

테리 시계의 복원*

정대현¹⁾, 백낙훈²⁾, 이종원³⁾, 유관우⁴⁾

¹⁾경북대학교 컴퓨터공학과

²⁾경북대학교 전자전기공학부

³⁾KOG 소프트

Reproducing Terry's clock

Dae Hyun Jung¹⁾, Nakhoon Baek²⁾, Won Lee³⁾, Kyan Woo Ryu⁴⁾

¹⁾Department of Computer Engineering, Kyungpook National University

²⁾Dept. of School of Electronic and Electrical Engineering, KNU

³⁾KOG soft

요 약

최근에는 디지털 박물관을 비롯하여, 미술품이나 역사적 유물들을 디지털 형태로 재현하려는 시도들이 활발해지고 있다. 디지털 형태로의 재현은 시공간의 제약을 받지 않으면서 컴퓨터 상에서 해당 미술품이나 유물을 감상할 수 있는 기회를 제공한다. 반면에, 고전적인 기계식 시계들 중의 하나인 테리 시계(Terry's clock)와 같은, 움직이는 유물은 내부의 기계 장치와 그에 따른 동적인 움직임 때문에 컴퓨터 상에서 재현하기가 까다롭다. 특히, 시계를 비롯한 비교적 오래된 기계 장치들은 기어나 진자와 같은 각각의 부품들을 재현한 후, 그 움직임을 동역학 기법들을 비롯한, 물리 법칙에 기반한 기술들로 재현하여야 한다. 본 논문에서는 기존의 운동학 방법들을 이용하여 각 부품의 움직임을 재현함으로써, 테리 시계를 컴퓨터 상에서 복원하였다. 본 논문에서 사용된 방법들은 다른 기계 장치들의 재현에도 응용 가능하다.

1. 서론

역사적인 가치를 가지는 골동품의 상당수는 기계적인 움직임을 가진다. 특히, 르네상스 시대 이후에는 톱니바퀴(기어)를 이용한 골동품들을 많이 찾아 볼 수 있다. 본 논문에서는 이러한 기계 장치들 중의 하나인 톱니바퀴로 구동되는 시계들 중의 하나를 컴퓨터 상에서 재현하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 기어를 이용하는 기계 장치의 움직임을 사실적으로 재현할 수 있는 방법으로 사용될 수 있다. 특히, 지금은 복원하기가 곤란한 과거의 기계 장치들을 컴퓨터 상에서 재현할 수 있는 하나의 방법으로 사용될 수 있다.

본 논문에서 복원의 대상으로 택한 기계 장치는 테리 시계 시스템(Terry Eli's clock)이다. 테리 시계는 19세기 초에 개발된 시계로, 미국 역사상 최초로 대량 생산되었다는 점에서 의의의 가치를 지닌 역사적 유물이다[11].

본 논문에서는 테리 시계를 물리 기반 모델링 기법으로 재현하고자 한다. 테리 시계의 설계도로부터 기하학적 모형을 복원한 후, 시계 내부의 기계 장치들 사이의 움직임을 실제계의 물리 법칙에 따라 시뮬레이션함으로써, 사실적인 움직임을 생성할 수 있다. 시계의 움직임은 기하학적 정보와 물리적 성질들을 이용하여 제약 조건을 가지는 운동학 방법(constraint dynamics method)으로 재현하였다.

본 논문의 전체 구성은 다음과 같다. 2절에서 관련 연구에 대하여

언급하고, 3절에서는 가상의 시계를 모델링하고, 동작하는 방법에 대해 기술한다. 4절은 구현결과를 보이고, 마지막으로 5절에서 결론과 향후 과제를 제시한다.

2. 관련 연구

컴퓨터 그래픽스와 가상 현실 기술의 발달에 따라 컴퓨터 화면에서 실제계의 물체들을 사실적으로 표현할 수 있게 되었다. 기존의 회화 작품들을 디지털 형태로 재현하여 모아놓은 디지털 박물관(digital museum)까지 등장하였다[7]. 평면에 표현되는 그림의 경우에는 이미지 스캐너(image scanner)나 디지털 카메라를 사용하여 간단히 컴퓨터 화면상에 재현이 가능하다. 조각 작품들은 3차원의 기하학 정보나 3차원 스캐너에 의한 볼륨 데이터를 이용하여 재현할 수 있다[8]. 또, MCOP(multiple center of projection)과 같은 이미지 기반 렌더링 방법들을 사용하여 조각품을 재현할 수도 있다[10].

최근에는 일본철판인쇄가 3차원 입체 영상을 다각도로 볼 수 있는 기술을 개발하였다[13]. 이 기술을 이용하여 가상 박물관을 만들으로써, 예술품을 멀리 가지 않더라도 감상할 수 있는 길을 열었다. 또한 스탠퍼드대학의 디지털 미켈란젤로 프로젝트[12]도 마찬가지로이다. 이 프로젝트가 성공한다면 대영박물관을 가보지 않아도 집에서 유물들을 현실감 있게 감상할 수 있을 것이다. 이제까지의 연구개발들은 컴퓨터 상에서 정적인 이미지의 사실적인 감상에 초점을 맞추

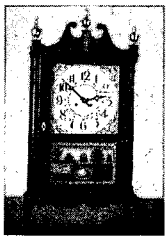
*본 연구는 2000년도 두뇌한국21 사업에 의하여 일부 지원되었다.

있다[10]. 반면에, 본 논문에서는 기존의 운동학 방법들[3,4]을 이용하여 컴퓨터 상에서 동적인 골동품들을 감상할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

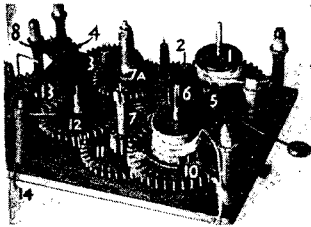
3. 구현 방법

3.1 전체 구성

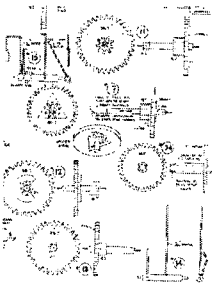
그림 1에 제시된 바와 같이, 테리 시계의 설계 도면을 이용하여 테리 시계를 복원하였다. 테리 시계는 총 15개의 기어와, 시계추를 이루는 1개의 제어막대로 구성된다. 중요한 역할을 수행하는 기어로는 동력을 발생시키는 구동 기어, 분침을 움직이는 분침 기어와 시침을 움직이는 시침 기어가 있다. 나머지 기어들은 구동 기어와 분침 기어, 시침 기어를 서로 연결시켜 동력을 전달하고 회전수를 조절하는 역할을 한다. 구동 기어의 끝 부분에는 제어 막대를 연결시켜 기어의 회전 속도를 조정한다.



(a) 실제 외형



(b) 시계 내부



(c) 부품도



(d) 가상 시계

그림 1. 테리 시계

3.2 운동학 방법의 적용

기계식 시계는 기어의 톱니바퀴들이 맞물리도록 구성되기 때문에 시계의 움직임이 물리 법칙에 맞아 들어가도록 제약 조건을 가지는 운동학 방법을 사용하여 재현할 수 있다. 제약 조건을 가지는 운동학 방법에서는 흔히 Reduced coordinate 방법과 Lagrange multiplier 방법이 사용되고 있다[3]. Reduced coordinate 방법의 사용 시에는 전체 시계의 자유도를 표현하기 위해, 물체 좌표계와 세계 좌표계를 서로 대응시키는 방법이 필요하다. 가상 시계 시스템에서는 이러한 복잡한 연산을 피하기 위해 Lagrange multiplier 방법을 사용하였다. 시계의 내부 구조에 따라 운동학 방법을 적용시키는 방법은 다음과 같다.

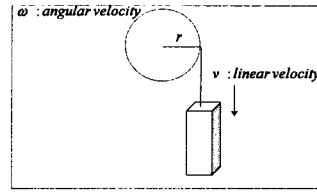


그림 2. 구동 기어 부분

우선, 구동 기어는 그림 2에서와 같이, 시계의 동력을 생성하는 무계추와 실로 연결되어 있다. 무계추는 중력에 의해 아래 방향으로 직선 운동을 하게 되고, 이 때, 무계추의 질량을 m 이라 하면, 구동 기어에는 $\vec{f} = m\vec{g}$ 의 힘이 가해진다. 이 힘에 의해 구동 기어는 $\vec{\tau} = \vec{r} \times \vec{f}$ 의 토크를 받게 되고, 이 토크 $\vec{\tau}$ 에 의해 시계가 동작한다.

구동 기어의 회전 운동은 맞물려 있는 기어들을 통하여 분침 기어와 시침 기어를 움직인다. 실제 기어에서는 동력이 톱니와 톱니가 서로 맞물림으로써 전달된다. 이 때, 맞물려 있는 기어들 간의 충돌과 그에 따른 힘의 전달을 자연 현상 그대로 구현한다면, 매우 복잡한 계산 과정을 거쳐야 할 뿐 아니라, 인접한 기어들의 톱니와 톱니를 부드럽게 맞추기가 쉽지 않다. 본 논문에서는 효과적인 구현을 위하여, 내부적으로는 기어를 간단한 원통형으로 모델링하였다. 따라서, 실제 기어의 경우에는 톱니 수가 회전수를 결정하지만, 본 논문에서의 기어는 반지름의 크기가 회전수를 결정하고, 기어와 기어의 맞물림은 기어 constraint[6]로 구현하였다.

기어 constraint에서는 서로 맞물린 기어들의 반지름을 각각 r_1 , r_2 라 하고, 이들의 각속도를 각각 ω_1 , ω_2 라 하면, 두 기어들 간에는 다음 관계식을 만족시켜야 한다.

$$r_1 \omega_1 = r_2 \omega_2$$

구동 기어의 각속도는 무계추가 발생 시킨 토크 $\vec{\tau}$ 로 부터 구할 수 있으므로, 구동 기어와 분침 기어, 시침 기어는 서로를 연결하는 기어들에 차례로 위의 관계식을 적용시킴으로써 시간의 흐름에 따라 회전하게 된다.

설계도에 의한 각 기어의 반지름 값들은 실제 시계에서는 정확한 시간을 표시하지만, 컴퓨터 상의 구현에서는 계산 과정의 오차 등의 원인으로 각 기어의 회전 비율이 정확하지는 않을 수도 있다. 반면에, 원래의 테리 시계에서는 구동 기어가 1회전하는 동안 분침 기어는 정확하게 1/60 회전한다. 본 논문에서는 각 기어의 반지름 값들을 미세하게 조정하여 오차를 보정하였다.

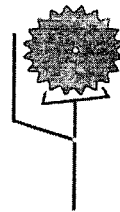


그림 3. 제어 막대

시계에 사용된 기어들 중의 하나에는 그림 3에서와 같이, 전체 기어의 회전 속도를 조절하기 위한 제어 막대(retainer wire)가 부착되어 있다. 이 제어 막대와 기어는 일정한 시간 간격마다 서로 접촉함으로써, 전체 기어의 회전에 제동을 건다. 즉, 제어 막대가 없는 경우

에는 무게추가 가하는 힘에 의해, 분침 기어와 시침 기어가 매우 빠른 속도로 회전하게 되어, 시계로서의 역할을 수행할 수 없다.

제어 막대가 일정한 간격으로 제동 기능을 수행하기 위해, 제어 막대의 일부분에는 시계추가 달려 있고, 이 시계추는 일정한 간격의 진자 운동을 한다. 이 진자 운동에 의해, 제어 막대가 좌우로 움직이면서 기어의 톱니와 일정한 간격으로 접촉한다.

제어 막대에서 진자 운동을 하는 부분의 길이를 l , 진폭의 각도를 θ 라 하면, 진자 운동의 주기 T 는 다음과 같이 계산된다[5].

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l \times \theta}{g}}$$

여기서, g 는 중력 가속도이다. 기계식 시계에서는 진폭의 각도를 일정하게 고정시키므로, 진자의 길이 l 을 조절하여 진자 운동의 주기를 조절할 수 있다. 이 진자 운동의 주기에 따라, 전체 기어의 제동 주기가 미세하게 조절되고, 결과적으로 시계의 속도를 조절할 수 있다.

본 논문에서는 기어의 톱니와 제어 막대가 서로 물리는 과정을 접촉(contact)으로 처리한다[1, 2]. 기어의 톱니와 제어막대가 접촉하는 시간은 거의 일정한 간격을 유지하고, 접촉하는 지점도 항상 같기 때문에, 이러한 접촉 처리는 일반적인 충돌 처리에 비해서는 매우 쉽게 구현할 수 있다. 또한, 이 때 발생하는 접촉힘(contact force)은 항상 일정하므로, 한 번 계산한 값을 계속 사용할 수 있다.

제어 막대는 진자 운동을 하기 위해서, 별도로 고정된 막대의 끝부분에 연결된 링(ring)모양을 통과하도록 설치된다. 즉, 링의 위치는 고정되어 있고, 제어 막대 상의 한 점은 항상 이 링 부분에 위치하여야 한다는 제약 조건을 가진다. 따라서, 이 링 부분에서 제어 막대와 고정 막대는 서로 line constraint로 연결되어 있다고 볼 수 있다. 물체의 한 점이 다른 물체의 line 상에 위치하도록 설정되는 line constraint는 구현하기가 까다롭다. 본 논문에서는 기존의 plane constraint를 이용하여 line constraint를 구현하였다. plane constraint는 물체의 특정한 점이 특정 평면상에 위치하여야 한다는 제약 조건을 가지므로[6], line constraint의 제약 조건이 되는 line을 포함하는 2개의 직교 평면을 설정한 후, 이 평면들에 대한 2개의 plane constraint를 각각 설정하여 line constraint의 제약 조건을 만족하도록 구현하였다.

4. 결과

본 논문에서 구현한 테리 시계는 그림 4에 제시된 애니메이션 시퀀스와 같이 동작하였다. 이 시스템은 테리 시계의 원 설계도에 근거하여 구현되었고, 컴퓨터 상에서 실시간으로 정확한 시간을 표시한다. 특히, 컴퓨터 상에서의 구현이라는 장점 때문에, 시계의 외관을 표현할 수 있음은 물론, 그림 4에서와 같이, 그 내부 구조와 동작 원리를 자세히 보여줄 수도 있다는 장점을 가진다. 또, 운동학 법칙에 기초하여 구현하였기 때문에, 실제 기계식 시계에서와 같이, 제어 막대의 길이를 조정함으로써, 시계의 속도를 미세하게 조절할 수도 있다.

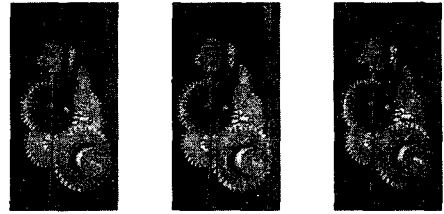
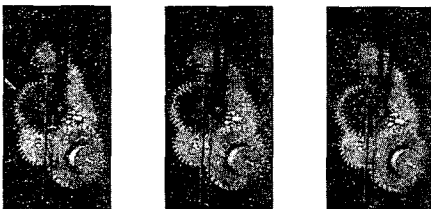


그림 4. 가상 시계의 동작

5. 결론

본 논문에서는 역사적인 의미를 가지는 유물들 중에서도 기계적인 움직임을 가지는 것들의 복원을 목적으로 하였다. 기계적인 움직임을 가지는 유물들은 대부분 기어나 진자 등의 비교적 단순한 기계 장치로 구현되어 있으므로, 기존의 운동학 법칙들을 이용하여 컴퓨터 상에서 재현하는 것이 가능하다.

본 논문은 기존의 운동학 법칙들로 실존하는 기계식 시계들 중의 하나인 테리 시계를 구현하는 과정을 보이고, 실제 구현된 결과가 작동함을 보였다. 이 과정을 통하여 기존의 물리 기반 모델링 방법들이 역사적인 유물의 복원에 유용하게 쓰일 수 있음을 보였다. 가상 박물관에서는 이러한 방법으로 기계적인 움직임을 가지는 유물들도 복원할 수 있을 것이다. 특히, 유물의 외관과 외부적인 움직임 뿐만 아니라, 내부 기계 구조들의 움직임을 보여 줄 수도 있기 때문에, 교육적 효과가 클 것으로 기대된다.

[참고 문헌]

- [1] D. Baraff, "Analytical methods for dynamic simulation of non-penetrating rigid bodies," *SIGGRAPH '89*, pp. 223-232, 1989.
- [2] D. Baraff, "Fast contact force computation for nonpenetrating rigid bodies," *SIGGRAPH '94*, pp. 23-34, 1994.
- [3] D. Baraff, "Linear-Time Dynamics using Lagrange Multipliers," *SIGGRAPH '96*, pp. 137-146, 1996.
- [4] D. Baraff and A. Witkin, *Physically Based Modeling*, SIGGRAPH'98 course note, 1999.
- [5] D. Halliday, *fundamentals of physics*, Wiley, 1997.
- [6] G. Martin, *Kinematics and dynamics of machines*, McGraw-Hill, 1982.
- [7] H. McWhinnie, "The Electronic Museum," *Computers and Graphics*, 12(2):269, 1988.
- [8] F. McGuire, "The origins of sculpture: Evolutionary 3D design," *IEEE CG&A*, 13(1):9-11, 1993.
- [9] M. Moore and J. Wilhelms, "Collision Detection and Response for Computer Animation," *SIGGRAPH88*, pp.289-298, 1988.
- [10] P. Rademacher and G. Bishop, "Multiple-Center-of-Projection Images," *SIGGRAPH98*, pp.199-206, 1998.
- [11] <http://www.britanica.com>
- [12] <http://graphics.stanford.edu/projects/mich>
- [13] 19990605 전자신문 <신기술> 예술품 가상현실 감상