

이산사건 시스템 제어 및 모니터링을 위한 퍼지 페트리네트 응용

Application of Fuzzy Petri Nets for Discrete Event System Control and Monitoring

노명균, 홍상은

순천향대학교 전기·전자공학부 (Tel:+82-418-530-1367; Fax:+82-418-530-1373; E-mail:sehong@asan.sch.ac.kr)

Abstract This paper presents a Petri net approach for the control and monitoring of discrete event system. The proposed model is fuzzy Petri nets based on the fuzzy logic with Petri nets and the hierarchy concept. Fuzzy Petri nets have been used to model the imprecise situations which can arise within automated manufacturing system, and also the hierarchy concept allow to handle the refinement of places and transition in Petri nets model. These will form the foundation of a simulator-tool with manipulation interface for application of fuzzy Petri nets.

Keyword Petri Nets, Discrete Event System, Fuzzy Petri Nets, Monitoring

1. 서론

페트리네트는 여러 시스템에 적용할 수 있는 그래프 표현이며 수학적인 모델링 도구이다. 페트리네트는 동시적(concurrent), 비동기적(asynchronous), 분산적(distributed), 병렬적(parallel), 비확정적(nondeterministic), 그리고 확률적(stochastic)인 현상을 갖는 정보처리, 작업공정 시스템을 묘사하고 분석, 연구하는데에 유익한 도구이다.

이산사건시스템은 부품의 제조공정, 통신망, 그리고 컴퓨터시스템 등이 있다. 자동화시스템 특히 본 연구에서 다루는 공장자동화시스템 (FAS : Factory Automation System)의 대부분의 부시스템(Sub-system)은 이산사건 시스템으로 구성되어 질 수 있다. 이와 같은 시스템을 분석하기 위해서는 시스템에 대한 적절한 모델링이 필요하다. 이산 사건 시스템의 모델링은 여러 가지 방법이 제안되어 있고 분류도 다양하지만 그 가운데 페트리네트는 망이론에 기초를 둔 모델링 방법으로 이산사건을 잘 표현을 할 수 있다. 또한, 이산사건시스템의 명확한 규정(formal specification), 명확한 확인(formal verification), 그리고 성능평가(performance evaluation)에 대한 통일된 환경을 제공하며 실시간 제어 (real-time control)의 구현에 사용될 수 있다. 특히, 정보의 흐름을 나타내는 토큰(token)은 시스템의 동적이고 동시발생적인 상황과 활동을 모의실험하는데 사용될 수 있다. 이러한 토큰 정보로부터 시스템의 각 부분의 상태에 대한 실시간 감시(Monitoring)가 가능하다. 그리고 PLC (Programmable Logic Controller)와 같은 여러 부시스템을 순서대로 동작시키고 조정할 수 있을 뿐 아니라, 시스템에 대한 페트리네트 모델로부터 시뮬레이션을 할 수 있고, 이로부터 성능평가도 가능하다.

그러나 FAS는 시스템 전부를 이산사건으로 취급하는 것은 아니며 특정의 부시스템인 경우 정량적인 제어출력을 내주어야 하는 연속적인 제어관점을 필요로 한다. FAS의 또다른 특징은 시스템 규모가 방대하고 공정기기의 연속적이고 반복적으로 사용되며 여러 공정환경의 변화로 인하여서 시스템이 확정적이지 못하기 때문에 파라미터의 변화가 심하게 된다. 그러므로 연속적인 제어관점을 갖는 부시스템에는 실제 시스템에 효과적으로 적용, 활용되고 있는 퍼지추론을 사용하여 정량적인 제어출력을 내주게 된다.

그러나 기존의 퍼지이론을 부시스템에 부분 적용하게 되면 전체 시스템을 그래프 표현인 페트리네트로 적용하기 어렵게 된다. 그러므로 본 연구에서는 퍼지연산의 과정을 페트리네트로 구성하여 전체 시스템을 페트리네트로 구성하는 방법을 연구하고자 한다. 이러한 페트리네트 구조를 본 논문에서는 퍼지 페트리네트라 하고 퍼지연산 기능을 수행하는 부분을 계층화 개념을 적용한 계층플레이스화 하여 상위제어기와 하위제어기간에 토큰의 이동에 따른 정보를 얻어서 FAS의 상태를 모니터링하고 퍼지연산을 상위제어기에서 수행하여 결과값을 하위제어기에 전달하는 방법에 제시하였다.

2. 페트리네트

2.1 페트리네트의 구조

페트리 네트는 플레이스(Place)와 트랜지션(Transition)이라는 두 개의 노드(Node)와 호선(Arc)으로 구성되어 있다.

페트리 네트는 다음과 같이 5개의 구성 원소로 이루어져 있다.

$PN = (P, T, I, O, M_0)$

P : 플레이스(place)의 집합

T : 트랜지션(transition)의 집합

I : $P \rightarrow T$, 입력함수

O : $T \rightarrow P$, 출력함수

M_0 : 페트리네트의 초기 마킹

표 1은 입력 플레이스, 트랜지션, 그리고 출력 플레이스의 기능이다.

표 1 플레이스와 트랜지션의 기능

TABLE 1 Function of Place and Transition

Input Place	Transition	Output Place
Preconditions	Event	Postconditions
Input data	Computation step	Output data
Input signals	Signal processor	Output signals
Resources needed	Task or job	Resources released
Conditions	Clause in logic	Conclusion(s)
Buffers	Processor	Buffers

2.2 실행규칙

활성화 (enabling) : 트랜지션의 모든 입력 플레이스에 토큰(token)이 있을 때, 트랜지션은 활성화 되고 발화(fire)할 수 있다.

발화 (firing) : 활성화 된 트랜지션이 발화하면, 모든 입력 플레이스에서 하나의 토큰이 제거되고, 모든 출력 플레이스에 하나의 토큰이 더해진다.

예를 들어 화학반응 식에서 $2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$ 를 페트리네트로 표현하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

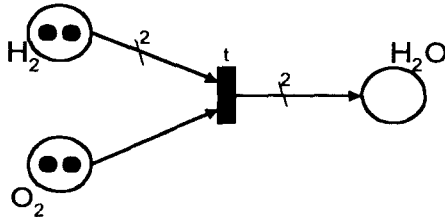


그림 1. 발화되기 전의 상태
Fig. 1 Before firing

두 개의 토큰이 H_2 와 O_2 의 입력 플레이스에 각각 존재를 하게 되고 트랜지션 t는 활성화되어 발화하게 되어 그림 2와 같은 상태로 전환된다.

여기서 t는 더 이상 활성화되지 않으며 발화되지 않는다.

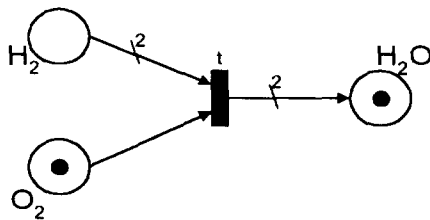


그림 2. 발화된 후의 상태
Fig. 2. After firing

2.3 계층 플레이스

페트리네트의 특징의 부분에 대한 상세한 입력, 출력 그리고 내부의 작용을 고려, 계층적 구성법을 도입하여 페트리네트를 구조적인 측면으로 하나의 플레이스에 구성해 볼 수 있다.

그림 3에서는 계층 플레이스에 대한 예이다. (a)와 같이 하나의 플레이스에 (b)와 같은 세부적인 기능의 페트리네트를 구성하여 사용한다. 이러한 계층 플레이스의 특징을 이용하여 다음에 설명할 퍼지 페트리네트의 구조적인 구성방법을 다룰 때 사용될 것이다.

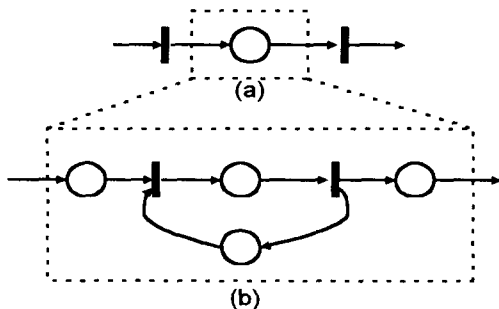


그림 3. 계층 플레이스의 예
Fig. 3. An Example of Hierarchical Place

3. 퍼지 페트리네트

3.1 퍼지 연산

그림 4와 같은 퍼지 연산은 입력을 퍼지화를 수행하고 추론을 거친 다음 비퍼지화를 수행하여 출력을 내 보낸다.

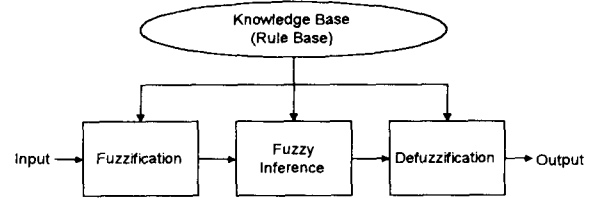


그림 4 퍼지 연산의 블록 다이어그램
Fig. 4. Block Diagram of Fuzzy Operation

3.2 퍼지 연산의 페트리네트 표현

위 그림과 같은 SISO 특성을 갖는 부시스템에 대한 퍼지 연산 과정을 페트리 네트로 표현하면 그림 5와 같은 구조를 갖는다.

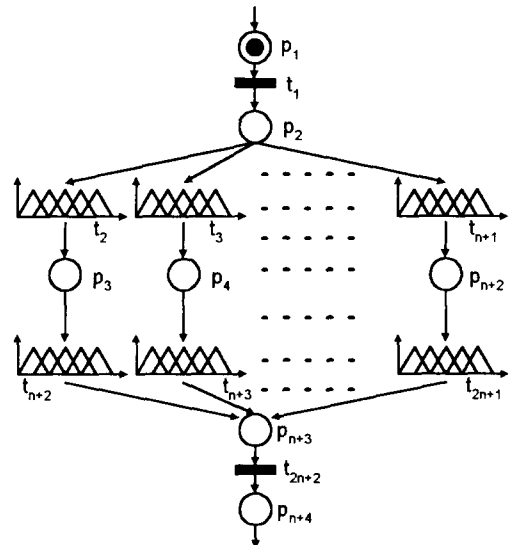


그림 5 퍼지 연산의 페트리네트 표현
Fig. 5. Representation of Fuzzy Operation

위의 그림은 전건부와 후건부에 각각 5개의 멤버십 함수를 갖고, 이에 대한 n개의 퍼지룰에 대해 P1을 통해서 입력이 들어왔을 때 퍼지연산 과정을 페트리네트로 구성을 한 것이다. 이 경우, 퍼지추론의 부분을 트랜지션으로 구성을 하였다. 다음 표 2는 그림 5에서의 각 플레이스와 트랜지션의 기능에 대한 설명이다.

표 2. 그림 5에서의 플레이스와 트랜지션의 기능
TABLE 2. A Function of Place and Transition in Fig. 5

P1	입력값 입력
P2	퍼지화 완료
P3 ~ Pn+2	전건부 퍼지 발화 완료
Pn+3	후건부 퍼지 발화 완료
Pn+4	비퍼지화 완료 (출력값 설정)
t1	퍼지화
t2 ~ tn+1	전건부 퍼지 발화
tn+2 ~ tn+1	후건부 퍼지 발화
t2n+2	비퍼지화

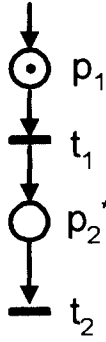


그림 6. 그림 5에 대한 계층 플레이스의 예
Fig. 6. An Example of Hierarchical Place to Fig. 5.

그림 5와 같은 퍼지 연산의 페트리네트 표현을 그림 3의 경우와 같이 계층 플레이스로 나타낸 예가 그림 6과 같이 주어진다. 위의 그림에서는 p_2^* 를 퍼지연산의 페트리네트 표현을 계층플레이스로 취급하여 이를 퍼지플레이스(Fuzzy Place)라 부른다. 여기서 만약 t_1 을 환경변수 즉 센서의 값을 읽는 동작이라고 가정하고, t_2 를 공정에 해당하는 액츄에이터를 동작하는 트랜지션으로 가정한다. 이때, p_1 에 토큰이 마킹되면 t_1 이 발화되고 t_1 이 발화함으로써 센서값을 읽어 들여 p_2^* 가 마킹된다. 이를 퍼지마킹(Fuzzy Marking)이라 부르며 퍼지마킹이되면 퍼지플레이스에 해당하는 퍼지연산을 하게된다. 퍼지 연산을 종료한 후에는 t_2 가 발화되면서 여기에 해당하는 동작 즉, 액츄에이터에 의한 공정을 수행하게 한다. 이러한 공정은 결국, 퍼지연산의 결과값에 따라 수행하게 된다.

이러한 페트리네트의 동작을 본 논문에서는 퍼지 페트리네트라고 한다.

그러나 그림 5와 같이 멤버십 함수를 삼각형 형태로 구성하지 않고 Gaussian function으로 구성하여 퍼지 플레이스를 수식으로 대체할 수 있는 경우를 생각해 보자.

퍼지 추론방법을 식(1)과 같이 정의할 때,

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x) \mu_B(y) \quad (1)$$

$$\mu_A(x) = \mu_{F_1^* \times \dots \times F_n^*}(x) = \min\{\mu_{F_1^*(x_1)}, \dots, \mu_{F_n^*(x_n)}\}$$

여기서 식(2)와 같이 비퍼지화 방법을 무게중심법 (Center average defuzzifier)을 사용하면

$$y = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{y}^i (\mu_{B^i}(\bar{y}^i))}{\sum_{i=1}^M (\mu_{B^i}(\bar{y}^i))} \quad (2)$$

singleton fuzzifier는 식(3)과 같이 얻어진다.

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{y}^i \left[\prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j) \right]}{\sum_{i=1}^M \left[\prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j) \right]} \quad (3)$$

$$\text{여기서 } \mu_{B^i}(\bar{y}^i) = \prod_{j=1}^n \mu_{F_j^i}(x_j)$$

식(4)와 같이 멤버십 함수가 Gaussian function으로 주어지고 $a_i = 1$ 이라 하면 식(5)와 같은 퍼지연산식을 얻을 수가 있다.

$$\mu_{F_i^i}(x_i) = a_i^i \exp \left[- \left(\frac{x_i - \bar{x}_i^i}{\sigma_i^i} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{y}^i \left[\prod_{j=1}^n \exp \left(- \left(\frac{x_j - \bar{x}_j^i}{\sigma_j^i} \right)^2 \right) \right]}{\sum_{i=1}^M \left[\prod_{j=1}^n \exp \left(- \left(\frac{x_j - \bar{x}_j^i}{\sigma_j^i} \right)^2 \right) \right]} \quad (5)$$

\bar{y}^i : center of fuzzy set for each rules

식 (5)와 같은 퍼지연산을 설정하게 되면 실제 제어프로그램 작성시에 퍼지연산을 수행하는 플레이스를 수식으로 대체할 수 있다. 그러나 페트리네트를 구성할 때는 식 (5)와 같은 수식에 대한 작용은 상태를 나타낸다는 플레이스의 기능적인 정의에 위배됨으로 그림 5에서 전건부 후건부의 멤버십 함수를 Gaussian function으로 바꾸어 증으로 퍼지 페트리네트를 구성한다.

4. 이산사건 시스템의 모니터링

본 연구에서 제안한 퍼지 페트리네트를 이용하기 위해서는 상위 제어기인 supervisory controller에서 퍼지연산을 수행하여야 한다. 그리고 퍼지 연산을 수행한 값을 하위 제어기에게 통신 라인 등을 통해서 전송하여야 한다.

만약 퍼지 페트리네트를 이용하는 자동화 시스템이라면 하위 제어기는 그림 6과 같은 계층 플레이스로만 이루어진 페트리네트가 프로그래밍 되고 상위 제어기는 그림 5와 같은 퍼지 페트리네트가 프로그래밍 되어있어야 한다. 이러한 경우에 그림 6에서처럼 하위 제어기에서 t_1 이 발화가 된다면 p_2^* 에 토큰이 위치될 것이다. 이렇게 되면 상위 제어기에서는 그림 5와 같은 퍼지 페트리네트를 바탕으로 한 퍼지 연산을 수행하여서 t_2 에 대한 출력값을 하위 제어기에게 넘겨 주게 된다.

이러한 경우에 상위 제어기는 토큰의 마킹된 각 상태를 모니터링할 필요가 있다.

페트리네트에서 각 사건의 천이는 토큰이 플레이스에 위치되는 마킹 상태의 변화이다. 그리고 이 상태 천이의 과정에서 플레

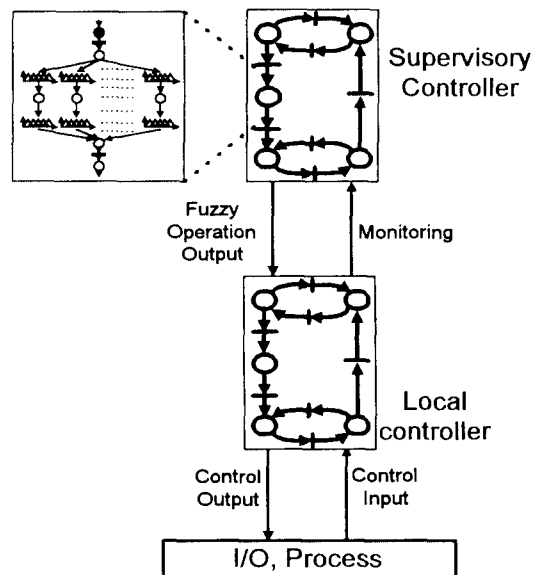


그림 7 퍼지 페트리네트의 응용
Fig. 7. Application of Fuzzy Petri Nets

이스가 시스템의 상태를 나타내는 특성을 통해서 통신라인등을 매개체로 모니터링이 이루어진다.

그림 7은 위와 같은 과정을 도식적으로 나타낸 것이다. 상위 제어기와 하위제어기에 구성된 페트리네트는 퍼지연산과정을 계층 플레이스화 하였을 때는 같은 형태이다. 그러나 하위제어기의 공정의 과정에서 계층플레이스에 토큰이 위치되었다고 상위제어기가 모니터링을 통해서 판단하게 되면 상위제어기는 계층플레이스에 해당하는 퍼지연산을 수행하여서 그 결과값을 하위제어기에 전달하게 된다. 하위제어기는 이 전달받은 값을 공정에 이용하게 된다.

5. 결 론

본 연구에서는 퍼지 페트리네트를 이용하여 이산사건과 비이산사건의 경우가 FAS에서의 자동화시스템에 동시에 존재할 때, 퍼지연산과정을 페트리네트로 구성하여서 퍼지 페트리네트를 제안하였다.

제안한 퍼지 페트리네트의 특징은 다음과 같다.

1. 생산공정의 제어와 모니터링에서 퍼지논리를 적용한 페트리네트 모델의 응용이 가능하다.
2. 퍼지 페트리네트 적용시 멤버쉽함수를 Gaussian function으로 대체하면 적응제어의 효과를 기대할 수 있다.
3. 페트리네트 모델에 계층화 개념을 도입하므로써 보다 정밀한 제어출력이 가능하다.
4. 계층화 개념의 도입은 이론적인 고려보다 대규모 실 시스템의 모델링에 주 목적을 두었다

본 연구에서 제안한 방법은 이산시스템의 제어와 모니터링을 위한 시뮬레이터의 개발을 위한 기초를 제공할 것이다.

참고문헌

- [1] Syed I. Ahson, "Petri Net Model of Fuzzy Neural Networks," *IEEE Trans. Syst. Man Cyber.* Vol. 25, No. 6, p926-932, June 1995
- [2] Tiehua Cao, Arthur C. Sanderson, "Task Sequence Planning Using Fuzzy Petri Nets," *IEEE Trans. Syst. Man Cyber.* Vol. 25, No. 5, p755-768, May 1995
- [3] Mu Der Jeng, "A Petri Net Synthesis Theory for Modeling Flexible Manufacturing Systems," *IEEE Trans. Syst. Man Cyber.* Vol. 27, No. 2, p169-183, April 1997
- [4] K. H. Lee, "Hierarchical Reduction Method for Analysis and Decomposition of Petri Nets," *IEEE Trans. Syst. Man Cyber.* SMC-15-2, p272-280, 1985
- [5] Carl G. Looney "Fuzzy Petri Nets for Rule-Based Decisionmaking," *IEEE Trans. Syst. Man Cyber.* Vol. 18, No. 1, p178-183, 1988
- [6] Tadao Murata, "Petri Nets : Properties, Analysis and Applications," *Proceeding of The IEEE*, Vol. 77, NO. 4, p541-580, April 1989
- [7] J. L. Peterson, "Petri Net Theory and The Modelling of Systems," Prentice-Hall, 1981.
- [8] Nidhal Rezg, Eric Niel, "Extension of the Supervision

Concept to the Monitoring of Discrete Event Systems", *Proceedings of the 1996 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, p150-156, 1996

- [9] Li-Xin Wang, *Adaptive Fuzzy Systems and Control: Design and Stability Analysis*, Prentice-Hall International, Inc., 1994
- [10] H. J. Zimmermann, "Fuzzy Set Theory and Its Applications," Kluwer Academic Publishers, 1991