

펌프-밸브 시스템의 DES 접근론적 Failure Diagnosis

손 형 일*, 김 기 응 (부산대 대학원 지능기계공학과), 이 석 (부산대 기계공학부)

DES Approach Failure Diagnosis of Pump-valve System

H. I. Son, K. W. Kim(Intelli. Mech. Eng. Dept., PNU), S. Lee(Mech. Eng. School, PNU)

ABSTRACT

As many industrial systems become more complex, it becomes extremely difficult to diagnose the cause of failures. This paper presents a failure diagnosis approach based on discrete event system theory. In particular, the approach is a hybrid of event-based and state-based ones leading to a simpler failure diagnoser with supervisory control capability. The design procedure is presented along with a pump-valve system as an example.

Key Words : Discrete Event Systems, Supervisory Control, Failure Diagnosis

1. 서론

산업시스템의 고장진단은 지난 몇십년 동안 많은 관심을 받아온 연구분야였다. 특히, 반도체 생산시스템, 자동차 생산시스템, 화학공정 시스템, HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) 시스템, 발전소 등과 같이 대규모이고 복잡한 시스템의 고장진단을 위한 보다 조직적이고 체계적인 방법이 필요하게 되었다. 그래서 fault tree, analytical redundancy, expert system, model-based reasoning, Discrete Event System (DES)등을 이용한 많은 접근론들이 연구되고 있다. 이런 접근론들에는 각각 다음과 같은 제약이 있다. 먼저 fault tree는 기본적으로 그것을 구성하기가 지나치게 어려워서 실질적인 사례에 적용하기가 쉽지 않다. 그리고 analytical redundancy는 계산 복잡도가 크고, 모델링 오차와 계측 noise로 인해 sensitivity가 문제를 야기시킬 수 있다. Expert system은 전문가의 지식을 추출하는 것이 어려워서 개발기간이 길어질 수 있는 단점이 있다. 마지막으로 model-based reasoning은 많은 연구가 이루어지고 있지만 아직까지 dynamic 시스템에 대한 적용이 어렵다는 단점이 있다. 그렇지만 DES 접근법은 일반적으로 고장진단 할 대부분의 산업시스템이 DES로 생각될 수 있어 시스템을 모델링하기가 비교적 쉽고 고장진단을 위한 보다 체계적인 방법을 제시하므로 고장진단을 위한 좋은 방법이 될 수 있다^[1-4]. 이와 같은 이유로 저자는

[5]에서 DES 접근법을 이용하여 고장진단 시스템을 구성하는 기법을 제시하였다.

본 논문에서는 [5]에서 제시한 on-line passive diagnoser를 만드는 새로운 방법을 간단한 펌프-밸브 시스템에 적용하였다.

2. Background

2.1 Notation^[6]

Finite State Automaton(FSA)를

$$G = \{Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m\} \quad (1)$$

으로 나타내고, 여기서 Q 는 state set, Σ 는 event set, δ 는 $\delta : Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$ 인 transition function, q_0 는 initial state, Q_m 은 작업의 완료를 나타내는 marked state set이다. Transition function δ 에서 Σ^* 는 event의 sequence(string)를 나타낸다. G 가 생성해내는 language는

$$L(G) = \{s \mid s \in \Sigma^*, \delta(q_0, s) \text{ is exist}\} \quad (2)$$

$\overline{L(G)}$, $L_m(G)$ 는 $L(G)$ 의 prefix closure, marked language를 의미한다. 그리고 $G_1 \times G_2$, $G_1 \wedge G_2$ 은 각각 FSA G_1, G_2 의 synchronous product, meet product를 나타낸다.

$E \subseteq G$ 인 임의의 language의 G 에 대한 supremal controllable and observable sublanguage는 (3)으로 구

할 수 있다.

$$supCO(E) = G \wedge P^{-1}[supC(P(E))] \quad (3)$$

2.2 Diagnostic Supervisor^[5]

플랜트를 FSA로 모델링하고 주어진 legal language E 에 대한 $supCO(E)$ 를 구한다. 이렇게 구한 $supCO(E)$ 가 플랜트에 대한 supervisor가 되며 플랜트의 supervisor 아래에서의 closed-loop behavior는 Finite State Moore Automaton (FSMA) $G = \{Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m, Y, \lambda, C, \gamma\}$ 로 나타낸다. 여기서 $Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m$ 은 state set, event set, transition function, 초기 state, marked state set을 나타내고, Y, λ, C, γ 는 각각 sensor output set, sensor output map, control command set, control command map을 의미한다.

DES G 에 대한 diagnoser를 FSMA $D = \{Z, E, \zeta, z_0, Z_m, \bar{K}, \bar{x}\}$ 로 정의한다. FSMA D 에서 Z 는 state set, E 는 event set, z_0 는 초기 state, Z_m 은 marked state set, \bar{K} 은 state condition set 그리고 \bar{x} 는 state condition map이다. 이렇게 정의한 diagnoser를 *diagnostic supervisor*라 한다. 설계된 diagnoser는 고장이 diagnoser가 초기화되기 전에 발생했는지 그 후에 발생했는지 고장진단에는 아무런 문제가 없다. Diagnostic supervisor는 diagnoser의 현재 state에서 control command가 발생하면 새로운 state로 transition된다. 그리고 transition된 state의 sensor output을 읽어들이고 현재의 state condition을 추정함으로써 DES를 on-line diagnosis한다. 즉, 현재 diagnoser의 state condition만을 추정하면 되므로 off-line diagnosis보다 간단하고 계산 복잡도가 작아지게 되며, 메모리에 저장해야할 정보도 줄어든다.

Diagnosability의 정의를 정의 1에 나타내었고, diagnostic supervisor가 diagnosable하기 위한 필요충분조건은 정리 1에 있다.

정의 1 : Diagnoser가 초기화되고 임의의 failure mode F_i 가 발생한 후 임의의 event들이 N_i 번 발생한 후 diagnoser의 state가 F_i -certain이 되면 diagnoser는 F_i -diagnosable하다고 한다. 그리고 모든 failure mode F_i 에 대해서 F_i -diagnosable하다면 diagnoser는 *diagnosable*하다. ©

정리 1 : Diagnoser에 F_i -indeterminate cycle이 존재하지 않는다는 것은 diagnoser가 F_i -diagnosable하기 위한 필요충분조건이다. ©

3. Pump-valve System

3.1 DES Modelling

펌프, 밸브, supervisor로 구성된 간단한 시스템을 생각하자. 그리고 계측센서로는 flowmeter가 사용된다고 가정하자. Flowmeter의 값은 noflow를 나타내는 NF와 flow를 나타내는 F 두 개가 있다고 하자. 따라서 sensor output set $Y = \{NF, F\}$ 이다. 시스템에서 펌프는 고장이 발생하지 않고, 밸브에서만 고장이 일어난다고 가정한다. 펌프와 밸브의 FSA는 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 즉, 밸브에서 Stuck_closed, Stuck_open의 고장이 일어난다고 가정하였다.

그림 1의 FSA에서 $\bar{\Sigma}_{uc} = \{\text{Stuck_closed}, \text{Stuck_open}\}$ 가 되고 고장은 당연히 unobservable event이기 때문에 $\bar{\Sigma}_{uc} = \bar{\Sigma}_{uo}$ 이다. 그림 1의 밸브와 펌프의 FSA를 synchronous product한 결과가 그림 2에 나와 있다. 그리고 그림 3에 시스템의 supervisor를 구하기 위한 legal language E 를 나타내었다. 이에 대한 supremal controllable and observable sublanguage 즉, supervisor S 를 구하여 그림 4에 나타내었다. 그리고 supervisor의 control map ϕ 는 표 1에 나타내었다. 마지막으로 DES의 FSMA를 구하기 위해서 그림 2의 \bar{G} 와 그림 4의 S 를 meet product하여 G 를 구하면 state transition이 그림 4와 똑같이 나온다. 즉 $L(G) = L(S/\bar{G}) = L(S) \cap L(\bar{G}) = L(S)$ 가 된다. 그러므로 DES의 control command map γ 역시 supervisor의 control map ϕ 와 같게 된다. 따라서 그림 4의 FSA에 표 1의 control map, sensor output map를 추가시키면 DES의 FSMA G 가 된다. 여기서 표 1의 state는 $x_{i,i=1,\dots,12}$ 를 $q_{i,i=1,\dots,12}$ 와 일대일 대응시키면 된다.

3.2. Diagnoser.

앞에서 구성한 DES에 대해서 Stuck_closed event를 failure mode F_1 , Stuck_open event를 failure mode F_2 로 두자. 그러면 state condition set $K = \{N, F_1, F_2\}$ 이 된다. 그리고 state condition map x 는 표 1과 같이 정의된다.

Diagnoser를 만들기 전에 먼저 diagnoser의 초기 state z_0 를 구하면 $q_5 = \delta(q_1, F_1)$, $q_9 = \delta(q_1, F_2)$ 이므로 $z_0 = \{q_1, q_5, q_9\}$ 가 된다. [5]에서 제시한 과정에 의해서 최종 설계된 diagnoser를 그림 5에 나타내었다.

그림 5를 보면 state $\{q_2, q_6, q_{10}\}$ 에서 control command Start_pump가 발생한 후 sensor output 값

이 F가 되면 diagnoser의 state는 $\{q_3, q_{11}\}$ 가 되고, NF가 되면 $\{q_7\}$ 가 된다. 즉 supervisor에서는 하나의 control command를 보내지만 diagnoser에서는 sensor output에 따라서 state를 구분한다.

3.3. Diagnosability

Diagnoser의 state $\{q_7\}, \{q_8\}, \{q_5\}, \{q_6\}$ 가 F_1 -certain이므로 펌프-밸브 시스템의 diagnoser는 F_1 -diagnosable하다. 그렇지만 F_2 -certain인 state가 없으므로 F_2 -diagnosable하지는 않다.

그림 5의 diagnoser를 보면 $\{q_1, q_5, q_9\}, \{q_2, q_6, q_{10}\}, \{q_3, q_{11}\}, \{q_4, q_8, q_{12}\}$ 가 F_2 -indeterminate cycle을 이룬다. 왜냐하면 그림 3에서 $\{q_1, q_2, q_3, q_4\}$ 가 state condition N 으로 cycle을 이루고있고, state set $\{q_9, q_{10}, q_{11}, q_{12}\}$ 역시 state condition F_2 로 cycle을 이루고있기 때문이다. 즉, N -cycle, F_2 -cycle이 존재한다. 따라서 F_2 -indeterminate cycle이 존재하므로 F_2 -diagnosable하지 않다. 이것의 물리적인 의미는 다음과 같다. 만약 failure event Stuck_closed가 발생하면 DES의 state condition은 F_1 이 된다. 그렇지만 diagnoser의 state는 아직 F_1 -uncertain을 나타낸다. 이때 control command Start_pump가 일어났을 때 sensor output이 NF가 되면 F_1 -certain이 되는 것이다. 즉, 펌프를 작동시켰는데도 flowmeter가 NF를 가리키므로 밸브가 닫혀있음을 diagnoser는 알 수 있는 것이다. 하지만 failure event Stuck_open이 발생했을 때는 flowmeter의 값이 정상적으로 나타나므로 diagnoser는 고장을 알지 못하는 것이다. 이는 diagnoser가 flowmeter의 값만으로는 N -cycle, F_2 -cycle을 구분하지 못하여 F_2 -indeterminate cycle에서 빠져 나오지 못하게됨을 의미한다. 따라서 Stuck_open을 검출하기 위해서는 추가적인 센서가 필요함을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 DES 접근론적 failure diagnosis 문제를 다룸에 있어서 기존에 제시되었던 event-based 접근법과 state-based 접근법을 결합하여 on-line passive diagnoser를 설계하는 방법을 제시하여 이를 펌프-밸브 시스템에 적용시켰다.

추후 연구과제로는 nondiagnosable한 시스템을 diagnosable하게 변화시키는 active diagnosis 문제를 다루는 것을 들 수 있겠다. 그리고 시스템이

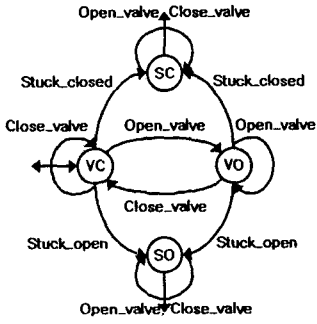
diagnosable하기 위한 최적의 센서 개수와 위치를 찾는 것과 본문에서 언급한 diagnostic supervisor의 blocking 해결방안도 앞으로 다루어야 할 문제이다.

참고문헌

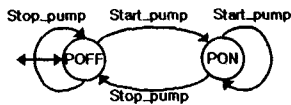
1. Meera Sampath, "A Discrete Event Systems Approach to Failure Diagnosis", Ph.D. Thesis, The University of Michigan, December, 1995.
2. M. Sampath, S. Lafortune, D. Teneketzis, "Active Diagnosis of Discrete-Event Systems", IEEE Trans. Automat. Contr., vol. 43, no. 7, pp. 908-929, July, 1998.
3. Shahin Hashtrudi Zad, "Fault Diagnosis in Discrete Event and Hybrid Systems", Ph.D. Thesis, The University of Toronto, 1999.
4. Yongseok Park, "Model-based Monitoring of Discrete Event Systems", Ph.D. Thesis, The Purdue University, May, 1996.
5. 손형일, 김기웅, 이석, "이산사건 시스템의 Failure Diagnosis", 제어계측, 로봇틱스 및 자동화 연구회 합동 학술 발표회 논문집, pp.298- 303, 2000.
6. W. M. Wonham, "Notes on Control of Discrete Event Systems", Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, 1998.

Table 1 Control Map ϕ , Sensor Output Map λ and State Condition Map χ

State	Control Command C	State	Sensor Output Y	State Condition χ
x_1	Open_valve	q_1	NF	N
x_2	Start_pump	q_2	NF	N
x_3	Stop_pump	q_3	F	N
x_4	Close_valve	q_4	NF	N
x_5	Open_valve	q_5	NF	F_1
x_6	Start_pump	q_6	NF	F_1
x_7	Stop_pump	q_7	NF	F_1
x_8	Close_valve	q_8	NF	F_1
x_9	Open_valve	q_9	NF	F_2
x_{10}	Start_pump	q_{10}	NF	F_2
x_{11}	Stop_pump	q_{11}	F	F_2
x_{12}	Close_valve	q_{12}	NF	F_2



(a)



(b)

Fig. 1 FSA of Components (a) Valve, (b) Pump

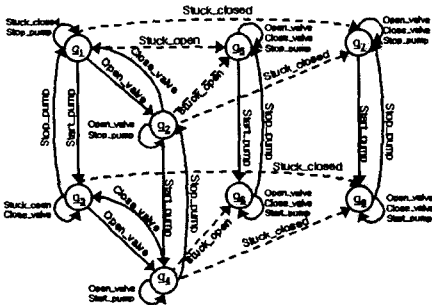


Fig. 2 FSA of Plant

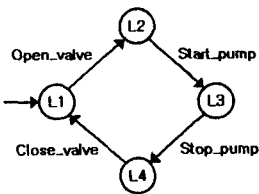


Fig. 3 FSA of Legal Language

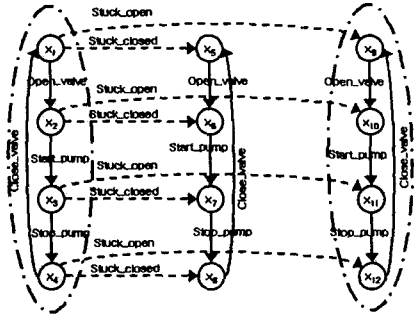


Fig. 4 FSA of Supervisor

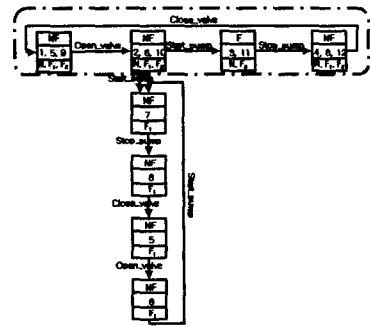


Fig. 5 Diagnoser