

동적 환경하에서의 충돌 예측 및 감지

°한 인 환*

*홍익대학교 기계설계학과

양 우 석**

**홍익대학교 전기공학과

Collision Prediction and Detection in a Dynamic Environment

Inhwan Han*

* Dept. of Mech. Design & Prod. Engineering, Hong Ik University

Woo Suk Yang**

** Dept. of Electrical Engineering, Hong Ik University

Abstract

Many dynamic mechanical systems, such as parts-feeders, walking machines, and percussive power tools, are described by equations of motion which are discontinuous. The discontinuities result from kinematic constraint changes which are difficult to foresee, especially in presence of impact. A simulation algorithm for these types of systems must be able to algorithmically predict and detect the kinematic constraint changes without any prior knowledge of the system's motion. This paper presents a rule-based approach to the prediction and detection of kinematic constraint changes between bodies with arc and line boundaries. The developed algorithm's ability to accurately and automatically detect the unpredicted changes of kinematic constraints is demonstrated with a numerical example.

1. 서론

많은 불연속동작을 가지는 다이나믹 기계 시스템은 연속적인 운동방정식에 의해 표현할 수 없을 뿐만 아니라 기구학적 구속조건 (kinematic constraint)이 변화하는 방법이나 순간을 예측할 수가 없다. 가변 토폴로지를 가지는 비선형 다이나믹 시스템의 경우, 그 다이나믹스는 물체 사이의 기구학적 구속조건식에 의해 결정된다. 그런데 이 구속조건식들은 시스템 다이나믹스의 함수로서 변화하며, 특정한 경우를 제외하고는 예측하기가 어렵다. 이러한 다이나믹 시스템을 시뮬레이션하기 위해서는 구속조건의 변화가 적절한 알고리즘에 의해 결정되어야만 한다. 이 알고리즘은 구속조건식들이 변화하는 시점을 결정해야 하고, 변화하는 토폴로지에 상응해서 기구학적 구속조건식들을 수시로 생성 혹은 제거하여 다이나믹 운동방정식을 재구성하여야만 한다.

가변 토폴로지를 가지는 기계 시스템을 해석하기 위한 시뮬레이션 패키지의 개발은, 미국을 중심으로 최근 활발히 진행 중이다. Hoffmann et al. [1]과 Cremer et al. [2] 등이 그러한 시뮬레이션 패키지들을 발표하였다. 그런데 그들은 solid modeller, 다이나믹스 해석, 제어 알고리즘등을 조합하여 단일

한 범용 패키지로 만들기 위한 종합화에 역점을 두었다. 그들의 패키지는 예측이 용이한 불연속 운동만을 포함하는 기계 시스템을 시뮬레이트 할 수 있으며, 기구학적 구속조건의 변화를 정형화하거나 분류하지 못했다. 많은 연구자들 [3,4,5]은 hinge를 가지는 기계 시스템 (고정 토폴로지 시스템)을 위한 시뮬레이션 패키지의 개발에 기여하여 왔다. 또한 기구학 해석을 위한 패키지로 잘 알려져 있는 DADS나 ADAMS등과 같은 경우에도 가변 기구학적 구속조건을 위한 event handler들을 포함하고는 있으나, 그 구속조건의 변화는 사용자에 의해 예측되고 입력되어야만 한다. Gilmore et al. [6]는 가변 토폴로지를 가지는 기계 시스템을 위해서, 구속조건들의 변화를 자동적으로 예측, 포착하여 다이나믹 운동방정식을 자동적으로 재구성하는 알고리즘을 제시하였다. 그들은 point-to-line 접촉, force closure, ray firing, state variables 등의 개념을 사용하여 구속조건의 변화들을 정형화 하였다. 그런데, 이 알고리즘은 단지 외부경계선이 직선만으로 이루어진 물체 (polygonally shaped bodies)만 취급하였을 뿐만 아니라, 모든 접촉점에서 마찰력의 개재를 허용치 않았다. 그러나 이 알고리즘은 처음으로, 예측하기 힘든 기구학적 구속조건들의 변화들을 자동적으로 예측 그리고 포착하는 rule-based 시스템이었다.

본 논문과 관련된 연구의 목적은 예측 혹은 쉽게 감지할 수 없는 기구학적 구속조건식 변화 (changes in kinematic constraint equations)를 가지는 평면 시스템 (planar system)의 다이나믹스를 고려하는 광범위한 시뮬레이션 패키지를 개발하는 것이다. 많은 부품처리 시스템은 사실상 2차원 평면 시스템으로 간주할 수 있으므로, 본 연구에서는 평면 시스템을 고려한다. 그러나 상당한 부분에서 그 결과는 3차원 시스템에 적용될 수 있을 것이다. 패키지 개발과정중 마찰을 수반하는 충돌현상을 완벽하게 해석하였고, 그 결과는 multibody system에까지 확장되었다[7]. 일부 개발 완료된 패키지에서는 외부경계선이 직선뿐만 아니라 원호 (circular arc)로도 표현되는 것을 허용한다.

동적환경에서의 동작계획에 관해서는 아주 최근에 들어와서 본격적인 연구가 미국을 중심으로 진행되고 있다[8]. 동적 환경에서의 동작계획의 핵심부는 충돌의 감지와 회피에 관한 부분이 될 것이다. 충돌 감지에 관해서는 오래전부터 많은 연

구멍이 진행되어 왔으며, 특히 다이나믹 시스템들을 위한 시뮬레이션 시스템을 개발하는 분야에서 주요한 결과[1,2,10]가 많이 발표되었다. 충돌감지를 위한 효율적인 정책은, 쉽게 예측하거나 혹은 포착할 수 없는 기구학적 변화를 가지는 다이나믹 시스템의 해석이나 설계에 필수적인 도구이다. 자동 부품 정렬, 자동 조립, 보행 로봇등의 시스템 설계, 해석, 혹은 동작 정책 수립등광범위한 부문에 적용될 수 있기 때문에 관련 공학계의 많은 분야에서 각개로 연구가 진행되고 있는 상황이다.

본 논문에서는, 개개의 물리적인 물체를 하나의 분리된 기하학적 도형 그리고 외부 경계선과 상태변수에 의해 표현되는 다이나믹 부시스템 (sub-system)으로 고려한다. 물리적으로 볼 때, 물체 사이의 접촉, 마찰 그리고 충돌현상등은 각 물체의 경계선에서 발생한다. 따라서 본 알고리즘은 경계선의 기하학을 주요하게 고려할 것이다. 문제에 대한 접근방법은 geometric modeling, 다이나믹 기계 시스템 그리고 기구학의 개념을 사용한다. 구속조건식들은 시스템 다이나믹스의 함수로서 변화하며, 특정한 경우를 제외하고는 예측하기가 어렵다. 이 문제는 많은 요소들을 포함하고 있다. 구속조건식들이 변화하는 시점이 결정되어야 하고, 적절한 구속조건식들이 수시로 생성 혹은 제거되어야만 한다. 모든 해석은 multibody system을 효과적으로 다룰 수 있도록 논리적인 체제로 편성하였다. 모든 요소들은 많은 기계시스템의 해석을 위해 유기적으로 결합되어 하나의 패키지로서 역할을 수행하고 있다. 본 논문에서 제시되는 알고리즘은 가변 기구학적 구속조건을 가지는 다이나믹 기계시스템에 일반적으로 활용될 수 있을 것이다.

2. Geometric Model

본 논문에서는 움직이는 물체들의 해석을 위해, 그 물체들의 외부 경계선을 주요한 요소로서 고려한다. 물체들의 외부 경계선은 직선뿐만 아니라 원호의 일부만이 포함되도록 하여, 보다 일반적으로 적용될 수 있는, 시뮬레이션 및 동작계획을 위한 규칙 (rules)들을 개발한다. 물체들의 간격하고도 효과적인 기하학적 묘사는 rule-base 해석 과정에 필수불가결한 전제 조건이 될 것이다. 물체들은 직선의 끝점들과 원호의 중심에 의해 묘사될 수 있다.

데이터 구조에서, 각 점들에는 원호의 Symbolic Radius가 할당된다. 만일 그점이 직선의 끝점이면, Symbolic Radius의 값은 Zero이다. Symbolic Radius가 양수값(+1)을 가지면 Convex Arc를 나타내고, 음수값(-1)을 가지면 Concave Arc를 의미한다. 추가로 직선의 양끝점들은 원호의 양끝점을 정의한다. 각 점은 물체의 경계선을 따라 시계바늘 방향으로 정의되며, 물체의 Centroid(혹은 물체 내부의 임의의 점)에 대한 극좌표 값에 의해 정의된다. 그림 1과 표 1은 예가 되는 대표적 물체의 경계선이 표현되는 방법과 물체를 기하학적으로 표현하는 수치 데이터를 보여준다.

제시하는 물체의 기하학적 표현 방법이 Rule-Based Procedure를 수행하기 위해 필요하고, 여타의 범용 목적으로도 간결하다고 여겨진다.

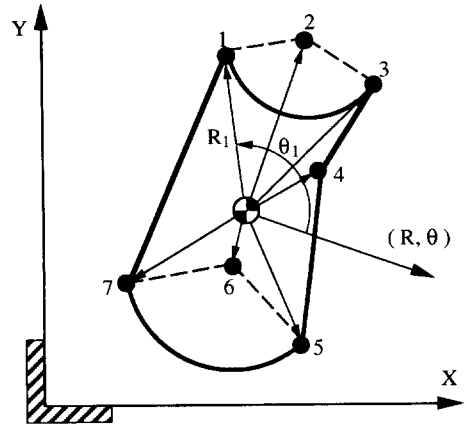


그림 1. 물체의 기하학적 묘사
표 1. 경계선 표현 수치 데이터

i	R (m)	θ (deg.)	SRC
1	.063938	111.72	0
2	.079415	91.20	-1
3	.074227	69.22	0
4	.044804	61.56	0
5	.047506	319.90	0
6	.011679	276.57	+1
7	.045495	222.27	0

3. 충돌 예측 및 감지

정의되어진 Geometric Model을 가지고, 충돌의 형태는 다음의 4가지로 나타난다.

- ◆ Point-to-Line 충돌
- ◆ Arc-to-Arc 충돌
- ◆ Point-to-Arc 충돌
- ◆ Arc-to-Line 충돌

충돌의 4가지 형태 각각에 대하여, 기하학적으로 정형화하여, 충돌을 예측(Prediction)하고 감지(Detection)하는 규칙들이 제시된다.

3.1 기구학적 구속조건식의 변화

물체 사이의 접촉모델은 다음과 같이 크게 4가지 형태로 나눌 수 있다[10].

- ◆ Arc-to-Arc 접촉
- ◆ Point-to-Arc 접촉
- ◆ Arc-to-Line 접촉
- ◆ Point-to-Line 접촉

각 접촉의 경우에 대해, 마찰을 고려한 기구학적 구속조건식들을 유도하고 다이나믹 해석을 위해 일반적인 sparse matrix 형태로 운동방정식을 유도한다. 기구학적 구속조건식의 변화는 추가, 삭제, 교환의 3가지 형태로 크게 나눌 수가 있다. 구속조건 추가는 충돌(impact)에 의해 발생한다. 그리고 삭제 및 교환은 물체사이의 상대적인 미끄럼에 의해 발생되며 그 전형적인 예가 그림 2에 보여진다. 가능한한 모든 경우를 각각 정형화 (characterization)하고, 그 변화를 자동적으로

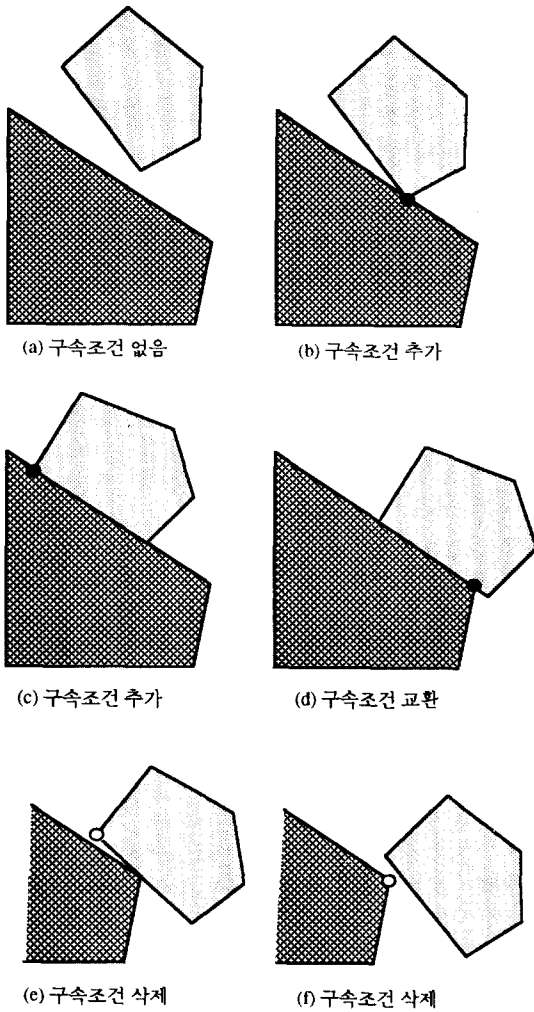


그림 2. 기구학적 구속조건식의 변화

로 예측 (predict), 포착 (detect)하는 여러가지 규칙 (rules)들이 개발되었다. 구속조건 의 삭제와 교환의 경우는 본 논문 범위 바깥에 있고 자세한 내용은 [10]을 참조하기 바란다. 따라서 user가 대상 기계시스템의 초기 토폴로지 및 초기조건과 물성치들만 입력하면, 개발된 알고리즘은 기구학적 구속조건 의 다양한 변화들을 스스로 고려하여 자동적으로 연속적인 시뮬레이션 을 수행한다.

3.2 Point-to-Line 충돌

물리적으로 한 점이 다른 물체의 경계선과 충돌하기 위해서는 그 점은 경계선을 향한 순간 상대속도를 가져야만 한다. 그림 3에 보여지는 것처럼, 충돌이 발생하기 위해서는 점의 상대속도와 경계선의 outward normal의 dot product가 음수가 되어야만 한다. 이 규칙은 해석적으로 식 (1)로 표현될 수 있으며, 시스템의 전체 점들과 직선들의 집합으로부터 충돌의 가능성이 있는 쌍들을 결정하는데 사용될 수 있다[6].

$$\mathbf{V}(j,n) \cdot \mathbf{n}(i,m) < 0 \quad (1)$$

$\mathbf{V}(j,n)$ 은 body n에 있는 점 j의 body m에 대한 순간 상대속도

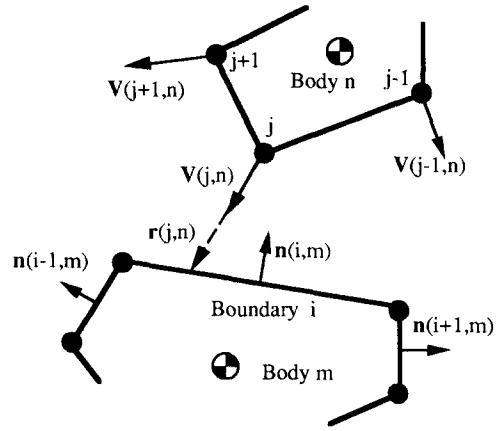


그림 3. Point-to-Line 충돌의 특성화

이고, $\mathbf{n}(i,m)$ 은 body m에 있는 경계선 i의 outward normal이다.

직선 경계선의 길이가 유한하다는 점에 착안하여, 상대속도 벡터에 의해 정의되는 점의 운동경로가 다른 물체의 경계선에 도달할 수 있을 수 있는 지에 관한 또 한가지의 추가적인 규칙을 개발할 수 있다. 순간 상대속도 벡터를 따라 점 j에서 발사되는 ray $\mathbf{r}(j,n)$ 이 경계선을 관통한다면, 그 점은 경계선과 충돌할 가능성이 있다. 이 조건과 식 (1)은 충돌 예측에 대한 규칙을 정의한다.

두개의 물체사이의 상대거리, $|\mathbf{r}(j,n)|$ 이 zero가 될 때, 두 물체는 한 점과 상응하는 경계선에서 충돌이 발생하는 것이 된다. 충돌감지에 관한 규칙은 식 (2)에 의해 표현된다.

$$|\mathbf{r}(j,n)| = 0 \quad (2)$$

3.3 Arc-to-Arc 충돌

두개의 원호가 충돌할 지도 모르는 상황이 그림 4에 보여진다. Point-to-Line 충돌과 유사하게, 원호들이 충돌하기 위해서는 원호의 중심점들이 서로를 향한 순간 상대속도를 가져야만 한다. 이 규칙은 해석적으로 식 (3)에 의해 표현된다.

$$\mathbf{V}_{jk} \cdot \mathbf{r}_{jk} < 0 \quad (3)$$

\mathbf{V}_{jk} 는 순간 상대속도 벡터이고, \mathbf{r}_{jk} 는 body m에 있는 중심점

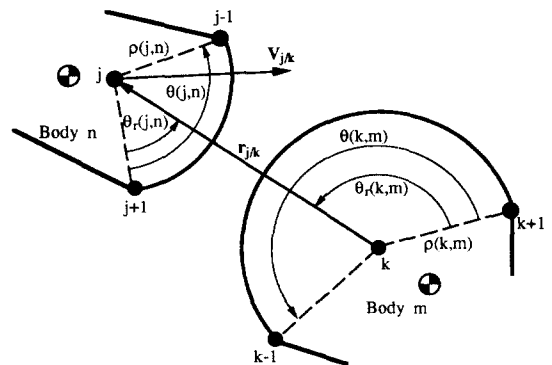


그림 4. Arc-to-Arc 충돌의 특성화

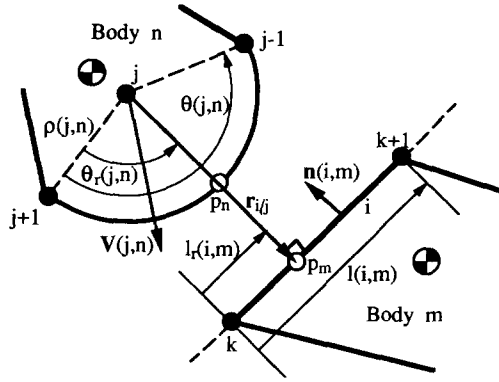


그림 5. Arc-to-Line 충돌의 특성화

k에 대한 body n에 있는 중심점 j의 상대위치 벡터이다. 원호는 완벽한 원의 일부분이라는 점에 착안, 원호들의 상대적인 방향을 고려하여, 한 원호가 다른 원호에 도달할 수 있는지를 검사하는 추가적인 규칙이 유도될 수 있다. 한 물체에 있는 원호의 중심점으로부터 다른 물체에 있는 원호의 중심점으로 발사된 ray r_{jk} 가 두 원호를 모두 관통한다면 두 원호는 충돌할 가능성이 있다. 이 규칙은 식(4)에 의해 표현된다.

$$0 \leq \theta_r(j,n) \leq \theta(j,n) \quad (4a)$$

$$0 \leq \theta_r(k,m) \leq \theta(k,m) \quad (4b)$$

식 (3)과 (4)는 충돌예측에 대한 규칙을 정의한다. 접촉을 위한 조건 즉, 충돌 감지에 대한 규칙은 해석적으로 식 (5)에 의해 표현된다.

$$|r_{jk}| - \rho(j,n) - \rho(k,m) = 0 \quad (5)$$

식 (5)에서 ρ 는 원호의 곡률 반경이다. Point-to-Arc 충돌의 경우는 $\rho(j,n) = 0$ 일 때, 두 원호의 충돌로 해석할 수 있다.

3.4 Arc-to-Line 충돌

그림 5에 한 물체의 원호와 다른 물체의 직선 경계선이 충돌할 지도 모르는 상황이 보여지고 있다. Point-to-Line 충돌과 Arc-to-Arc 충돌에서 해석했던 것처럼, Arc-to-Line 충돌이 발생하기 위해서는, 원호 중심점의 상대속도와 직선 경계선의 outward normal의 dot product가 음수가 되어야만 한다. 이 규칙은 해석적으로 식 (6)에 의해 표현된다.

$$\mathbf{V}(j,n) \cdot \mathbf{n}(i,m) < 0 \quad (6)$$

직선 경계선의 길이가 유한하고 원호가 원이 아니라는 점을 주목, 원호와 직선의 상대위치를 고려하여, 원호와 직선이 서로 접촉할 가능성이 있는지를 검사하는 추가적인 규칙이 도출된다. 이 규칙은 Point-to-Line, Arc-to-Arc 충돌의 경우와는 다소 상이하다. body m의 경계선 i에 수직하도록 body n의 원호 중심점 j로부터 발사되는 ray를 벡터 r_{ij} 로 정의한다. 그 ray가 원호를 관통하는 점들을 각각 p_n 과 p_m 으로 하면, 이 두 점에서 충돌할 가능성이 있는 것이 된다. 다시 말하면, 그 ray는 충돌을 위해서는 그 원호와 직선 경계선을 관통해야만 한다. 이 규칙은 해석적으로 식 (7)에 의해 표현된다.

$$0 \leq l_r(i,m) \leq l(i,m) \quad (7a)$$

$$0 \leq \theta_r(j,n) \leq \theta(j,n) \quad (7b)$$

식 (7)에서 $l_r(i,m)$ 은 body m에 있는 직선 경계선 i의 길이이다. 식 (6)과 (7)은 Arc-to-Line 충돌 예측에 대한 규칙을 정의한다.

원호와 직선사이의, ray r_{ij} 를 따른 상대 거리가 zero가 될 때 두 물체는 충돌한 것이 된다. 그 충돌의 감지에 대한 규칙은 식 (8)에 의해 표현된다.

$$|r_{ij}| - \rho(j,n) = 0 \quad (8)$$

언제 충돌할지를 예측하기 위해 식 (8)에서 정의된 것과 같은 상대거리와 그것의 시간에 관한 미분치를 이용한다. 이 정보는 충돌 회피를 위한 동작계획의 수립에 이용될 수 있을 것이다.

3.5 마찰력이 개재된 충돌 해석

충돌의 경우 normal impulse의 값이 일반 미끄럼 접촉의 normal force와 비교할 때 매우 크므로, 마찰에 의해 발생하는 tangential impulse가 간과될 수 없다. 그럼에도 불구하고 기존의 연구들은 마찰의 역할을 무시하거나 혹은, Coulomb의 법칙을 그대로 적용하여 단순히 normal impulse의 값에 마찰계수를 곱하여 tangential impulse의 값으로 사용하였다. 실제로, 충돌의 짧은 시간동안 그 미끄럼의 방향이 변할 수 있다는 사실을 간과한 것이다. 따라서, 그 결과는 대체로 부적절한 것이 되고, 상황에 따라서는 충돌후 운동에너지가 충돌전보다 오히려 증가하는 치명적인 오류까지 범하게 되었다[11]. 충돌문제에 대한 또 다른 해석방법으로 탄성학적인 접근방법을 들 수 있겠으나, 그 수학적 난해성과 모델링의 문제로 인해 실제 문제의 적용에 그 한계를 보여주고 있다. 부품처리 시스템 뿐만 아니라 자동차 충돌 문제에 이르기 까지, 강체역학의 범주내에서 충돌 문제를 해석하는 것이 오히려 적절하다는 연구 보고[12]가 있다. 강체역학의 범위내에서, 짧은 충돌시간동안 impulse-momentum 이론과 Coulomb의 법칙을 사용하여 마찰력을 수반하는 충돌문제에 대한 해석을 시도한 연구 결과의 일부가 본 논문의 한 공동저자에 의해 이미 발표[7]되었다.

4. 예제 - Abouncing Block on a Vibrating Table

전술한 rule-based 알고리즘을 [6],[7] 그리고 [9]에 제시된 해석과 유기적으로 결합시켜 완성된 시뮬레이션 시스템을 가지고 시험한 한 결과가 본 절에서 제시된다. 개발된 시뮬레이션 시스템에 필요한 사용자의 입력은, 물체들의 외곽선 묘사, 물성치들과 초기조건 뿐이다. 그림 6에 예제 시스템의 초기 토폴로지와 위치가 나타나 있고 표 2에는 입력 데이터가 제시된다. 예제 시스템은 Chaotic Dynamic System의 한 예로서 잘 알려져 있는 A Bouncing Ball on a Vibrating Table [12]문제와 유사하며, 로봇틱스 분야에서는 로봇트에 의한 Catching System으로도 고려할 수 있다.

그림 7은 블록과 테이블의 수직방향의 속도를 보여주고 있다. 그림에서 보여지는 것처럼, 제시된 시뮬레이션 시간동안 블록과 테이블이 운동하는 3가지의 서로 다른 영역으로 인한 심한 비선형성을 보여주고 있다. 처음, 블록의 자유비행동안 블록은 중력으로 인한 일정 가속도를 가진다. 그러나, 충돌동

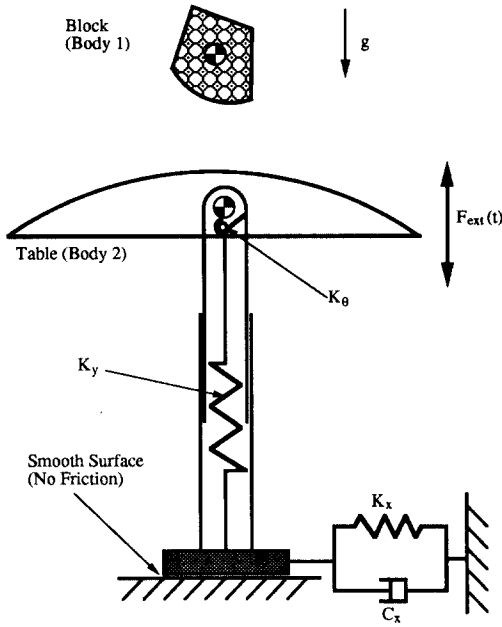


그림 6. A Bouncing Block on a Vibrating Table

표 2. 예제 시스템에 대한 입력데이터

Physical Data

Block	$m_1 = 0.415 \text{ Kg}$	$I_1 = 0.000363 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
Table	$m_2 = 0.636 \text{ Kg}$	$I_2 = 0.002980 \text{ Kg}\cdot\text{m}^2$
$K_x = 120 \text{ N/m}$	$K_y = 1700 \text{ N/m}$	
$K_\theta = 0.45 \text{ N}\cdot\text{m/rad}$	$C_x = 50 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$	
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$	$e = 0.5$	
$\mu_s = 0.3$	$\mu_k = 0.25$	
$F_{ext}(t) = 8.0\sin(2\pi\cdot 4t)$		

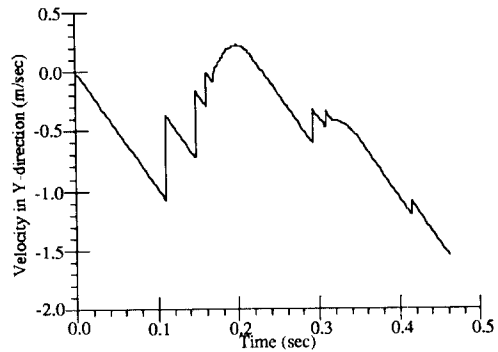
Initial Condition

Zero Initial Velocities

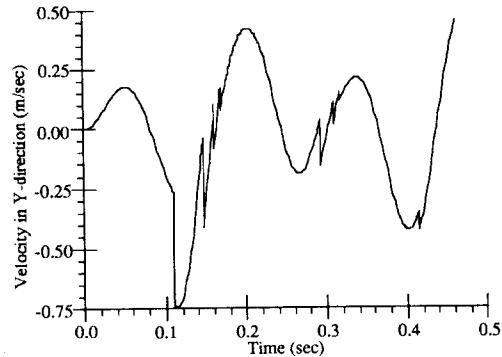
안은 아주 높은 가속도를 가지게 되는데, 이는 마찰, 충돌계수 및 상대접근 속도등에 의해 영향을 받는다. 그림 8은 시스템의 운동모습을 시뮬레이트 한 것이며, 표 3은 시뮬레이션 시간동안 발생하는 사건들을 나타내 주고 있다. 이 예제는 제시된 알고리즘이 다이나믹스 해석과 유기적으로 결합하여, 충돌과 같은, 쉽게 예측하기 힘든 구속조건의 변화를 정확하고도, 자동적으로 포착하고 시뮬레이트 하는 능력을 보여주고 있다. 이러한 종류의 예제는, 보행로봇이나 내부 충돌이 발생하는 많은 기계 메카니즘의 해석이나 설계와 관련하여 시사하는 바가 크다.

5. 결론

많은 다이나믹 기계시스템은 쉽게 예측할 수 없는 기구학적 구속조건의 발생으로 인한 불연속성을 필수적으로 내포하고 있다. 충돌과 같은 구속조건의 변화는 다이나믹스의 함수이



(a) Vertical Velocity of the Block



(b) Vertical Velocity of the Table

그림 7. Block과 Table의 수직방향 속도

기 때문에 특정한 경우를 제외하고는 예측하기가 불가능하다. 그러나, 본 논문에서 제시된 Rule-Based 알고리즘은 충돌과 같은 구속조건의 변화를 자동적으로 예측하고 포착한다. 이미 토의되었던 것처럼, 동적환경하에서 수립한 충돌 예측 및 감지에 관한 규칙들은, Rule-Based 다이나믹 시뮬레이션 패키지에 활용되어 그 유효성과 정확성을 입증하였다. 이러한 rule-based procedure에서 필요한 데이터는, 각 물체들의 기하학적 형상에 관한 정보, 동적초기조건 및 외력등이다. 실제의 경우, 외력에 관한 정보가 주어지기가 어렵기 때문에, 충분히 짧은 sampling period를 가지고, 움직이는 물체들의 configuration에 관한 데이터와 속도에 관한 정보가 주어지면 될 것이다.

충돌감지를 위한 효율적인 정책은, 쉽게 예측하거나 혹은 포착할 수 없는 기구학적 변화를 가지는 다이나믹 시스템의 해석이나 설계에 필수적인 도구이다. 자동 부품 정렬, 자동 조립, 보행 로봇등의 시스템 설계, 해석, 혹은 동작 정책 수립 등 광범위한 부문에 적용될 수 있다. 충돌 회피를 위한 규칙의 수립도 충돌 예측 및 감지에 관한 규칙들의 바탕위에서 도출될 수 있을 것이다. 예를 들면, 무인 반송차가 장애물들이 random하게 움직이는 상황에서, 주어진 목표점에 가장 짧은 시간내에 도달하도록 매순간마다 장애물들과의 충돌 가능성, 충돌 가능점 및 충돌 예정 시간을 산출하고, 무인차의 속도 벡터를 적절히 바꿔주는 상당히 일반적인 규칙들을 개발할 수

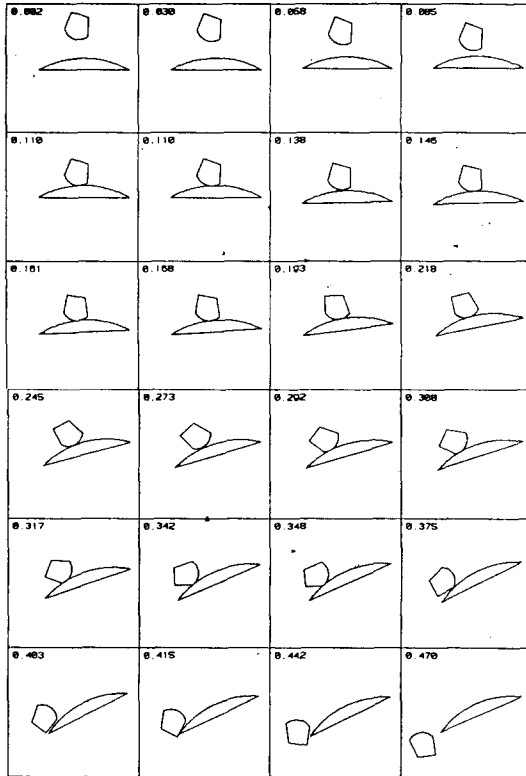


그림 8. Bouncing Block 과 Table 운동의 그래픽 애니메이션

표 3. 예제시스템에 대한 시뮬레이션 결과 요약

Time (sec)	Event Summary of Results
0.000	• The simulation begins.
0.110	• Arc-to-arc collision between the block and the table.
0.146	• Arc-to-arc collision between the block and the table.
0.161	• Arc-to-arc collision between the block and the table.
0.168	• Arc-to-arc collision between the block and the table. • Establishing an arc-to-arc constraint.
0.218	• Removing the arc-to-arc constraint.
0.292	• Arc-to-arc collision between the block and the table.
0.308	• Arc-to-arc collision between the block and the table.
0.317	• Arc-to-arc collision between the block and the table. • Establishing an arc-to-arc constraint.
0.348	• Changing the arc-to-arc to point-to-arc constraint. • Removing the point-to-arc constraint.
0.415	• Point-to-line collision between the block and the table. • The block leaves the table.

있을 것이다. 이 때, 속도 벡터의 크기는 상수로 하여, 방향만 바꿔주는 동작계획의 수립이 현실적으로 적절할 것이다.

감사: 이 연구는 1992년도 한국과학재단 연구비 지원 (923-0900-010-2)을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

[1] Hoffmann, C.M., Hopcroft, J.E., "Simulation of Physical Systems from Geometrical Models," *IEEE J. of Robotics and Automation*, Vol. 3, No. 3, pp. 194-

206, 1987.
 [2] J. F. Cremer and A. J. Stewart, "The Architecture of Newton, a General-Purpose Dynamic Simulator," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1806-1811, 1989.
 [3] Wittenburg, J., *Dynamics of Systems of Rigid Bodies*, B.G. Teubner, Stuttgart, 1977.
 [4] Nikravesh, P.E., *Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1988.
 [5] Haug, E.J., *Computer Aided Kinematics and Dynamics of Mechanical Systems Volume I: Basic Methods*, Allyn and Bacon, Mass., 1989.
 [6] B. J. Gilmore and R. J. Cipra, "Simulation of Planar Mechanical Systems with Changing Topologies, Part I: Characterization and Prediction of the Kinematic Constraint Changes, Part II: Implementation Strategy and Simulation Results for Example Dynamic Systems," *ASME J. of Mechanical Design*, Vol.113, pp. 70-83, 1991.
 [7] I. Han and B. J. Gilmore, "Multi-Body Impact Motion with Friction - Analysis, Simulation and Experimental Validation," *ASME Advances in Design Automation*, pp. 331-340, 1990, The Best Technical Paper Award, and Accepted for Publication in *ASME J. of Mechanical Design*.
 [8] K. Fujimura and H. Samet, "Motion Planning in a Dynamic Domain," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 324-330, Cincinnati, OH, May 1990.
 [9] A. Foisy, V. Hayward, and S. Aubry, "The Use of Awareness in Collision Prediction," *Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 338-343, Cincinnati, OH, May 1990.
 [10] Inhwan Han, M. M. Ogot, and B. J. Gilmore, "The Incorporation of Arc Boundaries and Stick/slip Friction in a Rule-Based Simulation Algorithm for Dynamic Mechanical Systems with Changing Topologies," *ASME Advances in Design Automation*, pp. 103-114, 1991, and Accepted for Publication in *ASME Journal of Mechanical Design*.
 [11] Keller, J.B., "Impact with Friction," *J. of Applied Mechanics*, Vol. 53, 1986, pp. 1-4.
 [12] Brach, R.M., "Tangential Restitution in Collisions," *Proc. of ASME WAM, AMD-Vol. 103*, 1989, pp. 1-7.
 [13] Holmes, P. J., "The Dynamics of Repeated Impacts with a Sinusoidally Vibrating Tables," *J. of Sound and Vibration*, Vol. 84, 1982, pp. 173-189.