논문 2011-48SC-3-6

간헐 고장이 존재하는 비동기 머신의 견실한 상태 피드백 제어

(Robust State Feedback Control of Asynchronous Machines with Intermittent Faults)

양 정 민*

(Jung-Min Yang)

요 약

본 논문에서는 상태 피드백 제어를 이용한 비동기 순차 머신의 고장 탐지 및 극복 과정을 다룬다. 논문에서 고려하는 비동기 머신은 간헐 고장의 영향을 받는다. 간헐 고장이 발생하면 머신은 원하지 않는 상태 천이를 하며, 일정 시간 동안 외부 입력의 변화에 반응하지 못하고 고장 상태를 유지한다. 본 논문에서는 비동기 머신에서 발생하는 간헐 고장을 탐지할 수 있는 조건을 규명하고 간헐 고장을 극복하는 견실한 상태 피드백 제어기의 존재조건과 설계 알고리듬을 제안한다. 과도 고장에 대한 기존의 내고장성 제어 기법과 이번 연구에서 제안하는 간헐 고장에 대한 제어기 동작과의 차이점도 설명한다. 또한 사례 연구를 통해서 제안된 제어기의 설계 과정을 예시한다.

Abstract

This paper addresses the problem of fault detection and tolerance for asynchronous sequential machines using state feedback control. The considered asynchronous machine is affected by intermittent faults. When intermittent faults occur, the machine undergoes unauthorized state transitions and, for a finite duration, remains at the fault state, not responding to the change of the external input. In this paper, we postulate the scheme of detecting intermittent faults and present the existence condition and design algorithm for a robust state feedback controller that overcomes the adversarial effect of intermittent faults. We also undertake a comparative study between the previous control scheme for transient faults and the present strategy for intermittent faults. The design procedure for the proposed controller is described in a case study.

Keywords : Asynchronous Sequential Machines, Corrective Control, Fault Tolerance, Intermittent Faults

Ⅰ. 서 론

Murphy, Geng, Hammer가 2000년대 초에 발표한 이후로[1,2] 비동기 순차 머신(asynchronous sequential machine)의 교정 제어(corrective control)는 자동 제어의 원리로 비동기 머신의 안정 상태(stable-state) 동작을 보정해주는 새로운 제어 이론으로 자리 잡았다. 비동기 머신은 전역 클럭(clock) 없이 동작하기 때문에 설계가 난해하고 동기 머신(synchronous machine)과의 결합이 어렵다는 단점이 있다. 하지만 교정 제어는 전역 클럭이 없다는 바로 그 특성을 이용하여 폐루프 시스템(closed-loop system)의 동작을 바꾼다. 최근에 나온 교정 제어에 관한 연구로는 무환 순환(infinite cycle)[3], 크리티컬 레이스(critical race)[4], 모델 불확실성[5], 과도 외란 입력(transient disturbance input)[6] 등 교정 제어를 이용하여 비동기 머신에서 발생하는 여러 가지 오동작을 없애는 결과들이 있다.

본 논문의 목적은 교정 제어를 이용하여 입력/상태(input/state) 비동기 순차 머신에서 발생하는 간헐 고장(intermittent fault)을 탐지하고 복구하는 방법을 제안하는 일이다. 간헐 고장이 발생하면 머신은 원하지 않는 상태 천이(state transition)를 하며, 일정 시간 동

* 정회원, 대구가톨릭대학교 전자공학과
(Department of Electrical Engineering, Catholic University of Daegu)
※ 이 논문은 2011년도 대구가톨릭대학교 교내연구비 지원에 의한 것임
접수일자: 2011년1월17일, 수정완료일: 2011년5월12일

안 외부 입력의 변화에 반응하지 못하고 고장 상태를 유지한다. 교정 제어를 이용하여 과도 고장(transient fault)이나 영구 고장(permanent fault)이 존재하는 비동기 머신을 위한 고장 극복 제어 기법은 저자의 선행 연구에서 다루었으나[6,7] 간헐 고장에 대한 연구는 아직 발표되지 않았다.

간헐 고장은 과도 고장과 유사하나 고장의 영향이 일정 시간 동안 유지된다는 차이점이 있다[8]. 과도 고장 극복 기법과 비교하여 본 연구가 가지는 차별성은 다음과 같다.

1) 과도 고장이 발생하면 비동기 머신이 원하지 않는 상태 천이를 한 후 즉시 고장 극복을 위한 제어 동작을 가동할 수 있다. 그러나 간헐 고장은 고장의 영향이 일정 시간 지속되며, 또한 고장의 영향이 얼마나 지속되는지 제어기가 알지 못한다. 따라서 과도 고장의 경우와는 다른 새로운 고장 탐지 기법의 개발이 요구된다.
2) 간헐 고장의 영향이 지속되는 동안에는 비동기 머신의 외부 입력이 계속 바뀌어도 머신은 외부 입력 값에 맞는 정상적인 상태 천이를 하지 못한다. 즉 간헐 고장 발생 동안 비동기 머신은 일종의 dead-zone을 거친다. 따라서 교정 제어기가 외부 입력의 변화에 대해서 어떻게 대처하면서 고장 극복 동작을 취할지를 결정해야 한다.

본 논문에서는 먼저 간헐 고장이 존재하는 비동기 순차 머신을 모델링하고 고장 탐지 및 극복 문제를 설정한다. 그런 다음 간헐 고장 발생 조건을 규정하고 교정 제어기가 간헐 고장을 탐지하기 위한 조건과 탐지 과정을 제시한다. 그리고 간헐 고장에 의한 원하지 않는 상태 천이를 복구시키는 제어기가 존재할 필요충분조건을 규명하고 제어기 설계 알고리듬을 제안한다. 또한 사례 연구를 통해서 제안된 제어기의 설계 과정을 예시한다.

간헐 고장의 대표적인 예는 컴퓨터 기반 실시간 시스템 내부에서 전선 등의 접촉 불량으로 입출력 신호가 일정 시간 동안 제대로 나오지 않는 고장이다. 본 논문에서 제시한 견실한 상태 피드백 제어기를 시스템에 부착하면 이러한 간헐 고장에 상관없이 제대로 된 입력/출력 관계를 구현할 수 있다.

Ⅱ. 모델링 및 문제 설정

1. 간헐 고장이 존재하는 비동기 순차 머신

일반적인 집합 A에서 A^+는 A의 원소로 이루어진 길이 1 이상의 스트링(string) 집합을 말하며, $A^*=A^+\cup\{\varepsilon\}$이다. 여기서 ε는 빈 스트링(empty string)을 의미한다.

본 논문에서 다루는 비동기 순차 머신은 머신의 현재 상태 값이 출력으로 나오는 입력/상태 머신이다. 유한 상태 머신(finite-state machine)으로 입력/상태 비동기 머신 Σ를 표현하면 다음과 같다.

$$\Sigma = (A, X, x_0, f)$$

A는 입력 집합, X는 상태 집합, $x_0\in X$은 초기 상태(initial state)이며, $f:X\times A\rightarrow X$는 상태 천이 함수(state transition function)이다. 비동기 머신은 항상 안정 상태(stable state)나 과도 상태(transient state) 중에서 한 가지 상태를 가진다[9]. 임의의 상태-입력 조합 $(x,u)\in X\times A$에서 $f(x,u)=x$라면 x는 안정 상태이며 (x,u)는 안정 조합(stable combination)이다. 반면 $f(x,u)\neq x$이면 x는 과도 상태, (x,u)는 과도 조합(transient combination)이다.

전역 클럭이 없는 비동기 머신의 성질에 따라서 Σ의 과도 상태 천이 시간은 극히 짧다. Σ가 안정 조합 (x,u)에 있을 때 입력이 u에서 u′로 바뀐다고 하고 (x,u′)가 과도 조합이라고 가정하자. 머신 Σ는 $f(x,u')=x_1$, $x_2=f(x_1,u')$,...등으로 과도 상태 $x_1,x_2,...$를 순식간에 거쳐서 $f(x',u')=x'$인 '다음 안정 상태(next stable state)' x′에 도달한다. 외부 사용자에게는 Σ가 안정 조합 (x,u)에서 다음 안정 조합 (x′,u′)으로 즉시 이동하는 모습만 관측된다. 이러한 Σ의 안정 상태 동작만을 따로 표현하기 위해서 'stable-state 머신 $\Sigma_{|s}$'를 아래와 같이 정의한다[2].

$$\Sigma_{|s} = (A, X, x_0, s),\ s(x,u) := x'$$

위 식에서 f 대신 사용되는 'stable recursion 함수' s는 상태-입력 조합 (x,u)의 다음 안정 상태 x′를 반환하는 함수이다. 단위 입력 대신 입력 스트링을 s의 변수로 설정하면 다음과 같이 일반화할 수 있다.

$$s(x,ut) := s(s(x,u),t),\ x\in X,\ u\in A,\ t\in A^+$$

$s(x,t)=x'$인 입력 스트링 $t\in A^+$가 존재하면 상태 x′는 상태 x로부터 '도달가능하다(stably reachable)'[2~3]라고 부른다.

간헐 고장을 나타내기 위해서 입력 집합 A를 $A = A_N \cup A_F$와 같이 나눈다. A_N은 정상적인 외부 입력 집

합을 가리키고 A_F는 간헐 고장을 일으키는 외란 입력 집합을 말한다. 임의의 간헐 고장 입력 $w \in (A_F)^+$는 제어기가 관측 불가능(unobservable)하며 머신 Σ로의 진입을 막을 수도 없다(not disable).

Σ가 안정 상태 x에 있을 때 간헐 고장 w가 일어날 수 있다고 하자. w가 발생하면 Σ는 원하지 않는 상태 천이(unauthorized state transition)를 거쳐서 다음 안정 상태 x′로 옮겨 간다. 즉 $s(x,w)=x'$이고 $s(x',w)=x'$이다. 그런데 앞서 기술했듯이 간헐 고장이 일어나면 과도 고장과 달리 Σ가 상태 천이를 한 후에도 고장의 영향이 일정 시간 동안 사라지지 않는다. 유한 상태 머신 정의 하에서 이러한 성질을 표현하기 위해서 본 논문에서는 w가 내부적으로는 단위 고장 입력 $\omega \in A_F$로 이루어진 유한 스트링으로 동작한다고 가정한다. (이것이 앞에서 $w \in (A_F)^+$라고 표시한 이유이다.) 명시적으로 w를 다음과 같이 표현한다.

$$w := \omega\omega\cdots\omega,\ |w|<\infty$$

즉 임의의 간헐 고장 입력 w에는 단위 고장 입력 값 ω가 대응된다.

$w=\omega\omega\cdots\omega$가 일으키는 간헐 고장 동작은 다음과 같이 해석된다. 먼저 w의 첫 번째 단위 고장 입력 ω는 Σ를 상태 x에서 다음 안정 상태 x′로 천이시킨다. Σ가 x′로 옮겨간 후에는 w의 나머지 $|w|-1$개의 ω가 작동하여 Σ를 x′에 계속 머무르게 한다. 이 동안 Σ는 정상적인 외부 입력이 들어와도 반응하지 못하고 계속 고장 상태를 유지한다. 앞서 기술했듯이 w의 길이 |w|가 미리 알려져 있지 않기 때문에 w의 영향이 언제 끝나는지 제어기가 알지 못한다. 하지만 위에서 정의한 대로 $|w|<\infty$이므로 일정 시간이 지나서 ω의 영향이 모두 소진된 후에는 Σ가 외부 입력 또는 제어 입력에 반응할 수 있게 된다.

2. 문제 설정

그림 1은 입력/상태 비동기 머신 Σ의 간헐 고장을 극복하기 위한 교정 제어 시스템이다. C는 비동기 머신으로 구현되는 교정 제어기이다. $v \in A_N$는 정상적인 외부 입력이며, $u \in A_N$는 C가 만드는 제어 입력, 그리고 $x \in X$는 Σ의 현재 상태 값이다. $w \in (A_F)^+$는 간헐 고장 입력으로서 Σ로 유입되는 외부 외란이나 구성 소자의 노후화, 접촉 불량 등의 원인 때문에 Σ에서 생기는 내부 고장을 통칭한다[9]. 비동기 머신 Σ의 입력 $z \in A$는 u와 w 중 가장 직전에 변한 값으로 결정된다. 하지만 전술했듯이 w가 발생했을 경우에는 w가 가진 단위 고장 입력이 모두 Σ에 들어가기 전까지는 u의 값이 변해도 Σ의 입력은 w로 계속 유지된다. Σ_c는 Σ와 C로 구성된 폐루프 시스템을 가리킨다.

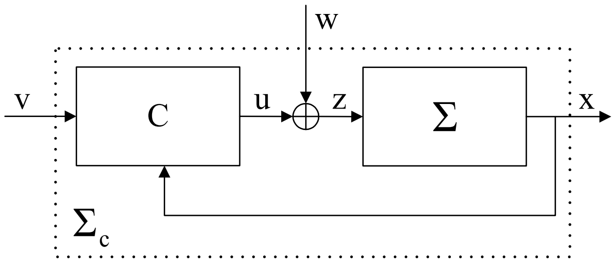


그림 1. 간헐 고장 극복을 위한 교정 제어 시스템
Fig. 1. Corrective control system for overcoming intermittent faults.

문제의 목적은 Σ에 간헐 고장이 발생해도 폐루프 시스템 Σ_c가 정상 동작을 하도록 하는 교정 제어기 C의 존재조건과 C의 설계 과정을 제시하는 일이다. 그런데 간헐 고장이 발생하면 일정 시간 동안(dead-zone) 어떠한 제어 입력도 Σ에 먹히지 않는다. 따라서 여기서 말하는 '정상 동작'이란 간헐 고장이 야기하는 dead-zone이 끝난 후 즉시 머신이 원래 상태로 천이하여 예측한 동작을 계속 진행한다는 뜻이다.

그림 1의 폐루프 시스템은 비동기 순차 머신 동작의 기본 모드 원리(fundamental mode operation)[9]를 만족시킨다고 가정한다. 기본 모드 원리는 비동기 머신이 안정 상태에 있을 때에만 입출력 변수가 바뀔 수 있다는 것이다. 기본 모드가 만족되지 않는다면 머신이 과도 상태에 있을 때에도 입력 값이 바뀔 수 있다. 이 경우 클럭에 의한 동기화가 안 되어 있기 때문에 비동기 머신이 가지는 다음 안정 상태는 예측 불가능하게 된다.

Ⅲ. 간헐 고장 탐지 및 복구

1. 간헐 고장 탐지

간헐 고장의 발생을 탐지하는 일은 과도 고장[6]이나 영구 고장[7]의 경우와 유사하다. 기본 모드 원리에 따라서 간헐 고장은 머신이 안정 상태에 있을 때 발생한다. 그림 1의 Σ가 안정 조합 $(x,u) \in X \times A_N$에 있다고 하자. 교정 제어기 C가 제어 입력 u를 다른 값으로 바꾸면 Σ도 그 변화에 따라서 정상적인 상태 천이를 하며, 상태 천이의 결과는 상태 피드백 값 x에 의해서 C로 전달된

다. 그런데 C가 제어 입력을 바꾸지 않은 상황에서 상태 피드백 값이 x에서 다른 값 $x' \in X$로 변경되었다고 하자. 그림 1의 구조에서 이 현상이 관찰되면 간헐 고장 w가 발생했다는 사실을 알 수 있다.

Σ가 안정 상태 x에 있을 때 발생하여 Σ를 x′로 천이시키는 간헐 고장 입력의 집합을 $W(x,x') \subset (A_F)^+$라고 정의하자. 교정 제어기 C는 안정 상태 x에서 x′로 가는 상태 천이를 관측한 순간 $W(x,x')$에 속한 간헐 고장이 발생했음을 인지한다. 제어기 C는 발생한 간헐 고장 입력 w의 정확한 값을 알지 못하지만 Σ의 모델링 정보로부터 집합 $W(x,x')$를 미리 알 수는 있다

2. 간헐 고장 복구

상태 x에서 발생한 간헐 고장 $w \in W(x,x')$의 영향을 복구하기 위해서는 w가 발생한 직후 교정 제어기 C가 머신 Σ를 x′에서 x로 되돌리는 제어 입력 스트링을 제공해야 한다. 비동기 머신 Σ를 x′에서 x로 되돌리는 제어기가 존재할 필요충분조건은 기존 연구[1-3]에서 밝힌 대로 x가 x′로부터 도달가능하다는 것이다. 이 조건을 다시 쓰면

$$\exists t \in (A_N)^+ \text{ such that } s(x',t)=x$$

이다. 위 식에서 나타낸 입력 스트링 t를 이용하여 교정 제어 동작을 구현한다.

교정 제어기 C의 존재조건을 표현하기 위해서 임의의 상태가 가지는 간헐 고장 발생 여부와 도달가능성을 skeleton 행렬로 표현한다. 먼저 Σ가 n개의 상태를 가진다고 하고 상태 집합을 $X=\{x_1,x_2,\ldots,x_n\}$이라 하자. 정상 입력 집합 A_N에 대하여 Σ가 가지는 n×n차 skeleton 행렬 $K(\Sigma)$는 다음과 같이 정의된다[1-3]: $K(\Sigma)$의 (i,j)번째 원소를 $K_{ij}(\Sigma)$라 하자. 만약 상태 x_j가 상태 x_i로부터 도달가능하면 $K_{ij}(\Sigma)=1$이고 그렇지 않으면 $K_{ij}(\Sigma)=0$이다. 다시 말하면 $K(\Sigma)$는 Σ의 각 상태간의 도달가능성 여부를 0과 1로 간단하게 표시한 행렬이다.

본 논문에서는 기존의 skeleton 행렬 정의를 확장하여 어떤 상태에서 간헐 고장이 발생할 수 있는지 여부를 나타내는 n×n차 skeleton 행렬을 $K^F(\Sigma)$라고 정의한다. $K^F(\Sigma)$의 (i,j)번째 원소 $K^F_{ij}(\Sigma)$는 앞에서 정의한 $W(x_i,x_j)$를 이용하여 다음과 같이 유도된다.

$$K^F_{ij}(\Sigma) = 1 \text{ if } W(x_i,x_j) \neq \varnothing$$
$$K^F_{ij}(\Sigma) = 0 \text{ if } W(x_i,x_j) = \varnothing$$

즉 x_i에서 x_j로 원하지 않는 상태 천이를 유발하는 간헐 고장이 발생할 수 있으면 $K^F_{ij}(\Sigma)=1$이며 그렇지 않으면 $K^F_{ij}(\Sigma)=0$이다.

간헐 고장을 극복하는 교정 제어기를 꾸밀 수 있으려면 x_i에서 x_j로 가는 고장에 의한 임의의 상태 천이를 되돌릴 수 있어야 한다. 다시 말하면 $K^F_{ij}(\Sigma)=1$이면 반드시 $K_{ji}(\Sigma)=1$이어야 한다. 이 조건을 일반화하면 아래와 같은 교정 제어기 존재조건이 완성된다.

$$K(\Sigma) \geq (K^F(\Sigma))^T \tag{1}$$

$(K^F(\Sigma))^T$는 $K^F(\Sigma)$의 전치행렬(transpose matrix)이다.

교정 제어기의 존재조건 (1)이 Σ에 대해서 만족된다고 하고 제어기 설계 과정을 기술한다. 그림 1의 폐루프 시스템에서 교정 제어기 C는 외부 입력 $v \in A_N$와 상태 피드백 $x \in X$를 입력으로 받아서 제어 입력 $u \in A_N$를 출력으로 낸다. 따라서 C를 유한 상태 머신으로 표현하면 아래와 같은 입력/출력(input/output) 비동기 머신 형태가 된다.

$$C = (X \times A_N,\ A_N,\ \Xi,\ \xi_0,\ \phi,\ \eta)$$

$X \times A_N$과 A_N은 각각 C의 입력과 출력 집합이며 Ξ은 C의 상태 집합, $\xi_0 \in \Xi$는 초기 상태, $\phi: \Xi \times X \times A_N \rightarrow \Xi$는 상태 천이 함수, 그리고 $\eta: \Xi \times X \times A_N \rightarrow A_N$는 출력 함수이다.

$W(x_i,x_j) \neq \varnothing$인 상태 x_i가 있다고 하고 Σ가 안정 상태 x_i에 도달하였다고 하자. 앞서 기술한 대로 기본 모드 원리에 따라서 간헐 고장은 Σ가 안정 상태에 있을 때 발생한다. 초기 상태 ξ_0에 있던 교정 제어기 C는 Σ가 안정 상태 x_i에 도달한 순간 다른 상태로 천이하여 간헐 고장의 발생에 대비한다. 교정 제어 기존 연구에서는 C가 이동하는 이 상태를 'transition 상태'[2,10]라고 하고 ξ_t로 표시한다. ξ_0나 ξ_t에서 아직 간헐 고장이 발생하지 않았기 때문에 C는 정상적인 외부 입력 v를 그대로 제어 입력 u에 전달해준다. ξ_0과 ξ_t에서 C의 상태 천이 함수 ϕ와 출력 함수 η는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}
&\phi(\xi_0,x,v) = \xi_0,\ \forall (x,v) \in X \times A_N \setminus \{x_i\} \times U(x_i) \\
&\phi(\xi_0,x,v) = \xi_t,\ (x,v) \in \{x_i\} \times U(x_i) \\
&\phi(\xi_t,x,v) = \xi_t,\ (x,v) \in \{x_i\} \times U(xi) \\
&\eta(\xi_0,x,v) = v,\ \forall (x,v) \in X \times A_N \\
&\eta(\xi_t,x,v) = v,\ \forall (x,v) \in X \times A_N
\end{aligned} \tag{2}$$

위 식에서 $U(x_i) \subset A_N$는 x_i와 안정 조합을 이루는 정상 입력의 집합을 말하고 '\'는 차집합(difference set)

을 가리킨다.

고장이 일어나지 않은 상황에서는 ξ_t에서 교정 제어기 C가 받는 상태 피드백 값이 x_i로 유지된다. 즉 머신 Σ는 안정 상태 x_i에 머물러 있다. 이후 외부 입력 v가 $U(x_i)$에 속하지 않은 값으로 바뀐다면 Σ는 다른 상태로 천이하며 그 후 정상적인 입출력 동작이 계속될 것이다. 하지만 외부 입력 v가 변하지 않은 상황에서 상태 피드백 값이 x_i에서 x_j로 바뀌었다면 C는 Σ에서 (값을 알 수 없는) 간헐 고장 $w \in W(x_i,x_j)$가 발생했다는 사실을 인지한다. 제어기 존재조건 (1)에 의해서 $K^F_{ij}(\Sigma)=1$이면 $K_{ji}(\Sigma)=1$이므로 $s(x_j,t)=x_i$인 입력 스트링 $t=u_1u_2\cdots u_{|t|}\in(A_N)^+$가 존재한다. 간헐 고장을 극복하기 위해서 C는 이 입력 스트링 t를 이용한다. t의 길이가 $|t|$이므로 C는 $|t|$개의 보조 상태(auxiliary state)를 더 필요로 한다[2]. 여기서 C가 필요로 하는 보조 상태를 $\xi_1,\xi_2,...,\xi_{|t|}$로 정의하자.

C는 w의 길이를 알지 못하고 w 내부의 단위 고장 입력 스트링이 언제 끝나는지도 모른다. C가 가질 수 있는 최선의 방책은 w의 스트링이 소진될 때까지, 즉 비동기 머신 Σ가 간헐 고장으로 인해 거치는 dead-zone이 끝날 때까지 고장 극복을 위한 제어 입력 스트링의 첫 번째 입력 값을 Σ에 계속 넣어주는 것이다. 이 방법을 다시 설명하기 위해서 먼저 Σ가 상태 x_j에서 입력 스트링 t를 받아서 x_i까지 옮겨갈 때 통과하는 안정 상태들을 $x^1,x^2,...,x^{|t|-1}$라 하자. stable recursion 함수 s로 $t=u_1u_2\cdots u_{|t|}$와 $x^1,x^2,...,x^{|t|-1}$와의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&s(x_j,u_1) = x^1\\
&s(x^1,u_2) = x^2\\
&\vdots\\
&s(x^{|t|-1},u_{|t|}) = x_i\\
&s(x_i,u_{|t|}) = x_i
\end{aligned}
$$

상태 피드백이 x_i에서 x_j로 바뀌는 순간 C는 첫 번째 보조 상태 ξ_1로 이동한다. 즉

$$\phi(\xi_t,x_j,v_{old}) = \xi_1,\ v_{old}\in U(x_i) \tag{3}$$

이다. 위 식에서 v_{old}는 고장이 일어나기 직전 상태 x_i와 안정 조합을 이룬 정상 입력을 가리킨다. 간헐 고장의 영향이 x_j에 지속되고 있는 동안 상태 ξ_1에 있는 C는 첫 번째 입력 u_1을 Σ에 제어 입력으로 공급한다. 물론 그림 1에서 볼 수 있듯이 Σ로 들어가는 최종 입력 z는 u_1이 아닌 w이며 고장의 영향이 지속되는 한 상태 피드백도 계속 x_j 값이 나온다. 즉 ξ_1에서 C의 출력 함수 η는 다음과 같이 정의된다.

$$\eta(\xi_1,x,v) = u_1,\ \forall(x,v)\in X\times A_N \tag{4}$$

위 식에서 정상적인 외부 입력을 v_{old} 대신 v로 표현한 것에 주목한다. 이것은 간헐 고장의 영향이 지속되는 동안 외부 입력이 v_{old}에서 다른 값으로 계속 바뀔 수 있다는 의미이다. 하지만 이 동안은 Σ가 v에 맞는 상태 천이를 하지 못하므로 교정 제어기 C는 위 식과 같이 모든 v를 '흡수'하고 대신 속 바뀔 수 있다는첫 번째 의미이다.u_1을 생성한다. 비동기 순차 머신 Σ의 운용 특성에 따라서 정상적인 상태 천이가 관찰되지 않는 동안에는 외부 입력 v가 변해도 의미가 없다. 따라서 간헐 고장이 발생하여 지속되고 있는 기간에는 시스템이 v를 변경하지 않도록 미리 설정할 수도 있다.

C가 u_1을 넣었을 때 상태 피드백이 x_j에서 x^1로 바뀌었다고 하자. 이것은 간헐 고장의 영향이 끝나서 u_1이 비동기 머신 Σ의 입력 z로 들어가 Σ가 고장 복구를 위한 첫 번째 상태 천이 $x_j\rightarrow x^1$를 했다는 사실을 뜻한다. x^1을 받은 C는 두 번째 보조 상태 ξ_2로 천이한다.

$$\phi(\xi_1,x^1,v) = \xi_2,\ \forall v\in A_N \tag{5}$$

ξ_2에서 C는 t의 두 번째 입력 character u_2를 제어 입력으로 Σ에 공급한다.

$$\eta(\xi_2,x,v) = u_2,\ \forall(x,v)\in X\times A_N \tag{6}$$

u_2를 받은 Σ 역시 두 번째 중간 상태 x^2로 천이하고, x^2를 상태 피드백으로 받은 C는 ξ_3으로 이동하여 u_3을 제어 입력으로 생성한다. 이런 식으로 일련의 교정 동작을 거치면 Σ는 간헐 고장이 발생하기 전에 머물렀던 원래 상태 x_i로 이동하여 고장 극복 과정이 완료된다. 이 모든 교정 동작이 클럭 없이 순식간에[2,5-7] 진행되므로 간헐 고장의 영향이 사라진 직후 폐루프 시스템 Σ_c는 고장으로 천이된 상태 x_j에서 원래 상태 x_i로 즉시 복구하는 모습이 관측될 것이다. 하지만 간헐 고장의 선천적 제한 조건으로 인해서 고장 발생 후 외부 입력이 변해도 정상적인 상태 천이나 고장 복구가 되지 않는 시간이 존재하는 것은 막지 못한다. 앞에서 언급했듯이 고장 기간 중 외부 입력 v를 변경시키지 않는 설정을 미리 함으로써 이 문제가 일으키는 피해를 최대한 줄일 수 있다.

Ⅳ. 제어기 설계 예제

논문에서 제안된 간헐 고장에 대한 교정 제어기의 설계 과정을 기술하기 위해서 그림 2의 사례 연구 비동기 머신 Σ를 생각하자. Σ의 정상 입력 집합은 $A_N = \{a, b, c, d\}$, 간헐 고장 입력 집합은 $A_F = \{\omega_1, \omega_2\}$이며 간헐 고장 w_1과 w_2는 각각 $w_1=\omega_1\omega_1\cdots\omega_1$과 $w_2=\omega_2\omega_2\cdots\omega_2$로 정의된 유한 스트링이다. 또 Σ의 상태 집합은 $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, 초기 상태는 $x_0 = x_1$이다. 사례 연구 기술을 간단하게 하기 위해서 $\Sigma = \Sigma_{|s}$로 설정하였다. 그림 2에서 관측연구 있듯이 $W(x_1,x_2)=\{w_1\}$, $W(x_3,x_4)=\{w_2\}$이며 나머지 상태에서는 $W(x_i,x_j)=\varnothing$이다. 즉 Σ가 x_1과 x_3에서 안정 조합을 이룰 때 각각 간헐 고장 w_1과 w_2가 발생하여 x_2와 x_4로 원하지 않는 상태 천이를 겪을 수 있다. 교정 제어기의 존재조건을 알아보기 위해서 먼저 skeleton 행렬을 구한다. 그림 2의 상태 흐름도로부터 $K(\Sigma)$와 $K^F(\Sigma)$는 다음과 같이 나온다.

$$K(\Sigma)=\begin{bmatrix}1&1&1&1\\1&1&1&1\\1&1&1&1\\1&1&1&1\end{bmatrix} \qquad K^F(\Sigma)=\begin{bmatrix}0&1&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&1\\0&0&0&0\end{bmatrix}$$

그림 2에서 $s(x_1,c)=x_2$이므로 $K_{12}(\Sigma)=1$이다. $K(\Sigma)$의 다른 원소 값도 유사하게 유도할 수 있다. 또 그림 2에서 보면 고장 입력 w_1과 w_2에 의해서 Σ가 x_1에서 x_2, 그리고 x_3에서 x_4로 각각 천이되므로 $K^F(\Sigma)$의 값은 위와 같이 나온다. 두 행렬은 $K(\Sigma)\geq(K^F(\Sigma))^T$ 관계를 만족시키므로 제어기 존재조건 (1)이 성립된다.

교정 제어기의 존재조건을 확인하였으므로 다음으로

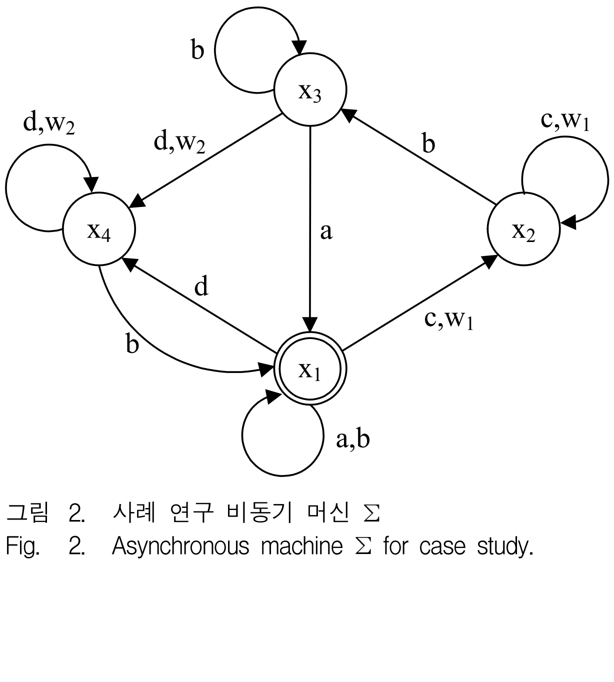


그림 2. 사례 연구 비동기 머신 Σ
Fig. 2. Asynchronous machine Σ for case study.

제어기 설계 과정을 기술한다. 간헐 고장이 일어날 수 있는 상태가 x_1과 x_3 두 개이므로 교정 제어 모듈도 두 개를 설계한 후 기존 연구[3]에서 제안된 "join" 연산을 이용하여 하나로 결합한다. 이번 사례 연구에서는 x_1에서 발생하는 간헐 고장을 극복하는 제어기 모듈을 C_1이라 부르고 $C_1=(X\times A_N, A_N, \Xi, \xi_0, \phi, \eta)$을 설계하기로 한다.

간헐 고장 w_1에 의해서 상태 x_2로 천이한 Σ를 원래 상태 x_1로 되돌리는 정상 입력 스트링은 그림 2에서 볼 수 있듯이 ba, bdb 등 두 개가 있다. 여기서는 둘 중 길이가 더 짧은 스트링인 ba를 제어 입력 스트링 t로 사용하기로 한다. $|t|=2$이므로 앞 장에서 기술한대로 제어기 C_1이 가지는 상태는 $\Xi = \{\xi_0, \xi_t, \xi_1, \xi_2\}$로 총 4개이다.

i) 초기 상태 ξ_0

초기 상태 ξ_0에 있던 C_1은 Σ가 x_1과 안정 조합을 이루는 순간 transition 상태 ξ_t로 천이해야 한다. 또 간헐 고장이 아직 발생하지 않았으므로 C_1은 외부 입력 v를 제어 입력 u에 그대로 전달한다. 식 (2)로부터 ξ_0에서 C_1의 ϕ와 η는 다음과 같다.

$$\phi(\xi_0,x,v) = \xi_0,\ \forall(x,v)\in X\times A_N\setminus\{x_1\}\times\{a,b\}$$
$$\phi(\xi_0,x,v) = \xi_t,\ (x,v)\in\{x_1\}\times\{a,b\}$$
$$\eta(\xi_0,x,v) = v,\ \forall(x,v)\in X\times A_N$$

그림 2에서 $U(x_1)=\{a,b\}$이므로 위와 같은 식이 나온다.

ii) transition 상태 ξ_t

transition 상태 ξ_t에서 C_1은 간헐 고장이 일어나지 않는 한 현 상태를 유지해야 하므로 식 (2)의 정의와 같이

$$\phi(\xi_t,x,v) = \xi_t,\ (x,v)\in\{x_1\}\times\{a,b\}$$
$$\eta(\xi_t,x,v) = v,\ \forall(x,v)\in X\times A_N$$

로 나온다. 외부 입력 v의 값이 변하지 않은 채 간헐 고장 w_1이 일어나는 순간 비동기 머신 Σ가 상태 x_2로 천이된다. 상태 피드백의 변화로 간헐 고장의 발생을 인지한 C_1은 식 (3)에서 정의한 바대로 첫 번째 보조 상태 ξ_1로 이동한다.

$$\phi(\xi_t,x_2,v_{old}) = \xi_1,\ v_{old}\in\{a,\ b\}$$

iii) 보조 상태 ξ_1, ξ_2

ξ_1로 이동한 C_1은 식 (4)~(6)에서 정의한 것과 같이 제어 입력 스트링 t=ba의 첫 번째 입력 b를 제어 입력 u로서 Σ에 공급한다. 그림 2에서 b를 받은 Σ는 간헐 고장의 영향이 끝난 후 x_3으로 천이한다. 상태 피드백 x_3을 관측한 C_1은 두 번째 보조 상태 ξ_2로 이동하여 t의 두 번째 입력 a를 생성하며, a를 받은 Σ는 마지막으로 원래 상태인 x_1로 귀환하여 고장 극복 과정이 완료된다. (4)~(6)을 기반으로 ξ_1, ξ_2에서 C_1의 동작을 설계하면 아래와 같다.

$\eta(\xi_1,x,v)$ = b, $\forall(x,v)\in X\times A_N$ (간헐 고장의 영향이 끝날 때까지 계속 b 입력. v는 변할 수 있음)

$\phi(\xi_1,x_3,v) = \xi_2$, $\forall v\in A_N$

$\eta(\xi_2,x,v)$ = a, $\forall(x,v)\in X\times A_N$

$\phi(\xi_2,x_1,v) = \xi_0$, $\forall v\in A_N$ (초기 상태로 복귀)

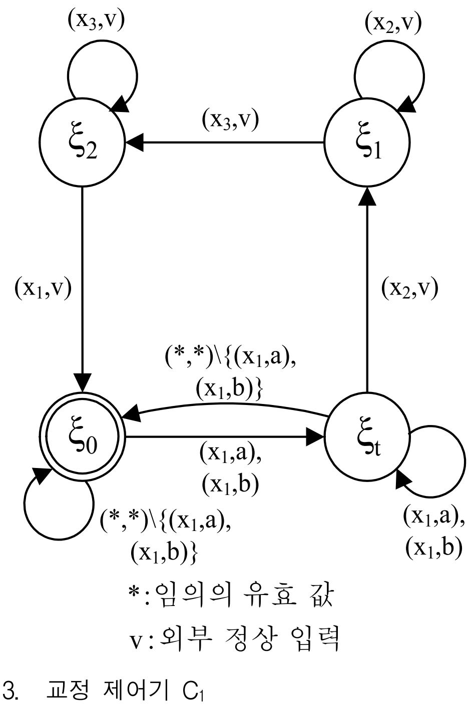


그림 3. 교정 제어기 C_1

Fig. 3. Corrective controller C_1.

표 1. 교정 제어기 C_1의 출력 값

Table 1. Output values of corrective controller C_1.

상태	출력 값
ξ_0	v (외부 정상 입력)
ξ_t	v (외부 정상 입력)
ξ_1	b
ξ_2	a

그림 3은 i)~iii)의 동작을 가지도록 설계된 제어기 모듈 C_1의 유한 상태 머신이다. 앞서 기술했듯이 C_1에 의해 제어되는 폐루프 시스템에서 간헐 고장 극복 동작은 비동기적으로 순식간에 진행되므로 외부 사용자에게는 고장의 발생이 거의 인식되지 않는다. C_1이 각 상태에서 내는 출력은 표 1에 정리되었다.

V. 결 론

비동기 순차 머신을 위한 교정 제어는 자동 제어의 새로운 분야로서 비동기 머신에서 발생하는 여러 가지 고장을 극복하는 데 우수성을 보인다. 본 논문에서는 간헐 고장이 존재하는 입력/상태 비동기 순차 머신의 내고장성 극복 문제를 교정 제어를 이용하여 해결하였다. 간헐 고장은 한 번 발생하면 고장의 영향이 끝날 때까지 유한 시간이 경과되어야 하므로 기존 연구에 비해서 고장 탐지와 극복 동작에서 차이를 보인다. 본 논문에서는 간헐 고장을 극복하는 교정 제어기가 존재할 필요충분조건을 skeleton 행렬을 이용하여 폐형식(closed form)으로 표현하였고 교정 제어기의 상세한 설계 과정을 기술하였다.

일반적인 비동기 순차 머신은 간헐 고장과 더불어 과도 고장의 발생도 함께 생기는 경우가 많다. 교정 제어를 이용하여 과도 고장과 간헐 고장의 영향이 모두 존재하는 비동기 순차 머신을 제어하는 연구가 추후 과제로 남아 있다.

참 고 문 헌

[1] T. E. Murphy, X. Geng, and J. Hammer, "Controlling races in asynchronous sequential machines," 15th Triennial World Congress, Barcelona, Spain, 2002.

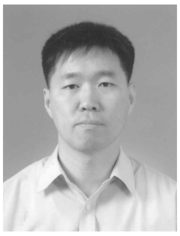
[2] T. E. Murphy, X. Geng, and J. Hammer, "On the control of asynchronous machines with races," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 6, pp. 1073-1081, 2003.

[3] N. Venkatraman and J. Hammer, "On the control of asynchronous sequential machines with infinite cycles," International Journal of Control, vol. 79, no. 7, pp. 764-785, 2006.

[4] J. Peng and J. Hammer, "Input/output control of asynchronous sequential machines with races," International Journal of Control, vol. 83, no. 1, pp. 125-144, 2010.

[5] 양정민, 박용국, “모델 불확실성을 가진 비동기 순차 머신의 모델 정합 포함을 위한 상태 피드백 제어”, 전자공학회논문지, 제47권 SC편, 제4호, 7-14쪽, 2010년.
[6] 양정민, 곽성우, “외란 입력을 극복하기 위한 입력/출력 비동기 머신의 교정 제어,” 전기학회논문지, 제58권, 제3호, 591-597쪽, 2009년.
[7] 양정민, “교정 제어를 이용한 비동기 순차 머신의 영구 고장 극복”, 전자공학회논문지, 제47권 SC편, 제5호, 9-17쪽, 2010년.
[8] C. M. Krishina and K. G. Shin, Real-Time Systems, New York: McGraw-Hill, 1997.
[9] Z. Kohavi, Switching and Finite Automata Theory, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1978.
[10] X. Geng, Model Matching for Asynchronous Sequential Machines, Ph.D. dissertation, University of Florida, 2003.

저 자 소 개



양 정 민(정회원)
1993년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사 졸업
1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업
1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업
1999년~2001년 한국전자통신연구원 선임연구원
2001년~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 부교수
<주관심분야 : 비동기 머신 제어, 실시간 시스템 고장 진단 등>