

실시간 자동차 동작을 표현하기 위한 단순화된 시뮬레이션 모델

이동춘*, 백낙훈**, 이종원***, 유관우*

*경북대학교 컴퓨터공학과

**경북대학교 전자전기공학부

***KOG 소프트

The simplified simulation model for real-time vehicle motion

Dong Chun Lee*, Nakhoon Baek**, Won Lee***, Kyan Woo Ryu*

Department of Computer Engineering, Kyungpook National University

Dept. of School of Electronic and Electrical Engineering, KNU

***KOG soft

본 논문에서는 3차원 지형 상에서 자동차의 움직임을 사실적으로 실시간에 시뮬레이션하기 위한 계산 모델을 제안한다. 자동차의 동작을 시뮬레이션하기 위해서는 자동차에 적용되는 모든 힘들과 그 힘을 받는 자동차 내의 복잡한 구조에 대한 분석이 필요하다. 자동차 역학 분야에서는 이러한 요소들을 모두 고려하는 분석 모델이 사용되고 있으나, 너무 많은 계산량 때문에 현재의 개인용 컴퓨터에서는 시뮬레이션이나 가상 현실, 게임 등의 응용 분야에서 적용시키기가 곤란하다. 본 논문에서는 자동차의 시뮬레이션에서 반드시 필요한 기본 동작들을 중심으로 비교적 사실적이면서도 계산량을 줄일 수 있는, 단순화된 자동차 동작 모델을 제안한다. 이 모델은 물리학 법칙들에 근거하였으며, 최종 구현된 시스템에서는 비교적 사실적으로 자동차의 주행, 가속, 점프, 전복 등의 동작을 표현할 수 있었다.

1. 서론

자동차의 동작을 시뮬레이션하기 위해서는 자동차에 작용하는 모든 힘들, 즉 엔진의 토크력, 중력, 타이어와 지면의 마찰력, 공기 저항 등을 해당 자동차의 내부 구조에 근거하여 분석한 후, 복잡한 계산 과정을 거쳐야 한다. 자동차 역학 분야에서는 복잡한 모델을 통하여 이러한 계산 과정에서의 정확도를 높이는 방향으로 대부분의 연구가 이루어져 왔다. 그러나, 이러한 분석 과정은 상당한 양의 계산을 필요로 하기 때문에, 현재의 개인용 컴퓨터에서, 특히 실시간 응용에 그대로 적용하기는 곤란하다. 본 논문에서는 가상 현실이나 컴퓨터 게임 등의 시각 위주 응용 분야들을 위한 단순화된 자동차 시뮬레이션 모델을 제시하고자 한다.

이제까지 자동차 역학 분야에서는 상당한 양의 분석 결과들이 발표되어져 왔다. 컴퓨터 그래픽스 분야에서도 다양한 연구 결과들이 발표되어 있다. Deyo, et.al.은 드라이빙 시뮬레이션(driving simulation)을 위해, constrained dynamics에 기반한 시뮬레이션 모델을 제시하였으나 [5], 이 모델 역시 상당한 계산량을 필요로 하는 단점이 있다. Jimenes et.al.은 물리적인 분석 과정을 통하여 자동차의 동작 계획(motion planning)을 개선할 수 있음을 보였다[7].

Ted Zuvich는 자동차 경주 게임에서 사용할 수 있는 단순화된 시뮬레이션 모델을 제시했다[9]. 이 모델은 상대적으로 적은 계산량을 필요로 하는 장점이 있으나, 모델 자체가 경주용 트랙에서 벌어지는 자동차의 움직임만을 고려하여 설계된 단점이 있다. 예를 들어, 자동차가 평

면으로 구성된 트랙만을 달리므로, 이 모델에서는 자동차의 회전을 yaw, 즉 트랙 평면에 수직인 벡터를 회전축으로 하는 경우만을 고려하였다. 결과적으로 이 시뮬레이션 모델에서는 울퉁불퉁한 지형에서의 점프나 과도한 원심력으로 인한 전복 등은 표현할 수 없다는 단점을 가진다.

본 논문에서는 자동차의 움직임에 미치는 영향이 큰 요소들을 주로 고려하여, 비교적 사실적인 움직임을 실시간에 처리할 수 있는 시뮬레이션 모델을 제시하고자 한다. 이 모델은 3차원 지형 정보와 함께 사용됨으로써, 자동차의 점프와 같은 동작을 표현할 수 있고, 실제 구현한 예들도 제시한다.

본 논문에서는 자동차의 정상 주행 상태에서 자동차에 가해지는 힘을 중심으로, 2장에서는 접촉력(contact force), 3장에서는 회전력, 4장에서는 자동차의 추진력, 중력, 공기 저항에 대한 계산식을 보인다. 5장에서는 점프나 제동 상황에서 필요한 처리들을 보이고, 마지막으로 6장에서 실제 구현 예제와 결론을 제시한다.

2. 접촉력(Contact force \vec{F}_c)

자동차가 어떠한 힘(중력)에 반응하다 보면 계산 과정에서 타이어나 차체가 지면에 들어가 있는 상황이 발생할 수도 있다. 자동차에 지속적으로 contact force를 가함으로써 자동차가 이러한 상태에 도달하는 것을 막을 수 있다. contact force를 이용하여 잘못된 시뮬레이션 결과를 해결하는 방법은 이미 Moore, Baraff 등이 제안한 바 있다[1,2,3,8]. 그

*본 연구는 2000년도 두뇌한국21 사업에 의하여 일부 지원되었다.

러나 이러한 방식들은 정확한 반면에 복잡한 수식으로 인하여 많은 계산량이 요구된다. 본 논문에서는 자동차와 바퀴가 연결되는 부분에 가상의 damping spring을 설정하여 contact force \vec{F}_c 와 \vec{F}_c' 에 의한 토르que \vec{T}_c 를 다음과 같이 계산한다.

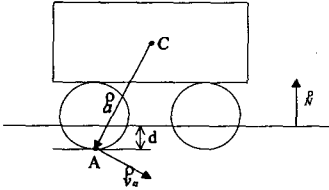


그림 1. contact 상태의 자동차

$$\vec{F}_c = (K_s \cdot d - K_d \cdot \vec{v}_a \cdot \vec{N}) \cdot \vec{N} \text{----- (1)}$$

$$\vec{T}_c = a \times \vec{F}_c \text{----- (2)}$$

여기서 K_s 는 스프링 상수이고 K_d 는 damping 상수, \vec{v}_a 는 자동차의 현재 선형 속도, d 는 자동차 바퀴와 지면과의 거리이다.

식 (1)을 계산하기 위해서는 현재 바퀴들이 접하고 있는 지면에 대한 정보가 필요하다. 만약 오른손 좌표계를 사용하는 시스템에서 바퀴들 중의 3개가 반시계 방향으로 순서가 매겨진 점 $\vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3$ 에서 각각 지면과 접하고 있다면, 지면의 Normal Vector는 $\vec{N} = (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \times (\vec{P}_3 - \vec{P}_1)$ 로 근사할 수 있고, 이 점들로 구성된 평면의 방정식은 $\vec{N} \cdot (\vec{X} - \vec{P}_1) = 0$ 로 계산되므로, 자동차와 지면 사이의 거리 d 를 계산할 수 있다.

3. 회전력(\vec{F}_a)

자동차가 곡선 주행을 할 때 자동차에는 원심력과 이에 대응하는 구심력이 작용한다. 이러한 원심력과 구심력은 자동차가 지나가고 있는 지면과의 마찰(friction)에 의해 발생하는데, 자동차가 미끄러짐이 없이 곡선 주행을 한다면 원심력의 크기는 다음과 같다.

$$|\vec{F}_{centrif}| = m \cdot \frac{v^2}{r} \text{----- (3)}$$

이 원심력의 크기는 자동차가 미끄러짐이 없다면 자동차가 받는 회전력의 크기와 같다.

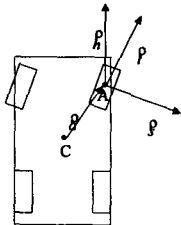


그림 2. 곡선 주행시의 자동차

자동차의 미끄러짐이 없다고 가정할 때, 자동차의 핸들각이 작으면 자동차가 움직이는 반경이 클 것이고 자동차의 핸들각이 크면 자동차가

움직이는 반경이 작으므로 자동차의 핸들각과 원심력은 비례 관계를 가진다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 자동차의 핸들각을 자동차의 머리방향 벡터 \vec{h} 와 타이어의 진행 방향 벡터 \vec{i} 가 이루는 각으로 설정하면, 이 핸들각이 커질수록 벡터 \vec{i} 와 타이어의 A지점에서의 속도 벡터가 이루는 각 또한 커진다. 즉 자동차의 머리방향 벡터와 자동차 바퀴의 contact 지점에서의 속도 벡터가 이루는 각에 비례하여 회전력을 받게 된다[10]. 따라서 식 (3)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$|\vec{F}_{centrif}| = m \cdot v^2 \cdot \text{angle}(\vec{h}, \vec{v}_a) \text{----- (4)}$$

여기서 angle은 \vec{h} 와 \vec{v}_a 가 이루는 각이고, angle은 $[-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}]$ 의 구간 내에 위치한다.

자동차 바퀴의 contact지점에서 받는 회전력의 크기는 식 (4)와 같고 그 방향은 타이어의 측면 방향인 \vec{s} 방향이다. 따라서, 자동차가 받는 회전력과 그로 인한 토르크는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{F}_a = (K_a \cdot K_f \cdot m \cdot v^2 \cdot \text{angle}(\vec{h}, \vec{V}_a)) \cdot \frac{\vec{s}}{|\vec{s}|} \text{----- (5)}$$

$$\vec{T}_a = \vec{a} \times \vec{F}_a \text{----- (6)}$$

여기서 K_a 는 회전력 상수이고 K_f 는 지면의 friction 상수로 $[0, 1]$ 구간 내의 값이다.

4. 자동차의 추진력, 중력, 공기 저항력

자동차의 추진력은 자동차 바퀴의 토르que(torque)가 지면과의 마찰을 통하여 선형 힘으로 전환되어 발생한다. 따라서 자동차의 추진력은 지면의 마찰 계수 K_f 와 자동차의 엔진 가속 수치 E 에 비례한다.

$$\vec{F}_p = K_f \cdot E \cdot \frac{\vec{h}}{|\vec{h}|} \text{----- (7)}$$

$$\vec{T}_p = \vec{a} \times \vec{F}_p \text{----- (8)}$$

여기서 \vec{h} 는 자동차의 머리방향 벡터이다.

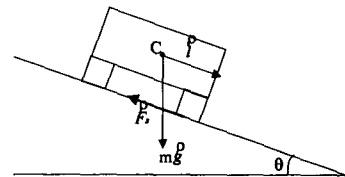


그림 3. 경사면에서 자동차에 작용하는 힘

경사가 없는 평지에 있는 자동차는 자동차에 수직 방향으로 중력의 힘을 받는다. 그러나 그림 3에서 보는바와 같이, 자동차가 경사진 지면에 측면으로 서있을 경우 자동차에는 앞으로의 미끄러짐을 방지하기 위한 마찰력 \vec{F}_f 가 발생한다. \vec{F}_f 와 그로 인한 토르크는 다음과 같이 계산된다.

$$\vec{F}_s = -(m \cdot \vec{g} \cdot \frac{\vec{i}}{|\vec{i}|}) \vec{i} \text{----- (9)}$$

$$\vec{T}_s = \vec{a} \times \vec{F}_s \text{----- (10)}$$

여기서 $\vec{\gamma}$ 은 자동차의 측면방향 벡터이다.

자동차 시뮬레이션에서 마지막으로 고려되어야 할 힘은 중력과 공기저항력이다. 모든 물체는 지구 중심 방향으로 질량에 비례하여 중력을 받고 자동차는 속력의 제곱에 비례하여 공기저항을 받게된다[10].

$$\vec{F}_g = m \cdot \vec{g} \quad \text{----- (11)}$$

$$\vec{F}_r = K_r \cdot v^2 \cdot \frac{\vec{h}}{|\vec{h}|} \quad \text{----- (12)}$$

여기서 K_r 은 공기저항 상수이다. 자동차의 움직임은 최종적으로 이제 까지 계산된 힘들을 모두 합하여 적용시킴으로서 시뮬레이션된다.

5. Jumping 또는 제동상태에서의 자동차

자동차가 지면을 주행하다 보면 자동차 바퀴가 지면에서 떨어지는 경우가 발생하는데 이 경우 자동차는 중력과 공기저항력만을 받게 된다. 이 Jumping 상태에서부터 지면에 착지하는 동작은 자동차의 바퀴와 지면이 충돌하는 상태이다. 본 논문에서는 이 충돌반응을 앞에서 언급한 contact force로서 수행할 수 있으므로 충돌반응을 위한 별도의 처리는 필요하지 않다. 만약 자동차가 제동상태에 있게 되면 자동차의 진행 반대 방향의 힘이 지면과 닿고 있는 타이어에 발생한다. 또한 제동력의 크기는 자동차의 무게와 지면의 마찰계수에 비례한다.

마지막으로 자동차 바퀴의 움직임을 살펴보면, 자동차 바퀴의 회전수는 일반적으로 자동차가 움직인 거리에 비례한다. 그러나, 자동차가 측면으로 미끄러질 수도 있으므로, 본 논문의 구현에서는 자동차 바퀴의 회전수를 자동차가 움직인 벡터를 현재의 자동차 머리방향 벡터(h)와 내적인 값으로 계산하였다.

6. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 자동차에 작용하는 중요한 힘들에 대한 계산식을 세운 후, 이를 실시간 자동차 시뮬레이션에 적용하여 보았다. 실제 구현된 시스템은 별도의 그래픽스 가속 카드가 없는 펜티엄 III 500MHz급 개인용 컴퓨터에서 초당 16 ~ 30 프레임을 출력할 수 있었다. 그림 5는 구현된 시스템에서 실시간으로 생성된, 자동차가 경사면을 타고 올라간 후 짐핑하여 지면에 닿는 일련의 과정 중에서 일부이다.

본 논문이 제안한 자동차 시뮬레이션 방법은 제시된 예제에서 보는 바와 같이, 개인용 컴퓨터에서 비교적 사실적인 영상들을 실시간으로 생성할 수 있었다. 특히, 기존의 컴퓨터 게임 분야에서 제안된 시뮬레이션 모델이 평면으로 이루어진 지면에서만 적용 가능하였던 데에 비하여, 본 논문에서 제안하는 방법은 3차원의 다양한 지형에서 적용 가능한 특징이 있다.

본 논문에서는 자동차 바퀴와 지면과의 충돌을 contact force의 계산 과정에서 처리하였으나, 자동차가 전복된 경우에 차체와 지면 간의 충돌검사와 충돌 반응을 처리하는 부분은 차체의 기하학적 정보를 이용하여 좀더 효과적으로 처리하는 방법이 필요하다. 또한 실제 가상공간에서는 지면이외의 다양한 물체들이 자동차와 충돌할 수도 있으므로, 이에 대한 충돌 검사 및 충돌 처리 방법도 연구되어져야 할 것이다.

[참고문헌]

1. D. Baraff. "Analytical Methods for Dynamic Simulation of

Non-Penetrating Rigid Bodies", *SIGGRAPH '89*, pp. 223-232, 1989.
 2. D. Baraff. "Coping with Friction for Non-Penetrating Rigid Body Simulation", *SIGGRAPH '91*, pp. 31-40, 1991.
 3. D. Baraff, "Fast Contact Force Computation for Non-Penetrating Rigid Bodies", *SIGGRAPH '94* pp. 23-34, 1994.
 4. R. Bosch. *Automotive Handbook*, Automotive Equipment Business Sector, Department for Technical Information, Stuttgart, 1996.
 5. R. Deyo, John A. Biggs and P. Doenges, "Getting Graphics in Gear: Graphics and Dynamics in Driving Simulation", *SIGGRAPH '88*, pp. 317~326, 1988.
 6. T. D. Gillespie. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers, Inc., 1992.
 7. S. Jimenez, A. Luciani and O. Raoult, "Physical Simulation of Land Vehicles with Obstacle Avoidance and Various Terrain Interactions", *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 4(2):79~94, 1993.
 8. B. Mirtich and J. Canny, Impulse-Based Simulation of Rigid Bodies, *Proceedings of 1995 Symposium on Interactive 3D Graphics*, April 1995.
 9. Ted Zuvich, Vehicle Dynamics for Racing Games, *Game Developers Conference Proceedings*, pp.741-758, 2000.
 10. 김형섭, 박경석. *자동차 역학*, 일진사, 1996.

