論 文
57-1-19

입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신의 모델 매칭

Model Matching of Asynchronous Sequential Machines with Input Disturbance

楊 正 敏†
(Jung-Min Yang)

Abstract – Model matching problem of asynchronous sequential machines is addressed in this paper. The main topic is to design a corrective controller such that the closed-loop behavior of the asynchronous sequential machine can follow a given model, i.e., their models can be "matched" in stable states. In particular, we assume that the considered asynchronous machine suffers from the presence of an input disturbance that can cause undesirable state transitions. The proposed controller can realize both model matching and elimination of the adverse effect of the input disturbance. Necessary and sufficient condition for the existence of a corrective controller that solves model matching problem is presented. Whenever controller exists, algorithms for their design are outlined and demonstrated in a case study.

Key Words : Asynchronous Sequential Machines, Corrective Control, Input Disturbance, Model Matching

1. 서 론

본 논문은 비동기 순차 머신(Asynchronous Sequential Machine)의 교정 제어기 설계에 대해서 다룬다. 비동기 순차 머신은 동기 순차 머신(Synchronous Sequential Machine)에 비해서 전력 소비가, 적고 연산 속도가 뛰어나며, 언제나 평균적 성능(average-case performance)을 보인다는 등의 장점이 있으나[1] 설계하기가 어렵고 해저드(hazard) 등의 문제가 내재할 수 있다. Hammer 등이 시작한 비동기 순차 머신을 위한 교정 제어(corrective control)는 재설계를 거치지 않고 기존 비동기 순차 머신의 동작을 바꾼다는 점에서 주목을 받아 왔다[2]-[4]. 교정 제어의 핵심은 비동기 순차 머신을 제어 대상으로 보고 전통적인 피드백 제어 기법을 이용하여 폐루프(closed-loop) 시스템의 동작을 보상한다는 사실이다. 저자의 최근 연구에서는 입력 외란(input disturbance)이 비동기 순차 머신에서 존재할 때 외란이 야기하는 원하지 않는 상태 천이를 없애주는 교정 제어기가 제안되었다[5][6].

본 논문의 목적은 입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신이 외란의 영향을 없애면서 정상적인 동작을 가지게 하며 또 주어진 모델의 동작과 일치하도록 하는 모델 매칭(model matching) 문제를 푸는 일이다. 제안될 교정 제어기는 외란에 의한 상태 천이를 원상태로 돌리고 비동기 머신의 동작을 원하는 목적(모델의 동작)에 맞게 보상하는 등 두 가지 작업을 동시에 수행한다. 이 문제는 자동 제어 분야에서 외란의 영향을 받는 플랜트(plant)를 위한 모델 추종 제어(Model Following Control)와 유사하다. 비동기 순차 머신의 모델 매칭 문제는 기존 연구[3][7]에서도 다루어져 왔으나 원하지 않는 상태 천이를 일으키는 입력 외란이 존재하는 머신에 대한 문제는 아직 해결되지 않았다. 또한 전통적인 피드백 제어 기법을 쓰는 본 논문의 방식은 Finite State Automata의 language를 기본으로 하는 Generator/Acceptor 방식의 DES 관리제어(Supervisory Control)[8]와 근본적으로 다른 접근 방법이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 [5]의 결과를 바탕으로 입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신의 수학적 모델링을 요약한다. 3장에서는 교정 제어 시스템을 기술하고 입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신의 모델 매칭 문제를 정의한다. 4장에서는 모델 매칭 문제 해결을 위한 제어기의 존재조건과 설계 과정을 제시하며, 제안된 제어기의 설계 과정은 5장의 사례 연구에서 검증한다. 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론을 내린다.

2. 입력 외란을 가진 비동기 순차 머신

본 장에서는 선행 연구 [5]에서 정립한 입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신의 수학적 모델을 요약한다. 비동기 순차 머신은 유한 상태 머신(Finite State Machine)으로 표현 가능하다. 논문에서 고려되는 비동기 순차 머신은 현재의 상태가 출력으로 나오는 입력/상태 머신(input/state machine)이며 원하지 않는 입력 외란이 존재하여 머신으로 들어온다. 입력 외란을 포함시킨 유한 상태 머신 식은 아래와 같이 두 개의 입력을 가진다.

$\Sigma = (A \times B, Y, X, x_0, f, h)$

† 교신저자, 正會員 : 大邱가톨릭大 電子工學科 副敎授 · 工博
E-mail : jmyang@cu.ac.kr
接受日字 : 2007年 10月 31日
最終完了 : 2007年 12月 6日

위 식에서 A는 정상적인 외부 입력이 가질 수 있는 알파벳 집합이고 B는 입력 외란의 알파벳 집합이며 빈 스트링(empty string) ϵ를 포함한다. Y는 출력 알파벳 집합, X는 n개의 원소로 이루어진 머신의 상태 집합이며 x_0는 머신의 초기 상태이다. f는 상태 천이 함수, h는 출력 함수이다. 입력/상태 머신에서는 Y=X이고 출력 함수는 h(x)=x로 항등함수(identity function)가 된다. 상태 천이 함수 f는 $f: X \times A \times B \rightarrow X$의 매핑(mapping)을 가지며 아래와 같이 정의된다.

$$x_{k+1} = f(x_k, (u_{1k}, u_{2k})),\ k = 0, 1, 2, \ldots$$

$u_{1k} \in A$는 정상적인 외부 입력, $u_{2k} \in B$는 입력 외란을 정의하며 $(u_{10}, u_{20}), (u_{11}, u_{21}), (u_{12}, u_{22}), \ldots$는 머신의 입력 시퀀스(sequence), $x_0, x_1, x_2, \ldots$는 머신의 상태 시퀀스를 가리킨다. 머신의 스텝(step) k는 입력이나 상태 변수가 변경되었을 때마다 하나씩 증가한다.

'valid pair' $(x, (u_1, u_2)) \in X \times A \times B$는 유한 상태 머신에서 f가 정의된 입력과 상태 쌍을 말한다. valid pair $(x, (u_1, u_2))$는 $f(x, (u_1, u_2)) = x$일 때 'stable combination'이라고 정의된다. 이때 x는 '안정 상태(stable state)'라 불리며 함수 f의 고정점(fixed point)이 된다. 비동기 순차 머신은 입력이 바뀌지 않는 한 stable combination에서 계속 머물러 있게 된다. stable combination이 아닌 입력과 상태 쌍을 'transient combination'이라고 부르고 transient combination을 이루는 상태를 '불안정 상태(unstable state)'라고 정의한다.

transient pair $(x, (u_1, u_2))$는 입력이 바뀌지 않는 한 $x_1 = f(x, (u_1, u_2))$, $x_2 = f(x_1, (u_1, u_2))$,...와 같이 연쇄적으로 상태 천이를 하여 stable combination에 도달한다. 즉 $x' = f(x_q, (u_1, u_2)) (q \geq 1)$이고 $x' = f(x', (u_1, u_2))$인 상태 x'가 존재한다면 $(x', (u_1, u_2))$는 비동기 순차 머신이 $(x, (u_1, u_2))$에서 시작하여 도달하는 stable combination이 된다. 이때 x'는 x로부터 'stably reachable'하다고 말한다. 만약 연쇄 천이가 끝나지 않고 transient combination 사이에서 계속 이루어진다면 $(x, (u_1, u_2))$는 무한 순환(infinite cycle)의 한 부분이 된다. 본 논문에서는 비동기 순차 머신에서 무한 순환이 존재하지 않는다고 가정한다.

비동기 순차 머신 Σ의 'stable recursion' 함수 s는 모든 valid pair에서 정의되는 함수로서 valid pair에서 시작하여 비동기 순차 머신이 다다르는 '다음 안정 상태(next stable state)'를 그 함수 값으로 가진다. 즉 valid pair $(x, (u_1, u_2))$에서

$$s(x, (u_1, u_2)) := x'$$

이며 x'는 $(x, (u_1, u_2))$의 다음 안정 상태이다. 정의에 따라서 $(x', (u_1, u_2))$는 stable combination이 된다. f대신 s를 이용하여 입력/상태 머신 Σ의 'stable state 머신'을

$$\Sigma_{|s} := (A \times B, X, X, x_0, s, h)$$

이라고 정의하고 $\Sigma_{|s}$라고 명명한다. stable state 머신은 비동기 순차 머신이 외부 사용자에게 보이는 실제 모습을 나타낸다. 클럭이 없으므로 비동기 순차 머신이 불안정 상태에서 머무르는 시간은 이론적으로 0이며, 머신은 순식간에 다음 안정 상태로 천이된다. 따라서 외부에서 보면 비동기 순차 머신의 상태가 고정되는 stable combination 동작만이 유효하다고 말할 수 있다.

본 논문에서는 선행 연구 [5][6]과 마찬가지로 입력 외란 u_2가 비동기 순차 머신이 stable combination에 있을 때만 발생하여 머신이 다음 안정 상태에 도달하면 소멸된다고 설정한다. 또 u_2는 정상 입력 u_1에 상관없이 발생하므로 상태 x에서 입력 외란 u_2가 발생할 때 stable recursion 함수 s는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & s(x, (u_1^i, u_2)) := s(x, (u_1^j, u_2)),\ \forall u_1^i, u_1^j \in U(x), \\ & s(x, (u_1, u_2)) := \text{undefined},\ \forall u_1 \not\in U(x) \end{aligned} \tag{1}$$

위 식에서 U(x)(⊂A)는 상태 x와 stable combination을 이루는 모든 정상 입력 알파벳 집합을 가리킨다. 식 (1)의 첫 번째 줄은 머신이 상태 x와 stable combination을 이루고 있는 한 입력 외란 u_2에 의한 상태 천이 결과는 u_1 값에 상관없다는 뜻이며, 두 번째 줄은 머신이 stable combination에 있지 않을 때에는 입력 외란의 변화가 발생할 수 없다는 의미이다. 이것은 비동기 순차 머신의 매개변수가 머신이 stable combination에 있을 때만 변할 수 있다는 기본 모드(fundamental mode)[8][9] 원칙에도 들어맞는 설정이다.

3. 모델 매칭 문제

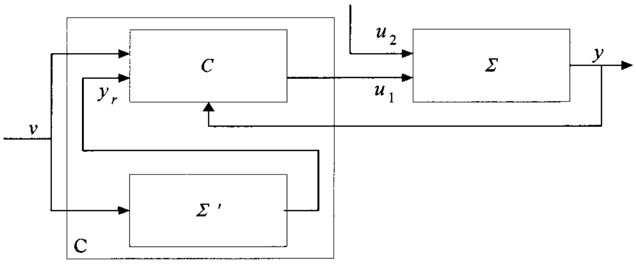


그림 1. 입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신의 폐루프 시스템.

Fig. 1. Closed-loop system of an asynchronous sequential machine with input disturbance.

선행 연구 [5]에서 제안된 비동기 순차 머신 제어 시스템 구조는 그림 1과 같다. 교정 제어기 C는 상태 피드백 제어부(control unit) C와 모델 Σ'로 구성된다. 제어부 C는 역시 비동기 순환 머신으로 구현되는데, 외부 입력 v와 제어 대상 머신 Σ의 상태 피드백 y를 받아 제어 입력 u_1을 생성하여 Σ에 보낸다. 모델 Σ'는 외부 입력 v에 대한 모델의 현재 상태 y'_r를 제어부 C에 보낸다. Σ'는 폐루프 시스템의 동작이 따라가야 할 모델이며, y'_r는 자동 제어의 모델 추종 제어(model following control)에서 쓰이는 기준 입력(reference input)에 해당되는 신호이다. Σ'는 미리 주어지는 값이므로 본 논문에서는 앞으로 상태 피드백 제어부 C가 바로 제어기 C를 의미한다고 설정한다.

외부에서 발생하는 입력 외란 u_2는 제어기 C를 거치지

않고 Σ로 직접 들어가기 때문에 제어기는 u_2가 발생시키는 원하지 않는 상태 천이를 막을 방법이 없다. 하지만 머신 Σ이 u_2에 의해서 옮겨간 상태로부터 원래 상태로 돌아갈 수 있는 능력을 보유한다면 제어기 C가 교정 동작을 구현할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 목적 이외에도 머신의 폐루프 시스템 동작을 주어진 기준 모델의 동작과 일치시키도록 하는 목적을 추가한다. 선행 연구 [6]에서는 Σ에서 단순히 입력 외란의 상태 천이를 제외한 유한 상태 머신을 모델 Σ'이라고 설정하였다. 즉 입력 외란을 제외하면 Σ'는 Σ과 동일한 머신이었다. 본 연구에서는 머신 Σ의 동작과는 다른 모델 Σ'를 설정함으로써 모델 매칭 문제의 일반성을 획득하기로 한다.

비동기 순차 머신의 모델 매칭 문제를 자세하게 정의하기 위해서 제어기 C와 폐루프 시스템의 모델링을 기술한다. 그림 1에서 제어기 C는 다음과 같은 유한 상태 머신으로 모델링 된다[6].

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

위 식에서 Ξ은 C의 상태 집합이며 ξ_0는 초기 상태, ϕ는 recursion 함수, η는 출력 함수이다. 그림 1의 폐루프 시스템을 Σ_c라고 표기하면 Σ_c는 C와 Σ로 이루어진 복합 시스템이므로 상태 집합 $X \times \Xi$, 입력 집합 $A \times B$를 가진다. f_c와 h_c를 각각 Σ_c의 상태 천이 함수, 출력 함수라고 정의하면 폐루프 시스템의 유한 상태 머신 표현 식은 아래와 같다.

$\Sigma_c = (A \times B, X, X \times \Xi, (x_0, \xi_0), f_c, h_c)$

Σ가 입력/상태 머신이므로 Σ_c의 출력 함수 h_c도 항등 함수가 된다.

두 개의 비동기 순차 머신의 stable state 머신 동작이 서로 일치하면 두 머신은 'stably equivalent'하다고 정의된다(등호 '='로 표시)[8]. stably equivalent한 두 머신은 현재 상태에서 동일한 입력이 들어오면 항상 동일한 출력을 낸다. 고려하는 비동기 순차 머신의 종류가 현재 상태를 그대로 출력값으로 가지는 입력/상태 머신이므로 stably equivalent한 두 머신의 상태 집합이 먼저 동일해야 하며, 임의의 안정 상태에서 입력 변화에 대한 다음 안정 상태가 서로 일치해야 한다.

비동기 순차 머신에 대한 교정 제어가 해결하는 모델 매칭 문제의 목적은 제어 대상 머신 Σ의 폐루프 시스템 동작 Σ_c를 어떤 stable state 머신 Σ'과

$\Sigma_{c|s} = \Sigma'$,

즉, 서로 stably equivalent되도록 바꾸는 일이다. 본 논문에서는 또한 Σ 안에 내재하는 입력 외란에 의한 상태 천이를 되돌리는 일도 성공해야 완전한 모델 매칭이 가능하다. 입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신에 대한 모델 매칭 문제를 다음과 같이 정의한다.

정의 1. 입력/상태 비동기 순차 머신 $\Sigma = (A \times B, X, X, x_0, f, h)$에서 입력 외란 $u_2 \in B$가 존재하여 식 (1)과 같은 상태 천이가 발생할 수 있다고 하자. stable state 머신 $\Sigma' = (A, X, X, x_0, s', h)$는 Σ와 동일한 입력 집합 A와 상태 집합 X를 가지며 입력 외란의 영향을 받지 않는 모델이다. 폐루프 시스템 $\Sigma_{c|s}$이 Σ'와 stably equivalent하는 동작을 보이도록 하는 교정 제어기 C가 존재할 필요충분조건을 구하고, C가 존재한다면 설계 알고리즘을 찾는다. □

모델 매칭 문제를 푸는 교정 제어기의 존재 여부는 비동기 순차 머신 Σ와 모델 Σ'의 도달가능성(reachability) 관계에 달려 있으므로 도달가능성을 정량적으로 표현하는 일이 필수적이다. [5]에서는 기존 연구 [3]에서 제안되었던 정상 입력에 대한 도달가능성 행렬과 더불어 입력 외란의 변화에 따른 도달가능성을 알려주는 'skeleton 행렬'을 아래와 같이 정의하였다.

정의 2: 입력 외란이 존재하는 입력/상태 비동기 순차 머신 Σ의 stable state 머신을 $\Sigma_{|s} := (A \times B, X, X, x_0, s, h)$이라고 하고 상태 집합 X의 원소를 $X = \{x_1, \ldots, x_n\}$라고 표시하자. Σ의 '정상 입력에 대한 skeleton 행렬' $S(\Sigma)$은 아래와 같이 정의되는 n×n차 정방 행렬이다.

$$S_{ij}(\Sigma) = \begin{cases} 1 & \exists\, u_1 \in A^+ \; s.t.\; x_j = s(x_i, (u_1, \epsilon)) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

또한 Σ의 '입력 외란에 대한 skeleton 행렬' $S_d(\Sigma)$은 아래와 같이 정의되는 n×n차 정방 행렬이다.

$$S_{dij}(\Sigma) = \begin{cases} 1 & \exists\, u_2 \in B \;\; s.t.\; x_j = s(x_i, (u_1, u_2)), \\ & \exists\, u_1 \in U(x_i) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{3}$$

□

상태 x_i에서 x_j로 가는 정상 입력 스트링(A^+)에 의한 stable transition 경로가 존재하면 skeleton 행렬의 원소 $S_{ij}(\Sigma)$는 1의 값을 가지며, 경로가 존재하지 않으면 0의 값을 가진다. 이 때 입력 외란은 $u_2 = \epsilon$로서 발생하지 않는다고 가정한다. 즉 $S(\Sigma)$는 정상 입력 변화에 대한 비동기 순차 머신 도달가능성을 0, 1로 간단하게 정량화한다. 입력 외란에 대한 skeleton 행렬 $S_d(\Sigma)$도 비슷하게 정의되지만 $S(\Sigma)$와 비교하여 중요한 차이점이 존재한다. $S_d(\Sigma)$는 두 상태 사이에서 벌어지는 입력 외란에 의한 상태 천이를 나타내지만 입력 외란의 변화가 한 번만 발생한다고 설정한다($u_2 \not\in B^+$, $u_2 \in B$). 그 이유는 그림 1에서 제안된 교정 제어기가 입력 외란 변화에 의한 상태 천이를 인지하는 즉시 교정을 시작하도록 설계되기 때문이다. 다시 말하면 원하지 않는 상태 천이가 일어난 후 또 다른 입력 외란이 발생하기 전에 제어기의 동작이 시작되므로 한 스텝에 대한 도달가능성만 고려하면 된다.

4. 제어기 설계

4.1 문제 설정

정의 1에서 설정한 모델 매칭 문제를 풀기 전에 폐루프 시스템 Σ_c과 모델 Σ' 사이의 stable equivalence 관계를 다른 방법으로 표현한다. 폐루프 시스템 Σ_c의 stable recursion 함수를 s_c라고 표기하면

$s_c : X \times \Xi \times A \times B \rightarrow X \times \Xi$

와 같은 매핑 관계를 가진다. 폐루프 시스템 $\Sigma_{c|s}$의 임의

상태 $(x, \xi) \in X \times \Xi$에서 x만을 추출하는 투영 함수 Π_x를 아래와 같이 정의하자.

$\Pi_x : X \times \Xi \rightarrow X$

s_c와 Π_x를 이용하여 Σ_c와 Σ'의 stable equivalence를 재론하면 다음과 같다.

i) 입력 외란이 없을 때($u_2 = \epsilon$): Σ'에서 정의된 모든 valid pair $(x, v) \in X \times A$에 대하여 (x, ξ, v)가 $\Sigma_{c|s}$의 valid pair가 되는 C의 상태 $\xi \in \Xi$가 존재하며 (x, ξ, v)는 아래 식을 만족한다.

$$\Pi_x s_c(x, \xi, (v, \epsilon)) = s'(x, v) \qquad (4)$$

ii) 입력 외란이 있을 때($u_2 \neq \epsilon$): $(x, (v, \epsilon))$, $v \in U(x)$를 Σ가 가지는 임의의 stable combination이라고 하자. 입력 외란 u_2가 ϵ에서 ω로 변할 때 아래 식을 만족시키는 제어기 C의 상태 $\xi \in \Xi$가 항상 존재한다.

$$\Pi_x s_c(x, \xi, (v, w)) = x \qquad (5)$$

i)은 머신 Σ가 모델 Σ'와 다른 동작을 보일 때 교정 제어를 통해서 폐루프 시스템의 동작을 모델 Σ'와 항상 일치시킬 수 있다는 뜻이다. ii)는 머신의 stable combination에서 입력 외란이 발생하여 원하지 않는 상태 천이가 일어나도 교정 제어기가 즉시 작동하여 머신을 원래의 상태로 되돌릴 수 있다는 의미이다.

제어기를 설계하기 위해서 우선 머신 Σ의 상태 집합 X 중 입력 외란이 일어날 수 있는 것들과 stable state 머신 $\Sigma_{|s}$에서 모델 Σ'과 다른 동작을 보이는 상태들을 분류하자. X의 원소 중 안정 상태에서 모델 Σ'과 다른 상태 천이를 보이는 상태 집합을 $T = \{\tau_1, \tau_2, , \ldots, \tau_q\}$라고 하고 입력 외란이 발생할 수 있는 상태 집합을 $Z = \{z_1, z_2, \ldots, z_p\}$라 하자. 일반적으로 $T \cap Z \neq \varnothing$, 즉 모델 Σ'과 다른 동작을 보이는 상태에서 입력 외란에 의한 원하지 않는 상태 천이가 일어날 수도 있다.

Σ와 Σ'과의 모델 미스매치(mis-match)를 다음과 같이 표현한다.

$$\tau_i \times U_i \rightarrow x'_i, \ i = 1, \ldots, q \qquad (6)$$

위 식의 의미는 모델 Σ'가 τ_i에서 stable combination을 이루고 있을 때 $U_i (\subset A)$에 속하는 입력 알파벳 v가 들어오면 x'_i로 상태 천이되지만 머신 Σ은 τ_i에서 x'_i가 아닌 다른 상태로 천이된다는 뜻이다. ($\tau_i \times U_i$는 각 i에 대해서 서로소이다.)

또 z_i에서 입력 외란이 발생하여 머신이 다다를 수 있는 상태 집합을 $\chi(z_i)$라고 정의한다. z_i에서 발생할 수 있는 입력 외란의 종류가 두 개 이상이라면 $|\chi(z_i)| \geq 2$, 즉 $\chi(z_i)$의 원소가 두 개 이상일 수 있다.

4.2 모델 매칭 구현

식 (4)의 모델 매칭을 구현하는 제어기 C를 설계한다. 앞에서도 설명했듯이 모델 매칭 제어기가 존재할 필요충분조건은 머신 Σ가 (6)의 모델 미스매치를 극복하는 데 필요한 도달가능성을 지니고 있는지 여부이다. 비동기 순차 머신 Σ이 가져야 할 도달가능성을 skeleton 행렬로 표시하면 아래와 같다.

$$S_{\tau(i)x'(i)}(\Sigma) = 1, \, i = 1, \ldots, q \qquad (7)$$

위 식에서 $\tau(i)$와 $x'(i)$는 식 (6)의 상태 τ_i와 x'_i가 집합 X에서 가지는 색인을 각각 말한다. 식 (7)은 머신 Σ의 안정 상태 x_i에서 $v \in U_i$인 v가 들어올 때 Σ가 $s(x_i, v) (\neq x'_i)$ 대신 x'_i으로 천이하기 위해서는 x'_i가 z_i로부터 stably reachable 해야 한다는 것을 말하고 있다.

제어기 C의 recursion 함수와 출력 함수를 각각 ϕ와 η라고 정의하고 $\xi \in \Xi$를 C가 가지는 임의의 상태라고 하자. 그림 1에서 C는 세 개의 입력을 가지므로 ϕ와 η를 각각 $\phi(\xi, x_r, (x, v))$, $\eta(\xi, x_r, (x, v))$라고 표기하자. $x_r (= y_r)$는 모델 Σ'의 현재 상태(기준 입력)를 말한다. ξ_0를 C의 초기 상태라고 정의하면 ξ_0에서 제어기가 해야 할 일은 머신의 상태가 $\tau_1, \ldots, \tau_q$ 중 하나에 속하는지를 알아서 다음 제어 동작을 하도록 준비하는 것이다. ξ_0에서 C의 동작을 아래와 같이 정의하자. 두 집합 α와 β가 있을 때 α/β를 α 원소에서 β 원소를 뺀 차집합이라고 정의한다.

$$\begin{aligned} &\phi(\xi_0, x_r, (x, v)) := \xi_0, \\ &\forall \, (x, v) \in X \times A / \cup_{i=1,\ldots,q} \tau_i \times U(\tau_i) \\ &\phi(\xi_0, x_r, (\tau_i, v)) := \xi_0(\tau), \\ &\quad \forall \, (x, v) \in U(\tau_i), i = 1, \ldots, q \end{aligned} \qquad (8)$$

$U(\tau_i)$는 식 (1)에서 사용하였듯이 τ_i와 stable combination을 이루는 모든 입력 알파벳 집합이다. 초기 상태에서 제어기 C는 외부 입력을 머신에 그대로 전달하는 역할만을 수행하므로 C의 출력 함수는 아래와 같이 정의된다.

$$\eta(\xi_0, x_r, (x, v)) := v, \, \forall \, (x, v) \in X \times A$$

위 설정에 따라서 제어기는 머신이 상태 $\tau_1, \ldots, \tau_q$ 중 하나와 stable combination을 이루면 초기 상태 ξ_0에서 상태 $\xi_0(\tau)$로 천이된다. $\xi_0(\tau)$를 C의 transition 상태라고 부른다[3][6]. 이 상태에서 C는 외부 입력 v의 값을 보고 폐루프 시스템 $\Sigma_{c|s}$의 상태 천이 함수를 바꾸는 동작을 시작한다. 하지만 제어기는 외부 입력 값이 변하기 전까지는 $\xi_0(\tau)$에서 Σ의 상태를 그대로 유지시켜야 한다. 즉 Σ가 τ_i와 stable combination을 계속 이루도록 해야 하므로 C의 출력 함수 η는 $\xi_0(\tau)$에서 아래와 같이 설정된다.

$$\begin{aligned} &\eta(\xi_0(\tau), x_r, (\tau_i, v)) := t, \, \exists \, t \in U(\tau_i), \\ &\qquad \forall v \in A, \ i = 1, \ldots, q \end{aligned} \qquad (9)$$

위 식에서 t는 머신의 현재 상태 τ_i와 stable combination을 이루는 입력 알파벳 중의 하나로 선택된다. 이와 같이 제어 입력을 설정하면 머신의 동작은 외부 입력 v에 영향을 받지 않게 되어 차후 제어기 C가 Σ의 동작을 바꿀 수 있다.

$\xi_0(\tau)$에서 제어기가 할 일은 머신 Σ의 현재 상태와 외부 입력에 따라 결정되는 목적 상태(다음 안정 상태)로 머신을

천이 시키는 일이다. Σ가 τ_i와 stable combination을 이루고 있을 때 U_i에 속한 외부 입력 v가 들어왔다고 하자. 식 (7)에 의해서 x'_i는 τ_i로부터 stably reachable하므로 $s(\tau_i, \alpha_i) := x'_i$인 입력 스트링 $\alpha_i \in A^+ \times \epsilon$가 다음과 같이 존재한다.

$$\alpha_i := (v_i^1, \epsilon)(v_i^2, \epsilon) \cdots (v_i^{m(i)}, \epsilon)$$

위 식에서 m(i)는 스트링 α_i의 길이이며 ϵ는 입력 외란이 발생하지 않는다는 의미이다. α_i가 들어올 때 Σ가 지나가는 상태를 $x_i^1, \ldots, x_i^{m(i)-1}$라고 하면 τ_i에서 x'_i까지의 stable transition은 다음과 같이 도시(圖示)될 수 있다.

$$\tau_i \overset{v_i^1}{\longleftrightarrow} x_i^1 \overset{v_i^2}{\longleftrightarrow} x_i^2 \overset{v_i^3}{\longleftrightarrow} \cdots \; x_i^{m(i)-1} \overset{v_i^{m(i)}}{\longleftrightarrow} x'_i \tag{10}$$

그림 1의 폐루프 시스템은 안정 상태에서 매개 변수가 한 번씩만 바뀔 수 있는 기본 모드를 만족시켜야 하므로 위의 stable transition을 구현하기 위해서 제어기 C는 m(i)개의 중간 상태를 필요로 한다. $\tau_i \rightarrow x'_i$의 교정 동작을 위해서 C가 가지는 중간 상태를 ξ_i^k, $k = 1, \ldots, m(i)$라고 정의하면 제어기 C의 recursion 함수 ϕ와 출력 함수 η의 동작은 다음과 같이 연쇄적으로 정의된다.

- $\xi_0(\tau) \rightarrow \xi_i^1$

$$\begin{aligned} &\phi(\xi_0(\tau), x_r, (\tau_i, v)) := \xi_i^1, \quad \forall v \in U_i, \\ &\phi(\xi_0(\tau), x_r, (\tau_i, v)) := \xi_0(\tau), \quad \forall v \in U(\tau_i)/U_i, \\ &\phi(\xi_0(\tau), x_r, (\tau_i, v)) := \xi_0, \quad \forall v \in A/(U(\tau_i) \cup U_i) \end{aligned} \tag{11}$$

- $\xi_i^k \rightarrow \xi_i^{k+1}$, $k = 1, 2, \ldots, m(i) - 1$

$$\begin{aligned} &\phi(\xi_i^k, x_r, (x_i^k, v)) := \xi_i^{k+1}, \quad \forall v \in U_i, \\ &\eta(\xi_i^k, x_r, (x, v)) := v_i^k, \; \forall (x, v) \in X \times A \end{aligned} \tag{12}$$

- $\xi_i^{m(i)} \rightarrow x'_i$

$$\begin{aligned} &\phi(\xi_i^{m(i)}, x_r, (x'_i, v)) := \xi_i^{m(i)}, \quad \forall v \in U_i, \\ &\phi(\xi_i^{m(i)}, x_r, (x, v)) := \xi_0(\tau), \\ &\quad \forall (x, v) \in \cup_{i=1,\ldots,q} \tau_i \times U(\tau_i), \\ &\phi(\xi_i^{m(i)}, x_r, (x, v)) := \xi_0, \\ &\quad \forall (x, v) \in X \times A / \cup_{i=1,\ldots,q} \tau_i \times U(\tau_i), \\ &\eta(\xi_i^{m(i)}, x_r, (x, v)) := v_i^{m(i)}, \quad \forall (x, v) \in X \times A \end{aligned} \tag{13}$$

위와 같이 제어기의 동작을 설정하면 식 (6)의 모델 매칭이 구현된다. 비동기 순차 머신의 교정 제어의 핵심은 (10)의 교정 동작이 stable transition을 통해서 이루어지지만 ((x_i^k, v_i^k)는 모두 Σ의 stable combination이다), 각각의 transition 속도를 매우 빠르게 하여 (이론적으로 0) 외부 사용자에게는 마치 unstable transition처럼 보인다는 사실이다. 따라서 교정 제어를 거친 폐루프 시스템의 stable state 머신 $\Sigma_{cl\,s}$은 안정 상태 τ_i에서 $v \in U_i$인 v가 들어오면 x'_i이 다음 안정 상태가 된다. 식 (11) ~ (13)의 구동에 대한 자세한 설명은 기존 연구 [3][6]에 나와 있다.

제어기 C는 τ_i에서 x'_i까지 연결하는 입력 스트링의 길이 m(i)에 해당하는 중간 상태를 필요로 하기 때문에 C가 가지는 총 상태 개수 Q는 아래와 같다. (식 (6) 참조)

$$Q = 2 + \sum_{i=1}^{q} m(i) \tag{14}$$

위 식에서 2는 C의 초기 상태 ξ_0와 transition 상태 $\xi_0(\tau)$를 셈한 것이다.

4.3 입력 외란 영향 삭제

입력 외란이 발생하여 원하지 않는 상태 천이가 일어났을 때 머신을 원래의 상태로 되돌리는 교정 동작도 앞 절에서 구현된 제어기와 유사하게 설계된다.

입력 외란이 발생할 수 있는 상태 집합 Z에 속한 임의의 z_i에서 입력 외란이 발생하여 머신이 다다를 수 있는 상태 집합을 $\chi(z_i)$라고 정의하였다. x'_{ij}, $j = 1, \ldots, |\chi(z_i)|$를 $\chi(z_i)$의 원소라 하자. 입력 외란의 영향을 되돌리는 교정 제어기가 존재하기 위해서는 외란이 발생하여 머신 Σ가 다다르는 상태에서 원래의 상태까지 도달가능 해야(stably reachable) 한다. 식 (7)과 유사하게 이 조건을 skeleton 행렬로 표시하면 아래와 같다.

$$S_{x'_i(j) z(i)}(\Sigma) = 1, \; i = 1, \ldots, p, \; j = 1, \ldots, |\chi(z_i)| \tag{15}$$

위 식에서 $z(i)$와 $x'_i(j)$는 상태 z_i와 x'_{ij}가 집합 X에서 가지는 색인을 각각 말한다.

제어기의 교정 동작은 앞 절에서 구현한 것과 거의 동일하다. 한 가지 차이점은 (10)과 달리 상태 z_i가 교정 동작의 출발 상태가 아닌 목적 상태(다음 안정 상태)가 되어야 하며, $\chi(z_i) \geq 2$, 즉 상태 z_i 당 일어날 수 있는 입력 외란에 의한 천이 결과가 복수 개가 될 수 있다는 사실이다. $\chi(z_i)$에 속하는 상태 x'_{ij}에서 원래 상태 z_i까지를 연결해주는 입력 스트링 α_{ij}을 다음과 같이 정의하자.

$$\alpha_{ij} := (v_{ij}^1, \epsilon)(v_{ij}^2, \epsilon) \cdots (v_{ij}^{m(i,j)}, \epsilon)$$

위 식에서 m(i,j)는 스트링 α_{ij}의 길이이다. 제어기가 구현할 교정 동작을 상태 z_i에 대해서 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{array}{l} x'_{i1} \overset{v_{i1}^1}{\longleftrightarrow} x_{i1}^1 \overset{v_{i1}^2}{\longleftrightarrow} x_{i1}^2 \overset{v_{i1}^3}{\longleftrightarrow} \cdots \; x_{i1}^{m(i,1)-1} \overset{v_{i1}^{m(i,1)}}{\longleftrightarrow} \searrow \\ \qquad \vdots \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad z_i \\ x'_{ir} \overset{v_{ir}^1}{\longleftrightarrow} x_{ir}^1 \overset{v_{ir}^2}{\longleftrightarrow} x_{ir}^2 \overset{v_{ir}^3}{\longleftrightarrow} \cdots \; x_{ir}^{m(i,r)-1} \overset{v_{ir}^{m(i,r)}}{\longleftrightarrow} \nearrow \end{array} \tag{16}$$

식 (16)에서 r은 $r = |\chi(z_i)|$, 즉 집합 $\chi(z_i)$의 원소 개수를 말한다.

앞 절에서 구현한 제어기와 마찬가지로 입력 외란의 영향을 없애는 제어기는 초기 상태 ξ_0에서 시작한다. 비동기 머신 Σ가 Z에 속하는 상태 하나와 stable combination을 이루면 제어기는 transition 상태 '$\xi_0(z)$'로 천이되어 교정 동작을 시작한다. 본 제어기가 필요로 하는 상태의 총 개수 P를 계산하면 아래와 같다.

$$P = 2 + \sum_{i=1}^{p} \sum_{j=1}^{|X(z_i)|} m(i,j) \tag{17}$$

상태 z_i에서 분기하는 입력 외란의 결과가 둘 이상일 수 있으므로 각 경우에 대해서 교정 동작을 구현하는 중간 상태를 설정하면 위 식과 같은 개수만큼의 상태가 필요하게 된다. 제어기의 자세한 동작 설정은 선행 연구 [6]에 나와 있다.

4.4 제어기 결합

정의 1에서 설정된 모델 매칭 문제는 머신 Σ의 폐루프 시스템 동작 $\Sigma_{cl\,s}$을 모델 Σ'과 일치시키는 동시에 입력 외란이 발생하여 원하지 않는 상태 천이가 일어날 경우 폐루프 시스템이 즉시 원래 상태로 되돌아갈 수 있게 제어기를 꾸미는 일이다. 이 제어기는 4.2절과 4.3.절에서 각각 구한 제어기를 결합함으로써 구현된다. 4.2절에서 설계한 모델 매칭 제어기를 C', 4.3절에서 설계한 입력 외란 영향 삭제를 위한 제어기를 C''라고 각각 이름 붙인다. 통합 제어기 C는 C'와 C''의 초기 상태 ξ_0와 (같은 이름으로 정의되었음) transition 상태 $\xi_0(\tau)$, $\xi_0(z)$를 각각 결합하여 하나의 상태 ξ_0와 $\xi_0(\tau, z)$를 만듦으로써 구현된다. 식 (14)와 (17)로부터 C가 가지는 총 상태 개수를 구하면 Q+P-2이다. (초기 상태와 transition 상태는 서로 결합되기 때문에 총 개수에서 2를 뺀다.) 비동기 순차 머신 Σ이 임의의 상태 x와 stable combination을 이룰 때 통합 제어기 C가 작동되는 규칙은 아래와 같다.

i) $x \in X/(T \cup Z)$: 이 경우는 x가 T와 Z 어디에도 속하지 않으므로 제어기 C는 외부 입력 v를 그대로 머신 Σ에 전달하는 역할만을 수행한다.

ii) $x \in T/Z$: x는 T에 속하고 Z에는 포함되지 않으므로 제어기 C 중 모델 매칭 제어 부분 C'의 동작만이 수행된다.

iii) $x \in Z/T$: x는 Z에 속하고 T에는 포함되지 않으므로 상태 x에서 모델 미스매치는 존재하지 않고 입력 외란만 일어날 수 있다. 따라서 제어기 C 중 입력 외란 삭제 부분 C''의 동작만이 수행된다.

iv) $x \in T \cap Z$: x가 T와 Z 양쪽 모두에 속할 때는 먼저 변화하는 매개 변수에 따라서 제어기가 작동한다. 식 (8)에서 정의한 동작에 의해서 제어기 C는 머신 Σ가 x와 stable combination을 이루면 초기 상태 ξ_0에서 transition 상태 $\xi_0(\tau, z)$로 천이된다. 이때 그림 1의 C와 머신 Σ은 모두 stable combination이 되므로 기본 모드 원리에 따라서 C에 들어오는 입력 v, y 중 하나만이 변경될 수 있다[3][6]. 만약 v가 변경되어 $U_i(x)$에 속하는 입력 v가 들어온다면 (i는 상태 집합 X에서 x가 차지하는 색인) 식 (6)의 모델 미스매치에 해당되므로 모델 매칭 제어 부분 C'가 작동하여 (10)과 같은 교정 동작이 따라온다. 만약 y가 변경된다면 이것은 입력 외란 u_2가 발생하여 원하지 않는 상태 천이가 일어났다는 뜻이므로 입력 외란을 없애기 위해서 C''가 작동한다. 다시 말하면 통합 제어기 C 중 C'와 C'' 부분은 기본 모드 원리에 따라서 서로 상충하는 때가 생기지 않는다. 따라서 본 제어기의 설계는 well-posed[3][4]된다고 말할 수 있다.

C'과 C''가 결합된 제어기 C는 비동기 순차 머신이 식 (7)과 (15)의 도달가능성을 만족시킬 때 나온 결과이므로 (7)과 (15)는 제어기 존재를 위한 충분조건이다. 하지만 이 조건은 제어기 존재의 필요조건이기도 하다. 이상의 논리를 정리하여 본 논문의 주요 결과를 요약하면 아래와 같이 나온다. 제어기 존재의 필요조건에 대한 증명은 기존 연구 결과 [3][4]를 참조하면 구할 수 있으므로 생략하기로 한다.

정리 1: $\Sigma = (A \times B, X, X, x_0, f, h)$ 는 입력 외란이 존재하는 입력/상태 비동기 순차 머신이다. 모델 $\Sigma' = (A, X, X, x_0, s', h')$는 Σ와 동일한 입력과 상태 집합을 공유하며 입력 외란이 존재하지 않는 stable state 머신이다. $S(\Sigma)$와 $S_d(\Sigma)$, $S(\Sigma')$를 각각 Σ와 Σ'의 skeleton 행렬이라고 할 때 다음 명제는 서로 동치이다.

(i) 그림 1의 폐루프 시스템 $\Sigma_{cl\,s}$이 Σ'와 stably equivalent되도록 하고 Σ에서 일어나는 모든 입력 외란에 의한 상태 천이를 되돌릴 수 있는 교정 제어기 C가 존재한다.

(ii) $S(\Sigma) \geq S(\Sigma')$이고 $S(\Sigma) \geq S_d^T(\Sigma)$이다. $S(\Sigma)$와 $S(\Sigma')$는 머신 Σ와 모델 Σ'의 정상 입력에 대한 skeleton 행렬이며 $S_d^T(\Sigma)$는 입력 외란에 대한 skeleton 행렬 $S_d(\Sigma)$의 전치 행렬이다. □

위 정리에서 명제 (ii)는 (7)과 (15)의 조건을 skeleton 행렬로 다시 표현한 것이다. 어떤 상태 x_i에서 모델 미스매치가 발생하여 모델 Σ'은 x_i에서 x_j로 천이되지만 비동기 순차 머신 Σ은 그렇지 못하다고 가정하자. $S(\Sigma) \geq S(\Sigma')$이고 skeleton 행렬의 원소는 0 또는 1이므로 $S_{ij}(\Sigma') = 1$이면 항상 $S_{ij}(\Sigma) = 1$이다. 따라서 정리 1에 의해서 (10)과 같은 교정 동작을 항상 구현할 수 있다. $S(\Sigma) \geq S_d^T(\Sigma)$인 경우도 비슷하게 설명할 수 있다 ([6] 참조).

5. 예 제

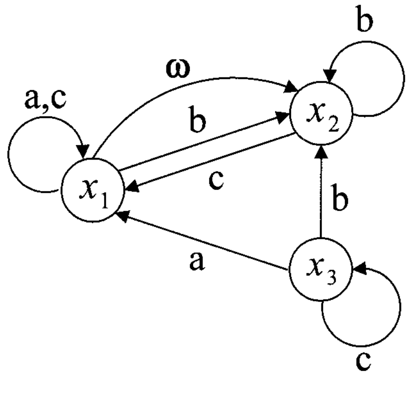


그림 2. 입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신 Σ.

Fig. 2. Asynchronous sequential machine Σ with input disturbance.

앞 장에서 기술한 모델 매칭을 위한 교정 제어기를 예제를 통해서 직접 설계하여 그 효용성을 입증한다. 그림 2는 입력 외란이 존재하는 제어 대상 비동기 순차 머신 Σ의 상태흐름도(State flow diagram)이다. 내용 전개를 간략하게 하기 위해서 $\Sigma=\Sigma_{|s}$로 설정하였다. 머신의 상태 집합은 $X=\{x_1, x_2, x_3\}$, 입력 집합은 A={a,b,c}, 그리고 입력 외란 집합은 B={ω}이다. 그림 3은 머신 Σ가 추종해야 할 모델 Σ'의 상태흐름도이다. 그림에서 알 수 있듯이 Σ'은 입력 외란을 포함하지 않는 정상적인 비동기 순차 머신이다. 그림 2와 그림 3을 비교하여 다음과 같은 모델 미스매치를 찾는다.

$x_3 \times \{a\} \rightarrow x_2$

머신 Σ가 x_3와 stable combination을 이루고 있을 때 외부 입력 a가 들어오면 x_1으로 천이하는 대신에 (Σ의 동작) x_2로 가야 한다 (Σ'의 동작). 또한 Σ은 상태 x_1에서 입력 외란 ω가 발생하여 x_2로 원하지 않는 상태 천이를 겪을 수 있다. 4.1절에서 정의한 상태 집합 T와 Z는 각각 $T=\{x_3\}$, $Z=\{x_1\}$이 된다.

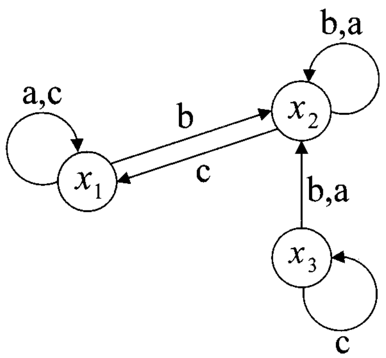


그림 3. 모델 Σ'.
Fig. 3. Model Σ'.

그림 2와 그림 3으로부터 Σ와 Σ'의 skeleton 행렬을 구하면 아래와 같다.

$$S(\Sigma)=\begin{bmatrix}1&1&0\\1&1&0\\1&1&1\end{bmatrix},\ S_d(\Sigma)=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix}$$

$$S(\Sigma')=\begin{bmatrix}1&1&0\\1&1&0\\0&1&1\end{bmatrix}$$

$S(\Sigma) \geq S(\Sigma')$이고 $S(\Sigma) \geq S_d^T(\Sigma)$이므로 정리 1에 따라서 모델 매칭 문제를 해결하는 제어기를 만들 수 있다.

먼저 Σ와 Σ'의 모델 매칭 문제를 해결하는 제어기 C'를 설계한다. $U(x_3)=\{c\}$이고 $U_1=\{a\}$(식 (6) 참조)이므로 식 (8)에서 정의된 제어기 초기 상태에서의 동작은 아래와 같이 나온다.

$\phi(\xi_0, x_{r'}(x,v)) := \xi_0,\ \forall\ (x,v) \in X\times A/(x_3,c)$

$\phi(\xi_0, x_{r'}(x_3,c)) := \xi_0(x)$

$\eta(\xi_0, x_{r'}(x,v)) := v,\ \forall\ (x,v) \in X\times A$

머신 Σ가 stable combination (x_3, c)을 이루면 제어기는 transition 상태 $\xi_0(\tau)$로 옮겨간다. 식 (9)에 따라서 $\xi_0(\tau)$에서 제어기의 출력 함수를 정의하면 아래와 같다.

$\eta(\xi_0(\tau), x_{r'}(x_3,v)) := c,\ \ \forall v \in A$

즉 모델 매칭을 실현하기 위해서 제어기는 제어 입력 c를 출력함으로써 머신을 안정 상태 x_3로 유지시킨다.

머신 Σ을 x_3에서 x_2로 상태 천이시키는 입력 스트링을 그림 2에서 찾으면 b이다. 이 스트링의 길이는 1이므로 제어기의 중간 상태는 ξ_1^1 한 개만 정의하면 된다. $\xi_0(\tau)$와 ξ_1^1에서의 제어기 동작은 식 (11)과 (13)에서 찾을 수 있다.

$\phi(\xi_0(\tau), x_{r'}(x_3,a)) := \xi_1^1,$

$\phi(\xi_0(\tau), x_{r'}(x_3,c)) := \xi_0(\tau),$

$\phi(\xi_0(\tau), x_{r'}(x_3,b)) := \xi_0$

$\phi(\xi_1^1, x_{r'}(x_2,a)) := \xi_1^1,$

$\phi(\xi_1^1, x_{r'}(x_2,v)) := \xi_0,\ \ v \in \{b,c\},$

$\eta(\xi_1^1, x_{r'}(x,v)) := c,\ \ \forall\ (x,v) \in X\times A$

x_1에서 일어나는 입력 외란에 의한 상태 천이를 되돌리는 제어기 C''의 동작도 C'와 유사하게 정해지므로 자세한 설계 내용은 생략한다([6] 참조). C'와 C''를 만든 다음에 4.4절에서 제시한 방법대로 두 제어기의 초기 상태와 transition 상태를 각각 결합하여 하나로 통합하면 모델 매칭 문제 해결을 위한 완전한 제어기 설계가 완성된다.

6. 결 론

본 논문에서는 입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신이 입력 외란의 영향을 없애면서 동시에 기준 모델의 동작을 추종하도록 하는 모델 매칭 문제를 해결하였다. 제안된 제어 시스템은 Hammer의 교정 제어기를 기반으로 하여 구성되었으며, 폐루프 시스템에서 재설계 없이 비동기 순차 머신의 동작을 바꿀 수 있다. 비동기 순차 머신은 기본 모드로 동작하므로 머신의 도달가능성 조건만 만족되면 입력 외란에 의한 상태 천이를 없애고 모델 매칭을 위한 교정 동작도 구현된다. 본 논문의 결과를 바탕으로 현존하는 비동기 순차 머신을 위한 교정 제어 시스템 제작에 관한 연구가 차기 연구에서 수행될 것이다.

참 고 문 헌

[1] S. Hauck, “Asynchronous design methodologies: an overview,” Proceedings of the IEEE, vol. 83, no. 1, pp. 69-93, 1995.

[2] J. Hammer, "On corrective control of sequential machines," International Journal of Control, vol. 65, no. 2, pp. 249-276, 1996.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 양정민, "입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신의 교정 제어 I: 모델링," 전기학회논문지, 제56권 D편, 제9호, pp. 1655-1664, 2007.

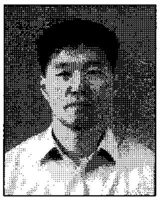
[6] 양정민, "입력 외란이 존재하는 비동기 순차 머신의 교정 제어 II: 제어기 설계," 전기학회논문지, 제56권 D편, 제9호, pp. 1665-1676, 2007.

[7] X. J. Geng, "Model matching for asynchronous sequential machines," Ph.D. Dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Florida, USA, 2003.

[8] Z. Kohavi, Switching and Finite Automata Theory, New York: McGraw-Hill, 1970.

[9] 조경연, 이재훈, 민형복, "기본 모드에서 동작하는 비동기 순차 회로의 시험 벡터 생성," 전자공학회논문지, 제35권 C편, 제9호, pp. 716-726, 1998.

저 자 소 개



양 정 민 (楊 正 敏)

1971년 3월 31일생. 1993년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업. 1995년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1999년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공박). 1999년 3월~2001년 2월 한국전자통신연구원 컴퓨터·소프트웨어연구소 선임연구원. 2001년 3월~현재 대구가톨릭대학교 전자공학과 부교수. 주관심분야: 비동기 순차 머신 제어, 결음새 연구 등.

Tel : 053-850-2736, Fax : 053-850-2704

E-mail : jmyang@cu.ac.kr