

건설 그래픽 시뮬레이션 시스템의 기능개선에 관한 연구

Study on the Enhancement of the Functionality of Construction Graphical Simulation System

김영환·O 서종원**

Kim, Yeong-Hwan · Seo, Jong-Won

요 약

본 연구에서는 현재의 그래픽 시뮬레이션 시스템의 한계를 극복하기 위한 노력으로서 그래픽 시뮬레이션 시스템을 이용한 건설 프로세스 시뮬레이션 결과의 시각화와 장비 운용의 사실적 묘사를 위한 물리적 모델링에 관해서 다루었다. 비정형 물체를 다루는 공사인 토공작업에 대한 시각화를 위하여서 건설공사에 주로 사용되는 수학/통계적 시뮬레이션인 불연속사건 시뮬레이션(Discrete Event Simulation) 프로그램의 출력을 분석하여 작업시간, 대기시간, 운반물량 등에 대한 수치적 결과가 건설작업의 3차원 그래픽 시각화로 표현될 수 있도록 장비, 자재, 작업환경에 대한 객체 지향 모델을 설계하였다. 또한 그래픽 시뮬레이션을 통해서 시공과정을 현실과 보다 유사하게 표현하기 위한 일환으로서, 물리적 특성을 고려하여야만 합리적으로 묘사할 수 있는 대표적 장비운용 특성인 크레인 붐(Boom)을 움직였을 때 나타나는 케이블과 자재의 추진동에 관한 물리적 모델링을 수행하여 건설 그래픽 시뮬레이션 시스템의 유용도를 제고하였다.

키워드: 건설 그래픽 시뮬레이션, 시각화, 가상현실, 불연속사건 시뮬레이션, 물리적 모델링

1. 서 론

3차원 그래픽 시뮬레이션은 건설공사의 시공계획을 위해서 매우 유용하게 쓰일 수 있으나(Alciatore 1991, OpdenBosch 1995), 장비 및 작업의 종류에 따라 적용상의 한계를 가지고 있는 실정이다. 크레인과 같이 고정된 위치에서 기하의 형태가 분명한 정형의 물체를 인양하여 새로운 곳에 위치시키는 방식(Pick-and-Place)의 시공과정의 경우 3차원 모델을 이용한 그래픽 시뮬레이션이 매우 강력한 도구가 된다. 이는 크레인의 위치 선정, 크레인 방식 선정, 크레인의 대수 선정 등에 대한 의사결정시 가장 중요한 것이 기하적인 분석이기 때문이다.

하지만 토공과 같이 비정형의 물체를 다루는 경우에는 그래픽 시뮬레이션의 적용에 한계를 갖게 된다. 예로서 토공의 경우 장비의 조합인 도저, 굴삭기 등의 운용에 대한 시뮬레이션을 위해서 원 지반에 대한 그래픽 모델을 수정하여 작업 후 변화된 지반의 형태에 대한 대략적 시각화 등은 가능하나 변화가 심한 토질조건과 토사와 장비와의 복잡한 상호작용 등을 고려해 볼 때 굴삭 되는 토사의 양을 그래픽 모델을 이용하여 정확히 산정하는 방식의 분석에는 큰 의미를 두기 힘들기 때문이다. 이와

같은 경우에는 사용되는 장비의 작업시간, 대기시간, 작업용량 등의 수치적 데이터에 근거하여 공정전체의 생산성에 대한 분석을 하게 되는 수학/통계적 시뮬레이션이 그 장점을 보인다. 수학/통계적 시뮬레이션은 프로세스 모델 구축의 어려움 등으로 건설 분야에서의 활용이 매우 제한되어 있는 실정이다. 따라서 모델링을 용이하게 할 수 있는 방안에 대한 연구가 이루어지고 있다(Oloufa 1993, Huang and Halpin 1993, Sawhney and AbouRizk 1996). 또한 수치적으로 표현되는 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 건설사업 의사결정자들에게 확신을 주는데 상당한 어려움이 따른다. 이를 극복하기 위하여 Huang등은 시뮬레이션 진행시 프로세스 모델의 각 노드(node) 색상을 시간의 변화와 작업 상태에 따라 바꾸어 줌으로써 이에 대한 시각적 입증을 시도하였다(Huang and Halpin 1993). 만일 수치적으로 표현되는 수학/통계적 시뮬레이션 결과를 3차원 그래픽 애니메이션을 이용하여 장비의 움직임과 자재의 흐름으로서 보여줄 수 있다면, 이는 그래픽 시뮬레이션의 기능을 확장시키는 것이며 수학/통계적 시뮬레이션이 갖는 치명적 약점을 보완해주는 것이다. Kamat과 Martinez는 이러한 주제로 연구하여 수학/통계적 시뮬레이션의 결과를 3차원 그래픽으로 시각화하는 시스템을 개발하였다(Kamat and Martinez 2001,2002).

또한 현재의 건설 그래픽 시뮬레이션 시스템에는 건설 장비나 재료의 물리적인 특성을 고려하는 모델을 포함하고 있지 않다. 그래픽 시뮬레이션을 통해서 시공과정을

* 학생회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정

** 중신회원, 한양대학교 토목공학과 조교수, 공학박사, 교신저자
본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자 연구비 지원에 의한 연구의 일부임. 과제번호 2003-041-D00569.

현실과 유사하게 표현하기 위해서는 장비 및 재료의 하중, 속도 및 가속도 등의 물리적 특성을 분석할 필요가 있다. Hendrickson과 Rehak은 가상현실 방식의 건설시뮬레이션을 위한 물리적 모델의 필요성을 제안하고 있으며(Hendrickson and Rehak 1993), Beliveau와 Dal은 건설장비 시뮬레이션에 물리적 모델을 반영하는데 필요한 이론적인 기초작업 즉 모델링 이슈들에 대해 정리하였다(Beliveau and Dal 1994). 하지만 장비의 변형, 지반상태, 기상조건 등의 물리적 현상을 고려한 복잡하고 많은 시간이 소요되는 모델링 과정이 요구되며, 실시간 해석이 가능치 않게 되므로, 물리적 모델을 반영한 그래픽 시뮬레이션을 비현실적으로 만들고 있다. 이러한 물리적 모델링과 연관된 어려움에도 불구하고, 크레인 작업과 같은 시공과정처럼 물리적 특성을 동시에 고려하여야만 합리적으로 묘사할 수 있는 경우가 있다. 크레인 붐(Boom)을 움직였을 때 나타나는 케이블과 자재의 추진동은 시공성 증진 및 작업의 안전을 위해서 고려되어야 한다. 현재 건설 그래픽 시뮬레이션 시스템은 이러한 물리적인 특성을 고려하는 모델을 포함하고 있지 않다.

이 연구의 목적은 그림 1에 보이는 것처럼 앞서 언급한 건설 그래픽 시뮬레이션의 한계들을 극복하는데 있다. 본 논문에는 현재의 그래픽 시뮬레이션 시스템의 한계를 극복하기 위한 노력으로 건설 프로세스 시뮬레이션의 시각화와 물리적 모델링에 관해서 다루었다.

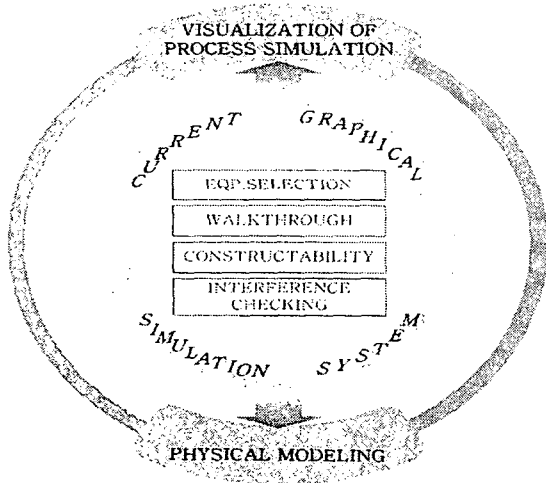


그림 1. 건설 그래픽 시뮬레이션 시스템의 기능 확장

2. 프로세스 시뮬레이션 시각화를 위한 개발 환경

SIGMA(Simulation Graphical Modeling and Analysis system)와 WorldUP®의 연계를 통하여 불연속사건 시뮬레이션(Discrete Event Simulation)의 시각화가 이루어졌다. WorldUP®(EAI-Sense8 Products)은 3차원 가상현실 응용 프로그램을 만들기 위한 소프트웨어 개발 및 제작 환경을 제공하며, SIGMA는 프로세스 시뮬레이션의 결과

를 얻기 위해 사용된 범용 불연속사건 시뮬레이션 프로그램이다.

3. 토공작업의 프로세스 시뮬레이션

프로세스 시뮬레이션의 결과를 시각화 하기위한 대상을 토공작업으로 한정하였다. 토공은 다량의 비정형 물체를 한 곳에서 다른 곳으로 운반하는 전문화된 건설 분야이다. 토공 프로세스는 크게 상차(Load), 운반(Haul), 하차(Dump) 그리고 복귀(Return)의 4가지 작업으로 분류할 수 있다. 사용된 장비는 로더와 트럭이며, 그림 2에 보여진 바와 같이 간략한 토공 프로세스의 불연속사건 시뮬레이션 모델을 구축할 수 있었다.

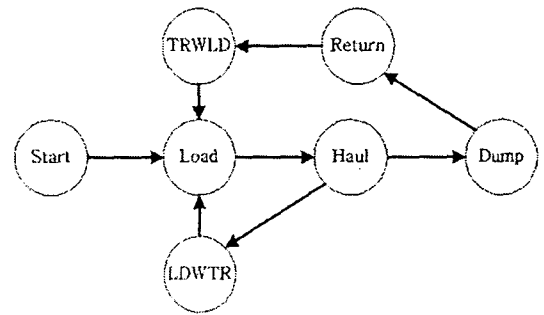


그림 2. SIGMA를 이용한 토공 모델

3.1 구성요소와 속성 식별

시스템에서 고유하거나 일시적인 구성요소와 구성요소들의 속성은 다음과 같이 구분하였다.

- 로더: 작업시간, 상태변수, 용량
- 트럭: 단계별 작업시간, 상태변수, 작업용량

3.2 상태변수 확정

시스템 요소들의 상황을 나타내주는 상태변수들이 필요하다.

- 로더의 상태(Loader: 0/1=busy/idle)
- 적재를 위해 기다리는 트럭의 수(Truck)

3.3 사건 식별

구성요소들의 상태가 변화하는 것을 사건이라 정의하였으며, 토공작업과 관련하여 다음과 같은 사건들이 발생할 것으로 가정하였다.

- 상차(Load): 시작 단계에서 트럭들은 상차작업을 위해 대기중이며, 로더는 기다리는 트럭 중 하나에 토사를 상차시키기 시작한다.
- 운반(Haul): 토사가 적재된 트럭은 운반을 시작한다.
- 로더대기(LDWTR): 상차가 끝나고, 로더는 대기상태로 복귀.

- 하차(Dump): 트럭이 사토지점에 토사를 하차시키기 시작한다.
- 복귀(Return): 하차가 끝나고, 트럭은 상차지점으로 돌아온다.
- 트럭대기(TRWLD): 상차지점으로 돌아온 트럭은 로더와 다른 트럭이 상차작업 중이면 대기한다.

3.4 사건 관계 상세화

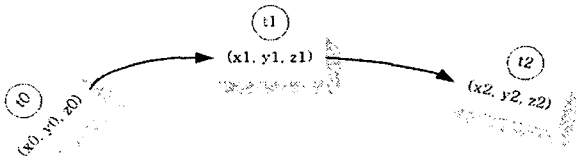
사건들 간의 관계에 따라 상태변수의 변화를 초래한다.

- 상차: 상차에 따른 로더의 상태변수, Loader=0(busy)
로더를 기다리는 트럭의 수, Truck=Truck-1
상차에 이어서 “운반”이 계획되어 있다.
- 운반: 운반에 이어서 “하차”가 계획되어 있다.
- 로더대기: 상차작업 후, 로더의 상태변수,
Loader=1(idle)
만일 Truck>0이면 “상차”가 즉시 시작된다.
- 하차: 하차에 이어서 “복귀”가 계획되어 있다.
- 복귀: 복귀에 이어서 “트럭대기”가 계획되어 있다.
- 트럭대기: 복귀하여 대기하는 트럭의 수,
Truck=Truck+1
만일 Loader>0이면 “상차”가 시작된다.

4. 토공작업의 시각화

프로세스 시뮬레이션에서 얻어진 상차, 운반, 하차, 복귀 각각의 시작시간 등의 결과로부터 작업시간이 산정되었으며, 산정된 작업시간은 텍스트 파일로 저장되어져 각각의 그래픽 객체들의 움직임을 정의하기 위한 스크립트의 입력값으로 활용된다.

그래픽 객체들의 움직임은 WorldUP@에서 Basicscript 언어를 사용해 정의된다. 특정 작업시간 안에 하나의 객체를 이동시키기 위해서는 위치와 소요시간에 대한 정보가 정의되어야만 한다.



다음의 의사 코드는 위의 그림과 같이 한 객체를 t2의 시간동안 (x0, y0, z0)의 위치에서 (x2, y2, z2)의 위치로 이동시키는 예의 일부이다. 여기서 주목할 점은 작업시간의 변화를 가상공간 내에서 장비를 움직이며 현실적으로 표현하기 위하여 장비의 위치정보와 시간정보를 융합한 것이다.

```

...
If T<=(t1-t0) then
obj.gettranslation pos
pos.x = x0+(x1-x0)/(t1-t0)*T
pos.y = y0+(y1-y0)/(t1-t0)*T

```

```

pos.z = z0+(z1-z0)/(t1-t0)*T
obj.settranslation pos
End if
If (t1-t0)<T<=(t2-t0)
obj.gettranslation pos
pos.x = x1+(x2-x1)/(t2-t1)*(T-t1)
pos.y = y1+(y2-y1)/(t2-t1)*(T-t1)
pos.z = z1+(z2-z1)/(t2-t1)*(T-t1)
obj.settranslation pos
end if
...

```

여기서 T, t0, t2는 각각 시스템의 시간, 이동이 시작되는 시간, 이동이 끝나는 시간(연속되는 동작의 시작 시간)이며, t1은 출발지점과 도착지점의 중간점이라 할 수 있는 (x1,y1,z1)에 객체가 도달했을 시의 시간이다. 토공 시뮬레이션에서 장비들의 평면 좌표가 위와 같은 방법으로 연속적으로 갱신된다. 동적인 토공 프로세스를 프로세스 시뮬레이션을 통해 얻어진 결과를 연계하여 트럭, 로더 그리고 토사의 흐름을 시간에 근거하여 효과적으로 시각화 할 수 있도록 스크립트들이 작성되었다. 그림 6은 트럭 6대와 로더 1대가 조합이 되어 진행되는 토공작업에 대한 결과 예시이다.

5. 크레인의 물리적 모델링

건설공사에서 정형물체를 다루는 대표적 장비인 크레인인 케이블을 이용하므로 흔들림과 관련된 동적 거동은 기하분석식 동시에 고려하여야 할 매우 중요한 사항이다. 그러나 현재 사용되는 그래픽 시뮬레이션 시스템은 물리적 모델을 포함하지 않으므로 이에 대한 묘사가 불가능하다.

케이블을 사용하는 크레인은 Cart-Pendulum 시스템으로 표현 될 수 있다. 케이블이 연결된 활차와 매달려 있는 물체의 역학적 해석을 통하여 활차의 위치와 케이블이 흔들리는 각에 관한 운동 방정식을 얻을 수 있으며, 이로부터 얻어진 결과가 크레인 케이블의 흔들림을 모델링하는데 사용되었다.

5.1 크레인 시스템의 역학적 고찰

다음의 그림 3의 자유물체도에서 식(1)과 (2)의 운동방정식을 얻었다.

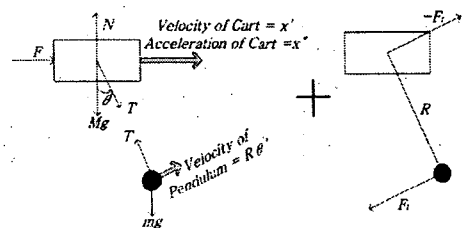


그림 3. 크레인 시스템의 자유물체도

$$(M+m)x'' = mR\theta'^2 \sin\theta - mR\theta' \cos\theta - F - dx' \quad (1)$$

$$(b/R)\theta' + m\ddot{x} \cos\theta + mR\ddot{\theta} + mgs\dot{\theta} = 0 \quad (2)$$

M : 활차의 질량

m : 매달린 물체의 질량

R : 케이블 길이

T : 케이블의 장력

x : 활차의 위치

θ : 흔들림 각

F : 활차를 움직이는 힘

F_t : 물체의 흔들림 저항으로 발생하는 우력

$$(\vec{F}_t = \frac{-b}{R}\theta'(\cos\theta\vec{i} + \sin\theta\vec{j})), b \text{ 는 저항계수}$$

g : 중력가속도

5.2 Runge-Kutta 방법을 이용한 해석

앞 절의 식(1)과 (2)를 수치해석 방법인 Runge-Kutta 방법으로 해석하기 위하여 활차의 가속도(x'')와 케이블의 각가속도(θ'')에 관하여 풀면 식(3)과 (4)를 얻을 수 있다.

$$x'' = \frac{mR\theta'^2 \sin\theta + mgs\dot{\theta} \cos\theta + F + (b/R)\theta' \cos\theta}{M + ms\dot{\theta}^2} \quad (3)$$

$$\theta'' = \frac{-mR\theta'^2 \sin\theta \cos\theta - (m+M)gs\dot{\theta} - F \cos\theta - (1+M/m)(b/R)\theta'}{R(M + ms\dot{\theta}^2)} \quad (4)$$

크레인의 콘트롤 입력(Control Input)은 활차, 즉 크레인 Tip의 가속도이다. 크레인 Tip이 정지 상태에서 가속되어 움직이고 감속하여 다시 정지하는 그림 4와 같은 가속도 프로파일을 입력으로 하여 식(3)과 (4)를 사용하면 시간에 따른 활차의 위치와 케이블의 흔들림 각에 관하여 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림 7은 이에 대한 3차원 그래픽 출력을 보여준다. 이와 같이 크레

인 작업의 물리적 모델을 이용하면, 장비와 작업환경내 충돌 확인, 시공성 분석, 양중계획(Lift Planning) 등을 현실적으로 수행할 수 있게 된다.

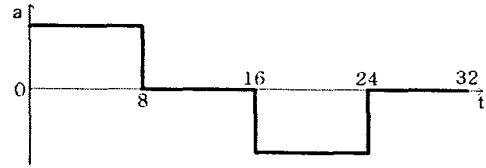


그림 4. 활차의 가속도

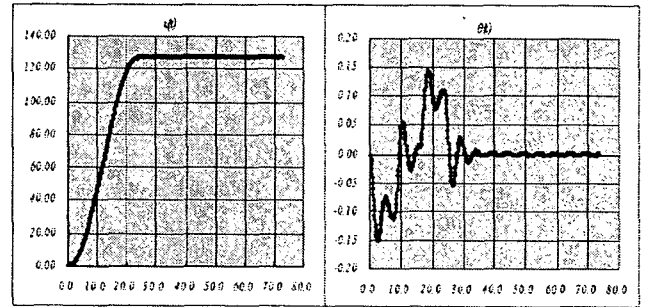


그림 5. 활차의 위치와 케이블의 흔들림 각

6. 결 론

본 연구의 목적은 건설공사의 시공계획시에 시뮬레이션을 통하여 시공과정을 수행하여 봄으로써 최적의 건설장비 및 공법을 선택하게 하고 이를 효율적으로 운용할 수 있게끔 해주는 그래픽 시뮬레이션 시스템의 개발에 있다. 본 연구에서는 불연속사건 시뮬레이션 시스템과의 연계를 통하여 토공 프로세스의 시각화가 이루어졌다. 이를 통해서 건설공사를 실제와 유사하게 시각화하여 불연속사건 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 입증할 수 있음을 알 수 있었다. 또한 시공계획 단계에서 물리적 특성을 고려한 그래픽 시뮬레이션을 통하여 더욱 합리적으로 시공과정을 묘사함으로써 물리적 모델링이 시공성 증진과 안전을 위하여 중요한 요소임을 알 수 있었다.

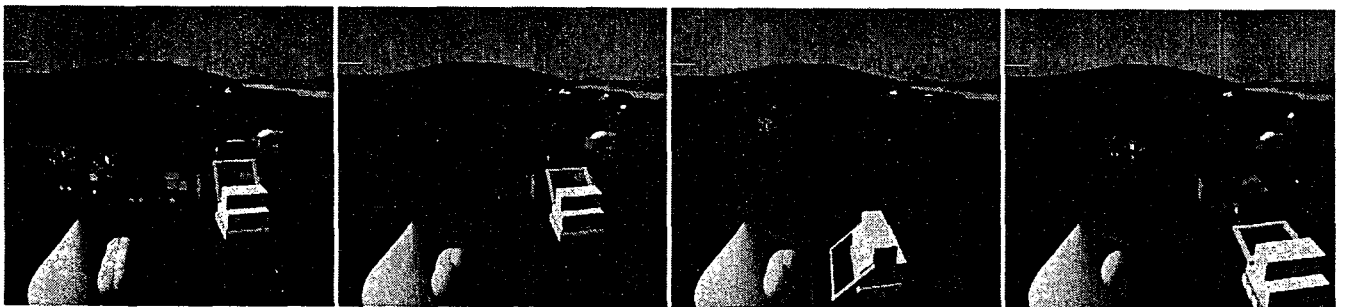


그림 6. 프로세스 시뮬레이션 시각화

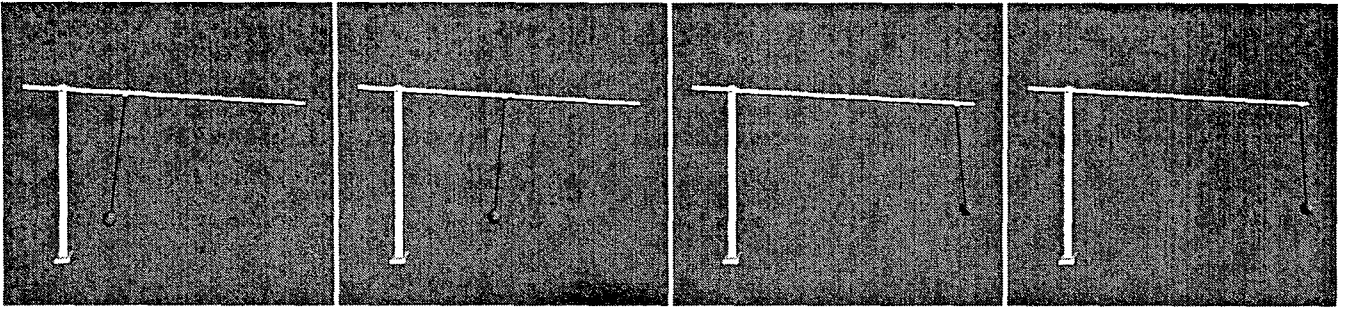


그림 7. 물리적 모델을 이용한 크레인 시뮬레이션

참고문헌

1. Alciatore, D., O'Connor, J., and Dharwadkar, P. (1991) A Survey of Graphical Simulation in Construction: Software, Usage, and Applications, Report to the Advanced Technological Systems Task Force of The Construction Industry Institute.
2. OpdenBosch, A. and Baker, N. (1995) Simulation of Construction Operations in Virtual Interactive Environments, Proceedings of the Second Congress on Computing in Civil Engineering, Atlanta, Georgia.
3. Huang, R. and Halpin, D. W. (1993) Dynamic Interface Simulation for Construction Operation (DISCO), Proceedings of the 10th International Symposium on Automation Robotics in Construction, pp. 503-510.
4. Oloufa, A. A., (1993) Modeling of building construction activities using forms, Proceedings of the 10th International Symposium on Automation Robotics in Construction, pp. 237-244.
5. Sawhney, A. and AbouRizk, S. M. (1996) Computerized tool for hierarchical simulation modeling, ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 12, No. 2, pp. 115-124.
6. Kamat, V. and Martinez J. (2001) Visualizing Simulated Construction Operations in 3D, ASCE Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 329-337.
7. Hendrickson, C. and Rehak, D. (1993) The Potential of a 'Virtual' Construction Site for Automation Planning and Analysis, Proceedings of the 10th International Symposium on Automation Robotics in Construction, pp. 511-518.
8. Beliveau, Y. J. and Dal, T. (1994) Dynamic-Behavior for Material Handling in Construction, Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 8, No. 3, pp. 269-285.
9. Schruben, L. W. (1992) SIGMA: A graphical simulation modeling program, *The Scientific Press, South San Francisco, CA.*

Abstract

Visualization of construction process simulation and physical modeling were considered to overcome the limitations of current graphical simulation. The output of discrete-event simulation programs which are the most common mathematical/statistical simulation tool for construction processes were analyzed for the visualization of earthmoving process that dealing with objects without fixed form. Object-oriented models for equipment, material and work environments were devised to effectively visualize the numerical simulation results of the working time, the queuing time as well as the amount resources etc. The oscillation of the crane's cable and the lifted material that should be considered to rationally modeled and simulated by construction graphical simulation. The derived equation of motion was solved by numerical analysis procedure. Then obtained results was used for physical modeling.

Keywords: Construction graphical simulation, Visualization, Virtual Reality, Discrete-event simulation, Physical modeling
