

자동화 시스템의 고장예측 사례 연구

Case Study on Fault Prediction of Automated System

강길순*, 이승연*, 임유철*, 이종효**, 유준*

* 충남대학교(전화:(042)823-3533, 팩스:(042)823-5436, E-mail : s_kangks@cnu.ac.kr)

** 국방과학연구소 (전화:(042)821-3181, E-mail : ljonghyo@hanmail.net)

요약 : 본 연구는 기존의 고장진단 기법들을 토대로 주어진 자동화 시스템에 실제 적용이 가능한 고장예측 알고리즘을 제시한다. 고장예측은 시스템이 운용되는 도중에 제한된 정보와 컴퓨터 자원을 이용하여 수행되어야 하므로 실시간 적용을 위하여 2단계로 구분하여 수행된다. 첫 번째는 실시간 고장예측 단계로서 시스템 운용 중에 시스템의 고장 징후를 탐지하는 역할을 하며, 두 번째는 오프라인 고장예측 단계로서 실시간으로 고장 징후가 탐지되면 시스템의 작동을 멈춘 후 고장의 징후를 분류하고 식별하는 역할을 수행한다. 원활한 고장예측 알고리즘을 도출하기 위해 자동화 시스템의 이산사건 모델과 연속시간 모델을 수립하였으며, 이들을 통합한 공정모델에 대하여 하이브리드 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 제안된 기법은 자동화 시스템의 공정모델에 기구부, 모터부에 대한 고장모델을 부가하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

Keywords : fault prediction, automated system, discrete event model, hybrid simulation

I. 서론

오늘날 공정 시스템은 컴퓨터의 발달로 복잡하고 다양한 기능을 수행할 수 있도록 다수의 하부시스템 및 제어요소로 구성된 복잡한 연결시스템 구조를 가지며, 많은 공정이 자동화되고 있는 추세이다. 이에 비례하여 고장의 요인과 발생 빈도가 증가하기 때문에 최근에 이러한 자동화 공정 시스템의 신뢰도의 유지를 위한 적극적인 대처방법으로서 고장예측에 대한 관심이 고조되고 있다. 고장예측은 시스템에서 고장이 발생한 후 이를 검출하는 고장진단과는 달리 고장에 대한 징후를 사전에 발견함으로써 고장으로 발전하기 이전에 이를 검출하는 기법이다.

본 연구는 기존의 고장진단 기법들을 토대로 자동화 공정 시스템에 실제 적용이 가능한 고장예측 알고리즘을 제시한다. 고장예측은 시스템이 운용하는 도중에 제한된 정보와 컴퓨터 자원을 이용하여 수행되어야 하므로 실시간 적용을 위하여 2단계로 구분하여 수행하였다. 첫 번째는 실시간 고장예측 단계로서 시스템 운용 중에 가용한 정보만을 이용하여 시스템의 고장 징후를 탐지하는 역할을 하며, 카이스퀘어(χ^2) 기법을 이용한 문턱값 검사 및 전문가 시스템을 적용하여 수행된다. 두 번째는 오프라인 고장예측 단계로서 실시간으로 고장 징후가 탐지되면 시스템의 작동을 멈춘 후 별도의 정비모드에서 고장의 징후를 분류하고 식별하는 역할을 수행함으로써 고장예측을 완료하며, 매개변수(parameter) 식별기법 및 신경회로망이 적용된다. 또한 본 연구에서는 원활한 고장예측 알고리즘을 도출하기 위해 자동화 시스템의 이산사건 모델과 연속시간

모델을 수립하였으며, 이들을 통합한 공정모델에 대해 하이브리드(hybrid) 시뮬레이션 환경을 구축하였다. 본 논문에서 제안된 기법은 현재 개발중인 무기체계의 탄약운반 자동화 공정 시스템을 대상으로 공정모델에 기구부, 모터부에 대한 고장모델을 부가하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

II. 대상 자동화 시스템

고장예측을 위해서는 먼저 대상이 되는 자동화 시스템에 대한 명확한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 대상 시스템으로서 그림 1과 같은 무기체계의 탄약운반 자동화 공정 시스템^[1]을 선정하였으며, 이 시스템은 크게 기구부와 제어 장치로 나눌 수 있다. 기구부는 적치대, 수평 이송기, 수직 이송기, 컨베이어로 구성되어 있으며, 각 장치들은 다수의 전동기 축과 센서로 이루어져 있다.

수평 이송기는 수평 X, 수평 Y, 회전, 그리프의 네 가지의 축으로 구성되며 이들의 궤적제어를 통해 탄을 적치대에서 수직이송기로 주거나 받는다. 동작 순서는 먼저 그리프 축의 그리퍼(Gripper)가 탄을 잡지한 후 수평 X, 수평 Y, 회전 축이 동시에 궤적 제어를 행하여 탄을 목적지까지 전달한 다음에 그리프 축으로 탄을 확지한다. 그리고 다시 다음 탄을 위해 수평 X, 수평 Y, 회전 축이 동시에 궤적 제어를 행하여 원위치로 복귀한다. 수직 이송기는 수직, 회전, 그리프의 세 가지의 축으로 구성되며 이들이 정해진 동작을 함으로써 탄을 수평 이송기에서 컨베이어로 주거나 받는다. 동작 순서는 그리프 축의 그리퍼가 수평 이송기의 탄을 잡지한 후에

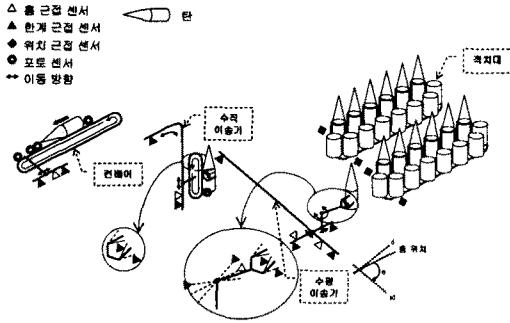


그림 1. 자동화 시스템 기구부 구조
Fig. 1. Automated System Structure

수직 축에 의해 상승하고 그립 축이 그리퍼를 확정한 후 회전 축이 회전하여 체인이 탄을 컨베어로 이송한다. 컨베어는 회전과 램머 축으로 구성되며, 동작 순서는 수직 이송기로부터 받은 탄을 회전 축에 의해 컨베어를 회전시켜 컨베어의 끝단에 있는 램머까지 이송시키면 램머가 이를 받아서 전진하여 탄을 목적지까지 밀어낸다.

III. 고장예측 알고리즘 도출

1. 실시간 고장예측 알고리즘

그림 1과 같은 자동화 공정 시스템의 각 축별로 제공되는 정보는 위치제어축의 경우 위치정보만, 속도제어축의 경우 속도정보만, 토크제어축의 경우 토크정보만 각각 통신주기에 따라 일정하게 제공되며 각 동작의 시작시간과 완료시간도 이용 가능하다. 따라서 고장예측을 위해서는 각 축별로 동작하는 기준값, 즉 위치기준값, 속도기준값, 토크기준값을 근거로 각 축의 오차 성분 및 동작시간을 특징점으로 이용하고 이를 적절히 가공하여 고장징후를 탐지하도록 알고리즘을 구성하여야 한다.

시스템에서 기구부나 모터, 센서에 고장이 발생하였을 때 이를 빠르게 감지하는 것은 매우 중요하며 고장징후 감지 방법은 정확하고 계산량이 적어야 하므로 본 연구에서는 가장 신속하고 계산량이 적은 방법인 문턱값(threshold) 비교 방법을 이용하는 한계치 검사와 추이곡선 검사를 수행하였으며, 이렇게 검출된 결과를 근거로 전문가 시스템을 이용하여 최종적으로 고장징후를 판단하였다.

위치축에 대한 실시간 고장예측 알고리즘의 구조 및 단계별 적용 기법을 정리하면 그림 2과 같으며, 속도 또는 토크축에 대해서도 이와 유사하게 구현될 수 있다.

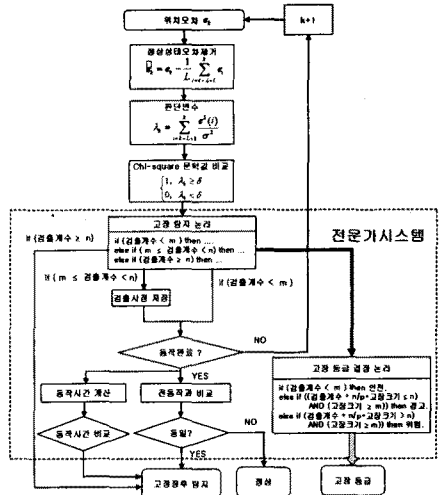


그림 2. 실시간 고장예측 알고리즘(위치제어축)
Fig. 2. Real time fault prediction algorithm (position control axis)

단계 1) 위치오차 계산

$$e_p(k) = P_r(k) - P_m(k) \quad (1)$$

P_r : 기준 위치, P_m : 측정 위치, e_p : 위치오차

단계 2) 정상상태 오차 제거

$$\tilde{e}(k) = e(k) - \frac{1}{L} \sum_{i=k-L+1}^k e(i) \quad (2)$$

\tilde{e}_p : 정상상태 바이어스 성분이 제거된 위치오차

단계 3) 판단변수 선정

$$\lambda(k) = \sum_{i=k-L+1}^k \frac{\tilde{e}_p^2(i)}{\sigma^2} \quad (3)$$

λ : 판단변수, σ : \tilde{e}_p 의 정상표준편차

L : 윈도우 크기

단계 4) 문턱값 비교

$$\begin{cases} 0, & \lambda(k) < \delta \\ 1, & \lambda(k) \geq \delta \end{cases} \quad (4)$$

$$\Pr \left(\sum_{i=k-L+1}^k \frac{e^2(i)}{\sigma^2} > \delta \right) = \alpha \quad (5)$$

δ : 자유도 L 과 유의수준에 의해 선정된 문턱값

단계 5) 전문가 시스템을 이용한 고장탐지 논리

• 탐지1: 검출시점을 저장하여 전 동작과 검출시점이 동일하면 고장징후로 판단

IF ($m \leq N_\lambda < n$) THEN save DT_k

and IF ($DT_{k-1} = DT_k$) THEN on-line fault

N_λ : 연속적으로 단계 4)의 문턱값을 초과한 검출개수

DT_k : k 시점에서 검출시간

m : 이상징후로 판단하고 반응하는 N_λ 의 최소 개수

n : 고장징후로 판단하는 N_λ 의 최소 개수

- 답지2 : 이상징후로 판단하는 검출개수가 연속적으로 일정개수 이상 반복되면 고장징후로 판단
 $IF (n \leq N_k) THEN on-line\ fault$
- 답지3 : 동작시간이 기준 시간과 비교하여 허용오차 시간을 초과 하면 실시간 고장징후로 판단하는 논리
 $IF (k = end) \text{ and } (|k - MT| > \Delta) THEN on-line\ fault$
 MT : 동작시간 기준값
 Δ : 동작지연 및 초과 허용범위 시간

2. 오프라인 고장예측 알고리즘

실시간 고장징후가 탐지되면 시스템의 작동을 멈춘 후 별도의 정비모드에서 오프라인 고장예측 알고리즘에 의해서 고장의 징후를 분류하고 식별이 수행된다. 오프라인 고장예측은 고장징후가 탐지된 축에 대하여 좀 더 세부적으로 진단을 수행하여 고장징후의 원인이 모터인지 기구인지 판단하는데 주 목적이 있으며 정확한 고장예측 및 분류를 위하여 실시간 운용 때보다는 좀 더 많은 정보가 필요하다. 그림 1의 자동화 시스템에서는 이를 위하여 통신 주기를 확장하고 데이터 포맷을 변경하여 운용 흐름, 동작시간 외에 위치, 속도, 토크 등과 같은 센서 신호를 추가로 획득하고 메모리에 저장한 후 이를 이용하였다.

본 연구에서는 검토된 고장예측 기법 중 파라메타 추정을 통한 신경회로망 기법[2]을 적용하였다.

추정된 파라메타를 패턴으로 간주하고 패턴을 분류함으로써 고장진단을 하며, 분류기로서는 신경회로망을 이용한다. 신경회로망은 학습방법에 따라 지도학습과 자율학습 신경회로망으로 나눌 수 있는데 볼스만머신과 다층 신경회로망 등은 지도학습을 이용하며, 자기조직화 형상지도와 ART2 신경회로망 등은 자율학습을 이용한다. 지도학습에서는 이미 알고 있는 데이터를 이용하여 신경회로망의 출력이 원하는 값을 따라가도록 가중치를 조정하나, 자율학습에서는 사전 정보를 갖지 못한 데이터로부터 규칙성을 찾아 신경회로망 자체를 조직해 나간다.

ART2 신경회로망은 이미 학습된 패턴과 입력패턴 간의 일치정도를 검사(경계인수 검사)하여 유사하면 같은 클래스로 학습하고, 그렇지 않으면 새로운 클래스를 생성시키는 중가 분류 알고리즘에 의해 패턴을 분류함으로써 추가 학습이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 ART2 신경회로망은 예견되지 않은 새로운 고장징후의 구축과 분류에 있어서 이용될 수 있으므로 오프라인 고장예측에 효과적인 것으로 판단되어 오프라인 고장예측 방안으로 도입하였다.

최종 도출한 ART2를 이용한 오프라인 고장예측 알고리즘은 그림 3과 같으며 각각의 단계별로 상세히 설명하면 다음과 같다.

단계1) 실시간 고장예측 알고리즘에 의해 고장이 예상되는 축에 대하여 다시 고장여부 확인

단계2) 이득행렬의 초기화 수행

단계3) RLS(Recursive Least Square)기법을 이용한 모터 파라미터 추정

단계4) 새로이 추정된 모터 파라미터가 입력되면, MINNET(minimum net)이 입력패턴과 각 출력노드와의 거리를 아래와 같이 계산하여, 거리가 최소인 출력노드를 선택하고 이 노드를 승리노드라고 하며 J 로 표시

$$d_j = ||W_j - X||, \quad j=1,2,\dots,M \quad (6)$$

여기서 $||$ 는 노름의 놈(norm)

단계5) 승리노드 J 의 거리가 아래와 같은 경계인수조건을 만족하면 경계인수검사를 통과하여 단계 7)로 가며, 그렇지 못하면 단계6)으로 이동

$$경계인수조건 : ||W_j - X|| < \rho \quad (7)$$

ρ : 각 클래스의 분류반경을 결정하는 경계인수

단계6) 새로운 가중치의 클래스 k 가 생성

$$W_k = X$$

단계7) 승리노드 J 의 가중치의 재조정

$$W_j^{new} = \frac{X + W_j^{old} [class_j^{old}]}{[class_j^{old}] + 1} \quad (8)$$

W_j^{old}, W_j^{new} : J 번째 출력 노드에서의 조정 전,후의 가중치 벡터, $[class_i]$: 클래스 i 에 속한 패턴들의 개수

단계8) 모터의 고장징후 판단

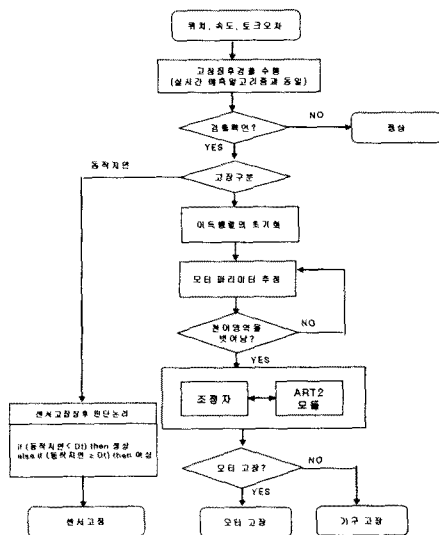


그림 3. 오프라인 고장예측 알고리즘(위치제어축)

Fig. 3. Off-line fault prediction algorithm (position control axis)

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

1. 시뮬레이션 환경 구축

그림 4의 공정모델에 대하여 MATLAB상의 Simulink 환경에서 그림 5와 같은 시뮬레이션 환경을 구축하였다.

원활한 고장예측 알고리즘을 도출하기 위해서는 고장예측을 위해서는 이러한 시스템에 대한 이해를 바탕으로 공정을 잘 표현하는 모델이 필요하다. 본 연구에서는 일반적인 모델링기법을 비교하여 자동화시스템의 이산사건 모델과 연속시간 모델을 수립하였으며, 이들을 통합하여 공정모델을 구축하였다.

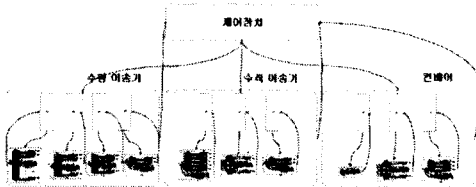


그림 4. 자동화 시스템의 공정 모델
Fig. 4. Process model of automation system

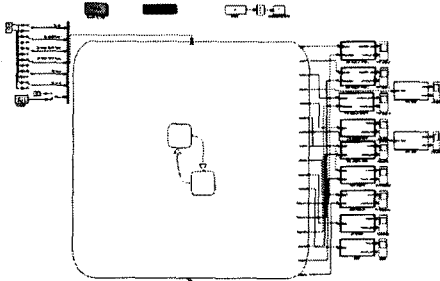


그림 5. 시뮬레이션 환경 구축
Fig. 5. Simulation Environment

2. 시뮬레이션 결과

수평 이송기 X축에 대하여 특정위치에서 필스형태의 기구부 고장에 대한 실시간 및 오프라인 시뮬레이션 결과를 그림 6과 그림 7에 각각 제시하였다.

실시간 예측 시뮬레이션 결과 고장여부를 탐지하고, 계속되는 오프라인 예측 시뮬레이션 결과 기구부에서 고장이 발생하였음을 보여준다. 여러 가지 다양한 고장에 대하여 시뮬레이션 결과 수평이송기 X축을 비롯한 다른 위치제어축, 속도제어축 및 토크제어축에서도 고장예측이 원활하게 수행됨을 알 수 있었다.

V. 결론

본 연구에서 자동화시스템에 대한 고장예측 기법을 무기체계의 자동화 시스템을 대상으로 도출하였다. 실시간 적용을 위하여 고장예측 단계를 실시간 고장예측과 오프라인 고장예측으로 구분하였으며 실시간 고장예측은 제한된 정보 및 시간제약상 카이스캐어를 이용한 문턱값 검사와 전문가 시스템을 적용하였으며,

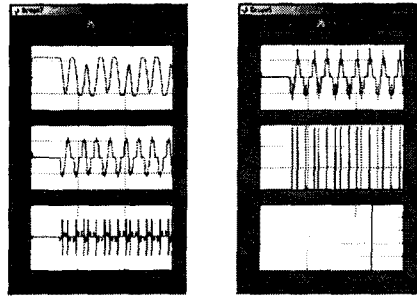


그림 6. 실시간 고장예측 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Real time fault prediction simulation result

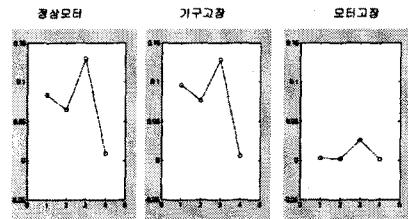


그림 7. 오프라인 고장예측 시뮬레이션 결과(매개변수 식별)
Fig. 7. Off-line fault prediction simulation result (parameter identification)

오프라인 고장예측에서는 정확한 고장예측 및 고장 분류를 위하여 매개변수 식별 및 신경회로망을 적용하였다.

도출된 알고리즘을 검증하기 위하여 MATLAB을 이용한 하이브리드 시뮬레이션 환경을 구축하고 정의된 고장에 대한 각각의 고장모델을 만들어 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 기법은 시뮬레이션을 통하여 작동작됨을 확인할 수 있었으며, 후후에 실제 시스템을 통한 검증을 수행할 예정으로 있다.

참고 문헌

- [1] 박승규 외 4인, 다축동시 제어 시스템 구축 및 기구메카니즘 최적화 최종보고서, 삼성테크윈, 2001.
- [2] 이인수, 선형시스템의 모델기반 고장감지와 분류 알고리즘, 경북대학교, 1996.
- [3] 장종태, 페트리네트를 이용한 RTP 셀의 모델링 및 시뮬레이션 연구, 충남대학교, 1999.
- [4] 이강수의 5인, Petri Net를 이용한 안전성 평가 방법에 관한 연구, 한국전자통신연구소
- [5] 윤병중 외 9인, 전문 제어 시스템에 관한 연구 기술현황분석보고서, 국방과학연구소, 1992.
- [6] 구인수 외 11인, 첨단 계측제어기술 개발 - 디지털 감시기술 개발 최종보고서, 과학기술처, 1997.