



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0001907
(43) 공개일자 2024년01월04일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G05B 23/02 (2006.01)

(52) CPC특허분류
G05B 23/0254 (2013.01)
G05B 23/0221 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2022-0078794
(22) 출원일자 2022년06월28일
심사청구일자 2022년06월28일

(71) 출원인

인천대학교 산학협력단

인천광역시 연수구 갯벌로 27, 인천대학교 이노베이션센터(송도동)

(72) 발명자

정철민

인천광역시 연수구 아카데미로 119, 8호관 C동 432호(송도동, 인천대학교)

박채훈

인천광역시 연수구 아카데미로 119, 8호관 C동 432호(송도동, 인천대학교)

강창목

인천광역시 연수구 아카데미로 119, 8호관 C동 442호(송도동, 인천대학교)

(74) 대리인

특허법인충정

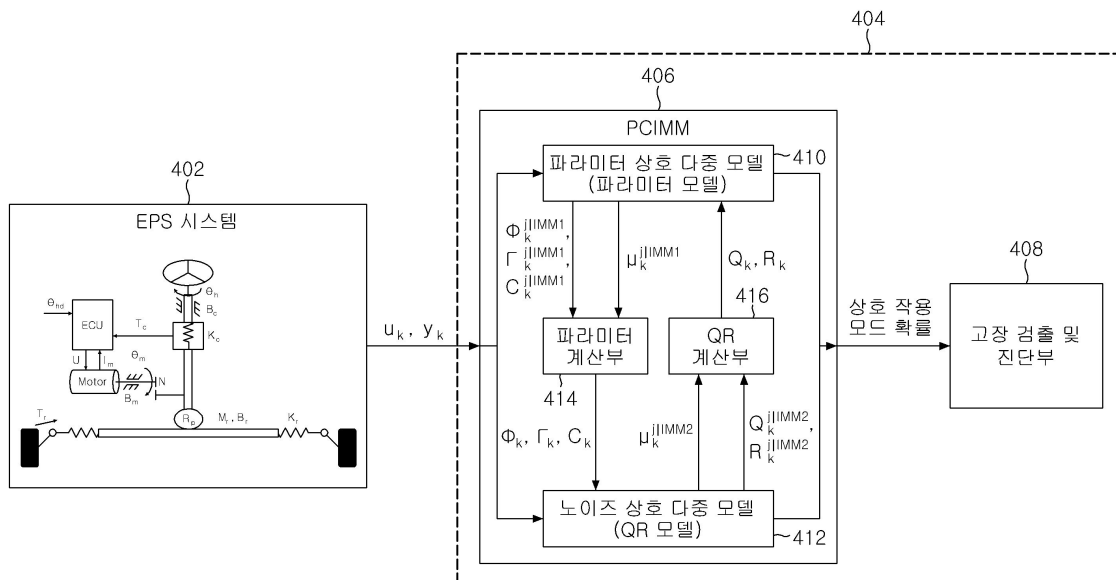
전체 청구항 수 : 총 14 항

(54) 발명의 명칭 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법

(57) 요약

본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치는, 시스템의 복합적인 고장과 관련된 모드 확률들을 획득하기 위하여 복수의 상호 다중 모델이 병렬로 연결된 병렬연결 상호 다중 모델; 및 상기 병렬연결 상호 다중 모델에서 출력되는 모드 확률들에 기반하여 상기 시스템의 복합적인 고장을 검출하는 고장 검출 및 진단부를 포함한다.

대표도



(52) CPC특허분류

G05B 23/0237 (2013.01)

G05B 23/0275 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

시스템의 복합적인 고장과 관련된 모드 확률들을 획득하기 위하여 복수의 상호 다중 모델이 병렬로 연결된 병렬 연결 상호 다중 모델; 및

상기 병렬연결 상호 다중 모델에서 출력되는 모드 확률들에 기반하여 상기 시스템의 복합적인 고장을 검출하는 고장 검출 및 진단부를 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치.

청구항 2

청구항 1에 있어서,

상기 병렬연결 상호 다중 모델은,

상기 시스템의 파라미터와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 파라미터 상호 다중 모델; 및

상기 시스템의 노이즈와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 노이즈 상호 다중 모델을 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치.

청구항 3

청구항 2에 있어서,

상기 병렬연결 상호 다중 모델은,

상기 파라미터 상호 다중 모델의 모드 확률들을 고려하여 현재의 시스템 상태를 나타내는 시스템 행렬을 계산하는 파라미터 계산부; 및

상기 노이즈 상호 다중 모델의 모드 확률들을 고려하여 현재의 시스템의 노이즈 상태를 나타내는 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)을 계산하는 QR 계산부를 더 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치.

청구항 4

청구항 3에 있어서,

상기 파라미터 상호 다중 모델은, 상기 QR 계산부로부터 수신된 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)에 기반하여 상기 파라미터와 관련된 모드 확률들을 갱신하고,

상기 노이즈 상호 다중 모델은, 상기 파라미터 계산부로부터 수신된 시스템 행렬에 기반하여 상기 노이즈와 관련된 모드 확률들을 갱신하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치.

청구항 5

청구항 2에 있어서,

상기 파라미터 상호 다중 모델은 상기 시스템의 복수 유형의 파라미터 각각과 관련된 상태를 추정하기 위한 복수의 칼만 필터 모델을 포함하고,

상기 노이즈 상호 다중 모델은 상기 시스템의 복수 유형의 노이즈 각각과 관련된 상태를 추정하기 위한 복수의 칼만 필터 모델을 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치.

청구항 6

청구항 2에 있어서,

상기 파라미터 상호 다중 모델 및 상기 노이즈 상호 다중 모델 각각은, 상기 시스템의 외부에서 발생하여 상기

시스템에 인가되는 외란을 확장 동역학 모델로 모델링한 외란값을 포함하는 시스템 행렬을 사용하여 모드 확률들을 획득하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치.

청구항 7

청구항 1에 있어서,

상기 시스템은 전자식 조향 시스템을 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치.

청구항 8

복수의 상호 다중 모델이 병렬로 연결된 병렬연결 상호 다중 모델이, 시스템의 복합적인 고장과 관련된 모드 확률들을 획득하는 단계; 및

고장 검출 및 진단부가, 상기 병렬연결 상호 다중 모델에서 출력되는 모드 확률들에 기반하여 상기 시스템의 복합적인 고장을 검출하는 단계를 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법.

청구항 9

청구항 8에 있어서,

상기 병렬연결 상호 다중 모델은,

상기 시스템의 파라미터와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 파라미터 상호 다중 모델; 및

상기 시스템의 노이즈와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 노이즈 상호 다중 모델을 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법.

청구항 10

청구항 9에 있어서,

상기 병렬연결 상호 다중 모델은,

상기 파라미터 상호 다중 모델의 모드 확률들을 고려하여 현재의 시스템 상태를 나타내는 시스템 행렬을 계산하는 파라미터 계산부; 및

상기 노이즈 상호 다중 모델의 모드 확률들을 고려하여 현재의 시스템의 노이즈 상태를 나타내는 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)을 계산하는 QR 계산부를 더 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법.

청구항 11

청구항 10에 있어서,

상기 파라미터 상호 다중 모델은, 상기 QR 계산부로부터 수신된 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)에 기반하여 상기 파라미터와 관련된 모드 확률들을 갱신하고,

상기 노이즈 상호 다중 모델은, 상기 파라미터 계산부로부터 수신된 시스템 행렬에 기반하여 상기 노이즈와 관련된 모드 확률들을 갱신하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법.

청구항 12

청구항 9에 있어서,

상기 파라미터 상호 다중 모델은 상기 시스템의 복수 유형의 파라미터 각각과 관련된 상태를 추정하기 위한 복수의 칼만 필터 모델을 포함하고,

상기 노이즈 상호 다중 모델은 상기 시스템의 복수 유형의 노이즈 각각과 관련된 상태를 추정하기 위한 복수의 칼만 필터 모델을 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법.

청구항 13

청구항 9에 있어서,

상기 파라미터 상호 다중 모델 및 상기 노이즈 상호 다중 모델 각각은, 상기 시스템의 외부에서 발생하여 상기 시스템에 인가되는 외란을 확장 동역학 모델로 모델링한 외란값을 포함하는 시스템 행렬을 사용하여 모드 확률들을 획득하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법.

청구항 14

청구항 8에 있어서,

상기 시스템은 전자식 조향 시스템을 포함하는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 최근 자율주행 자동차의 시장이 지속적으로 확대되면서 첨단 운전자 보조 시스템인 ADAS(Advanced Driver Assistance System) 기술이 발전하고 있다. ADAS는 첨단 센서와 제어 장치를 통해 운전자를 보조해 운전 미숙이나 갑작스러운 사고 등으로부터 안전성을 향상시킬 뿐만 아니라 운전의 편의성도 높여준다.

[0003] 기술의 편의성과 필요성에 의해 많은 ADAS 어플리케이션이 연구되고 있으며 특히 차선 유지 시스템(LKS: Lane Keeping System)은 대표적인 횡방향 제어로서 전자식 조향 시스템인 EPS(Electric Power Steering) 시스템으로 제어하게 된다.

[0004] 최근에는 환경 문제와 기술의 발전으로 인해 EPS 시스템은 많은 신차에서 기존의 유압식 조향 시스템 방식인 HPS(Hydraulic Power Steering)를 대체하고 있다. 이처럼 EPS 시스템의 중요성이 높아짐에 따라 자율주행 차량의 횡방향 제어를 위한 다양한 제어 기법들이 제안되었다.

[0005] EPS 시스템은 많은 장점들을 가지는 운전자 조향 보조 시스템이지만 향상된 기술에는 언제나 제어 안정성이 보장되어야 한다. EPS 시스템을 구성하는 여러 가지 기계 또는 전기 장치에서 예상치 못한 고장이 발생해 시스템의 특성이 갑자기 변하는 경우 안정적인 제어를 못하게 될 가능성이 커지면서 운전자에게 나쁜 영향을 미칠 수 있다.

[0006] 이를 방지하기 위해 시스템의 안정성과 운전자의 안전성을 보장하기 위한 고장 진단 알고리즘을 연구하는 것은 매우 중요하며 실제로도 플랜트 모델을 기반으로 한 연구들, 그리고 최근에는 서포트 벡터 머신(SVM: Support Vector Machine)과 같은 인공지능을 접목한 고장 진단 연구들도 많이 이루어지고 있다. 하지만 인공지능 기반 고장 진단 알고리즘의 경우, 좋은 성능을 내기 위한 학습 시간도 오래 걸리고 아직까지는 모델을 기반으로 한 알고리즘과 비교했을 때 확연한 성능 차이를 내기는 어렵다.

선행기술문헌

특허문헌

[0007] (특허문헌 0001) KR 10-1189697 B1

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 전자식 조향(EPS: Electric Power Steering) 시스템 등과 같은 시스템이 기계적, 전기적으로 고장이 났을 때 어떠한 고장인지 판단해주는 알고리즘으로 병렬연결 상호 다중 모델(PCIMM: Parallel Connected Interacting Multiple Model)을 적용하여, 병렬적으로 구성된 모델들의 상호작용을 통해

어떠한 고장 상태가 가장 적합한지 확률적으로 알 수 있으므로 고장 제어를 빠르고 정확하게 할 수 있고, 단일 관측기만을 사용할 때보다 시스템 예측 정확도가 높아 여러 외부 요인의 영향을 받을 때나 알 수 없는 상황에 처했을 때도 시스템의 상태를 추정하여 안정적인 제어가 가능하도록 하며, 더 나아가 기존의 상호 다중 모델(IMM: Interacting Multiple Model) 알고리즘에서 고장 진단 성능 향상을 위한 새로운 구조의 설계 방식을 제시함으로써 다수의 상호 다중 모델(IMM) 추정기들이 확률에 기반한 값을 업데이트하도록 설계하여 더 복잡하고 복잡한 상황에서 추정 신뢰도를 높일 수 있어 시스템의 고장을 정확하게 진단할 수 있는, 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0009] 상기 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치는,
- [0010] 시스템의 복잡한 고장과 관련된 모드 확률들을 획득하기 위하여 복수의 상호 다중 모델이 병렬로 연결된 병렬 연결 상호 다중 모델; 및
- [0011] 상기 병렬연결 상호 다중 모델에서 출력되는 모드 확률들에 기반하여 상기 시스템의 복잡한 고장을 검출하는 고장 검출 및 진단부를 포함할 수 있다.
- [0012] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치에 있어서, 상기 병렬연결 상호 다중 모델은,
- [0013] 상기 시스템의 파라미터와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 파라미터 상호 다중 모델; 및
- [0014] 상기 시스템의 노이즈와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 노이즈 상호 다중 모델을 포함할 수 있다.
- [0015] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치에 있어서, 상기 병렬연결 상호 다중 모델은,
- [0016] 상기 파라미터 상호 다중 모델의 모드 확률들을 고려하여 현재의 시스템 상태를 나타내는 시스템 행렬을 계산하는 파라미터 계산부; 및
- [0017] 상기 노이즈 상호 다중 모델의 모드 확률들을 고려하여 현재의 시스템의 노이즈 상태를 나타내는 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)을 계산하는 QR 계산부를 더 포함할 수 있다.
- [0018] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치에 있어서, 상기 파라미터 상호 다중 모델은, 상기 QR 계산부로부터 수신된 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)에 기반하여 상기 파라미터와 관련된 모드 확률들을 갱신하고,
- [0019] 상기 노이즈 상호 다중 모델은, 상기 파라미터 계산부로부터 수신된 시스템 행렬에 기반하여 상기 노이즈와 관련된 모드 확률들을 갱신할 수 있다.
- [0020] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치에 있어서, 상기 파라미터 상호 다중 모델은 상기 시스템의 복수 유형의 파라미터 각각과 관련된 상태를 추정하기 위한 복수의 칼만 필터 모델을 포함하고,
- [0021] 상기 노이즈 상호 다중 모델은 상기 시스템의 복수 유형의 노이즈 각각과 관련된 상태를 추정하기 위한 복수의 칼만 필터 모델을 포함할 수 있다.
- [0022] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치에 있어서, 상기 파라미터 상호 다중 모델 및 상기 노이즈 상호 다중 모델 각각은, 상기 시스템의 외부에서 발생하여 상기 시스템에 인가되는 외란을 확장 동역학 모델로 모델링한 외란값을 포함하는 시스템 행렬을 사용하여 모드 확률들을 획득할 수 있다.
- [0023] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치에 있어서, 상기 시스템은 전자식 조향 시스템을 포함할 수 있다.
- [0024] 상기 과제를 해결하기 위한 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법은,

- [0025] 복수의 상호 다중 모델이 병렬로 연결된 병렬연결 상호 다중 모델이, 시스템의 복합적인 고장과 관련된 모드 확률들을 획득하는 단계; 및
- [0026] 고장 검출 및 진단부가, 상기 병렬연결 상호 다중 모델에서 출력되는 모드 확률들에 기반하여 상기 시스템의 복합적인 고장을 검출하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0027] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법에 있어서, 상기 병렬연결 상호 다중 모델은,
- [0028] 상기 시스템의 파라미터와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 파라미터 상호 다중 모델; 및
- [0029] 상기 시스템의 노이즈와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 노이즈 상호 다중 모델을 포함할 수 있다.
- [0030] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법에 있어서, 상기 병렬연결 상호 다중 모델은,
- [0031] 상기 파라미터 상호 다중 모델의 모드 확률들을 고려하여 현재의 시스템 상태를 나타내는 시스템 행렬을 계산하는 파라미터 계산부; 및
- [0032] 상기 노이즈 상호 다중 모델의 모드 확률들을 고려하여 현재의 시스템의 노이즈 상태를 나타내는 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)을 계산하는 QR 계산부를 더 포함할 수 있다.
- [0033] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법에 있어서, 상기 파라미터 상호 다중 모델은, 상기 QR 계산부로부터 수신된 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)에 기반하여 상기 파라미터와 관련된 모드 확률들을 갱신하고,
- [0034] 상기 노이즈 상호 다중 모델은, 상기 파라미터 계산부로부터 수신된 시스템 행렬에 기반하여 상기 노이즈와 관련된 모드 확률들을 갱신할 수 있다.
- [0035] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법에 있어서, 상기 파라미터 상호 다중 모델은 상기 시스템의 복수 유형의 파라미터 각각과 관련된 상태를 추정하기 위한 복수의 칼만 필터 모델을 포함하고,
- [0036] 상기 노이즈 상호 다중 모델은 상기 시스템의 복수 유형의 노이즈 각각과 관련된 상태를 추정하기 위한 복수의 칼만 필터 모델을 포함할 수 있다.
- [0037] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법에 있어서, 상기 파라미터 상호 다중 모델 및 상기 노이즈 상호 다중 모델 각각은, 상기 시스템의 외부에서 발생하여 상기 시스템에 인가되는 외란을 확장 동역학 모델로 모델링한 외란값을 포함하는 시스템 행렬을 사용하여 모드 확률들을 획득할 수 있다.
- [0038] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법에 있어서, 상기 시스템은 전자식 조향 시스템을 포함할 수 있다.

발명의 효과

- [0039] 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에 의하면, 확장 상태 관측기를 이용하여 알 수 없는 외란값을 추정할 수 있다.
- [0040] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에 의하면, 고장 모델을 분류하는 기준 및 설계하는 방안을 제시할 수 있다.
- [0041] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에 의하면, 단일 필터 기반 고장 진단 방식과는 달리 확률적으로 시스템 파라미터를 추정하여 시스템 특성 변화에 강인하다.
- [0042] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에 의하면, 복합적인 시스템 고장 상태를 추정하기 위해 병렬연결 상호 다중 모델(PCIMM)을 사용하면 일반적인 상호 다중 모델(IMM) 필터를 사용할 때보다 고장 진단 성능이 크게 향상될 수 있다.
- [0043] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에

의하면, 전자식 조향(Electric Power Steering) 시스템 등과 같은 시스템이 기계적, 전기적으로 고장이 났을 때 어떠한 고장인지 판단해주는 알고리즘으로 병렬연결 상호 다중 모델(PCIMM: Parallel Connected Interacting Multiple Model)을 적용하여, 병렬적으로 구성된 모델들의 상호작용을 통해 어떠한 고장 상태가 가장 적합한지 확률적으로 알 수 있으므로 고장 제어를 빠르고 정확하게 할 수 있다.

[0044] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에 의하면, 단일 관측기만을 사용할 때보다 시스템 예측 정확도가 높아 여러 외부 요인의 영향을 받을 때나 알 수 없는 상황에 처했을 때도 시스템의 상태를 추정하여 안정적인 제어가 가능하도록 할 수 있다.

[0045] 또한, 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에 의하면, 기존의 상호 다중 모델(IMM) 알고리즘에서 고장 진단 성능 향상을 위한 새로운 구조의 설계 방식을 제시함으로써 다수의 상호 다중 모델(IMM: Interacting Multiple Model) 추정기들이 확률에 기반한 값을 업데이트 하도록 설계하여 더 복잡하고 복잡한 상황에서 추정 신뢰도를 높일 수 있어 시스템의 고장을 정확하게 진단할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0046] 도 1은 컬럼형 전자식 조향(C-EPS) 시스템의 구조를 도시한 도면.

도 2는 상호 다중 모델(IMM)의 구조를 도시한 도면.

도 3은 IMM의 고장 검출 및 진단 구조를 도시한 도면.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치를 도시한 도면.

도 5는 파라미터 상호 다중 모델의 상세 블록도.

도 6은 노이즈 상호 다중 모델의 상세 블록도.

도 7은 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법의 알고리즘을 도시한 도면.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법의 흐름도.

도 9는 모델들 간의 스위칭을 도시한 블록도.

도 10은 모터 고장시 IMM 시뮬레이션 결과를 도시한 도면.

도 11은 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법의 시뮬레이션 결과를 도시한 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0047] 본 발명의 목적, 특정한 장점들 및 신규한 특징들은 첨부된 도면들과 연관되어지는 이하의 상세한 설명과 바람직한 실시예들로부터 더욱 명백해질 것이다.

[0048] 이에 앞서 본 명세서 및 청구범위에 사용된 용어나 단어는 통상적이고 사전적인 의미로 해석되어서는 아니되며, 발명자가 그 자신의 발명을 가장 최선의 방법으로 설명하기 위해 용어의 개념을 적절하게 정의할 수 있는 원칙에 입각하여 본 발명의 기술적 사상에 부합되는 의미와 개념으로 해석되어야 한다.

[0049] 본 명세서에서 각 도면의 구성요소들에 참조번호를 부가함에 있어서, 동일한 구성 요소들에 한해서는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 번호를 가지도록 하고 있음에 유의하여야 한다.

[0050] 또한, "제1", "제2", "일면", "타면" 등의 용어는, 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하기 위해 사용되는 것으로, 구성요소가 상기 용어들에 의해 제한되는 것은 아니다.

[0051] 이하, 본 발명을 설명함에 있어, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 관련된 공지 기술에 대한 상세한 설명은 생략한다.

[0052] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시형태를 상세히 설명하기로 한다.

[0054] EPS 시스템의 고장 진단

[0055] EPS 시스템 모델

[0056] 도 1은 스티어링 컬럼(100)에 모터(102)가 위치한 컬럼형 전자식 조향(C-EPS) 시스템의 구조를 도시한 것이다. 여기서는 자율주행 차량의 EPS 시스템이라고 가정하고, 운전자 토크 T_d 를 0으로 가정한다.

[0057] 제어 레퍼런스인 θ_{hd} 를 전자제어장치인 ECU(Electronic Control Unit)(104)에 입력하면 모터(102)의 전압(U)을 조절하여 모터 토크를 생성하고, 모터 토크를 기어(106)에 의해 스티어링 컬럼(100)으로 전달하여, 결과적으로 스티어링 휠(108)의 각도(θ_h)가 제어 레퍼런스(θ_{hd} : 목표 스티어링 휠 각도)를 추종하게 된다.

[0059] 동역학 모델

[0060] EPS 시스템에 뉴턴 법칙을 적용하여 스티어링 컬럼(100), 모터(102), 기어(106), 랙/피니언(110)의 기계적, 전기적 파라미터들을 고려해 수학적 식 1과 같이 동역학 모델을 표현할 수 있다.

수학적 식 1

$$J_c \ddot{\theta}_h = -K_c \theta_c - B_c \dot{\theta}_c + \frac{K_c}{N} \theta_m + T_d$$

$$J_{eq} \ddot{\theta}_m = \frac{K_c}{N} \theta_h - K_N \theta_m - B_{eq} \dot{\theta}_m + K_t I_m - \frac{1}{N} T_r$$

$$L_m \dot{I}_m = -R_m I_m - K_t \dot{\theta}_m + U$$

[0061]

[0062] 여기서 $J_{eq} = J_m + (R_p^2/N^2)M_r$, $K_N = (K_c + K_r R_p^2)/N^2$, $B_{eq} = B_m + (R_p^2/N^2)B_r$ 이다.

[0063] 상기에서 J_c 는 스티어링 컬럼 관성 모멘트, θ_c 는 스티어링 휠 각도, K_c 는 스티어링 휠 강성, B_c 는 스티어링 휠 비스코스 댐핑, N은 모터 기어 비, θ_m 은 모터 각도 위치, T_d 는 운전자 토크, J_m 은 모터 관성 모멘트, R_p 는 스티어링 컬럼 피니언 반경, M_r 은 랙 질량, K_r 은 타이어 탄성률, B_m 은 모터 샤프트 비스코스 댐핑, B_r 은 랙의 비스코스 댐핑, θ_h 는 스티어링 휠 각도 위치, K_t 는 모터 토크 전압 상수, I_m 은 모터 전류, T_r 은 랙과 피니언에 대한 도로 리액션 토크, L_m 은 모터 인덕턴스, R_m 은 모터 저항, 그리고 U는 모터 단자 전압을 나타낸다.

[0064] EPS 시스템의 모터(102)에 의해 바퀴(112)가 좌우로 움직이게 되면 그에 해당하는 힘이 지면으로부터 작용하게 되는데, 이때 외란 T_r (Road reaction torque on the rack and pinion)이 발생한다. 하지만 외란(T_r)은 측정이 불가능한 값이므로 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에서는 관측기를 통한 추정을 위해 상태 변수가 확장된 모델을 구성한다.

[0065] 확장 상태 관측기로 외란(T_r)을 추정하기 위하여 상태 벡터 $\mathbf{x} = [\theta_h \ \omega_h \ \theta_m \ \omega_m \ I_m \ d]^T$ 와 입력 $u = U$ 를 가지는 동역학 모델을 구성한다. 이때 $d = T_r$ 이다. 상기에서 θ_h 는 스티어링 휠 각도 위치, ω_h 는 스티어링 휠 각속도, θ_m 은 모터 각도 위치, ω_m 은 모터 각속도, I_m 은 모터 전류, T_r 은 외란으로서 랙과 피니언

에 대한 도로 리액션 토크, 그리고 U 는 모터 단자 전압을 나타낸다.

$\dot{d} = 0$ 이라고 가정했을 때, 증강된 상태공간 방정식은 수학식 2와 같이 나타낼 수 있다.

수학식 2

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = A\mathbf{x}(t) + Bu(t)$$

$$\mathbf{y}(t) = C\mathbf{x}(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\left(\frac{K_c}{J_c}\right) - \left(\frac{B_c}{J_c}\right) & \frac{K_c}{J_c N} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{K_c}{J_{eq} N} & 0 & -\left(\frac{K_N}{J_{eq}}\right) - \left(\frac{B_{eq}}{J_{eq}}\right) & \frac{K_t}{J_{eq}} & -\left(\frac{1}{J_{eq} N}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\left(\frac{K_t}{L_m}\right) - \left(\frac{R_m}{L_m}\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서,

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_m} & 0 \end{bmatrix}^T \text{이며, } C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \text{ 이다.}$$

다중 모델 기반 고장 진단 알고리즘

EPS 고장에 대한 안정성과 신뢰성을 확보하기 위하여 고장 발생 시 고장을 진단하고 분류할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 본 발명에서는 여러 고장 상태의 시스템 모델들을 설계하고 다중 필터가 병렬적으로 관측을 하는 다중 모델 구조(Multi model structure)를 설계한다.

도 2는 상호 다중 모델(IMM: Interacting Multiple Model)에 기반한 고장 검출 및 진단 구조를 도시한 도면이고, 도 3은 상호 다중 모델(IMM)(300)의 구조를 도시한 도면이다.

도 2에 도시된 상호 다중 모델(IMM)에 기반한 고장 검출 및 진단 구조는 제어부(204)에 포함될 수 있다. 제어부(204)는, EPS 시스템(202)으로부터 입력값인 모터 터미널 전압(u_k)과 출력값인 스티어링 휠 각도(y_k)를 수신하여, 각 모델에서 추정된 모드 확률을 출력하는 상호 다중 모델(206) 및 모드 확률들에 기반하여 EPS 시스템(202)의 고장을 검출하고 진단하는 고장 검출 및 진단부(208)를 포함할 수 있다.

칼만 필터(306_1 내지 306_n)

상호 다중 모델(IMM)(206, 300)은 Zero-Order Hold(ZOH)를 이용해 이산화된 모델에 칼만 필터(Kalman filter)를 적용한 필터 모델들(306_1 내지 306_n)로 구성될 수 있다. 확장 상태 관측기로서 사용된 칼만 필터는 과거의 정보와 새로운 측정값을 이용하는 알고리즘이다. 예측과 추정 단계가 시스템에 대하여 재귀적으로 작용하여 실제 출력값에 가까워지도록 반복적으로 값을 업데이트한다. 그와 동시에 가우시안 노이즈(Gaussian noise)의 영향을 고려하여 최적화된 관측기 이득을 통해 상태 변수를 추정할 수 있다.

상호 다중 모델(206, 300)

고장이 발생한 특정 파라미터를 찾기 위해 IMM을 기반으로 Markov chain rule을 따르는 확률적 다중 모델의 병렬 구조를 설계한다. Markov 확률 분포를 가지는 시스템에 Bayesian 이론에 근거한 상호작용을 만드는 IMM 추정

기는 가장 간단하고 비용 효율적인 시스템 추정 알고리즘 중 하나이다.

[0080] 도 3의 구조는 n개의 칼만 필터(KF) 모델(306_1 내지 306_n)로 구성된 상호 다중 모델(IMM)(300)이다, 서로 다른 모드에서 가장 가능도(Likelihood)가 높은 모드를 추정하게 되는데, 이때 모드 확률(Mode probability)과 전이 확률(Transition probability)에 따라 모드 i에서 가장 확률이 높은 모드 j로 모드 간 전환이 일어나고 병렬적으로 필터링된다. 이러한 IMM 추정기는 믹싱(304), 필터링(306_1 내지 306_n)의 반복적인 과정과 머징(310) 과정을 통해 최종 추정값을 도출하며, 다음과 같은 재귀적 알고리즘을 수행한다.

[0082] 믹싱 확률 계산부(302) 및 믹싱부(304)

[0083] 믹싱 확률 계산부(302)는, 현재 각 모델의 확률인 모드 확률(μ_{k-1}^i)과 전이 행렬(π_{ij})에 기반하여 믹싱 확률(μ_k^{ij})을 계산할 수 있다. 믹싱 확률(μ_k^{ij})은 수학식 3과 같이 정의되며, 전체 n개의 모델(306_1 내지 306_n) 간에 상호 작용이 일어날 확률이 정의된 행렬이다.

수학식 3

$$\mu_k^{ij} = \frac{1}{c_j} \pi_{ij} \mu_{k-1}^i$$

$$c_j = \sum_{i=1}^n \pi_{ij} \mu_{k-1}^i$$

[0084]

[0085] 여기서 c_j 는 모델 j에 대한 정규화 인자이며, j는 필터 모델 번호, k는 필터 스텝을 나타낸다. 믹싱부(304)는 상호 작용 후의 상태 변수와 공분산인 믹싱된 상태($\hat{x}_k^{0j}$)와 믹싱된 공분산(Σ_k^{0j})을 수학식 4에 기반하여 계산할 수 있다.

수학식 4

$$\hat{x}_k^{0j} = \sum_{i=1}^n \mu_k^{ij} \hat{x}_{k-1}^i$$

$$\Sigma_k^{0j} = \sum_{i=1}^n \mu_k^{ij} \left[\Sigma_{k-1}^i + (\hat{x}_{k-1}^i - \hat{x}_k^{0j})(\hat{x}_{k-1}^i - \hat{x}_k^{0j})^T \right]$$

[0086]

[0087] 여기서 $(\hat{x}_{k-1}^i - \hat{x}_k^{0j})(\hat{x}_{k-1}^i - \hat{x}_k^{0j})^T$ 는 모델의 불확실성을 의미한다. 이 과정에서는 칼만 필터의 보정 과정으로부터 나온 모델별 추정값인 추정된 상태($\hat{x}_{k-1}^i$)와 추정된 공분산(Σ_{k-1}^i)이 믹싱 확률(μ_k^{ij})에 의해 전체적인 모델 간에 확률적인 보정이 일어난다.

[0089] 필터링(306_1 내지 306_n)

[0090] 칼만 필터(306_1 내지 306_n)는 예측과 추정 단계를 재귀적으로 반복하는 관측기이다. 단일 칼만 필터와의 차이점은 예측 단계에서 믹싱 과정의 상호 작용에 의해 확률적 보정이 일어난 값으로 예측을 한다는 것이다.

[0091] 예측은 수학식 5에 기반하여 수행될 수 있다.

수학식 5

[0092]

$$\bar{x}_k^j = \Phi_k^j \hat{x}_k^{0j} + \Gamma_k^j u_k$$

[0093]

$$\bar{\Sigma}_k^j = \Phi_k^j \bar{\Sigma}_k^{0j} (\Phi_k^j)^T + Q_k^j$$

[0094]

Φ_k^j 는 수학식 2에 기재된 행렬 A를 이산화한 행렬을 나타내고, Γ_k^j 는 수학식 2에 기재된 행렬 B를 이산화한 행렬을 나타낼 수 있다.

[0095]

보정은 수학식 6 및 수학식 7에 기반하여 수행될 수 있다.

수학식 6

[0096]

$$\hat{x}_k^j = \bar{x}_k^j + K_k^j v_k^j$$

수학식 7

[0097]

$$v_k^j = y_k - \bar{y}_k^j$$

[0098]

$$S_k^j = C_k^j \bar{\Sigma}_k^j (C_k^j)^T + R_k^j$$

[0099]

$$K_k^j = \bar{\Sigma}_k^j (C_k^j)^T (S_k^j)^{-1}$$

[0100]

$$\bar{\Sigma}_k^j = \bar{\Sigma}_k^j - K_k^j S_k^j (K_k^j)^T$$

[0101]

C_k^j 는 수학식 2에 기재된 행렬 C를 나타낼 수 있다.

[0103]

모드 확률 계산부(모드 확률 갱신)(308)

[0104]

새로운 측정값(y_k)과 예측된 값($\bar{y}_k^j$)의 차이를 칼만 필터(306_1 내지 306_n)로부터 $v_k^j = y_k - \bar{y}_k^j$ 에 의해 구할 수 있다. 새로운 측정값(y_k)은 측정된 출력값으로서 측정된 스티어링 휠 각도를 의미하고, 예측된 값($\bar{y}_k^j$)은 예측된 출력값으로서 예측된 스티어링 휠 각도를 의미할 수 있다.

[0105]

모든 모델의 오차와 오차 공분산을 따져 측정값에 가장 적합한 모델을 선정할 수 있는데, 이때 모델들의 가능도를 가능도 함수(Likelihood function)를 통해 수학식 8과 같이 구할 수 있다.

수학식 8

$$A_k^j = \frac{1}{|2\pi S_k^j|^{1/2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (v_k^j)^T (S_k^j)^{-1} v_k^j \right]$$

모드 확률 계산부(308)는, 모델들의 가능도(A_k^j)에 의해 현재 시스템에 대한 적합도라 할 수 있는 모드 확률(μ_k^j)을 수학식 9에 기반하여 획득할 수 있다.

수학식 9

$$\mu_k^j = \frac{c_j A_k^j}{\sum_{i=1}^n c_i A_k^i}$$

모드 확률(μ_k^j)과 추정된 상태($\hat{x}_k^j$), 추정된 공분산(Σ_k^j)은 재귀적으로 다음 단계에서 다시 모델 간 믹싱이 일어난다.

머징부(310)

이 과정에서는 모든 모델의 확률을 기반으로 최종 추정값을 도출하며, 필터의 추정값이 필요할 때 구하게 된다. 머징부(310)는 수학식 10에 기반하여 각 모델의 추정값들의 모드 확률에 대한 기대값을 구하여 최종 추정값($\hat{x}_k$)을 획득할 수 있다.

수학식 10

$$\hat{x}_k = \sum_{j=1}^n \mu_k^j \hat{x}_k^j$$

$$\Sigma_k = \sum_{j=1}^n \mu_k^j \left[\Sigma_k^j + (\hat{x}_k^j - \hat{x}_k)(\hat{x}_k^j - \hat{x}_k)^T \right]$$

병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법

상호 다중 모델(IMM)의 고장 진단과 상태 변수 추정 성능을 조금 더 개선하기 위하여, 본 발명은 병렬연결 상호 다중 모델(PCIMM: Parallel Connected Interacting Multiple Model) 구조를 제시한다. 하나의 상호 다중 모델(IMM) 내에서 칼만 필터들이 서로 상호 작용하듯이 새로운 방식은 다수의 상호 다중 모델(IMM) 추정기들이 병렬적인 구조로 구성되어 IMM 간에 확률에 기반한 값을 업데이트하여 서로 상호보완하도록 설계될 수 있다.

이러한 PCIMM 구조를 사용하면 IMM의 상태 추정 성능을 향상시켜 더 복잡하고 복합적인 상황에서 상태 추정이 가능하다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치를 도시한 도면이다.

- [0119] 도 4에 도시된 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치는 제어부(404)에 포함될 수 있다. 제어부(404)는, EPS 시스템(402)으로부터 입력값인 모터 터미널 전압(u_k)과 출력값인 스티어링 휠 각도(y_k)를 수신하여, 각 모델에서 추정된 모드 확률들을 출력하는 병렬연결 상호 다중 모델(406) 및 모드 확률들에 기반하여 EPS 시스템(402)의 고장을 검출하고 진단하는 고장 검출 및 진단부(408)를 포함할 수 있다.
- [0120] 상기 병렬연결 상호 다중 모델(406)은, 상기 EPS 시스템(402)의 파라미터와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 파라미터 상호 다중 모델(410) 및 상기 EPS 시스템(402)의 노이즈와 관련된 모드 확률들을 획득하기 위한 노이즈 상호 다중 모델(412)을 포함할 수 있다.
- [0121] 또한, 상기 병렬연결 상호 다중 모델(406)은, 상기 파라미터 상호 다중 모델(410)의 모드 확률들을 고려하여 현재의 EPS 시스템(402) 상태를 나타내는 시스템 행렬을 계산하는 파라미터 계산부(414) 및 상기 노이즈 상호 다중 모델(412)의 모드 확률들을 고려하여 현재의 EPS 시스템(402)의 노이즈 상태를 나타내는 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)을 계산하는 QR 계산부(416)를 더 포함할 수 있다.
- [0122] 차량이 동작 중에 EPS 시스템(402)에서 출력값(y_k)으로서 스티어링 휠 각도(θ_h)를 받을 수 있다. 이때 EPS 시스템(402)은 EPS 모터(102)의 단자 전압(U)을 입력으로 받는다. 각각의 상호 다중 모델(IMM)(410)은 다중 필터로 여기서는 여러 개의 칼만 필터로 구성되어 있다. 각각의 칼만 필터는 고유의 고장 필터 모델들로 설계되어 있으며 EPS 시스템(402)이 적합한 고장 상태가 되었을 때, 해당되는 고장 모델의 확률이 증가한다. Bayesian 확률 이론에 근거하여 Markov 확률 분포에 따라 모델들이 상호작용을 일으켜 비용효율적으로 시스템을 추정할 수 있다.
- [0123] 이러한 IMM 필터는 시스템의 입력과 출력을 기반으로 모델들의 적합도를 가능도 함수(likelihood function)를 통해 나타낼 수 있다. 현재 시스템 특성에 가장 적합하다고 판단되는 모델이 현재 시스템의 고장 상태인 것이다. 확률적으로 시스템의 상태를 추정하는 IMM 필터는 단일 필터를 이용한 추정 방식과 비교하여 여러 고장 상황에 대해 유연하게 대처할 수 있다는 것이 장점이다. 만약 한가지 고장상황이 아닌 둘 이상의 고장이 복합적으로 발생하는 상황이라면 병렬연결 상호 다중 모델(PCIMM)을 적용하는 것이 적합하다.
- [0124] PCIMM은 동시에 일어나는 여러 고장 상황을 미리 범주화하여 고장을 설계하고 그에 따라서 복합 고장을 검출하고 진단하는 것이 가능하다. 도 4에서는 하나의 예시로 두 가지의 복합 고장에 대한 PCIMM의 블록선도를 나타내었는데, 먼저 파라미터 상호 다중 모델(410)에서는 EPS 시스템(402)의 파라미터 고장, 즉 스티어링 휠의 마찰력 증가, 랙과 피니언의 마찰력 증가, EPS 모터의 전기적 저항 증가 등에 대한 고장을 진단할 수 있으며, 노이즈 상호 다중 모델(412)에서는 EPS 시스템(402)의 출력 센서의 노이즈 증가 고장을 진단할 수 있게 설계되었다.
- [0125] 이러한 두 가지 형태로 설계된 IMM은 PCIMM이라는 하나의 시스템에 묶여 병렬적으로 각각의 고장을 진단하며 이 두 가지의 모드 확률(mode probability)을 기반으로 상호 작용 모드 확률(interacted mode probability)을 도출해 내어 정확한 시스템의 고장 상태를 판단할 수 있다.
- [0126] 한편, 도 5를 참조하면, 상기 파라미터 상호 다중 모델(410)은, 믹싱 확률 계산부(500), 믹싱부(502), 제1 내지 제4 칼만 필터 모델(504_1 내지 504_4), 모드 확률 계산부(506) 및 머징부(508)를 포함할 수 있다.
- [0127] 도 6을 참조하면, 상기 노이즈 상호 다중 모델(412)은, 믹싱 확률 계산부(600), 믹싱부(602), 제1 내지 제3 칼만 필터 모델(604_1 내지 604_3), 모드 확률 계산부(606) 및 머징부(608)를 포함할 수 있다.
- [0128] 도 5에 도시된 파라미터 상호 다중 모델(410)과 도 6에 도시된 노이즈 상호 다중 모델(412) 각각은 칼만 필터의 개수만 상이하고, 나머지 구조는 도 3에 도시된 상호 다중 모델(300)의 구조와 동일하므로, 이에 대한 설명은 생략하기로 한다.
- [0129] 도 4에 도시된 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치는 2개의 상호 다중 모델(IMM), 즉 파라미터 상호 다중 모델(410) 및 노이즈 상호 다중 모델(412)로 구성되어 있을 수 있다.
- [0130] 먼저, 파라미터 상호 다중 모델(410)에서는 모드 확률을 고려하여 현재의 시스템 상태에 가장 잘 맞는 시스템 행렬을 찾아서 노이즈 상호 다중 모델(412)로 업데이트할 수 있다.
- [0131] 그리고 노이즈 상호 다중 모델(412)에서는 파라미터 상호 다중 모델(410)로부터 받은 시스템 행렬을 활용하여

노이즈 상호 다중 모델(412) 내의 모드 확률을 고려한 시스템 노이즈 공분산(Q)과 출력 노이즈 공분산(R) 값을 찾아줄 수 있다.

[0132] 이후에는 Q, R 값이 다시 파라미터 상호 다중 모델(410)에서 활용될 수 있도록 업데이트하는 방법으로 반복적으로 상호 작용할 수 있다.

[0133] 도 7은 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법의 알고리즘을 도시한 도면이다.

[0135] 파라미터 업데이트(갱신)

[0136] 파라미터 상호 다중 모델(410)에서는 모든 모델이 동일한 Q, R을 가진다. 모드 확률이 업데이트되는 단계 후에 한 번의 단계를 더 거친다. 이 단계에서는 모드 확률을 고려한 모델들의 파라미터 행렬, 즉 시스템 행렬 (Φ_k, Γ_k, C_k)을 노이즈 상호 다중 모델(412)에 업데이트할 수 있다.

[0138] Q, R 업데이트(갱신)

[0139] 노이즈 상호 다중 모델(412)에서는 모든 모델이 동일한 파라미터 행렬을 가진다. 모드 확률을 고려한 모델들의 시스템 노이즈 공분산(Q_k), 출력 노이즈 공분산(R_k)을 파라미터 상호 다중 모델(410)에 업데이트한다.

[0140] 이때 파라미터 업데이트와 Q, R 업데이트는 동일한 단계에서 병렬적으로 일어날 수 있다.

[0141] 한편, 도 7에서 참조번호 700으로 표시된 박스 안의 시스템 행렬(Φ_k, Γ_k, C_k)은 수학식 11에 기반하여, 파라미터 계산부(414)에서 계산될 수 있다.

수학식 11

$$\begin{aligned}\hat{\Phi}_k &= \sum_{j=1}^n \mu_{k,\#1}^j \hat{\Phi}_k^j \\ \hat{\Gamma}_k &= \sum_{j=1}^n \mu_{k,\#1}^j \hat{\Gamma}_k^j \\ \hat{C}_k &= \sum_{j=1}^n \mu_{k,\#1}^j \hat{C}_k^j\end{aligned}$$

[0142]

[0143] Φ_k^j 는 수학식 2에 기재된 행렬 A를 이산화한 행렬을 나타내고, Γ_k^j 는 수학식 2에 기재된 행렬 B를 이산화한 행렬을 나타내며, C_k^j 는 수학식 2에 기재된 행렬 C를 나타낼 수 있다. 즉, 시스템 행렬(Φ_k, Γ_k, C_k)은 수학식 11에 기재된 바와 같이, 행렬 A를 이산화한 행렬, 행렬 B를 이산화한 행렬 및 행렬 C에 기반하여 갱신될 수 있다. 본 발명의 일 실시예에서, Φ_k 와 $\hat{\Phi}_k$ (추정값), Γ_k 와 $\hat{\Gamma}_k$ (추정값) 그리고 C_k 와 $\hat{C}_k$ (추정값) 각각은 동일한 의미를 가지며, 혼용되어 기재될 수 있다.

[0144] 또한, 시스템 노이즈 공분산(Q_k) 및 출력 노이즈 공분산(R_k)은 수학식 12에 기반하여 QR 계산부(416)에서 계산될 수 있다.

수학식 12

$$\begin{aligned}\hat{Q}_k &= \sum_{j=1}^n \mu_{k,\#2}^j \hat{Q}_k^j \\ \hat{R}_k &= \sum_{j=1}^n \mu_{k,\#2}^j \hat{R}_k^j\end{aligned}$$

$\hat{Q}_k^j$ 와 $\hat{R}_k^j$ 의 초기값은 시뮬레이션에 의해 또는 실험에 의해 적합한 값으로 설정되고, 이후 수학식 12에 의해 갱신될 수 있다. 본 발명의 일 실시예에서, Q_k 와 $\hat{Q}_k$ 그리고 R_k 와 $\hat{R}_k$ 각각은 동일한 의미를 가지며, 혼용되어 기재될 수 있다.

도 8은 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 방법의 흐름도이다.

도 4 및 도 8을 참조하면, 단계 S800에서, 병렬연결 상호 다중 모델(406)이, EPS 시스템(402)의 복합적인 고장과 관련된 상호 작용 모드 확률들을 획득할 수 있다.

단계 S802에서, 고장 검출 및 진단부(408)는 상기 병렬연결 상호 다중 모델(406)에서 출력되는 상호 작용 모드 확률들에 기반하여 상기 EPS 시스템(402)의 복합적인 고장을 검출할 수 있다.

예시적으로, 고장 검출 및 진단부(408)는 상호 작용 모드 확률들을 소정의 기준값, 예를 들어 0.5(50%)와 비교하여, 상호 작용 모드 확률이 0.5 이상인 경우, 정상 또는 고장으로 판단하여, 고장을 복합적으로 검출할 수 있다.

파라미터 상호 다중 모델(410)이 모델 1(정상), 모델 2(고장 1: 스티어링 컬럼의 댐핑이 증가하는 고장 상태), 모델 3(고장 2: 모터에서 저항이 증가하는 고장 상태) 및 모델 4(고장 3: 랙/피니언에서 댐핑이 증가하는 고장 상태)에 대한 상호 작용 모드 확률들을 출력하고, 노이즈 상호 다중 모델(412)이 모델 5(정상), 모델 6(고장 4: 시스템 노이즈가 증가하는 고장 상태) 및 모델 7(고장 5: 출력 노이즈가 증가하는 고장 상태)에 대한 상호 작용 모드 확률들을 출력하는 경우, 그리고 모델 2(고장 1: 스티어링 컬럼의 댐핑이 증가하는 고장 상태)에 대한 상호 작용 모드 확률이 0.5 이상이고, 모델 7(고장 5: 출력 노이즈가 증가하는 고장 상태)에 대한 상호 작용 모드 확률이 0.5 이상인 경우, 고장 검출 및 진단부(408)는 고장 1(스티어링 컬럼의 댐핑이 증가하는 고장 상태) 및 고장 5(출력 노이즈가 증가하는 고장 상태)가 발생한 것으로 판단하여, EPS 시스템(402)에서 스티어링 컬럼의 댐핑이 증가하는 고장 및 출력 센서의 노이즈가 증가하는 고장이 발생했다는 것을 알 수 있다.

EPS 시스템(402)의 복합적인 고장과 관련된 상호 작용 모드 확률들을 획득하는 단계(S800)는, 파라미터 상호 다중 모델(410)이 QR 계산부(416)로부터 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)을 획득하는 단계(단계 S804), 파라미터 상호 다중 모델(410)이 QR 계산부(416)로부터 획득된 시스템 노이즈 공분산(Q)과 출력 노이즈 공분산(R)에 기반하여 모드 확률을 갱신하는 단계(단계 S806) 및 파라미터 계산부(414)가 시스템 행렬(Φ_k, Γ_k, C_k)을 계산하는 단계(단계 S808)를 포함할 수 있다.

또한, EPS 시스템(402)의 복합적인 고장과 관련된 상호 작용 모드 확률들을 획득하는 단계(S800)는, 노이즈 상호 다중 모델(412)이 파라미터 계산부(414)로부터 시스템 행렬(Φ_k, Γ_k, C_k)을 획득하는 단계(단계 S810), 노이즈 상호 다중 모델(412)이 파라미터 계산부(414)로부터 획득된 시스템 행렬(Φ_k, Γ_k, C_k)에 기반하여 모드 확률을 갱신하는 단계(단계 S812) 및 QR 계산부(416)가 시스템 노이즈 공분산(Q_k)과 출력 노이즈 공분산(R_k)을 계산하는 단계(단계 S814)를 더 포함할 수 있다.

모의 실험 결과

고장 상태 모델링

[0157] EPS 시스템에서 발생할 수 있는 파라미터 고장의 종류는 크게 기계적 고장, 전기적 고장으로 나눌 수 있다.

[0158] 하지만 EPS 시스템은 많은 기계, 전기장치들로 구성되어 있기 때문에 각 시스템의 파라미터 변화에 의한 고장 상태를 모델링해주기 위해서는 여러 요인을 고려해주어야 한다. 본 발명에서는 스티어링 컬럼, 모터, 랙/피니언 시스템에 대한 고장을 대표적으로 선정했다. 먼저, 스티어링 컬럼과 랙/피니언 시스템에서 갑작스러운 외부 요인에 의해 마찰력이 증가하게 되는 경우 각각의 댐핑인 B_c , B_r 의 변화가 일어나는 것으로 기계적 고장을 나타냈다. 그리고 모터에서 저항 R_m 이 증가하게 될 경우 모터에 흐르는 전류에 변화가 생기므로 시스템에 미치는 영향이 크다. 따라서 이를 전기적 고장으로 나타냈다.

[0159] 정상적으로 동작하는 EPS 시스템 모델을 Model 1로 정하고, 스티어링 컬럼의 댐핑 B_c 가 증가하는 고장 상태를 Model 2, 모터에서 저항 R_m 이 증가하는 고장 상태를 Model 3, 랙/피니언에서 댐핑 B_r 이 증가하는 경우를 Model 4로 하여, 표 1과 같이 총 4개의 모델을 구성하였다. 표 1은 예시적인 EPS 시스템에서의 고장 모델링을 나타낸 것이다. 여기서 B_c^1, R_m^1, B_r^1 은 Model 1의 파라미터값들이다.

표 1

Model No.	Fault	Fault modeling
1	Normal operating	-
2	B_c fault (Mechanical fault: increased friction of the steering wheel system)	$10 * B_c^1$
3	R_m fault (Electrical fault: increased resistance of the motor)	$10 * R_m^1$
4	B_r fault (Mechanical fault: increased friction of the rack and pinion system)	$10 * B_r^1$

[0160]

[0162] 실험 환경 설정

[0163] 각 모드의 확률들의 합과 전이행렬의 행의 합은 1을 유지하도록 모드 확률의 초기값 μ_0^i 와 전이행렬 π_{ij} 를 설정 해주어야 한다. 본 발명의 일 실시예에서는 수학적 13과 같이, 모드 확률의 초기값을 4개의 모델에 대하여 0.25로 모두 동일한 확률을 주었으며, 도 9에 도시된 바와 같이 전이행렬은 정상 동작 상태에서 세 가지의 고장 상태로 전환될 수는 있지만 어떠한 특정한 고장 상태에서는 정상 상태로만 전환될 수 있도록 설계했다. 본 발명의 실시예에서는 확률 100%를 1로 설정하였다.

수학적 13

$$\mu_0^i = [0.25 \ 0.25 \ 0.25 \ 0.25]$$

$$\pi_{ij} = \begin{bmatrix} 0.997 & 0.001 & 0.001 & 0.001 \\ 0.001 & 0.999 & 0 & 0 \\ 0.001 & 0 & 0.999 & 0 \\ 0.001 & 0 & 0 & 0.999 \end{bmatrix}$$

[0164]

[0166] 단일 칼만 필터와 상호 다중 모델(IMM) 성능 비교

[0167] 고장 진단 성능을 검증하기 위해 정상 동작 중에 20초 부근부터 한 종류의 고장이 발생하며, 이때 알고리즘적으로 적합한 모델의 가능도가 증가하면서 모드 확률이 증가하게 된다. 결과적으로는 세 가지의 고장에 대해서 모두 노이즈 성분을 줄이면서 상태 변수를 추정할 수 있었다.

[0168] 도 10은 대표적으로 모터의 전기적 고장상황을 가정하여 R_m 이 7배만큼 증가하는 경우에 대한 모의 실험 결과이다. IMM은 각기 다른 네 가지 타입의 칼만 필터 모델로 구성되어 확률적으로 추정값을 보정하므로 단일 칼만 필터를 사용할 때보다 고장 검출 성능에서 차이가 있었다. 도 10a와 도 10b를 참조하면, 고장을 분류하고 진단하는 데 있어서 IMM은 단일 칼만 필터를 사용할 때보다 훨씬 좋은 성능을 보여주는 것을 알 수 있다.

[0169] 칼만 필터 외에 Unscented Kalman filter나 Extended Kalman filter와 같은 단일 필터는 정상 상태의 시스템 모델 파라미터를 기반으로 추정하기 때문에 여러 필터 모델을 포함하는 IMM에 비해 고장 추정 성능이 떨어질 수밖에 없다. 단일 필터들은 갑자기 변한 시스템을 따라가기 힘든 반면, IMM은 고장난 시스템의 출력값을 거의 정확히 추정한다.

[0170] 또한 도 10c와 같이 시스템이 변화함과 동시에 그에 해당하는 Model 3의 확률은 상승하지만 해당하지 않는 고장 상태의 모드 확률은 유효 확률인 50%를 넘어가지 않았다. 따라서 시스템이 크게 변하더라도 IMM은 여러 칼만 필터 모델의 확률적인 상호 작용에 의해 단일 관측기에 비해 지속적으로 상태를 추정하는 능력이 탁월하여 빠르고 정확한 고장 검출을 하는 것을 확인할 수 있었다.

[0171] 여기서 확장 상태 관측기(Extended state observer)를 사용하여 외란 T_r 을 추정한 결과는 도 10d와 같다. T_r 은 바퀴의 방향이 회전함으로써 생기는 반발력 토크이므로 스티어링 휠 각도(Steering wheel angle)에 반대 방향으로 작용하는 토크값을 임의로 발생시켰으며 이때의 추정값이 실제 필터에 적용되었다.

[0173] 병렬연결 상호 다중 모델(PCIMM) 성능 검증

[0174] 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에서는 2개의 상호 다중 모델(IMM)로 구성된 병렬연결 상호 다중 모델(PCIMM)에 대한 모의 실험을 수행하였다. 파라미터 IMM 모델링은 표 1과 동일하고, 노이즈 IMM 모델링은 표 2와 같다.

표 2

Model No.	Weight(Q)	Weight(R)	Modeling
1	1	1	Default Q, Default R
2	1	1/100	Default Q, R ↓
3	1	100	Default Q, R ↑
Default Q, R			
$Q = \text{diag}([0.1 \ 0.01 \ 0.1 \ 0.01 \ 0.05 \ 0.1]) * 10^{-3}$ $R = 0.1$			

[0175]

[0176] IMM 추정기는 기본적으로 출력을 받아서 필터링을 하는 알고리즘이기 때문에 센서 노이즈와 관련된 R의 변화에 따라 노이즈(QR) 모델을 선정하였다.

[0177] 이러한 모델을 기반으로 도 11에 도시된 바와 같이, 앞선 실험 환경과는 다른 고장 상황에서 모의 실험을 진행하였다. 도 11a를 참조하면, 20초 부근부터 한 종류의 파라미터 고장이 발생하는 것은 같으나 추가적으로 10초에서 30초 사이에 센서 노이즈(R)가 정상 상태의 60배가 증가하는 복합적인 고장 상황을 가정하였다.

[0178] 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법은, 단일 고장이 아닌 두 가지의 고장 상황이 발생했음에도 불구하고, 도 11b 내지 도 11f에 도시된 바와 같이, IMM 추정기 모델들의 확률적인 상호작용을 통해 서로의 고장 상황에 대한 가능성을 보정하여 노이즈에 상관없이 변화하는 시스템 특성을 잘 추정할 수 있는 것을 확인하였다.

[0179] 표 3은 단일 IMM과 PCIMM의 평균 제곱근 오차(RMSE: Root Mean Square Error)를 비교한 것이다.

표 3

		x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	y
RMSE	Single IMM	0.290	4.734	3.907	54.468	9.983	3.884
	PCIMM	0.204	2.730	2.746	24.587	3.664	0.204

[0180]

[0181] 표 3을 참조하면, 단일 IMM을 사용할 때보다 PCIMM을 사용하는 경우 추정 정확도가 높아져 RMSE 값이 크게 줄었음을 알 수 있다.

[0182] 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법에서는 횡방향 제어의 안정성을 향상시키기 위해 고장 진단 알고리즘을 적용하여 EPS 시스템의 고장 상황에 대한 신뢰성을 높이고자 하였다. 바퀴와 지면 사이에서 발생하는 외란 T_r 을 고려한 확장 동역학 모델을 제시하고 EPS 시스템의 기계적, 전기적 고장들을 분석하여 여러 고장 상황을 모델링함으로써 EPS 시스템에 적합한 다중 모델을 설계할 수 있었다.

[0183] IMM은 칼만 필터의 여러 모델이 병렬 구조로 구성되어 확률적인 상호작용을 통해 빠르게 변하는 시스템 특성을 추정하는 것이 가능하며, 단일 칼만 필터를 적용하는 것보다 시스템을 추종하는 관점에서 더 강력한 성능을 보여주었다. 또한 IMM의 복잡한 고장 상황에서의 성능을 향상시킬 수 있는 PCIMM을 제시하고 검증하였다.

[0184] 본 발명의 일 실시예에 의한 병렬연결 상호 다중 모델을 이용한 시스템 고장 진단 장치 및 방법은 EPS 시스템뿐만 아니라, 다양한 시스템의 기계적, 전기적 고장들을 분석하여 고장을 진단하거나, 시스템의 상태를 추정하는데 적용될 수 있다.

[0185] 이상 본 발명을 구체적인 실시예를 통하여 상세하게 설명하였으나, 이는 본 발명을 구체적으로 설명하기 위한 것으로, 본 발명은 이에 한정되지 않으며, 본 발명의 기술적 사상 내에서 당 분야의 통상의 지식을 가진 자에 의해 그 변형이나 개량이 가능함은 명백하다고 할 것이다.

[0186] 본 발명의 단순한 변형 내지 변경은 모두 본 발명의 영역에 속하는 것으로, 본 발명의 구체적인 보호 범위는 첨부된 청구범위에 의하여 명확해질 것이다.

부호의 설명

[0187] 100 : 스티어링 컬럼 102 : 모터
 104 : ECU 106 : 기어
 108 : 스티어링 휠 110 : 랙/피니언
 112 : 바퀴 202, 402 : EPS 시스템
 204, 404 : 제어부 206, 300 : 상호 다중 모델(IMM)
 208, 408 : 고장 검출 및 진단부 302, 500, 600 : 믹싱 확률 계산부
 304, 502, 602 : 믹싱부
 306_1 내지 306_n : 제1 내지 제n 칼만 필터
 308, 506, 606 : 모드 확률 계산부 310, 508, 608 : 머징부

406 : 병렬연결 상호 다중 모델 410 : 파라미터 상호 다중 모델

412 : 노이즈 상호 다중 모델 414 : 파라미터 계산부

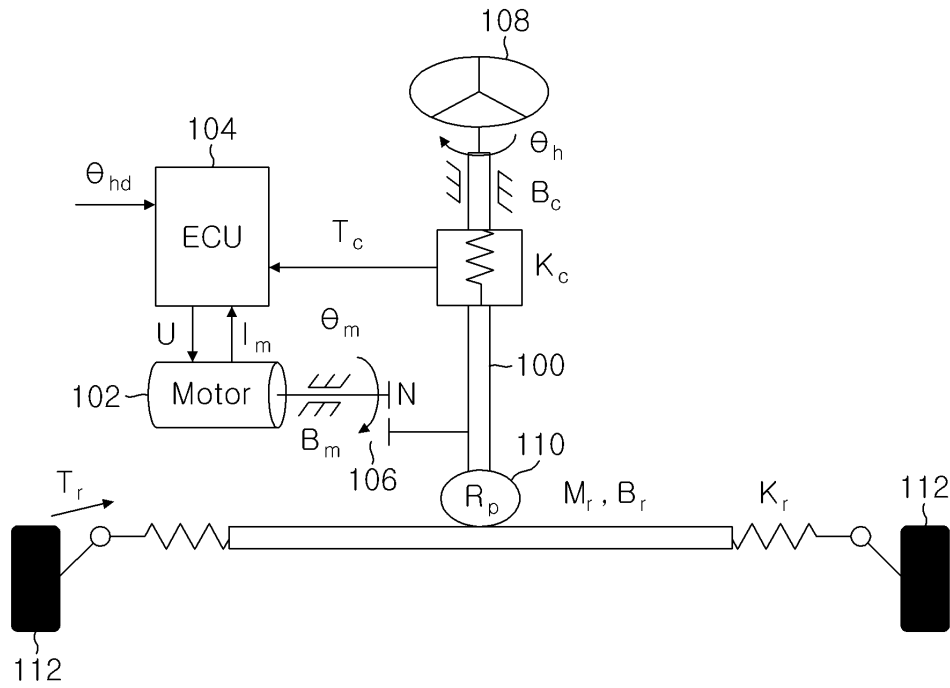
416 : QR 계산부

504_1 내지 504_4 : 제1 내지 제4 칼만 필터

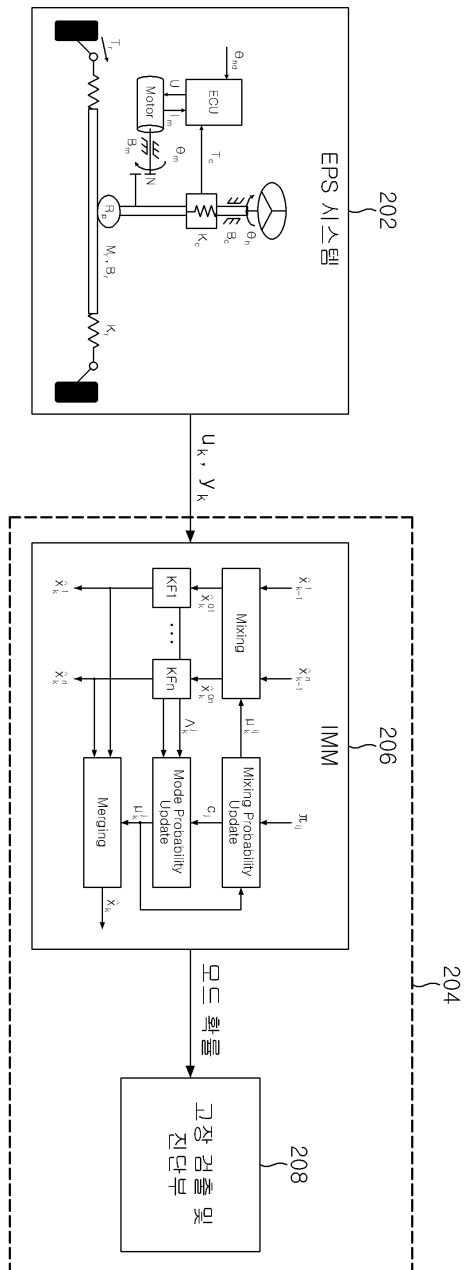
604_1 내지 604_3 : 제1 내지 제3 칼만 필터

도면

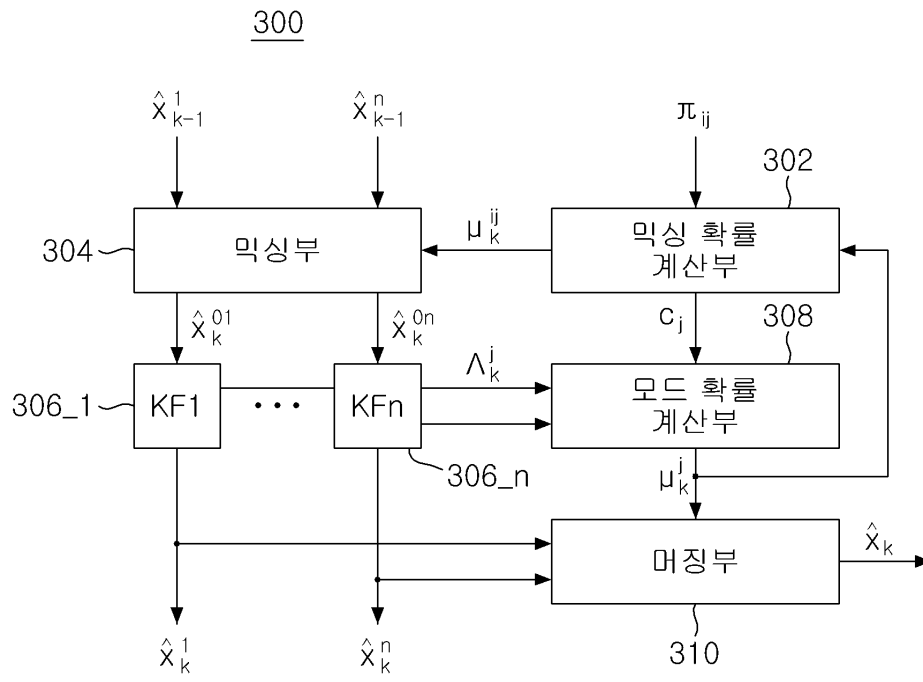
도면1



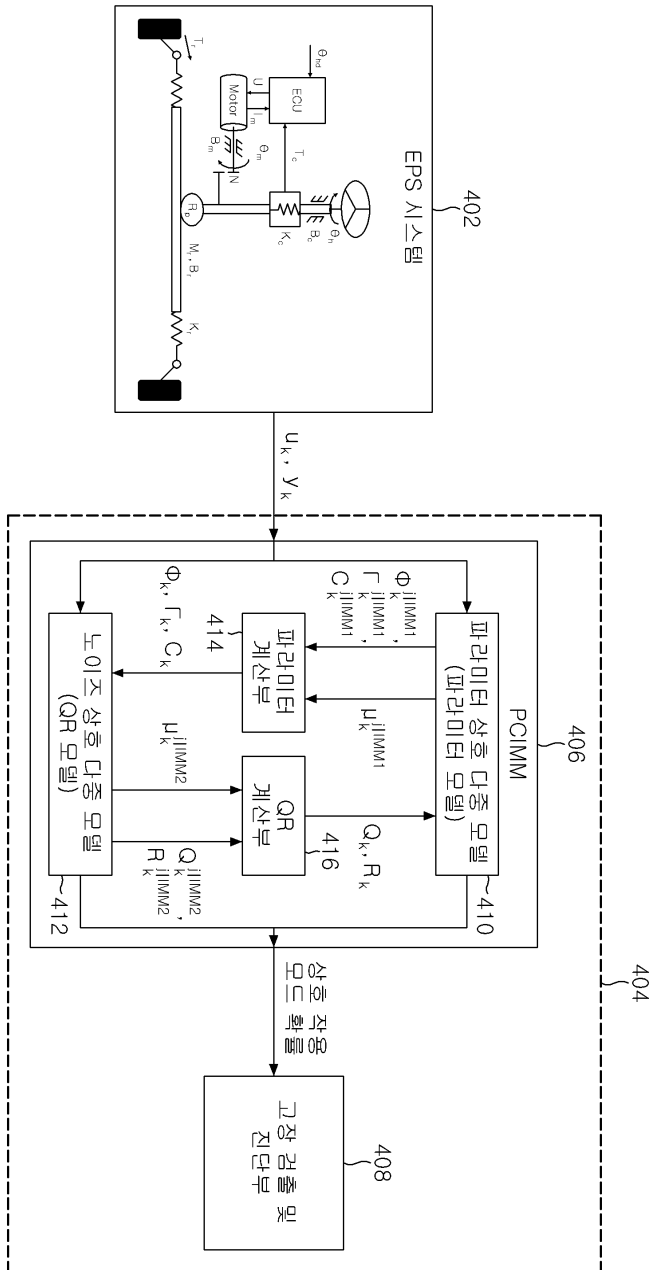
도면2



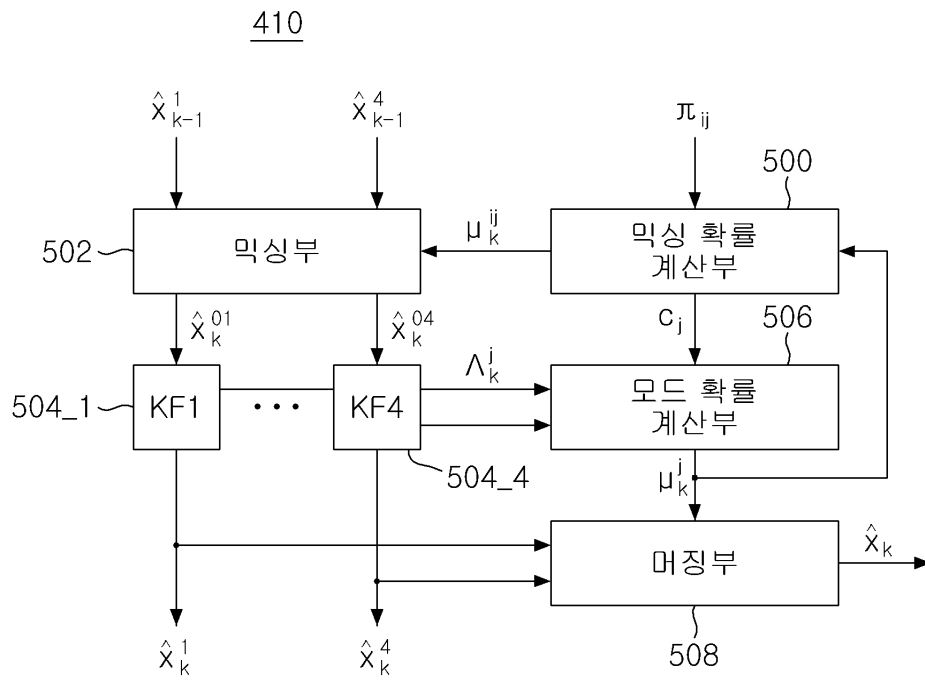
도면3



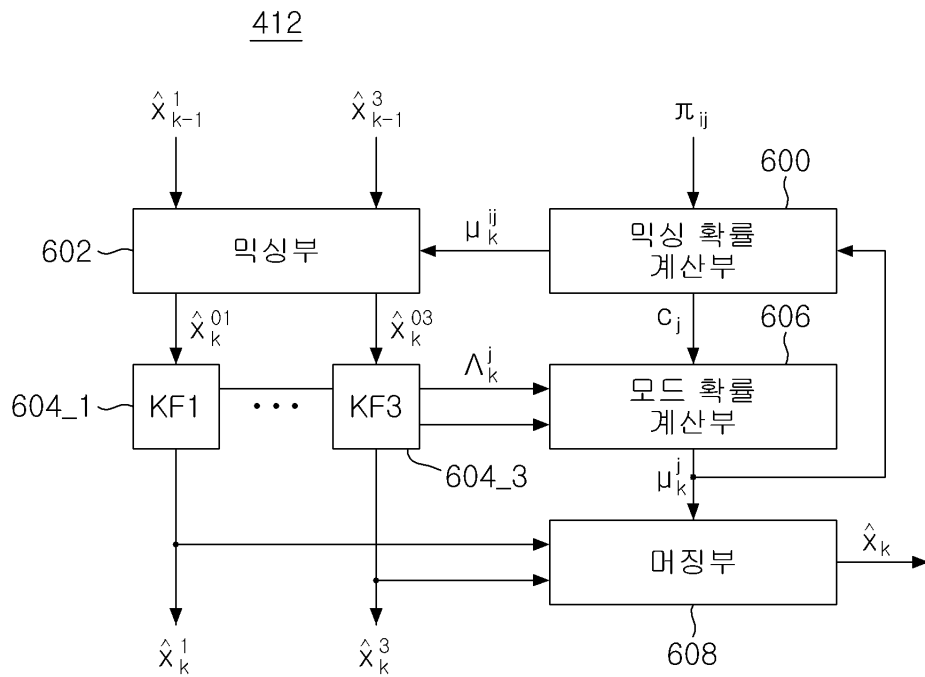
도면4



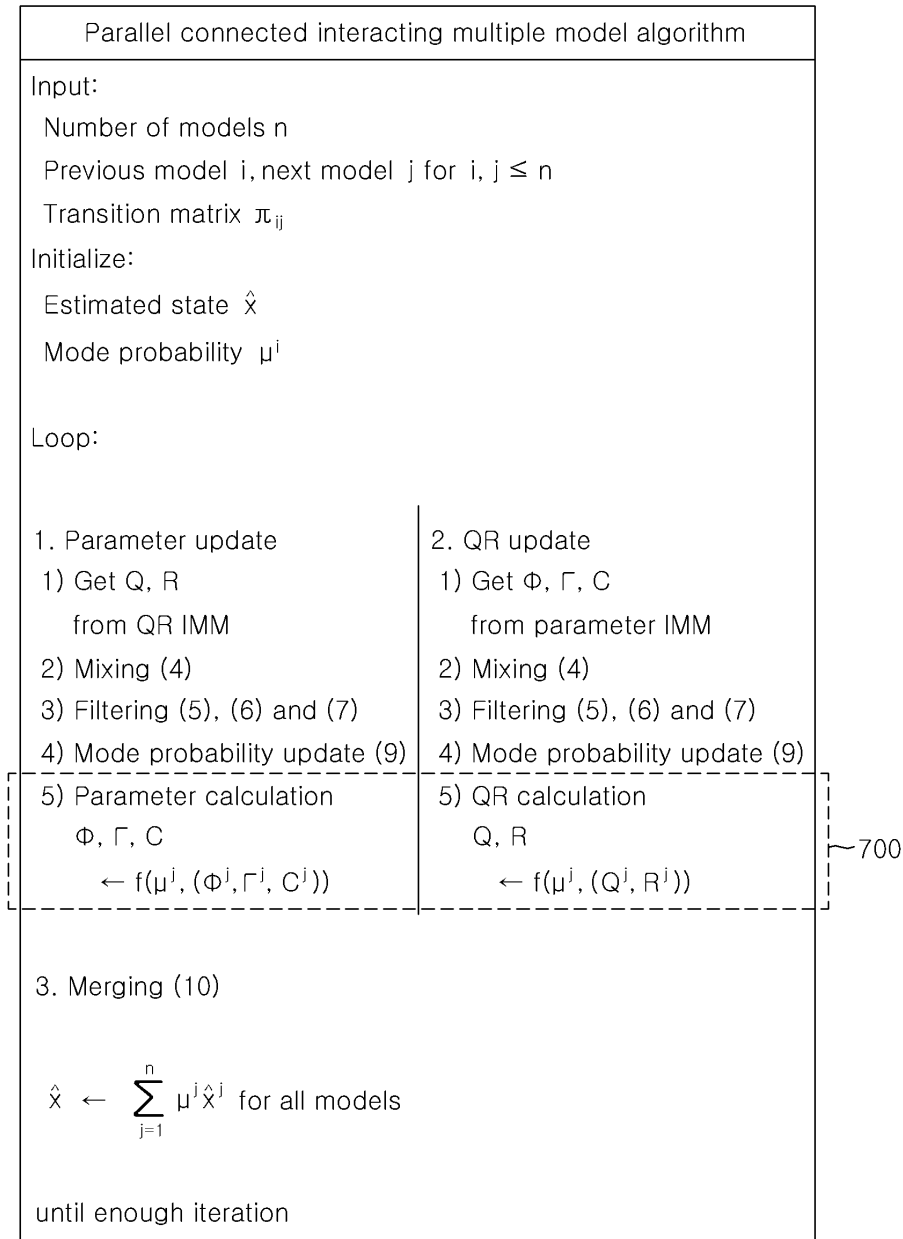
도면5



도면6

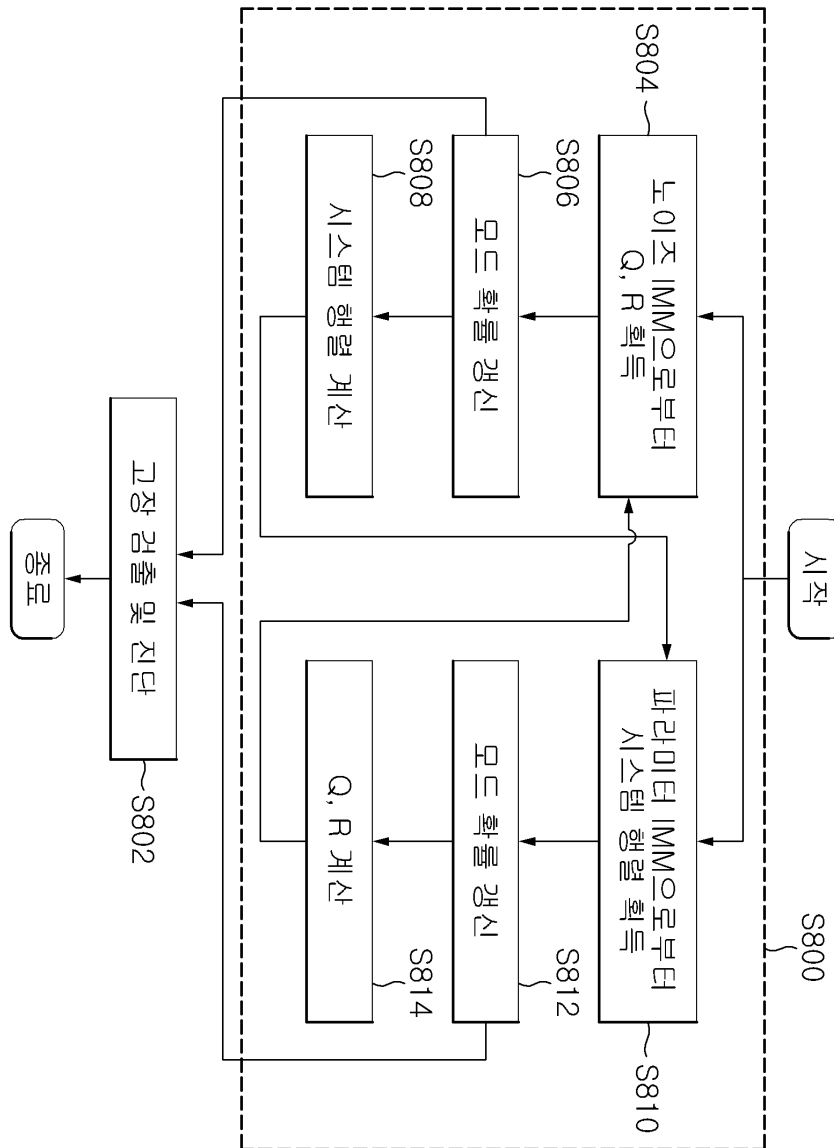


도면7

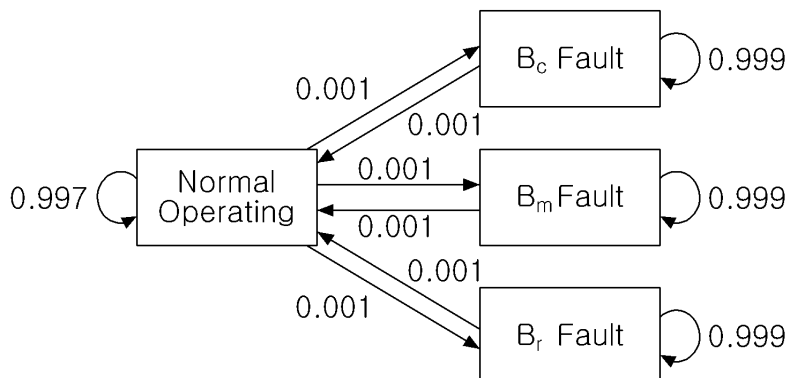


700

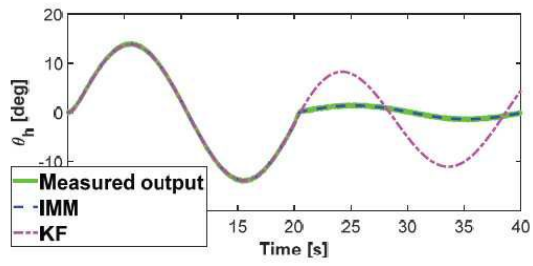
도면8



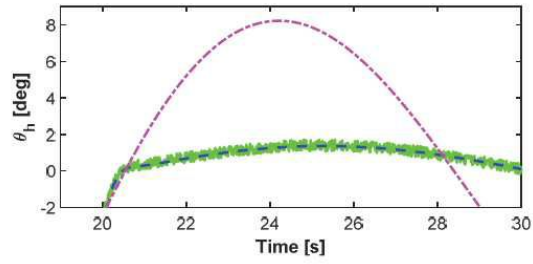
도면9



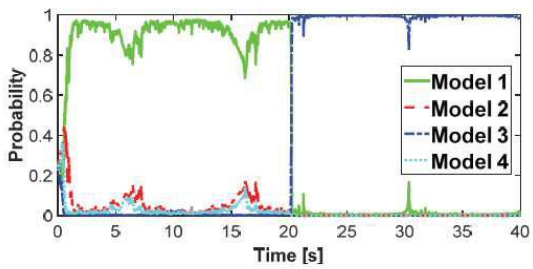
도면10



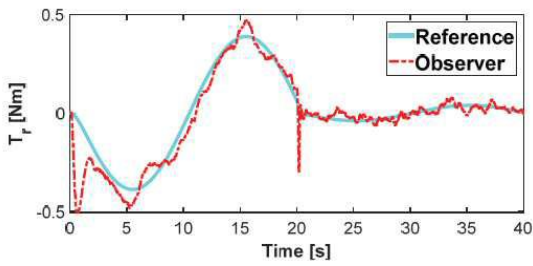
(a) Output estimation



(b) Output estimation(zoom 19~30 s)

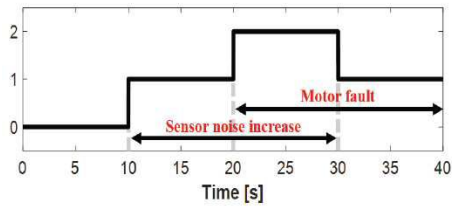


(c) Mode probability

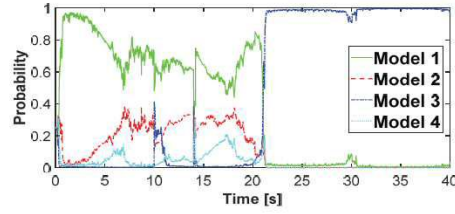


(d) Disturbance estimation

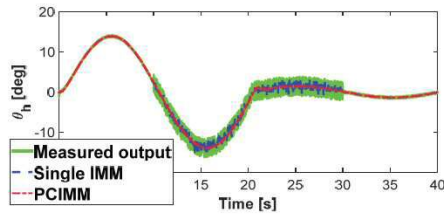
도면11



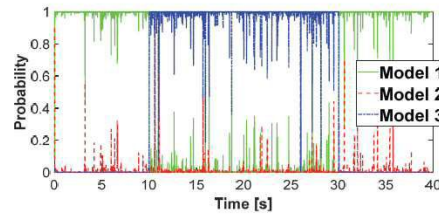
(a) Number of fault



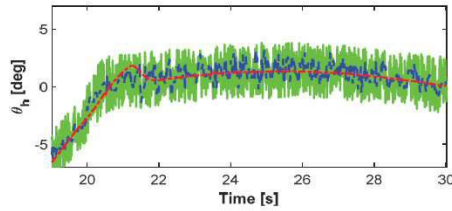
(d) Mode probability of parameter model



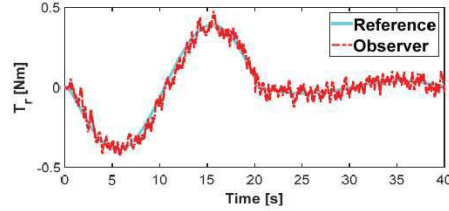
(b) Output estimation



(e) Mode probability of QR model



(c) Output estimation(zoom 19~30 s)



(f) Disturbance estimation