



(19) 대한민국특허청(KR)  
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2016-0074427  
(43) 공개일자 2016년06월28일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
*G06F 17/50* (2006.01) *G06F 17/13* (2006.01)  
*G06F 17/16* (2006.01) *G06F 17/18* (2006.01)  
*G09B 19/16* (2006.01)

(52) CPC특허분류  
*G06F 17/5018* (2013.01)  
*G06F 17/13* (2013.01)  
(21) 출원번호 10-2015-0181245  
(22) 출원일자 2015년12월17일  
심사청구일자 없음  
(30) 우선권주장  
14/574,843 2014년12월18일 미국(US)

(71) 출원인  
다솔 시스템즈 시뮬리아 코포레이션  
미국 02919 로드 아일랜드주 존스턴 앤우드 애비뉴 1301 스위트 101더블유

(72) 발명자  
반 더 벨덴 알렉산더 저코버스 마리아  
미국 30360 조지아주 애틀랜타 원터스 힐 드라이브 3715  
(74) 대리인  
특허법인코리아나

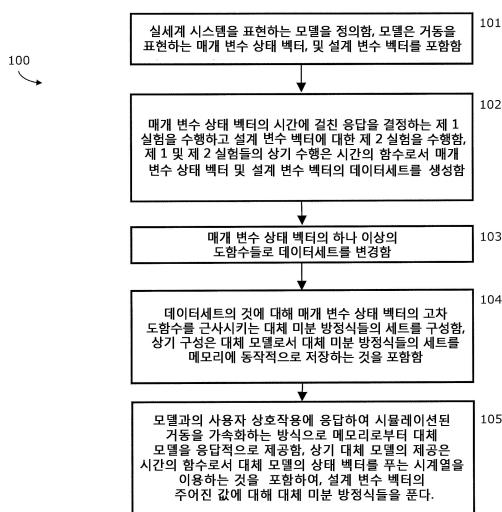
전체 청구항 수 : 총 22 항

(54) 발명의 명칭 데이터에 기초한 상호작용 3D 경험들

### (57) 요 약

실시형태들은 상호작용 경험들에 사용하기 위한 대체 모델을 구성하기 위한 방법들 및 시스템들을 제공한다. 이러한 실시형태는 매개 변수 상태 벡터 및 설계 변수 벡터를 포함하고 실세계 시스템을 표현하는 모델을 정의함으로써 시작한다. 다음으로, 제 1 및 제 2 실험들을 수행하여, 매개 변수 상태 벡터의 시간에 걸친 응답을 결정하고 시간의 함수로서 매개 변수 상태 벡터 및 설계 변수 벡터의 데이터세트를 생성한다. 그 후, 데이터세트는 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 변경되고, 데이터세트에서의 것에 대해 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수를 근사시키는 대체 미분 방정식들의 세트가 구성되고, 대체 미분 방정식들의 세트가 대체 모델로서 저장된다. 이어서, 대체 모델이 모델과의 사용자 상호작용에 응답하여 시뮬레이션된 거동을 가속화하는 방식으로 메모리로부터 제공된다.

### 대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류

*G06F 17/16* (2013.01)

*G06F 17/18* (2013.01)

*G06F 17/5086* (2013.01)

*G09B 19/16* (2013.01)

---

## 명세서

### 청구범위

#### 청구항 1

상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법으로서,

실세계 시스템을 표현하는 모델을 정의하는 단계로서, 상기 모델은 거동을 표현하는 매개 변수 상태 벡터, 및 설계 변수 벡터를 포함하는, 상기 모델을 정의하는 단계;

상기 매개 변수 상태 벡터의 시간에 걸친 응답을 결정하는 제 1 실험을 수행하고, 상기 설계 변수 벡터에 대한 제 2 실험을 수행하는 단계로서, 상기 제 1 실험 및 상기 제 2 실험을 수행하는 것은, 시간의 함수로서 상기 매개 변수 상태 벡터 및 상기 설계 변수 벡터의 데이터세트를 생성하는, 상기 제 1 실험을 수행하고 제 2 실험을 수행하는 단계;

상기 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 상기 데이터세트를 변경하는 단계;

상기 데이터세트에서의 매개 변수 상태 벡터에 대해 상기 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수 (higher derivative) 를 근사시키는 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하는 단계로서, 상기 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하는 단계는 대체 모델로서 상기 대체 미분 방정식들의 세트를 메모리에 동작적으로 저장하는 단계를 포함하는, 상기 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하는 단계;

상기 모델과의 사용자 상호작용에 응답하여 시뮬레이션된 거동을 가속화하는 방식으로 상기 메모리로부터 상기 대체 모델을 응답적으로 제공하는 단계로서, 상기 대체 모델을 제공하는 단계는 시간의 함수로서 상기 대체 모델의 상태 벡터를 푸는 시계열을 이용하는 것을 포함하여 상기 설계 변수 벡터의 주어진 값에 대한 상기 대체 미분 방정식들을 푸는, 상기 대체 모델을 응답적으로 제공하는 단계를 포함하는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

#### 청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하는 단계는:

대체 미분 방정식들의 하나 이상의 후보 세트들을 반복적으로 구성하는 단계를 포함하고, 상기 대체 미분 방정식들의 세트는 적어도 상기 데이터세트의 서브세트에 대한 최저 교차 검증 에러를 갖는 세트로서 상기 하나 이상의 후보 세트들로부터 선택되는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

#### 청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 상기 데이터세트를 변경하는 단계는 상기 데이터세트로부터 시간을 제거하는 단계를 포함하는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

#### 청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 실험들은:

물리적 실험; 및

수치적 고충실험

중 적어도 하나인, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

**청구항 5**

제 1 항에 있어서,

정의된 상기 모델은:

이산 이벤트들 (discrete events); 및

바운더리 조건들

중 적어도 하나를 포함하는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

**청구항 6**

제 1 항에 있어서,

정의된 상기 모델은 고충실도, 고차원 수치 모델이고,

상기 방법은 상기 정의된 모델의 차원성을 감소시키는 단계를 더 포함하는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

**청구항 7**

제 6 항에 있어서,

상기 정의된 모델의 차원성을 감소시키는 단계는:

주요 컴포넌트 분석 (principal component analysis);

k-최인접 이웃들 (k-nearest neighbors); 및

서브스페이스 학습 (subspace learning)

중 적어도 하나를 채용하는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

**청구항 8**

제 1 항에 있어서,

기능적 목업 인터페이스 (FMI; functional mock-up interface)에 상기 대체 모델을 엑스포트하는 단계를 더 포함하는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

**청구항 9**

제 1 항에 있어서,

하드웨어 시스템에서 상기 대체 모델을 채용하는 단계를 더 포함하고, 상기 하드웨어 시스템은 자동 전자 제어 유닛 (automotive ECU; automotive electronic control unit) 또는 비행 시뮬레이터를 포함하는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

**청구항 10**

제 1 항에 있어서,

상기 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수는:

방사상 기저 함수들 (radial basis functions);

뉴럴 네트들 (neural nets);

chebychev 다항식들;

응답 표면 방법들 (response surface methods);

다항식 응답 표면 방법들 (polynomial response surface methods);

절대 항 회귀 (arbitrary term regression);

지원 벡터 머신들 (support vector machines); 및

스페이스-맵핑 (space-mapping)

중 적어도 하나를 이용하여 근사되는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

### 청구항 11

제 1 항에 있어서,

상기 대체 모델을 구성하는 단계는:

변동량 및 바이어스 에러를 감소시키기 위해 상기 대체 모델을 최적화하는 단계를 더 포함하는, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 컴퓨터 구현 방법.

### 청구항 12

상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템으로서,

실세계 시스템을 표현하는 모델을 정의하도록 구성되는 모델 정의 모듈로서, 상기 모델은 거동을 표현하는 매개 변수 상태 벡터, 및 설계 변수 벡터를 포함하는, 상기 모델 정의 모듈;

상기 모델 정의 모듈에 동작적으로 커플링되고, 상기 매개 변수 상태 벡터의 시간에 걸친 응답을 결정하는 제 1 실험, 및 상기 설계 변수 벡터에 대한 제 2 실험을 수행하도록 구성되는 실험 모듈로서, 상기 제 1 및 제 2 실험들은, 시간의 함수로서 상기 매개 변수 상태 벡터 및 상기 설계 변수 벡터의 데이터세트를 생성하는, 상기 실험 모듈;

상기 실험 모듈로부터 상기 데이터세트를 수신하고, 상기 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 상기 데이터세트를 변경하도록 구성되는 데이터세트 모듈;

상기 데이터세트에서의 매개 변수 상태 벡터에 대해 상기 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수를 근사시키는 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하도록 구성되는 대체 모듈로서, 상기 구성하는 것은 대체 모델로서 상기 대체 미분 방정식들의 세트를 메모리에 동작적으로 저장하는 것을 포함하는, 상기 대체 모듈; 및

상기 모델과의 사용자 상호작용에 응답하여 시뮬레이션된 거동을 가속화하는 방식으로 상기 메모리로부터 상기 대체 모델을 응답적으로 제공하도록 구성되는 상호작용 모듈로서, 상기 대체 모델을 제공하는 것은 시간의 함수로서 상기 대체 모델의 상태 벡터를 푸는 시계열을 이용하는 것을 포함하여 상기 설계 변수 벡터의 주어진 값에 대한 상기 대체 미분 방정식들을 푸는, 상기 상호작용 모듈을 포함하는, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

### 청구항 13

제 12 항에 있어서,

상기 대체 모듈은:

대체 미분 방정식들의 하나 이상의 후보 세트들을 반복적으로 구성함으로써, 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하도록 구성되고,

상기 대체 미분 방정식들의 세트는 적어도 상기 데이터세트의 서브세트에 대한 최저 교차 검증 에러를 갖는 세트로서 상기 하나 이상의 후보 세트들로부터 선택되는, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

### 청구항 14

제 12 항에 있어서,

상기 데이터세트 모듈은 상기 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 상기 데이터세트를 변경함에 있어서 상기 데이터세트로부터 시간을 제거하도록 구성되는, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

### 청구항 15

제 12 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 실험들은:

물리적 실험; 및

수치적 고충실도 실험

중 적어도 하나인, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

### 청구항 16

제 12 항에 있어서,

정의된 상기 모델은:

이산 이벤트들; 및

바운더리 조건들

중 적어도 하나를 포함하는, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

### 청구항 17

제 12 항에 있어서,

정의된 상기 모델은 고충실도, 고차원 수치 모델이고, 상기 모델 정의 모듈은 또한 상기 정의된 모델의 차원성을 감소시키도록 구성되는, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

### 청구항 18

제 17 항에 있어서,

상기 모델 정의 모듈은:

주요 컴포넌트 분석;

k-최인접 이웃들; 및

서브스페이스 학습

중 적어도 하나를 채용함으로써 상기 정의된 모델의 차원성을 감소시키도록 구성되는, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

### 청구항 19

제 12 항에 있어서,

기능적 목업 인터페이스 (FMI)에 상기 대체 모델을 엑스포트하도록 구성되는 엑스포트 모듈을 더 포함하는, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

### 청구항 20

제 12 항에 있어서,

상기 시스템은 자동 전자 제어 유닛 (ECU) 또는 비행 시뮬레이터 중 적어도 하나에 통합되는, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

### 청구항 21

제 12 항에 있어서,

상기 대체 모듈은:

방사상 기저 함수들;

뉴럴 네트들;

chebychev 다항식들;

응답 표면 방법들;

다항식 응답 표면 방법들;

절대 항 회귀;

지원 벡터 머신들; 및

스페이스-맵핑

중 적어도 하나를 이용하여 상기 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수를 근사시키도록 구성되는, 상호작용 경험에서의 이용을 위하여 대체 모델을 생성하는 시스템.

## 청구항 22

하나 이상의 클라이언트들과 네트워크를 따라 통신하는 서버에 의해 실행되는 컴퓨터 프로그램이 저장된 컴퓨터 판독가능 기록 매체로서,

상기 컴퓨터 프로그램은 프로세서에 의해 실행될 때,

실세계 시스템을 표현하는 모델을 정의하게 하는 것으로서, 상기 모델은 거동을 표현하는 매개 변수 상태 벡터, 및 설계 변수 벡터를 포함하는, 상기 모델을 정의하게 하고;

상기 매개 변수 상태 벡터의 시간에 걸친 응답을 결정하는 제 1 실험을 수행하게 하고, 상기 설계 변수 벡터에 대한 제 2 실험을 수행하게 하는 것으로서, 상기 제 1 실험 및 상기 제 2 실험을 수행하는 것은, 시간의 함수로서 상기 매개 변수 상태 벡터 및 상기 설계 변수 벡터의 데이터세트를 생성하는, 상기 제 1 실험을 수행하게 하고 제 2 실험을 수행하게 하고;

상기 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 상기 데이터세트를 변경하게 하고;

상기 데이터세트에서의 매개 변수 상태 벡터에 대해 상기 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수를 근사시키는 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하게 하는 것으로서, 상기 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하는 것은 대체 모델로서 상기 대체 미분 방정식들의 세트를 메모리에 동작적으로 저장하는 것을 포함하는, 상기 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하게 하고; 그리고

상기 모델과의 사용자 상호작용에 응답하여 시뮬레이션된 거동을 가속화하는 방식으로 상기 메모리로부터 상기 대체 모델을 응답적으로 제공하게 하는 것으로서, 상기 대체 모델을 제공하는 것은 시간의 함수로서 상기 대체 모델의 상태 벡터를 푸는 시계열을 이용하는 것을 포함하여 상기 설계 변수 벡터의 주어진 값에 대한 상기 대체 미분 방정식들을 푸는, 상기 대체 모델을 응답적으로 제공하게 하는

프로그램 명령들을 포함하는, 컴퓨터 프로그램이 저장된 컴퓨터 판독가능 기록 매체.

## 발명의 설명

### 기술 분야

[0001] 본 발명은 일반적으로 컴퓨터 프로그램들 및 시스템들의 분야에 관한 것이고 구체적으로는, 제품 설계 및 시뮬레이션의 분야에 관한 것이다. 본 발명의 실시형태들은 또한, 비디오 게임들, 엔지니어링 시스템 설계, 협업적 의사 결정 및 엔터테인먼트, 예를 들어, 영화에 채용될 수도 있다.

## 배경 기술

[0002] 부품들 또는 부품들의 어셈블리들의 설계 및 시뮬레이션을 위해 복수의 기존 제품 및 시뮬레이션 시스템들이 시장에 제공된다. 이러한 시스템들은 통상적으로 CAD (computer aided design) 및/또는 CAE (computer aided engineering) 프로그램들을 채용한다. 이들 시스템들은 사용자가 오브젝트들 또는 오브젝트들의 어셈블리들의 복잡한 3차원 모델들을 구성, 조작 및 시뮬레이션하게 허용한다. 따라서 이들 CAD 및 CAE 시스템들은 예

지들 또는 라인들을 이용하여, 어떤 경우들에서는 면들 (faces) 을 갖고 모델링된 오브젝트들의 표현을 제공한다. 라인들, 에지들, 면들 또는 다각형들은 여러 방식들, 예를 들어, NURBS (non-uniform rational basis-splines) 로 표현될 수 있다.

[0003] 이들 CAD 시스템들은, 주로 지오메트리 (geometry) 의 명세들 (specifications) 인 모델링된 오브젝트들의, 부품들 또는 부품들의 어셈블리들을 관리한다. 특히, CAD 파일들은 사양들을 포함하고, 이 사양으로부터 지오메트리가 생성된다. 지오메트리로부터, 표현이 생성된다. 사양들, 지오메트리, 및 표현들은 단일의 CAD 파일 또는 다수의 CAD 파일들에 저장될 수도 있다. CAD 시스템들은 설계자들에게 모델링된 오브젝트들을 표현하기 위한 그래픽 툴들을 포함하고, 이들 툴은 복잡한 오브젝트들의 디스플레이에 전용된다. 예를 들어, 어셈블리는 수 천개의 부품들을 포함할 수도 있다. CAD 시스템은 전자적 파일들에 저장된 오브젝트들의 모델들을 관리하는데 이용될 수 있다.

[0004] CAD 및 CAE 시스템들의 출현은 오브젝트들에 대한 폭넓은 범위의 표현 가능성들을 허용한다. 이러한 한 표현은 FEA (finite element analysis) 모델이다. 용어 FEA 모델, FEM (finite element model), 유한 소자 메시 (finite element mesh) 및 메시는 여기에서는 상호교환적으로 이용된다. FEM 은 통상적으로 CAD 모델을 표현하고, 따라서 하나 이상의 부분들 또는 전체 어셈블리를 표현할 수도 있다. FEM 은 FEM 이 표현하는 기본적인 (under lying) 오브젝트 또는 오브젝트들의 특성들을 갖는 방식으로 프로그래밍될 수도 있다. 당해 기술 분야에 잘 알려진 바와 같이 FEM 또는 다른 이러한 오브젝트 표현이 이러한 식으로 프로그래밍될 때, 이는 자신이 표현하는 오브젝트의 시뮬레이션들을 수행하는데 이용될 수도 있다. 예를 들어, FEM 은 차량의 내부 캐비티, 구조물을 둘러싸는 음향 유체, 및 임의의 수의 실세계 오브젝트들을 표현하는데 이용될 수도 있다. 또한, FEMs 와 함께 CAD 및 CAE 시스템들이 엔지니어링 시스템들을 시뮬레이션하는데 이용될 수 있다. 예를 들어, CAE 시스템들은 잡음 및 차량들의 진동을 시뮬레이션하도록 채택될 수 있다.

[0005] 그러나, 이러한 기존의 시뮬레이션 방법들은 자체 결함이 없는 것이 아니다. 실제 실험적 및 수치적 실험들, 이를 테면, <http://www.3ds.com/products-services/simulia/overview/> 및 Helm, Experimental Techniques 에서 입수 가능한 Numerical Models to Create Simulated Behavior 에 기재된 것들은 많은 양의 시간을 소요하고, 상당한 전문 기술들이 행해질 것을 요구한다. 이러한 시뮬레이션들/실험들로부터의 통상의 결과들은 비디오들, 이미지들, 또는 그래프들의 형태들로 제공된다. 거동 연구, 이를 테면, Kahneman, Thinking Fast and Slow 에 제시된 연구는 "경험" 이 실시간 실험을 통하여 얻어짐을 개시한다. 액션이 단기 간격으로 직접 결과를 야기하면, "경험" 이 얻어진다. 장기 결과들만을 갖는 액션들은 소그룹의 사람들을 위한 "경험"을 가져온다. 이와 유사하게, 상호작용성이 없다면 (즉, 실험/시뮬레이션을 변경할 기회가 없음), 적은 경험이 얻어진다. 따라서, 예를 들어, 이미지들을 통하여 과학적 결과들을 제시하는 전문가의 현재 패러다임은 청중의 경험을 추가해야 하는 수단으로서 효율적이지 못하다.

[0006] 기존의 시뮬레이션들/실험들을 갖는 다른 문제는 Experimental Techniques 에서와 같이, 시뮬레이션 자체를 수행한 다음 그 결과들을 재사용하는데 걸리는 시간이며, 이는 Numerical Models to Create Simulated Behavior and Experimental Techniques 에 기재되어 있다. 이러한 시간 소모적인 시뮬레이션들은 백만번까지의 검증 실험들을 요구하는 시스템 검증 또는 최적화에 이용될 수 없다. 이러한 시스템 연구들을 행하기 위해 현재의 현실적인 시뮬레이션 툴들 (예를 들어, 비선형 유한 엘리먼트 분석) 보다 세자리수 내지 네자리수의 크기 정도로 더 빠른 기술들이 요구된다.

[0007] 시뮬레이션들/실험들의 사용자 "경험"을 강화하기 위한 시도들이 행해져 왔지만, 기존의 기술들은 부적합하다. 이를 테면, Box 등의 Statistic for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery 에 설명된 것과 같은 광범위하고 넓게 이용되는 워크의 바디부는 Numerical Models to Create Simulated Behavior and Experimental Techniques 에서 설명된 실험 테스팅 및/또는 Experimental Techniques 에서 설명된 시뮬레이션 된 거동을 생성하기 위해 수치 모델들을 이용하는 실험들의 관점에서 이용가능하다. 이들 실험들/시뮬레이션들은 종종 응답 표면 방법들, Chebychev 다항식, 그리고 격자법, 또는 방사상 기저 함수들과 같은 기술들을 이용하여 통합된다. 이들 방법들은 고정된 입력 1차원 (1D), 파라미터들의 세트와 고정된 출력, 1D, 출력 파라미터들의 세트 사이의 정확한 전달 함수를 생성한다. 1차원 데이터는 매우 추상적이고, 추상적인 정보는 청중의 경험에 추가하기 위한 효율적인 수단이 아니다. 이러한 방법들은 시뮬레이션의 상태 공간을 감소시키는 것에 기초한다. 이러한 예에서, 완전한 3D 연산 (즉, 메싱된) 모델은 선형적으로 알려져 있지만 알려진 거동 모델에 잘 맞추어지는 것을 유지하는 동안 모델의 복잡도 및 해결 시간이 감소된다. 이는 Jolliffe I.T. Principal Component Analysis, Series: Springer Series in Statistics (2nd ed, Springer

NY)에 기재된 Principle Component Analysis와 같은 기술들을 통하여 (예를 들어, 수백만의 메시 노드들로부터 수십의 파라미터들로의) 자유도들의 감소를 통해 행해진다.

[0008] 최근, 적절한 직교 분해 (orthogonal decomposition)를 이용한 Sirovich "snapshot method"를 이용하여 필드 데이터의 특수한 보간들을 생성하도록 작업이 행해져 왔다. 이 방법은 2차원 (2D) 또는 3D (필드) 데이터를, 경험을 덜 추상적으로 만드는 (기본) 필드들의 소형 세트의 (선형) 합수로서 재생한다. 그러나, 이 방법은 주어진 모델의 시계열 시뮬레이션의 압축에만 적합하며 이에 따라, 시나리오의 부분으로서 모델에서의 변동들을 고려하지 않는다. 또한, 개인적인 센서 데이터 (필드에서의 위치들)에 대한 예측 값들은 전체적인 필드를 근사시키는데 있어서의 절충점으로 인하여 매우 정확하지 않다.

[0009] <http://www.scai.fraunhofer.de/geschaeftsfelder/numerische-software/produkte/femzip.html?&L=1>에서 입수 가능한 Sirovich와 Fraunhofer, Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures I-III와 같은 시뮬레이션 필드 데이터의 압축에 대한 기준의 툴들이 있다. 이들 툴들은 (Sirovich에 의해 기술된) 기본 필드가 부임을 위하여 컴퓨팅되는 속도를 개선시킨다. 이러한 툴들은 또한 보다 넓은 분포를 가능하게 하는 데 이터 저장 요건들을 또한 감소시킨다. 그러나, 독립적으로, 이들 툴들은 넓은 청중에 대한 "경험"을 생성하기 위하여 시나리오 및 모델이 "온 더 플라이" 방식으로 변경되는 것을 고려하지 않는다.

[0010] 다른 기준의 방법은 Klein에서 설명된 파라미터 추정에 의존한다. 이러한 방법을 수행함에 있어서, 미분 방정식들이 알려져 있지만, 방정식 상수들의 일부는 알려져 있지 않다. 예를 들어, 항공기 동역학의 경우에, 미지의 공기역학적 도함수들은 비행 데이터와 항공기 모델 데이터 사이의 오차를 최소화함으로써 구해질 수 있다.

[0011] Klein V. "Aerodynamic Parameters of High Performance Aircraft Estimated from Wind Tunnel and Flight Test Data", NASA-98-AGARD.

[0012] 예를 들어, Klein의 방정식 (31)은:

[0013] 조화 운동에 대하여,

$$\begin{aligned}\Delta C_L &= \alpha_A (C_{L\alpha} - k^2 C_{Lq}) \sin \omega t + \alpha_A k (C_{L\dot{\alpha}} + C_{L\dot{q}}) \cos \omega t \\ &= \alpha_A (\bar{C}_{L\alpha} \sin \omega t + k \bar{C}_{Lq} \cos \omega t)\end{aligned}$$

(31)

[0014] [0015] 항들  $C_{L\alpha} C_{Lq} C_{L\dot{q}}$  및  $k$ 는  $t, C_L, q, \alpha, \dot{q}$ 에 대한 실험 데이터에 기초하여 방정식에 피팅되거나 또는 캘리브레이션된다.

[0016] 많은 신규 제품 설계 시뮬레이션들에서, 운동 방정식들은 여기에 도시된 항공기의 운동 방정식만큼 잘 알려져 있지는 않다. 따라서, 많은 시뮬레이션들은 위에 설명된 방법에 의존할 수 없다. 파라미터 추정에 의존하는 방법들은 고차 수학적 대체물들에 대해 관리가능한 레벨로 매개 변수 상태들의 수를 감소시키기 때문에 Jolliffe가 논의한 접근 방식에 상호보완적이다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0017] 본 발명의 실시형태들은 위에 설명된 기준의 실험/시뮬레이션 기술들이 가진 문제들을 극복하는 것이다.

### 과제의 해결 수단

[0018] 본 발명의 실시형태들은 상호작용 경험에서의 이용을 위한 대체 모델을 구성하는 방법들 및 시스템들을 제공한다. 적어도 하나의 예시적인 실시형태에 따르면, 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하는 방법은 실세계 시스템을 표현하는 모델을 정의함으로써 시작하며, 여기에서, 모델은 거동을 표현하는 매개 변수 상태 벡터, 및 설계 변수 벡터를 포함한다. 이러한 방법은 매개 변수 상태 벡터의 시간에 걸친 응답을 결정하도록 제 1 실험 (시뮬레이션, 분석 등)을 수행하고, 설계 변수 벡터에 대한 제 2 실험을 수행하는 것을 더 포함한다. 제 1 및 제 2 실험들은 시간의 함수로서 매개 변수 상태 벡터와 설계 변수 벡터의 데이터세트를 생성한다. 본 방법은 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 데이터세트를 변경한 다음, 데이터세

트에서의 것에 대해 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수 (higher derivative) 를 근사시키는 대체 미분 방정식들의 세트를 구성함으로써 진행한다. 이러한 실시형태에서, 구성하는 것은 메모리에서의 대체 모델로서 대체 미분 방정식들의 세트를 동작적으로 저장하는 것을 포함한다. 이러한 방법은 모델과의 사용자 상호작용에 응답하여 시뮬레이션된 거동을 가속화하는 문제에 있어서 메모리로부터 대체 모델을 응답적으로 제공함으로써 상호작용 경험에 이용된다. 이는 시간 함수로서 대체 모델의 상태 벡터를 푸는 시계열을 이용하는 것을 포함하는 설계 변수 벡터의 주어진 값에 대한 대체 미분 방정식들을 풀음으로써 구현될 수도 있다.

[0019]

방법의 대안의 실시형태에서, 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하는 것은 대체 미분 방정식들의 하나 이상의 후보 세트들을 반복적으로 구성하는 것, 및 대체 모델로서 저장되는 하나 이상의 후보 세트들로부터 대체 미분 방정식들의 세트를 선택하는 것을 포함하고, 여기에서, 선택된 후보 세트는 적어도 데이터세트의 서브세트에 대한 최저 교차 검증 에러를 갖는 세트이다. 이러한 실시형태에서, 데이터세트의 서브세트는 여기에서는 검증 데이터세트로서 지칭될 수도 있다. 다른 실시형태에 따르면, 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 데이터세트를 변경하는 것은 데이터세트로부터 시간을 제거하는 것을 포함한다. 또 다른 실시형태에서, 제 1 및 제 2 실험들은 수치적인 고충실도 실험 및 물리적인 실험 중 적어도 하나이다. 다른 실시형태는 정의된 모델의 차원성을 더 감소시키는 것을 포함할 수도 있다. 이러한 실시형태에서, 정의된 모델의 차원성을 감소시키는 것은 주요 컴포넌트 분석 (principal component analysis), k-최인접 이웃들 (k-nearest neighbors), 및 서브스페이스 학습 (subspace learning) 중 적어도 하나를 채용한다.

[0020]

또한, 또 다른 실시형태에서, 정의된 모델은 이산 이벤트들 및 바운더리 조건들 중 적어도 하나를 포함한다. 방법의 일 구현은 기능적인 목업 인터페이스 (mock-up interface) 에 대체 모델을 엑스포트하는 것을 더 포함한다. 더욱 추가로, 일 실시형태는 하드웨어 시스템에서 대체 모델을 채용할 수도 있으며, 여기에서, 하드웨어 시스템은 자동 전자 제어 유닛 또는 비행 시뮬레이터이다.

[0021]

여기에서 설명된 원리들에 따라 수행되는 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수는, 방사상 기저 함수 (radial basis functions), 뉴럴 네트들 (neural nets), chebychev 다항식들, 응답 표면 방법들 (response surface methods), 다항식 응답 표면 방법들 (polynomial response surface methods), 절대 항 회귀 (arbitrary term regression), 지원 벡터 머신들 (support vector machines), 및 스페이스 맵핑 중 적어도 하나를 이용함으로써 근사될 수도 있다. 본 발명의 방법들에 따르면, 대체 모델을 구성하는 것은 변동량 및 바이어스 에러를 감소시키기 위해 대체 모델을 최적화하는 것을 더 포함한다.

[0022]

본 발명의 대안의 실시형태는 상호작용 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하기 위한 시스템으로 개시된다. 이러한 시스템은 실세계 시스템을 표현하는 모델을 정의하도록 구성되는 모델 정의 모듈을 포함하며, 정의된 모델은 설계 변수 벡터, 및 거동을 표현하는 매개 변수 상태 벡터를 포함한다. 본 발명의 일 실시형태에 따르면, 시스템은 모델 정의 모듈에 동작적으로 커플링되고, 매개 변수 상태 벡터의 시간에 걸친 응답을 결정하는 제 1 실험, 및 설계 변수 벡터에 대한 제 2 실험을 수행하도록 구성되는 실험 모듈을 더 포함한다. 실험들은 시간의 함수로서 매개 변수 상태 벡터와 설계 변수 벡터의 데이터세트를 생성한다. 일 실시형태에서, 시스템은 실험 모듈로부터 데이터세트를 수신하고 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 데이터세트를 변경하도록 구성되는 데이터세트 모듈을 더 포함한다. 대체 모듈은 시스템에 추가로 포함되며, 대체 모듈은 데이터세트에서의 것에 관련하여 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수를 근사시키는 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하도록 구성된다. 또한, 대체 모듈은 메모리에서의 대체 모델로서 대체 미분 방정식들의 세트를 동작적으로 저장할 수도 있다. 시스템은 사용자 상호작용에 응답하여 모델의 시뮬레이션된 거동을 가속화하는 방식으로 메모리로부터 대체 모델을 응답적으로 제공하도록 구성된 상호작용 모듈을 더 포함한다. 상기 대체 모델을 제공하는 것은 시간 함수로서 대체 모델의 상태 벡터를 푸는 시계열을 이용하는 것을 포함하는 설계 변수 벡터의 주어진 값에 대한 대체 미분 방정식들을 푼다.

[0023]

시스템의 일 실시형태에 따르면, 대체 모듈은 대체 미분 방정식들의 하나 이상의 후보 세트들을 반복적으로 구성함으로써 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하도록 구성된다. 이러한 실시형태에서, 대체 모델로서 저장된 대체 미분 방정식들의 세트는 하나 이상의 후보 세트들로부터, 적어도 데이터세트의 서브세트에 대한 최저 교차 검증 에러를 갖는 세트로서 선택된다. 일 실시형태에서, 데이터세트 모듈은 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 데이터세트를 변경하도록 구성된다. 또 다른 실시형태에서, 제 1 및 제 2 실험들은 수치적인 고충실도 실험 및 물리적인 실험 중 적어도 하나이다. 시스템의 또 다른 실시형태에 따르면, 정의된 모델은 이산 이벤트들 및 바운더리 조건들 중 적어도 하나를 포함한다.

[0024]

또한, 정의된 모델이 고충실도의 고차원 수치 모델인 일 실시형태에서, 모델 정의 모듈은 정의된 모델의 차원성

을 감소시키도록 또한 구성된다. 이러한 실시형태에서, 모델 정의 모듈은 주요 컴포넌트 분석 (principal component analysis), k-최인접 이웃들 (k-nearest neighbors), 및 서브스페이스 학습 (subspace learning) 중 적어도 하나를 채용함으로써 정의된 모델의 차원성을 감소시키도록 구성될 수도 있다. 시스템의 대안의 실시형태는 대체 모델을 기능적 목업 인터페이스로 엑스포트하도록 구성된 엑스포트 모델을 더 포함한다. 또 다른 실시형태에서, 시스템은 자동 전자 제어 유닛 또는 비행 시뮬레이터에 통합된다.

[0025] 대체 모델은 방사상 기저 함수, 뉴럴 네트들, chebychev 다항식들, 응답 표면 방법들, 다항식 응답 표면 방법들, 절대 항 회귀, 지원 벡터 머신들, 및 스페이스 맵핑 중 적어도 하나를 이용함으로써 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수를 근사시키도록 구성될 수도 있다.

[0026] 본 발명의 다른 실시형태는 대체 모델을 생성하기 위한 클라우드 연산 구현으로 개시된다. 이러한 실시형태는 하나 이상의 클라이언트들을 갖는 네트워크를 따라 통신하여 서버에 의해 실행되는 컴퓨터 프로그램 제품으로 교시되며, 컴퓨터 프로그램 제품은 컴퓨터 관독가능 매체를 포함한다. 컴퓨터 관독가능 매체는 프로그램 명령들을 포함하고, 프로그램 명령들은 프로세서에 의해 실행될 때: 실세계 시스템을 표현하는 모델을 정의하게 하는 것으로서, 여기에서, 모델은 거동을 표현하는 매개 변수 상태 벡터, 및 설계 변수 벡터를 포함하는, 모델을 정의하게 하고; 매개 변수 상태 벡터의 시간에 걸친 응답을 결정하는 제 1 실험을 수행하게 하고, 설계 변수 벡터에 대한 제 2 실험을 수행하게 하는 것으로서, 제 1 실험 및 제 2 실험을 수행하는 것은 시간의 함수로서 매개 변수 상태 벡터 및 설계 변수 벡터의 데이터세트를 생성하는, 제 1 실험 및 제 2 실험을 수행하게 하고; 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 데이터세트를 변경하게 하고; 데이터세트에서의 것에 대해 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수를 근사시키는 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하게 하는 것으로서, 방정식들의 세트를 구성하는 것은 대체 모델로서 대체 미분 방정식들의 세트를 메모리에 동작적으로 저장하는 것을 포함하는, 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하게 하고; 그리고 모델과의 사용자 상호작용에 응답하여 시뮬레이션된 거동을 가속화하는 방식으로 메모리로부터 대체 모델을 응답적으로 제공하게 하는 것으로서, 대체 모델을 제공하는 것은 시간의 함수로서 대체 모델의 상태 벡터를 푸는 시계열을 이용하는 것을 포함하는 설계 변수 벡터의 주어진 값에 대한 대체 미분 방정식들을 푸는 것을 포함하는, 대체 모델을 응답적으로 제공하게 한다.

### 도면의 간단한 설명

[0027] 상기의 설명은, 상이한 도면들 전체에 걸쳐 유사한 부품에 유사한 도면 부호가 병기된 첨부의 도면에 예시된, 본 발명의 예시적인 구체예들에 관한 하기의 상세한 설명으로부터 더 명확해질 것이다. 도면들은 반드시 스케일화된 것은 아니며, 대신 본 발명의 실시형태들을 예시하는 것에 중점을 두었다.

도 1은 본 발명의 일 실시형태에 따른 상호작용적 3D 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 구성하기 위한 방법의 흐름도이다.

도 2는 본 발명의 원리들을 구현하는 에어포일 플루터의 N-코드 시뮬레이션에 이용되는 여러 컴포넌트들을 예시한다.

도 3은 일 실시형태의 원리들을 이용하여 결정되는 제어 시스템 중의 플랩에 대한 CFD 플로우 필드를 예시한다.

도 4는 본 발명의 일 실시형태에 채용될 수도 있는 제어 서보 각도 및 공격 각도를 예시하는 관련 그래프들 및 항공기의 CAD 모델을 추상화한다.

도 5는 시간의 함수로서 시뮬레이션된 에어포일 피치의 그래프이다.

도 6은 예시적인 실시형태에 따라 결정되는 2차 상미분 방정식들을 표현하는 선형 대체 모델의 평가를 예시한다.

도 7은 예시적인 실시형태에 따라 결정되는 2차 상미분 방정식들을 표현하는 선형 대체 모델의 평가를 예시한다.

도 8은 일 실시형태의 원리들에 따라 대체 모델을 생성하는 방법을 묘사하는 흐름도이다.

도 9는 4.8 초 및 33 Hz에서 제어기 온에 의한 RBF 및 제어기 오프에 의한 4차 RSM으로 근사되는 일 실시형태의 원리들에 따라 결정되는 에어포일 수직 배치 및 에어포일 피치를 예시한다.

도 10은 3.1 초 및 42 Hz에서 제어기 온에 의한 RBF 및 제어기 오프에 의한 4차 RSM으로 근사되는 에어포일

플루터 N-코드 시뮬레이션으로부터의 시계열을 예시하는 그래프이다.

도 11a 는 본 발명의 원리들에 따른 대체 모델을 생성하는 방법의 흐름도이다.

도 11b 는 도 11a 에 예시된 대체 모델을 생성하기 위한 방법의 계획되는 도면이다.

도 12 의 시뮬레이션에 있어서 본 발명의 원리들을 채용하는 방법을 묘사하는 흐름도이다.

도 13 은 일 실시형태의 원리들에 따라 3D 경험에 대한 대체 모델을 생성하는 시스템의 간략화된 블록도이다.

도 14 는 본 발명의 일 실시형태가 구현될 수도 있는 컴퓨터 네트워크 환경의 간략화된 도면이다.

### 발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0028]

하기에 발명의 예시적인 실시형태들을 설명한다.

[0029]

여기에 인용된 모든 특허들, 공개된 출원들 및 인용문헌들의 기술은 그 전체가 참조로서 포함된다.

[0030]

본 발명의 실시형태들은 시뮬레이션들/상호작용적 차원 경험들의 상술한 제약들을 극복한다. 본 발명의 이러한 실시형태는 수학적 대체물들을 이용하여 현실적인 거동 시뮬레이션 모델들을 가속화함으로써 근 실시간 경험을 생성하는 방법으로 개시된다. 이들 대체 모델들은 물리적 테스트 데이터 또는 고충실도 시뮬레이션 데이터에 기초한다. 고충실도 N-코드 (FEA, CFD (Computational Fluid Dynamics), 또는 논리적) 코-시뮬레이션들은 거동 예측의 각각의 실시간 초에 대해 1 시간의 CPU 시간 정도를 소요할 수 있다. 본 발명의 실시형태들은 실시간 또는 근실시간 애플리케이션들에서 이용되기에 충분히 고속이도록 하는 크기 정도들까지 이 프로세스를 스피드업한다. 이는 사이버-물리적 시스템들의 상호작용 설계, 다중 훈련 (multi-disciplinary) 최적화 및 검증에 대한 실제적인 기법을 실행한다. 이들 대체 모델들은 기능적 목업 유닛 (Functional Mockup Unit) 으로서 랩핑되어 시스템 시뮬레이션 툴에 배치되고/되거나 하드웨어에 내장될 수 있다. FMUs 는 <http://www.functional-mockup-interface.org/index.html> 에 기술되어 있으며, 그 내용들은 여기서는 참조로서 포함된다.

[0031]

일 실시형태는 물리적 또는 수치적 모델에 대한 수치적 고충실도 실험을 먼저 실행한 다음, 관심의 거동을 표현하는 매개 변수 상태 벡터 ( $p$ ) (예를 들어, 시간 ( $t$ )) 의 시간에 따라 응답을 관찰함으로써 현실적 거동 모델링을 가속화한다. 이 모델은 이산 이벤트들 (예를 들어, 제어기 온/오프) 뿐만 아니라 강제된 바운더리 조건들, 이를 테면 도로 여기상태들 (road excitations) 을 포함할 수 있다. 대안으로서, 이러한 실험을 실행하기 전에, 일 실시형태는 관리가능한 파라미터 수들 (예를 들어, 대략 100) 까지, 주요 컴포넌트 분석 또는 유사한 기술들을 이용하여 고충실도의 고차원 수치 모델의 차원 수를 먼저 감소시킬 수도 있다. 계속 진행하여, 실험을 실행한 후, 이러한 실험은, 초기 조건들의 주어진 세트 ( $p(t=0)$ ) 에 대해 ( $t$ ,  $v$ ,  $p$ ) 의 함수로서 데이터세트를 생성하도록 관심의 모델 설계 변수 벡터 ( $v$ ) 에 대한 구조화된 (예를 들어, 실험 설계) 또는 비구조화된 방식으로 이 실험을 이어서 반복한다.

[0032]

본 방법은 데이터세트들을 결합하고, 백워드 미분 방식 (backward differentiation scheme) 을 이용하여 시간에 대해 상태 변수들을 미분한 다음 데이터세트로부터 시간을 제거하고 산출 ( $v$ ,  $p$ ,  $\dot{p}$ ,  $\ddot{p}$ ) 함으로써 계속된다.

그 후, 저차 도함수들  $\ddot{p} = (v, p, \dot{p})$  의 대체 함수로서 고차 방사상 기저 함수, 매개 네트들, chebychev 다항식들, 응답 표면 방법들, 다항식 응답 표면 방법들과 같은 기법들을 이용하여 근사되며,  $\ddot{p} = (v, p, \dot{p})$  의 완성 세트에서의 부분인 트레이닝 세트에 걸쳐 항 감소가 있다. 정확한 예측 대체물이 선택되고 그 기술적 설정들은 그 변동량 및 바이어스 에러를 감소시키도록 최적화되고, 트레이닝에 이용되지 않은 데이터세트의 부분과 함께 평가된다. 따라서, 대체 모델을 형성한다. 일 실시형태는 또한, 주어진 값 ( $v$ ) 및 주어진 초기 조건들 ( $p(t=0)$  및  $\dot{p}(t=0)$ ) 에 대해,  $t=0$  으로부터  $p(t)$  를 수치적 포워드 적분할 수도 있다.

상태 벡터 및 설계값들의 이들 초기 조건들은 오리지널 시계열 실험들의 것과 동일하도록 제약된다. 이 모델은 이어서 FMU 로 엑스포트되고, 근 실시간으로 현실적 거동을 시뮬레이션하기 위해 3D 모델링 소프트웨어에 직접 채용될 수 있다. 대안으로서, 하드웨어, 이를 테면, 비행 시뮬레이터 또는 자동 전자 제어 유닛 (ECU) 에 직접 이용될 수 있다.

[0033]

도 1 은 상호작용적 경험에 이용하기 위한 대체 모델을 생성하는 방법 (100) 의 흐름도이다. 방법 (100) 은 실세계 시스템을 표현하는 모델을 정의함으로써 시작한다 (101). 정의된 모델은 거동 및 설계 변수 벡터를

표현하는 매개 변수 상태 벡터를 포함한다. 예를 들어, 매개 변수 상태 벡터는 오브젝트의 위치 및 회전 각도들 (및 이들의 도함수들) 을 포함할 수도 있고, 설계 변수 벡터는 오브젝트에 대한 질량 및 힘 (그리고 그 방향) 을 포함할 수도 있다. 단계 101에서 정의된 모델은 임의의 실세계 시스템을 표현할 수도 있으며, 이것의 예들이 아래 여기에서 설명된다. 또한, 모델은 예를 들어, CAD 시스템의 이용을 통하여 당해 기술 분야에 알려진 원리들에 따라 정의될 수도 있다. 방법 (100) 은 매개 변수 상태 벡터의 시간에 걸친 응답을 결정하는 제 1 실험 및 설계 변수 벡터에 대한 제 2 실험을 수행함으로써 진행한다 (102). 예시적인 실험은 여러 질량들, 힘들 및 힘 방향들에 대한 매개 변수 상태의 시계열을 기록하는 것을 포함한다. 수행 (102) 은 시간의 함수로서 매개 변수 상태 벡터와 설계 변수 벡터의 데이터세트를 생성한다. 실험들을 수행 (102) 한 후에, 방법 (100) 은 다음으로 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 데이터세트를 변경한다 (103). 일 실시형태에 따르면, 단계 (103) 는 유한 차이 방법을 이용하여 시간 스텝, 및 시간 스텝에서의 상태 벡터 값으로부터 직접 연산된 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들을 결정하는 것을 포함한다. 다음으로, 데이터세트에서의 것에 대하여 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수를 근사시키는 대체 미분 방정식들의 세트가 구성된다 (104). 방법 (100) 의 컴퓨터 구현 실시형태에서, 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하는 것 (104) 은 메모리에서의 대체 모델로서 대체 미분 방정식들의 세트를 동작적으로 저장하는 것을 포함한다. 방법 (100) 은 모델과의 사용자 상호작용에 응답하여 시뮬레이션된 거동을 가속화하는 방식으로 메모리로부터 대체 모델을 응답적으로 제공함으로써 종결된다 (105). 상기 대체 모델을 제공함 (105) 에 있어서, 대체 미분 방정식들은 시간의 함수로서 대체 모델의 상태 벡터를 푸는 시계열을 이용하는 것을 포함하는 설계 변수 벡터의 주어진 값에 대해 풀려진다. 따라서, 대체 모델의 이러한 제공 (105) 은 개선된 사용자 경험을 제공한다.

[0034]

방법 (100) 의 일 실시형태에 따르면, 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하는 것 (104) 은 대체 미분 방정식들의 하나 이상의 후보 세트들을 반복적으로 구성하는 것, 및 대체 모델로서 저장되는 대체 미분 방정식들의 세트를, 적어도 데이터세트의 서브세트에 대한 최저 교차 검증 에러를 갖는 하나 이상의 후보 세트들로부터의 세트로서 선택하는 것을 포함한다. 방정식을 구성하는 것을 수행함에 있어서 이용되는 데이터세트의 이 서브세트는 검증 데이터세트로서 고려될 수도 있다. 방법 (100) 의 또 다른 실시형태에 따르면, 데이터세트를 변경하는 것 (103) 은 데이터세트로부터 시간을 제거하는 것을 포함할 수도 있다. 또 다른 실시형태에서, 방법 (100) 의 단계 (102) 에서 수행되는 제 1 및 제 2 실험들은 물리적 실험 및/또는 수치적 고충실험이다.

[0035]

방법 (100) 의 또 다른 실시형태에서, 정의된 모델은 이산 이벤트들 및 바운더리 조건들을 더 포함한다. 정의된 모델이 고충실험의 고차원 수치 모델인 일 실시형태에서, 방법 (100) 은 정의된 모델의 차원성을 감소시키는 것을 더 포함할 수도 있다. 이러한 실시형태에 따르면, 차원성은 예를 들어, 주요 컴포넌트 분석, k-최인접 이웃들, 및/또는 서브스페이스 학습을 채용함으로써 당해 기술 분야에 알려진 원리들에 따라 감소될 수도 있다.

[0036]

방법 (100) 은 또한 기능적 목업 인터페이스에 대체 모델을 엑스포트하는 것을 포함할 수도 있다. 대안의 실시형태에서, 방법 (100) 은 비행기 시뮬레이트 또는 자동 전자 제어 유닛과 같은 하드웨어 시스템에 채용된다. 방법 (100) 의 일 실시형태에서, 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수는 방사상 기저 함수, 뉴럴네트들, chebychev 다항식들, 응답 표면 방법들, 다항식 응답 표면 방법들, 절대 항 회귀, 지원 벡터 머신들, 및 스페이스 맵핑 중 적어도 하나를 이용함으로써 단계 (104) 에서 결정된다. 또 다른 실시형태에서, 단계 (104) 에서 대체 모델을 구성하는 것은 변동량 및 바이어스 에러를 감소시키기 위해 대체 모델을 최적화하는 것을 더 포함한다.

[0037]

도 2 는 본 발명의 원리들에 따라 실행되는 상호작용 경험이 기반이 될 수 있는 개별적인 응답 시계열 데이터를 생성하기 위한 방법 (210) 의 개요를 예시한다. 도 2 에 예시되고 아래 설명된 예는 Van der Velden 등의 "Probabilistic Certificate of Correctness for Cyber Physical Systems" (ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, August 12-15, Chicago, IL, USA, DETC2012-70135) 에 기재된 바와 같은 4-코드 CFD-FEA-논리적 임베디드 소스 코-시뮬레이션의 데이터세트들을 채용하며, 이를 내용을 여기서는 참조로서 포함한다. 이를 데이터세트들은 상미분 방정식/1차원 데이터세트 (213a) 및 부분 미분 방정식 / 3D 데이터세트 (213b) 를 포함하며, 이를 양쪽 모두는 모델 추상화들 (211) 및 연속하는 시간 데이터세트 (214a) 와 이산 시간 데이터세트 (214b) 로부터 발생하며, 이를 데이터세트 양쪽 모두는 연산 모델들 (212) 로부터 발생한다. 데이터세트들 (213a, 213b, 214a 및 214b) 은 비제한적인 예에서, 다이몰라 (Dymola) (216a), 아바쿠스 (Abaqus)/CFD (216b), 아바쿠스 (Abaqus)/표준 (Standard) (216c), 및 컨트롤빌드 (ControlBuild) (216d) 를 포함할 수도 있는 도메인 시뮬레이션 소프트웨어

(215)에 의해 프로세싱된다. 이들 데이터세트들 (213a, 213b, 214a 및 214b)은 여기에 설명된 원리들에 따라 상호작용적으로 풀려질 수 있는 모델로 변환될 수 있다. 도 2에 예시된 오버뷰는 도 3에 예시된 유한 엘리먼트 모델 (321)에 대한 CFD 플로우 필드 (320) (음영표시로 도시됨)의 데이터를 사용자에게 제공할 수도 있다. 이러한 일 예에서, 플로우 필드는 제어 시스템 액츄에이션 동안에 부분적으로 분리된 플랩에 대한 Navier-Stokes를 채용함으로서 결정될 수도 있다.

[0038] 도 4는 날개 (430)를 가진 글라이더 (431)를 예시한다. 날개 (430)는 플루터로 지칭되는 제한 사이클 모션을 수직적으로 변위시키고 비스듬하게 보이게 한 것으로 보여진다. 주어진 시간  $t$ 에서, 날개 (430)의 트레일링 에지 플랩을 이동시키는 액티브 플루터 제어 시스템이 배치된다. 이 시스템은 센서들, 임베디드 소프트웨어, 및 플랩 메카니즘을 활성화하는 전기 모터들로 구성된다. 여기에 설명된 예시적인 방법은 날개 (430)의 플루터를 모델링하는 상호작용적 경험을 제공한다. 날개 (430)에 대한 주어진 스팬와이즈 로케이션에 대해, 높은 애스펙트비 데이터가 날개 (430)의 상태, 이를 테면, 제어 소프트웨어 활성화 (433)를 나타내는 제어 서보 각도 (432) 및 어택 각도 (434)에 대해 제공된다. 다른 데이터는 수직 변위를 포함할 수도 있다.

[0039] 도 5는 시간의 함수로서 에어포일 피치 ( $\alpha$ )를 예시하는 그래프 (540)이다. 그래프 (540)는 자유 제한 사이클 운동 (플루터 억제 활성화)에 대한 고충실도 코-시뮬레이션에 의해 시간의 함수로서 시뮬레이션되는 에어포일 피치를 표현하는 데이터 (541)를 포함한다. 전체 코-시뮬레이션 데이터 (541)는 우수한 정확도를 제공하면서 제조에 극도로 시간 소모적이고 계산적인 비용이 들 수 있는 기존의 뱃지 프로세싱 방법론들을 이용하여 결정되는 데이터를 표현한다. 따라서, 본 발명의 실시형태들은 전체 코-시뮬레이션 데이터 (541)를 근사시키는 대체물들을 계산한다.

[0040] 에어포일 피치 데이터 ( $\alpha$ ) 및 수직 변위 데이터 ( $z$ )로 시작하여, 일 실시형태는 상태 파라미터들 및 이들 시간 도함수들 ( $t, \alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}, z, \dot{z}, \ddot{z}$ )의 데이터의 세트를 산출하기 위해 백워드 수치 스텝을 이용하여 데이터세트를 미분하는 것을 진행한다. 다음, 파라미터로서 시간이 제거되고, 상태 벡터의 함수 ( $\alpha, z$ )로서  $\alpha$  및  $z$ 의 고차 도함수 및 코-시뮬레이션 데이터의 부분을 이용한 저차 도함수를 표현하도록 대체물들 ( $F$ )에 기초하여 방정식들의 시스템이 생성된다. 나머지 데이터는 대체물들을 검증하기 위해 예약된다. 방정식들의 결과적인 시스템은 아래에 제공된다:

$$F_1(\alpha, \dot{\alpha}, z, \dot{z}) = \ddot{\alpha}$$

$$F_2(\alpha, \dot{\alpha}, z, \dot{z}) = \ddot{z}$$

[0041] 계속해서,  $F_1$  및  $F_2$ 는 잘 알려진 스프링 뱃지 모델을 표현하는 2차 선형 상미분 방정식을 획득하도록 선형 회귀 대체 모델로서 표현될 수도 있다. 이 스프링 뱃지 모델은 이것이 날개 플루터에 대한 적절한 모델 형태라는 종래의 정보 없이도 유도됨을 주지한다. 따라서, 본 발명의 실시형태들은 시스템을 표현하는 적절한 모델의 종래 정보를 필요로 하지 않는다. 이 예에 대해 데이터를 이용하여 유도되는 2차 선형 상미분 방정식의 일 예는 아래 제공된다:

$$\begin{bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.4 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -423.11 & -127.73 \\ 18.513 & -230.74 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2.5370 & 26.374 \\ 0.19421 & -3.2897 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{z} \end{bmatrix}$$

[0042] 2차 미분 방정식을 표현하는 결과적인 1차 대체 모델은 도 5의 음영 표시된 선 (542)으로 도시된다. 도 5에 도시된 바와 같이, 2차 모델은 전체 코-시뮬레이션 데이터 (541)와 유사한 주파수를 갖지만 진폭은 매우 상이하다. 그래프 (540)는 1차 대체물로 근사되는 에어포일 플루터 N-코드 시뮬레이션을 표현하는 데이터 (542), 및 4차 대체물 (543)로 표현되는 데이터를 더 포함한다. 이와 유사하게, 에어포일 수직 변위 ( $z$ )의 도면이 플루터 제어 시스템의 주어진 대역폭 ( $w$ )에 대한 시간의 함수로서 존재한다. 이러한 데이터는 도 5에 도시된 데이터에 유사하게 표현될 수도 있다.

[0043] 본 발명의 실시형태들은 또한, 데이터 외에 위에 설명된 세트로 모델을 검증함으로서 이러한 에러의 소스를 결정할 수 있다. 이러한 평가는 실제  $\ddot{\alpha}$  데이터와, 선형 대체물로부터 구성되는 2차 ODE에 의해 예측되는 것 사이에 큰 에러가 존재함을 나타낸다. 이 에러는 도 6에 도시되어 있으며, 여기에서 그래프 (650)는

$\ddot{\alpha}$  데이터를 보여주고, 여기에서 라인 (652) 은 모델의 완벽한 검증을 표현하며, 데이터 포인트들 (653) 은 별대로 설정되었던 실제 데이터를 보여준다. 이 검증으로부터, 선형 대체물은 한계 사이클 코-시뮬레이션에 대한 양호한 근사화가 아님을 선형적으로 알게 된다. 이는 큰 각도들에서 에어포일 플로우 분리의 비선형성에 기인할 수도 있다. 도 6 은 그래프 (651) 에서,  $\ddot{z}$  근사화가 매우 양호함을 추가로 예시한다. 라인 (654) 이 예측된  $\ddot{z}$  데이터인 경우, 데이터 포인트들 (655) 이 이전에 별도로 설정되었던 나머지 데이터 포인트들이다.

[0046] 이 에러를 정정하기 위해, 일 실시형태는 2차 모델로부터 4차 모델로 대체 모델을 스위칭하고 4차 모델을 이용하여 검증을 반복할 수도 있다. 이 검증의 결과는 도 7 에 도시되어 있으며,  $\ddot{\alpha}$  데이터 및  $\ddot{z}$  데이터는 그 래프들 (760 및 761) 에 의해 각각 도시된다. 그래프들 (760 및 761) 양쪽 모두는, 예측된 데이터 (762 및 764) 가 대응하는 데이터 포인트들 (763 및 765) 과 매우 잘 정렬하고 있음을 보여준다. 이 4차 모델의 결과들은 도트 포인트들 (543) 에 의해 도 5 에 도시되며, 이 포인트들은 오리지널 코-시뮬레이션 거동 결과들 (541) 및 외삽들과 잘 정렬된다. 따라서, 이러한 실시형태는 전체 코-시뮬레이션 데이터를 이용하는 계산적 희생 없이도 상호작용적 경험에 이용될 수 있는 대체 모델을 전개하였다.

[0047] 이러한 방법의 구현은 도 8 에 도시되어 있으며, 여기에서 도 7 에 도시된 검증된 모델은 event time=Task.controller\_on\_time 일 때까지 한계 사이클 운동에 대한 방법 (870) 에 이용된다. 방법 (870) 은 이 경우에, 테스크 프로세스 (872) 의 컴포넌트인 제어기-온 시간 (874) 때까지 선택된 파라미터의 값들의 시퀀스 전반에 걸쳐 반복하는 루프 (871) 를 포함한다. 루프 (871) 의 각각의 반복에 있어서, 테스크 프로세스 (872) 는 시간이, 제어기가 오프임을 나타내는 제어기-오프 시간 (873) 미만인지 또는 제어기가 온임을 나타내는 제어기-온 시간 (874) 초과인지의 여부를 식별한다. 시간이 제어기-온 시간 미만일 때, 즉, 제어기가 오프일 때 (873), 위에 설명된 4차 대체물을 이용하여 프로세스 875 에서  $a$  및  $z$  를 계산한다. 위에 설명된  $F_1$  및  $F_2$  를 포함하는 방정식들의 시스템의 상호작용 모델 (876) 은 방정식들의 시스템에 대한 상이한 입력들을 이용하여  $\ddot{\alpha}$  및  $\ddot{z}$  를 연산하기 위해 시스템 (870) 에 채용될 수도 있다.

[0048] 본 발명의 실시형태들은 설계 변수들의 효과를 추가로 도입할 수 있다. 위에 설명된 예에서, 이는  $w = 20, 25, 33, 50$  및  $100 \text{ Hz}$  의 대역폭을 갖는 샘플들을 추가하고 디지털 제어기가 time = controller\_on\_time 에서 플랩을 활성화함으로써 행해진다. 데이터세트 ( $t, t_{controller\_on}, w, a, \dot{a}, \ddot{a}, z, \dot{z}, \ddot{z}$ ) 를 산출한다. 그 후, 위에 설명된 프로세스는 time = controller\_on\_time 에서 활성화되는 새로운 대체 모델을 생성하도록 이 데이터세트를 이용하여 반복된다. 이러한 실시형태에서, 4차 RMS 방법은 작업을 하지 않는다. 그러나, 이를 테면, Hardy, "Multiquadratic equations of topography and other irregular surfaces" (J Geophysics Res 76, 1905-15 (1971)) 에 기재된 것과 같이, RMS 방법을 방사상 기저 함수 대체 방법으로 대체한다.

[0049] 이 변경된 대체 모델의 결과들은 도 9 에 도시되어 있으며, 여기에서, 그래프 (980) 는  $a$  대 시간을 보여주고, 그래프 (981) 는  $z$  대 시간을 보여준다. 그래프들에서, 더 밝게 음영 표시된 선들 (982 및 984) 은 전체 코-시뮬레이션 결과들을 예시하며, 더 어두운 선들 (983 및 985) 은 4.8 초 및  $33 \text{ Hz}$  에서 제어기 온에 의한 RBF (986) 및 제어기 오프에 의한 4차 RSM 으로 근사되는  $a$  및  $z$  를 보여준다.

[0050] 트레이닝 데이터를 이용하여 본 발명의 원리들에 따라 대체 모델들을 구성하는 방법들이 위에 설명되어 있다. 그러나, 본 발명의 실시형태들은 이렇게 제한되지 않고, 구성된 대체 모델들은 다른 데이터, 이를 테면, 사용자에 의해 제공된 데이터를 이용하여 시뮬레이션들 / 상호작용 경험들에 이용될 수 있다. 이러한 실시형태에서, 에어포일 시스템의 거동은 상이한 시스템 대역폭, 상이한 시스템 온 시간, 및 상이한 초기 조건들로 대체 모델들을 이용함으로써 결정될 수도 있다. 도 10 은 3.1 초 및  $42 \text{ Hz}$ 에서 상기 상이한 데이터, 제어기 오프에 의한 4차 RSM 및 제어기 온에 의한 RBF 를 이용한 시스템 원리들의 검증들을 보여준다. 그래프 (1090) 는 상술한 조건들 하에서  $\ddot{a}$  대 시간의 응답을 보여준다. 제어기가 턴온되고 (1092) RBF 시뮬레이션 기술이 채용될 때 (1094) 응답의 보다 세부적인 사항을 보여주기 위해 그래프의 부분 (1091) 이 또한 도 10 에서 확대되어 있다. 그래프 (1090) 는 대체 데이터 (1095) 가 전체 코-시뮬레이션 데이터 (1093) 를 밀접하게 따르고 있음을 나타낸다.

[0051] 도 10 의 분해된 영역 (1091) 에서 관측될 수 있는 바와 같이, 시간에 따라, 일부 상태 에러는 수치적 적분 에러 (오일러 시간 스텝), 및 시계열 사이의 오프-세트로 이어질 수 있는 근사화 에러로 인하여 축적한다. 제

여기가 3.1s에서 턴온될 때, 풀 코-시뮬레이션은 플랩 편향성으로 인하여, 매우 높은 피치 가속도들 ( $\ddot{\alpha}$  (-120 rad/s<sup>2</sup>))로의 평활한 트랜지션을 생성한다. 그러나, 대체물은 단일 시간 스텝에서 제어기 오프 (0 Hz)로부터 42 Hz로 점프하고 이에 따라 방사상 가속도에서 스텝을 생성한다. 그러나, 그 시점에서부터 대체물에 의해 예측되는 가속도는 평활하게 되는 반면, 디지털 제어기에 의한 전체 코-시뮬레이션은 피치 가속도에 대한 고주파수 이산 정정들을 갖는다. 그러나, 이는 실제 애플리케이션에 대해 허용가능한 에러이다. 이러한 실시형태는 실시간으로 상호작용 실험들을 채용하도록 정확한 실시간 (대체) 모델을 제공한다. 예를 들어, 대체 모델은 시스템이 불안정상태가 되는 대역폭들 또는 활성화 시간들/조건들이 존재하는지의 여부를 결정하는데 이용될 수 있다. 또 다른 실시형태에서, 대체 모델은 시뮬레이션 루프에서 대기의 조건들로 인한 어택 각도에서의 변동량들과 같은 시간 종속적 바운더리 조건들을 추가함으로써 추가로 강화된다.

[0052]

위에 도입된 바와 같이, 그리고 도 11a 및 도 11b와 관련하여 설명된 같이, 본 발명의 실시형태들은 시스템을 시뮬레이션하는 물리적 미분 방정식들의 정보를 필요로 하지 않는다. 데이터세트가 관련하고 있는 상태/설계 벡터를 포함하는 것만을 필요로 한다. 이러한 관련 벡터들이 포함되지 않으면, 방법은 높은 교차 검증 에러를 생성하고 따라서 모델이 관련 벡터 데이터를 결여하고 있음을 시그널링한다. 이러한 방법은 모델 형태 (벡터들의 방정식들)가 선형적으로 정의되어야 할 것을 양쪽 모두 필요로 하는 Kalman 필터링 및 파라미터 추정과 같은 기존의 기술들에 비해 유리하다. 대체 모델을 구성하기 위하여, 일 실시형태에 따르면, 검증 데이터세트에 대한 최저 교차 검증 에러를 갖는 대체 미분 방정식 모델로서 반복적 방법을 통하여 모델 형태가 구성되고 식별된다. 이러한 방법은 여기에서 도 11a 및 도 11b와 관련하여 여기에서 설명된다.

[0053]

도 11a 및 도 11b는 본 발명의 일 실시형태에 따라 대체 모델을 구성하는 방법 (1100; 도 11a에는 1100a 및 도 11b의 1100b 사이에서 스플릿됨)을 예시한다. 방법 (1100)은 오서링 (1101)을 시작시키고, 메모리 영역에서의 3D 시스템 센서 로케이션들에서 시스템 설계 변수들 ( $v_i$ ), 시스템 내부 상태들 ( $p_i$ ), 관심의 시스템 상태들 ( $q_i$ ), 및 시스템 바운더리 조건들 ( $b_i$ )을 정의한다 (1102). 다음으로, 시계열 실험이 수행되고, 결과적인 시스템 내부 상태 결과들 ( $p_i$ ) 및 관심의 시스템 상태들 ( $q_i$ )이 범위  $\min < v_i < \max$  및 내부 상태 조건  $q_{t=0}, p_{t=0}$  상에서 시간  $t = 0$ 에서  $t = t$  시간까지  $v_i$ 의 값들에 대해 결정된다 (1103). 방법 (1100)은 설계 변수들 및 시간  $t$  대 상태 변수들에 대한 데이터 로우들을 연결하여  $row_i = v_i, t, p_i, q_i, b_i$ 를 산출함으로써 계속한다 (1104). 데이터 로우들을 생성한 후, 시간 스텝 (t)을 이용하여 모든 관련 상태 ( $p_i$ ) 및 바운더리 조건들 ( $b_i$ ) 시간 도함수를 연산한 다음,  $row_i = v_i, p_i, p'_i, p''_i, \dots, q_i, q'_i, q''_i, \dots, b_i, b'_i, b''_i$  (여기에서  $x' = dx/dt, x'' = d^2x/dt^2$  임)를 발생시키는 데이터세트에서의 파라미터로서 시간을 제거한다 (1105). 프로세스 (1105)를 수행한 후, 데이터 로우들 ( $row_i$ )이 트레이닝 데이터세트 및 검증 데이터세트에 랜덤하게 할당된다 (1106). 이후, 관심의 상태들의 시간 도함수들에 대해 예를 들어,  $i = 0$ 에서부터 3 까지  $i$ 는 반복된다 (1107). 방법 (1100)에서,  $i$ 는 아래 설명된 테스트 (1109)에 따라 반복된다. 각각의 반복에서, 함수 (F)는 대체 기술, 다향식 또는 다른 회귀 기술들을 이용하여 구성되고, 이는 다음 식들,  $i = 0$ 이면,

$$q_i = F(v_i, p_i, p'_i, p''_i, \dots, b_i, b'_i, b''_i \dots); \quad i = 1 \quad \text{이면},$$

$$q'_i = F(v_i, p_i, p'_i, p''_i, \dots, b_i, b'_i, b''_i \dots); \quad i = 2 \quad \text{이면},$$

$$q''_i = F(v_i, p_i, p'_i, p''_i, \dots, b_i, b'_i, b''_i \dots) \text{을 가져온다} (1108). \quad \text{각각의 함수 (F)가 대체 기술들을 이용하여 생성된 후} (1108), \text{이는 예측 데이터의 } q_i, q'_i, q''_i \text{에서 단계 1103으로부터의 검증 세트를 마이너스한 것이 } \varepsilon \text{ 보다 큰지를 결정하도록 테스트되며} (1109), \text{여기에서 } \varepsilon \text{는 모델 검증 에러, 예를 들어, 모델의 완벽한 검증을 표현하는 선} (652) \text{과 실제 데이터 포인트들} (653) \text{사이의 차이이다. } q_i, q'_i, q''_i \text{ (예측된 검증 세트)가 } \varepsilon \text{ 보다 크면, 방법} (1100) \text{은 종료한다} (1111). \text{그러나, } q_i, q'_i, q''_i \text{ (예측된 검증 세트) } \varepsilon \text{가 보다 작으면, } i \text{는 증분되고} (1110), \text{방법은 프로세스} (1107) \text{로 되돌아가 계속 진행한다.}$$

[0054]

도 12는 상호작용적 경험에서 방법 (1100) 또는 여기에 설명된 임의의 방법을 채용하는 방법 (1220)을 예시한

다. 방법 (1220) 은 런타임 경험을 통하여 시작한 다음 (1221), 방정식들, 이를 테면, 도 11a 및 도 11b에 설명된 대체 미분 방정식들 (F) 이  $time = 0$  에서의 새로운 초기 조건들 (m) 에서, 그리고 메모리 영역에 저장된 변수 값 (k) 및 새로운 시간 종속적 바운더리 조건들 또는 이벤트들 (b<sub>n</sub>) (시간) 에서, 오프라인으로 상태 ( $p_i$ , 및  $q_i$ ) 에 대해 풀려진다 (1222). 프로세스 (1222) 는 후-프로세싱을 위하여 메모리 영역 ( $time$ ,  $v_k$ ,  $t$ ,  $p_i$ ,  $q_i$ ,  $b_n$ ) 에 솔루션 시계열을 저장함으로서 계속 진행한다. 다음,  $time = 0$  에서의 새로운 초기 조건들 (m) 에서, 그리고 변수 값 (k) 및 새로운 시간 종속적 바운더리 조건들 또는 이벤트들 (b<sub>n</sub>) 에서 디지털 목업 또는 하드웨어 시뮬레이터의 상태들 ( $p_i$ , 및  $q_i$ ) 을 구동함으로써 실시간 사용이 시작된다 (1223). 방법 (1220) 은 프로세스의 포인트 (1224) 에서 새로운 이벤트 값들, 이를 테면, 사용자, 제어기 또는 콘텍스트 값들의 도입을 추가로 수용한다. 방법 (1220) 은 새로운 이벤트 값 ( $b_n$ ) 이 수신되는지의 여부를 모니터링하고 (1225), 그렇다면, 실시간으로 방정식들을 풀어 클록과 동기하여 시간 ( $time = time + dt$ ) 으로 나아간다 (1226). 새로운 이벤트 값이 1225 에서 검출되지 않으면,  $p_i$ ,  $q_i$ , 및  $b_n$  을 이용하여, 사용자에 대한 실시간 경험에 생성하기 위하여 시간  $t$  에서 디지털 목업 또는 하드웨어 시뮬레이터의 상태를 업데이트한다 (1227).

[0055]

도 13 은 본 발명의 일 실시형태에 따라 대체 모델을 생성하는데 이용될 수도 있는 컴퓨터 기반 시스템 (1330) 의 간략화된 블록도이다. 시스템 (1330) 은 버스 (1335) 를 포함한다. 버스 (1335) 는 시스템 (1330) 의 여러 컴퓨터를 간의 상호접속부로서 역할을 한다. 여러 입력 및 출력 디바이스들, 이를 테면, 키보드, 마우스, 디스플레이, 스피커들 등을 시스템 (1330) 에 접속하기 위한 입력/출력 디바이스 인터페이스 (1338) 가 버스 (1335) 에 접속된다. 중앙 프로세싱 유닛 (CPU) (1332) 은 버스 (1335) 에 접속되고, 컴퓨터 명령들의 실행을 위해 제공한다. 메모리 (1337) 는 컴퓨터 명령들을 실행하기 위하여 이용되는 데이터에 대한 휘발성 저장부를 제공한다. 저장부 (1336) 는 오퍼레이팅 시스템 (도시 생략) 과 같이 소프트웨어 명령들에 대한 비휘발성 저장부를 제공한다. 시스템 (1330) 은 또한 광역 네트워크들 (WANs) 및 근거리 네트워크들 (LANs) 을 포함하는 당해 기술에서 알려진 임의의 다양한 네트워크들에 접속하기 위한 네트워크 인터페이스 (1331) 를 포함한다.

[0056]

모델 정의 모듈 (1333) 은 버스 (1335) 에 추가로 접속된다. 모델 정의 모듈 (1333) 은 실세계 시스템을 표현하는 모델을 정의하도록 구성되며, 정의된 모델은 설계 변수 벡터 및 거동을 표현하는 매개 변수 상태 벡터를 포함한다.

[0057]

실험 모듈 (1334) 은 버스 (1335) 를 통하여 모델 정의 모듈 (1333) 에 동작적으로 커플링되고, 매개 변수 상태 벡터의 시간에 걸친 응답을 결정하는 제 1 실험, 및 설계 변수 벡터에 대한 제 2 실험을 수행하도록 구성된다. 시스템 (1330) 의 이러한 실시형태에서, 제 1 및 제 2 실험들은 시간의 함수로서 매개 변수 상태 벡터 및 설계 변수 벡터의 데이터세트를 생성한다. 시스템 (1330) 은 실험 모듈 (1334) 로부터 데이터세트를 수신하고 매개 변수 상태 벡터의 하나 이상의 도함수들로 전송된 데이터세트를 변경하도록 구성되는 데이터세트 모듈 (1341) 을 더 포함한다. 데이터세트 모듈 (1341) 에 의해 결정되었던 데이터세트에서의 것에 대해 매개 변수 상태 벡터의 고차 도함수를 근사시키는 대체 미분 방정식들의 세트를 구성하도록 구성된 대체 모듈 (1339) 이 버스 (1335) 에 접속된다. 대체 모듈 (1339) 에 의한 이러한 구성은 대체 미분 방정식들의 세트를 대체 모델로서, 메모리 (1337) 또는 저장 디바이스 (1336) 에 동작적으로 저장하는 것을 포함한다. 모델과의 사용자 상호작용에 응답하여 시뮬레이션된 거동을 가속화하는 방식으로 메모리 (1337) 또는 저장부 (1336) 로부터 대체 모델을 응답적으로 제공하도록 구성된 상호작용 모듈 (1340) 이 시스템 (1330) 에 동작적으로 커플링된다.

대체 모델의 이러한 제공은 시간 함수로서 대체 모델의 상태 벡터를 푸는 시계열을 이용하는 것을 포함하는 설계 변수 벡터의 주어진 값에 대한 대체 미분 방정식들을 룬다.

[0058]

일 실시형태들에서, 가속화된 시뮬레이션된 거동은 정규 시뮬레이션 기술들에 비해 가속화되는 것을 고려될 수도 있다. 또한, 가속화된 시뮬레이션된 거동은 실세계 이벤트들에 비해 가속화되거나 또는 감속화될 수도 있고, 예를 들어, 시뮬레이션은 날개 플루터가 실세계에서 발생하는 것보다 더 빠른 속도로 날개 플루터의 효과를 보여줄 수도 있다.

[0059]

여기에 설명된 예시적인 실시형태들은 많은 상이한 방식들로 구현될 수도 있음을 알아야 한다. 일부 경우들에서, 여기에 설명된 여러 방법들 및 머신들이 물리적, 가상 또는 하이브리드 범용 컴퓨터, 이를 테면, 컴퓨터 시스템 (1330), 또는 컴퓨터 네트워크 환경, 이를 테면, 도 14 와 관련하여 여기에서 아래 설명된 컴퓨터 환경 (1400) 에 의해 각각 구현될 수도 있다. 컴퓨터 시스템 (1330) 은 CPU (1332) 에 의한 실행을 위하여 메모리 (1337) 또는 비휘발성 저장부 (1336) 에 소프트웨어 명령들을 로딩시킴으로써 여기에 설명된 방법들을 실행

하는 머신들로 변환될 수도 있다. 또한, 모델 정의 모듈 (1333), 실험 모듈 (1334), 데이터세트 모듈 (1341), 대체 모듈 (1339), 및 상호작용 모듈 (1340) 은 별도의 모듈들로서 도시되어 있지만, 예시적인 일 실시 형태에서 이들 모듈들은 여러 구성들을 이용하여 구현될 수도 있다. 당해 기술 분야의 당업자는 시스템 (1330) 및 이것의 여러 컴포넌트들이 여기에 설명된 본 발명의 임의의 실시형태들을 실시하도록 구성될 수도 있음을 더 알아야 한다.

[0060] 도 14 는 본 발명의 일 실시형태가 구현될 수도 있는 컴퓨터 네트워크 환경 (1400) 을 예시한다. 컴퓨터 네트워크 환경 (1400) 에서, 서버 (1401) 는 통신 네트워크 (1402) 를 통하여 클라이언트들 (1403a-n) 에 링크된다. 환경 (1400) 은 클라이언트들 (1403a-n) 이 단독으로 또는 서버 (1401) 와 결합하여 위에 설명된 방법들의 어느 것을 실행하는 것을 허용하는데 이용될 수도 있다.

[0061] 이것의 실시형태들 또는 양태들은 하드웨어, 펌웨어 또는 소프트웨어의 형태로 구현될 수도 있다. 소프트웨어로 구현되면, 소프트웨어는 프로세서로 하여금, 소프트웨어 또는 이들의 명령들의 서브세트들을 로딩하게 하도록 구성되는 임의의 비일시적 컴퓨터 관독가능 매체 상에 저장될 수도 있다. 그 후, 프로세서는 명령들을 실행하고, 여기에 설명된 방식으로 장치들로 하여금 동작하게 하거나 장치들을 동작시키도록 구성된다.

[0062] 추가로, 펌웨어, 소프트웨어, 루틴들 또는 명령들은 데이터 프로세서들의 특정 액션들 및/또는 기능들을 수행하는 것으로서 여기에서 설명될 수도 있다. 그러나, 여기에 포함된 이러한 설명들은 단지 편리함을 위한 것일 뿐이며 이러한 액션들은 실제로 컴퓨팅 디바이스들, 프로세서들, 제어기들, 또는 펌웨어, 소프트웨어, 루틴들, 명령들 등을 실행하는 다른 디바이스들로부터 야기됨을 알아야 한다.

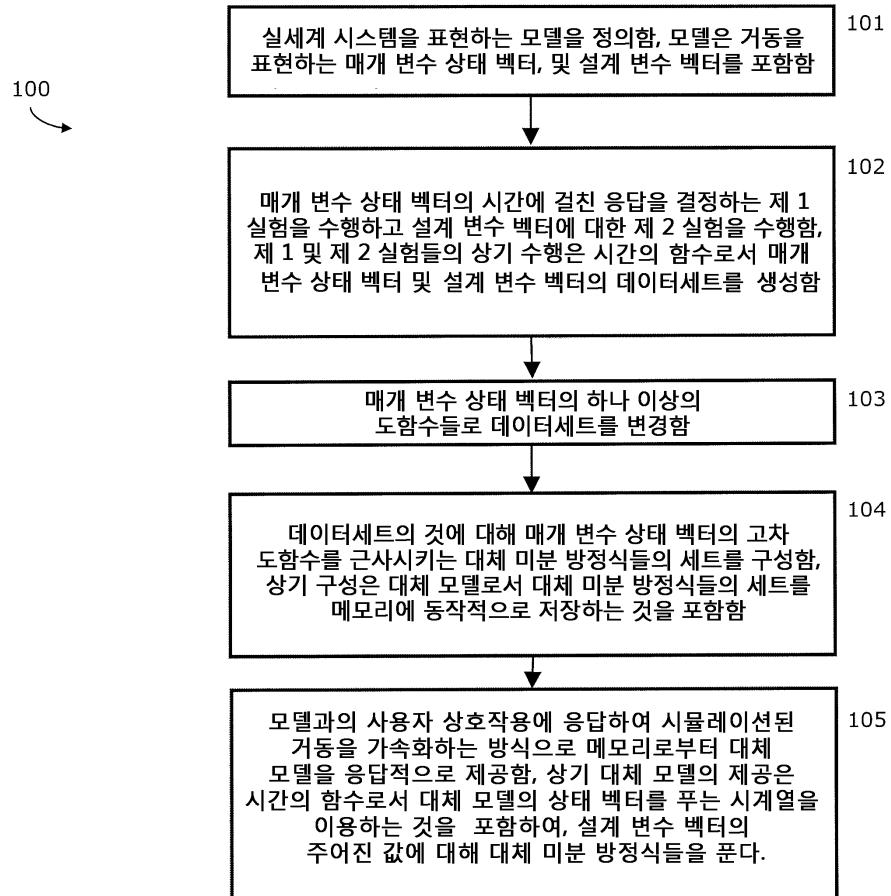
[0063] 흐름도들, 블록도들, 및 네트워크 다이어그램들이 상이하게 배열된 또는 상이하게 표현되는 더 많거나 더 적은 엘리먼트들을 포함할 수도 있음을 알아야 한다. 그러나 또한, 특정 구현형태들이 특정 방식으로 구현되는 실시형태들의 실행을 예시하는 블록 및 네트워크 다이어그램들 및 복수의 블록 및 네트워크 다이어그램들을 시사할 수도 있음을 알아야 한다.

[0064] 따라서, 추가의 실시형태들은 또한 다양한 컴퓨터 아키텍처들, 물리적, 가상, 클라우드 컴퓨터들, 및/또는 이들의 일정 조합으로 구현될 수도 있고, 이에 따라 여기에 설명된 데이터 프로세서들은 실시형태들의 제한없이 단지 예를 드는 목적으로만 의도된다.

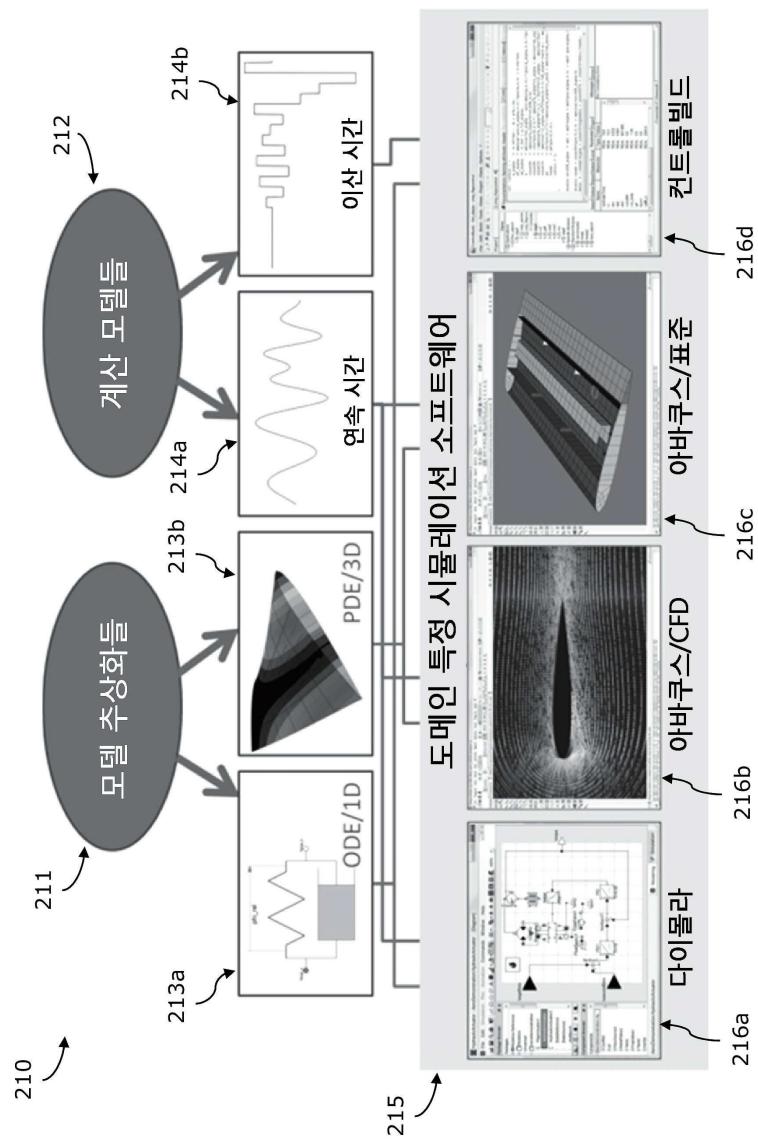
[0065] 본 발명이 본 발명의 예시적인 구체예들을 참조로 특별히 도시되고 설명되었지만, 종래 기술에서 통상의 지식을 가진 자라면, 첨부된 특허청구범위에 의해 포괄되는 본 발명의 범위를 벗어나지 않으면서 형태 및 상세들에서의 여러 변형들이 이루어질 수도 있음을 이해할 것이다.

## 도면

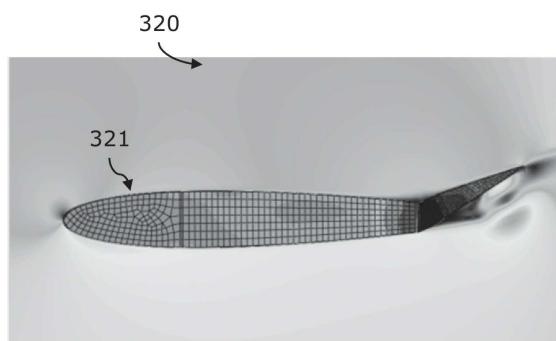
## 도면1



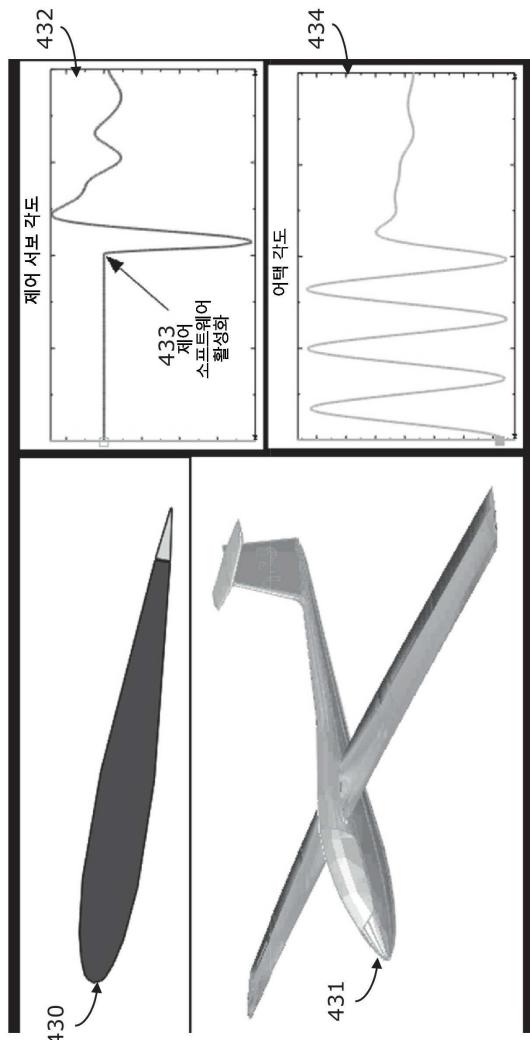
## 도면2



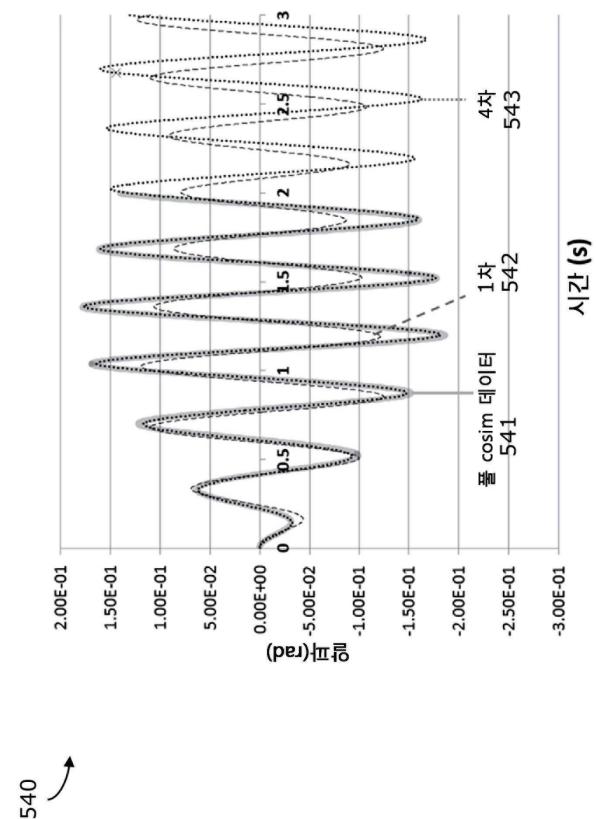
## 도면3



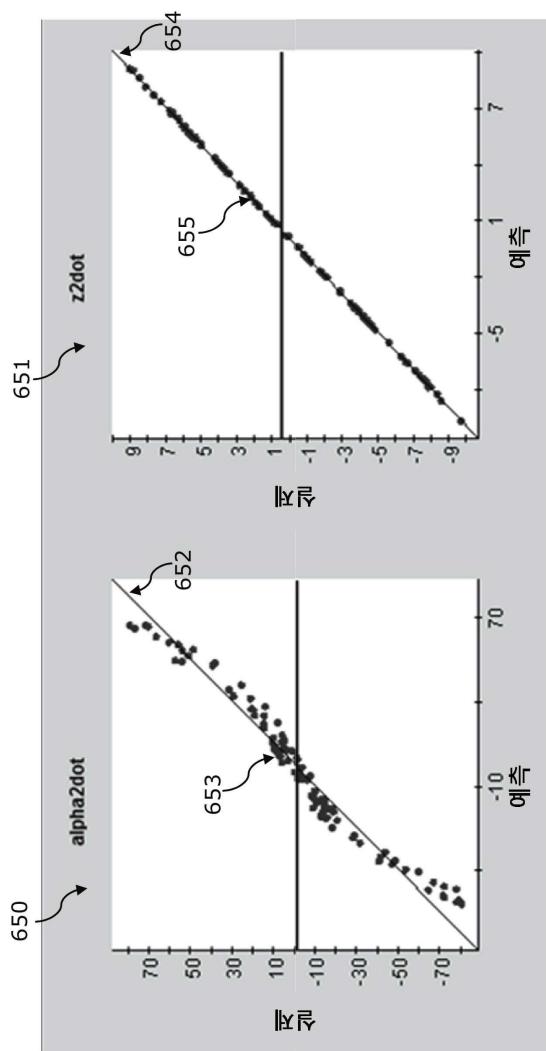
도면4



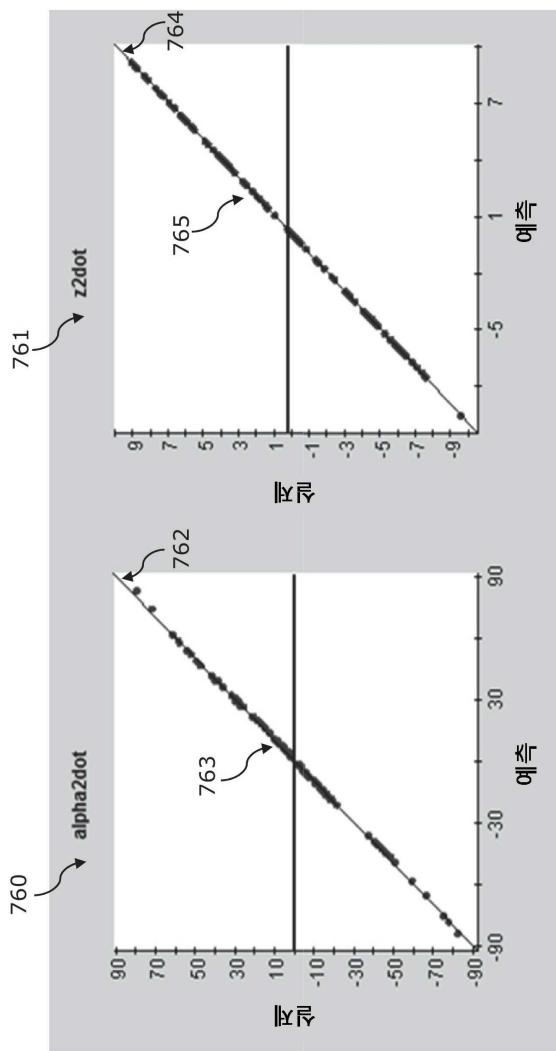
## 도면5



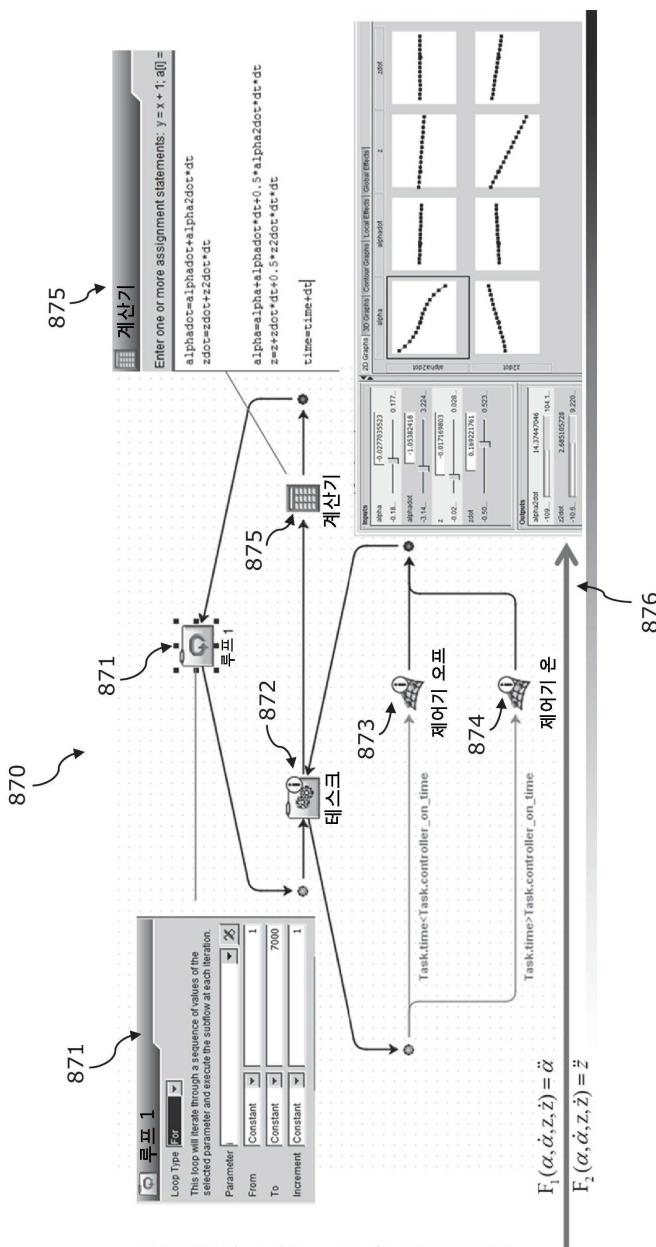
도면6



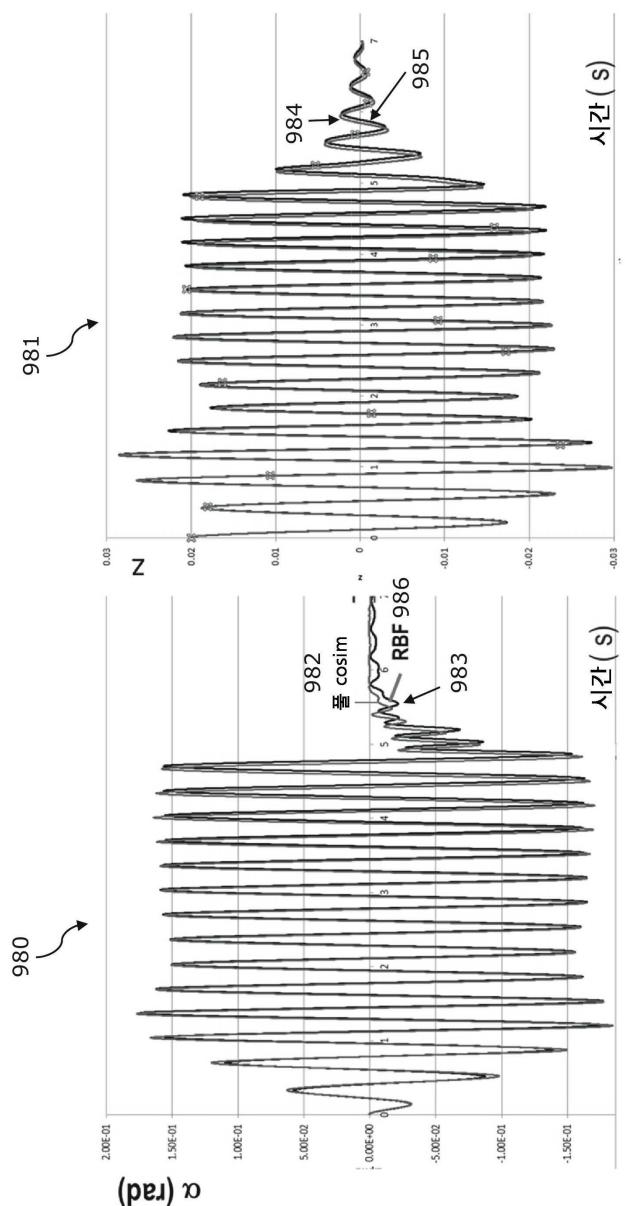
## 도면7



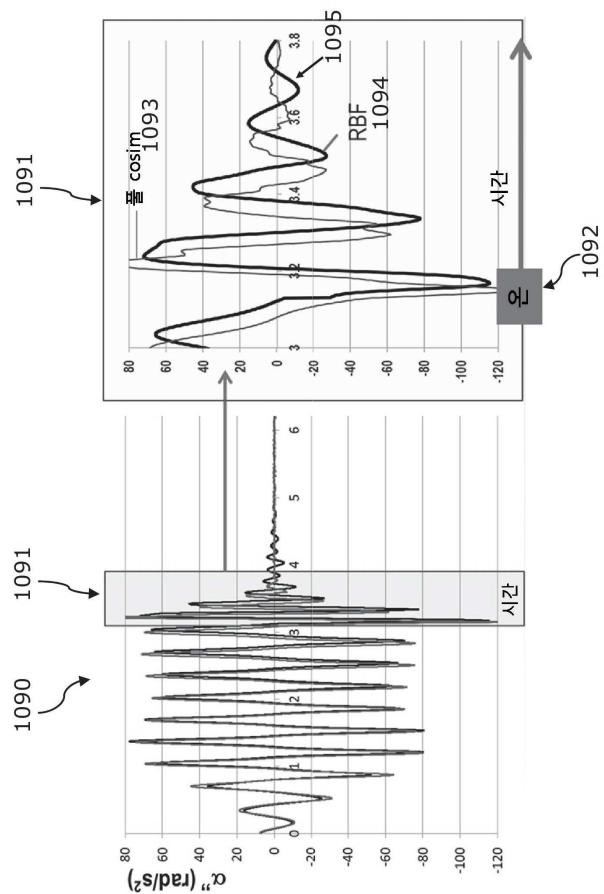
## 도면8



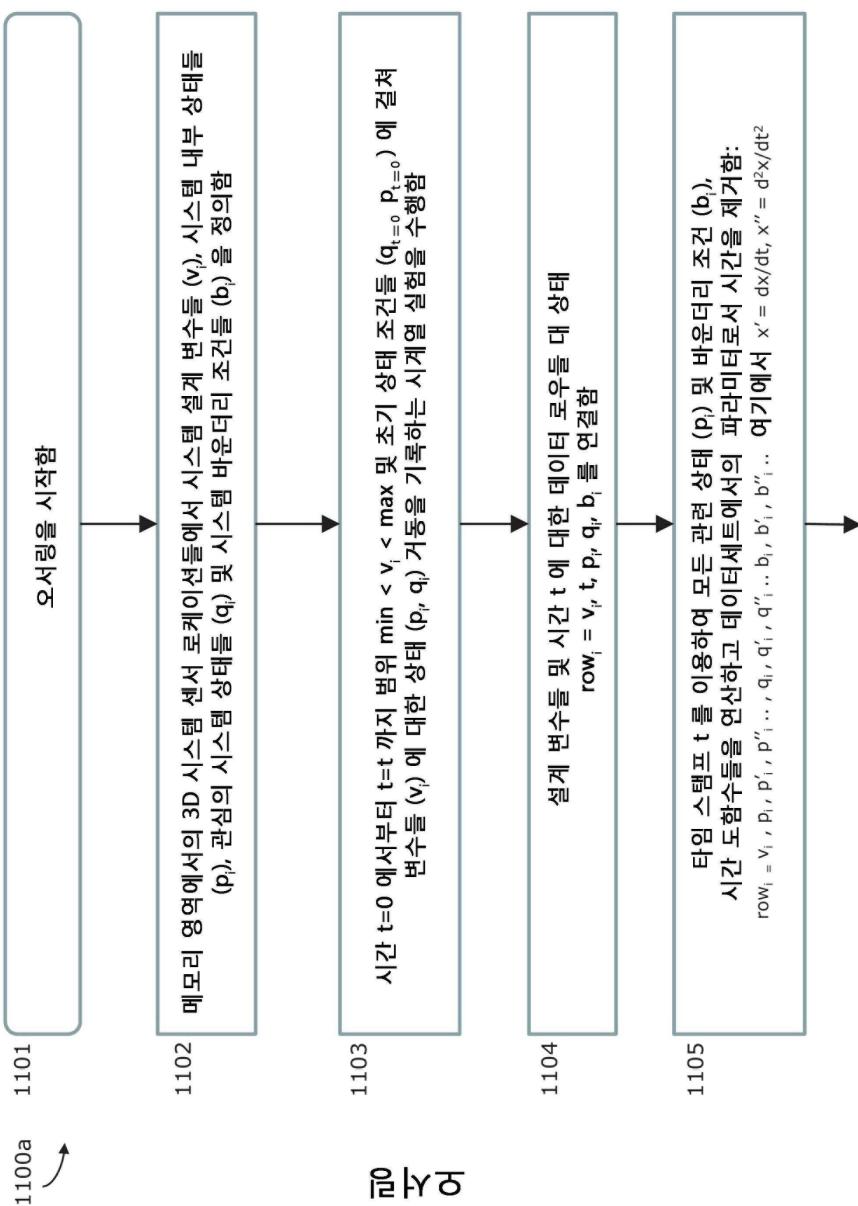
도면9



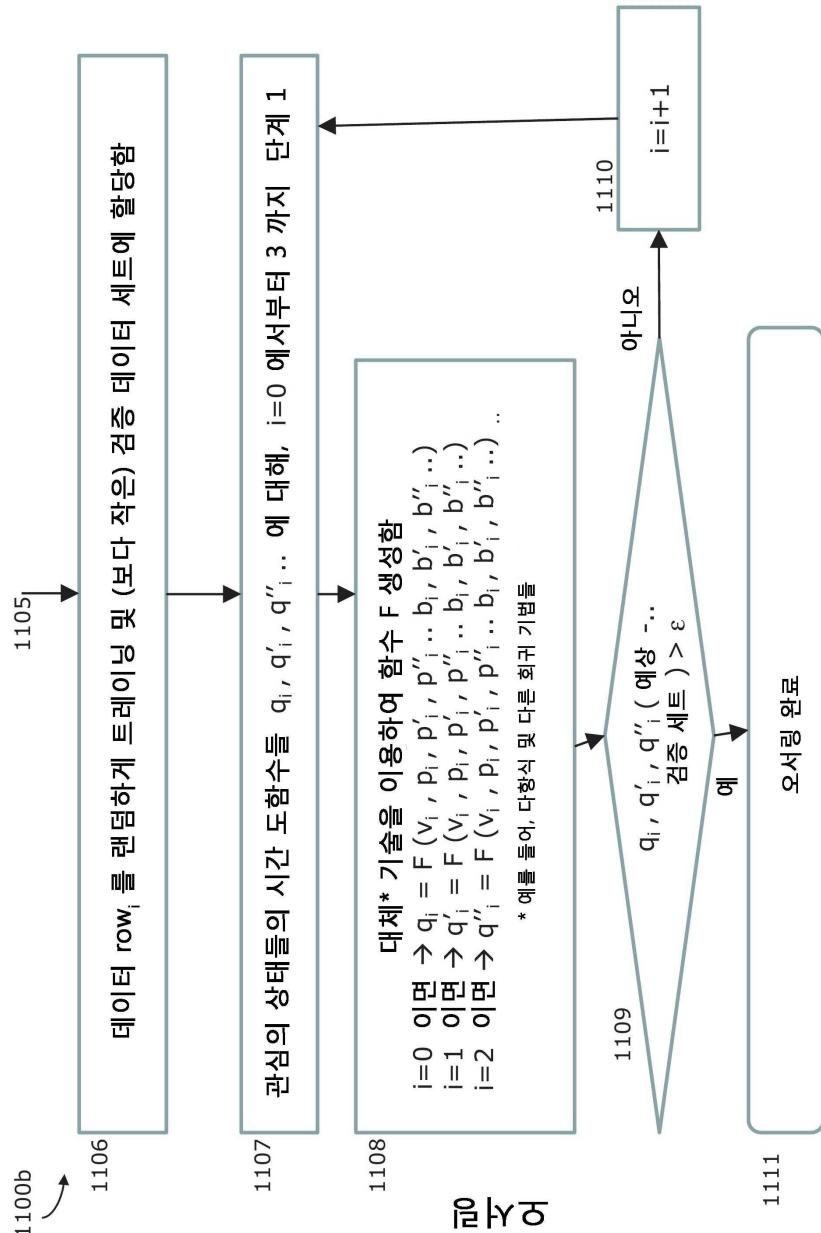
도면10



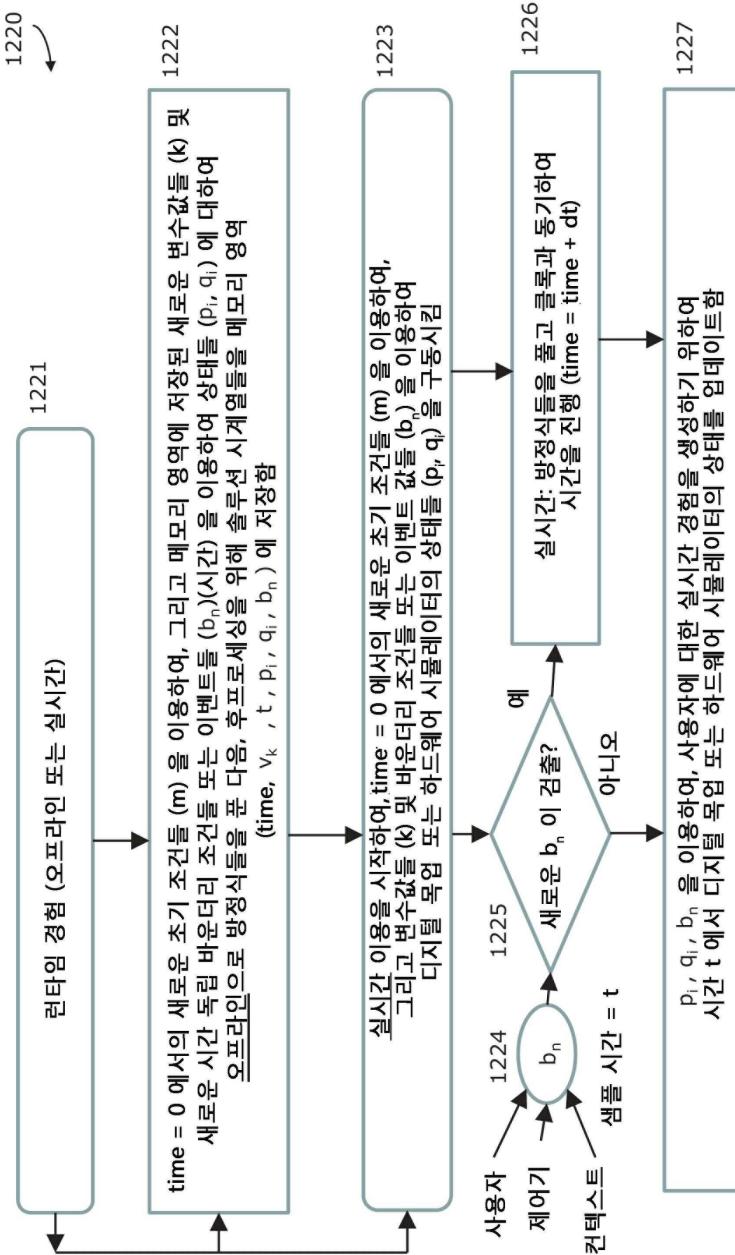
## 도면11a



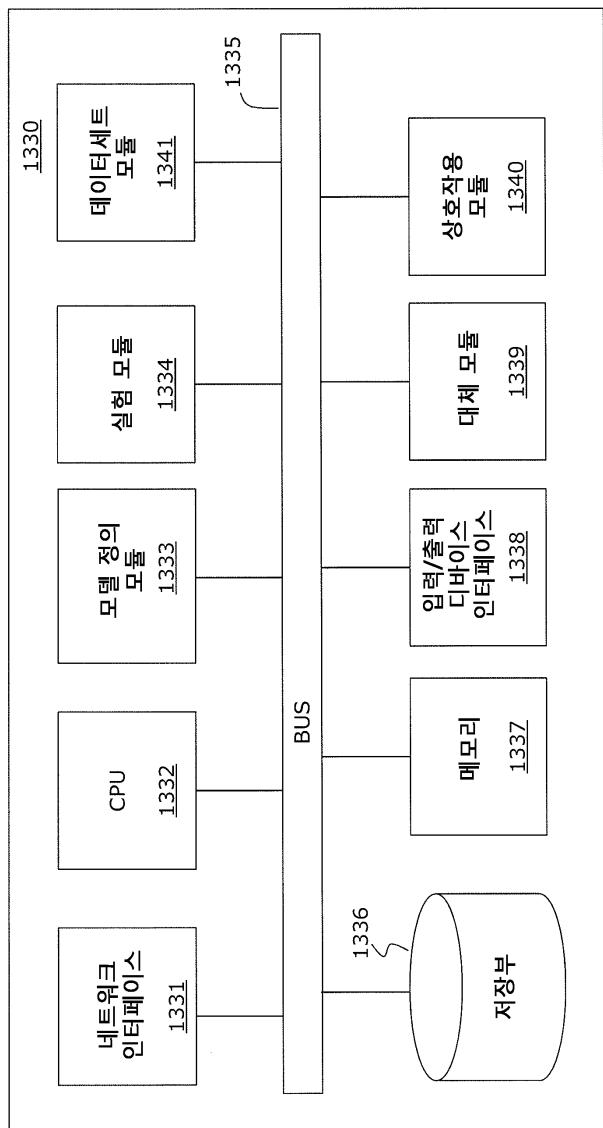
## 도면11b



## 도면12



## 도면13



도면14

