

안녕하세요. 심사 소견에 감사 말씀을 드립니다. 수정/지도해주신 각각의 사항에 대한 답변을 드립니다.

1. 반영하도록 하겠습니다.

2. 원고의 7페이지, 밑에서 두 번째 문단의 구체 궤적 교차를 언급할 때 인용하였습니다. 참고 문헌의 인용 순서가 잘못된 것으로 보입니다 ... 정정하도록 하겠습니다.

3. 각각의 내용을 반영하여 논문을 첨삭하였고, 아래에 첨삭한 내용에 해당하는 부분을 붙임1에 첨부합니다.

4. 공을 타격할 시 당점의 영향은 고려하지 않으며, 항상 사용자가 정중앙에 타점을 두고 타격한다고 가정합니다. 따라서 시작 각속도는 항상 0입니다. 가해지는 힘은 공의 시작 속도를 직접 지정하는 방법으로 표현하였습니다. 또한, 당구공이 당구대 표면을 이동하고 쿠션에 부딪힘에 따라 발생하는 회전의 영향 또한, 제한적인 범위에서 휴리스틱을 통해 구현하였습니다.

5. 환경의 제약으로 인해 본 연구를 교육 목적으로 근거로 삼을 수 있을 만큼 활용할 기회가 없었습니다. 따라서 구체적인 효과를 비교하거나 입증할 만한 사례를 제시하기는 어려울 것 같습니다.

그러나 질문해주신 사항에 대한 대략적인 견해를 말씀드리자면, 먼저 금전적인 측면에서 본 시스템을 구축하기 위해선 (당구대의 가격을 제하고) 약 250만원 정도의 예산을 필요로 하며, 이는 시스템 구축을 위한 일회성 지불로, 장기적으로 당구 강사를 고용하는 것에 비해 대단히 적은 비용입니다. (24시간 운용될 수 있음을 생각하면, 한 달 이내에 금액의 절대치는 상쇄될 수 있습니다)

문제가 되는 것은 학습 효과인데, 본 연구에서 구현하는 시스템은 대인 교육과 적절하게 병행되었을 때 가장 높은 효과를 볼 수 있다고 생각합니다. 학습자가 큐대를 처음 잡았을 때 교육자에게 기초적인 자세 등을 지도받고, 이후 (논문에서도 언급한 바 있듯) 어느 정도 진입 장벽을 극복할 때까지의 개인적인 연습을 본 연구의 시스템을 통해 촉진하는 식입니다.

당구와 같이 어느 정도 운동 감각(피지컬)을 요구하는 스포츠는, 학습자가 오히려 교육자가 있는 상황에서 더 큰 심리적인 부담을 느끼고 학습 능률이 떨어지는 상황이 발생할 수 있다고 생각합니다. 따라서 학습자 혼자서 당구에 익숙해질 시간이 필요한데, 이렇게 혼자서 연습하는 시간을 단축하고, AR 플랫폼의 시각 효과를 통해 혼자 연습하는 시간이 지루해지지 않도록 하는 것을 본 시스템의 궁극적인 목표로 두고 있습니다.

따라서 본 시스템이 기존의 방법을 대체하는 경쟁 대상이 되기보다는, 기존의 시스템과 상호 보완적인 역할을 수행하는 것이 바람직하다고 생각합니다.

붙임 1. 3번 항에 대한 반영 목록

경로 시뮬레이션에서 시분할 방식의 물리 시뮬레이션을 소개할 때 활용된 식 (4)와 식 (5)는 다음과 같습니다.

$$\vec{v}_{n+1} = \vec{v}_n + \vec{a}_n \Delta t \quad (4)$$

$$\vec{s}_{n+1} = \vec{s}_n + \vec{v} \Delta t \quad (5)$$

식 (4)는 단위 시간 Δt 마다 이산적으로 물리 시뮬레이션을 수행하는 시스템에서, 단위 시간 동안의 개체의 속도 변화를 계산하기 위한 적분 연산을 가속도에 대한 단위 시간의 곱으로 단순화하여 계산하고, 현재 속도에 누적합니다. 식 (5)는 같은 맥락으로 위치 변화 계산을 위한 속도에 대한 적분 연산을 단순화합니다.

식 (9)와 식 (10)은 목적을 좀 더 직관적으로 나타낼 수 있게끔, 표현을 약간 바꾸었습니다.

$$\alpha = \min\left(\frac{\Delta t}{t_{roll}}, 1\right), \quad (9)$$

$$\vec{\omega}_{n(max)} = \frac{-\vec{v}_n \times \hat{u}_{up}}{r}, \quad (10)$$

식 (9)의 α 는 공 객체의 직선 속도와 회전 속도의 일치 정도를 나타내며, 본 연구에서는 단순히 상수 t_{roll} 에 대한 Δt 의 비로 나타냈습니다. 이 때, α 의 최대값을 1로 제한합니다.

당구공이 진행 방향으로 미끄럼 없이 회전하고 있다면, 공과 지면 사이의 접점의 속도는 곧 공의 직선 방향 속도의 반대 방향이 됩니다. 이 때 각속도 벡터는 속도의 반대 방향과 접촉 평면의 법선(위 방향 벡터)의 외적을 반지름 r 로 나누어 계산합니다. 이는 식 (10)과 같습니다.

$$\vec{v}' = \vec{v}_0 + f_{s(ball)} r \vec{\omega}_{n+1} \times \hat{u}_{up}. \quad (13)$$

각속도 $\vec{\omega}_{n+1}$ 와 지면의 법선 벡터 \hat{u}_{up} 을 외적하고, 반지름 r 을 곱하면 공의 각속도를 당구대 표면에 작용하는 선속도로 표현할 수 있습니다. 식 (13)은 마찰 상수 $f_{s(ball)}$ 을 통해 이 중 일부만을 당구공 객체의 최종 선속도에 반영하여 누적합니다.

$$\vec{v}_{contact} = (r f_{s(cushion)} \vec{\omega}_{n+1} \times \hat{n}) \odot (\hat{u}_{up} \times \hat{n}), \quad (14)$$

$$\vec{v}' = \vec{v}_0 + \vec{v}_{contact}. \quad (15)$$

식 (14)의 요소별 곱(\odot 기호) 왼쪽의 식은 식(13)에서와 같이 지면에 작용하는 각속도의 선속도 표현을 계산하고, 여기에 당구대 쿠션의 마찰 상수 $f_{s(cushion)}$ 로 적용 비율을 조정합니다. 이렇게 계산된 선속도 성분은 당구대 쿠션의 수평 방향 벡터인 우측의 식 $\hat{u}_{up} \times \hat{n}$ 과 요소별 곱을 수행함으로써 접선 방향으로 작용하는 속도만 남게 됩니다.

식 (15)는 식 (14)에서 계산된 접선 방향의 속도를 충돌 이후 당구공의 최종 선속도에 누적합니다.