



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0160581
(43) 공개일자 2024년11월11일

- | | |
|--|---|
| <p>(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 <i>G06N 3/006</i> (2023.01) <i>G01S 17/00</i> (2020.01)
 <i>G01S 17/86</i> (2020.01) <i>G01S 17/89</i> (2020.01)
 <i>G01S 17/931</i> (2020.01) <i>G06T 19/00</i> (2011.01)</p> <p>(52) CPC특허분류
 <i>G06N 3/006</i> (2023.01)
 <i>G01S 17/006</i> (2013.01)</p> <p>(21) 출원번호 10-2024-7029955
 (22) 출원일자(국제) 2023년02월08일
 심사청구일자 없음
 (85) 번역문제출일자 2024년09월05일
 (86) 국제출원번호 PCT/CA2023/050165
 (87) 국제공개번호 WO 2023/150876
 국제공개일자 2023년08월17일
 (30) 우선권주장
 63/308,042 2022년02월08일 미국(US)</p> | <p>(71) 출원인
 와비 이노베이션 인코퍼레이티드
 캐나다 엠5티 2에스6 온타리오 토론토 배서스트 스트리트 440 4플로어</p> <p>(72) 발명자
 우르타순 라켈
 캐나다 엠5티 2에스6 온타리오 토론토 배서스트 스트리트 440 4플로어
 마니바사감 시바발란
 캐나다 엠5티 2에스6 온타리오 토론토 배서스트 스트리트 440 4플로어
 아이작 닐 클리포드
 캐나다 엠5티 2에스6 온타리오 토론토 배서스트 스트리트 440 4플로어</p> <p>(74) 대리인
 특허법인코리아나</p> |
|--|---|

전체 청구항 수 : 총 20 항

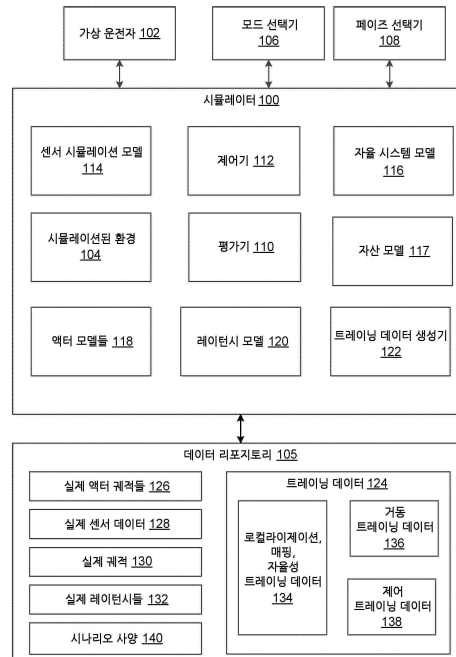
(54) 발명의 명칭 자율 시스템 트레이닝 및 테스트

(57) 요약

자율 시스템 트레이닝 및 테스트의 동작들은, 현실 세계 시나리오의 디지털 트윈을 시뮬레이션된 환경의 시뮬레이션된 환경 상태에서 생성하는 것을 포함할 수도 있다. 동작들은 또한 반복적으로, 다수의 시간 단계들을 통해: 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 센서 시뮬레이션 모델을 실행하여 시뮬레이션된 센서 출력을 획득하는 것,

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도2



시뮬레이션된 센서 출력에 기초하는 적어도 하나의 작동 액션을 자율 시스템의 가상 운전자로부터 획득하는 것, 적어도 하나의 작동 액션에 기초하여 자율 시스템의 자율 시스템 상태를 업데이트하는 것, 다수의 액터 모델들을 사용하여, 시뮬레이션된 환경 상태에 따라 시뮬레이션된 환경 내의 다수의 액터들을 모델링하여 다수의 액터 액션들을 획득하는 것, 및 액터 액션들 및 자율 시스템 상태에 따라 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것을 포함할 수도 있다. 동작들은 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트한 후에 가상 운전자를 평가하는 것을 더 포함할 수도 있다.

(52) CPC특허분류

G01S 17/86 (2020.01)

G01S 17/89 (2022.01)

G01S 17/931 (2020.01)

G06T 19/003 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

방법으로서,

현실 세계 시나리오의 디지털 트윈을 시뮬레이션된 환경의 시뮬레이션된 환경 상태로서 생성하는 단계;

반복적으로, 복수의 시간 단계들을 통해;

상기 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 센서 시뮬레이션 모델을 실행하여 시뮬레이션된 센서 출력을 획득하고,

자율 시스템의 가상 운전자로부터, 상기 시뮬레이션된 센서 출력에 기초하는 적어도 하나의 작동 액션을 획득하고,

상기 적어도 하나의 작동 액션에 기초하여 상기 자율 시스템의 자율 시스템 상태를 업데이트하고,

복수의 액터 모델들을 사용하여, 상기 시뮬레이션된 환경 상태에 따라 상기 시뮬레이션된 환경에서의 복수의 액터들을 모델링하여 복수의 액터 액션들을 획득하고, 그리고

상기 복수의 액터 액션들 및 상기 자율 시스템 상태에 따라 상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 단계; 및

상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트한 후 상기 가상 운전자를 평가하는 단계를 포함하는, 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 시뮬레이션된 센서 출력이 상기 현실 세계에서 상기 자율 시스템 상의 복수의 센서들로부터 상기 가상 운전자에 대한 입력의 포맷을 복제하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 시뮬레이션된 센서 출력은 LiDAR 센서 출력을 포함하는, 방법.

청구항 4

제 2 항에 있어서,

상기 자율 시스템의 카메라의 관점으로부터의 이미지를 생성하는 단계; 및

상기 이미지를 상기 가상 운전자에게 제시하는 단계

를 더 포함하는, 방법.

청구항 5

제 1 항에 있어서,

상기 현실 세계 시나리오로부터 혼합 현실 시나리오를 생성하기 위해 상기 복수의 액터들에 새로운 액터를 추가하는 단계; 및

상기 새로운 액터의 액터 모델을 사용하여, 상기 현실 세계 시나리오에서의 상기 새로운 액터의 거동을 모델링하는 단계

를 더 포함하며,

상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것은 상기 새로운 액터의 상기 거동을 고려하고, 상기 가상 운전

자는 상기 새로운 액터의 상기 거동에 반응하는, 방법.

청구항 6

제 1 항에 있어서,

상기 현실 세계 시나리오로부터 혼합 현실 시나리오를 생성하기 위해 상기 복수의 액터들 중 기존 액터의 거동을 수정하는 단계; 및

상기 기존 액터의 액터 모델을 사용하여, 상기 현실 세계 시나리오에서의 상기 기존 액터의 상기 거동을 모델링하는 단계

를 더 포함하며, 업데이트된 상기 자율 시스템 상태는 상기 기존 액터의 상기 거동을 고려하고,

상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것은 상기 기존 액터의 상기 거동을 고려하고, 상기 가상 운전자는 상기 기존 액터의 상기 거동에 반응하는, 방법.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 가상 운전자를 평가하는 것에 기초하여 상기 가상 운전자를 수정하도록 상기 가상 운전자를 트레이닝하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 가상 운전자를 평가하는 것에 기초하여 상기 복수의 액터들의 거동을 수정하는 것을 통해 상기 가상 운전자의 적대적 트레이닝을 수행하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 9

제 1 항에 있어서,

레이턴시 모델을 사용하여, 상기 현실 세계 시나리오에서 상기 자율 시스템 상에서 실행되는 상기 가상 운전자의 복수의 레이턴시들을 모델링하는 단계를 더 포함하는, 방법.

청구항 10

제 9 항에 있어서,

상기 복수의 레이턴시들은 상기 가상 운전자에 센서 출력을 송신하는 센서 레이턴시, 상기 자율 시스템 상에서 실행되는 상기 가상 운전자의 컴퓨터 하드웨어 레이턴시, 및 상기 적어도 하나의 작동 액션에 기초하여 상기 자율 시스템 상태를 업데이트하는 것의 자율 시스템 레이턴시를 포함하는, 방법.

청구항 11

시스템으로서,

자율 시스템의 가상 운전자; 및

시뮬레이터를 실행하는 컴퓨터 프로세서를 포함하며, 상기 시뮬레이터는 상기 컴퓨터 프로세서로 하여금:

현실 세계 시나리오의 디지털 트윈을 시뮬레이션된 환경의 시뮬레이션된 환경 상태로서 생성하는 것;

반복적으로, 복수의 시간 단계들을 통해:

상기 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 센서 시뮬레이션 모델을 실행하여 시뮬레이션된 센서 출력을 획득하고,

상기 자율 시스템의 상기 가상 운전자로부터, 상기 시뮬레이션된 센서 출력에 기초하는 적어도 하나의 작동 액션을 획득하고,

상기 적어도 하나의 작동 액션에 기초하여 상기 자율 시스템의 자율 시스템 상태를 업데이트하고,

복수의 액터 모델들을 사용하여, 상기 시뮬레이션된 환경 상태에 따라 상기 시뮬레이션된 환경에서의 복수의 액터들을 모델링하여 복수의 액터 액션들을 획득하고, 그리고

상기 복수의 액터 액션들 및 상기 자율 시스템 상태에 따라 상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것; 및

상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트한 후 상기 가상 운전자를 평가하는 것을 포함하는 동작들을 수행하게 하는, 시스템.

청구항 12

제 11 항에 있어서,

상기 동작들은:

상기 시뮬레이션된 센서 출력이 상기 현실 세계에서 상기 자율 시스템 상의 복수의 센서들로부터 상기 가상 운전자에 대한 입력의 포맷을 복제하는 것을 더 포함하는, 시스템.

청구항 13

제 11 항에 있어서,

상기 동작들은:

상기 현실 세계 시나리오로부터 혼합 현실 시나리오를 생성하기 위해 상기 복수의 액터들에 새로운 액터를 추가하는 것; 및

상기 새로운 액터의 액터 모델을 사용하여, 상기 현실 세계 시나리오에서의 상기 새로운 액터의 거동을 모델링하는 것

을 더 포함하며,

상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것은 상기 새로운 액터의 상기 거동을 고려하고, 상기 가상 운전자는 상기 새로운 액터의 상기 거동에 반응하는, 시스템.

청구항 14

제 11 항에 있어서,

상기 동작들은:

상기 현실 세계 시나리오로부터 혼합 현실 시나리오를 생성하기 위해 상기 복수의 액터들 중 기존 액터의 거동을 수정하는 것; 및

상기 기존 액터의 액터 모델을 사용하여, 상기 현실 세계 시나리오에서의 상기 기존 액터의 상기 거동을 모델링하는 것

을 더 포함하며, 업데이트된 상기 자율 시스템 상태는 상기 기존 액터의 상기 거동을 고려하고,

상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것은 상기 기존 액터의 상기 거동을 고려하고, 상기 가상 운전자는 상기 기존 액터의 상기 거동에 반응하는, 시스템.

청구항 15

제 11 항에 있어서,

상기 동작들은:

상기 가상 운전자를 평가하는 것에 기초하여 상기 가상 운전자를 수정하도록 상기 가상 운전자를 트레이닝하는 것을 더 포함하는, 시스템.

청구항 16

제 11 항에 있어서,

상기 동작들은:

상기 가상 운전자를 평가하는 것에 기초하여 상기 복수의 액터들의 거동을 수정하는 것을 통해 상기 가상 운전자의 적대적 트레이닝을 수행하는 것을 더 포함하는, 시스템.

청구항 17

제 11 항에 있어서,

상기 동작들은:

레이턴시 모델을 사용하여, 상기 현실 세계 시나리오에서 상기 자율 시스템 상에서 실행되는 상기 가상 운전자의 복수의 레이턴시들을 모델링하는 것을 더 포함하는, 시스템.

청구항 18

제 17 항에 있어서,

상기 복수의 레이턴시들은 상기 가상 운전자에 센서 출력을 송신하는 센서 레이턴시, 상기 자율 시스템 상에서 실행되는 상기 가상 운전자의 컴퓨터 하드웨어 레이턴시, 및 상기 적어도 하나의 작동 액션에 기초하여 상기 자율 시스템 상태를 업데이트하는 것의 자율 시스템 레이턴시를 포함하는, 시스템.

청구항 19

비일시적 컴퓨터 판독가능 매체로서,

컴퓨터 시스템으로 하여금:

현실 세계 시나리오의 디지털 트윈을 시뮬레이션된 환경의 시뮬레이션된 환경 상태로서 생성하는 것;

반복적으로, 복수의 시간 단계들을 통해:

상기 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 센서 시뮬레이션 모델을 실행하여 시뮬레이션된 센서 출력을 획득하고,

자율 시스템의 가상 운전자로부터, 상기 시뮬레이션된 센서 출력에 기초하는 적어도 하나의 작동 액션을 획득하고,

상기 적어도 하나의 작동 액션에 기초하여 상기 자율 시스템의 자율 시스템 상태를 업데이트하고,

복수의 액터 모델들을 사용하여, 상기 시뮬레이션된 환경 상태에 따라 상기 시뮬레이션된 환경에서의 복수의 액터들을 모델링하여 복수의 액터 액션들을 획득하고, 그리고

상기 복수의 액터 액션들 및 상기 자율 시스템 상태에 따라 상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것; 및

상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트한 후 상기 가상 운전자를 평가하는 것

을 포함하는 동작들을 수행하게 하기 위한 컴퓨터 판독가능 프로그램 코드를 포함하는, 비일시적 컴퓨터 판독가능 매체.

청구항 20

제 19 항에 있어서,

상기 동작들은:

상기 현실 세계 시나리오로부터 혼합 현실 시나리오를 생성하기 위해 상기 복수의 액터들에 새로운 액터를 추가하는 것; 및

상기 새로운 액터의 액터 모델을 사용하여, 상기 현실 세계 시나리오에서의 상기 새로운 액터의 거동을 모델링하는 것

을 더 포함하며,

상기 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것은 상기 새로운 액터의 상기 거동을 고려하고, 상기 가상 운전

자는 상기 새로운 액터의 상기 거동에 반응하는, 비밀시적 컴퓨터 관독가능 매체.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

관련 출원들에 대한 상호 참조

[0002]

본 출원은, 2022 년 2 월 8 일자 출원된 미국 특허 출원 일련 번호 제63/308,042호의 정규 출원이며, 이로써 그의 이익을 주장한다. 미국 특허 출원 일련 번호 제63/308,042호는 그 전체가 참조에 의해 본 명세서에 통합된다.

배경 기술

[0003]

자율 시스템(Autonomous system)은, 인간 조종사 또는 인간 운전자가 현실 세계 환경에서 움직이고 현실 세계 환경에 반응할 것을 요구하지 않는 운송 수단의 자율 주행(self-driving) 모드이다. 오히려, 자율 시스템은 자율 시스템의 의사 결정 부분인 가상 운전자(virtual driver)를 포함한다. 구체적으로, 가상 운전자는 자율 시스템의 작동(actuation)을 제어한다. 가상 운전자는 어떻게 현실 세계에서 상호작용할지를 학습하는 인공 지능 시스템이다. 인공 지능 시스템으로서, 가상 운전자가 트레이닝되고 테스트된다. 그러나, 가상 운전자는 현실 세계에서 운송 수단의 모드를 제어하기 때문에, 가상 운전자의 트레이닝 및 테스트는 다른 인공 지능 시스템들보다 더 엄격해야 한다.

발명의 내용

과제의 해결 수단

[0004]

일반적인 일 양태에서, 방법은 현실 세계 시나리오의 디지털 트윈(digital twin)을 시뮬레이션된 환경의 시뮬레이션된 환경 상태로서 생성하는 단계를 포함할 수도 있다. 방법은 또한 반복적으로, 다수의 시간 단계(timestep)들을 통해: 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 센서 시뮬레이션 모델을 실행하여 시뮬레이션된 센서 출력을 획득하고, 자율 시스템의 가상 운전자로부터 시뮬레이션된 센서 출력에 기초하는 적어도 하나의 작동 액션을 획득하고, 적어도 하나의 작동 액션에 기초하여 자율 시스템의 자율 시스템 상태를 업데이트하고, 시뮬레이션된 환경 상태에 따라 시뮬레이션된 환경에서의 다수의 액터(actor)들을, 다수의 액터 모델들을 사용하여, 모델링하여 액터 액션들을 획득하고, 그리고 다수의 액터 액션들 및 자율 시스템 상태에 따라 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 단계를 포함할 수도 있다. 방법은 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트한 후 가상 운전자를 평가하는 단계를 더 포함할 수도 있다.

[0005]

일반적인 일 양태에서, 시스템은 자율 시스템의 가상 운전자, 및 컴퓨터 프로세서로 하여금 동작들을 수행하게 하는 시뮬레이터를 실행하는 컴퓨터 프로세서를 포함할 수도 있다. 동작들은, 현실 세계 시나리오의 디지털 트윈을 시뮬레이션된 환경의 시뮬레이션된 환경 상태로서 생성하는 것을 포함할 수도 있다. 동작들은 또한 반복적으로, 다수의 시간 단계들을 통해: 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 센서 시뮬레이션 모델을 실행하여 시뮬레이션된 센서 출력을 획득하고, 자율 시스템의 가상 운전자로부터 시뮬레이션된 센서 출력에 기초하는 적어도 하나의 작동 액션을 획득하고, 적어도 하나의 작동 액션에 기초하여 자율 시스템의 자율 시스템 상태를 업데이트하고, 시뮬레이션된 환경 상태에 따라 시뮬레이션된 환경에서의 다수의 액터들을, 다수의 액터 모델들을 사용하여, 모델링하여 액터 액션들을 획득하고, 그리고 다수의 액터 액션들 및 자율 시스템 상태에 따라 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것을 포함할 수도 있다. 동작들은, 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트한 후 가상 운전자를 평가하는 것을 더 포함할 수도 있다.

[0006]

일반적인 일 양태에서, 비밀시적 컴퓨터 관독가능 매체는 동작들을 수행하기 위한 컴퓨터 관독가능 프로그램 코드를 포함할 수도 있다. 동작들은, 현실 세계 시나리오의 디지털 트윈을 시뮬레이션된 환경의 시뮬레이션된 환경 상태로서 생성하는 것을 포함할 수도 있다. 동작들은 또한 반복적으로, 다수의 시간 단계들을 통해: 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 센서 시뮬레이션 모델을 실행하여 시뮬레이션된 센서 출력을 획득하고, 자율 시스템의 가상 운전자로부터 시뮬레이션된 센서 출력에 기초하는 적어도 하나의 작동 액션을 획득하고, 적어도 하나의 작동 액션에 기초하여 자율 시스템의 자율 시스템 상태를 업데이트하고, 시뮬레이션된 환경 상태에 따라 시뮬레이션된 환경에서의 다수의 액터들을, 다수의 액터 모델들을 사용하여, 모델링하여 액터 액션들을 획득하고, 그리고 다수의 액터 액션들 및 자율 시스템 상태에 따라 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트하는 것을 포함

할 수도 있다. 동작들은, 시뮬레이션된 환경 상태를 업데이트한 후 가상 운전자를 평가하는 것을 더 포함할 수도 있다.

[0007] 본 발명의 다른 양태들은 다음의 설명 및 첨부된 청구항들로부터 명백해질 것이다.

도면의 간단한 설명

[0008] 도 1은 하나 이상의 실시예들에 따른 시스템의 도면을 도시한다.

도 2는 하나 이상의 실시예들에 따른 시스템의 보다 상세한 도면을 도시한다.

도 3, 도 4, 도 5, 도 6, 도 7, 도 8 및 도 9는 하나 이상의 실시예들에 따른 흐름도들을 도시한다.

도 10은 하나 이상의 실시예들에 따른 플로우차트를 도시한다.

도 11은 하나 이상의 실시예들에 따른 시뮬레이터의 예를 도시한다.

도 12a 및 도 12b는 하나 이상의 실시예들에 따른 예들을 도시한다.

도 13은 하나 이상의 실시예들에 따른 다양한 시뮬레이션 시나리오들의 예를 도시한다.

도 14a, 도 14b 및 도 14c는 하나 이상의 실시예들에 따른 트레이닝의 예를 도시한다.

도 15a, 도 15b 및 도 15c는 시뮬레이터가 현실 세계로부터의 액터 거동(actor behavior)을 수정함으로써 혼합 현실 시뮬레이션을 수행하는 예를 도시한다.

도 16a 및 도 16b는 본 발명의 하나 이상의 실시예들에 따른 컴퓨팅 시스템을 도시한다.

다양한 도면들에서의 같은 요소들은 일관성을 위해 같은 참조 번호들로 표기된다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0009] 일반적으로, 실시예들은 자율 시스템들의 트레이닝 및 테스트에 관한 것이다. 자율 시스템은, 인간 조종사 또는 인간 운전자가 현실 세계 환경에 대해 이동하고 반응할 것을 요구하지 않는 운송 수단의 자율 주행 모드이다. 오히려, 자율 시스템은 자율 시스템의 의사 결정 부분인 가상 운전자를 포함한다. 가상 운전자는 어떻게 현실 세계에서 상호작용할지를 학습하는 인공 지능 시스템이다. 자율 시스템은 완전히 자율적이거나 반자율적일 수도 있다. 운송 수단의 모드로서, 자율 시스템은 현실 세계 환경을 통해 이동하도록 구성된 하위징에 포함된다. 자율 시스템들의 예들은 자율 주행 차량들(예컨대, 자율 주행 트럭들 및 승용차들), 드론들, 비행기들, 로봇들 등을 포함한다. 가상 운전자는, 의사 결정하고 그리고 자율 시스템으로 하여금 이동, 시그널링, 정지 또는 현재 상태를 유지하는 것을 포함하여 현실 세계와 상호작용하게 하는 소프트웨어이다.

[0010] 현실 세계 환경은 자율 시스템이, 트레이닝될 때, 이동하도록 설계된 현실 세계의 부분이다. 따라서, 현실 세계 환경은 자율 시스템이 출발지로부터 목적지로 이동할 때 콘크리트 및 토지, 사람, 동물, 다른 자율 시스템, 및 인간 주행(human driven) 시스템, 구조물, 및 다른 객체들과의 상호작용들을 포함할 수도 있다. 현실 세계 환경과 상호작용하기 위해, 자율 시스템은 현실 세계 환경의 측정치들을 획득하기 위해 사용되는, 다른 타입들 중에서 LiDAR 센서들과 같은, 다양한 타입들의 센서들 및 현실 세계 환경으로부터 이미지들을 캡처하는 카메라들을 포함한다.

[0011] 현실 세계 환경에서 자율 시스템들의 가상 운전자의 테스트 및 트레이닝은, 트레이닝되지 않은 가상 운전자가 야기할 수 있는 사고들 때문에 안전하지 않다. 또한, 오직 현실 세계 로깅된 데이터만을 사용하여 가상 운전자를 트레이닝하는 것은 발생할 수도 있는 드문 이벤트들을 캡처하지 않는다.

[0012] 가상 운전자를 테스트 및 트레이닝하기 위해, 실시예들은 다양한 시나리오들을 모델링하는 시뮬레이터를 포함한다. 시뮬레이터에 의한 모델링은, 시뮬레이션된 환경에서의 자율 시스템 상호작용 및 시뮬레이션된 환경에서의 다른 액터들의 반응을 포함한다. 따라서, 시뮬레이터는 현실 세계 환경의 로깅된 데이터를 단순히 리플레이(replay)하지 않는다. 또한, 시뮬레이터는 추가로, 자율 시스템에 기초하여 시나리오들을 구축함으로써 자율 시스템의 결정(decision)들에 적응한다.

[0013] 이제 도면들로 넘어가면, 도 1에 도시된 바와 같이, 시뮬레이터(100)는 자율 시스템(102)의 가상 운전자를 트레이닝 및 테스트하도록 구성된다. 예를 들어, 시뮬레이터는 자율 시스템들을 위한 통합(unified) 모듈러 혼합 현실 폐쇄 루프(closed-loop) 시뮬레이터일 수도 있다. 시뮬레이터(100)는, 별도의 상이한 자율성

(autonomy) 컴포넌트들의 평가뿐만 아니라, 폐쇄 루프 방식에서 완전한 시스템으로서 가능하게 하는 구성가능한 시뮬레이션 프레임워크이다. 시뮬레이터는 자동으로 현실 세계 시나리오의 "디지털 트윈"을 재구성(reconstruct)하여, 규모에 맞게(at scale) 가상 운전자의 정확한 평가를 가능하게 한다. 시뮬레이터(100)는 또한, 가상 운전자의 성능에 대한 통찰력을 제공하도록 다양하고 사실적인 평가 변형들을 생성하기 위해 현실 세계 데이터와 시뮬레이션된 데이터를 결합하는 혼합 현실 시뮬레이션을 수행하도록 구성될 수도 있다. 혼합 현실 폐쇄 루프 시뮬레이션은 시뮬레이터(100)가 현실 세계에서 발생하지 않은 반사실적인 "만약(what-if)" 시나리오들에 대한 가상 운전자의 액션을 분석하도록 허용한다. 시뮬레이터(100)는, 자율성의 자동적이고 스케일링가능한(scalable) 향상을 가능하게 하기 위해 전체 자율 시스템 및 폐쇄 루프 트레이닝에 대하여 드물지만 안전 필수(safety-critical) 시나리오들을 시뮬레이션하고 트레이닝하는 기능성을 더 포함한다.

[0014] 시뮬레이터(100)는 시뮬레이션된 환경(104)을 생성한다. 시뮬레이션된 환경(104)은, 자율 시스템이 이동하도록 설계되는, 실제 존재하거나 존재하지 않을 수도 있는, 현실 세계 환경의 시뮬레이션이다. 이와 같이, 시뮬레이션된 환경(104)은 자연 객체들, 구조물, 건물들 및 도로들, 장애물들, 뿐만 아니라 다른 자율 및 비자율 객체들을 포함하는 현실 세계에서의 객체들(즉, 시뮬레이션된 객체들) 및 배경의 시뮬레이션을 포함한다. 시뮬레이션된 환경은 자율 시스템이 배치될 수도 있는 환경 조건들을 시뮬레이션한다. 추가적으로, 시뮬레이션된 환경(104)은 자율 시스템들에 대한 입력들에 영향을 미칠 수도 있는 다양한 날씨 조건들을 시뮬레이션하도록 구성될 수도 있다. 시뮬레이션된 객체들은 정지(stationary) 및 비정지 객체들 양자 모두를 포함할 수도 있다. 비정지 객체들은 현실 세계 환경에서 액터들이다.

[0015] 시뮬레이터(100)는 또한 평가기(110)를 포함한다. 평가기는, 시뮬레이션된 환경에서 다양한 시나리오들을 생성함으로써 가상 운전자(102)를 트레이닝 및 테스트하도록 구성된다. 각각의 시나리오는 정적 부분들, 시뮬레이션된 객체들의 움직임, 시뮬레이션된 객체들의 서로와의 액션들 및 자율 시스템 및 시뮬레이션된 객체들에 의해 취해진 액션들에 대한 반응들을 포함하는, 그러나 이에 제한되지 않는, 시뮬레이션된 환경의 구성이다. 평가기(110)는 추가로, 다양한 메트릭들(metrics)을 사용하여 가상 운전자의 성능을 평가하도록 구성된다.

[0016] 하나 이상의 실시예들에서, 평가기(110)는 자율 시스템(102)의 가상 운전자에 대해 적대적(adversarial)이다. 가상 운전자(102)가 다양한 시나리오에서 어떻게 주행하는지를 관찰함으로써, 평가기(110)는 가상 운전자(102)가 평가 메트릭들을 실패할 수도 있었던 경우를 학습한 후, 평가기가 학습한 것에 기초하여 어려운 시나리오들을 생성한다. 그런 다음, 그 시나리오들은 가상 운전자를 테스트 및/또는 트레이닝하는 데 사용될 수 있다. 트레이닝 동안, 평가기(110)는 메트릭 정보를 가상 운전자(102)로 전송하고, 가상 운전자는 이 정보를 사용하여 가상 운전자의 파라미터들을 업데이트하고 시나리오를 더 잘 처리한다. 시뮬레이션된 환경에서 동작하는 가상 운전자를 평가기(110)가 더 많이 평가할수록, 평가기는 가상 운전자의 결점들이나 어려움들 또는 실패들을 더 잘 찾는다. 따라서, 평가기(110)의 목표는 자율 시스템(102)의 가상 운전자가 차선적으로(sub-optimally) 수행할 수도 있는 시나리오들을 식별한 후 그 시나리오들을 위해 트레이닝 및 테스트하는 것이다.

[0017] 전술한 바와 같이, 평가기(110)는 시나리오의 수행에 걸쳐 가상 운전자의 성능을 평가한다. 성능을 평가하는 것은 규칙들을 적용하는 것을 포함할 수도 있다. 예를 들어, 규칙들은 자동화 시스템이 임의의 다른 액터와 충돌하지 않는 것, 안전 및 편의 표준들의 준수(예를 들어, 승객들이 차량 내에서 특정 가속력 초과를 경험하지 않는 것), 자동화 시스템이 실행된 궤적으로부터 벗어나지 않는 것, 또는 다른 규칙일 수도 있다. 각각의 규칙은, 규칙을 어기는 정도를 대응하는 스코어와 관련시키는 메트릭 정보와 연관될 수도 있다. 평가기(110)는, 데이터 드리븐(data-driven) 뉴럴 네트워크가 좋은 주행 거동과 나쁜 주행 거동 사이를 구별하도록 학습함에 따라 구현될 수도 있다. 평가 시스템의 다양한 메트릭들은, 자동화 시스템이 특정 시나리오를 위한 성공 기준의 요건들을 충족시키는지 여부를 결정하기 위해 활용될 수도 있다. 또한, 시스템 레벨 성능에 더하여, 모듈러 기반 가상 운전자들에 대해, 평가기는 또한 시뮬레이터에서 기록된 실제값(ground truth)에 관하여 장면 내의 액터들에 대한 예측 성능 또는 세그먼테이션(segmentation)과 같은 개별적인 모듈들을 평가할 수도 있다.

[0018] 도 2는 하나 이상의 실시예들에 따른 시스템의 보다 상세한 도면을 도시한다. 도 2에 도시된 바와 같이, 시스템은 데이터 리포지토리(repository)(105)에 연결된 시뮬레이터(100)를 포함한다. 시뮬레이터는, 페이즈(phase) 선택기(108)에 의해 선택된 바와 같은 다수의 페이즈들 및 모드 선택기(106)에 의해 선택된 바와 같은 모드들에서 동작하도록 구성된다. 페이즈 선택기(108) 및 모드 선택기(106)는, 페이즈 및 모드의 선택을 각각 수신하도록 구성된 그래픽 사용자 인터페이스 또는 애플리케이션 프로그래밍 인터페이스 컴포넌트일 수도 있다. 선택된 페이즈 및 모드는 시뮬레이터(100)의 구성을 정의한다. 즉, 선택된 페이즈 및 모드는 어떤

시스템 컴포넌트들이 통신하는지 및 시스템 컴포넌트들의 동작들을 정의한다.

- [0019] 페이지는 페이지 선택기(108)를 사용하여 선택될 수도 있다. 페이지(108)는 트레이닝 페이지 또는 테스트 페이지일 수도 있다. 트레이닝 페이지에서, 평가기(110)는 메트릭 정보를 가상 운전자(102)에 제공하며, 이는 메트릭 정보를 사용하여 가상 운전자(102)를 업데이트한다. 평가기(110)는 추가로, 가상 운전자를 위한 시나리오들을 생성함으로써 가상 운전자(102)를 추가로 트레이닝하기 위해 메트릭 정보를 사용할 수도 있다. 테스트 페이지에서, 평가기(110)는 메트릭 정보를 가상 운전자에 제공하지 않는다. 테스트 페이지에서, 평가기(110)는 가상 운전자를 평가하기 위해 그리고 가상 운전자(102)를 위한 시나리오들을 개발하기 위해 메트릭 정보를 사용한다.
- [0020] 모드는 모드 선택기(106)에 의해 선택될 수도 있다. 모드는, 현실 세계 데이터가 사용되는 정도, 시뮬레이션된 데이터에 노이즈(noise)가 주입되는지 여부, 현실 세계 데이터의 섭동(perturbations)의 정도, 및 시나리오들이 적대적일도록 설계되는지 여부를 정의한다. 예시적인 모드들은 개방 루프 시뮬레이션 모드, 폐쇄 루프 시뮬레이션 모드, 단일 모듈 폐쇄 루프 시뮬레이션 모드, 퍼지(fuzzy) 모드, 적대적 모드, 및 퍼지 모드를 포함한다. 개방 루프 시뮬레이션 모드에서, 가상 운전자는 현실 세계 데이터로 평가된다. 단일 모듈 폐쇄 루프 시뮬레이션 모드에서, 가상 운전자의 단일 모듈이 테스트된다. 단일 모듈 폐쇄 루프 시뮬레이션 모드의 예는, 시나리오가 시뮬레이션에서 진행됨에 따라 로컬라이저(localizer) 추정된 포즈가 시간이 지남에 따라 어떻게 드리프트하는지를 시뮬레이터가 평가하는 로컬라이저 폐쇄 루프 시뮬레이션 모드이다. 트레이닝 데이터 시뮬레이션 모드에서, 트레이닝 데이터를 생성하기 위해 시뮬레이터가 사용된다. 폐쇄 루프 평가 모드에서, 가상 운전자 및 시뮬레이션 시스템은 시스템 성능을 평가하기 위해 함께 실행된다. 적대적 모드에서, 액터들은 적대적 행위를 수행하도록 수정된다. 퍼지 모드에서, 노이즈가 (예컨대, 신호 프로세싱 노이즈 및 다른 타입들의 노이즈를 복제(replicate)하기 위해) 시나리오에 주입된다. 시스템의 범위로부터 벗어나지 않고 다른 모드들이 존재할 수도 있다.
- [0021] 또한, 도 2에 도시된 바와 같이, 시뮬레이터(100)는 선택된 모드 및 페이지에 따라 시뮬레이터(100)의 다양한 컴포넌트들을 구성하는 기능성을 포함하는 제어기(112)를 포함한다. 즉, 제어기(112)는 시뮬레이터(100)의 구성 파라미터들에 기초하여 시뮬레이터의 컴포넌트들 각각의 구성을 수정할 수도 있다. 도 1을 참조하여 기술한 바와 같이, 시뮬레이터(100)는 평가기(110) 및 시뮬레이션된 환경(104)을 포함한다. 시뮬레이터(100)의 다양한 컴포넌트들은 또한, 자율 시스템 모델(116), 센서 시뮬레이션 모델들(114), 자산(asset) 모델들(117), 액터 모델들(118), 레이턴시 모델들(120), 트레이닝 데이터 생성기(122), 시뮬레이션된 환경(104)을 포함할 수도 있다. 이들 컴포넌트들 각각이 아래에 설명된다.
- [0022] 자율 시스템 모델(116)은 가상 운전자가 실행할 자율 시스템의 상세한 모델이다. 자율 시스템 모델(116)은 모델, 지오메트리, 물리적 파라미터들(예를 들어, 질량 분포, 유의성 지점들(points of significance)), 엔진 파라미터들, 센서 위치들 및 타입, 센서들의 발화(firing) 패턴, 가상 운전자가 실행하는 하드웨어에 대한 정보(예를 들어, 프로세서 전력, 메모리의 양, 및 다른 하드웨어 정보), 및 자율 시스템에 대한 다른 정보를 포함한다. 자율 시스템 모델의 다양한 파라미터들은 사용자 또는 다른 시스템에 의해 구성가능할 수도 있다.
- [0023] 예를 들어, 자율 시스템이 자동차(motor vehicle)인 경우, 모델링 및 역학(dynamics)은 차량의 타입(예를 들어, 승용차, 트럭), 제조사 및 모델(make and model), 지오메트리, 물리적 파라미터들, 이를테면 질량 분포, 차축(axle) 포지션, 엔진의 타입 및 성능 등을 포함할 수도 있다. 차량 모델은 또한, 차량 상의 센서들(예를 들어, 카메라, LiDAR 등), 센서들의 상대적 발화 동기화 패턴, 및 센서들의 교정(calibrate)된 외인성(extrinsic)들(예를 들어, 포지션 및 배향) 및 내인(intrinsic)들(예를 들어, 초점 길이)에 대한 정보를 포함할 수도 있다. 차량 모델은 또한, 온보드 컴퓨터 하드웨어, 센서 드라이버들, 제어기들, 및 테스트 하의 자율성 소프트웨어 툴리스를 정의한다.
- [0024] 차량 역학 시뮬레이션은 가상 운전자의 작동 액션들(예를 들어, 스티어링(steering) 각도, 원하는 가속)을 취하고 시뮬레이션된 환경에서 자율 시스템 상에서 작동 액션들을 작용되게 하여 시뮬레이션된 환경 및 자율 시스템의 상태를 업데이트한다. 상태를 업데이트하기 위해, 운동학적 모션 모델이 사용될 수도 있거나, 또는 차량에 가해지는 힘의 설명이 되는 역학 모션 모델이 사용되어 상태가 결정될 수도 있다. 시뮬레이터 내에서, 각각의 시간 단계에서 실제값 작동들 및 차량 상태들을 갖는 실제 로그 시나리오들에 대한 액세스로, 실시예들은 또한 가상 운전자 출력들이 주어지면 자율 시스템의 새로운 상태를 추론하는 뉴럴 네트워크의 파라미터들을 학습하거나 분석적 차량 모델 파라미터들을 최적화할 수도 있다.
- [0025] 하나 이상의 실시예들에서, 센서 시뮬레이션 모델들(114)은, 시뮬레이션된 환경에서, 능동 및 수동 센서 입력들

을 모델링한다. 수동 센서 입력들은, 시물레이션된 환경 내의 카메라(들)의 시물레이션된 포지션에 기초하여 하나 이상의 카메라들의 관점으로부터 정지 및 비정지 시물레이션된 객체들을 포함하는 시물레이션된 환경의 시각적 외관(appearance)을 캡처한다. 수동 센서 입력들의 예는 관성 측정 유닛(IMU)을 포함하고 열적 능동 센서 입력들은 LiDAR, RADAR, GPS(global positioning system), 초음파 등과 같은 능동 센서들로부터의 자율 시스템의 가상 운전자에 대한 입력들이다. 즉, 능동 센서 입력들은 센서들에 의해 취해진 측정치들을 포함하고, 상기 측정치들은 시물레이션된 환경 내의 센서(들)의 시물레이션된 포지션에 기초하여 시물레이션된 환경에 기초하여 시물레이션된다. 예로서, 능동 센서 측정치들은 시간에 걸쳐 그리고 자율 시스템의 이동과 관련하여 시물레이션된 환경에 대해 LiDAR 센서가 만들 측정치들일 수도 있다.

[0026]

센서 시물레이션 모델들(114)은, 차량 플랫폼 상의 센서 구성에 따라 각각의 시간 단계에서 시물레이션된 환경(104)에서의 주변 장면의 센서 관측치들을 시물레이션하도록 구성된다. 시물레이션된 환경이, 수정 없이, 현실 세계 환경을 직접적으로 표현(represent)할 때, 센서 출력은 가상 운전자에 직접적으로 피드(feed)될 수도 있다. 광 기반 센서들의 경우, 센서 모델은 센서 데이터를 생성하기 위해 장면 내의 객체들과 상호작용하는 광선(ray)들로서 광을 시물레이션한다. (예를 들어, 정지 및 비정지 객체들의) 자산 표현에 의존하여, 실시예들은 텍스처링된 메시(mesh)들을 갖는 자산들을 위한 그래픽 기반 렌더링, 뉴럴 렌더링, 또는 다수의 렌더링 방식들의 조합을 사용할 수도 있다. 다수의 렌더링 방식들을 활용하는 것은 향상된 사실주의로 맞춤형(customizable) 세계 구축을 가능하게 한다. 자산들은 3D로 구성되고 렌더 커맨드들의 표준 인터페이스를 지원하기 때문에, 최종 센서 데이터를 생성하기 위해 상이한 자산 표현들이 심리스(seamless) 방식으로 구성될 수도 있다. 추가적으로, 현실 세계에서 발생한 것을 리플레이하고 현실 세계에서와 동일한 자율 시스템을 사용하는 시나리오들의 경우, 원래의 센서 관측치들이 각각의 시간 단계에서 리플레이될 수도 있다.

[0027]

자산 모델들(117)은 다수의 모델들을 포함하며, 각 모델은 현실 세계에서 특정 타입의 개별적인 자산들을 모델링한다. 자산들은 구조물 장벽들 또는 교통 표지판들, 주차된 차들, 및 배경(예컨대, 초목 또는 하늘)과 같은 무생물 객체들을 포함할 수도 있다. 시나리오 내의 엔티티들 각각은 개별적인 자산에 대응할 수도 있다. 이와 같이, 자산 모델, 또는 자산 모델의 타입의 인스턴스가, 시나리오에서의 엔티티들 또는 자산들 각각에 대해 존재할 수도 있다. 자산들은 3차원 시물레이션된 환경을 형성하기 위해 함께 구성될 수 있다. 자산 모델은 시물레이터가 자산을 시물레이션하는 데 필요한 모든 정보를 제공한다. 자산 모델은 시물레이션된 환경에서 자산을 표현하고 시물레이션하기 위해 시물레이터에 의해 사용된 정보를 제공한다. 예를 들어, 자산 모델은 지오메트리 및 경계 볼륨(bounding volume), 다양한 관심 파장들(예를 들어, 카메라를 위한 가시광선, LiDAR를 위한 적외선, RADAR를 위한 마이크로파)에서의 광과의 자산의 상호작용, 변형(deformation)(예를 들어, 리깅(rigging)) 또는 조명 변화들(예를 들어, 방향지시등들)을 설명하는 애니메이션 정보, 상이한 표면들에 대한 마찰과 같은 재료 정보, 및 자산의 시맨틱 클래스 및 관심 키 포인트들과 같은 메타데이터를 포함할 수도 있다. 자산의 특정 컴포넌트들은 상이한 인스턴스화(instantiation)들을 가질 수도 있다. 예를 들어, 렌더링 엔진들과 유사하게, 자산 지오메트리는 메시, 복셀(voxel)들, 포인트 클라우드들, 분석적 부호화 거리 함수(signed-distance function), 또는 뉴럴 네트워크와 같이, 많은 방식으로 정의될 수도 있다. 자산 모델들은 아티스트들에 의해 생성되거나, 또는 현실 세계 센서 데이터로부터 재구성되거나, 또는 적대적이라도 알고리즘에 의해 최적화될 수도 있다.

[0028]

자산 모델들(117)의 세트와 밀접하게 관련되고, 가능하게는 그의 일부로 간주되는 것은 액터 모델들(118)이다. 액터 모델은 시나리오에서 액터를 표현한다. 액터는 독립적인 의사 결정 프로세스를 갖는 시각적 존재(sentient being)이다. 즉, 현실 세계에서, 액터는 환경에 기초하여 의사 결정하는 생명이 있는 존재(예컨대, 사람 또는 동물)일 수도 있다. 액터는 수동적 움직임보다는 또는 수동적 움직임에 더하여 능동적 움직임을 한다. 액터 모델, 또는 액터 모델의 인스턴스는 시나리오에서 각각의 액터에 대해 존재할 수도 있다. 액터 모델은 액터의 모델이다. 액터가 운송 수단의 모드에 있으면, 액터 모델은 액터가 위치한 운송 수단의 모델을 포함한다. 예를 들어, 액터 모델들은 보행자, 어린이들, 운전자들에 의해 수행되는 차량들, 애완동물들, 자전거들, 및 다른 타입들의 액터들을 표현할 수도 있다.

[0029]

액터 모델은 장면 내의 모든 액터들 및 각각의 시간 단계에서의 그들의 액션들을 제어하기 위해 시나리오 사양 및 자산들을 활용한다. 액터의 거동은 자율 시스템을 중심으로 주위의 관심 영역에서 모델링된다. 시나리오 사양에 의존하여, 액터 시물레이션은 원하는 거동을 달성하기 위해 시물레이션에서 액터들을 제어할 것이다. 액터들은 다양한 방식으로 제어될 수 있다. 하나의 옵션은, 리드(lead) 액터로부터 특정 상대 거리 또는 충돌 시간(time-to-collision; TTC)을 유지하려고 시도하는 지능형 운전자 모델(IDM) 또는 휴리스틱 유래(heuristic-derived) 차선변경 액터 모델들과 같은 휴리스틱 액터 모델들을 활용하는 것이다. 다른 옵션은

직접적으로 실제 로그로부터 액터 궤적들을 리플레이하는 것, 또는 데이터 드리븐 트래픽 모델로 액터(들)를 제어하는 것이다. 구성가능한 설계를 통해, 실시예들은 상이한 거동 모델들에 의해 제어될 액터들의 상이한 서브세트들을 믹스 매치(mix and match)할 수도 있다. 예를 들어, 멀리 떨어진 액터들은 초기에 자율 시스템과 상호작용하지 않을 수도 있고 실제 로그 궤적을 따를 수 있지만, 자율 시스템의 근처 가까이일 때 데이터 드리븐 액터 모델로 스위칭할 수도 있다. 다른 예에서, 액터들은 실제-로그에서의 하이-레벨 루트를 여전히 준수하는 휴리스틱 또는 데이터 드리븐 액터 모델에 의해 제어될 수도 있다. 이 혼합 현실 시뮬레이션은 제어 및 사실주의를 제공한다.

[0030] 또한, 액터 모델들은 협력적 또는 적대적 모델에 있도록 구성될 수도 있다. 협력적 모드에서, 액터 모델은 시뮬레이션된 환경의 상태에 응답하여 합리적으로(rationally) 작용(act)할 액터들을 모델링한다. 적대적 모드에서, 액터 모델은 난폭 운전 및 불량 주행을 보이는 것과 같이 비합리적으로 작용하는 액터를 모델링할 수 있다.

[0031] 레이턴시 모델(120)은 자율 시스템이 현실 세계 환경에 있을 때 발생하는 타이밍 레이턴시를 표현한다. 타이밍 레이턴시의 여러 소스들이 존재할 수도 있다. 예를 들어, 이벤트가 발생한 시간부터 센서들이 그 이벤트로부터 센서 정보를 검출하고 센서 정보를 가상 운전자에 전송하는 것까지 레이턴시가 존재할 수도 있다. 가상 운전자의 컴퓨팅 하드웨어와 비교하여 시뮬레이션된 환경에서 가상 운전자를 실행하는 컴퓨팅 하드웨어 사이의 차이에 기초하여 다른 레이턴시가 존재할 수도 있다. 또한, 가상 운전자가 작동 신호를 자율 시스템에 송신하는 시간 사이에 작동 신호에 기초하여 (예를 들어, 방향 또는 속력을) 변경하는 다른 타이밍 레이턴시가 존재할 수도 있다. 레이턴시 모델(120)은 타이밍 레이턴시의 다양한 소스들을 모델링한다.

[0032] 달리 말하면, 현실 세계에서, 현실 세계에서의 안전 필수 결정들은 몇 분의 1초 만에 응답 시간에 영향을 미치는 것을 수반할 수도 있다. 자율 시스템의 현실 세계 거동의 복제를 보장하기 위해, 시뮬레이션 시스템의 중요한 부분은 온보드 시스템의 상이한 컴포넌트들의 정확한 타이밍들 및 레이턴시를 시뮬레이션하는 것이다. 이를 수행하기 위한 하나의 옵션은, 현실 세계(즉, HIL(hardware-in-the-loop)) 시뮬레이션에서와 정확히 동일한 온보드 컴퓨터 하드웨어 상에서 자율 시스템을 실행하는 것이다. 그러나, 동일한 온보드 컴퓨터를 사용하는 것은 규모에 맞게 시뮬레이션을 실행하기에 불가능하고 비용이 많이 들 수도 있다. 정확한 하드웨어에 대한 엄격한 요건 없이 스케일링가능한 평가를 가능하게 하기 위해, 센서 모듈들 및 자율성의 상이한 컴포넌트들의 레이턴시들 및 타이밍들은 상이한 컴퓨터 하드웨어 상에서 실행되는 동안 모델링된다. 레이턴시 모델은, 이전에 수집된 현실 세계 데이터로부터 기록된 리플레이 레이턴시들일 수도 있거나 HIL 시뮬레이션 셋업과 매치되기 위해 각각의 시간 단계에서 레이턴시들을 추론하는 데이터 드리븐 뉴럴 네트워크를 가질 수도 있다.

[0033] 트레이닝 데이터 생성기(122)는 트레이닝 데이터(124)(후술됨)를 생성하도록 구성된다. 예를 들어, 트레이닝 데이터 생성기(122)는 현실 세계 시나리오들을 수정하여 새로운 시나리오들을 생성할 수도 있다. 현실 세계 시나리오들의 수정은 혼합 현실이라고 지칭된다. 예를 들어, 혼합 현실 시뮬레이션은 신규 거동들을 갖는 새로운 액터들을 추가하는 것, 현실 세계로부터의 액터들 중 하나 이상의 액터들의 거동을 변경하는 것, 및 그 영역의 센서 데이터를 수정하는 한편 센서 데이터의 나머지를 원래 로그와 동일하게 유지하는 것을 수반할 수도 있다. 일부 경우들에서, 트레이닝 데이터 생성기(122)는 양성(benign) 시나리오를 안전 필수 시나리오로 변환한다.

[0034] 시뮬레이터는 데이터 리포지토리(105)에 연결된다. 데이터 리포지토리(105)는 데이터를 저장하도록 구성된 임의의 타입의 스토리지 유닛 또는 디바이스이다. 데이터 리포지토리(105)는 현실 세계로부터 수집된 데이터를 포함한다. 예를 들어, 현실 세계로부터 수집된 데이터는 실제 액터 궤적들(126), 실제 센서 데이터(128), 현실 세계를 캡처하는 시스템의 실제 궤적(130), 및 실제 레이턴시들(132)을 포함한다. 실제 액터 궤적들(126), 실제 센서 데이터(128), 현실 세계를 캡처하는 시스템의 실제 궤적(130), 및 실제 레이턴시들(132) 각각은 (예컨대, 현실 세계 로그에서) 현실 세계로부터의 하나 이상의 센서들에 의해 캡처되거나 이들로부터 직접적으로 계산된 데이터이다. 다시 말해서, 현실 세계로부터 수집된 데이터는 실제로 일어난 실제 이벤트들이다. 예를 들어, 자율 시스템이 차량인 경우에서, 현실 세계 데이터는 센서 장비로 현실 세계에서 주행하는 차량에 의해 캡처될 수도 있다.

[0035] 데이터 리포지토리(105)는 또한 트레이닝 데이터(124)를 저장하는 기능성을 포함한다. 트레이닝 데이터(124)는 시나리오가 현실 세계에서 발생한다면 현실 세계 데이터를 복제하는 데이터이다. 따라서, 트레이닝 데이터(124)는 현실 세계 이벤트들을 시뮬레이션하기 위해 사용되는, 생성된 데이터이다. 트레이닝 데이터

(124)는 로컬라이제이션(localization), 매핑, 및 자율성 트레이닝 데이터(134), 액터들의 거동을 시뮬레이션하는 거동 트레이닝 데이터(136), 및 자율 시스템의 제어들을 시뮬레이션하는 제어 트레이닝 데이터(138)를 포함한다.

[0036] 또한, 데이터 리포지토리(105)는 하나 이상의 시나리오 사양들(140)을 저장하는 기능성을 포함한다. 시나리오 사양(140)은 자율 시스템을 테스트하거나 트레이닝하기 위한 시나리오 및 평가 설정을 특정한다. 예를 들어, 시나리오 사양(140)은 자율 시스템의 현재 상태(예를 들어, 전체 6D 포즈, 속도 및 가속도), 도로 레이아웃을 특정하는 맵 정보, 및 시나리오에서의 모든 동적 액터들 및 객체들의 초기 상태를 특정하는 장면 레이아웃과 같은, 장면의 초기 상태를 기술할 수도 있다. 시나리오 사양은 또한, 액터 모델들에 대한 입력들인 시나리오에서의 동적 액터들이 시간에 따라 어떻게 진화해야 하는지를 기술하는 동적 액터 정보를 포함할 수도 있다. 동적 액터 정보는 액터들을 위한 경로 정보, 원하는 거동들 또는 공격성을 포함할 수도 있다. 시나리오 사양(140)은 사용자에게 의해 특정되거나, 도메인-특정-언어(domain-specification-language; DSL)를 사용하여 프로그램적으로 생성되거나, 데이터 드리븐 알고리즘으로부터 휴리스틱으로 절차적으로 생성되거나, 또는 적대적일 수도 있다. 시나리오 사양(140)은 또한, 특정 현실 세계 맵 상에서 발생하는 것 또는 원래의 위치들 및 궤적들에 의해 정의된 액터들의 서브셋을 갖는 것과 같은, 현실 세계 로그로부터 수집된 데이터에 대해 컨디셔닝될 수 있다.

[0037] 가상 운전자와 시뮬레이터 사이의 인터페이스들은 가상 운전자와 현실 세계의 자율 시스템 사이의 인터페이스들에 매치된다. 예를 들어, 센서 시뮬레이션 모델(114) 및 가상 운전자는 현실 세계의 센서들과 상호작용하는 가상 운전자와 매치된다. 가상 운전자는 자율 시스템 상에서 실행되는 실제 자율성 소프트웨어이다. 센서 시뮬레이션 모델(114)에 의해 출력되는 시뮬레이션된 센서 데이터는 가상 운전자가 현실 세계에 있는 것처럼 가상 운전자가 입력으로서 취하는 정확한 메시지 포맷이거나 그로 변환될 수도 있고, 그 후 가상 운전자는 순차적으로 실행되는 컴포넌트들에 대해 통합된 시뮬레이션된 레이턴시들을 갖는 블랙 박스 가상 운전자로서 실행될 수 있다. 그 다음, 가상 운전자는 실제 자율 시스템 상의 하위 레벨 제어기와 인터페이스하기 위해 사용하는 것과 정확히 동일한 제어 표현을 출력한다. 그 후, 자율 시스템 모델(116)은 시뮬레이션된 환경에서 자율 시스템의 상태를 업데이트할 것이다. 따라서, 시뮬레이터(100)의 다양한 시뮬레이션 모델들은 현실 세계 설정과 매치되도록 그들 고유의 주파수들에서 비동기적으로 병렬로 실행된다.

[0038] 도 1 및 도 2가 컴포넌트들의 구성들을 도시하고 있지만, 본 발명의 범위를 벗어나지 않고 다른 구성들이 사용될 수도 있다. 예를 들어, 다양한 컴포넌트들은 단일 컴포넌트를 생성하도록 결합될 수도 있다. 다른 예로서, 단일 컴포넌트에 의해 수행되는 기능성은 둘 이상의 컴포넌트들에 의해 수행될 수도 있다.

[0039] 도 3 내지 도 9는 하나 이상의 실시예들에 따른 시뮬레이터의 상이한 모드들의 예를 도시한다. 도 3 내지 도 9에 도시된 다양한 컴포넌트들은 도 1 및 도 2의 컴포넌트들을 사용하여 수행될 수도 있다. 도 3은 시뮬레이터에 의해 수행될 수도 있는 개방 루프 평가의 예를 도시한다. 개방 루프 평가는 "로그-리플레이"이며, 여기서 현실 세계에서 동일한 자율 시스템 플랫폼에 의해 수집된 이전에 기록된 로그(예를 들어, 실제 센서 데이터(304), 자율 시스템의 실제 궤적(306), 및 실제 액터 궤적들(308)을 가짐)가 동일한 정확한 메시지들 및 타이밍들로, 그러나 거동의 변화를 평가하기 위해 상이한 가상 운전자(310)로 시뮬레이션에서 플레이백(play back)된다. 도 2의 모델들(즉, 액터 시뮬레이션, 센서 시뮬레이션, 레이턴시 모델, 차량 모델) 각각은 각각의 메시지들을 시뮬레이션에서 리플레이할 수 있고 평가기(302)는 각각의 시간 단계에서 자율성의 출력들을 모니터링할 수 있다. 도 3에 도시된 바와 같이, 가상 운전자는 시뮬레이터와 상호작용하지 않거나 그의 출력들에 대해 작용하지 않는다. 오히려, 가상 운전자는 리플레이된 입력들이 주어지면 출력들을 단순히 생성한다.

[0040] 도 4는 시뮬레이터가 퍼즈 테스트(fuzz testing) 모드(400)를 수행하는 개방 루프 평가의 예를 도시한다. 다시 말해서, 퍼지 모듈들(402, 404, 406, 및 408)은 실제 센서 데이터(410), 자율 시스템의 실제 궤적(412), 및 실제 액터 궤적들(414), 및 실제 레이턴시들(416)에 섭동들을 더한다. 시뮬레이터는 또한 이러한 설정에서 혼합 현실을 수행하고, 현실 세계 입력 메시지들이 사실적인 노이즈로 섭동되는, "퍼즈 테스트"를 수행할 수 있다. 따라서, 가상 운전자(418)가 노이즈에 얼마나 잘 반응하는지를 결정하도록 가상 운전자(418)의 성능의 변화들이 평가기(420)에 의해 분석될 수 있다. 예를 들어, 시뮬레이터는 센서 메시지들을 드롭하는 것, 픽셀 컬러들 또는 LiDAR 포인트 클라우드들을 수정하는 것, 또는 모듈들 사이의 레이턴시들을 증가시키는 것과 같이 상이한 모듈들 내에 노이즈를 주입하고, 자율성이 그러한 섭동들에 대해 강건(robust)한지 여부를 검증할 수 있다.

- [0041] 도 5는 폐쇄 루프 평가 모드(500)의 예를 도시한다. 개방 루프 평가는 현실 세계를 리플레이하지만, 자율 시스템 또는 장면 내 다른 액터들이 현실 세계 궤적들로부터 벗어나도록 허용하지 않는다. 폐쇄 루프 평가 모드는, 상이한 플랫폼 상에서, 액터가 상이하게 수행된 경우, 또는 전혀 알지 못하는 시나리오/맵/액터 거동에 대해 가상 운전자가 어떻게 수행할 지와 같은 만약(what if)의 시나리오들을 다룬다. 구체적으로, 폐쇄 루프 평가 모드(500)에서, 시뮬레이션된 환경 상태는 가상 운전자가 위치되는 3차원 가상 환경이다. 센서 시뮬레이션 모델은 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 실행되어 자율 시스템 상의 시뮬레이션된 환경에 위치한 센서들에 의해 검출될 사실적인 센서 입력들을 생성한다. 즉, 센서 시뮬레이션 모델은 입력으로서, 시뮬레이션된 환경 상태를 취하고 가상 운전자에 대한 센서 입력들을 구성한다. 레이턴시 모델은, 어떻게 가상 운전자가 현실 세계에서 센서 데이터를 수신하고 프로세싱하는 지를 반영하도록 센서 입력들의 타이밍에 레이턴시를 더한다. 가상 운전자는 자율 시스템을 제어하기 위한 작동 액션들을 출력한다. 작동 액션들은, 시뮬레이션된 환경에서의 자율 시스템의 포지셔닝을 작동 액션들에 기초하여 수정하는 자율 시스템 모델로 전달된다. 예를 들어, 자율 시스템 모델은 시뮬레이션된 환경에서 속력, 제동, 선회 또는 다른 액션의 증가를 반영할 수도 있다. 액터 모델들(504)은 또한 시뮬레이션된 환경 상태 및 업데이트된 시뮬레이션된 환경 상태에 따라 업데이트한다. 즉, 액터 모델들은 가상 운전자의 액션들에 반응한다. 그 후 평가기는 가상 운전자의 액션들을 평가할 수 있다.
- [0042] 도시된 바와 같이, 폐쇄 루프 평가 모드에서, 가상 운전자(502) 및 액터 모델들(504)은 현재 장면이 주어진 각각의 시간 단계에서 그들의 거동을 업데이트하고, 장면을 반영하는 새로운 센서 관측치들이 시뮬레이션된다. 폐쇄 루프 평가에서, 시뮬레이션된 환경 상태는 가상 운전자 및 액터 모델들에 의한 양자 모두의 결정들에 기초하여 업데이트된다. 그 결과는, 로컬라이제이션 및 센서 인지(perception)를 포함한, 자율 시스템의 다양한 컴포넌트들이 테스트하고 있으므로 더 사실적인 시스템 성능 테스트이다. 이에 따라, 인지 프로세싱의 변화, 새롭게 추가된 센서 구성, 또는 계산 플랫폼 변화가 평가기(506)에 의해 정의된 바와 같이 전반적인 시스템 성능을 향상시키는지 여부가 평가될 수도 있다.
- [0043] 도 6은 모듈 레벨 평가 모드(600)의 예를 도시한다. 모듈 레벨 평가 모드는 별도의 가상 운전자의 단일 모듈을 테스트하는 데 사용될 수도 있다. 예를 들어, 단일 모듈은 로컬라이제이션 모듈, 모션 계획, 또는 제어기 모듈일 수도 있다. 하나 이상의 실시예들은 시뮬레이터를, 가상 운전자의 특정 부분들만을 테스트하기 위해 특정 컴포넌트들을 인에이블하고 특정 컴포넌트들을 디스에이블하도록 구성할 수도 있다. 예를 들어, 센서 시뮬레이션은 오직 로컬라이저 성능을 테스트하고 드리프트를 측정하기 위해서만 각각의 시간 단계에서 실행될 수 있거나, 또는 사실적인 인지 및 예측 출력들이 오직 모션 계획기(planner)를 테스트하기 위해서만 모델링될 수 있다. 이들 평가들은 다른 시뮬레이션 모듈들을 위해 특정된 구성에 의존하여 개방 루프 또는 폐쇄 루프 설정 어느 하나에서 수행될 수 있다.
- [0044] 도 6은 개방 루프 시스템에서 로컬라이제이션 시스템만을 평가하는 예를 도시한다. 도시된 바와 같이, 가상 운전자의 로컬라이저 모듈은 레이턴시 모델로부터 레이턴시와 함께 센서 시뮬레이션 모델 출력을 수신한다. 로컬라이저의 출력은, 평가를 수행하는 평가기에 전달된다. 별개로, 현실 세계를 표현할 수도 있거나 그렇지 않을 수도 있는 미리 정의된 커스텀 궤적이, 업데이트된 시뮬레이션된 환경 상태를 결정하기 위한 입력으로서 사용된다. 액터 모델들은 로컬라이저에 의해 영향을 받지 않는 업데이트된 시뮬레이션된 환경 상태, 및 시뮬레이션된 환경 상태에 기초하여 실행된다.
- [0045] 도 7은 트레이닝 데이터 생성 모드(700)의 예를 도시한다. 렌더링 시스템들은, 트레이닝 데이터 생성의 일부로서 인지 모델들을 트레이닝하기 위해 센서 데이터를 오프라인을 시뮬레이션하는 데 사용될 수도 있다. 시뮬레이터에서, 자산들은 아티스트 유래 CAD 모델들에 더하여 현실 세계 데이터로부터 구축될 수 있기 때문에, 자산들은 더 많은 시나리오 변형들을 테스트하기 위해 훨씬 더 많은 다양성을 갖는다. 추가적으로, 맞춤형 물리 및 뉴럴 렌더링 접근법은 보다 사실적인 시뮬레이션된 센서 데이터를 가능하게 한다. 인지에 대한 트레이닝 데이터를 생성하는 것과 함께, 시뮬레이터는 또한 시뮬레이션 또는 자율 모듈들 중 임의의 것에 대한, 그리고 심지어는 오프라인 교정, 매핑, 및 자동 라벨링 모델들에 대한 트레이닝 데이터를 생성할 수 있다. 트레이닝 데이터 생성은 자율성과 시뮬레이션의 모든 컴포넌트들의 개발 시간 및 비용 효율을 향상시킨다.
- [0046] 도 8은 적대적 모드(800)에서 수행하는 것의 예를 도시한다. 시뮬레이터는 도 5를 참조하여 기술한 바와 같이 시뮬레이션 사양에 의해 정의된 시나리오를 실행할 수 있다. 평가기는 다양한 메트릭들에 대하여 가상 운전자의 성능을 평가한다. 평가기의 출력은 하나 이상의 적대적 액터들(802)로 전달된다. 예를 들어, 도 8에서, 적대적 액터는 자율 주행 차량(SDV)의 동작을 방해하기 위해 적대적 모델을 구성하는 피드백을 수신한다. 구체적으로, 평가기의 출력은 가상 운전자의 메트릭 정보를 수행하는 가장 낮은 것과 매치된다.

예를 들어, 가상 운전자가 충돌을 일으킴에 의해 양호하게 수행하지 못한 경우, 적대적 액터는 가상 운전자 앞에서 끼어드는 차일 수도 있다. 적대적 액터들을 사용함으로써, 가상 운전자가 어려움을 가질 수도 있는 안전 필수 시나리오들 상에서 가상 운전자를 식별 및 실행하도록 시뮬레이션이 수행된다. 따라서, 하나 이상의 실시예들은 현실 세계 시나리오들이 광범위하게 분포되어 있고 드문 이벤트들의 롱테일(long tail)들이 있는 현실 세계에서 가상 운전자를 사용하는 문제들을 해결한다. 더욱이, 중단간(end-to-end) 폐쇄 루프 테스트는 새로운 능력을 언락(unlock)하여 대신에 가상 운전자에 대한 도전적인 시나리오들을 자동으로 탐색하며 찾고, 또한 현실 세계 분포를 커버하는 가장 중요한 시나리오들 상에 있는 가상 운전자를 트레이닝 또는 평가한다.

[0047] 예를 들어, 최적화 가능한 파라미터들 x (예를 들어, 액터 배치, 액터 거동 또는 경로, 날씨 조건들 등)를 갖는 시뮬레이션 사양이 주어지면, 시뮬레이터는 블랙 박스 함수 g 로서 작용하고 가상 운전자 출력은 입력 센서 데이터의 함수 f 로서 기동한다. 평가기 ε 는 시뮬레이션된 환경에서 가상 운전자의 성능을 평가하는 스코어를 생성한다. 가상 운전자에 대해 어려운 "적대적" 시나리오들을 위한 탐색은 다음 식(식 1)을 사용하여 찾을 수도 있다:

$$\arg \max_x \mathcal{E}(g(x, f)), \quad \text{s.t.} \quad \mathcal{R}(g(x, f)) \quad \text{식 1}$$

[0049] 식 1에서, $\mathcal{R}$ 은 x 의 상이한 샘플들이 시나리오들의 실현가능한 세트에 놓이도록 보장하기 위해 제약들을 설정한다. 베이저안(Bayesian) 최적화 또는 기울기 추정(gradient estimation) 방법론들과 같은, 적대적 시나리오들을 식별하기 위해 상이한 최적화 모듈들이 활용될 수도 있다.

[0050] 도 9는 폐쇄 루프 트레이닝 모드(900)의 예를 도시한다. 적대적 시나리오 식별과 유사하게, 평가기는 시뮬레이터 그 자체 내에서 가상 운전자의 성능을 향상시키고 그로부터 학습하기 위해 피드백을 가상 운전자에 직접적으로 제공하는 데 사용될 수 있다. 시뮬레이터는 현실 세계 밀집 트래픽 도메인들을 포함하는 임의의 트래픽 시나리오에 대해 폐쇄 루프 트레이닝을 사용한다. 폐쇄 루프 트레이닝은 가상 운전자 및 그의 다양한 컴포넌트들이 주행 성능의 최종 목적을 위해 자동으로 최적화되는 것을 보장할 수 있다.

[0051] 머신 러닝 프로세스를 통해 전체적인 시스템은 실패의 원인들을 인식하고, 자율 시스템은 미래에 그러한 실패를 어떻게 회피할 지를 학습한다. 유사하게, 평가기는 가상 운전자가 최적으로 수행되지 않았을 수도 있는 영역들에 대한 피드백을 제공할 수도 있다.

[0052] 도 10은 폐쇄 루프 모드에서 시뮬레이터를 실행하기 위한 흐름도를 도시한다. 블록 1002에서, 현실 세계 시나리오의 디지털 트윈이 시뮬레이션된 환경 상태로서 생성된다. 현실 세계로부터의 로그 데이터는 초기 가상 세계를 생성하는 데 사용된다. 로그 데이터는 어떤 자산 및 액터 모델들이 사용되는지 및 자산들의 초기 포지셔닝을 정의한다. 예를 들어, 로그 데이터에 대해 컨볼루션 뉴럴 네트워크들을 사용하여, 현실 세계 내의 다양한 자산 타입들이 식별될 수도 있다. 다른 예들로서, 로그 데이터의 오프라인 인지 시스템들 및 인간 주석들이 자산 타입들을 식별하는 데 사용될 수도 있다. 이에 따라, 대응하는 자산 및 액터 모드들은 자산 타입들에 기초하여 식별되고 현실 세계에서의 실제 액터들 및 자산들의 포지션들에 추가될 수도 있다. 따라서, 자산 및 액터 모델들은 초기 3차원 가상 세계를 생성하기 위한 것이다.

[0053] 블록 1003에서, 센서 시뮬레이션 모델이 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 실행되어 시뮬레이션된 센서 출력을 획득한다. 센서 시뮬레이션 모델은 자율 시스템의 센서들에 뷰를 복제하기 위해 빔포밍 및 다른 기법들을 사용할 수도 있다. 자율 시스템의 각각의 센서는 대응하는 센서 시뮬레이션 모델 및 대응하는 시스템을 갖는다. 센서 시뮬레이션 모델은 가상 환경 내의 센서의 포지션에 기초하여 실행되고 시뮬레이션된 센서 출력을 생성한다. 시뮬레이션된 센서 출력은 가상 운전자에 의해 실제 센서로부터 수신되었을 것과 동일한 형태이다.

[0054] 시뮬레이션된 센서 출력은 가상 운전자로 전달된다. 블록 1005에서, 가상 운전자는 시뮬레이션된 센서 출력에 기초하여 실행되어 작동 액션들이 생성된다. 작동 액션들은 어떻게 가상 운전자가 자율 시스템을 제어하는 지를 정의한다. 예를 들어, SDV의 경우, 작동 액션들은 가속의 양, 스티어링의 움직임, 방향지시등의 트리거링 등일 수도 있다. 작동 액션들로부터, 시뮬레이션된 환경에서의 자율 시스템 상태가 블록 1007에서 업데이트된다. 작동 액션들은, 자율 시스템의 실제 액션들을 결정하기 위해 자율 시스템 모델의 입력으로서 사용된다. 예를 들어, 자율 시스템 모델은 자율 시스템의 결과적인 움직임을 표현하기 위해 도로 및 날씨 조건들에 더하여 작동 액션들을 사용할 수도 있다. 예를 들어, 젖은 또는 눈 오는 환경에서, 건조한 환경에서와 동일한 양의 가속 액션은 건조한 환경에서보다 더 적은 가속을 야기할 수도 있다. 다른 예로서, 자율

시스템 모델은 가능하게는 결합 있는 타이어들(예를 들어, 타이어 미끄러짐), 기계적 기반 레이턴시, 또는 자율 시스템에서의 다른 가능한 결합들을 고려(account for)할 수도 있다.

[0055] 블록 1009에서, 시뮬레이션된 환경에서의 액터들의 액션들은 시뮬레이션된 환경 상태에 기초하여 모델링된다. 가상 운전자 모델과 동시에, 액터 모델들 및 자산 모델들은 시뮬레이션된 환경 상태에 대해 실행되어 시뮬레이션된 환경에서의 자산들 및 액터들 각각을 위한 업데이트를 결정한다. 여기서, 액터 액션들은 가상 운전자를 테스트하기 위해 평가기의 이전 출력을 사용할 수도 있다. 예를 들어, 액터가 적대적이면, 평가기는 가상 운전자의 이전 액션에 기초하여, 가상 운전자의 최저 스코어링 메트릭을 표시할 수도 있다. 액터 모델의 액션들에 대한 메트릭들의 매핑을 사용하여, 액터 모델은 그 특정 메트릭을 이용하거나 테스트하기 위해 실행된다.

[0056] 따라서, 블록 1011에서, 업데이트된 시뮬레이션된 환경 상태는 액터 액션들 및 자율 시스템 상태에 따라 업데이트된다. 업데이트된 시뮬레이션된 환경은 자율 시스템 및 액터들의 포지션들의 변화를 포함한다. 모델들이 현실 세계와 독립적으로 실행되기 때문에, 업데이트는 현실 세계로부터의 편차를 반영할 수도 있다. 따라서, 자율 시스템은 새로운 시나리오들로 테스트된다. 블록 1013에서, 계속할지 여부가 결정된다. 계속할 것으로 결정되면, 업데이트된 시뮬레이션된 환경 상태를 사용하여 블록 1003에서 자율 시스템의 테스트가 계속된다. 각각의 반복에서, 트레이닝 동안, 평가기는 피드백을 가상 운전자에 제공한다. 따라서, 가상 운전자의 파라미터들은 다양한 시나리오들에서 가상 운전자의 성능을 향상시키도록 업데이트된다. 테스트 동안, 평가기는 안전 필수적일 수도 있는 엣지 케이스(edge case)들을 포함하는 다양한 시나리오들 및 패턴들을 사용하여 테스트할 수 있다. 따라서, 하나 이상의 실시예들은 가상 운전자를 향상시키고 현실 세계에서의 가상 운전자의 안전성을 증가시킨다.

[0057] 도시된 바와 같이, 자율 시스템의 가상 운전자는 가상 운전자의 현재 학습된 파라미터들 및 시나리오에 기초하여 작동한다. 시뮬레이터는 자율 시스템의 액션들을 획득하고, 시뮬레이션된 환경에서의 반응을 자율 시스템의 가상 운전자에 제공한다. 평가기는 가상 운전자의 성능을 평가하고 그 성능을 기반으로 시나리오들을 생성한다. 자율 시스템이 시뮬레이션된 환경에서 동작함에 따라 프로세스는 계속될 수도 있다.

[0058] 시스템의 가상 운전자, 평가기, 및 다른 컴포넌트들 및 모델들은 동작들을 수행하도록 트레이닝되는 하나 이상의 머신 러닝 모델들이거나 이들을 포함할 수도 있다. 사용될 수도 있는 예시적인 머신 러닝 모델들은 뉴럴 네트워크 모델들, 결정 트리들, 및 다른 모델들을 포함한다. 목표는 직관적으로, 지능적으로, 그리고 안전하게 주행하도록 자율 시스템의 가상 운전자를 가르치는 것이다. 도 11에 도시된 바와 같이, 시뮬레이터는 도시된 바와 같이 스케일링가능한, 고 충실도(fidelity) 패쇄 루프 시뮬레이터이다. 인공 지능(AI)을 사용하면, 시뮬레이션 환경은 스스로 주행하는 법을 학습하도록 테스트들을 설계하고 스킬들을 평가하고, 자율 주행 "브레인"(즉, 가상 운전자)을 가르칠 수 있는 몰입형 및 반응형 환경이다. 시뮬레이션된 환경 및 시뮬레이터를 사용하여, 가상 운전자는 공통 주행 시나리오들 및 안전 필수 엣지 케이스들 양자 모두를 포함하여 그의 주행 스킬들을 연마하는 데 필요한 방대하게 다양한 경험들에 노출된다. 목표는 현실 세계에서 테스트하기 위해 수 마일들을 주행할 필요성을 감소시키고 보다 안전한, 보다 감당 가능한 솔루션을 초래하는 것이다.

[0059] 시뮬레이터는 적어도 4 개의 코어 능력들을 가질 수도 있다: (1) 데이터로부터, 자동으로, 반자동으로, 그리고 규모에 맞게, 세계의 디지털 트윈들을 구축함; (2) 전체 소프트웨어 스택의 테스트를 가능하게 하는 근 실시간(near real-time) 고충실도 센서 시뮬레이션을 몰입형 및 반응형 방식으로 수행함; (3) 자동으로 그리고 규모에 맞게, 가상 운전자를 스트레스-테스트하기 위한 시나리오들을 생성함; 및 (4) 가상 운전자를 그의 실수들로부터 학습하고 인간 개입 없이 주行的 스킬들을 마스터하도록 가르침.

[0060] 시뮬레이터는 자동으로 그리고 규모에 맞게, 세계의 디지털 트윈들을 데이터로부터 구축한다. 효과적이기 위해, 시뮬레이터는 다양성 및 역동성 모두에 있어서, 높은 충실도로 현실 세계를 재현(recreate)할 필요가 있다. 시뮬레이션된 환경은 LiDAR 리턴들 및 카메라 이미지들과 같은 센서 데이터로부터 현실 세계 객체들 및 배경들의 지오메트리, 외관, 및 재료 속성들을 재구성하기 위해 AI를 활용한다. 이는, 시뮬레이터가 현실 세계의 다양성, 규모, 사실주의로, 우리가 주행하는 모든 곳으로부터 세계의 디지털 트윈들을 자동으로 재현할 수 있게 한다.

[0061] 시뮬레이터는 보이는 바와 같이 현실을 재현하고 AI를 사용하여 광범위한 시뮬레이션된 객체들 및 배경들을 재구성한다. 이들 객체들 및 배경들은 자율 시스템을 테스트하는 새로운 안전 필수 시나리오들을 생성하기 위해 시뮬레이션 시스템에서 사용될 수 있다. 따라서, 시뮬레이터는 LiDAR 시뮬레이션, 카메라 시뮬레이션, 액터 시뮬레이션, 객체 재구성, 시나리오 생성 및 테스트를 포함하는 시뮬레이션을 사용한다. 예를 들어,

도 12a에 도시된 바와 같이, 거리의 좌측(1202)은 거리의 우측(1204)과 동일한 거리의 가상 세계 재구성이다. 시뮬레이션된 환경에서, 가상 운전자에 대한 입력들은 현실 세계를 시뮬레이션하도록 설계된다. 시뮬레이션은, 시뮬레이션이 시나리오를 위한 수정을 포함할 수도 있기 때문에 현실 세계의 상태의 정확한 묘사가 아닐 수도 있다. 예를 들어, 도 12b에 도시된 바와 같이, 가상 운전자에 대한 입력으로서 사용되는 카메라 및 LiDAR 시뮬레이션(1208)에 가짜 차량이 추가된다. 또한, 도 12b에 도시된 바와 같이, 시뮬레이션된 환경은 가상 운전자에 대해 몰입형이다.

- [0062] 시뮬레이터는, 몰입형 및 반응형 방식으로 전체 소프트웨어 스택의 테스트를 가능하게 하는 근 실시간 고충실도 센서 시뮬레이션을 수행한다. 정확하게 세계를 재현하는 것이 과제이다. 그러나 현실 세계에서 주행하는 것을 시뮬레이터가 진정으로 대체하기 위해서는, 시뮬레이터가 현실 세계에서와 같이 시뮬레이션에서 동일하게 행동해야 한다. 시뮬레이터는 이를, 가상 운전자가 그의 센서들을 통해 가상 세계를 관찰하거나 "보는" 방식을 마치 가상 운전자가 현실 세계를 보는 방식과 같이 시뮬레이션함으로써 달성한다. 이것은, 시뮬레이션에서 전체 가상 운전자를 적절하게 테스트하고 가상 운전자에게 어떻게 주행하는지를 가르치는 유일한 방식이다.
- [0063] 시뮬레이터는 단순화된 물리 기반 렌더링과 함께 AI를 활용하여 근 실시간으로 사실적인 센서 데이터를 시뮬레이션한다. AI 알고리즘들은, 고품질 재현된 가상 세계들과 결합되어, 통상적인 복잡한 물리 시뮬레이터들보다 계산적으로 더 효율적이면서 물리 근사치를 더 사실적으로 보이게 하는 방법을 학습한다.
- [0064] 고품질 객체들 및 가상 세계들의 자동 생성으로, 시뮬레이터는 보이는 바와 같은 현실을 재현할 수 있을 뿐만 아니라, 이를 시나리오들에서 "액터"(예를 들어, 다른 시뮬레이션된 객체들)의 거동을 제거, 추가, 또는 변경하고 센서들을 재시뮬레이션함으로써 수정할 수 있다. 이는, 시뮬레이터로 하여금 가상 운전자가 흥미로운 또는 안전 필수 엣지 케이스들에 걸쳐 전체 소프트웨어 스택을 사실적으로 테스트하는 능력을 경험-연락하기 위한 무한한 수의 다양한 세계들을 생성할 수 있게 하고 가상 운전자가 정교한 주행 스킬들을 학습하는 것을 도울 수 있게 한다.
- [0065] 예를 들어, 시뮬레이터는 실제 시나리오를 시뮬레이션할 수도 있다. 그 후, 시뮬레이터는 주어진 기동(예를 들어, 차선 변경(왼쪽에서 오른쪽으로))을 수행하는 새로운, 완전히 시뮬레이션된 "액터"로 장면을 업데이트하고, 시뮬레이션된 센서 데이터를 생성한다. 이를, 임의의 기존 시나리오를 취하고 가상 운전자를 테스트하기 위해 그 시나리오를 수정하여, 규모에 맞게 수행할 수 있다. 도 13에 도시된 바와 같이, 다수의 시나리오들(1300)이 생성될 수도 있고, 각각의 시나리오는 가상 운전자를 테스트 및 트레이닝하기 위해 사용된다.
- [0066] 상이한 센서들 및 센서들의 구성들뿐만 아니라 그 센서들 및 차량들이 심지어 존재하기도 전의 차량 플랫폼들을 테스트하기 위해 시뮬레이션된 환경이 채용될 수 있다. 시뮬레이터를 사용하여, 새로운 센서 구성들이 심지어 현실 세계에 존재하기도 전에 그들을 어떻게 사용할 지를 가상 운전자에게 가르칠 수 있으므로 새로운 센서 구성들은 신속하게 설계 및 검증될 수 있어, 궁극적으로 자율 주행 차량들 및 다른 자율 시스템들의 훨씬 빠른 개발을 가능하게 한다.
- [0067] 시뮬레이션된 환경은 시나리오들을 자동으로 생성하고 가상 운전자를 스트레스-테스트한다. 시뮬레이터는 AI를 사용하여 가상 운전자를 테스트하고 트레이닝하기 위한 트래픽 시나리오를 생성하여, 자동으로 그리고 규모에 맞게, 모든 종류의 지오그래피들에 걸쳐, 모든 종류의 트래픽 거동을 갖는, 모든 종류의 변형들을 생성한다.
- [0068] 시나리오들은 단순히 영화처럼 플레이되는 정적 시나리오들이 아니다. 주행은 상호작용적 경험이고, 시뮬레이터는 이러한 상호작용적 경험을 복제한다. 상호작용적 경험의 복제는 도 14에 도시된 바와 같은 폐쇄 루프 시뮬레이션이다. 가상 운전자의 모든 액션은 시뮬레이션된 환경에서 반응을 갖는다. 구체적으로, 시뮬레이터는 시나리오에서의 "액터들"이 가게 하며 동작들이 수행되게 하고, 업데이트된 시뮬레이션된 환경을 보는 시뮬레이션된 센서들이 이어서 가상 운전자에게 가상 운전자가 관찰할 것을 알려주고, 이어서 가상 운전자가 그것이 어떻게 반응할지를 결정한다. 그 후 시뮬레이터는 그의 결정에 따라 가상 세계에서 가상 운전자를 이동시키고, 다른 트래픽 참가자들은 그에 따라 이동한다. 이 루프가 계속하여 이어진다.
- [0069] 이러한 타입의 시뮬레이션은, 가상 운전자가 시나리오가 현실 세계에 있고 가상 운전자가 자율 주행 차량을 주행한다면 그 시나리오가 어떻게 플레이되는지를 진정으로 경험하도록 허용한다. 따라서, 하나 이상의 실시예들은 소프트웨어 스택의 성능의 정확한 평가를 가능하게 한다.
- [0070] 시뮬레이터는, 가상 운전자의 약점들을 정확히 찾아내고 우리의 운전자가 처리하기에 어려움을 가질 적대적 시

나리오들을 자동으로 만들기 위해 AI를 활용한다. 즉, 시뮬레이터는 평가기에 의해 가상 운전자에 대하여 신중하게 플레이하여, 그의 약점들을 식별하고 활용하는 한편 가상 운전자가 자신의 스킬들을 동시에 학습한다.

시나리오들과 주행 스킬들의 대결 - 하나의 AI 시스템 대 다른 것(예컨대, 평가기 대 가상 운전자)이다.

[0071] 반직관적으로 보일 수도 있지만, 목표는 가상 운전자가 실패하는 것을 보는 것이다. 시뮬레이션된 환경에서 가상 운전자의 실패는 현실 세계에서 실패의 가능성을 감소시킨다. 따라서, 시뮬레이터는 가상 운전자를 그의 실수들로부터 학습하고 스스로 주행의 스킬들을 마스터하도록 가르친다.

[0072] 세계들을 재현하고, 센서 데이터를 시뮬레이션하고, 무한한 테스트 시나리오들을 생성할 수 있는 시뮬레이터를 구축하는 것은, 하나의 크고 대담한 목표: 안전하게 - 임의의 차량에 있어서, 임의의 시나리오에 있어서, 세계에서 어디에서든 - 주행하도록 스스로 학습하도록 가상 운전자를 가르치는 것의 서비스에 있어서의 모든 것이다.

[0073] 예를 들어, 가상 운전자는 초기에 까다로운 차선 병합 협상에 어려움을 겪을 수도 있다. 초기에, 초보 가상 운전자는 도 14a에 도시된 바와 같이 다른 액터와 충돌한다. 그러나 폐쇄 루프 트레이닝을 통해, 가상 운전자는 시간이 지남에 따라 더 나아지도록 학습할 수 있다. 중간(intermediate) 가상 운전자는 도 14b에 도시된 바와 같이 제동하고 다른 차량이 지나가게 허용한다. 시뮬레이션된 환경에서 더 많이 학습한 후의, 숙련된 가상 운전자는 최적의 기동을 실현하며, 이는 도 14c에 도시된 바와 같이 제동을 방지면서 또한 다른 액터에 대한 어려움을 야기하지 않는, 매끄럽게 약간 가속하는 것이다. 평가기는 피드백을 가상 운전자에게 제공한다.

[0074] 시뮬레이터는, 가상 운전자의 주행 스킬들(일반적인 주행 시나리오들 및 더 달성하기 힘든 안전 필수 엡지 케이스들을 포함함)을 날카롭게 하기 위해 필요한 방대하게 다양한 경험들에 가상 운전자를 노출시킨다. 시뮬레이터는 또한 각각의 결정 후에 가상 운전자의 성능에 대한 피드백을 가상 운전자에게 전달한다. 시뮬레이터의 피드백 시스템은 AI로 하여금 그의 실수들로부터 스스로 몰입형 및 반응형 방식으로 학습할 수 있게 한다. 가상 운전자는 시간이 지남에 따라 더 스마트한 운전자가 되도록 그의 액션들로부터 끊임없이, 자동으로 학습하고 있다.

[0075] 일부 경우들에서, 가상 운전자의 다수의 클론들이 실행되고 동시에 업데이트되어 상이한 시나리오들에서 그리고 서로 병렬로 안전하게 주행하도록 학습한다. 각각의 클론은 각각의 시나리오에 기초하여 업데이트되는 동일한 AI 네트워크를 갖는다. 예를 들어, 가상 운전자는 조용한 교외 거리를, 5차선 고속도로에서, 러시아워 동안 도심의 한가운데서, 및 기타 등등 - 모두 동시에 - 주행하는 방법을 학습하고 있을 수 있다.

[0076] 시뮬레이터를 통해, 가상 운전자는 시뮬레이션된 환경에 드롭되고 가상 운전자는 가상 운전자가 현실 세계에 있는 것처럼 볼 수 있고 거동할 수 있다. 그 후, 시뮬레이터는 가상 운전자를 테스트하기 위한 교통 시나리오들을 생성하고 차분한 오후, 러시아워 등을 모방하는 시나리오들의 변형들을 생성한다. 시뮬레이터는 가상 운전자 거동에 실시간으로 반응하여 흥미로운 상호작용들을 생성한다. 모든 액션은 반응을 가지며, 가상 운전자는 선택을 하고 트래픽은 반응한다. 가상 운전자가 다수의 시나리오들을 통해 진화하며, 가상 운전자의 평가가 다양한 시나리오들을 통해 진화한다. 따라서, 시간이 지남에 따라, 가상 운전자는 초보 운전자로서 시작할 수도 있고 그 후 안전하게 주행하는 법을 학습한다.

[0077] 예를 들어, 도 15a, 도 15b 및 도 15c에 도시된 바와 같이, 시뮬레이터는 액터 액션들이 현실 세계로부터 벗어나는 혼합 현실 세계를 생성할 수 있다. 도 15a, 도 15b 및 도 15c의 좌측 이미지(1502)는 자율 시스템 상의 실제 카메라를 통해 캡처된 현실 세계 이미지들을 도시한다. 도 15a, 도 15b 및 도 15c의 우측 이미지(1504)는 실제 이벤트들로부터 벗어난 혼합 현실 이미지를 도시한다. 우측 이미지들과의 좌측 이미지들의 비교에 기초하여 도시된 바와 같이, 가상 운전자 앞의 차는 시뮬레이션된 환경에서 직진을 계속하기 위해 가상 운전자 앞에 끼어드는 한편 현실 세계에서는 좌회전을 한다. 도시된 바와 같이, 현실 세계의 단일 데이터 캡처를 통해, 시뮬레이터는 가상 운전자를 안전하게 테스트하기 위해 다수의 시나리오들(예를 들어, 차가 좌회전을 함, 차가 가상 운전자와 동일한 차선으로 끼어들음)을 생성할 수 있다.

[0078] 실시예들은 향상된 기술적 결과를 달성하도록 특별히 설계된 컴퓨팅 시스템 상에서 구현될 수도 있다. 컴퓨팅 시스템에서 구현될 때, 본 개시의 특징들 및 요소들은 본 개시의 특징들 및 요소들을 구현하지 않는 컴퓨팅 시스템들에 비해 상당한 기술적 진보를 제공한다. 모바일, 데스크톱, 서버, 라우터, 스위치, 임베디드 디바이스, 또는 다른 타입들의 하드웨어의 임의의 조합은 본 개시에서 설명된 특징들 및 요소들을 포함함으로써 향상될 수도 있다. 예를 들어, 도 16a에 도시된 바와 같이, 컴퓨팅 시스템(1600)은 하나 이상의 컴퓨터 프로

세서들(1602), 논퍼시스턴트(non-persistent) 스토리지(1604), 퍼시스턴트(persistent) 스토리지(1606), 통신 인터페이스(1608)(예를 들어, 블루투스 인터페이스, 적외선 인터페이스, 네트워크 인터페이스, 광학 인터페이스 등), 및 본 개시의 특징들 및 요소들을 구현하는 다수의 다른 요소들 및 기능성들을 포함할 수도 있다. 컴퓨터 프로세서(들)(1602)는 명령들을 프로세싱하기 위한 집적 회로일 수도 있다. 컴퓨터 프로세서(들)는 프로세서의 하나 이상의 코어들 또는 마이크로 코어들일 수도 있다. 컴퓨터 프로세서(들)(1602)는 하나 이상의 프로세서들을 포함한다. 하나 이상의 프로세서들은 중앙 프로세싱 유닛(CPU), 그래픽 프로세싱 유닛(GPU), 텐서 프로세싱 유닛들(TPU), 이들의 조합들 등을 포함할 수도 있다.

[0079] 입력 디바이스들(1610)은 터치스크린, 키보드, 마우스, 마이크로폰, 터치패드, 전자 펜, 또는 임의의 다른 타입의 입력 디바이스를 포함할 수도 있다. 입력 디바이스들(1610)은 출력 디바이스들(1612)에 의해 제시된 데이터 및 메시지들에 응답하는 입력들을 사용자로부터 수신할 수도 있다. 입력들은 본 개시에 따라 컴퓨팅 시스템(1600)에 의해 프로세싱 및 송신될 수도 있는 텍스트 입력, 오디오 입력, 비디오 입력 등을 포함할 수도 있다. 통신 인터페이스(1608)는, 컴퓨팅 시스템(1600)을 네트워크(도시되지 않음)(예를 들어, 로컬 영역 네트워크(LAN), 인터넷과 같은 광역 네트워크(WAN), 모바일 네트워크, 또는 임의의 다른 타입의 네트워크)에 그리고/또는 다른 컴퓨팅 디바이스와 같은 다른 디바이스에 연결하기 위한 집적 회로를 포함할 수도 있다.

[0080] 또한, 출력 디바이스들(1612)은 디스플레이 디바이스, 프린터, 외부 스토리지 또는 임의의 다른 출력 디바이스를 포함할 수도 있다. 출력 디바이스들 중 하나 이상은 입력 디바이스(들)와 동일할 수도 또는 상이할 수도 있다. 입력 및 출력 디바이스(들)는 컴퓨터 프로세서(들)(1602)에 로컬로 또는 원격으로 연결될 수도 있다. 많은 상이한 타입들의 컴퓨팅 시스템들이 존재하고, 상기 언급된 입력 및 출력 디바이스(들)는 다른 형태들을 취할 수도 있다. 출력 디바이스들(1612)은 컴퓨팅 시스템(1600)에 의해 송신 및 수신되는 데이터 및 메시지들을 디스플레이할 수도 있다. 데이터 및 메시지들은 텍스트, 오디오, 비디오 등을 포함할 수도 있고, 본 개시의 다른 도면들에서 전송된 데이터 및 메시지들을 포함할 수도 있다.

[0081] 실시예들을 수행하기 위한 컴퓨터 판독가능 프로그램 코드의 형태의 소프트웨어 명령들은, CD, DVD, 스토리지 디바이스, 디스켓, 테이프, 플래시 메모리, 물리 메모리, 또는 임의의 다른 컴퓨터 판독가능 저장 매체와 같은 비일시적 컴퓨터 판독가능 매체 상에, 전체적으로 또는 부분적으로, 일시적으로 또는 영구적으로, 저장될 수도 있다. 구체적으로, 소프트웨어 명령들은 컴퓨터 판독가능 프로그램 코드에 대응할 수도 있으며, 상기 컴퓨터 판독가능 프로그램 코드는 프로세서(들)에 의해 실행될 때, 본 개시의 다른 도면들에서 설명된 데이터 및 메시지들을 송신, 수신, 제시, 및 디스플레이하는 것을 포함할 수도 있는, 하나 이상의 실시예들을 수행하도록 구성된다.

[0082] 도 16a의 컴퓨팅 시스템(1600)은 네트워크에 연결될 수도 있거나 네트워크의 일부일 수도 있다. 예를 들어, 도 16b에 도시된 바와 같이, 네트워크(1620)는 다수의 노드들(예를 들어, 노드 X(1622), 노드 Y(1624))를 포함할 수도 있다. 각각의 노드가, 도 16a에 도시된 컴퓨팅 시스템과 같은, 컴퓨팅 시스템에 대응할 수도 있거나, 또는 조합된 노드들의 그룹이 도 16a에 도시된 컴퓨팅 시스템에 대응할 수도 있다. 예로서, 실시예들은 다른 노드들에 연결되는 분산 시스템(distributed system)의 노드 상에서 구현될 수도 있다. 다른 예로서, 실시예들은 다수의 노드들을 갖는 분산 컴퓨팅 시스템 상에서 구현될 수도 있으며, 여기서 각각의 부분은 분산 컴퓨팅 시스템 내의 상이한 노드 상에 위치될 수도 있다. 또한, 상기 언급된 컴퓨팅 시스템(1600)의 하나 이상의 요소들은 먼(remote) 위치에 위치되고 네트워크를 통해 다른 요소들에 연결될 수 있다.

[0083] 네트워크(1620) 내의 노드들(예컨대, 노드 X(1622), 노드 Y(1624))은, 요청들을 수신하는 것 및 클라이언트 디바이스(1626)에 응답들을 송신하는 것을 포함하여, 클라이언트 디바이스(1626)에 대한 서비스들을 제공하도록 구성될 수도 있다. 예를 들어, 노드들은 클라우드 컴퓨팅 시스템의 일부일 수도 있다. 클라이언트 디바이스(1626)는 도 16a에 도시된 컴퓨팅 시스템과 같은 컴퓨팅 시스템일 수도 있다. 또한, 클라이언트 디바이스(1626)는 하나 이상의 실시예들 전부 또는 그들의 일부분을 포함하고 그리고/또는 수행할 수도 있다.

[0084] 도 16a의 컴퓨팅 시스템은, 비교들 및 다른 프로세싱의 결과들과 같은, 원시(raw) 및/또는 프로세싱된 데이터를 제시하는 기능성을 포함할 수도 있다. 예를 들어, 데이터를 제시하는 것은 다양한 제시 방법들을 통해 달성될 수도 있다. 구체적으로, 데이터는 사용자 인터페이스에서 디스플레이됨으로써 제시되고, 다른 컴퓨팅 시스템으로 송신되고, 저장될 수도 있다. 사용자 인터페이스는 디스플레이 디바이스 상에 정보를 디스플레이하는 그래픽 사용자 인터페이스(GUI)를 포함할 수도 있다. GUI는, 무슨 데이터가 보여지는지 뿐만 아니라 어떻게 데이터가 사용자에게 제시되는지를 조직화하는 다양한 GUI 위젯들을 포함할 수도 있다. 또한, GUI는 데이터, 예컨대, 텍스트를 통해 실제 데이터 값들로서 제시되거나, 데이터 모델을 시각화하는 것을 통해서와 같

이 데이터의 시각적 표현으로 컴퓨팅 디바이스에 의해 렌더링되는 데이터를 사용자에게 직접적으로 제시할 수도 있다.

[0085] 본 명세서에서 사용되는 바와 같이, 용어 "에 연결되는"은 다수의 의미들을 의도한다. 연결은 직접적일 수도 또는 (예를 들어, 다른 컴포넌트 또는 네트워크를 통해) 간접적일 수도 있다. 연결은 유선일 수도 또는 무선일 수도 있다. 연결은 2 개의 엔티티들 사이의 일시적, 영구적, 또는 반영구적 통신 채널일 수도 있다.

[0086] 도면들의 다양한 설명들은 조합될 수도 있고, 본 출원의 다른 도면들에서 설명된 특징들을 포함하거나 그 안에 포함될 수도 있다. 도면들에 도시된 다양한 요소들, 시스템들, 컴포넌트들, 및 단계들은 도면들로부터 도시된 바와 같이 생략, 반복, 조합, 및/또는 변경될 수도 있다. 이에 따라, 본 개시의 범위는 도면들에서 도시된 특정 배열로 한정되는 것으로 간주되어서는 안 된다.

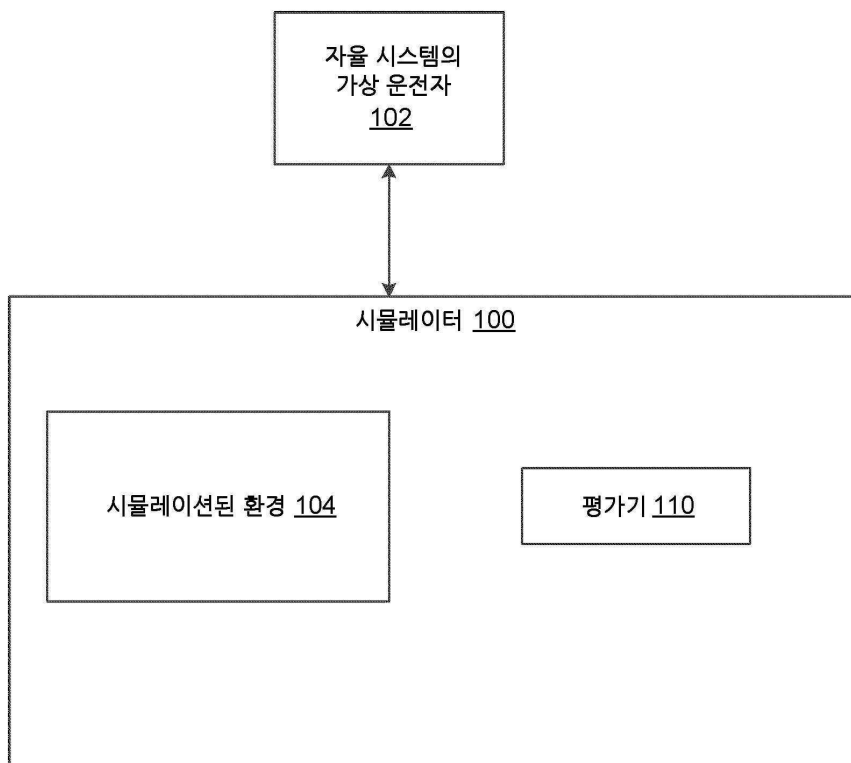
[0087] 본 출원에서, 서수들(예를 들어, 제1, 제2, 제3 등)은 요소(즉, 본 출원에서의 임의의 명사)에 대한 형용사로서 사용될 수도 있다. 서수 번호들의 사용은, 요소들의 특정 순서를 암시하거나 생성하는 것도 아니고, 용어들 "전", "후", "단일" 및 다른 이러한 용어의 사용에 의해서와 같이, 명시적으로 개시되지 않는 한 임의의 요소를 오직 단일 요소로인 것으로 제한하는 것도 아니다. 오히려, 서수들의 사용은 요소들 사이를 구별하기 위한 것이다. 예로 들어, 제1 요소는 제2 요소와 구별되며, 제1 요소는 하나 보다 많은 요소를 포함할 수도 있고 요소들의 순서화에 있어서 제2 요소를 후행(또는 선행)할 수도 있다.

[0088] 또한, 달리 명시적으로 언급되지 않는 한, 또는 "포괄적 또는(inclusive or)"이고, 그러므로 "및"을 포함한다. 또한, OR에 의해 결합된 아이템은 달리 명시적으로 언급되지 않는 한 임의의 수의 각 아이템과 아이템의 임의의 조합을 포함할 수 있다.

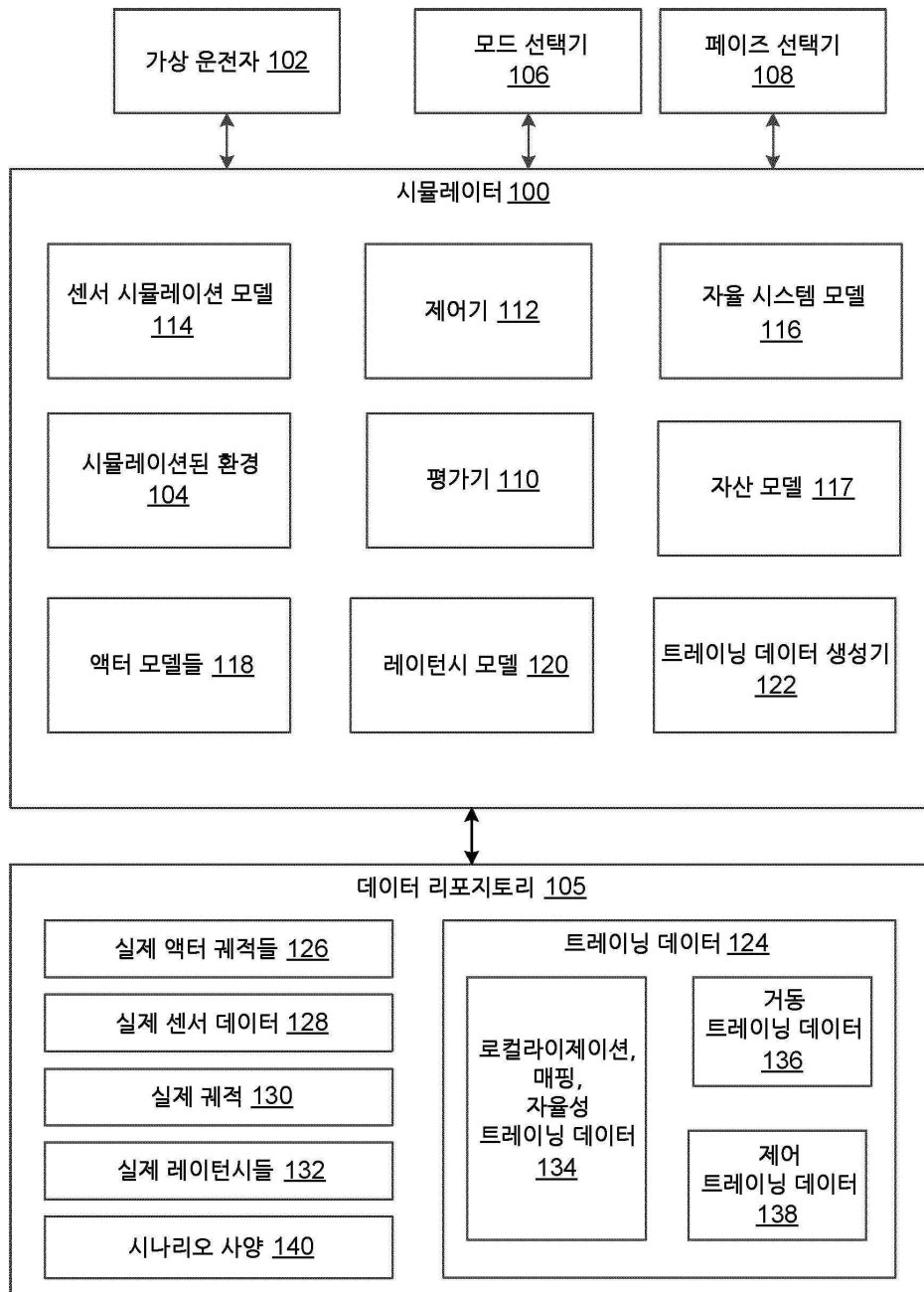
[0089] 위의 설명에서, 본 개시의 보다 철저한 이해를 제공하기 위해 다수의 특정 세부사항들이 제시된다. 하지만, 본 기술은 이들 특정 세부사항들 없이 실시될 수도 있음이 당업자에게 명백할 것이다. 다른 경우들에 있어서, 본 설명을 불필요하게 복잡하게 하는 것을 회피하기 위해, 잘 알려진 특징들은 설명되지 않았다. 또한, 위에서 명시적으로 설명되지 않은 다른 실시예들이 고안될 수 있으며 이들은 본 명세서에 개시된 바와 같은 청구항들의 범위로부터 벗어나지 않는다. 이에 따라, 범위는 첨부된 청구항들에 의해서만 한정되어야 한다.

도면

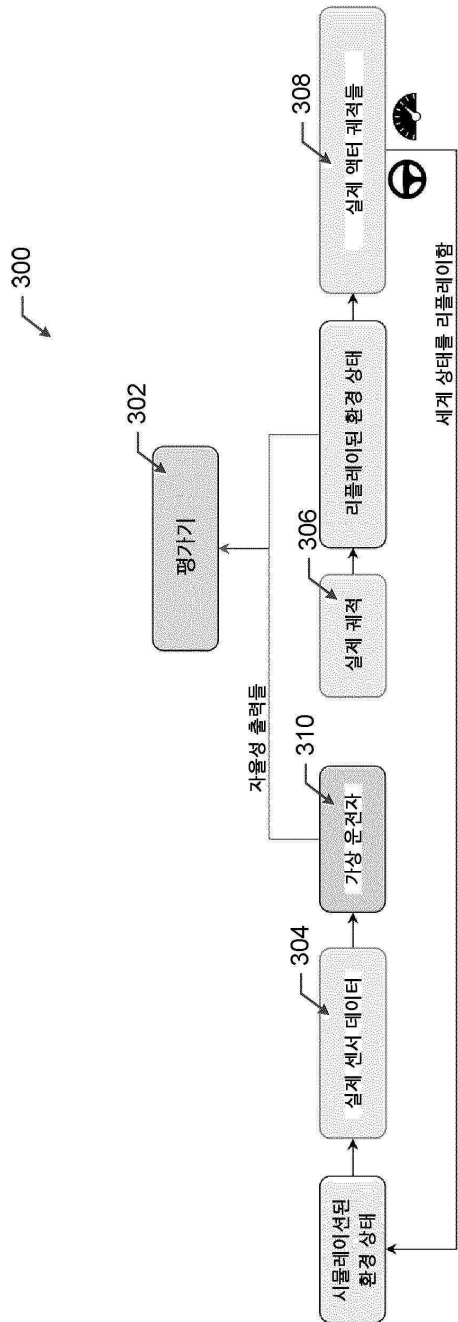
도면1



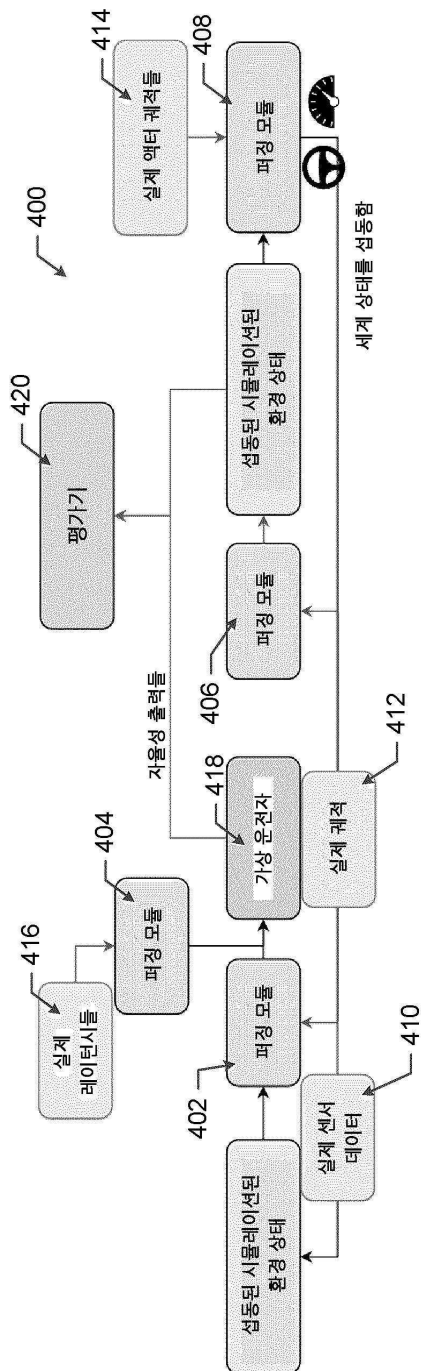
도면2



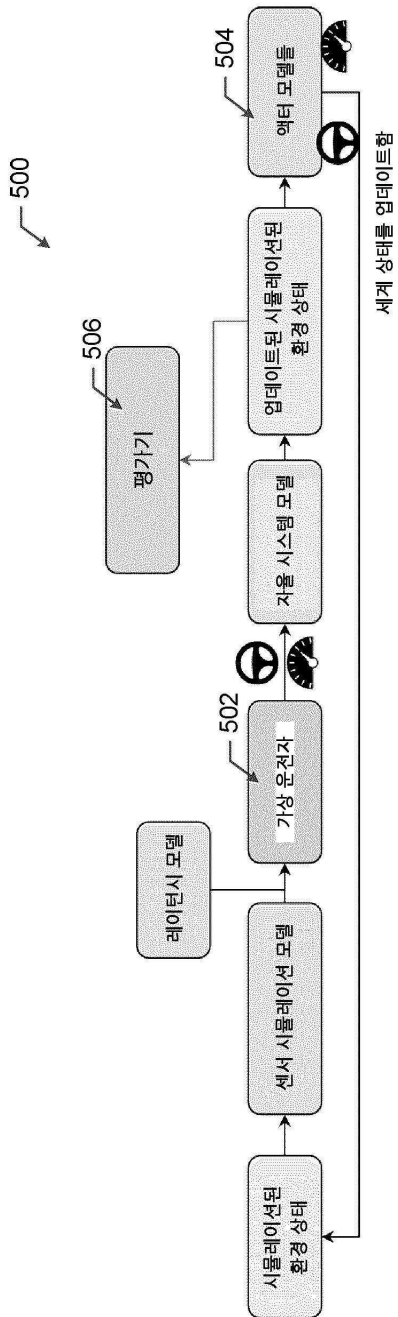
도면3



도면4

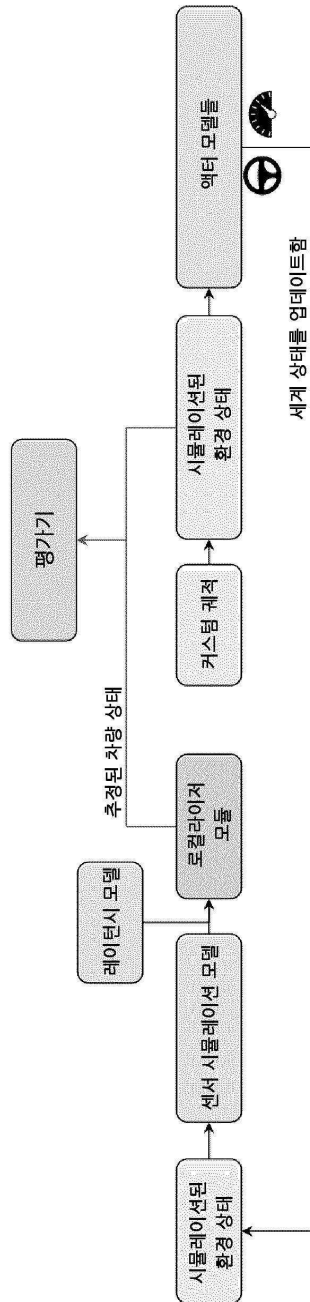


도면5



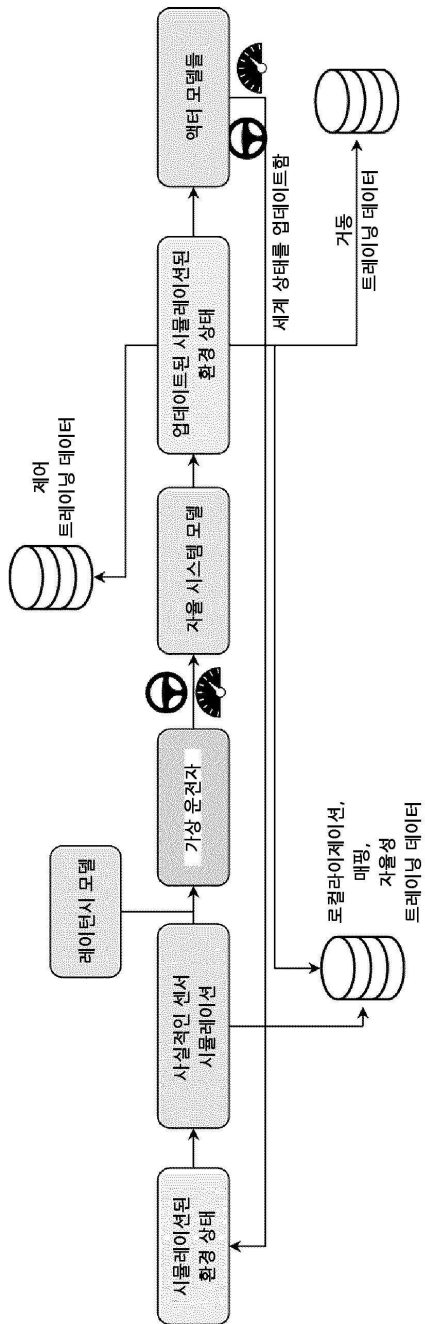
도면6

600

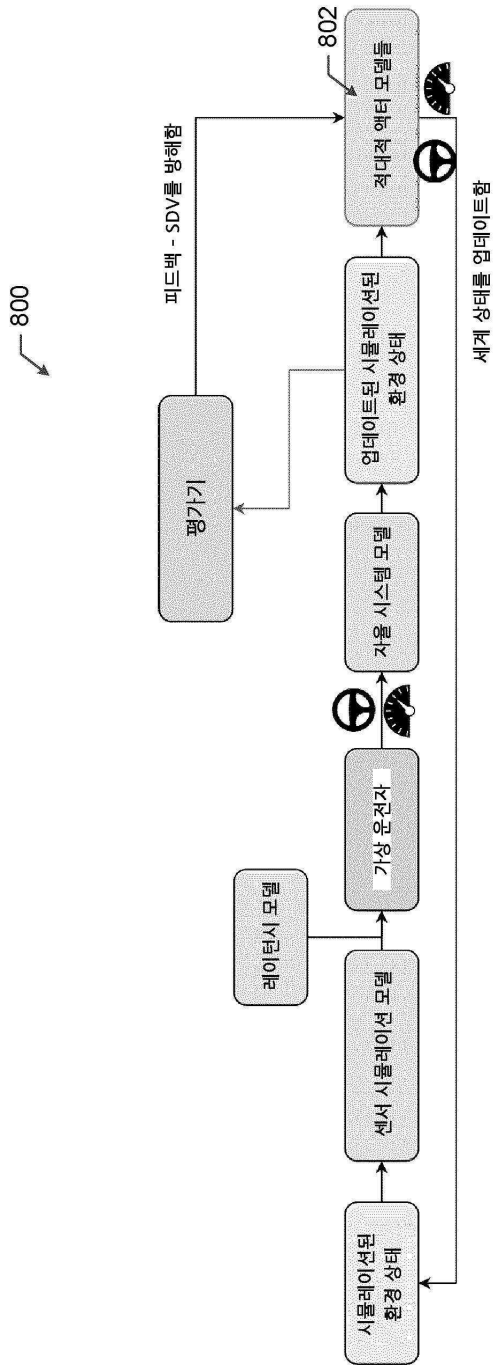


도면7

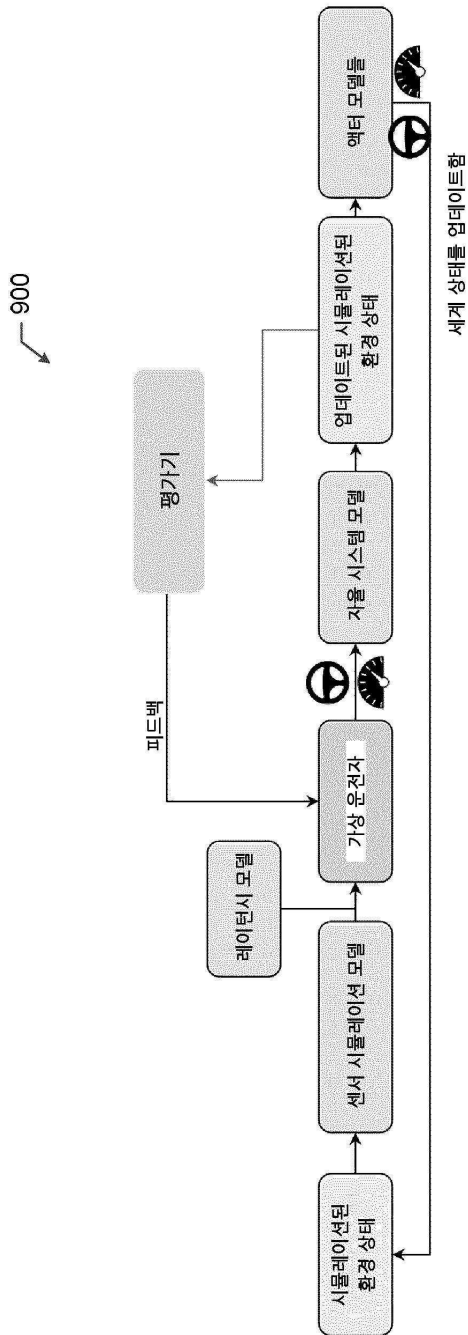
700



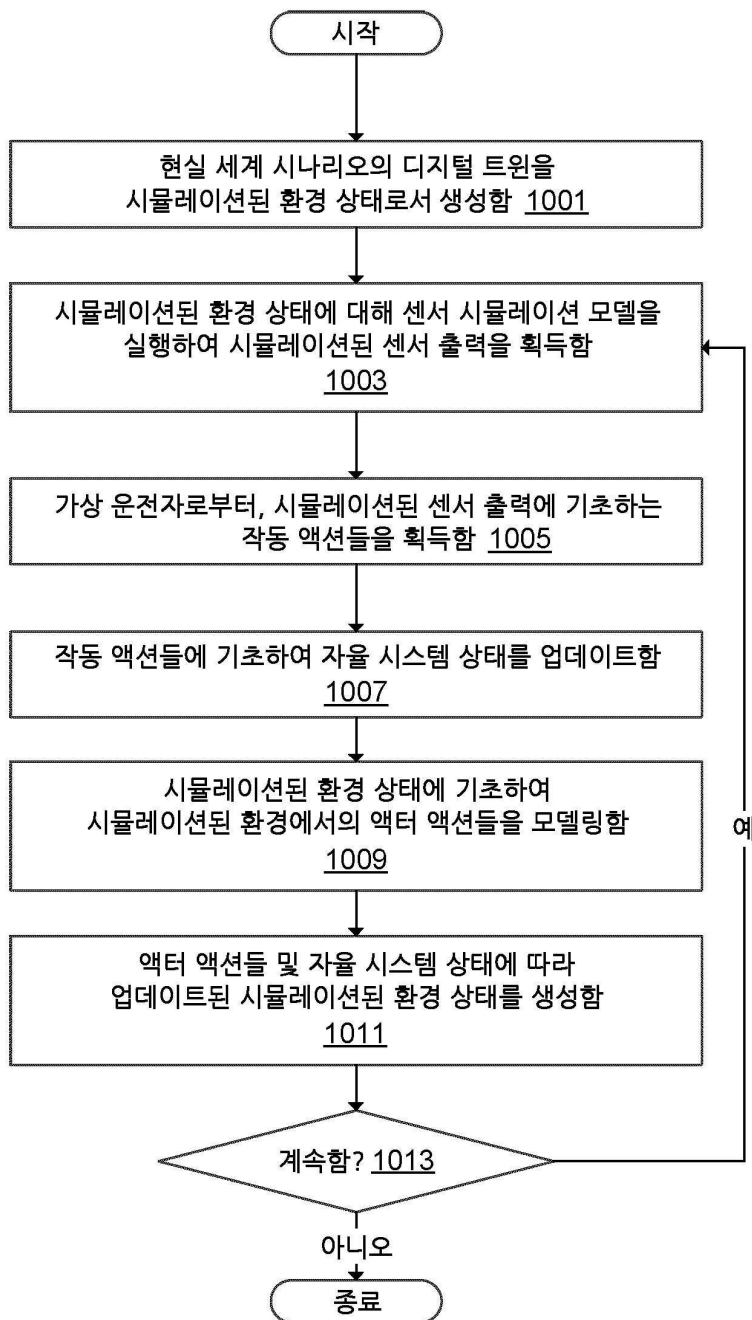
도면8



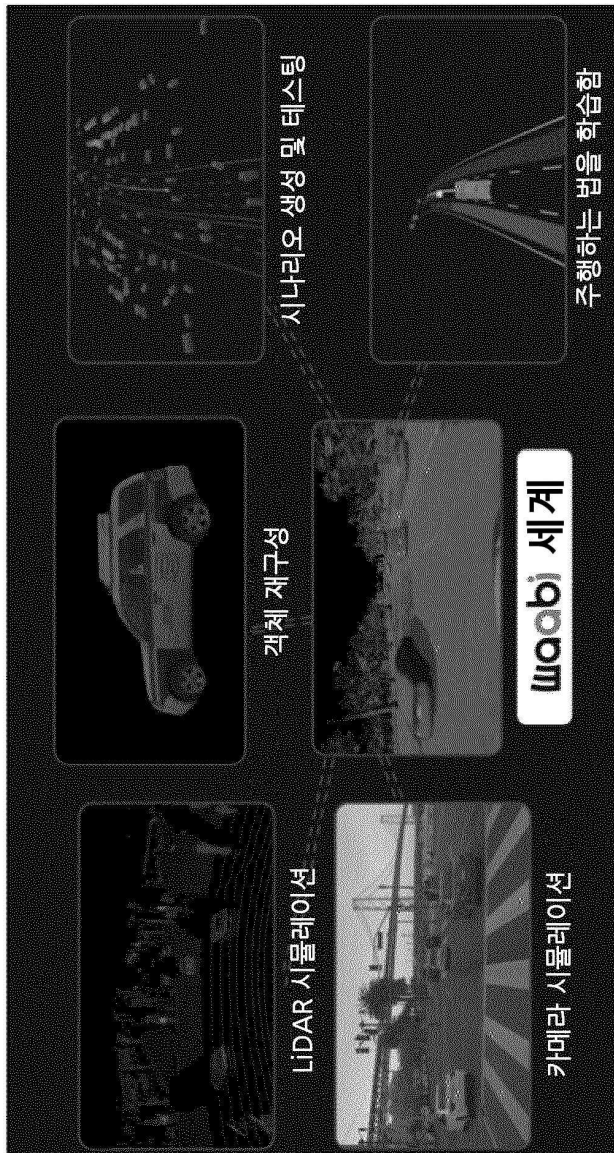
도면9



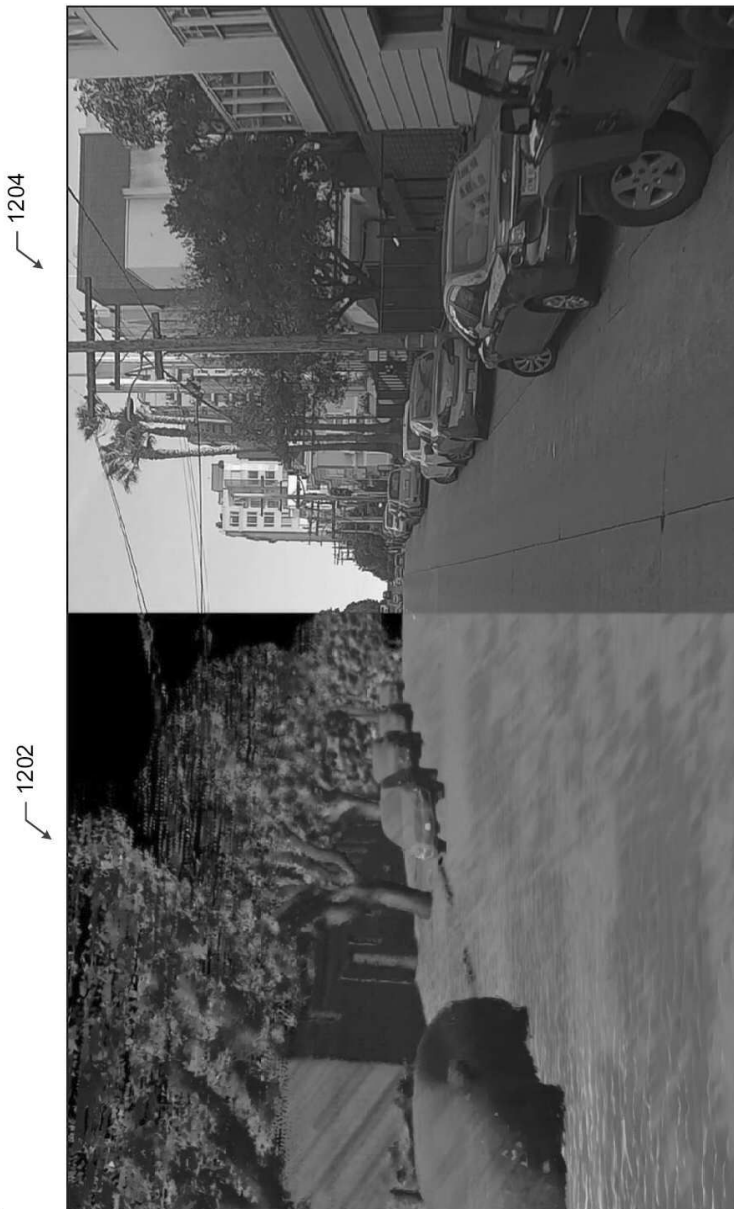
도면10



도면11



도면 12a

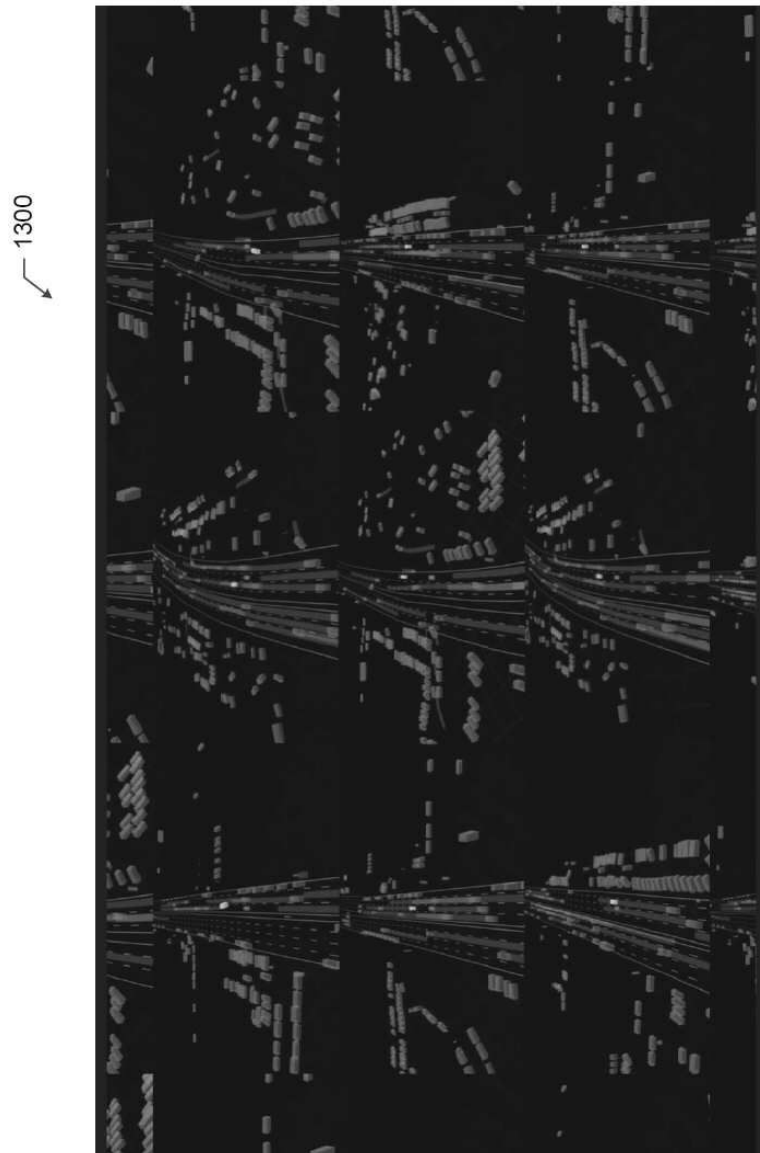


도면 12b

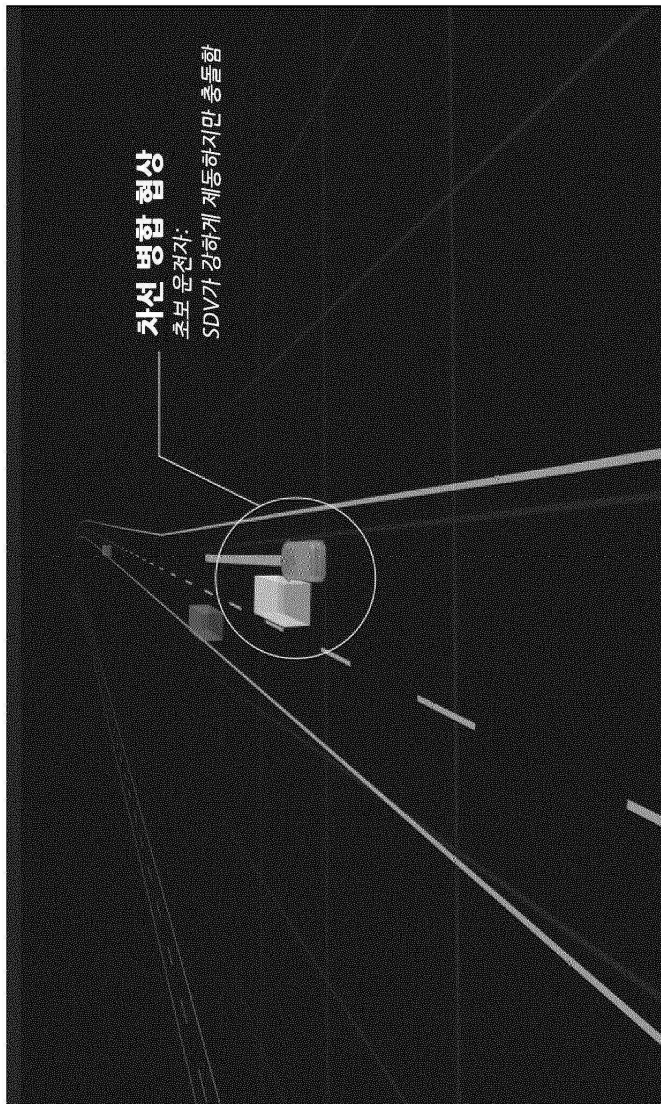
1208 ↙



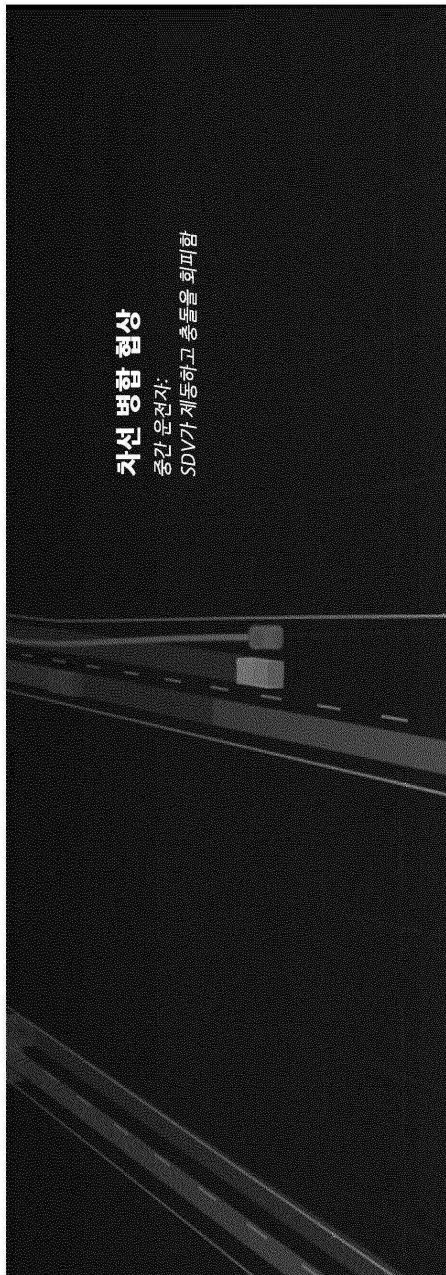
도면13



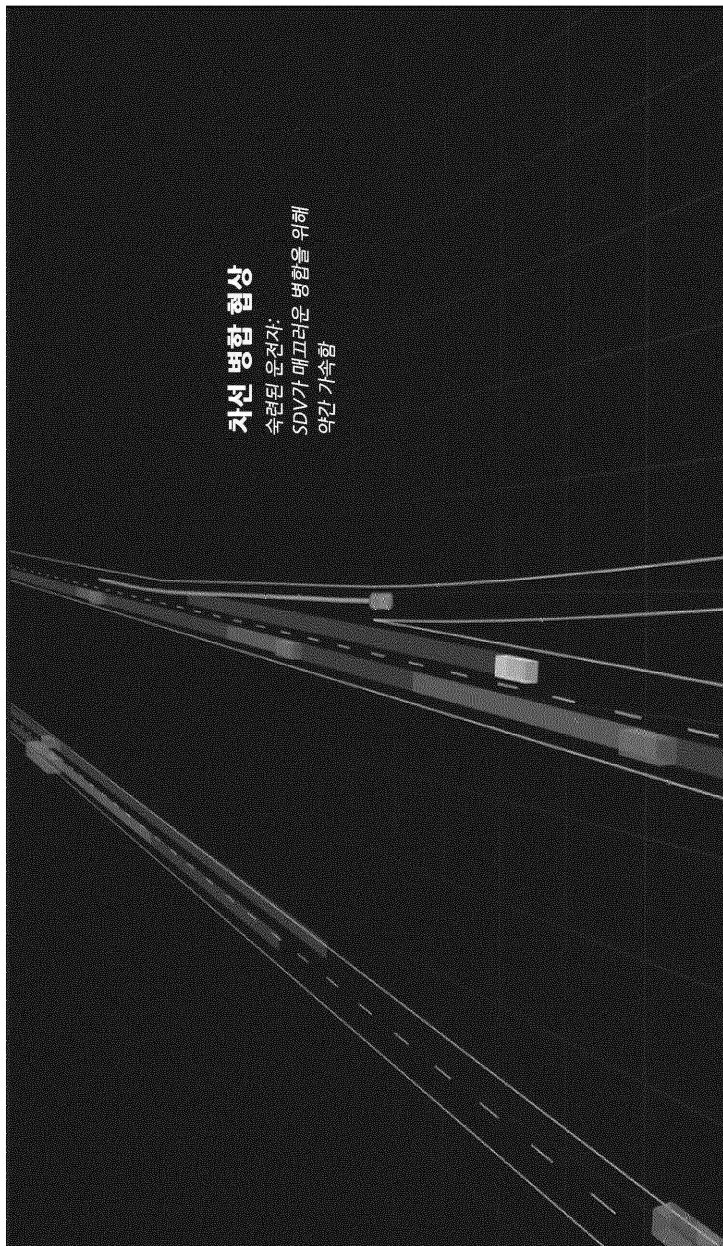
도면14a



도면14b



도면14c



도면15a



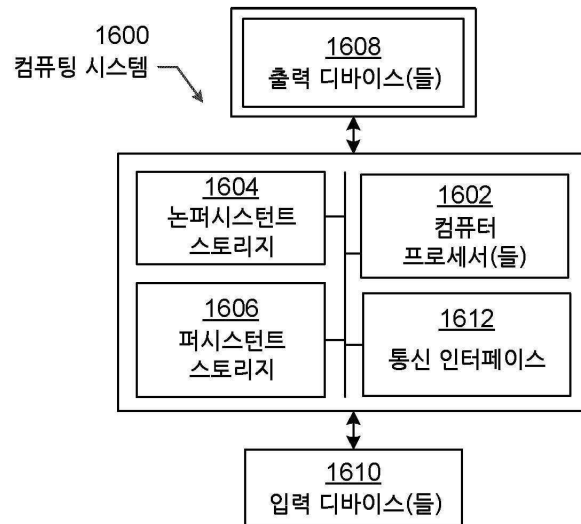
도면15b



도면15c



도면16a



도면 16b

