

퍼지추론을 적용한 직물 애니메이션

Real Time Textile Animation Using Fuzzy Inference

황선민, 송복희, 윤한경
한국기술교육대학교

Seon-Min Hwang(smhwang@kut.ac.kr), Bok-Hee Song(bhsong@kut.ac.kr),
Han-Kyung Yun(hkyun@kut.ac.kr)

요약

본 연구는 질량-스프링 모델 기반의 직물 모델에서 질점의 움직임을 분석하여 실시간 직물 애니메이션이 가능한 퍼지 추론 기법을 제안한다. 지금까지 직물과 같은 탄성체를 표현하기 위한 많은 기법들은 질량-스프링 모델을 사용하였다. 직물은 다수의 질량과 스프링의 조합으로 구성되어 변형 가능한 면을 이루게 되고, 면의 움직임은 운동법칙을 기반으로 수치적분을 통해 계산될 수 있다. 제안된 방법과 동일한 직물 구조에서 Explicit 오일러 방법은 $\Delta t > 0.01$ 일 경우 불안정성 문제가 나타났으며, Implicit 오일러 방법은 $\Delta t = 0.03$ 에서도 애니메이션이 생성되지만 많은 양의 선형 시스템을 계산해야 하는 단점을 가지고 있어서 실시간 처리에 부적합하다. 본 연구는 질량-스프링 모델에서 질점의 움직임을 계산하기 위하여 $\Delta t = 0.03$ 을 가지면서도 실시간 처리가 가능한 방법을 제안한다.

■ 중심어 : 퍼지 추론 | 직물 애니메이션 | 질량-스프링 | 선형시스템 | 실시간 처리 |

Abstract

A fuzzy inference technique for real-time textile animation without integration at textile model based Mass-Spring model is introduced. Until now many techniques have used the Mass-Spring model to describe elastically deformable objects like textile. A textile object is able to represent as a deformable surface composed of spring and masses, the movement of textile surface which is analysed through the numerical integration by the fundamental law of dynamics such as Hooke's law. However, the integration methods have 'instability problems' if the explicit Euler's method is applied or 'large amounts of calculation' if the implicit Euler's method is applied. A simple and fast animation technique for Mass-Spring model of a textile with fuzzy inference is proposed. The stabilized simulation result is obtained the state of each mass-point in real-time for the n of mass-points by a relatively simple calculation.

■ keyword : Fuzzy Inference | Textile Animation | Mass-Spring | Linear System | Real-Time Processing |

1. 서론

지금까지 컴퓨터 그래픽스 상에서 직물을 표현하는

방법에 대한 많은 연구들이 제안되었다. 선행 연구의 대부분은 물리 기반 모델을 사용하였는데, 변형 가능 표면 모델[9], 질량-스프링 모델[6], 파티클 시스템[4],

* 이 논문은 지역산업기술개발사업 및 한국기술교육대학교 교육연구진흥비지원 프로그램의 지원에 의하여 수행되었음
접수번호 : #110420-001
접수일자 : 2011년 04월 20일
심사완료일 : 2011년 07월 19일
교신저자 : 윤한경, e-mail : hkyun@kut.ac.kr

유한 요소법[2] 등이 이에 해당된다.

본 연구에서는 실시간 직물 애니메이션 영상을 제작하기 위하여 상대적으로 간단한 질량-스프링 모델을 이용하였다. 질량-스프링 모델은 질량을 가지는 질점과 이들을 연결하는 스프링과의 간단한 힘의 법칙으로 표현한 모델로, 각 질점에 가해지는 힘을 수치적으로 적분하면 질점들의 다음 위치를 예측할 수 있게 된다. 다른 방법들에 비해 질량-스프링 모델은 비교적 적은 수의 질점들의 움직임만 계산하여 직물을 모델링 할 수 있으나, 복잡한 수치 적분을 필요로 한다.

질량-스프링 모델에 사용되는 수치 적분을 위해 제안된 방법은 Explicit 오일러 방법과 Implicit 오일러 적분 방법이 있다. Explicit 오일러 방법은 불안정성 문제를 해결하기 위해 매우 짧은 시뮬레이션 타임 스텝을 가져야 하며, Implicit 방법은 비교적 긴 타임 스텝을 허용하는 대신 대규모의 선형 시스템을 계산해야 하기 때문에 실시간 처리가 어렵다는 단점을 가지고 있다 [5][7][8].

또한, 질량-스프링 모델은 비교적 높은 탄성 계수를 사용해야 하는데 높은 탄성 계수는 시스템의 불안정성을 유발하는 요인이 된다[1][3].

본 연구에서는 질량-스프링 모델의 Explicit 오일러 방법을 기반으로 하여 긴 타임 스텝에서도 안정적이고 실시간 애니메이션이 가능한 퍼지 추론 방법을 제안한다.

Explicit 오일러 방법은 매우 짧은 시간 간격마다 힘, 가속도, 속도, 위치와 관련된 방정식을 풀어야 하지만 본 연구에서 제안한 방법은 비교적 긴 시간 간격마다 퍼지 추론을 이용하여 간단하게 질점의 다음 위치를 계산할 수 있다.

II. 질량-스프링 모델

질량-스프링 모델은 $m \times n$ 개의 질량을 가진 가상의 점들이 스프링에 의해 연결된 메쉬 형태로 구성되어 있다. 각 점들을 연결하는 스프링군의 모델은 [그림 1]의 구조를 갖고 있으며 한 질점에 영향을 미치는 스프링

은 아래와 같이 정의 된다.

- 구조적 스프링 : 각각의 점 $[i, j]$ 와 $[i+1, j]$ 또는 $[i, j]$ 와 $[i, j+1]$ 사이의 연결
- 전단(변형) 스프링 : 각각의 점 $[i, j]$ 와 $[i+1, j+1]$ 또는 $[i+1, j]$ 와 $[i, j+1]$ 사이의 연결
- 접힘 스프링 : 각각의 점 $[i, j]$ 와 $[i+2, j]$ 또는 $[i, j]$ 와 $[i, j+2]$ 사이의 연결

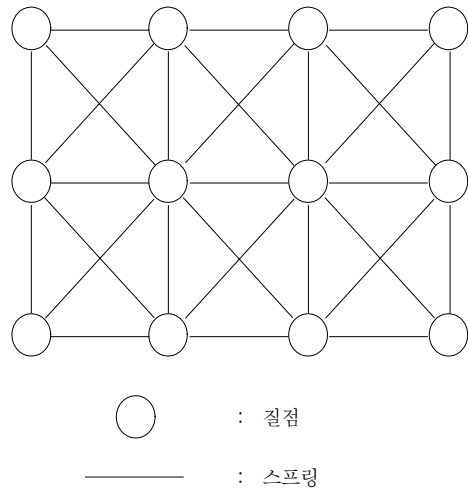


그림 1. 직물을 구성하는 질점과 스프링

각각의 질점들은 시간 t 에서 $P_{i,j}(t)$ 에 위치하게 되며 운동 법칙을 적용하면 힘은 (1)과 같이 된다.

$$F_{i,j} = \mu a_{i,j} \tag{1}$$

식 (1)에서 μ 는 각각의 점 $P_{i,j}$ 의 질량, $a_{i,j}$ 는 힘 $F_{i,j}$ 에 적용된 가속도이다. $F_{i,j}$ 는 내부 힘과 외부 힘으로 구성된다.

내부 힘은 점 $P_{i,j}$ 에 연결된 스프링의 장력으로 표현되며 식 (2)와 같다.

$$F_{inner} = -kx \tag{2}$$

식 (2)에서 k 는 스프링 상수이고, x 는 질점간의 거리이다.

외부 힘은 중력, 댐핑 등이 있으며 점 $P_{i,j}$ 에서의 중력은 식 (3)과 같다.

$$F_{gr}(P_{i,j}) = \mu g \quad (3)$$

스프링이 과도하게 축소되거나 늘어나는 것을 방지하기 위해 적절한 댐핑력이 필요하며 그 힘은 식 (4)와 같다.

$$F_d(P_{i,j}) = -C_d v_{i,j} \quad (4)$$

식 (4)에서 C_d 는 댐핑 계수이며, $v_{i,j}$ 는 점 $P_{i,j}$ 에서의 속도이다.

결국, 질점에 대한 힘은 내부 힘과 외부 힘의 합으로서 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$F(P_{i,j}) = -kx - C_d v_{i,j} \quad (5)$$

Explicit 오일러 방법을 이용하여 식 (6)과 같이 가속도를 구할 수 있다.

$$a_{i,j}(t + \Delta t) = \frac{1}{\mu} F_{i,j}(t) \quad (6)$$

식 (6)에서 Δt 는 시뮬레이션 타임 스텝으로 길어지면 모델이 불안정하게 되는 요인이 된다.

가속도 $a_{i,j}$ 를 적분해서 식 (7)과 같이 시간 t 에서의 질점의 속도를 구할 수 있다.

$$v_{i,j}(t + \Delta t) = v_{i,j}(t) + \Delta t a_{i,j}(t + \Delta t) \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 속도를 적분하면 식 (8)과 같이 시간 t 에서의 질점의 위치를 구할 수 있다.

$$P_{i,j}(t + \Delta t) = P_{i,j}(t) + \Delta t v_{i,j}(t + \Delta t) \quad (8)$$

III. 질량-스프링 모델 분석과 "유효 힘"

본 연구에서는 질점의 위치를 결정하는 데 있어서 질점에 가해진 힘을 "유효 힘"으로 변환하여 다음 시간의 질점의 위치를 추론하는 방법을 사용한다.

"유효 힘"은 질점의 다음 위치를 결정하는 요소이며 식 (9)와 같이 시간 t 의 유효 힘과 $t+1$ 시간의 힘의 합으로 계산할 수 있다.

$$F_{ef}(t + \Delta t) = F_{ef}(t) + F(t + \Delta t) \quad (9)$$

- $F_{ef}(t)$: 시점 t 에서의 유효 힘

"유효 힘"과 Δt 동안 질점이 움직인 거리는 식 (10)과 같은 관계를 가진다.

$$R(t + \Delta t) - R(t) \approx \frac{F_{ef}(t + \Delta t)}{\mu \cdot (1/\Delta t^2)} \quad (10)$$

- $R(t)$: 시점 t 에서의 질점 위치
- μ : 질점의 질량

따라서 시간 t 에서 질점에 가해진 "유효 힘"으로부터 퍼지 추론을 이용하여 질점이 움직인 거리를 계산할 수 있다.

Explicit 오일러 적분법을 이용하여 질점에 가해진 힘과 "유효 힘", 그리고 질점이 움직인 거리와의 관계를 [표 1]에 나타낸다. [표 1]을 보면 "유효 힘"과 질점이 움직인 거리가 비례함을 알 수 있다.

표 1. x 성분에 대한 유효 힘과 질점의 이동거리 관계(질점의 질량 : 0.3, Δt : 0.01)

time	힘	유효 힘	이동 거리
t	-0.0000999	-0.0002413	-0.0000001
t+ Δt	-0.0001446	-0.0003859	-0.0000001
t+2 Δt	-0.0001980	-0.0005839	-0.0000002
t+3 Δt	-0.0002591	-0.0008430	-0.0000003
t+4 Δt	-0.0003277	-0.0011707	-0.0000004
t+5 Δt	-0.0004041	-0.0015748	-0.0000005
t+6 Δt	-0.0004892	-0.0020640	-0.0000007
t+7 Δt	-0.0005838	-0.0026478	-0.0000009
t+8 Δt	-0.0006881	-0.0033359	-0.0000011
t+9 Δt	-0.0008019	-0.0041378	-0.0000014

y 성분과 z 성분도 x 성분과 동일한 비례 관계를 보
이므로 여기서는 생략한다.

$$F_{tot}(P_{i,j}) = F(P_{i,j}) + F_{gr}(P_{i,j}) + F_{dis}(P_{i,j}) + F_{vi}(P_{i,j}) \quad (12)$$

- $F(P_{i,j})$: 스프링 힘
- $F_{gr}(P_{i,j})$: 중력
- $F_{dis}(P_{i,j})$: 댐핑력
- $F_{vi}(P_{i,j})$: 풍력

IV. 퍼지 추론에 의한 질점 위치 계산

1. 스프링 힘의 계산

질점 $P_{i,j}$ 에 가해진 스프링 힘은 식 (11)에 의해 구한
다.

$$F(P_{i,j}) = - \sum_{(k,l) \in R} K_{i,j,k,l} \frac{l_{i,j,k,l} - l_{i,j,k,l}^0}{\|l_{i,j,k,l}\|} \quad (11)$$

- R : 스프링에 연결된 모든 질점
- $l_{i,j,k,l}$: $P_{i,j}$ 과 $P_{k,l}$ 의 거리
- $l_{i,j,k,l}^0$: $P_{i,j}$ 과 $P_{k,l}$ 에 연결된 스프링의 초기 길이
- $K_{i,j,k,l}$: 스프링 상수

t+1 시점에서 질점에 가해지는 힘은 [그림 2]와 같이
인접 질점들에 가해진 힘에 의해 영향을 받게 된다. 질
점 $P_{i,j}$ 에 가해지는 힘은 t 시점에서 인접 질점들과의
스프링 힘을 이용하여 계산할 수 있다.

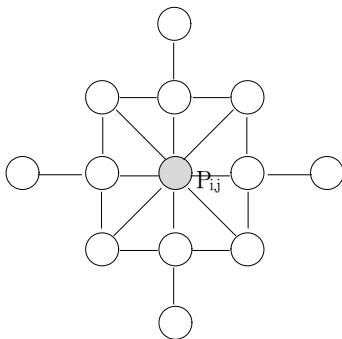


그림 2. 질점 $P_{i,j}$ 에 힘을 가하는 점들의 집합

시점 t에서 질점에 가해지는 모든 힘은 식(12)와 같이
스프링 힘과 중력, 댐핑력, 풍력의 합으로 나타낼 수 있
다.

2. 유효 힘을 이용한 퍼지 추론

본 연구에서는 질점의 위치 추론을 위하여 질량-스
프링 모델을 이용하며, 각각의 질점에 가해진 힘이 스
프링 힘의 한계치에 도달할 경우 질점의 위치는 현재
진행방향의 반대방향으로 변화하게 된다.

시점 t에서 질점의 위치를 추론하면서 t+1 시점에서
질점에 가해진 힘을 계산하는 과정을 반복함으로써 실
시간으로 직물 애니메이션을 행할 수 있다.

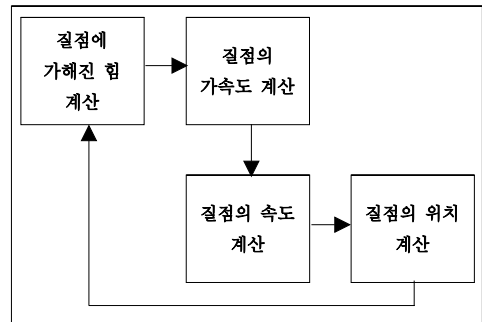


그림 3. Explicit 오일러 방법에 의한 애니메이션 프
로세스

[그림 3]은 Explicit 오일러 방법을 이용하여 t+1 시점
에서의 질점의 위치를 계산하는 과정이며 [그림 4]는
본 연구에서 사용한 방법으로서, 질점에 가해진 힘으로
부터 한 번에 질점의 위치를 계산할 수 있다.

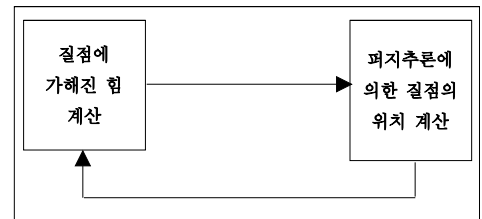


그림 4. 퍼지 추론을 적용한 애니메이션 프로세스

시점 t에서 계산된 “유효 힘”을 퍼지 추론의 입력값으로 사용하여 t+1 시점에서 질점이 움직인 거리를 추론할 수 있으며 추론된 결과는 거리 벡터이다.

시뮬레이션에 사용한 파라미터는 [표 2] 와 같다.

표 2. 시뮬레이션 파라미터

Parameter	Value
질점배열	(18, 16)
스프링상수	180
댐핑상수	3
질점 질량	0.3
풍력	(2.0, 0.0, 0.1)
Δt	0.01

시뮬레이션에 사용된 “유효 힘”의 입력 값은 x, y, z 성분 각각에 대해서 -27부터 +27 까지의 값을 가지며, 추론된 출력 값은 -0.009부터 +0.009 범위의 거리벡터이다.

본 연구에 사용된 퍼지 시스템은 입력과 출력이 각각 1개인 구조로서 추론 과정은 다음과 같다.

먼저 퍼지 추론을 위하여 유효 힘을 입력으로 하는 Member Function 은 [그림 5]와 같다.

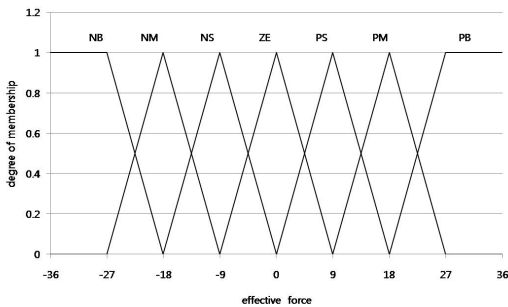


그림 5. Input Membership Function

입력된 데이터의 범위는 [표 3]과 같다.

표 3. Fuzzy Input Range

Fuzzy Value	Range
NB	[-36 -27 -18]
NM	[-27 -18 -9]
NS	[-18 -9 0]
ZE	[-9 0 9]
PS	[0 9 18]
PM	[9 18 27]
PB	[18 27 36]

다음 단계로 퍼지 규칙을 [그림 6]과 같이 설계한다.

Rule 1 : if x is NB, then z is NB
Rule 2 : if x is NM, then z is NM
Rule 3 : if x is NS, then z is NS
Rule 4 : if x is ZE, then z is ZE
Rule 5 : if x is PS, then z is PS
Rule 6 : if x is PM, then z is PM
Rule 7 : if x is PB, then z is PB
x : Effective Force
z : Distance Vector

그림 6. Fuzzy Rules

[그림 6]의 퍼지 규칙으로부터 퍼지 출력을 구하고, 구해진 퍼지 값에 대해 defuzzification 을 수행하여 최종 출력값인 거리 벡터를 얻는다.

퍼지 출력 범위는 [표 4]와 같다.

표 4. Fuzzy Output Range

Fuzzy Value	Range
NB	[-0.012 -0.009 -0.005999]
NM	[-0.009 -0.005999 -0.003001]
NS	[-0.005999 -0.003001 0]
ZE	[-0.003001 0 0.003001]
PS	[0 0.003001 0.005999]
PM	[0.003001 0.005999 0.009]
PB	[0.005999 0.009 0.01201]

[그림 7]은 Output Membership Function 이다.

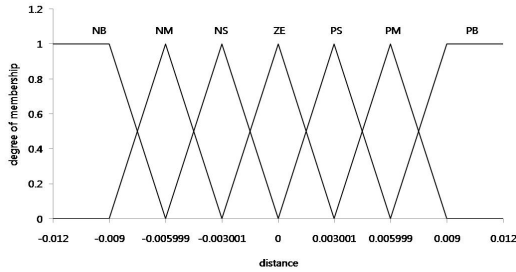


그림 7. Output Fuzzy

3. 식물 애니메이션

본 연구에 사용된 식물 모델은 [그림 8]과 같다. 식물 모델은 두 개의 고정된 점에 매달려 있는 깃발을 사용하며, 외부 힘으로 풍력의 영향을 받도록 한다. 애니메이션에 사용된 자세한 파라미터는 [표 2]와 같다.

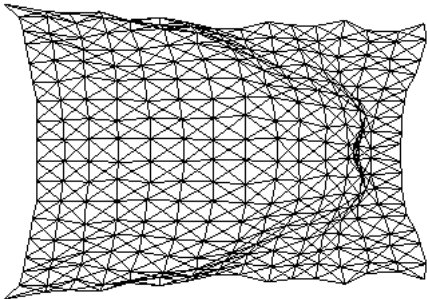


그림 8. 시뮬레이션에 사용된 식물 모델

Δt 를 0.01로 하여 Explicit 오일러 방법으로 애니메이션 한 경우와 본 연구에서 제안한 방법으로 애니메이션 한 경우를 비교한 그래프는 [그림 9]와 같다.

그래프에서 점선은 Explicit 오일러 방법에 의한 시간에 따른 거리벡터의 x성분 값이며, 실선은 제안된 방법에 의한 거리벡터의 x성분 값으로서 두 값이 유사함을 보인다.

y성분과 z성분에 대한 경우도 x성분과 동일한 형태의 결과를 나타낸다.

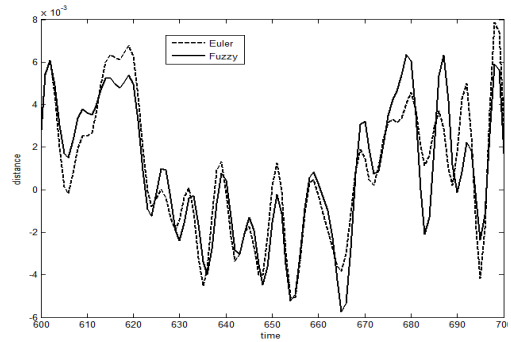


그림 9. 질점(8,7) 에서의 Explicit 오일러 방법과 제안된 방법에 대한 거리벡터 변화량 비교(x성분, $\Delta t = 0.01$)

P-IV급 PC에서 측정된 Explicit 오일러 방법과 제안한 방법과의 frame 당 CPU 시간은 [표 5]와 같다.

표 5. Frame 에 따른 CPU 시간 비교 (Mass Point: 288, triangles : 510, $\Delta t = 0.01$)

Method	Explicit Euler	Fuzzy
Time/Frame(ms)	3.73	3.59

제안된 방법을 사용한 식물 애니메이션 결과는 [그림 10][그림 11]과 같다. Explicit 오일러 방법으로는 불가능한 타임 스텝($\Delta t = 0.03$)에서도 퍼지 추론에 의해 실시간 애니메이션이 가능함을 보인다.

또한, Implicit Euler Method[7][8]에 적용된 것과 같은 긴 타임 스텝($\Delta t > 0.033$) 이상에서 애니메이션을 수행하였으나 애니메이션이 부자연스럽거나 중단됨을 확인할 수 있다.



그림 10. 제안된 방법을 사용한 식물 애니메이션 ($\Delta t = 0.01$)



그림 11. 제안된 방법을 사용한 직물 애니메이션 ($\Delta t = 0.03$)

V. 결론

본 연구에서는 질량-스프링 모델을 기반으로 실시간 직물 애니메이션을 구현하기 위한 빠르고 효율적인 방법을 제안한다. 제안된 방법은 알고리즘이 비교적 간단하지만 짧은 타임 스텝($\Delta t < 0.01$)을 가져야 하는 Explicit 오일러 방법의 단점을 극복하여 상대적으로 긴 타임 스텝($\Delta t = 0.03$)에서도 애니메이션이 가능하다는 것을 보인다.

제안된 방법에서는 질점에 가해진 힘으로부터 유효 힘을 구하여 다른 계산 없이 질점이 움직인 거리를 퍼지 추론하는 기법으로 직물 애니메이션을 구현한다. 이 추론 방법은 질량-스프링 모델을 기반으로 하는 대부분의 물리 모델링에 적용될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 질감에 따른 애니메이션의 효과를 도출하여 정량화하기 위한 연구를 진행하고 있으며 볼륨데이터에 적용하기 위한 연구가 요구된다.

참고 문헌

[1] D. Baraff and A. Witkin, "Large Steps in Cloth Simulation," Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH), pp.43-54, 1998.
 [2] G. Celniker and D. Gossard, "Deformable curve and surface finite-elements for free-form shape

design," Computer Graphics(Proc. of SIGGRAPH '91), pp.257-266, 1991.
 [3] M. P. Desbrun, P. Schroder, and A. Barr, "Interactive Animation of Structured Deformable Objects," Proceedings of Graphics Interface '99, pp.1-8, 1999.
 [4] B. Eberhardt, A. Weber, and W. Strasser, "A fast, flexible, particle-system model for cloth draping," IEEE Computer Graphics and Applications, pp.52-59, 1996.
 [5] S. Nakamura, "Initial value problems of ordinary differential equations," In Applied Numerical Methods with Software, pp.289-350, Prentice-Hall, 1991.
 [6] X. Provot, "Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior," Proc. of Graphics Interface '95, pp.147-154, 1995.
 [7] P. Volino, M. Courshesnes, and N. Magneant-Thalmann, "Versatile and Efficient Techniques for Simulating Cloth and Other Deformable Objects," In Computer Graphics Proceedings, pp.137-144, New York, 1995(8).
 [8] P. Volino, and N. Magneant-Thalmann, "Implicit Midpoint Integration and Adaptive Damping for Efficient Cloth Simulation," Computer Animation and Virtual Worlds, Wiley, 16(3-4), pp.163-175, 2005.
 [9] B. Wang, Z. Wu, Q. Sun, and M. Yuen, "A deformable model of thin flexible surfaces," Proc. of WSCG'98, pp.440-446, 1998.

저 자 소 개

황 선 민(Seon-Min Hwang)

정회원



- 1990년 2월 : 충북대학교 전자계산기공학과(공학사)
- 2003년 2월 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과(공학석사)
- 2007년 8월 : 한국기술교육대학교 전기전자공학과(공학박사수료)

<관심분야> : 퍼지, 컴퓨터 그래픽스, 물리 모델링

송 복 희(Bok-Hee Song)

정회원



- 현재 : 한국기술교육대학교 디자인공학과 교수

<관심분야> : 제품디자인, 유니버설디자인, 그린디자인, HCI, 디자인매니지먼트

윤 한 경(Han-Kyung Yun)

정회원



- 현재 : 한국기술교육대학교 컴퓨터공학부 교수

<관심분야> : 인공지능, HCI, Interactive Multimedia