

Detection filter에 기초한 고장검출기법 적용에 관한 연구

김정근, 장태규
중앙대학교 전자전기공학부

Application of The Fault Detection Filter For Dynamics Failure Detection

J. K. Kim, T. G. Chang
School of Electrical Engineering, Chung-Ang University
E-mail : tgchang@jupiter.cie.cau.ac.kr

요약문

본 논문에서는 해석적인 모델에 기초한 고장 검출 기법의 하나인 fault detection filter를 적용한 고장 검출 알고리즘을 개발하고 이를 적용하여 고장검출 필터의 유효성을 보이하고자 한다. Fault detection filter는 특수한 형태의 observer로써 특정한 고장의 발생시 잔차가 출력 공간에서 일정한 방향을 유지함으로써 고장 개소의 판별이 가능하다. 이에 본 논문에서는 fault detection filter에 기초한 고장 감지 시스템을 적용하기 위한 다이나믹 시스템 모델링과 고장 감지 시스템의 설계과정 및 이를 적용 모의시험 결과를 수록하였다. 결과를 통하여 fault detection filter가 갖는 방향성에 대한 sensitivity 효과를 고장 감지 목적에 유효하게 적용할 수 있음을 보였다.

1. 서론

다이나믹 시스템의 고장 감지에 관한 연구는 대상 다이나믹 시스템의 복잡도 증가에 따른 고 신뢰도 운전에 대한 요구가 증대됨에 따라 지속적으로 연구되고 있다. 최근 디지털 기술의 발전으로 인해 다이나믹 시스템의 수학적 모델링, 상태추정 및 계수추정 등의 제어 및 신호처리 기법의 경제적인 실현이 가능해짐에 따라 해석적인 모델에 기초한 고장감지에 관한 연구들이 많은 관심을 끌고 있다.

본 논문에서는 해석적인 모델에 기초한 고장 감지 알고리즘중 하나인 fault detection filter를 이용한 고장 감지 알고리즘을 설계하여 적용하는 기법을 개발하고자 한다. Fault detection filter는 Beard와 Jones에 의해 각각 1971, 1973년에 소개된 방법으로서 observer를

설계하는데 있어서 eigen vector를 특정한 고장의 발생시 residual이 출력 space에서 일정한 방향으로만 나타나도록 할당하여 주는데 기초한 기법이다.[1][2] 이 기법은 하나의 필터를 설계하여 다수의 고장 개소를 판별할 수 있어 다수의 고장을 판별하기 위해 각각의 고장에 따른 dedicated observer를 설계하여 적용하는 방법에 비해 구성이 간단하여, 고장 감지 시스템의 복잡도 및 시스템 자원 사용 요구를 줄일 수 있는 장점이 있다. Fault detection filter가 가지는 구성의 용이성과 고장개소의 판별까지 가능한 장점에도 불구하고 coupling이 많은 복잡한 플랜트의 경우 plant의 정성적인 특성에 기초한 fault vector를 선정하는 과정이 용이치 않고 동작 조건 또한 일반적으로 만족시키기 힘들어 실제 적용의 예는 거의 없는 실정이다. 이에 본 논문에서는 개발한 detection filter에 의한 고장감지 기법의 효용성 검증 차원에서 two-motor에 의해 구동되는 전기 자동차를 대상으로 적용하여 결과를 검토하고자 한다.

2. Fault detection filter에 의한 고장감지

본 논문에서는 고장감지 대상 dynamic 시스템을 식 (1)과 같이 state 벡터 x , input 벡터 u , output 벡터 y 에 대한 선형 시스템으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (1)$$

이에 대한 observer는 식 (2)와 같이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + D(y - \hat{y}) \\ \hat{y} &= C\hat{x} \end{aligned} \quad (2)$$

\hat{x} : 추정되는 state, \hat{y} : 추정되는 출력, D : Detection gain

이때 state 오차와 output 오차를 각각

$$\varepsilon = x - \hat{x}, \quad \bar{\varepsilon} = y - \hat{y}$$

로 정의하면, error dynamics는

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\epsilon}} &= G\bar{\epsilon}, \quad \bar{\epsilon} = C\epsilon \\ G &= A - DC \end{aligned} \quad (3)$$

로 얻어진다.

또한 plant 또는 actuator fault가 있을 때는 시스템 state equation을

$$\dot{x} = Ax + Bu + f_i \mu_i$$

f_i : i 번째 actuator 고장에 해당되는 고장 방향 벡터
 μ_i : i 번째 actuator 고장에 해당되는 고장 함수
 으로 나타내면, 이 때의 error dynamics는

$$\dot{\bar{\epsilon}} = G\bar{\epsilon} + f_i \mu_i, \quad \bar{\epsilon} = C\epsilon \quad (4)$$

이 된다. 식(4)에서 f_i 는 i 번째로 상정된 고장이 error dynamics에 어떤 방향으로 영향을 미치는지를 나타내는 벡터로, i 번째 actuator의 고장에 대해서는 plant dynamics의 입력 계수 B 의 i 번째 column의 방향으로 된다. 식(4)에서 μ_i 는 고장의 시간 특성을 나타내는 함수로, stochastic하거나 bias 형태를 취하며 μ_i 크기에 대한 정보는 고장의 분류에 있어서는 중요한 정보가 아니다.

이러한 시스템 및 고장으로부터 fault detection filter를 설계하는 것은 고장 발생 시 error dynamics의 output ($\bar{\epsilon}$)을 Cf_i 의 방향에 비례하도록 하여 고장을 분류할 수 있도록 하는 성질을 갖도록 detection gain을 결정하는 것이다. 이러한 필터는 error dynamics $G = (A - DC)$ 의 eigen value λ_i 와 eigen vector v_i 에 대하여 Cf_i 와 Cv_i 가 collinear 하게 하여주기 위한 조건을 만족하는 detection gain D 를 결정하는 것으로 설계되며, 이는 다음의 행렬식을 만족하는 D 를 구함으로써 얻어진다.[6]

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \lambda_i I - A & D \\ C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i^j \\ w_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ w_i \end{bmatrix} \\ w_i^j &= Cf_i = Cv_i^j \end{aligned} \quad (5)$$

3. 전기 자동차 운전제어계통 모델링

전기자동차는 비선형 dynamic 특성을 가지므로, fault detection filter 방법을 통한 고장 감지기법을 적용하기 위해서는 동작점에서의 선형모델을 기반으로 시뮬레이션을 수행해야한다. 전기 자동차의 7차 비선형 모델[7]을 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ x &= (\dot{x}, \dot{y}, \dot{\phi}, V_{w1}, V_{w2}, V_{w3}, V_{wd})^T \\ u &= (\delta, T_A, T_B)^T \\ y &= (V_{w1}, V_{w2}, V_{w3}, V_{wd})^T \end{aligned} \quad (6)$$

으로 표현된다.

이러한 비선형 방정식[식 (6)]을 선형의 상태 방정식

과 출력 방정식[식 (7)]으로 표현해야된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \rightarrow d\dot{x} = Adx + Bdu \\ y &= Cx \rightarrow dy = Cdx \end{aligned} \quad (7)$$

7차 비선형 모델을 식(6)의 incremental model로 근사화하기 위한 선형화의 기법으로는 식(8)의 Taylor 전계를 기반으로 하는 1차 근사 기법을 사용한다.

$$\begin{aligned} f(x, u) &\approx f(x_0, u_0) + \frac{\partial f(x_0, u_0)}{\partial x} dx \\ &\quad + \frac{\partial f(x_0, u_0)}{\partial u} du \\ \rightarrow df(x, u) &= f(x, u) - f(x_0, u_0) \\ &\approx \frac{\partial f(x_0, u_0)}{\partial x} dx + \frac{\partial f(x_0, u_0)}{\partial u} du \end{aligned} \quad (8)$$

A, B, C 를 구하려면 7차 비선형 모델을 각 state들로 편미분해야하는데 closed form으로 미분하기에는 너무 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 식 (7)을 closed form으로 나타내지는 않고 시뮬레이션을 통해 얻어진 각 부하요구시의 정상 상태값을 동작점으로 하여, 각 state 및 입력에 일정 비율의 증감을 주고 그 증감에 따른 출력과 미분 state의 증감을 계산하여 근사화된 선형 모델 계수들을 얻어낸다.

시뮬레이션에서 60km/h의 속도로 고속도로(정상노면)를 정속주행하는 상황을 정상 상태로 정하여 얻은 각 state의 동작점은 표 1.에 보였다.

표 1. 소신호 선형 모델을 위한 state 및 동작점

State Variable	Value	State Variable	Value
Vw[1]	60 [km/h]	Vw[2]	60 [km/h]
Vw[3]	60.095714 [km/h]	Vw[4]	60.095714 [km/h]
T[3]	20.64337 [kg m]	T[4]	20.643377 [kg m]
Vx	60 [km/h]	Vy	0 [km/h]
Yaw rate	0 [rad/sec]		

선형 모델의 계수를 구하기 위해서는 동작점에서의 미분 state와 출력값을 기준으로 동작점에 일정량의 증분을 주어 미분 state와 출력의 변화량을 구하여야한다. 우선 state equation에 대해 구해보면,

$$\begin{aligned} A(k) &\approx \frac{1}{dx(k)} f(dx, du) \Big|_{dx(i)=0 \text{ for } i \neq k, du(i)=0 \text{ for all } i} \\ B(k) &\approx \frac{1}{du(k)} f(dx, du) \Big|_{dx(i)=0 \text{ for all } i, du(i)=0 \text{ for } i \neq k} \end{aligned} \quad (9)$$

가 된다.

C 는 각 차륜의 속력을 측정하므로 직접적으로 얻어진다.

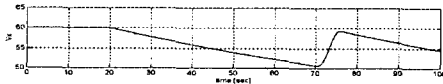
이상의 방법으로 동작점에서 입력에 $\pm 0.5\%$ 의 증분을 주어 구한 선형 모델의 계수는

$$A = \begin{bmatrix} -1.066e+0 & 5.623e-3 & -1.380e-4 & 8.586e-2 & 8.586e-2 & 8.343e-2 & 8.343e-2 \\ 0 & -1.034e+2 & -1.703e+1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -4.629e-1 & -5.576e+0 & -6.700e-2 & 6.700e-2 & -6.510e-2 & 6.510e-2 \\ 2.562e+2 & 1.212e+0 & -2.445e+2 & -8.248e+1 & 4.885e-2 & 3.847e-1 & 4.747e-2 \\ 2.562e+2 & -1.186e+0 & 2.446e+2 & 4.885e-2 & -8.278e+1 & 4.747e-2 & 3.847e-1 \\ 2.493e+2 & 3.826e+1 & -2.318e+2 & 3.735e-1 & 3.574e-2 & -8.016e+1 & 3.439e-2 \\ 2.493e+2 & -3.793e+1 & 2.319e+2 & 3.574e-2 & 3.735e-1 & 3.439e-2 & -8.016e+1 \end{bmatrix}$$

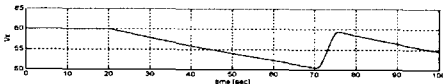
$$B = \begin{bmatrix} -2.583e-2 & 1.412e-3 & 1.412e-3 \\ 3.023e+1 & 0 & 0 \\ 3.269e+1 & -1.085e-3 & 1.085e-3 \\ -8.669e+1 & 6.467e-3 & 8.464e-4 \\ 8.263e+1 & 8.464e-4 & 6.466e-3 \\ -8.246e+1 & 3.191e-1 & -1.098e-2 \\ 8.231e+1 & -1.098e-2 & 3.191e-1 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

이다.
위에서 구한 선형 모델과 실제의 비선형 모델이 어느 정도 일치하는가를 알아보기 위해서 60 [km/h] 정속주행상태에서 55 [km/h]의 정속주행으로 감속에 대한 응답을 그림 1.에 비교해 보았다.



(a) 비선형 모델 기반



(b) 선형 모델 기반

그림 1. 60km/h에서 55km/h 정속주행으로 변경시 응답 특성

4. 고장감지필터의 설계 및 적용 모의시험

본 논문에서 정속주행 중 좌우 구동부에 결함이 발생하는 상황과 차체고장(타이어 압력저하) 상황을 대상으로 하였다. Actuator 결함인 구동부 결함은 각각 plant의 입력에 문제가 발생하는 것으로 입력과 관련된 B의 column vector를 선정하였고, 차체고장의 경우는 위 선형화 과정에서와 같은 방법으로 차체 parameter(차륜의 반지름)에 변화를 주고 state의 변화량을 잡아 선정하였다. 선정된 고장 vector는

$$F = \begin{bmatrix} 1.412e-3 & 1.412e-3 & 1.344e+1 & 1.344e+1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1.085e-3 & 1.085e-3 & -1.049e+1 & 1.049e+1 \\ 6.466e-3 & 8.464e-4 & 6.197e+1 & 7.638e+0 \\ 8.464e-4 & 6.466e-3 & 7.638e+0 & 6.197e+1 \\ 3.191e-1 & -1.098e-2 & -1.306e+4 & 7.428e+0 \\ -1.098e-2 & 3.191e-1 & 7.428e+0 & -1.306e+4 \end{bmatrix}$$

이다.

위에서 선정된 고장이 출력에서 구분이 되어져야 한다. 이는 C*F의 rank가 출력의 차수와 같아야 한다. 그렇지 않으면 detection filter를 통한 결과 선정된 고장 vector중 서로 구분되지 않는 vector가 존재한다. rank(C*F)=4 이므로 본 논문에서 선정된 고장 vector는 output separable하다.

Detection filter를 설계하기 위한 eigenvalue와 eigenvector의 설정은 output residue를 특정방향으로 나타내도록 하기 위해 필요한 eigenvector의 최소수, 즉 각 fault vector에 대응하는 detection space의 차수를 결정하고 이에 의해 해당하는 수의 eigenvector 및 eigenvalue를 시스템 dynamics의 정성적인 시정수 특성을 고려하여 설계하여 준다.

본 논문에서는 설정된 fault vector와 같이 detection space의 차수가 1인 경우 eigenvector는 일반적으로 다음과 같이 fault vector와 colinear하게 설정된다.

$$f^i = v_i, \quad i=1,2,3,4$$

Eigenvalue는 A의 eigenvalue중 가장 절대값이 큰것 (-103.41)보다 더 크게 잡으면 수렴성을 만족하게됨으로 -121에서 -124까지를 설정하였다.

이상으로 선정된 eigenvalue와 eigenvector로 식(9)를 풀면 detection gain은

$$D =$$

$$\begin{bmatrix} 2.328e+1 & 2.353e+1 & 8.175e-2 & 8.176e-2 \\ 3.289e+0 & -3.289e+0 & -2.905e-8 & 2.905e-8 \\ -2.245e+1 & 2.260e+1 & -6.382e-2 & 6.381e-2 \\ 1.356e+2 & 2.431e+0 & 3.770e-1 & 4.649e-2 \\ 2.153e+0 & 1.366e+2 & 4.643e-2 & 3.770e-1 \\ 1.182e+1 & 1.485e+1 & 4.246e+1 & 4.020e-2 \\ 1.759e+1 & 1.150e+1 & 5.418e-2 & 4.346e+1 \end{bmatrix}$$

이다.

이상으로 설계된 detection filter를 차체 dynamics (타이어 압력저하)의 경우와 구동 모터부의 출력저하 (33%)로 나누어 모의 실험을 수행하였다. 3절에서 기술된 운전제어계통에 detection filter가 적용되는 전체적인 구성을 그림 2.에 보였다.

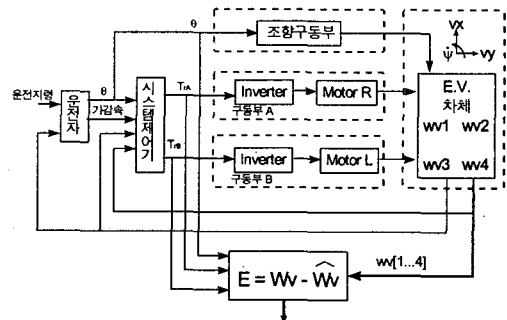


그림 2. 운전제어 시뮬레이터 및 detection filter 구성도

가. 구동부 failure

고장 검출 시험을 위하여 60km/h의 정속주행 중 w 좌측구동부 또는 우측구동부에 문제가 발생하여 출력이 33%줄어든 상황을 모의 실험하였다. 20초에서 좌측 구동부 또는 우측 구동부에 출력이 33%줄어 차량의 고장 상황을 유발한다. 차량에 좌측 구동부의 고장이 발생하였을 때의 state와 출력의 변화, 실제 출력과 추정 출력의 오차가 특정방향으로 발생함으로써 고장요인을 판별 할 수 있는 결과를 다음에 보였다.

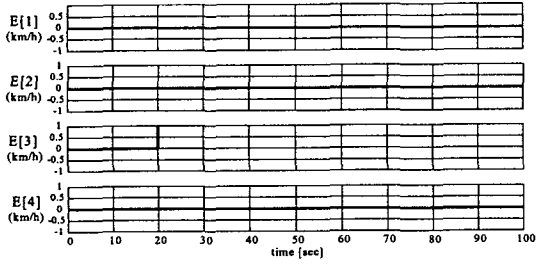


그림 4. 후륜좌측 구동부 고장시, fault detection filter에 의해 출력된 각 차륜별 속도 추정 오차(residual)

(위로부터 각각 좌측전륜, 우측전륜, 좌측후륜, 우측후륜)

Fault detection filter의 결과로 측정 출력과 추정 값과의 오차가 고장으로 선정한 failure vector의 1번째 column의 방향으로 나타나고 있음이 그림 4.에 나타나 있다. 이로서 우리가 설계한 고장감지기가 좌측 구동부에 출력이 저하되었음을 감지하는 올바른 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

나. 타이어 압력의 급격한 저하

후륜 좌측 차륜에 압력이 급격히 저하되는 고장상황을 차륜반경을 10% 줄여 본 연구에서 설정한 dynamics에 반영될 수 있도록 설정하여 모의 실험을 수행하여 detection filter의 동작을 확인하였다. 전기자동차는 60km/h의 정속주행 상태이며 모든 상황이 stable하게 유지되고 있다. 20초에 좌측후륜 또는 우측 후륜에 압력이 저하되어 반경을 10%줄여 차량의 고장 상황을 유발하도록 하였다. 다음에는 이러한 고장상황이 발생한 경우의 고장감지결과를 보였다.

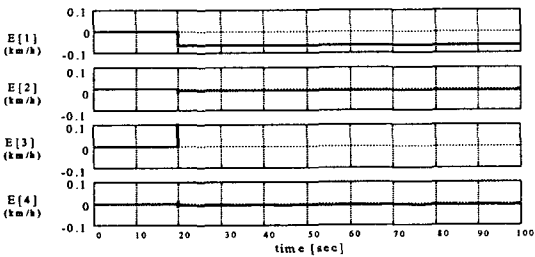


그림 5. 좌측후륜의 압력저하 고장 발생시, 설계한 fault detection filter 에 의해 출력된 차륜별 속도 추정 오차

Fault detection filter의 결과로 측정 출력과 추정 값과의 오차가 고장으로 선정한 failure vector의 3번째 column의 방향으로 나타나고 있음이 그림 5.에 나타나 있다. 이로서 우리가 설계한 고장감지기가 후륜 좌측 차륜에 압력이 저하되었음을 감지하는 올바른 동작하고 있음을 확인할 수 있다.

이상의 모의 실험을 통하여 좌우 모터 구동부의 고장과 차륜의 급격한 압력 저하 고장이 발생한 경우를, 자동차의 각 차륜별 속도를 입력받아 이로부터 단일 fault detection filter에 의해 추정 오차 (residual) vector의 방향을 확인하여 고장발생을 감지하고 고장 개소까지 구별하여 줄 수 있음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 fault detection filter를 적용한 고장 감지 기법 및 알고리즘을 제시하고 이를 2모터 구동방식 전기자동차에 적용하여 고장 진단 결과를 보임으로써 설계된 고장 감지 알고리즘의 유효성을 보였다. 구체적인 고장들로서 타이어 압력저하 및 모터 구동부의 고장을 검출하기 위한 감지기를 설계하여 적용 모의 실험을 수행하여 정상적인 동작을 수행하는 것을 확인하였다. 앞으로 알고리즘에 대한 실시간 구현에 관한 연구를 계속하여 실차 실험을 통한 성능을 확인하고, 이러한 고장감지 기법의 적용범위를 확장하기 위한 연구를 병행하여 수행할 필요가 있다 하겠다.

참고 문헌

- [1] R. V. Beard, "Failure accommodation in linear systems through self-reorganization," Dept. MVT-71-1 Man Vehicle Lab., Cambridge, MA, Feb. 1971.
- [2] H. L. Jones, "Failure detection in linear systems," Ph.D. dissertation, M.I.T., Cambridge, 1973.
- [3] Rolf Isermann, "Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods", *Automatica*, Vol. 20, No. 4, pp. 387-404, 1984.
- [4] Paul M. Frank, "Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Analytical and Knowledge-based Redundancy", *Automatica*, Vol. 26, No. 3, pp. 459-474, 1990.
- [5] Giorgio Rizzoni, "Detection of Sensor Failures in Automotive Engines", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol. 40, No. 2, May 1991.
- [6] J. E. White and J. L. Speyer, "Detection filter design: Spectral theory and algorithms", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-32, July 1987.
- [7] 김병기의 4인, "Multimotor 구동방식 전기자동차 운전제어 시뮬레이터 개발에 관한 연구", '96 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp 1173-1175, 1996.