

퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷을 이용한 교통신호제어기 설계

Design of Traffic Signal Controller Using Fuzzy Transition Timed Petri Net

모영승, 김정철, 김진권, 황형수

Mo young-seung, Kim jung-chul, Kim jin-kwon, Hwang hyung-soo

원광대학교 제어계측공학과

전화: (0653) 850-6345 FAX: (0653)853-2196

Abstract

The need for including time variables in various type of modeled Discrete Event Dynamic Systems(DEDSS) is apparent since the modeled systems are real time in nature. In the real world, almost all event is related to time. A Time Petri Net(TPN) is one of methods for modeling and analyzing of DEDSS with real time values. Two time values, α_i and β_i are defined for each transition. In this paper, we present Fuzzy Transition Timed Petri Net(FTTPN) to determine the optimal transition firing time between α_i and β_i using fuzzy theory. The traffic signal controller in an intersection is modeled and analyzed by FTTPN

I. 서론

이산 사건 시스템은 근본적으로 비동기 시스템이며, 사건의 발생에 따라서 전개되는 동적 시스템이다. 교통 신호제어기, 생산 공정, 통신 시스템 등의 많은 이산 사건 시스템들이 시간과 관련되어 있으며, 이러한 이산 사건 동적 시스템들을 모델링하고 성능을 평가하기 위한 방법으로 시간 페트리 넷(Timed Petri Net)가 이용되고 있다. 시간 페트리 넷은 발화 최소 시간 α_i 와 최대 시간 β_i 를 포함하고 있으며 발화 시간 구간인 α_i 와 β_i 사이의 임의의 시간에 사건이 발화하여 상태가 천이 된다. 본 논문에서는 현재 상태에서 상태천이에 관련된 정보 및 자료 등을 구하고 이 정보를 퍼지 집합의 소속 함수로 정의하고 추론하여 최적의 발화 시간을 제어할 수 있는 퍼지 천이 시간 페트리 넷(Fuzzy Transition Timed Petri Net : FTTPN)이라는 새로운 시간 페트리 넷을 제안한다. 그리고 FTTPN에 대한 응용 예로서

교차로의 교통 신호제어기를 모델링 하였으며, 모델링된 교통 신호제어기에서 교통 신호의 상태는 토큰의 변화로 하고, 차량의 흐름은 퍼지 제어기(모델)의 입력으로 하였다. 차량 흐름을 퍼지 집합의 소속 함수로 하여, 보다 효과적인 방법으로 교차로의 교통상황을 제어 할 수 있도록 하였다.

II. 퍼지 트랜지션 시간 페트리 넷

시간 페트리 넷(Petri Net)모델은 플레 이스(Place)에 토큰(Token)이 로드 되는 것에 의하여 상태를 표현하거나 토큰이 가지고 있는 성질에 의하여 상태를 표현한다[1]. 시간 페트리 넷에 퍼지 이론을 도입한 것이 퍼지 시간 페트리 넷(Fuzzy Timed Petri Net)이다 [2].

퍼지 시간 페트리넷에서 트랜지션의 발화 시간이 트랜지션들이 갖고있는 시간의 복잡한 상호 관계에 의하여 계산되는데 반하여, FTTPN에서는 퍼지 제어기 출력에 의하여 트랜지션의 발화 시간을 결정한다.

FTTPN은 다음 6개의 구성 요소로 정의한다.

정의 1

$\langle P, T, I(\cdot), O(\cdot), M \rangle$ 은 페트리 넷
 $FI: T \rightarrow Q^*(Q^* \cup \infty)$, Q^* 은 양의 유리수 집합.

입의 트랜지션 t_i 에 대하여

$$FI(t) = (\alpha_i, \gamma_i, \beta_i)이다.$$

여기서 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 는 다음과 같은 유리수로 정의한다.

$$0 \leq \alpha_i \leq \infty, \quad 0 \leq \beta_i \leq \infty, \quad \alpha_i \leq \gamma_i \leq \beta_i,$$

만약 $\beta_i \neq \infty$ 이면 $\alpha_i \leq \beta_i$ 이고, $\beta_i = \infty$ 이면 $\alpha_i < \beta_i$ 이다.

수 (α_i, β_i) 의 간격은 트랜지션 t_i 의 정지 발화시간(Static firing time)이라 하며, 좌반면 경계 α_i 는 정지 최초 발화시간(Static earliest firing time) 우반면 경계 β_i 는 정지 최종 발화시간(Static latest firing time)라 부른다. 즉, α_i 는 트랜지션이 발화하기까지 기다려야 하는 최소 대기시간, β_i 는 트랜지션이 반드시 발화해야 하는 최대 대기시간을 표현한다.

정의 2

입의 발화 시간 변수 γ_i 에 대하여,

γ_i 는 $0 \leq \gamma_i \leq \infty$ 이고, 양의 유리수

시간 간격 α_i, β_i 에 종속이다.

여기서 γ_i 는 트랜지션 상호 관계에 의하여 결정되는 것이 아니라 외부 입력, 즉 제어기에 의하여 결정된다. 제안된 FTTPN 시스템에서 퍼지 시간 트랜지션의 발화 시간 γ_i 를 결정하기 위하여, 퍼지 제어를 사용한다. 트랜지션의 발화시간을 결정하기 위한 방법으로는 지능형 알고리즘은 물론, 증가 함수나 램프함수 등을 모두 사용할 수 있다. 하지만 교통 신호제어기에서 녹색 신호의 길이를 조절하는 트랜지션은 차량의 원활한 교통흐름을 위하여 적절히 조절되어야 하기 때문에 본 논문에서는 퍼지 제어를 사용하여 설계하였다.

표 1. 대기 차량 수 모델

차량수	실제 측정값	시뮬레이션값	오차
1	2.4000	2.4424	-0.0424
2	4.4000	4.4159	-0.0159
...
19	33.1000	33.1241	-0.0241
20	34.7000	34.7285	-0.0285

논문에서 사용된 차량 수에 따른 고정점 통과 시간 데이터는 [3]의 실제 측정값을 사용하며, 이 20개의 데이터를 가지고 퍼지 제어를 설계하였다. 데이터는 표 1.과 같다.

소속 함수로는 삼각 함수를 사용하며, 소속 함수의 개수는 3개, 소속 함수의 파라메타는 고정된 값을 사용하였다. 그림 1.은 퍼지 집합의 소속함수를 보인다.

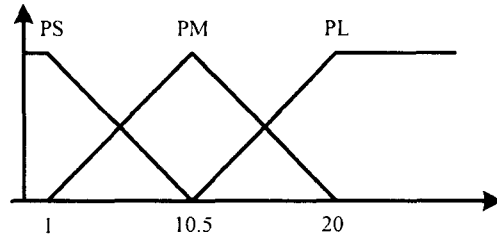


그림1. 퍼지 집합의 소속 함수

퍼지 추론은 3개의 규칙을 사용하여 다음과 같이 구성한다.

$$\text{IF } x \text{ is PS THEN } y = a_{10} + a_{11}x$$

$$\text{IF } x \text{ is PM THEN } y = a_{20} + a_{21}x$$

$$\text{IF } x \text{ is PL THEN } y = a_{30} + a_{31}x$$

경험적 방법에 의하여 선형 추론법을 사용하고, 후반부 파라미터 a_{10}, a_{11} 는 최소자승법에 의하여, 최종 출력은 무게 중심법을 사용하여 구한다 [4]. 표 1.에서 실제 측정값과 시뮬레이션의 오차는 대기 차량의 교차로 통과 시간을 모델링 한 것이므로 무시해도 좋은 것으로 가정한다.

제한된 교통 신호등 제어기에서 퍼지 제어기는 동기 신호를 받아 동작하므로 신호 상태에 있는 방향 검출기만의 정보를 처리하기 때문에 제어기는 단일입력 단일출력으로 모델링 하였다.

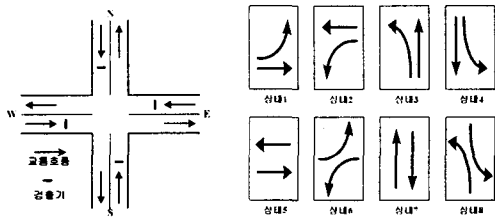
본 논문에서는 교통 신호제어기를 설계할 때 이미디어트(Immediate) 트랜지션, 디터미니스틱(Deterministic) 트랜지션, 퍼지 시간 트랜지션(Fuzzy Timed Transition)을 사용하였다. 이 세 개의 트랜지션은 모두 위의 페트리넷의 정의를 만족한다. 이미디어트 트랜지션은 활성화 된 후 지연시간 없이 바로 발화하며, 짧은 선으로 표현된다. 디터미니스틱 트랜지션은 활성화 된 후에 상수 지연시간을 가지고 발화하며, 굵은 막대로 표현된다 [1]. 퍼지 시간 트랜지션은 활성화 된 후 일정 시간 간격사이에 발화되는데 이 발화 시간은 외부 입력, 즉 퍼지 제어기 출력에 의하여 결정되며, 넷에서 굵은 막대중

간에 마킹된 것으로 표현된다.

III. 교통신호 제어기

그림 2. (a)는 본 논문에서 다루는 교차로이다. 이 교차로에서 각 방향의 신호는 그림 2. (b)의 8가지 신호 상태로 나뉘어지며 [3], 교통상황에 따라 적절한 상태를 선택한다. 교차로의 교통 신호 제어기 설계를 위하여 그림 2. (a) 교차로의 신호 상황을 다음과 같이 가정하였다.

- 보행자의 통행을 위한 횡단보도나 신호는 고려하지 않는다.



(a). 교차로 (b). 신호상태

그림 2. 교차로와 신호상태 모델

- 별도의 우회전 신호는 존재하지 않는다.
- 신호는 좌회전, 직진, 적색, 녹색 신호가 있으며 직진 신호 후에는 각각 황색 신호가 존재한다.

교차로 모델에서 검출기는 차량의 대수를 파악하며, 교차로의 4방향에 각각 존재한다. 본 모델에서 검출기는 교차로에서부터 100m 위치한다고 가정한다. 이는 차량의 평균길이를 4m, 차량간의 간격을 1m라 하였을 때 최대 20대의 차량이 대기할 수 있는 길이이다.

3.1 교통신호 제어기 모델

단일 방향의 교통 신호 제어기는 크게 2부분으로 나뉜다. 그림 3.는 FTTPN 모델이다.

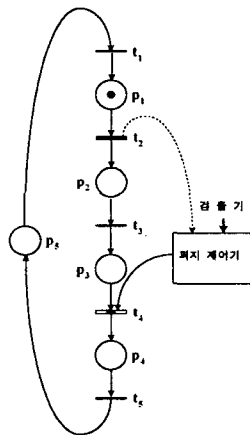


그림 3. 단일 방향의 교통 신호 제어기 모델

그림 3.의 모델에서 각 플레이스와 트랜지션의 의미는 표 2.과 같다.

표 2. 플레이스와 트랜지션의 의미

t_1	황색 신호시작	p_1	황색 신호 상태
t_2	황색 신호시간	p_2	황색 신호 종료
t_3	녹색 신호 시작	p_3	녹색 신호 상태
t_4	녹색 신호 지속	p_4	신호 종료 상태
t_5	신호 종료	p_5	적색 신호 상태

t_2 가 발화하면 토큰은 p_2 로 이동하여 황색 신호의 종료를 알린다. 또한 퍼지 제어기에 동기 신호를 제공하여 제어기가 출력 값을 계산하도록 하였다. 이 신호는 그림에서 점선 화살표로 표현하며, 페트리 네트의 입, 출력 함수를 나타내는 것이 아니므로 토큰의 변화에는 영향을 미치지 않는다. t_3 p_3 를 거친 토큰은 녹색 신호를 나타내며, t_1 에서 녹색신호의 길이를 조절한다. t_4 는 임의의 시간간격 사이에 발화하게 되는데 발화 시간은 퍼지 제어기가 결정한다. 단, 퍼지 제어기의 출력은 트랜지션 고유의 시간 간격을 넘지 못한다.

교차로에서의 교통제어 신호기의 모델은 그림 3.의 기본 모델 4개를 연결함으로써 얻어진다. 기존의 연구에서는 차량의 흐름을 토큰 수로 표현하였으나 [5], 본 논문에서는 대기 차량 수를 퍼지 제어기 입력으로 모델링 한다. FTTPN으로 모델링된 시스템에서 퍼지 시간 트랜지션의 발화 시간을 결정하기 위하여 퍼지 제어기(모델)를 사용하였다.

제한된 방법과 성능 비교를 위한 단위 시간연장 신호기는 통계 시간 페트리 네트로 모델링 한 것으로 [6]의 모델을 사용하였다.

IV. 시뮬레이션 및 결과

FTTPN에 의해서 모델링 된 교통신호 제어기의 성능을 평가하기 위하여 Matlab을 이용하여 시뮬레이션 프로그램을 개발하였으며, 1개의 교통 조건이 시뮬레이션 되었고, 그 결과는 단위시간 연장신호기와 비교되었다.

시뮬레이션을 위하여 그림 3의 t_1 발화 시간을 0에서 35초 사이 값으로 제한하였는데, 이는 검출기 사이의 최대 대기차량 20대가 모두 통과 할 수 있는 시간으로, 제어기 출력에 의한 신호연장에 따라서 발생할 수 있는 차량의 충돌을 방지한다. 시뮬레이션은

그림 2. (b)의 상태 1, 2, 3, 4로 하였기 때문에 검출기 사이에 대기하는 차량 수는 직진 차선과 좌회전 차선에 대기하는 차량 중 큰 값을 사용하는 것으로 가정하였다. 총 시뮬레이션 시간은 1시간, 시뮬레이션 조건은 표 3.과 같다.

표 3. 차량 입력 대수

방향	차량대수	차량대수(vehicle/h)
E방향 직, 좌회전		546
W방향 직, 좌회전		361
N방향 직, 좌회전		461
S방향 직, 좌회전		498

각 방향에서 황색 신호의 길이는 3초로 고정하였다.

제안된 방법과 비교하기 위하여 단위 시간 연장 신호기는 다음처럼 가정한다. 차량 검출기는 교차로로부터 70m에 위치한다고 가정하면 교차로와 검출기 사이에는 약 13~14대의 차량이 대기 할 수 있다. 시뮬레이션에서 황색 신호를 3초로 하였고, 기본 신호 시간은 25초로 하였다. 기본 시간이 끝나면 차량의 유무를 파악하여, 5초씩 최대 2번의 신호연장이 가능하도록 하였다. 2번의 연장 시간이 모두 끝나면 신호를 종료하고 다음 상태로 천이 되도록 하였다.

성능 지수로는 교차로 각 방향에서의 차량의 평균 지연시간이 사용되었다. 시뮬레이션 결과는 표 4.에 보인다.

표 4. 교차로의 시뮬레이션 결과

	평균지연시간		증가율 (%)
	제안된 방법	단위시간연장	
상태 1	33.9263	35.0000	3.07
상태 2	23.2568	25.0000	6.97
상태 3	30.0242	32.0370	6.28
상태 4	32.2310	35.0000	7.91

제안된 방법은 모든 경우에서 좋은 성능을 보인다. 안정된 교통조건(표 3.의 E 방향)에서는 3.07%의 개선을 보인다. 교차로에서 차량의 입력이 많은 차이가 나는 조건에서는 7.81%(표 3.의 S방향)의 성능 개선을 보인다. 이런 결과는 차량의 입력이 매우 적은 방향의 교차로에서 뛰어난 성능을 보인다. 즉 교차로에서 한 방향의 평균차량의 입력이 적은 곳에서는 신호 시간을 짧게 하여서 차량의 지연시간을 효과적으로 줄일 수 있다. 차량의 입력이 많고 일정한 방향에서는 적은 개선을 보인다.

이런 조건에서는 교통량이 교차로의 용량에 근접하기 때문에 이를 개선하기 위한 여

유가 무척 작다는 것을 의미한다.

V. 결론

많은 이산 사건 시스템들의 상태 천이는 시간과 관련이 있으며, 시간 페트리 넷에 의해서 모델링되고 분석되어진다. 본 논문은 시간 페트리 넷의 발화 시간구간에서 최적의 발화 시간을 제어하기 위해서 FTTPN을 제안하였고, 이를 응용하여 교통신호 제어를 모델링 하였다. 제안된 모델은 교차로의 각 방향에 대하여 독립적이기 때문에 교차로의 상태나 교차로의 종류에 따라 능동적으로 응용 할 수 있다.

시뮬레이션으로부터 얻어진 결과는 단위 시간 연장 신호기 보다 제안된 방법이 우수함을 보인다. 제안된 FTTPN은 FMS등 많은 분야에 적용 가능하며, 단일 교차로가 아닌 둘 이상의 교차로에 대한 연구가 진행되고 있다.

VI. 참고 문헌

- [1] Jiacun Wang, *Timed Petri Nets Theory and Application*, Kluwer Academic Publishers, Massachusetts, 1998.
- [2] Jabette Cardoso, Heloisa Camargo, (eds), *Fuzziness in Petri Nets*, Physica-Verlag, pp115-145, 1999.
- [3] Jee-Hyong Lee and Hyung Lee-Kwang, "Distributed and Cooperative Fuzzy Controllers for Traffic Intersections Group" *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 29, pp. 263-271, 1999.
- [4] 오 성권, 퍼지 모델 및 제어이론과 프로그램. 기다리. 1999.
- [5] F. DiCesare, P.T. Klup, M. Gile, and G. List, "The Application of petri Net to the Modeling, Analysis and Control of Intelligent Urban Traffic Networks," *Advances in Petri Net 1994, Lecture Notes in Computer Science 815*, R. Valette(Ed.), Springer-Venlag, PP.2-15, 1994
- [6] 고 인선, "스토케스틱 페트리 넷를 이용한 교통량 대응신호기 설계 및 교통 흐름 분석" 전자 공학회논문지, pp.306-316, 3월 1999.