1997年度 定期總會 및 秋季學術大會 論文集 1997.11.29

실시간 시간논리구조를 이용한 고정시간 교통제어 문제의 모델링 및 제어

정용만, 이원혁, 최정내, 황형수
원광대학교 제어계측공학과

Modeling and Control of Fixed-time Traffic Control Problem with Real-time Temporal Logic Frameworks

Yong Man Jeong, Won Hyok Lee, Jeong Nae Choi, Hyung Soo Hwang
Department of Control and Instrumentation Engineering University of Wonkwang

Abstract - A Discrete Event Dynamic System is a system whose states change in response to the occurrence of events from a predefined event set. A major difficulty in developing analytical results for the systems is the lack of appropriate modeling techniques. This paper proposes the use of Real-time Temporal Logic as a modeling tool for the modeling and control of fixed-time traffic control problem which by way of a DEDS. The Real-time Temporal Logic Frameworks is extended with a suitable structure of modeling hard real-time constraints. Modeling rules are developed for several specific situations. It is shown how the graphical model can be translated to a system of linear equations and constraints.

1. 서 론

많은 대규모의 동적 시스템들은 이산사건 시스템 구조로 이루어져 있다. 이러한 시스템들은 기존의 제어 및 시스템 이론으로 취급될 수 있는 연속변수 동적 시스템처럼 상미분 방정식이나 편미분 방정식에 의해 처리될 수 없으며 이산 적인 상태와 이 상태들 사이에서 사건의 천이관계를 나타냄으로써 표현할 수 있다. 이러한 시스템으로 생산 시스템, 교통 시스템, 일괄처리, 통신 시스템, 전문가 시스템 등을 예로 들 수 있다. 최근 이산사건 시스템에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 모델링 방법으로는 Automata and formal language[1], Petri-net[2], Finitely Recursive Process, Mini-Max Algebra, Temporal Logic Framework[3] 등이 제안되었다.

본 논문은 시간논리구조에 실시간 개념을 정의하고 실시간 이산사건 시스템의 한 분류인 고정시간 교통제어문제를 모델링하고 제어하는 것이다. 시간논리구조는 일반 논리구조에 시간 개념을 부가한 구조로 시간관계를 논리로 표현한 이론이다. 여기에 실시간 이론을 추가하고 이를 이용하여 고정시간에서 모든 제약조건을 만족하는 교통제어문제를 제어하는 것이다.

2. 시간논리구조

시간논리구조는 시간개념을 포함된 술어논리(1차 논리)의 확장이며, 시간 순차열에 따른 추론 지향적인 논리이다. 논리를 이용하며 시제 표현식으로 표현될 수 있는 두 가지 장점을 가지는 시간논리는 Allen's Properties-Event-Process[4]와 Mcdermott's Fact-Event[5]의 시제추론을 이용하였다. 이 시간논리는 주로 software 증명에 이용되었으며 최근에는 이산사건 시스템의 제어문제에 적용되었다[6].

2.1 시간논리구조의 기호 표현

시간논리구조는 시간과 시간에 대한 추론을 할 수 있는 형식구조이다. 시간논리구조는 전형적인 Boolean 연결자인 ¬(not), ∧(and), ∨(or), →(implies), ↔(if and only if)를 포함하며 시간의 변화량을 표현하기 위한 시간 연산자 □(henceforth), ◇(eventually), ○(next), U(until), P(proceed) 등을 가진다.

2.2 시간논리구조 모델

Lin과 Ionescu[3]에 의한 동적식(dynamic formula) $l(e,s)$은 $\Box[\delta=e \wedge x=R \rightarrow (\bigcirc x)=Q]$의 형태를 가진다. 이것은 한 상태 $s=x$와 다음 상태 $s'=f(e,s)=\bigcirc x$에 의한 천이(transition)를 나타낸다. 이 식은 사건 e의 발생에 의해 원소 x가 상태 R에서 상태 Q로 변화함을 의미한다.

공정에서 시간논리구조 모델은 식 (1)과 같이 6-변수를 가지는 식 M으로 정의된다.

$$M=(S,E,F^{*},f,s_0,l) \tag{1}$$

여기서, S는 상태 집합이고, E는 사건의 집합이다. 각 사건은 한 상태에서 다음 상태로의 천이와 같이 생각할 수 있다. 또한, s_0는 초기상태, f는

발화함수(firing function), F^*는 논리식의 집합이며 l은 E에서 F^*로의 labeling function이다. $\forall s \in S$와 $\forall e \in f(S)$에 대해 S에서 E^*로의 사상으로 $e(s)=f(s,e)$가 정의된다. 여기서 $f(s)$는 상태 s에서의 사건발화 집합이다.

$e(s)=f(s,e)=s'$ 은 한 상태에서 다음 상태로 천이를 나타내므로 발화함수 f를 실시간 프로그래밍에서 동적 동작으로 주어지는 다음상태 함수라고도 한다. 시간논리구조에서 한 상태를 정확하게 한 사건의 실행에 대응한다. 이 결과를 나타내기 위한 식은 식 (2)와 같다.

$$\Box(s_i(x) \wedge e_{i+1}(x) \rightarrow s_{i+1}(\bigcirc x)] \qquad (2)$$

여기서 $s_i(x)$는 x의 현재상태, $e_{i+1}(x)$는 x에 대응하는 사건의 발생을 나타내며, $s_{i+1}(\bigcirc x)$는 다음 상태를 표현한다.

2.3 실시간 시간논리구조

이산사건 시스템을 제어하고자 할 때 한 사건 e_i에 의해 한 상태에서 다음 상태로 상태가 천이 되는 동안 시간 t_i가 흐르게 된다. 천이시간동안 다른 사건 e_j가 발생할 수 있다. 이 사건 e_j에 의한 상태의 변화는 플랜트의 특성에 따라 받아들일 수도 있고 무시할 수도 있다. 또한 사건이 발생했을 때 상태의 천이가 어떤 시간(t_u)내에 종료 되어야 하는 경우가 있고 또한 어떤 시간(t_l)내에 종료되어서는 안되는 경우가 있다. 이러한 상황을 모델링 하기 위하여 식 (3)과 같은 실시간 시간논리구조식을 제안한다.

$$M_t=(S, E, F^*, f, s_0, l, t) \qquad (3)$$

여기서 t는 시간함수이고 다음과 같이 사용한다.

- $t(T_l; T_u)$: 사건 발생 후 상태 천이의 하한시간 T_l과 상한시간 T_u을 표시한다. 하한시간만 또는 상한시간만 필요할 경우는 각각 $t(T_l;)$과 $t(;T_u)$으로 표기할 수 있다.
- $t(T)$: 상태의 천이시간이 정확하거나 그럴 필요가 있을 경우 사용한다.

이 시간함수는 차기 상태식과 $\wedge$(and)로 연결될 수 있고, implies 기호 위에 표시할 수 있다. 또한 상태 천이 중에 다른 사건의 입력이 있을 경우 그 사건을 받아들이는 경우는 $(\underset{\uparrow_e}{\rightarrow})$으로 표기하고 무시할 경우에는 일반적인 implies($\rightarrow$)만을 사용하여 구분하였다. 이러한 기호들을 이용하여 중요한 시간적 제약을 표현함으로써 이산사건 시스템을 실시간으로 모델링 할 수 있다. 이러한 실시간 시간논리구조를 이용하여 다음 장에서 고정시간 교통모델에 적용하고 제어하였다.

3. 고정시간 교통제어문제

고정시간 제어문제는 두 가지 관점에서 바라볼 수 있다. 즉, 신호 시간(signal timings)에 의해 얻어지는 물리적 제약(physical constraints)과 최적화 되도록 하는 성능 측정(performance measure)이 있다. 전반적으로 물리적인 제약은 항상 같은 형태를 보이지만 특별한 상태를 다루기 위해 다른 성능측정이 요구된다. 그리므로 물리적 제약을 처리하고, 성능 최적화를 위해 일반적인 모델로 공식화하는 것이 현실적으로 중요한 문제이다.

3.1 교통 신호등에서 가능한 사건

신호등을 모델링하기 위해 먼저 신호등의 상태와 사건들을 정의해야 한다. 여기에서 정의할 수 있는 사건은 신호등이 변하는 그 때의 시간으로 정의한다. 한 신호등이 가질 수 있는 사건과 시간함수를 다음과 같이 정의할 수 있다. 여기서 각 신호등은 방향 그래프에서 각 마디로 표현할 수 있다.

$e(i)$: i번째 마디의 녹색 사건(또는 그 때의 시간)

$e(i+r)$: i번째 마디의 적색 사건(또는 그 때의 시간)

$t_{i,j}(T)$: 사건 $e(i)$의 발생에서 사건 $e(j)$가 발생할 때까지의 시간
즉, $t_{i,j}(T)=e(j)-e(i)$ 이고 다음 식과 같이 나타낸다.

$$e(i) \xrightarrow{t_{i,j}(T)} e(j)$$

$t_{i,j}(T_l; T_u)$: 사건 $e(i)$가 발생한 후 사건 $e(j)$가 발생할 수 있는 최소 시간 (T_l)과 최대 시간 (T_u)

이와 같은 정의를 이용하여 다음과 같은 제약조건을 시간논리구조로 표현할 수 있다.

3.2 신호 제약(signal constraints)

마디 i와 $i+r$을 고려할 때 사건 $e(i)$와 사건 $e(i+r)$가 발생할 수 있는 사건사이의 시간 $t_{i,i+r}(T)$라하며 이를 녹색 지속시간이라 한다. 녹색 지속시간의 최소시간을 T_l이라 하고 최대시간을 T_u라 하면 다음과 같은 조건을 따라야 한다.

- **조건 1 :**

$$\Box\Big(e(i) \xrightarrow{t_{i,i+r}(T_l;T_u)} e(i+r)\Big) \qquad (4)$$

3.3 충돌 제약(conflict constraints)

신호 i와 j가 충돌상태에 있다고 하자.

$t_{i+r,j}(T)$을 신호 j의 녹색 사건과 신호 i의 적색 사건사이의 차로 정의하고 다음의 조건 2를 만족해야 한다.

조건 2 :

$$\Box\Big(e(i+r) \xrightarrow{t_{i+r,j}(T_{ct};)} e(j) \Big) \qquad (5)$$

두 신호의 충돌 회로를 그림 1로 표현할 수 있다. 여기서 최소 여유시간은 일정 (T_{ct})하다고 가정한다.

그림 1. 충돌 회로
Fig. 1 Conflict circuit

두 신호의 충돌 회로에서 사건의 순차적 발생과 조건은 다음과 같다.

$$\Box\Big(e(i) \xrightarrow{t_{i,i+r}(T_l;T_u)} e(i+r) \xrightarrow{t_{i+r,j}(T_{ct})} e(j) \xrightarrow{t_{j,j+r}(T_l;T_u)} e(j+r) \xrightarrow{t_{j+r,\bigcirc i}(T_{ct})} e(\bigcirc i) \Big) \qquad (6)$$

3.4 조합제약(coordination constraints)

같은 흐름에 의해 순차적으로 교차된 정지선의 신호는 흐름 율이 충분히 높은 경우에 줄의 과잉에 의해 생기는 차량 소통 방해를 피하기 위해 조합되어야 한다. 또한 조합 제약은 부드럽고 효과적인 교통흐름을 보장하거나 정지하는 횟수를 감소시키기 위한 최적의 목적을 위해 사용된다.

하류신호에서 상류신호의 이동시간을 고려하고 이미 존재하는 열을 비우는 시간을 고려해야함으로 두 신호의 조합 시간은 이동시간과 같거나 작아야 한다. 이를 이용하여 조건 3을 얻을 수 있다.

• 조건 3 :

$$\Box\Big(e(i) \xrightarrow{t_{i,j}(T_l;T_u)} e(j) \Big)$$
$$\Box\Big(e(i+r) \xrightarrow{t_{i+r,j+r}(T_l;T_u)} e(j+r) \Big) \qquad (7)$$

조합 제약은 그림 2에 보였다.

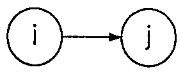

그림 2. 조합 회로
Fig. 2 Coordination circuit

4. 예 제

그림 3과 같은 실제 교통 문제와 보다 유사하고 보다 복잡한 시스템을 모델링 해보자. 그래프 는 그림 4와 같다.

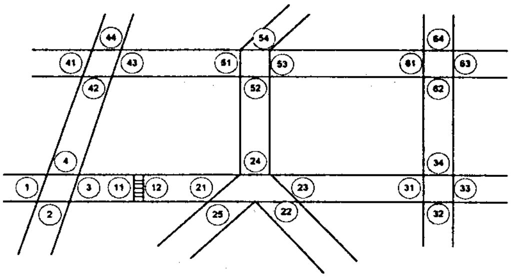

그림 3. 도로 교통 설계도

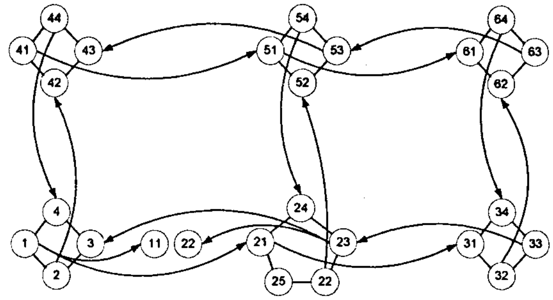

그림 4. 도로 교통 설계도 그래프

4.1 각 제약조건에 의한 모델링

그림 4를 보면 각 교차로간의 신호등은 충돌 회로로 보이고 직진 방향의 신호등간은 조합 회로로 보인다. 그리고 신호등 11과 22는 충돌하지 않으며 신호등 3의 녹색사건이 발생한 후 일정시간이 지난 후에 신호 11과 12는 동시에 적색사건이 발생하면 된다. 각 충돌 회로의 점등 순서는 신호등 제어에서 결정되어지며 각 회로에서 보이는 14개의 조합 조건은 다음과 같으며, 각 시간들은 교통 이동시간에 관련되어 있다.

$$\Box\Big(e(1) \xrightarrow{t_{1,21}(T_{tl};T_{tu})} e(21) \xrightarrow{t_{21,31}(T_{tl};T_{tu})} e(31) \Big)$$
$$\Box\Big(e(33) \xrightarrow{t_{33,23}(T_{tl};T_{tu})} e(23) \xrightarrow{t_{23,3}(T_{tl};T_{tu})} e(3) \Big)$$
$$\Box\Big(e(41) \xrightarrow{t_{41,51}(T_{tl};T_{tu})} e(51) \xrightarrow{t_{51,61}(T_{tl};T_{tu})} e(61) \Big)$$
$$\Box\Big(e(63) \xrightarrow{t_{63,53}(T_{tl};T_{tu})} e(53) \xrightarrow{t_{53,43}(T_{tl};T_{tu})} e(43) \Big)$$
$$\Box\Big(e(2) \xrightarrow{t_{2,42}(T_{tl};T_{tu})} e(42) \Big)$$
$$\Box\Big(e(44) \xrightarrow{t_{44,4}(T_{tl};T_{tu})} e(4) \Big)$$
$$\Box\Big(e(22) \xrightarrow{t_{22,52}(T_{tl};T_{tu})} e(52) \Big)$$
$$\Box\Big(e(54) \xrightarrow{t_{54,24}(T_{tl};T_{tu})} e(24) \Big)$$
$$\Box\Big(e(32) \xrightarrow{t_{32,62}(T_{tl};T_{tu})} e(62) \Big)$$
$$\Box\Big(e(64) \xrightarrow{t_{64,34}(T_{tl};T_{tu})} e(34) \Big)$$

4.2 제약조건에 의한 제어

그림 3과 4에 보여진 회로의 각 시간이 표 2와

같이 주어졌다고 하자. 표 2는 앞 절에서 표현한 모델링 식에 맞추어 표현하였고 이상적인 조합시간과 모의실험에서 얻은 결과를 나타냈다.

표 2. 조합회로에 의한 실제 데이터와 실험 결과

Present event	Next event	transition time	evacuation time	ideal time	simulation time
$e(1)$	$e(21)$	4:40	10	30 s	29 s
$e(21)$	$e(31)$	3:50	8	102 s	96 s
$e(33)$	$e(23)$	3:50	7	103 s	108 s
$e(23)$	$e(3)$	4:40	7	33 s	37 s
$e(2)$	$e(42)$	4:05	3	2 s	8 s
$e(44)$	$e(4)$	4:05	7	118 s	112 s
$e(41)$	$e(51)$	3:40	6	94 s	91 s
$e(51)$	$e(61)$	4:05	2	3 s	7 s
$e(63)$	$e(53)$	4:04	6	119 s	113 s
$e(53)$	$e(43)$	3:40	5	95 s	89 s
$e(22)$	$e(52)$	3:30	5	85 s	88 s
$e(54)$	$e(24)$	3:30	7	83 s	86 s
$e(32)$	$e(62)$	3:50	3	107 s	101 s
$e(64)$	$e(34)$	3:50	4	106 s	109 s

여기에서 이동시간이란 현재 상태(신호등)에서 다음 상태로 이동하는데 소요되는 시간을 말하며, 비움 시간이란 차량 집중에 의해 이미 존재하는 차량을 통과시키는데 소요되는 시간이다. 이상적인 시간은 조합제약을 만족하는 시간이며 실험결과와 차이를 보인다. 조합 제약(coordination conflicts)에 의한 최적의 조합 시간(coordination time)은 이동시간에 대한 비움 시간의 차로써 식 (8)과 같이 얻을 수 있다.

$$T_{optimal} = \text{transition time} - \text{evacuation time} \quad (8)$$

충돌 제약을 만족하고 모든 조합 제약을 만족하게 하는 것이 최적의 신호등 조합이나 이를 만족하는 신호등은 있을 수 없다. 따라서 최적에 가깝도록 신호 시간을 배열하는 것이 이 절의 목적이다. 이로 인하여 식 (8)에서 얻은 $T_{optimal}$ 근처에서 오차에 의한 상한값과 하한값을 설정한다. 모의실험 결과는 표 3과 같다.

표 3. 각 신호등의 녹색 시간

충돌 신호 / 교차로 번호	01	02	03	04	05
00	0 s	30 s	90 s	60 s	╳
10	80+r s	80+r s	╳	╳	╳
20	29 s	101 s	53 s	5 s	77 s
30	5 s	95 s	65 s	35 s	╳
40	8 s	38 s	98 s	65 s	╳
50	99 s	69 s	9 s	39 s	╳
60	106 s	76 s	16 s	46 s	╳

여기서 각 시간은 녹색사건의 발생 시간을 나타내며 i+r로 나타낸 시간은 적색시간을 나타낸다. 이 모의 실험에서 주기는 2분(120초)으로 하였고 오차 한계 시간은 6초로 하였다.

이상적인 조합 제약은 중요한 충돌 제약을 만족하지 못하므로 사용할 수 없다. 그러므로 충돌 제약을 만족하며 조합 회로를 이루는 모의 실험의 결과는 이상적인 경우와 최대 6초의 오차를 가지고 이루어 졌으며 그 결과는 표 2에 나타냈다.

5. 결 론

이산사건 시스템을 위한 형식화된 해석적 도구들의 개발은 프로세스 모델링과 제어를 위해 중요하게 여기는 연구분야이다. 그러나 아직까지 이런 이론들이 충분히 연구되어지지 않았다.

이런 기법들 중에서 우리는 이산 사건 시스템을 시간논리구조로 표현하고 모델링 하는 방법과 실시간으로 플랜트를 모델링 하는 방법을 소개하였고 제안된 이론을 이용하여 실시간 이산사건 시스템의 분류인 고정시간 교통제어문제를 표현하고 임의의 교통회로를 모델링하고 제어하는 예를 보였다.

향후 연구 방향은 우리가 제안한 이론을 보다 대규모 시스템에 적용해보고 실제 교통모델을 모든 교통 제약조건을 고려하여 모델링하고 제어하는 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Supervisory control of a class of discrete event process" SIAM J. Control. Optimize., Vol. 25, No. 1, pp. 206-230, 1987.

[2] E. C. Yamalidou and J. C. Kantor "Modeling and Optimal Control of Discrete Event Chemical Processes using Petri Nets" Computer Chem. Vol. 15, No. 7, pp. 503-519, 1991

[3] D. Ionescu, J. Y. Lin, and H. S. Hwang, "Specification of Intelligent controllers for discrete event system in a temporal logic framework" IFAC workshop on Algorithms and architecture for real time control, Seoul, Korea Aug. 1992, pp. 237-242.

[4] J. F. Allen, "Toward a general theory of action and time" Artificial Intelligence, Vol. 23, pp. 123-154, 1984.

[5] D. McDermott, "A temporal logic for reasoning about processes and plants" Cognitive Science, Vol. 6, pp. 101-155, 1982.

[6] J. S. Ostroff "real time Computer Control of Discrete Event Systems Modelled by Extended State Machines : A Temporal Logic Approach, PhD. thesis, Dept. of Electrical Eng. University of Toronto, 1987.