing hip)의 규칙을 수정하여 스탠스 레그 (stance leg)와 스윙 레그 (swing leg)가 서로 충돌하지 않고 보행을 지속할 수 있도록 한다. 이를 위해 스윙 풋 (swing foot)이 스탠스 풋 (stance foot)을 지나는 시점을 파악하여, 이 시점 이전에는 스윙 레그가 스탠스 레그보다는 바깥쪽으로 움직이는 것만 허용하며 이 시점이 지나야 안쪽으로 바깥쪽으로 모두 움직일 수 있도록 한다. 또한 해당 시점 전후의 스윙 힙 각도 경로에 급격한 변화가 생기지 않도록 하기 위한 전이 함수 (transition function)을 도입한다. 이를 통해 두 다리가 교차하지 않는 안정적인 보행 시뮬레이션 결과를 생성할 수 있으며, 같은 외력이 주어지는 상황에서의 기존의 제어기와 본 논문에서 제안하는 제어기가 생성하는 시뮬레이션 결과의 비교를 통해 본 논문이 제안한 방법이 효과적임을 보인다.

2. 관련 연구

물리 기반 시뮬레이션 환경에서 동작하는 이족 보행 제어 기법에 대한 연구는 컴퓨터그래픽스와 로보틱스 분야에서 오랫동안 연구되어 왔다. 특히 컴퓨터그래픽스 분야에서는 실세계와 같이 물리 법칙을 따르는 사실적인 움직임과 외부 환경의 변화에 대한 사실적인 반응을 만들어낼 수 있다는 점에서 많은 연구가 이루어져 왔다. 가장 초기의 연구 중 하나로 간단한 피드백 규칙과 유한 상태 기계를 이용하여 균형을 제어한 연구가 Hodgins et. al.에 의해 발표된 바 있으며 [2], 이러한 구조를 확장, 발전시켜 매우 안정적으로 동작하는 SIMBICON 제어기를 Yin et. al.이 제안한 바 있다 [3]. 또한 몸 전체 모델 (full body model)의 복잡도를 단순화한 모델을 사용한 연구들이 있으며 [4-7], 모션 캡처 데이터를 사용하여 생성되는 동작의 자연스러움을 추구한 연구들이 있었다 [1, 4, 8-11]. 그리고 많은 연구들에서 다양한 최적화 기법을 사용하여 제어기에서 사용하는 파라미터의 최적화 된 값을 찾고, 이를 통해 제어기의 안정성과 생성되는 결과 동작의 자연스러움을 향상시킨 결과를 보였다 [9-14]. 최근 들어서는 Hill-type 근육 모델을 이용한 인체 근골격 이족 보행 모델의 보행 제어 알고리즘을 제안한 연구들도 발표되고 있다 [15-18].

이와 같은 이족 보행 제어 연구에서 두 다리 간의 교차 및 충돌

회피를 어떻게 다루고 있는지를 살펴보자면, 우선 2010년에 발표된 Coros et. al.의 연구에서는 자체 충돌 (self collision)을 처리하고 있지 않기 때문에 급격한 방향 전환 동작 (sharp turn)의 경우에는 두 다리 간의 교차가 많이 발생할 수 있으므로 이를 완화하기 위한 간단한 회피 방법을 사용했다고 밝히고 있다 [6]. Kwon et. al.이 2010년에 발표한 연구에서는 두 다리 사이의 충돌 검출을 하고 있지 않기 때문에 두 다리가 서로 교차하게 될 수 있다고 언급하며, 이는 최적화 목적함수에 발 사이 간격을 표현하는 파라미터를 추가하면 해결할 수 있을 것으로 보인다고 밝히고 있다 [4]. Wang et. al.의 2010년 연구에서는 수행한 실험 중 하나에서만 자체 충돌 검출을 사용했고, 해당 실험에 대해서만 두 다리가 교차하는 결과가 나오는 것은 불가능하다고 밝히고 있다 [12]. Wu et. al.은 2010년의 연구에서 두 발은 충돌 검출을 하지 않지만, 두 다리는 충돌 검출을 함으로써 최적화된 파라미터가 두 다리가 엇갈리는 걸음걸이를 만들지 않도록 했다고 밝히고 있다 [14]. Geijtenbeek et. al.의 2013년 연구에서는 최적화 목적함수 평가 과정의 종료 조건 중 하나로 두 다리 사이의 충돌을 사용했고, 이를 통해 국소 최적값 (local minima)을 피할 수 있다고 언급하고 있다 [16]. 이와 같이 두 다리 간의 교차 회피를 언급한 관련 연구들은 많은 경우 파라미터 최적화 과정에서 두 다리의 교차가 일어나는 경우에는 충돌이 일어나며 넘어지도록 하여 페널티를 크게 부여하는 방식으로, 최적화된 제어기가 만들어내는 걸음걸이 역시 교차가 일어나지 않는 것을 기대하는 방식을 택했다. 하지만 이런 경우에도 실제 시뮬레이션 단계에서는 외부의 환경 변화에 따라서 생성되는 걸음걸이는 두 다리가 엇갈리게 될 가능성도 존재한다. 그 외의 연구들은 두 다리 간의 교차 회피에 대한 명시적인 언급이 전혀 없는 경우도 많은 상황이다.

본 논문에서는 위와 같이 실제 시뮬레이션 과정에서 충돌 회피를 기대할 수 있는 항을 파라미터 최적화 과정에 포함시키는 방식은 사용하지 않는다. 본 논문에서 사용하는 제어기의 파라미터는 손으로 조율된 (hand-tuned) 것을 사용하며, 따라서 제어기가 최적화되었는지 여부와는 상관없이 참조 모션을 적절하게 변조 (modulation)하여 시뮬레이션으로 생성되는 결과 보행 동작에서 두 다리를 교차하는 경우를 피할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

3. 개요

본 논문에서 제안하는 방법은 Lee et. al.의 데이터 기반 이족 보행 제어기 [1]를 기반으로 한다. Lee et. al.의 제어기는 참조 모션 공급부 (reference motion supplier), 데이터 기반 제어부 (data-driven control), 추종 제어부 (tracking control), 정동역학 시뮬레이션 (forward dynamics simulation)으로 구성되어 있다. 우선 시뮬레이션 할 참조 모션이 공급되면 데이터 기반 제어부에서는 매 프레임마다 동기화 (synchronization)와 균형 피드백 (balance feedback)의 두 가지 과정을 거쳐, 단순한 추종 제어만으로도 균형을 유지하면서 원본 참조 모션을 최대한 재현할 수 있는 변조된

참조 모션 (modulated reference motion)을 생성한다. 추종 제어 부에서는 변조된 참조 모션을 추종하며 시뮬레이션하기 위해 각 관절에서 발생시켜야 하는 힘을 매 순간 계산하고, 정동역학 시뮬레이션에서 계산된 관절 힘과 중력, 지면 반력을 모두 반영하는 시뮬레이션을 진행하여 이족 보행 캐릭터의 상태를 갱신하게 된다. 이 때 균형 피드백 과정에서는 사람의 보행에 많은 영향을 미치는 엉덩이 관절과 발목 관절의 각도 경로를 현재 시뮬레이션 되는 캐릭터의 상태를 반영하는 몇 가지 피드백 규칙에 의해 변경을 하게 되는데, 이것을 통해 몸이 전체적으로 왼쪽으로 기울어지고 있을 때 발을 좀 더 왼쪽으로 내딛는 식의 동작의 변경이 일어나게 된다. 본 논문에서는 이 피드백 규칙들 중 스윙하고 있는 다리의 움직임에 가장 큰 영향을 미치는 스윙 힙 관절에 대한 피드백 규칙을 수정하여, 스윙 레그와 스탠스 레그가 교차하지 않고 보행을 지속할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

4. 피드백 규칙 변경

보행 중 두 다리가 충돌할 가능성이 있는 시점은, 바로 이전 걸음에서는 스탠스 레그였던 현재의 스윙 레그가 현재 걸음의 시작 시점에서 스윙을 시작하여 현재의 스탠스 레그 옆을 지나치는 시점이다. 실제 사람은 보행 중에 스윙 힙을 통해 스윙 레그의 스윙 경로를 적절히 조절하기 때문에 스탠스 레그와 충돌을 하는 경우가 잘 발생하지 않는다. 우리가 제안하는 알고리즘 역시 스윙 힙 각도 조절을 통해 스윙 레그의 경로를 조절하는데, 이를 위해서는 스탠스 레그가 어느 정도로 기울어져 있는지를 알아야 한다. 적어도 스탠스 레그의 기울기만큼은 스윙 레그도 기울어져야 두 다리의 충돌을 피할 수 있기 때문이다. 이에 본 섹션에서는 우선 스탠스 힙의 목표 각도가 참조 모션의 스탠스 힙의 각도에 비해 피드백 규칙에 의해 얼마나 변경이 되었는지 파악하는 부분을 기술한 후, 이를 참고하여 피드백 규칙에 의해 스윙 힙의 각도를 변경하는 방법에 대해 기술하도록 한다.

4.1 스탠스 힙 피드백 정보 수집

Lee et. al.의 제어기의 스탠스 힙의 피드백 규칙은 다음과 같이 기술된다 [1].

$$\mathbf{q}_d = \mathbf{q}_{\text{pelvis}}^{-1} \mathbf{q}_{\text{hip}} \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_{\text{stance,hip}} = \mathbf{q}_{\text{sth}} (\mathbf{q}_{\text{sth}}^{-1} \mathbf{q}_d)^{c_0 \cdot s_{\text{stance}}(t)} \quad (2)$$

여기에서 $\mathbf{q}_{\text{pelvis}}$ 는 참조 모션의 다음 프레임에서의 골반의 방향이며, \mathbf{q}_{hip} 은 현재 시뮬레이션 되는 캐릭터의 스탠스 힙 관절 각도로, 결과적으로 \mathbf{q}_d 는 목표 스탠스 힙 관절 각도 (desired stance hip joint angle)를 의미한다. $\mathbf{q}_{\text{stance,hip}}$ 은 피드백 규칙에 의해 계산되는 결과인, 다음 프레임의 시뮬레이션 목표가 될 목표 포즈의 스탠스 힙 관절 각도이며, \mathbf{q}_{sth} 는 참조 모션의 다음 프레임에서의 스탠스 관절 각도를 의미하고, c_0 는 피드백 게인 (feedback gain)

이며, $s_{\text{stance}}(t)$ 는 이번 스탠스 구간의 시작 시점에서는 0, 끝 시점에서는 1을 반환하는 0부터 1까지 부드럽게 변하는 시간에 대한 함수인 전이함수 (transition function)이다.

스탠스 힙의 목표 각도와 참조 모션의 스탠스 힙의 각도의 차이인 $\mathbf{q}_{\text{diff,stance}}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{q}_{\text{diff,stance}} = (\mathbf{q}_{\text{sth}}^{-1} \mathbf{q}_d)^{c_0 \cdot s_{\text{stance}}(t)} \quad (3)$$

$\mathbf{q}_{\text{diff,stance}}$ 를 캐릭터의 이동 방향을 기준으로 구분한 관상면 (coronal plane)으로 투영한 각도를 $\theta_{\text{diff,stance}}$ 로 부르기로 한다.

4.2 스윙 힙 피드백 규칙 변경

Lee et. al.의 제어기의 스윙 힙의 피드백 규칙은 다음과 같이 기술된다 [1].

$$\theta_{\text{swing,hip}} = \theta_{\text{swh}} + (c_1(v_d - v) + c_2(d_d - d))s_{\text{swing}}(t) \quad (4)$$

여기에서 $\theta_{\text{swing,hip}}$ 은 피드백 규칙에 의해 계산되는 결과인 목표 포즈의 스윙 힙의 관절 각도이며, θ_{swh} 는 참조 모션의 다음 프레임에서의 스윙 힙 관절 각도이고, v 와 d 는 시뮬레이션 되는 캐릭터의 스탠스 풋을 기준으로 하는 캐릭터의 질량 중심의 수평면 상에서의 위치와 속도이고, v_d 와 d_d 는 참조 모션으로부터 계산된 v 와 d 의 목표값이며, c_1 과 c_2 는 피드백 게인, $s_{\text{swing}}(t)$ 는 이번 스윙 구간에 대해 0부터 1까지 부드럽게 변하는 전이함수이다. 식 (4)는 캐릭터의 이동 방향을 기준으로 구분한 시상면 (sagittal plane)과 관상면 (coronal plane)에 대해 각각 따로 적용이 되어야 한다.

스윙 힙의 목표 각도와 참조 모션의 스윙 힙 각도의 차이인 $\theta_{\text{diff,swing}}$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_{\text{diff,swing}} = \theta_{\text{swing,hip}} - \theta_{\text{swh}} \quad (5)$$

식(4)는 스윙 레그와 스탠스 레그의 상대적인 위치 관계를 전혀 고려하고 있지 않기 때문에, 이로부터 계산된 $\theta_{\text{diff,swing}}$ 을 그대로 사용하면 스윙 레그가 스탠스 레그와 교차하며 보행하는 경우가 발생한다. 따라서 우리는 계산된 $\theta_{\text{diff,swing}}$ 의 값을 사용하되, 상황에 따라 아래와 같은 제약 및 변경을 가하는 방식을 개발했다. Figure 1에서 그 결과로 생성된 보행 경로의 예시를 볼 수 있다. 참고로 우리가 제안하는 스윙 힙 관절 각도의 변경은 관상면 상에서만 이루어진다.

- 스윙 풋이 스탠스 풋을 지나기 전에는, 스윙 레그가 스탠스 레그보다 안쪽으로 들어올 수 없도록 스윙 힙의 각도를 제한한다. 즉, $\theta_{\text{diff,stance}}$ 보다 $\theta_{\text{diff,swing}}$ 가 큰 경우에는 스윙 힙의 목표 각도인 $\theta_{\text{swing,hip}2}$ 는 다음 식과 같이 계산된다.

$$\theta_{\text{swing,hip}2} = \theta_{\text{swh}} + \theta_{\text{diff,stance}} \quad (6)$$

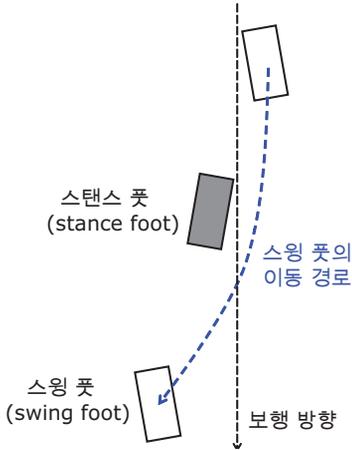


Figure 1: An example of a swing foot path generated by the modified feedback rule.

- 스윙 풋이 스텝스 풋을 지난 다음에는, 식 (4)가 본래 의도했던 바와 같은 스윙 레그의 동작을 만들어 내기 위해 식 (5)가 계산한 $\theta_{diff.swing}$ 값을 이용한다. 단, 이 때 $\theta_{diff.swing}$ 과 θ_{swh} 을 더한 값을 바로 스윙 힙의 목표 각도로 사용하면 스윙 풋이 스텝스 풋을 지난 직후의 시점에서는 스윙 힙의 목표 각도가 식 (6)이 계산한 $\theta_{swh} + \theta_{diff.stance}$ 에서 $\theta_{swh} + \theta_{diff.swing}$ 으로 갑자기 변하게 된다. 그 결과 목표 각도 경로에 불연속성이 생겨 순간적으로 스윙 힙 관절에 갑작스럽게 큰 힘이 발생하게 되고 결과적으로 정상적인 보행이 불가능해지는 문제가 생긴다. 따라서 이 시점에서의 전환을 부드럽게 하기 위해 전이함수 $s_{pass}(t)$ 를 도입한 아래의 식에 의해 스윙 힙 목표 각도를 결정한다.

$$\theta_{swing_hip2} = \theta_{swh} + \theta_{diff.stance} + (\theta_{diff.swing} - \theta_{diff.stance})s_{pass}(t) \quad (7)$$

전이함수 $s_{pass}(t)$ 는 스윙 풋이 스텝스 풋을 지난 직후의 시점에는 0, 이번 스윙 구간이 끝나는 시점에는 1을 반환하는 0부터 1까지 부드럽게 변하는 함수이다.

5. 실험 결과

본 논문이 제안하는 알고리즘의 효과성을 알아보기 위해, 손으로 조율된 파라미터로 동작하는 제어기가 제어하는 이족 보행 캐릭터를 좌, 우방향에서 임의의 외력을 가해 몸 전체가 반복적으로 좌, 우로 밀리도록 시뮬레이션하는 실험을 수행했다 (Figure 2). 캐릭터가 좌, 우로 밀리면 그 결과로 스윙 레그를 보다 좌, 우로 치우쳐 움직이게 되기 때문에, 이는 스텝스 레그와 스윙 레그가 교차할 수 있는 가능성이 많아지는 실험 설정이다.

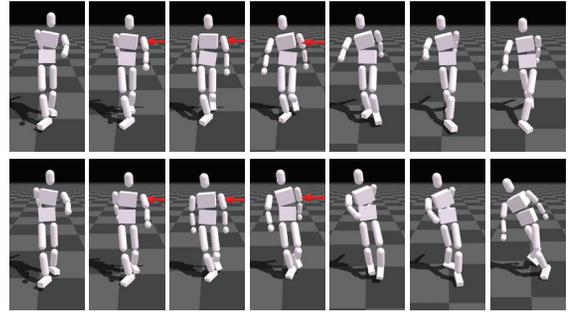


Figure 2: Comparison of our controller (top) and the original controller by Lee et. al. [1] (bottom) under the same simulation environment and external forces.

실제 사람 혹은 이족 보행 로봇과 같은 환경을 시뮬레이션 하기 위해 몸 전체의 자체 충돌 검출을 켜 상태로 시뮬레이션을 수행하였으며, 따라서 두 다리의 교차가 일어나는 상황에서는 다리가 서로 충돌하며 균형을 잃고 넘어지게 된다. 참고로 실험에 사용된 손으로 조율된 파라미터 셋트는 자체 충돌 검출을 사용하지 않고 외력이 없는 상황에서는 충분히 오랫동안 균형을 잃지 않고 안정적인 반복적 보행 사이클을 만들어 내는 것을 확인하였다.

같은 파라미터를 사용하고 같은 외력을 주는 동일한 환경에서, Lee et. al.의 기존의 제어기 [1]와 본 논문에서 제안하는 수정된 피드백 규칙을 사용하는 제어기는 확연히 다른 결과를 만들어내는 것을 확인할 수 있었다 (Figure 2). 몸이 오른쪽으로 밀려서 왼쪽 발인 스윙 풋을 좀 더 오른쪽으로 내딛어야 하는 상황에서, 기존의 제어기는 스윙 레그를 바로 오른쪽으로 움직이다가 오른쪽 다리인 스텝스 레그와 충돌을 일으키며 캐릭터가 바로 넘어지는 결과를 만들어냈지만, 본 논문에서 제안하는 제어기는 스윙 레그를 스텝스 레그와 부딪치지 않도록 전진시키다가 스텝스 레그를 지난 이후에 오른쪽으로 발을 내딛어서 그 이후에도 안정적인 보행을 지속하는 것을 확인할 수 있었다.

6. 토론

본 논문에서는 두 다리의 교차를 회피할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다. 이 방법은 최적화 목적함수에 두 다리에 대한 페널티를 포함하는 기존의 접근 방법과는 달리, 실제로 스윙 레그를 움직일 경로를 직접적으로 수정함으로써 예상치 않은 외력이 주어지는 등의 외부 환경의 변화가 있을 경우에도 두 다리의 충돌을 예방할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 방법은 기존에 존재하는 제어기에 최소한의 변경만 가하는 방식으로 효과적으로 구성될 수 있으며, 추가적인 계산 부담이 거의 없다는 장점이 있다. 이를 통해 컴퓨터 그래픽스 분야에서 제안된 기존의 보행 제어 알고리즘을 실제 이족 보행 로봇에 적용할 수 있는 가능성을 보였다고 말할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업이며 (No. NRF-2016R1D1A1B03930746), 2017년도 광운대학교 교내 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구결과임.

References

- [1] Y. Lee, S. Kim, and J. Lee, "Data-driven biped control," *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH 2010)*, vol. 29, no. 4, pp. 1–8, 2010.
- [2] J. K. Hodgins, W. L. Wooten, D. C. Brogan, and J. F. O'Brien, "Animating human athletics," in *SIGGRAPH*, 1995, pp. 71–78.
- [3] K. Yin, K. Loken, and M. van de Panne, "Simbicon: simple biped locomotion control," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 26, no. 3, p. 105, 2007.
- [4] T. Kwon and J. Hodgins, "Control systems for human running using an inverted pendulum model and a reference motion capture sequence," in *Proceedings of the 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 2010, pp. 129–138.
- [5] I. Mordatch, M. de Lasa, and A. Hertzmann, "Robust physics-based locomotion using low-dimensional planning," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, p. 71, 2010.
- [6] S. Coros, P. Beaudoin, and M. v. d. Panne, "Generalized biped walking control," *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH 2010)*, vol. 29, no. 4, pp. 1–9, 2010.
- [7] Y. Ye and C. K. Liu, "Optimal feedback control for character animation using an abstract model," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, p. 74, 2010.
- [8] U. Muico, Y. Lee, J. Popović, and Z. Popović, "Contact-aware nonlinear control of dynamic characters," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 28, no. 3, pp. 1–9, 2009.
- [9] L. Liu, K. Yin, M. van de Panne, and B. Guo, "Terrain runner: control, parameterization, composition, and planning for highly dynamic motions," *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Asia 2012)*, vol. 31, no. 6, 2012.
- [10] D. Han, J. Noh, X. Jin, J. S. Shin, and S. Y. Shin, "On-line real-time physics-based predictive motion control with balance recovery," *Computer Graphics Forum*, vol. 33, no. 2, pp. 245–254, 2014.
- [11] L. Liu, M. van de Panne, and K. Yin, "Guided learning of control graphs for physics-based characters," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 35, no. 3, 2016.
- [12] J. M. Wang, D. J. Fleet, and A. Hertzmann, "Optimizing walking controllers for uncertain inputs and environments," *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH 2010)*, vol. 29, no. 4, pp. 1–8, 2010.
- [13] M. de Lasa, I. Mordatch, and A. Hertzmann, "Feature-based locomotion controllers," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, p. 131, 2010.
- [14] J.-c. Wu and Z. Popović, "Terrain-adaptive bipedal locomotion control," *ACM Transactions on Graphics*, vol. 29, no. 4, p. 72, 2010.
- [15] J. M. Wang, S. R. Hamner, S. L. Delp, and V. Koltun, "Optimizing locomotion controllers using biologically-based actuators and objectives," *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH 2012)*, vol. 31, no. 4, 2012.
- [16] T. Geijtenbeek, M. van de Panne, and A. F. van der Stappen, "Flexible muscle-based locomotion for bipedal creatures," *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Asia 2013)*, vol. 32, no. 6, 2013.
- [17] I. Mordatch, J. M. Wang, E. Todorov, and V. Koltun, "Animating human lower limbs using contact-invariant optimization," *ACM Trans. Graph. (SIGGRAPH Asia 2013)*, vol. 32, no. 6, 2013.
- [18] Y. Lee, M. S. Park, T. Kwon, and J. Lee, "Locomotion Control for Many-muscle Humanoids," *ACM Trans. Graph.*, vol. 33, no. 6, pp. 218:1–218:11, Nov. 2014.

<저자소개>



이 윤 상

- 1999–2007: 서울대학교 기계항공공학부 학사
- 2007–2014: 서울대학교 컴퓨터공학부 박사
- 2014–2016: 삼성전자 소프트웨어센터 책임연구원
- 2016–현재: 광운대학교 소프트웨어학부 조교수
- 관심분야: 서Physically-Based Character Simulation, Understanding Human Body/Movement, Real-World Robots, 3D Printable Design