2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2003.7.21-23

Siphon 특성을 이용한 이산사건 시스템의 Deadlock 회피

김정철*, 김진권, 황형수, 김성중*
전북대학교 메카트로닉스공학과*, 원광대학교 제어계측공학과

Deadlock Avoidance of DEDS Using Siphon property

Kim Jung-Chul*, Kim Jin-Kwon, Hwang Hyung-Soo, Kim Sung-Joong*
Dept. of Mecatronics Engineering, Chonbuk Univ*, Dept. of Control & Instrumentation Engineering.

Abstract - 본 논문은 페트리 네트의 특별한 구조인 siphon의 특성을 이용하여 트랜지션 점화를 제어함으로써 deadlock을 회피하는 방법을 제시한다. 제안한 방법은 페트리 네트에서 상태 방정식을 유도한 후, siphon의 특성을 이용하여 deadlock을 회피할 수 있는 충분조건을 유도한다. 간단한 FMS의 예를 이용하여 제안한 방법을 사용하면 deadlock이 발생하지 않음을 보인다.

1. 서 론

FMS's와 같은 이산 사건 동적 시스템에서 deadlock 해석과 제어는 매우 중요한 연구 과제이다. Deadlock의 발생은 전체 시스템을 사용 못하게 할 수도 있으며, 특히 자동화된 생산 시스템의 경우 자동화 동작을 불가능하게 만든다. 또한, 전체 시스템 중에서 한 부분에서 발생한 deadlock은 시스템의 다른 부분으로 영향을 끼칠 수 있으며, 결국에는 완전히 전체 시스템의 모든 동작들이 멈추게 된다.

페트리 네트를 이용하여 deadlock 회피와 방지를 하는 연구가 그 동안 많은 방면에서 제안되었으나([1]-[2]), 일반적인 페트리 네트에서 deadlock에 대한 연구는 많지 않았다. 따라서, 범용성을 가지는 일반적인 페트리 네트에서 deadlock을 효과적으로 방지하는 방법이 필요하게 되었으며, 본 논문에서는 Feng Chu와 Xiao-Lan Xie[3]가 제시한 siphon의 특성을 기초로 하여 일반적인 페트리 네트에서 트랜지션의 점화를 제어함으로써 deadlock을 제어하는 방법을 제시한다.

2. 본 론

2.1 페트리 네트

2.1.1 페트리 네트의 기호와 표현

일반적으로 5개의 원소로 구성되어 있다.

정의 1 : 일반적인 페트리 네트는 $N=\langle P, T, I, O, M_0\rangle$로 구성되며, 각 요소들은 다음과 같다.

P : 유한한 플레이스의 집합
T : 유한한 트랜지션의 집합
I : 플레이스에서 트랜지션으로의 입력 함수
O : 트랜지션에서 플레이스로의 출력함수
M: 마킹 - 각 플레이스에 있는 토큰의 개수로서, M_0 는 초기 마킹이다.

2.1.2. Siphon과 Trap

Siphon과 trap은 페트리 네트의 deadlock 특성으로부터 도입된 특별한 구조이며, Siphon과 trap에 관한 정의는 다음과 같다.[3]

정의 2 : 어느 플레이스 집합 S에 대하여 $\cdot S \subseteq S \cdot$을 만족하는 집합 S를 **siphon**이라고 한다.

정의 3 : 어느 플레이스 집합 Q에 대하여, $Q \cdot \subseteq \cdot Q$를 만족하는 집합 Q를 **trap**이라고 한다.

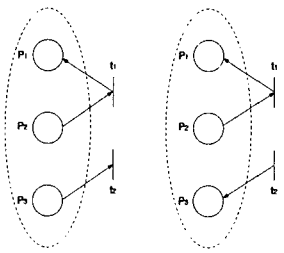

그림 1. Siphon과 trap

Minimal siphon(trap)이라는 것은 다른 siphon(trap)을 포함하고 있지 않은 siphon(trap)을 의미하는 것으로 deadlock 해석에서 중요한 용어이다.

2.2 Siphon을 이용한 Deadlock 해석[3]

Siphon과 관련된 잠재적인 deadlock에 대한 정의는 다음과 같다.

정의 4 : 결국에는 토큰이 모두 빠져나가는 siphon S를 잠재적인 deadlock(potential deadlock)이라 한다.

Deadlock의 해석에서 siphon과 trap의 중요한 특성은 다음과 같다.

특성 1

1) 어떤 마킹에서 토큰이 없는 siphon S는 토큰이 없는 상태를 유지한다.
2) 어떤 마킹에서 토큰이 생성된 trap은 마크된 상태를 유지한다.
3) 활성화된 트랜지션이 없는 어떤 마킹에서, 빈(empty) 플레이스의 집합은 siphon을 형성한다.

특성 2 : 만약 결국에는 토큰이 모두 빠져나가는 minimal siphon이 없다면 페트리 네트는 deadlock이 발생하지 않는다.

특성 3 : 마크된 trap을 포함한 어떤 siphon은 잠재적인 deadlock이 아니다.

위의 정의와 특성으로부터, siphon S가 만약 $F(S)=0$이면 잠재적인 deadlock이다. 여기서 F(S)는 다음으로 정의된 함수이다.

$$F(S)=\min\{M(S)\,|\,M=M_0+CY, M\geq 0, Y\geq 0\}$$

C는 사건 발생 행렬(incidence matrix)이고 M과 Y는 양의 정수 vector이며, self loop는 없는 것으로 간주한다. 관계 $M=M_0+CY$는 일반적으로 상태 방정식(state equation)으로 불려진다.

특성 2, 특성 3과 함수 F(S)로부터 deadlock이 발

생하지 않는 것과 siphon과 관련된 다음의 중요한 특성을 얻는다.

특성 4 : 만약 각각의 minimal siphon S가 마크된 Trap을 포함하거나 F(S)>0이면, 페트리 네트는 deadlock이 발생하지 않는다.

2.3 Siphon의 특성을 이용한 Deadlock 제어

Feng Chu와 Xiao-Lan Xie가 제시한 방법으로 초기 마킹을 찾을 경우 deadlock이 발생하지 않는 조건이 초기 마킹의 명확한 값으로만 이루어지지 않은 경우가 있다. 따라서, 이번 장에서는 Feng Chu와 Xiao-Lan Xie가 제시한 초기 마킹 설정의 특성을 살리면서 효과적으로 deadlock을 제어하기 위하여 초기 마킹과 점화벡터 사이의 관계식을 이용해 트랜지션의 점화를 제어함으로써 deadlock을 회피하는 방법을 제시한다.

2.3.1. 예 제 : 간단한 FMS

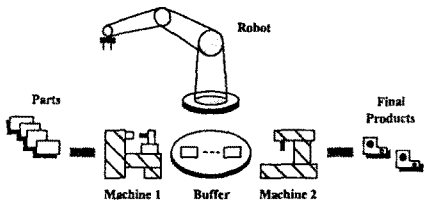

그림 2 간단한 FMS

(1) 구 성
▷ 두 개의 기계 공작 장소 : M_1, M_2.
▷ 적재(loading)와 하역(unloading)을 위한 로봇.
▷ 중간의 부품을 저장하기 위한 저장 공간.

(2) 동작 방법
부품이 시스템에 들어감. → 팔레트에 고정하여 M_1에 적재하여 처리 → M_1에서 저장공간으로 하역함 → M_2로 적재 한 후 처리→ M_2에서 최종 생산품으로 하역.

(3) 페트리 네트 표현

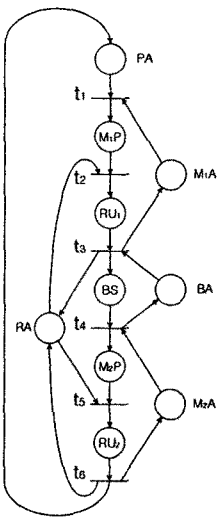

그림 3. FMS의 페트리 네트 표현

그림 3에 표현한 플레이스와 트랜지션의 의미는 표 1과 같다.

표 1. 그림 3의 플레이스와 트랜지션 설명

Number	플레이스	설 명
p_1	PA	이용 가능한 팔레트의 수
p_2	M_1P	M_1에 적재하여 원자재를 팔레트에 고정한 후 처리.
p_3	RU_1	로봇으로 중간단계의 부품을 저장공간에 하역
p_4	BS	저장공간에 중간단계의 부품을 저장.
p_5	M_2P	중간 단계의 부품을 M_2에 적재하여 처리.
p_6	RU_2	로봇으로 M_2로부터 최종 생산품으로 하역한 후, 고정된 것을 해제하여 팔레트를 처음단계로 돌려줌
p_7	M_1A	기계 장치 1의 유용성
p_8	BA	저장공간의 유용성
p_9	M_2A	기계 장치 2의 유용성
p_{10}	RA	로봇의 유용성
트랜지션		설 명
t_1	M_1P 동작의 시작	
t_2	M_1P 동작의 끝. RU_1 동작의 시작	
t_3	RU_1동작의 끝. BS 동작의 시작	
t_4	BS 동작의 끝. M_2P 동작의 시작	
t_5	M_2P 동작의 끝. RU_2 동작의 시작.	
t_6	RU_2 동작의 끝	

2.3.2. Deadlock이 발생하지 않을 조건

〈 그림 3 〉에서 minimal siphon은 $S_1=\{p_4, p_8\}$, $S_2=\{p_2, p_3, p_7\}$, $S_3=\{p_3, p_6, p_{10}\}$, $S_4=\{p_5, p_6, p_9\}$, $S_5=\{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6\}$, $S_6=\{p_6, p_8, p_9, p_{10}\}$이다. S_1, S_2, S_3, S_4, S_5는 또한 trap이다. 따라서, $F(S_6)>0$이기 위한 조건을 구하기 위해 상태 방정식을 전개한다. 간결하게 표현하기 위해 $m_i = M_0(p_i)$로 표현한다.

$M = M_0 + CY$ 이며,

$Y=[y_1, y_2, y_3, y_4, y_5, y_6]^T$

$$C=\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

관계식을 유도하여 간략화 하면 다음과 같다.

$$y_2 = m_6 + m_8 + m_9 + m_{10} + y_6 \quad (1)$$
$$y_3 = m_8 + m_9 + y_6 \quad (2)$$
$$y_4 = m_9 + y_6 \quad (3)$$
$$y_5 = -m_6 + y_6 \quad (4)$$
$$M(p_1) = m_1 - y_1 + y_6 \quad (5)$$
$$M(p_2) = y_1 - y_2 \quad (6)$$
$$M(p_3) = m_3 + m_6 + m_{10} \quad (7)$$
$$M(p_4) = m_4 + m_8 \quad (8)$$
$$M(p_5) = m_5 + m_6 + m_9 \quad (9)$$
$$M(p_7) = -y_1 + y_6 + 2 \quad (10)$$

식 (5)과 (10)에서 t_1의 점화는 다음을 만족할 때 점화를 할 수 있다.

- $m_1 \le 2$일 때: $-y_1 + y_6 + m_1 > 0$ (11)
- $m_1 > 2$일 때: $-y_1 + y_6 + 2 > 0$ (12)

식 (6)에서 t_2의 점화는 제어가 되어야 하며 다음을 만족할 때 점화를 할 수 있다.

$$y_1 - y_2 > 0 \quad (13)$$

Trap을 포함하고 있는 siphon의 조건과 식 (11)(12)(13)의 조건을 합하면 그림 3의 FMS의 deadlock이 발생하지 않을 조건은 다음과 같다.

• Deadlock이 발생하지 않을 조건

$m_4+m_8>0$ (14)

$m_2+m_3+m_7>0$ (15)

$m_3+m_6+m_{10}>0$ (16)

$m_5+m_6+m_9>0$ (17)

$m_1+m_2+m_3+m_4+m_5+m_6>0$ (18)

t_1의 점화

▷ $m_1 \le 2$일 때 :

$-y_1+y_6+m_1>0$을 만족하면 점화가능. (19)

▷ $m_1>2$일 때 :

$-y_1+y_6+2>0$을 만족하면 점화가능. (20)

t_2의 점화

$y_1-y_2>0$를 만족하면 점화가능. (21)

2.3.3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

공정은 초기조건은 $m_2= m_3= m_4= m_5= m_6=0$이며, $m_7= m_9= m_{10}=1$이다. 개수를 조절할 수 있는 자원은 팔레트와 저장공간으로 간주하며 m_1과 m_8의 개수 즉 팔레트와 저장공간의 개수는 각각 1~5까지 이다. 그 외의 시뮬레이션 조건은 표 2와 같다.

표 2. 프로그램 조건

프로그램 수행 시간 : 500초	
플레이스	작업 수행 시간(단위 : 초)
p_2	20, 10, 5
p_3	3
p_5	20, 10, 5
p_6	3
나머지 플레이스의 작업 수행 시간은 zero로 간주한다.	

아래의 표는 프로그램 수행 결과로, 왼쪽은 t_1과 t_2의 점화를 제어한 결과이며, 오른쪽은 제어하지 않은 결과이다. 표에 D로 표시된 부분은 Deadlock이 발생한 부분을 의미하며, 표 상단에 표기한 p_i의 값은 플레이스 p_i의 작업 수행 시간이며 단위는 초이다.

표 3. 시뮬레이션 결과 1

물품 생산량						p_2=20,	p_3=3,	p_5=5,	p_6=3	
m_1 \ m_8	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
2	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
3	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
4	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
5	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21

표 4. 시뮬레이션 결과 2

물품 생산량						p_2=20,	p_3=3,	p_5=10,	p_6=3	
m_1 \ m_8	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
2	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
3	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
4	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
5	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21

표 5. 시뮬레이션 결과 3

물품 생산량						p_2=10,	p_3=3,	p_5=20,	p_6=3	
m_1 \ m_8	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
2	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
3	21	21	21	21	21	D	21	21	21	21
4	21	21	21	21	21	D	D	21	21	21
5	21	21	21	21	21	D	D	D	21	21

표 6. 시뮬레이션 결과 4

물품 생산량						p_2=5,	p_3=3,	p_5=20,	p_6=3	
m_1 \ m_8	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
2	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
3	21	21	21	21	21	D	21	21	21	21
4	21	21	21	21	21	D	D	21	21	21
5	21	21	21	21	21	D	D	D	21	21

위의 결과에서 보듯이 deadlock이 발생하지 않을 조건이 초기 마킹과 점화 벡터 사이의 관계식으로 나왔을 경우 이를 이용하여 트랜지션의 점화를 제어함으로써 [3]에서 제시한 초기 마킹 설정의 장점을 살리면서 시스템이 deadlock이 발생하지 않고 효과적으로 동작함을 알 수 있다.

3. 결 론

Deadlock을 방지하기 위하여 그동안 페트리 네트를 이용하여 많은 연구가 있었으나, 대부분의 연구 결과들은 각각이 모델링하는 방법을 달리하는 페트리 네트에서의 deadlock 회피와 방지에 관한 연구 결과들이었으며, 그들 결과를 일반적인 페트리 네트에 적용하고자 하려면 처음부터 다시 모델링해야만 했었다.

본 논문에서는 일반적인 페트리 네트에서 deadlock 제어와 초기 마킹 설정을 동시에 만족시킬 수 있는 방법을 제시하였다. Feng Chu와 Xiao-Lan Xie가 제시한 방법을 사용하여 deadlock이 발생하지 않는 조건을 만족하는 초기 마킹을 설정하였으며, 만약 이들의 관계식이 초기 마킹으로만 이루어지지 않고 점화벡터와 초기 마킹으로 이루어진 관계식일 경우 트랜지션의 점화를 제어함으로써 deadlock이 발생하지 않도록 하였다. 간단한 FMS에 적용하여 트랜지션의 점화를 제어함으로써 deadlock이 발생하지 않음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] J. Ezpeleta, J. M. Colom, and J. Marthinez, *"A Petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems"*, IEEE Trans. Robot. Automat. vol. 11, pp. 173-184, 1995.

[2] Z. A. Banaszak and B. H. Krogh, *"Deadlock avoidance in flexible manufacturing systems with concurrently competing process flows"*, IEEE Trans. Robot. Automat., vol. 6, pp. 724-734, 1990

[3] Feng chu and Xiao-Lan Xie, *"Deadlock Analysis of Petri Nets Using Siphon and Mathematical Programming"* IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 13, No. 6, December 1997. pp. 793-804