

유연생산시스템을 제어하기 위한 패트리 넷 기반 Supervisor Control 설계

이은주, 이종근

*창원대학교 컴퓨터공학과

e-mail : ejlee@changwon.ac.kr, jkleee@changwon.ac.kr

Petri net based Supervisor Control Design to Control FMS

Eun Joo Lee, Jong Kun Lee

*Dept. of Computer Engineering, Changwon University

요 약

본 연구는 Ramadge 와 Wonham 의 Supervisor Control 을 기반으로 한다. 초기 이 이론은 오토마타를 이용하여 모델링 하였으며, 많은 연구가 활발하게 이루어져왔다. 그러나, 유한 오토마타는 병렬처리 및 동기화, 자원공유를 모델링하기 어렵다는 단점이 있다. 유한 오토마타를 기반으로 한 연구는 일반적으로 복잡한 시스템을 모델링 할 때 발생하는 결함 폭발성에 의한 제한성이 있다. 반면, 패트리 넷은 병렬처리나 동기화에 대한 모델링을 하기에 보다 더 강력한 도구이지만, 패트리 넷을 이용한 통합법은 아직까지 광범위하게 연구되지는 않았다. 따라서, 본 연구에서는 공장설비(plant)모델과 이 설비에 대해 사용자가 원하는 작업을 명시한 사용자 설계명세 (user specifications)모델을 패트리 넷을 이용하여 모델링하는 방법을 제안한다. 본 연구는 사용자 설계명세에 관련한 폐쇄 회로 패트리 넷(closed-loop PN)을 획득하고자 원시 공장설비 모델에 제어 플라이스(control place)를 추가하는 통합을 실행하기 위한 방법으로 Ghaffari 의 영역 이론(Theory of Region)을 이용하여 연구개발 하였다

1. 서론

본 연구의 기본 배경은 유연생산 시스템 (FMS: Flexible Manufacturing System)을 자동적으로 제어하는 제어기를 디자인 하는 것이다. 제조 시스템은 특히 이산사건 시스템 (DES: Discrete Event System)이다. 1987년 Ramadge 와 Wonham 은 이산사건 제어 시스템을 디자인하기 위한 방법으로 Supervisor Control 이론을 제안하였다[1]. Supervisor Control 의 목적은 공장설비 (plant) 모델과 사용자 상세설계명세서 (user specification) 모델을 통합하여 제어기를 생성하고, 이 생성된 제어기를 이용하여 공장설비를 폐쇄-루프 (close-loop)로 제어하는 것이다.

Ramadge 와 Wonham 은 초기 Supervisor Control 방법을 제안할 때 오토마타를 이용하여 제어기를 설계하고 제어된 공장설비를 모델링하기 위하여 유한 오토마타를 이용하였다. 그러나, 유한 오토마타는 병렬처리 및 동기화, 자원공유를 모델링하기 어렵다는 단점이 있다. 또한, 유한 오토마타를 기반으로 한 연구는 일반적으로 복잡한 시스템을 모델링 할 때 발생하는 결함 폭발성에 의한 제한성이 있다. 반면, 패트리 넷은 병렬처리나 동기화에 대한 모델링을 하기에 보다 더 강력한 도구이다. 따라서, Yamalidou 나 Alpan 외의 많은 연구자들은 Ramadge 와 Wonham 이 Supervisor control 이론을 제안한 이후로 패트리 넷을 이용하여 모델링하는 방법을 연구하고 있다 [2-3]. Yamalidou 의

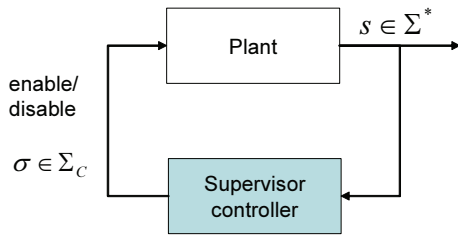
연구는 금지 플라이스에 대한 것으로 한정되며 사용자 상세설계명세는 부등식으로 표현한다. Alpan 의 연구는 사용자 상세설계명세서를 오토마타로 표현하였다.

따라서 본 연구에서는 보다 강력한 모델링 기법인 패트리 넷을 이용하여 원시 공장설비 모델 뿐만 아니라 사용자 상세설계명세 모델도 패트리 넷으로 모델링하여 통합하고 제어기를 설계하는 방법을 제시하려 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장에서 본 연구의 기본 배경인 Supervisor Control 에 대하여 설명하고 3 장에서는 본 연구에 사용된 Ghaffari 의 영역 이론 (Theory of Region)을 이용한 합성법을 소개한다. 4 장에서는 패트리 넷 기반 Supervisor Control 설계법을 제안하고 결론으로 본 연구의 특성과 앞으로의 연구 방향을 제시한다.

2. Automata-based Supervisory Control

서론에서 언급했듯이 Supervisor Control 을 구현하기 위해서 공장설비를 모델링하고 사용자 상세설계명세를 모델링하여 이 둘을 통합해야 한다. 그림 1 은 Supervisory Control 개요를 그림으로 묘사한 것이다.



Alphabet of event labels : $\Sigma = \Sigma_C \cup \Sigma_U$
 Controllable event : Σ_C Uncontrollable event : Σ_U
 Language environment : Σ^* = all finite strings of symbols from Σ
 Plant "behavior" is a sublanguage of Σ^*

(그림 1) Supervisor Control 개요 [4]

그림에서 알 수 있듯이 사건은 제어 가능한 사건들과 제어 불가능한 사건들로 분류되며 제어기는 제어 가능한 사건들만 관리할 수 있다.

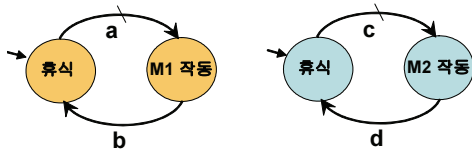
설명을 위하여 Ramdge 와 Wonham 은 생산자-소비자 시스템에 대하여 그림 2 와 같이 두 개의 기본 모델인 공장설비 모델과 사용자 상세설계명세 모델을 이용하였다.



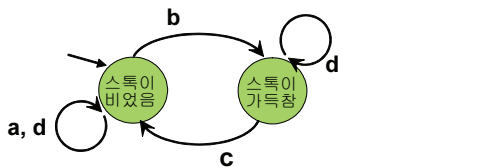
기계 (M₁)



기계 (M₂)



공장설비에 대한 오토마타 모델

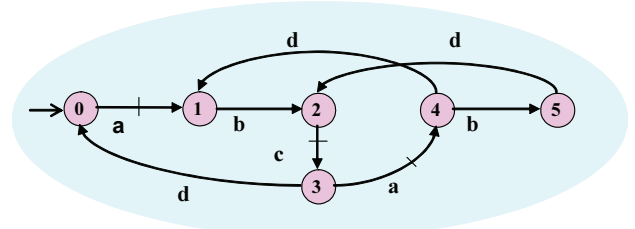


상세설계명세에 대한 오토마타 모델

(그림 2) 공장설비 오토마타 모델과 사용자 상세설계명세 오토마타 모델

예제에서는 사용자 상세설계명세에 맞게 공장설비가 작동하도록 제어기를 설계하기 위하여 그림 1 에서와 같이 제어가 가능한 사건들과 제어 불가능한 사건들을 각각 'a', 'c'와 'b', 'd'로 표기 하였다. 두 기계 M1 과 M2 는 각각 병렬의 상태로 동작한다. 이 두 기계를 스톡으로 연결하여 각각 생산자(M1)와 소비자

(M2)의 역할을 부여하여 하나의 시스템으로 만들고자 한다. 두 개의 오토마타 모델을 통합하기 위하여 벡터적 (Cross Product)을 하면 그림 3 과 같은 제어를 획득할 수 있다.



(그림 3) Ramadge 와 Wonham 의 오토마타 기반 Supervisor 제어기

그러나, 제어기를 생성하는 방법으로 오토마타를 사용하면 서브-시스템을 통합하기 위하여 벡터적을 사용하므로 상태 폭발이 발생할 가능성이 있다. 그러므로, 병렬 처리가 이루어지는 실제 시스템을 모델링할 경우 실현하기 어려울 수 있다. 이런 경우, 모델링 복잡성은 모델의 크기를 줄이거나 분할하여 복잡성을 줄이기도 한다[5]. 다른 방법으로는 패트리 넷과 같은 병렬처리를 모델링하기에 보다 더 적합한 방법을 이용하는 것이다.

3. The theory of Regions of Ghaffari

Ghaffari 는 발생 가능한 금지동작을 제어하기 위하여 초기 공장설비에 관한 패트리 넷에 제어 플레이스를 더하는 영역이론의 새로운 응용을 제안하였다[6]. Ghaffari 의 연구는 다음의 정리로 요약된다.

정리 1 [6] : 다음과 같이 제어 플레이스 $\{(M_0(p_c), C(p_c, \cdot))\}$ 의 집합 P_c 이 존재하면, 접근가능성 그래프가 G 인 패트리 넷 (N, M_0) 가 존재한다.

1. (N, M_0) 의 플레이스 p 가 G 의 순환식 (1)을 만족한다.

$$\sum_{t \in T} C(p, t) \vec{\delta}[t] = 0, \forall \delta \in \Delta \quad (1)$$

2. (N, M_0) 의 플레이스 p 가 G 의 마킹의 접근가능성 식 (2)에 적용된다.

$$M_0(p) + C(p, \cdot) \vec{\Gamma}_M \geq 0, \forall M \in R \quad (2)$$

3. M 으로부터 점화하지 않은 t 로 구성된 (M, t) 이 존재하면 상태분리식 (3)을 만족하는 제어 플레이스 p_c 가 적어도 하나 존재한다.

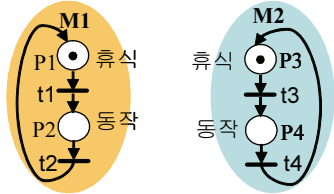
$$M(p_c) = M_0(p_c) + C(p_c, \cdot) \vec{\Gamma}_M + C(p_c, t) < 0 \quad (3)$$

본 연구에서는 Ghaffari 의 영역이론의 새로운 응용을 이용하여 초기 공장설비 모델에 제어기를 통합한다.

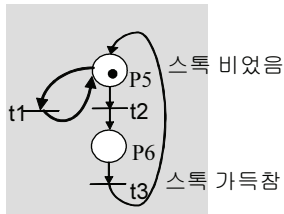
4. 패트리 넷 기반 Supervisor Control 설계

앞장에서 설명한 Supervisor Control 이론을 패트리넷 기반으로 설계하는 방법을 제안하기 위하여, 그림 2에서 묘사된 예제를 이용하고자 한다.

그림 2의 예제를 패트리 넷으로 다시 모델링 하면 그림 4와 같다.



공장설비에 대한 패트리 넷 모델

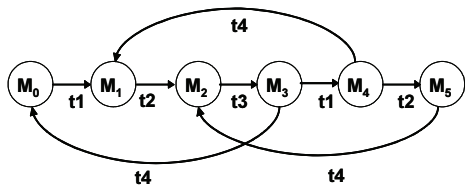


상세설계명세에 대한 패트리 넷 모델

(그림 4) 그림 2의 패트리 넷 모델

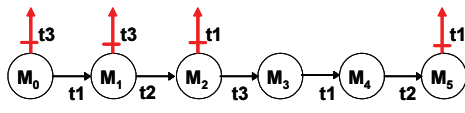
공장설비 모델과 상세 설계 모델을 전형적인 합성 방법인 접근가능성 그래프(Reachability Graph)를 이용하는 경우에는 오토마타에서와 유사하게 상태 폭발 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 패트리 넷 합성방법을 변형한 CSRG (Construction of a Synchronous Reachability Graph)를 이용한다 [7].

합성결과로 획득한 사용자 상세설계명세에 의한 기대 동작과 금지동작은 그림 5와 같다.



$$(t_1 t_2 (t_3 t_1 (t_2 t_4 + t_4 t_2))^* t_3 t_4)^*$$

가. 기대 동작의 시퀀스



$$t_3 + t_1 t_3 + t_1 t_2 t_1 + t_1 t_2 t_3 t_1 t_2 t_1$$

나. 금지 동작의 시퀀스

(그림 5) 기대 동작과 금지동작

그림 5의 시퀀스를 Ghaffari의 영역이론을 이용해 적용하기 위하여 다음의 식으로 변형할 수 있다.

$$C_c(p_c, t1) + C_c(p_c, t2) + C_c(p_c, t3) + C_c(p_c, t4) = 0 \quad (1.1)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{20}(p_c) &\geq 0 \\ M_{21}(p_c) &= M_{20}(p_c) + C(p_c, t1) \geq 0 \\ M_{22}(p_c) &= M_{20}(p_c) + C(p_c, t1) + C(p_c, t2) \geq 0 \\ M_{23}(p_c) &= M_{20}(p_c) + C(p_c, t1) + C(p_c, t2) + C(p_c, t3) \geq 0 \\ M_{24}(p_c) &= M_{20}(p_c) + 2C(p_c, t1) + C(p_c, t2) + C(p_c, t3) \geq 0 \\ M_{25}(p_c) &= M_{20}(p_c) + 2C(p_c, t1) + 2C(p_c, t2) + C(p_c, t3) \geq 0 \end{aligned} \right\} (2.1)$$

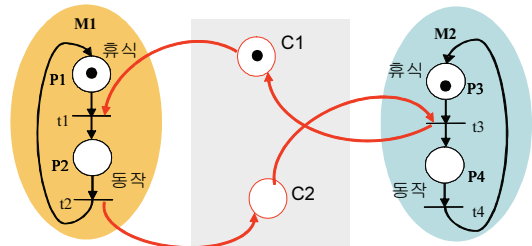
$$M_{20}(p_{c1}) + C(p_{c1}, t3) < 0 \quad (3.1)$$

$$M_{20}(p_{c2}) + C(p_{c2}, t1) + C(p_{c2}, t2) + C(p_{c2}, t3) < 0 \quad (3.2)$$

$$M_{20}(p_{c3}) + C(p_{c3}, t1) + C(p_{c3}, t3) < 0 \quad (3.3)$$

식 (1.1)은 정리 1의 식 (1), 식 (2.1)은 정리 1의 식 (2) 그리고 식 (3.1)에서 (3.3)은 정리 1의 식 (3)에 적용하여 생성된 수식들이다.

이 수식을 이용하여 영역이론에 따른 제어 플레이스를 계산하면 최종적으로 그림 6과 같은 패트리 넷 모델을 얻을 수 있다.



(그림 8) 사용자 상세설계명세에 의한 제어 패트리 넷 모델

그림 6은 기존의 공장설비 모델에 제어 플레이스 'C1'과 'C2'를 추가하여 사용자 요구 사항에 적합한 동작을 하는 것을 의미한다.

5. 결론

본 연구에서는 유연생산 시스템에서 사용자 요구에 따른 제어를 하기 위한 Supervisor Control 시스템을 패트리 넷을 이용하여 설계하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 기존의 패트리 넷을 이용한 방법과는 달리 금지 시퀀스를 추출하였으며, 이 추출된 시퀀스를 제어하는 제어 플레이스를 생성하였다. 추후 연구로는 사용자 상세설계명세를 모델링하는 체계적인 형식론을 제시하고자 한다.

참고문헌

[1] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Supervisory control of a class of Discrete Event Processes," SIAM J. Control and Optimization, vol. 25, No. 1, January 1987
 [2] Gülgün Alpan and Mohsen A. Jafari, "Synthesis of a Closed-Loop Combined Plant and Controller Model," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,

Part B, 2002

- [3] K. Yamlidou, J. Moody, M. Lemmon and P. Antsaklis, "Feedback control of Petri nets based on place invariants," vol.32, No.1, pp. 15-28, 1996
- [4] W. M. Wonham, "Supervisory Control of Discrete-Event Systems: An Introduction," Proc. IEEE International Conf. on Industrial
- [5] Max H. de Queiroz and Jose E.R. Cury, "Modular Supervisory Control of Large Scale Discrete Event Systems," Proceedings of the Fifth Workshop on Discrete Event Systems (WODES 2000), Ghent, Belgium, 21-23 August, 2000
- [6] A. Ghaffari, N. Rezg and X. Xie, "Live and Maximally Permissive Controller Synthesis Using Theory of Regions," in Synthesis and Control of Discrete Event Systems, B. Caillaud et al. (eds). Kluwer Academic Publishers, pp. 155-166, 2002
- [7] E. J. Lee, A. Toguyéni and N. Dangoumau, "Petri net based Controllers for Forbidden Sequences of State-Transitions in the Control of Flexible Manufacturing Systems," Conceptual Modeling and Simulation Conference - CMS 2005, Marseilles, France, October 20-22, 2005.