

비선형거동을 가지는 실시간체계의 한가지 모형검사방법

김용석, 최문숙

위대한 령도자 김정일동지께서는 다음과 같이 교시하시였다.

《과학자, 기술자들은 사회주의경제발전의 요구에 맞게 인민경제 모든 부문의 생산기술 공정과 생산방법, 경영활동을 새로운 과학적로대우에 올려세우는데서 나서는 과학기술적문제를 전망성있게 풀어나가야 하겠습니다.》(《김정일선집》 증보판 제11권 138페이지)

선형적인 거동을 가지는 실시간체계는 지속론리를 리용하여 모형화하고 정확성을 검사[1]할수 있다. 선행연구[2, 3]에서는 지속론리의 한가지 형태의 공식인 선형지속제한식을 리용하여 실시간체계의 선형적인 거동과 관련한 실시간요구를 서술하는 문제에 대하여 논의하였으며 실시간체계의 실시간자동체모형이 선형지속제한식을 만족시키는가를 검사하는 문제를 풀기 위한 한가지 모형검사알고리즘을 제기하고 여러가지 실천문제들에 적용하였다.

우리는 비선형적인 거동을 가지는 실시간체계의 정확성검증을 위한 한가지 모형검사방법을 제기하였는데 이를 위하여 우선 실시간자동체를 적분실시간자동체로 확장하고 선행연구의 선형지속제한식을 일반화된 선형지속제한식으로 확장하였다.

다음으로 적분실시간자동체가 일반화된 선형지속제한식을 만족시킨다는것을 증명하였다.

적분실시간자동체는 실시간자동체의 매 상태에 적분가능한 함수가 표식된 자동체이다.

먼저 선행연구의 실시간자동체를 서술하고 그에 기초하여 적분실시간자동체를 정의한다.

정의 1 다음의 조건을 만족시키는 $A = \langle S, T, low, up \rangle$ 을 실시간자동체라고 부른다.[1]

$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ 은 상태들의 유한모임, $T \subseteq S \times S$ 는 이행들의 유한모임, $low: T \rightarrow R$ 와 $up: T \rightarrow (R \cup \{\infty\})$ 는 이행에 대한 윗한계조건과 아래한계조건이다. 여기서 $0 \leq low(\rho) \leq up(\rho)$ 이다.

정의 2 다음의 5원조 $D = \langle S, T, low, up, L \rangle$ 을 적분실시간자동체라고 부른다. 여기서 $\langle S, T, low, up \rangle$ 은 실시간자동체이고 $L: S \rightarrow 2^{Intg(R^+)}$ 는 매 상태 $s \in S$ 에 적분가능한 유한개의 함수를 대응시키는 넘기기이다.

비선형거동을 가지는 실시간체계인 반응탱크는 적분실시간자동체로 모형화될수 있다.

반응탱크에서는 유해가스의 방출을 동반하는 한가지 화학반응이 비확정적으로 반복된다. 반응이 한번 진행되는데 걸리는 시간은 3~4h이다. 반응이 끝나면 결과물을 꺼내고 남아있는 액체를 다음 공정으로 보낸다. 2h가 지난 후에 다시 반응이 진행될수 있다. 방출된 유해가스를 제거하기 위하여 공기정화기가 설치되어 항시적으로 가동한다. 반응이 진행되는 동안에 방출되는 유해가스의 양은 적분가능한 함수 f_{tox} 로 표현되며 공기정화기의 정화능력은 적분가능한 함수 f_{detox} 로 표현된다. 반응탱크를 적분실시간자동체로 모형화하면 그림과 같다.

한편 일반화된 선형지속제한식은 선형지속제한식의 피적분함수인 부울함수를 적분가능한 함수로 일반화하는 방법으로 정의된다.

먼저 선행연구의 선형지속제한식을 서술하고 그
에 기초하여 일반화된 선형지속제한식을 정의한다.

정의 3 다음과 같은 형태의 지속론리공식을 선형지속제한식이라고 부른다.[1]

$$c_{\min} \leq \ell \leq c_{\max} \rightarrow \sum_{i=1}^n c_i \int s_i \leq C$$

정의에서 $c_{\min}, c_{\max}, c_i, C$ 들은 실수들이고 s_i 들은 실시간체계의 상태들이다. ℓ 은 시간구간의 길이를 나타내는 항이다.

정의 4 다음과 같은 형태의 지속론리공식을 일반화된 선형지속제한식이라고 부르고 $ELDI$ 로 표시한다.

$$c_{\min} \leq \ell \leq c_{\max} \rightarrow \sum_{i=1}^n c_i \int f_i \leq C$$

정의에서 $c_{\min}, c_{\max}, c_i, C, \ell$ 의 의미는 정의 3에서와 같다. f_i 들은 실시간체계의 상태들에 표식된 적분가능한 함수들이다.

일반화된 선형지속제한식을 리용하면 물리적량의 축적이 비선형성을 가지는 실시간체계의 실시간요구들을 서술할수 있다. 실례로 반응탱크의 실시간요구 《12h보다 작지 않은 임의의 시간구간에서 불 때 정화되는 유해가스량이 방출되는 유해가스량보다 적지 않다.》는 일반화된 선형지속제한식으로 다음과 같이 서술된다.

$$12 \leq \ell \rightarrow \int f_{\text{tox}} - \int f_{\text{detox}} \leq 0$$

이러한 실시간요구는 선행연구의 선형지속제한식으로는 서술할수 없고 일반화된 선형지속제한식을 써야만 서술할수 있다.

적분실시간자동체 $D = \langle S, T, low, up, L \rangle$ 가 주어졌다. T 의 원소를 이행이라고 부르며 $\rho, \rho_1, \rho_2, \dots$ 등으로 표시한다. 이행 $\rho = (s, s')$ 에 대하여 기호 $\bar{\rho} = s, \bar{\rho} = s'$ 를 약속한다.

임의의 $i (1 \leq i \leq n-1)$ 에 대하여 $\bar{\rho}_i = \bar{\rho}_{i+1}$ 이면 $Beh = \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 을 거동이라고 부른다. $TBeh = (\rho_1, t_1)(\rho_2, t_2) \dots (\rho_n, t_n)$ 을 Beh 의 시점거동이라고 부른다. 여기서 임의의 $i (1 \leq i \leq n-1)$ 에 대하여 $low(\rho_i) \leq t_i \leq up(\rho_i)$ 이다.

$Seq = \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 을 렬이라고 부른다. 렬 Seq 가 주어졌을 때 $TSeq = (\rho_1, t_1)(\rho_2, t_2) \dots (\rho_n, t_n)$ 을 Seq 의 시점렬이라고 부른다. 여기서 임의의 $i (1 \leq i \leq n-1)$ 에 대하여 $low(\rho_i) \leq t_i \leq up(\rho_i)$ 이다.

적분실시간자동체 D 의 거동모임을 L_D 로 표시한다. D 의 시점렬 $TSeq = (\rho_1, t_1)(\rho_2, t_2) \dots (\rho_n, t_n)$ 에 그것의 길이를 대응시키는 함수 ℓ 을 $\ell(TSeq) = \sum_{i=1}^n t_i$ 로 정의한다.

f 가 D 의 상태에 표식된 함수라고 하자. D 의 시점렬 $TSeq = (\rho_1, t_1)(\rho_2, t_2) \dots (\rho_n, t_n)$ 에 대하여 $\int f(TSeq)$ 를 다음과 같이 정의한다.

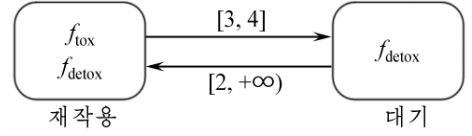


그림. 반응탱크의 적분실시간
자동체모형

$$\int f(TSeq) = \sum_{i=1}^n \begin{cases} \int_0^{t_i} f(x)dx, & f \in L(\bar{\rho}_i) \\ 0, & f \notin L(\bar{\rho}_i) \end{cases}$$

일반화된 선형지속제한식 $ELDI$ 의 선형항 $\sum_{i=1}^n c_i \int f_i$ 를 LF 로 표시한다. D 의 시점렬 $TSeq = (\rho_1, t_1)(\rho_2, t_2) \cdots (\rho_n, t_n)$ 에 대하여 $LF(TSeq)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$LF(TSeq) = \sum_{i=1}^n c_i \int f_i(TSeq)$$

정의 5 적분실시간자동체 D 와 일반화된 선형지속제한식 $ELDI$ 사이의 만족관계는 다음과 같이 정의된다.

$c_{\min} \leq \ell(TSeq) \leq c_{\max}$ 인 $TSeq$ 들에 대하여 $LF(TSeq) \leq C$ 이면 $ELDI$ 가 시점렬 $TSeq$ 에 의하여 만족된다고 한다.

$ELDI$ 가 Seq 의 모든 시점렬들에 의하여 만족되면 $ELDI$ 가 Seq 에 의하여 만족된다고 하고 $Seq \models ELDI$ 로 표시한다.

L 이 T 위의 언어라고 하자. 임의의 $Seq \in L$ 에 대하여 $Seq \models ELDI$ 이면 $ELDI$ 가 L 에 의하여 만족된다고 하고 $L \models ELDI$ 로 표시한다.

$L_D \models ELDI$ 이면 $ELDI$ 가 D 에 의하여 만족된다고 하고 $D \models ELDI$ 로 표시한다.

적분실시간자동체 D 와 일반화된 선형지속제한식 $ELDI$ 가 주어졌을 때 $D \models ELDI$ 를 판정하는것을 $ELDI$ 의 모형검사라고 부른다.

이때 모형검사에 대한 다음의 정리가 성립한다.

정리 문제 $D \models ELDI$ 는 허용구역이 선형제한이고 목적함수가 변수분리형련속함수인 유한개의 비선형계획법문제들의 유한모임으로 귀착된다.(증명생략)

정리에서 문제 $D \models ELDI$ 를 비선형계획법문제들로 귀착시키는 과정은 알고리즘적으로 결정가능하다. 또한 허용구역이 선형제한이고 목적함수가 변수분리형련속함수인 비선형계획법문제들을 푸는 방법은 이미 잘 연구되어있다. 이것은 $ELDI$ 의 모형검사가 알고리즘적으로 결정가능하다는것을 의미한다.

참 고 문 헌

- [1] Z. Chaochen et al.; Information Processing Letters, 40, 5, 269, 1991.
- [2] Z. Chaochen et al.; Duration Calculus; A Formal Approach to Real-Time Systems, Springer, 110~115, 2005.
- [3] M. Zhang et al.; LNCS, 5160, 395, 2008.

주체104(2015)년 11월 5일 원고접수

A Method for Model Checking of Real-Time Systems with Nonlinear Behavior

Kim Yong Sok, Choe Mun Suk

We introduce a method for model checking of real-time systems with nonlinear behavior by generalizing the model checking method of real-time systems with linear behavior.

Key words: real-time system, integral real-time automaton