



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2013년09월24일  
(11) 등록번호 10-1310276  
(24) 등록일자 2013년09월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
G06F 17/16 (2006.01) G06F 9/455 (2006.01)  
(21) 출원번호 10-2011-0120077  
(22) 출원일자 2011년11월17일  
심사청구일자 2011년11월17일  
(65) 공개번호 10-2013-0054602  
(43) 공개일자 2013년05월27일  
(56) 선행기술조사문헌  
KR1020030012782 A

(73) 특허권자  
이화여자대학교 산학협력단  
서울특별시 서대문구 이화여대길 52 (대현동, 이화여자대학교)  
한국과학기술연구원  
서울특별시 성북구 화랑로14길 5 (하월곡동)  
(72) 발명자  
김진욱  
서울특별시 노원구 하계2동 현대우성아파트 102동 407호  
김영준  
서울특별시 서대문구 이화여대길 52 (대현동, 이화여자대학교)  
(74) 대리인  
김 순 영, 김 영 철

전체 청구항 수 : 총 16 항

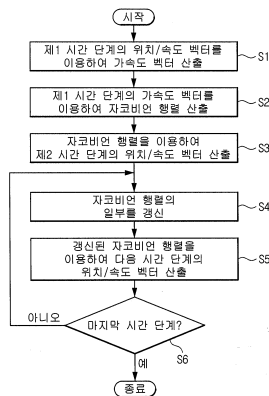
심사관 : 한선경

(54) 발명의 명칭 **연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법 및 시스템**

**(57) 요약**

연결체 강체(articulated rigid body)의 동역학 시뮬레이션 방법은, 복수 개의 강체를 포함하는 연결체 강체의 움직임을 복수 개의 시간 단계별로 산출하기 위한 방법일 수 있다. 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법은, 연결체 강체의 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여, 연결체 강체의 동역학식에 연관된 자코비언 행렬을 산출하는 단계; 자코비언 행렬을 이용하여, 연결체 강체의 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 단계; 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 단계; 및 갱신된 자코비언 행렬을 이용하여, 연결체 강체의 제3 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

**대표도 - 도1**



## 특허청구의 범위

### 청구항 1

복수 개의 강체를 포함하는 연결체 강체의 움직임을 복수 개의 시간 단계별로 산출하기 위한 동역학 시뮬레이션 방법으로서,

상기 연결체 강체의 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여, 상기 연결체 강체의 동역학식에 연관된 자코비언 행렬을 산출하는 단계;

상기 자코비언 행렬을 이용하여, 상기 연결체 강체의 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 단계;

상기 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여 상기 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 단계; 및

갱신된 상기 자코비언 행렬을 이용하여, 상기 연결체 강체의 제3 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법.

### 청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 제1 시간 단계는 상기 복수 개의 시간 단계 중 최초의 시간 단계인 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법.

### 청구항 3

제 1항에 있어서,

상기 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 단계 및 상기 제3 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 단계는, 후속하는 하나 이상의 시간 단계에 대해 반복 수행되는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법.

### 청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 자코비언 행렬은 상기 복수 개의 강체 각각에 대응되는 복수 개의 열을 포함하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법.

### 청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 단계는,

상기 복수 개의 열 중 일부의 열을 갱신하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법.

### 청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 후속하는 하나 이상의 시간 단계의 각 시간 단계에서 갱신되는 일부의 열은, 상기 각 시간 단계의 전 시간 단계에서 갱신되는 일부의 열과 적어도 부분적으로 상이한 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법.

**청구항 7**

제 4항에 있어서,

상기 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 단계는,

상기 제2 시간 단계의 속도 벡터에서 가장 큰 절대값을 갖는 성분을 산출하는 단계; 및

상기 자코비언 행렬의 상기 복수 개의 열 중 상기 가장 큰 절대값을 갖는 성분에 대응되는 열을 갱신하는 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법.

**청구항 8**

복수 개의 강체를 포함하는 연결체 강체의 움직임을 복수 개의 시간 단계별로 산출하기 위한 동역학 시뮬레이션 시스템으로서,

상기 연결체 강체의 동역학식에 연관된 자코비언 행렬을 산출함으로써, 상기 연결체 강체의 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터에 기초하여 상기 연결체 강체의 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 제1 시뮬레이션 모듈; 및

상기 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여 상기 자코비언 행렬의 일부를 갱신하며, 갱신된 상기 자코비언 행렬을 이용하여 상기 연결체 강체의 제3 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 제2 시뮬레이션 모듈을 포함하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템.

**청구항 9**

제 8항에 있어서,

상기 제1 시뮬레이션 모듈은,

상기 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여 상기 자코비언 행렬을 산출하는 자코비언 행렬 산출부; 및

상기 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터, 및 상기 자코비언 행렬을 이용하여 동역학식을 연산함으로써 상기 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 동역학식 계산부를 포함하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템.

**청구항 10**

제 8항에 있어서,

상기 제2 시뮬레이션 모듈은,

상기 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여 상기 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 자코비언 행렬 갱신부; 및

상기 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터, 및 갱신된 상기 자코비언 행렬을 이용하여 동역학식을 연산함으로써 상기 제3 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 동역학식 계산부를 포함하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템.

**청구항 11**

제 8항에 있어서,

상기 제1 시간 단계는 상기 복수 개의 시간 단계 중 최초의 시간 단계인 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템.

**청구항 12**

제 8항에 있어서,

상기 제2 시뮬레이션 모듈은, 상기 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 과정 및 상기 제3 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 과정을 후속하는 하나 이상의 시간 단계에 대해 반복 수행하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템.

**청구항 13**

제 12항에 있어서,

상기 자코비언 행렬은 상기 복수 개의 강체 각각에 대응되는 복수 개의 열을 포함하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템.

**청구항 14**

제 13항에 있어서,

상기 제2 시뮬레이션 모듈은, 상기 복수 개의 열 중 일부의 열을 갱신하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템.

**청구항 15**

제 14항에 있어서,

상기 후속하는 하나 이상의 시간 단계의 각 시간 단계에서 갱신되는 일부의 열은, 상기 각 시간 단계의 전 시간 단계에서 갱신되는 일부의 열과 적어도 부분적으로 상이한 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템.

**청구항 16**

제 13항에 있어서,

상기 제2 시뮬레이션 모듈은, 상기 제2 시간 단계의 속도 벡터에서 가장 큰 절대값을 갖는 성분을 산출하며, 상기 자코비언 행렬의 상기 복수 개의 열 중 상기 가장 큰 절대값을 갖는 성분에 대응되는 열을 갱신하는 것을 특징으로 하는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템.

**명세서****기술분야**

실시예들은 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법 및 시스템에 관한 것이다.

[0001]

**배경 기술**

- [0002] 실세계의 물리적 현상들을 컴퓨터 상에 재현하는 기술인 물리 기반 시뮬레이션 기술은 컴퓨터 애니메이션, 게임, 가상 현실, 영상 특수 효과 등 다양한 분야에 활용된다. 물리 기반 시뮬레이션에서 사용되는 기법 중 하나는 동역학 시뮬레이션이다. 동역학 시뮬레이션의 기법 중에서도 연결체 강체 동역학 시스템(articulated rigid body dynamic system)은 자연계에 존재하는 많은 시스템을 모델링하는 주요한 방법 중의 하나이다.
- [0003] 연결체 강체 동역학 시스템이란, 개별 강체를 관절로 표현하여 여러 개의 강체가 연결된 연결체 강체를 나타내는 모델로서, 인간 또는 동물 형태의 캐릭터 및 분자 구조를 나타내거나 로봇 시뮬레이션을 구현하기에 적합한 모델이다. 특히, 동역학 시뮬레이션의 양상이 점점 복잡해질수록 연결체 강체 동역학 시스템의 고속 시뮬레이션이 필수적으로 요구되고 있다. 일 예로, 미국 공개특허공보 제2003/0023415호에는 연결체 시스템의 고속 동역학 계산을 위한 방법이 개시되어 있다.
- [0004] 그러나, 연결체 강체 동역학 시스템의 동역학식에 대한 수치적 적분은 동역학 시뮬레이션 중에서도 가장 계산 복잡도가 부분 중 하나이다. 연결체 강체 동역학 시스템에서는 여러 개의 강체가 관절로 이어져 하나의 객체를 이루기 때문에 운동 방정식을 계산하기가 매우 복잡하며, 강체의 개수가 많아질수록 계산은 더욱 복잡해진다.
- [0005] 연결체 강체 동역학 시스템의 수치적 적분을 위하여 암시적 적분법(implicit integration)이 주로 사용되고 있다. 암시적 적분법의 경우 수치적으로 무조건 안정적(unconditionally stable)이기 때문에 수치적 안정성이 중요한 분야에서 많이 사용되는 방법이다. 그러나, 암시적 적분법에 의해 자유도(degree of freedom)가  $n$ 인 연결체 강체의 동역학식을 계산하는 경우 동역학식을 기술하는데만  $O(n^2)$ 의 계산 복잡도를 가지며, 동역학식을 푸는데  $O(n^3)$ 의 계산 복잡도를 가지므로 계산 복잡도가 큰 단점이 있다. 또한, 관절의 자유도가 커질수록 계산량이 급격히 증가하게 된다.

**선행기술문헌**

**특허문헌**

- [0006] (특허문헌 0001) 미국 공개특허공보 제2003/0023415호

**발명의 내용**

**해결하려는 과제**

- [0007] 본 발명의 일 측면에 따르면, 연결체 강체(articulated rigid body)의 동역학 시뮬레이션을 연산하는 데에 있어서 암시적 적분법(implicit integration)의 계산 복잡도를 감소시키고 계산을 고속화할 수 있는 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법 및 시스템을 제공할 수 있다.

**과제의 해결 수단**

- [0008] 일 실시예에 따른 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법은, 복수 개의 강체를 포함하는 연결체 강체의 움직임을 복수 개의 시간 단계별로 산출하기 위한 동역학 시뮬레이션 방법으로서, 연결체 강체의 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여, 연결체 강체의 동역학식에 연관된 자코비언 행렬을 산출하는 단계; 자코비언 행렬을 이용하여, 연결체 강체의 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 단계; 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 단계; 및 갱신된 자코비언 행렬을 이용하여, 연결체 강체의 제3 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0009] 일 실시예에 따른 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템은, 복수 개의 강체를 포함하는 연결체 강체의 움직임을 복수 개의 시간 단계별로 산출하기 위한 동역학 시뮬레이션 시스템으로서, 연결체 강체의 동역학식에 연관된 자코비언 행렬을 산출함으로써, 연결체 강체의 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터에 기초하여 연결체 강체의 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 제1 시뮬레이션 모듈; 및 제2 시간 단계의 위치 벡

터 및 속도 벡터를 이용하여 자코비언 행렬의 일부를 갱신하며, 갱신된 자코비언 행렬을 이용하여 연결체 강체의 제3 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 제2 시뮬레이션 모듈을 포함할 수 있다.

**발명의 효과**

[0010] 본 발명의 일 측면에 따른 연결체 강체(articulated rigid body)의 동역학 시뮬레이션 방법 및 시스템을 이용하면, 동역학식의 적분 과정에서 요구되는 자코비언(Jacobian) 행렬을 매 시간 단계마다 새로 구하는 대신 일부분을 갱신함으로써 계산 복잡도를 감소시키고 계산을 고속화할 수 있다. 동역학 시스템의 위치 및/또는 속도가 매우 급격히 변화하지 않는다면 자코비언 행렬의 변화는 위치 및/또는 속도의 변화에 비해 상대적으로 적기 때문에, 자코비언 행렬의 일부분을 갱신하더라도 이에 의한 오차는 암시적 적분법(implicit integration)의 근본적인 수치 오차와 비교하여 무시할 수 있을 정도로 작다.

**도면의 간단한 설명**

[0011] 도 1은 일 실시예에 따른 연결체 강체(articulated rigid body)의 동역학 시뮬레이션 방법의 순서도이다.  
 도 2는 일 실시예에 따른 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템의 구성도이다.

**발명을 실시하기 위한 구체적인 내용**

[0012] 이하에서, 도면을 참조하여 본 발명의 실시예들에 대하여 상세히 살펴본다.  
 [0013] 도 1은 일 실시예에 따른 연결체 강체(articulated rigid body)의 동역학 시뮬레이션 방법의 순서도이다.  
 [0014] 복수 개의 강체가 연결되어 있는 연결체 강체는, 각각의 강체를 관절로 나타내어 표현될 수 있다. 예를 들어, 개별 강체가 자유도(degree of freedom)가 1인 관절로 연결되어 구성된 연결체 강체의 경우, 각각의 관절의 상태는 이에 연결된 강체들 중 하나에 대한 다른 하나의 각도로서 표현될 수 있다. 관절의 자유도가 n일 경우, 연결체 강체는 다음 수학식 1과 같은 열벡터로 표현될 수 있다.

**수학식 1**

$$q = [q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_n]^T$$

[0015] 본 명세서에서는, 상기 수학식 1에 기재된 q를 연결체 강체의 위치 벡터로 지칭한다. 또한, 본 명세서에서는  $\dot{q}$  및  $\ddot{q}$ 를 각각 연결체 강체의 속도 벡터 및 가속도 벡터로 지칭한다. 이들 위치 벡터, 속도 벡터 및 가속도 벡터를 복수 개의 시간 단계별로 산출함으로써 연결체 강체의 움직임을 시뮬레이션할 수 있다. 우선, 연결체 강체에 대한 정동역학은 다음 수학식 2와 같은 상미분 방정식으로 표현될 수 있다.

**수학식 2**

$$\ddot{q} = f(q, \dot{q})$$

[0017] 상기 수학식 2를 이용하여, 각 시간 단계에서 연결체 강체의 위치 벡터 및 속도 벡터로부터 연결체 강체의 가속도 벡터를 산출할 수 있다. 다음으로, 연결체 강체의 위치 벡터, 속도 벡터 및 가속도 벡터를 이용하여 암시적 적분법(implicit integration)에 의해 동역학식을 연산함으로써, 다음 시간 단계에서 연결체 강체의 위치 벡터

및 속도 벡터를 산출할 수 있다.

[0019] 예를 들어, 하기 수학식 3 및 수학식 4는 암시적 적분법 중 오일러(Euler) 암시적 적분법을 나타내는 수식들이다.

수학식 3

[0020] 
$$q_{k+1} = q_k + h\dot{q}_{k+1}$$

수학식 4

[0021] 
$$\begin{aligned} \dot{q}_{k+1} &= \dot{q}_k + hf(q_{k+1}, \dot{q}_{k+1}, \tau) \\ &\approx \dot{q}_k + h(I - hf_v - h^2 f_x)^{-1} (f(q_k, \dot{q}_k, \tau) + hf_x \dot{q}_k) \end{aligned}$$

[0022] 상기 수학식 3 및 수학식 4에서  $q_k$  및  $q_{k+1}$ 은 각각 k번째 시간 단계 및 k+1 번째 시간 단계에서 연결체 강체의 위치 벡터이며, h는 각 시간 단계의 크기이고,  $\tau$ 는 연결체 강체에 인가되는 외력에 의한 토크(torque)를 나타낸다. 또한, 상기 수학식 3 및 수학식 4에서  $f_v$ 는 연결체 강체의 가속도 벡터  $\ddot{q}$ 을 연결체 강체의 속도 벡터  $\dot{q}$ 에 대해 편미분한 자코비언(Jacobian) 행렬이며,  $f_x$ 는 연결체 강체의 가속도 벡터  $\ddot{q}$ 을 연결체 강체의 위치 벡터 q에 대해 편미분한 자코비언 행렬이다.

[0023] 연결체 강체의 관절의 자유도가 n인 경우, 상기 수학식 1 및 수학식 2를 풀기 위해서는  $n \times n$  크기의 자코비언 행렬  $f_v$  및  $f_x$ 가 필요하다. 또한, 마찬가지로  $n \times n$  행렬인  $(I - hf_v - h^2 f_x)$ 의 역행렬을 구하거나 이와 상응하는 선형 시스템을 풀 필요가 있다. 그러나, 이 경우 동역학식을 기술하는데만  $O(n^2)$ 의 계산 복잡도를 가지며, 동역학식을 푸는데  $O(n^3)$ 의 계산 복잡도를 가지므로 계산 복잡도가 크다.

[0024] 계산 복잡도를 감소시키기 위하여, 실시예들에서는 연결체 강체의 움직임을 시뮬레이션하기 위한 복수 개의 시간 단계들 중 일 시간 단계(본 명세서에서는 이를 제1 시간 단계라 지칭한다)에 대해서만 자코비언 행렬  $f_v$  및  $f_x$ 를 전체 구성하며, 후속하는 하나 이상의 시간 단계(본 명세서에서는 이를 제2 시간 단계라 지칭한다)들에서는 자코비언 행렬을 전체 구성하지 않고 일부만을 갱신해 나가도록 구성된다. 예를 들어, 각 시간 단계에서 자코비언 행렬의 하나 또는 일부의 열만을 순차적으로 갱신해나갈 수 있다. 또는, 각 시간 단계의 연결체 강체의 속도 벡터에서 가장 빠른 속도를 갖고 있는 성분을 찾고, 자코비언 행렬 중 이에 대응되는 열만을 갱신할 수도 있다. 이에 대해서는 상세히 후술한다.

[0025] 도 1을 참조하면, 먼저 연결체 강체의 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터에 기초하여 가속도 벡터를 산출할 수 있다(S1). 예를 들어, 상기 제1 시간 단계는 연결체 강체를 시뮬레이션할 복수 개의 시간 단계 중 최초의 시간 단계일 수 있다. 위치 벡터 및 속도 벡터로부터 가속도 벡터를 산출하는 것은, 수학식 2를 참조하여 전술한 정동역학식을 계산하는 것에 의하여 수행될 수도 있다.

[0026] 다음으로, 연결체 강체의 제1 시간 단계의 가속도 벡터를 이용하여 연결체 강체의 동역학식에 연관된 자코비언 행렬을 산출할 수 있다(S2). 동역학식에 연관된 자코비언 행렬이란, 수학식 4를 참조하여 전술한 자코비언 행렬  $f_v$  및/또는  $f_x$ 를 포함할 수 있다. 자코비언 행렬은 해석적으로 산출할 수도 있으며, 또는 수치적으로 산출할 수도 있다. 예를 들어, 자코비언 행렬을 수치적으로 산출하는 경우  $f_x$ 의 i번째 행 및 j번째 열의 성분은 다음 수

학식 5에 의하여 산출될 수 있다.

수학식 5

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_j} = \frac{f_i(q_\varepsilon, \dot{q}) - f_i(q, \dot{q})}{\varepsilon}$$

[0027]

[0028] 상기 수학식 5에서  $\varepsilon$ 은 계산 정도(machine precision)를 고려하여 결정되는 상수이며,  $q_\varepsilon$ 은  $q$ 와 동일하되  $j$ 번째 성분에만  $\varepsilon$ 이 더해진 벡터이다. 즉,  $q_\varepsilon$ 은 하기 수학식 6과 같이 정의된다.

수학식 6

$$q_\varepsilon = [q_1 \quad \cdots \quad q_{j-1} \quad q_j + \varepsilon \quad \cdots \quad q_n]^T$$

[0029]

[0030] 다음으로, 위와 같이 산출된 자코비언 행렬을 이용하여 제1 시간 단계에 후속하는 제2 시간 단계의 연결체 강체의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출할 수 있다(S3). 예를 들어, 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터는, 이상의 과정(S2)에서 산출된 자코비언 행렬과 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여 전술한 수학식 1 및 수학식 2를 계산하는 것에 의하여 산출될 수 있다.

[0031] 다음으로, 산출된 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여, 자코비언 행렬의 일부를 갱신할 수 있다(S4). 종래의 시물레이션 방법에서 매 시간 단계마다 자코비언 행렬을 전체 구성하는 것과 달리, 실시예들에 따른 연결체 강체의 동역학 시물레이션 방법에서는 시물레이션의 초기 1회에만 자코비언 행렬을 전체 구성하고, 이에 후속하는 시간 단계들에서는 전 시간 단계에서 구성된 자코비언 행렬의 일부만을 갱신하여 각 시간 단계의 자코비언 행렬을 산출할 수 있다.

[0032] 다음으로, 갱신된 자코비언 행렬을 이용하여 다음 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출할 수 있다(S5). 또한, 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 단계(S4) 및 다음 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출하는 단계(S5)는 하나 이상의 후속하는 시간 단계에 대하여 반복 수행될 수 있다. 즉, 위치 벡터 및 속도 벡터의 산출 후 해당 시간 단계가 마지막 시간 단계인지를 판단하며(S6), 마지막 시간 단계가 아닐 경우에는 해당 시간 단계에서 다시 자코비언 행렬의 일부를 갱신하고(S4), 그 다음 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출할 수 있다(S5).

[0033] 일 실시예에서는, 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 단계(S4)에서 자코비언 행렬의 어느 하나 또는 일부의 열만을 갱신할 수 있다. 자코비언 행렬은 복수 개의 열을 포함하며, 각 열은 각각 연결체 강체에 포함된 개별 강체에 대응된다. 이때, 각 시간 단계별로 어느 하나의 열만을 순차적으로 갱신하는 방식으로 연결체 강체를 시물레이션할 수 있다. 또는, 각 시간 단계에서 복수 개의 열을 갱신하되, 각 시간 단계에서 갱신되는 열이 전 시간 단계에서 갱신되는 열과 적어도 부분적으로 상이하게 함으로써 자코비언 행렬의 모든 열들을 순차적으로 갱신해 나갈 수도 있다.

[0034] 일 실시예에서는, 자코비언 행렬의 일부를 갱신하는 단계(S4)에서 해당 시간 단계에서 가장 민감도가 높은 열만을 갱신할 수도 있다. 예를 들어, 연결체 강체의 속도 벡터  $\dot{q}$ 의 성분 중  $s$ 번째 성분이 가장 큰 절대값을 갖는다면, 자코비언 행렬의  $s$ 번째 열이 가장 민감도가 높다고 할 수 있다. 따라서, 속도 벡터에서 가장 큰 절대값을 갖는 성분을 산출한 후 자코비언 행렬에서 이에 해당하는 열만을 갱신하도록 구성될 수도 있다.

[0035] 이상에서 설명한 실시예들을 이용하여 연결체 강체의 동역학 시물레이션의 계산 복잡도를  $O(n)$ 으로 감소시킬 수 있다. 특히,  $n$ 이 큰 연결체 시스템에 암시적 적분법을 적용하는 경우 종래에는 정동역학의 자코비언 행렬을 구성하는 부분이 계산 복잡도의 측면에서 계산 병목 구간(computational bottleneck)이 되는데, 실시예들을 이용



하면 계산 복잡도가 감소되어 고속 계산이 가능하며 수치적으로 안정적인 적분 결과를 얻을 수 있어, 복잡한 연결체 강체 시스템의 실시간 동역학 시뮬레이션에 있어 효과적이다. 또한, 동역학 시스템의 위치 및/또는 속도가 매우 급격히 변화하지 않는다면 자코비언 행렬의 변화는 위치 및/또는 속도의 변화에 비해 상대적으로 적기 때문에, 자코비언 행렬의 일부만을 갱신하더라도 이에 의한 오차는 암시적 적분법의 근본적인 수치 오차와 비교하여 무시할 수 있을 정도로 작다.

[0036] 본 명세서에 기술한 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법은, 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션의 모든 과정을 기재하도록 의도되지 않으며, 종래 기술과 본 발명의 실시예들의 차이점을 위주로 설명되었다. 따라서, 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션에 있어서 본 명세서에서 구체적으로 기재하지 않은 계산 과정 및/또는 본 명세서에 기재하지 않은 충돌, 접촉 또는 침투 등의 현상을 시뮬레이션하기 위한 계산 과정이 추가적으로 이루어질 수 있으며, 동역학 시뮬레이션이 이러한 추가적인 계산 과정을 더 포함하는 경우에도 본 명세서에서 기술하는 발명의 사상의 범위에 포함되는 것이라는 점이 본 발명의 기술분야의 당업자들에게 용이하게 이해될 것이다.

[0037] 또한, 본 명세서에서 실시예들에 따른 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법은 도면에 제시된 순서도를 참조로 하여 설명되었다. 간단히 설명하기 위하여 상기 방법은 일련의 블록들로 도시되고 설명되었으나, 본 발명은 상기 블록들의 순서에 한정되지 않고, 몇몇 블록들은 다른 블록들과 본 명세서에서 도시되고 기술된 것과 상이한 순서로 또는 동시에 일어날 수도 있으며, 동일한 또는 유사한 결과를 달성하는 다양한 다른 분기, 흐름 경로, 및 블록의 순서들이 구현될 수 있다. 또한, 본 명세서에서 기술되는 방법의 구현을 위하여 도시된 모든 블록들이 요구되지 않을 수도 있다.

[0038] 도 2는 일 실시예에 따른 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템의 구성을 나타내는 블록도이다.

[0039] 본 명세서에 기술된 실시예는 전적으로 하드웨어이거나, 부분적으로 하드웨어이고 부분적으로 소프트웨어이거나, 또는 전적으로 소프트웨어인 측면을 가질 수 있다. 예컨대, 본 명세서에서 부(unit), 모듈(module) 또는 시스템(system) 등은 소프트웨어에 의해 제어되는 하드웨어를 포함하는 컴퓨터 관련 엔티티(entity)를 지칭할 수 있다. 예를 들어, 부, 모듈 또는 시스템은 프로세스, 객체(object), 실행파일(executable), 실행 스레드(thread of execution), 프로그램 등을 실행하는 프로세서 및/또는 컴퓨터일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 예를 들어, 애플리케이션(application)이 실행 중인 컴퓨터가 본 명세서에 기재된 부, 모듈 또는 시스템에 해당할 수 있다.

[0040] 도 2를 참조하면, 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 시스템(1)은 제1 시뮬레이션 모듈(10) 및 제2 시뮬레이션 모듈(20)을 포함할 수 있다. 제1 시뮬레이션 모듈(10)은 연결체 강체를 시뮬레이션할 복수 개의 시간 단계 중 일 시간 단계의 시뮬레이션을 수행하기 위한 부분이며, 제2 시뮬레이션 모듈은 이에 후속하는 하나 이상의 시간 단계에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위한 부분이다. 예를 들어, 상기 일 시간 단계는 복수 개의 시간 단계 중 최초의 시간 단계일 수도 있다.

[0041] 일 실시예에서, 제1 시뮬레이션 모듈(10)은, 자코비언 행렬 산출부(110) 및 동역학식 계산부(120)를 포함할 수 있다. 자코비언 행렬 산출부(110)는, 연결체 강체의 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터에 기초하여 가속도 벡터를 산출할 수 있다. 또한, 자코비언 행렬 산출부(110)는 산출된 가속도 벡터에 기초하여 자코비언 행렬을 산출할 수 있다. 이상의 과정은 도 1을 참조하여 전술한 실시예의 단계(S1, S2)로부터 당업자에게 용이하게 이해될 수 있으므로 자세한 설명을 생략한다.

[0042] 동역학식 계산부(120)는, 제1 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터와, 자코비언 행렬 산출부(110)에서 산출된 자코비언 행렬을 이용하여 동역학식을 연산함으로써 연결체 강체의 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출할 수 있다. 이상의 과정은 도 1을 참조하여 전술한 실시예의 단계(S3)로부터 당업자에게 용이하게 이해될 수 있으므로 자세한 설명을 생략한다.

[0043] 또한 일 실시예에서, 제2 시뮬레이션 모듈(20)은, 자코비언 행렬 갱신부(210) 및 동역학식 계산부(220)를 포함할 수 있다. 자코비언 행렬 갱신부(210)는, 연결체 강체의 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 이용하여, 제1 시뮬레이션 모듈(10)의 자코비언 행렬 산출부(110)에서 산출된 자코비언 행렬의 일부를 갱신할 수 있다. 이상의 과정은 도 1을 참조하여 전술한 실시예의 단계(S4)로부터 당업자에게 용이하게 이해될 수 있으므로 자세한 설명을 생략한다.

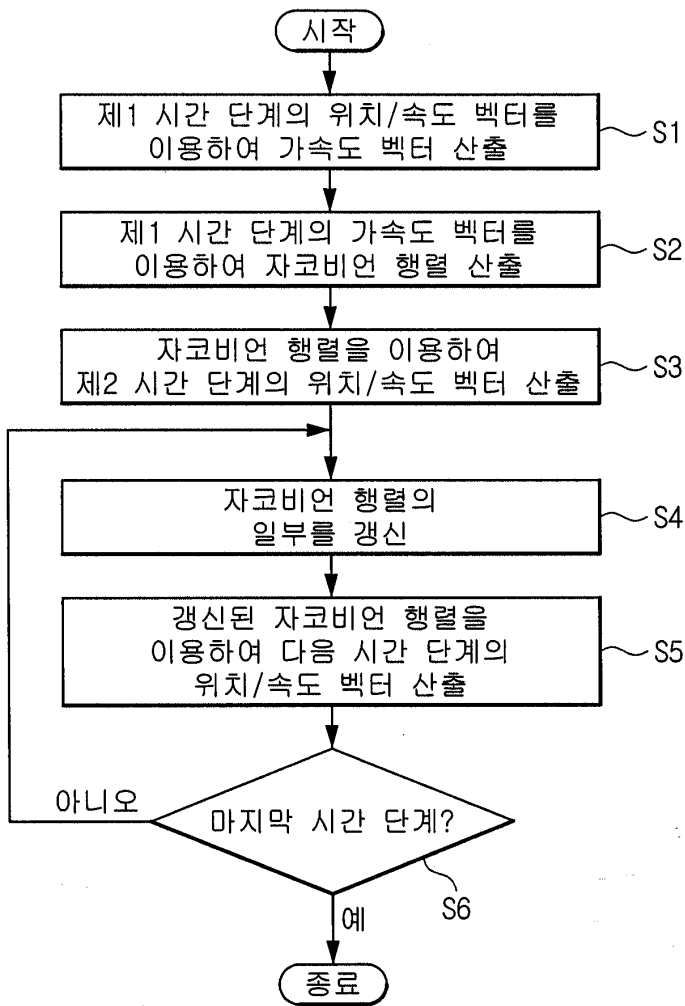
[0044] 동역학식 계산부(220)는, 제2 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터와, 자코비언 행렬 갱신부(210)에 의해 갱신된 자코비언 행렬을 이용하여 연결체 강체의 제3 시간 단계의 위치 벡터 및 속도 벡터를 산출할 수 있다. 이상의 과정은 도 1을 참조하여 전술한 실시예의 단계(S5)로부터 당업자에게 용이하게 이해될 수 있으므로 자세한

설명을 생략한다. 자코비언 행렬 갱신부(210) 및 동역학식 계산부(220)는, 이상에서 설명한 과정을 하나 이상의 후속하는 시간 단계에 대하여 반복적으로 수행할 수도 있다.

- [0045] 자코비언 행렬 갱신부(210)는 각 시간 단계에서 자코비언 행렬의 어느 하나의 열만을 갱신할 수 있다. 자코비언 행렬은 각각 개별 강체에 대응되는 복수 개의 열을 포함하며, 각 시간 단계별로 어느 하나의 열만을 순차적으로 갱신하는 방식으로 연결체 강체를 시뮬레이션할 수 있다. 또는, 자코비언 행렬 갱신부(210)는 각 시간 단계에서 복수 개의 열을 갱신하되, 각 시간 단계에서 갱신되는 열이 전 시간 단계에서 갱신되는 열과 적어도 부분적으로 서로 상이하게 함으로써 자코비언 행렬의 모든 열들을 순차적으로 갱신해 나갈 수도 있다. 또는, 자코비언 행렬 갱신부(220)는 각 시간 단계의 연결체 강체의 속도 벡터에서 가장 빠른 속도를 갖고 있는 성분을 찾아, 자코비언 행렬 중 이에 해당하는 열만을 갱신할 수도 있다.
- [0046] 본 명세서에 기술된 연결체 강체의 동역학 시뮬레이션 방법 및 시스템, 또는 상기 방법 및 시스템의 어떤 측면이나 부분은, 자기 저장 매체, 광학 저장 매체, 또는 기타 임의의 컴퓨터로 판독 가능한 기록 매체와 같은 유형 매체에 포함된 프로그램 코드(즉, 명령어)의 형태로 구현될 수도 있다. 상기 프로그램 코드는 컴퓨터와 같은 장치에 로드(load)되어 실행되며, 이때 상기 장치가 본 발명을 실시하기 위한 시스템에 해당된다.
- [0047] 이상에서 살펴본 본 발명은 도면에 도시된 실시예들을 참고로 하여 설명하였으나 이는 예시적인 것에 불과하며 당해 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 실시예의 변형이 가능하다는 점을 이해할 것이다. 그러나, 이와 같은 변형은 본 발명의 기술적 보호범위 내에 있다고 보아야 한다. 따라서, 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의해서 정해져야 할 것이다.

도면

도면1



도면2

