

페트리 넷을 이용한 유연 로봇 조립셀의 시뮬레이션에 관한 연구

* 임용희*, 홍지민*, 이기동*, 김대원**, 이범희*
*서울대학교 제어계측공학과 자동화시스템 공동연구소
**명지대학교 제어계측공학과

A Study on the Simulation of Flexible Robotic Assembly Cell Using Petri Net

* Yong-Hee Im*, Ji-Min Hong*, Ki-Dong Lee*, Dae-Won Kim*, Bum-Hee Lee*
*Dept. of Control & Instrumentation Eng. Seoul National University,
Automation & Systems Research Institute
**Dept. of Control & Instrumentation Eng. Myong Ji University

ABSTRACT

A flexible robotic assembly cell is modeled using Petri net. A simulator is developed and used to predict the optimal status of the system. The assembly cell of flexible manufacturing system(FMS) pilot plant of Automation and Systems Research Institute(ASRI) in Seoul National University is modeled. The system consists of 3 robots, 4 conveyors, automatic guided vehicle(AGV) and auto-stacker. The simulator is programmed in Turbo C on IBM PC, supporting a simple graphic simulation with pull-down menu. The flexibility of the assembly cell in the FMS plant is guaranteed, since it is possible to predict the optimal status of the system using this simulator.

1. 서론

FMS는 일반적으로 유연성과 다양성을 갖는 생산시스템으로 정의한다. 따라서 FMS 연구의 목적은 시스템의 생산성과 유연성 및 적응성을 최대화하는 데 있다. 그 목적을 실현하기 위해 FMS의 모델링 및 분석기법에 대한 연구가 짧은 기간이지만 많이 이루어져 왔다. Kusiak[1]은 FMS의 문제를 크게 설계문제(design problem)와 운영문제(operational problem)로 나누어 서술하였다. 여기서 설계문제는 FMS를 구성하는 모든 요소들의 최적선택(optimal selection) 문제를 다루고, 운영문제는 선택된 요소들의 최적활용(optimal utilization) 문제를 다룬다. 이와 같은 문제를 다루기 전에 선행되어야 할 것이 FMS 시스템을 수학적으로 모델링하는 일이다. 어떤 시스템이건 그 시스템을 효율적으로 운영하기 위해서는 위에서 설명한 기능 - 수학적 모델링, 설계문제, 운영문제 - 을 다루기 위한 시뮬레이터의 제작이 필수적이다. 본 논문에서는 서울대 자동화시스템 공동연구소 FMS 공장에 설치되어 있는 조립셀을 페트리 넷(Petri net)를 이용하여 모델링하는 기법과, 페트리 넷으로 모델링한 시스템의 성능을 평가할 수 있는 시뮬레이터 제작을 제시한다.

2. 모델링 방법

2.1 DEDS 모델링 방법

컴퓨터망, 통신망, 교통시스템 등과 같이 이산사건(discrete event)에 의해 동작하는 시스템을 DEDS(discrete event dynamic system)라 한다. DEDS에 반대되는 개념이 CVDS(continuous variable dynamic system)이다. DEDS에서

이산사건들은 그 발생이 이산적이고 비동기적이라는 것이 특징이다. 따라서 일의 도착이나 출발, 작업의 완료 등과 같은 이산사건에 의해 지배되는 FMS 역시 DEDS의 한 예라고 볼 수 있다. CVDS의 경우에는 적용할 수 있는 제어이론들이 많이 연구되어 있는데 반해, DEDS의 경우에는 모델링과 해석에 대한 여러가지 방법들이 제안[2]-[4]되어 있기는 하나, 아직까지는 일반화되지 못한 실정이다.

DEDS의 모델링 방법 중 대표적인 것으로는 페트리 넷(Petri net)모델, FSM(finite state machine), QN(queueing network) 모델 등이 있다. 이 중에서 페트리 넷은 시스템을 도식적, 계층적으로 나타낼 수 있으므로 복잡한 시스템을 모델링하고 분석하는 데 가장 널리 쓰인다[5]-[9]. 본 논문에서도 페트리 넷을 사용하여 FMS 공장의 조립셀을 모델링하였다.

2.2 페트리 넷 이론

여기서는 페트리 넷에서 가장 기초가 되며 본 논문에서 이용한 것들을 중심으로 그 이론을 살펴보기로 한다 [10]-[13].

정의 1: 페트리 넷 구성

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

P : 플레이스(place)의 유한집합

$$P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$$

T : 트랜지션(transition)의 유한집합

$$T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$$

I : $P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ 입력함수

$$\text{즉, } t_j = I(P_i)$$

O : $T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ 출력함수

$$\text{즉, } P_j = O(t_i)$$

플레이스는 트랜지션이 일어나기 위한 조건(condition)으로 생각할 수 있고, 트랜지션은 상태를 변화시키는 사건(event)이라 할 수 있다.

정의 2: 활성화(enable)

페트리 넷 제어의 흐름을 나타내는 것이 토큰(token)인데, 어떤 트랜지션의 모든 입력 플레이스에 토큰이 있는 경우 이 트랜지션을 활성화 상태에 있다고 한다.

정의 3: 마킹(marking)

$$\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$$

μ_i 는 i 번째 플레이스(P_i)의 상태를 나타낸다. 1의 값을 가지면 활성화 상태이고 0의 값을 가지면 비활성화된 상태이다.

정의 4 : 점화 (fire)

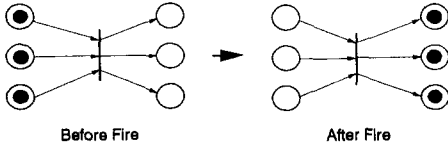


그림 2.1 페트리 넷의 점화

페트리 넷 모델에서 원은 플레이스, 수직선은 트랜지션을 나타낸다. 그리고 플레이스 안에 있는 점은 토큰을 의미하는데, 트랜지션으로 들어오는 모든 플레이스 안에 토큰이 들어있을 때에만 활성화 상태가 되며 트랜지션이 일어난다. 트랜지션이 일어나는 것을 점화(fire)라 한다.

정의 5 : 확장 페트리 넷 (EPN-extended petri net)

페트리 넷로는 실제 시스템을 정확하게 표현하기 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위해 나온 것이 확장된 페트리 넷[14]이다.

- ① 여러 종류의 플레이스 사용
 - 상태 플레이스(status place)
 - 소스 플레이스(source place) : 자원(source)을 제공하는 플레이스
 - 싱크 플레이스(sink place) : 재원을 받는 플레이스
 - 서브넷(subnet) : 모듈식 모델링 가능
- ② 여러 종류의 토큰 사용 -- 부품과 제어, 정보 등의 흐름 구별 가능
- ③ 조건 분기 트랜지션 -- 사용자 조건에 맞게 분기
- ④ 금지 아크 (inhibitor) -- P_1 에는 토큰이 없고 P_2 에는 토큰이 있을 경우 트랜지션이 일어난다. 즉 P_1 의 앞에 붙어있는 조그만 원이 NOT 논리소자 역할을 한다고 볼 수 있다.
- ⑤ 시간 트랜지션(timed transition) -- 트랜지션이 일어나는 동안에, 즉 점화가 시작되어 끝날 때까지 시간이 걸린다고 가정

그림 2.2는 확장된 페트리 넷에서 쓰이는 기호이다.

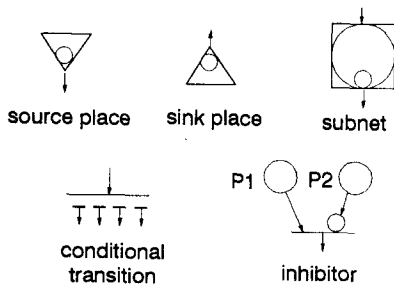


그림 2.2 확장된 페트리 넷의 기호

3. 시스템 설정 및 모델링

3.1 시스템 설정

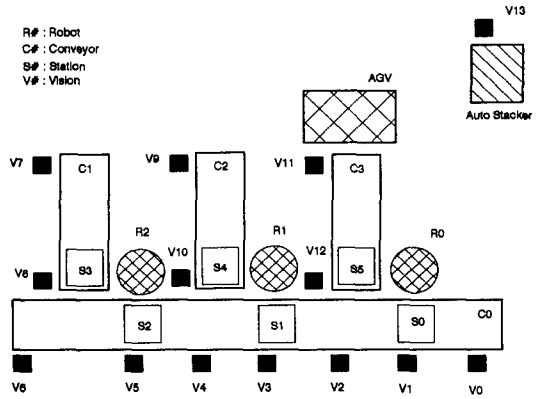


그림 3.1 FMS 공장 조립셀

ASRI FMS 공장에는 여러 작업 단위가 있다. 부품을 가공하는 가공셀(machining cell), 부품을 조립하는 조립셀(assembly cell), 부품의 가공 상태를 확인하는 검사셀 (inspection cell), 각 셀들을 연결해주는 무인반송차(AGV)의 물류셀, CIM으로 도약하기 위한 데이터베이스부 등으로 FMS-CIM 공장은 구성되어 있다. 본 논문에서는 이 중에서 조립셀을 모델링 대상으로 삼았다

그림 3.1에서 보는 바와 같이 조립셀은 로봇 3대, 컨베이어(조립1, 부품2), 스테이션 6개, 비전시스템(광센서) 14대, 무인반송차(AGV) 1대, 그리고 그림에는 나와 있지 않은 팔레트 6개로 구성되어 있다. 이 중에서 움직이는 요소는 로봇, 컨베이어, 팔레트, 무인반송차이고, 움직이지 않고 상태정보만 가지고 있는 것은 비전시스템과 스테이션이다. 그리고 페트리 넷에 의해 움직이는 요소는 로봇과 컨베이어, 무인반송차, 스테이션이고, 비전시스템과 팔레트는 프로그램 내의 알고리즘에 의해 작동한다.

3.2 시스템 모델링

구성요소들을 페트리 넷으로 동작시키기 위해서는 플레이스에 해당하는 구성요소의 상태와 트랜지션에 해당하는 동작을 정의해야 한다. 다음에 조립셀 각 요소의 상태와 동작을 정의한다.

① 로봇(robot)

부품을 잡는 동작(GRASP)과 조립하는 동작(ASSEMBLE)은 시간 개념을 넣은 시간 트랜지션이다.

- 상태 -- STOP : 정지 상태
MOVING : 팔이 스테이션 사이를 움직이고 있는 상태
UNGRASP : 부품을 내려놓은 상태
GRASP : 부품을 잡은 상태
ASSEMBLE : 로봇이 부품을 조립하는 상태
- 동작 -- STOP : 정지 동작
MOVE : 팔을 스테이션 사이에서 움직이는 동작
UNGRASP : 부품을 내려놓는 동작
GRASP : 부품을 잡는 동작.
ASSEMBLE : 부품을 조립하는 동작.

② 컨베이어(conveyor)

- 상태 -- STOP : 정지 상태
FORWARD : 앞으로 움직이고 있는 상태
BACKWARD : 뒤로 움직이고 있는 상태
- 동작 -- STOP : 정지 동작
FORWARD : 앞으로 움직이게 하는 동작
BACKWARD : 뒤로 움직이게 하는 동작

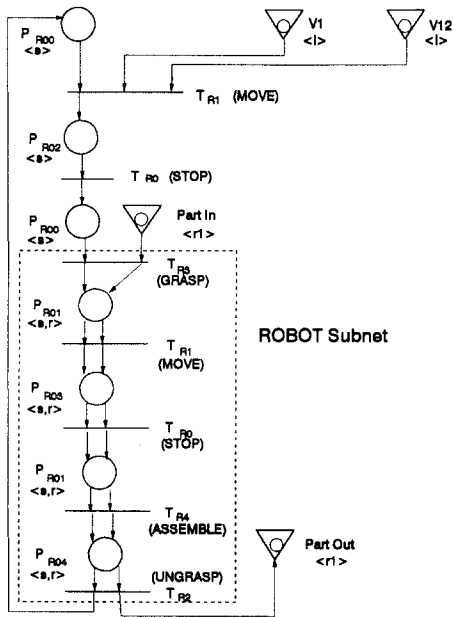


그림 3.2 로봇 모델링

③ 무인반송차(AGV)

- 상태 -- STOP : 정지 상태
MOVING : 움직이고 있는 상태
LOADED : 팔레트를 가지고 있는 상태
UNLOADED : 팔레트를 갖고 있지 않은 상태
- 동작 -- STOP : 정지 동작
MOVE : 움직이게 하는 동작
LOAD : 팔레트를 싣는 동작.
UNLOAD : 팔레트를 내리는 동작.

④ 스테이션(station)

작업을 하기 위해서 팔레트를 고정하는 요소이다. 스테이션을 올리면 팔레트가 고정되고, 내리면 컨베이어를 따라 흐르게 된다.

- 상태 -- DOWN : 내려가 있는 상태
UP : 올라가 있는 상태
- 동작 -- DOWN : 내리는 동작
UP : 올리는 동작

⑤ 비전 시스템 (vision)

- 비전은 센서 역할만 하므로 동작은 없다.
- 상태 -- OFF : 물체가 없는 경우
ON : 물체가 있는 경우

⑥ 작업 플래그 (work flag)

조립선의 동작을 제어하는 데 있어 작업이 끝났는지 안 끝났는지를 아는 것은 매우 중요하다. 작업 플래그(work flag) 1은 로봇 0의 작업이 끝났는지를 나타내고 플래그 2, 3은 각각 로봇 1, 2의 작업 수행을 나타낸다. 전체 작업 플래그(TWork Flag)는 원하는 전체 작업의 수행완료 여부를 나타내는데 이것 역시 동작은 없다.

- 상태 -- 0 : 작업이 아직 안 끝났다.
1 : 작업이 끝났다.

트큰은 상태, 팔레트, 부품, 정보의 네 가지 종류를 사용하였는데 표 3.1에 그 설명이 나와 있다. 위에서 정의한 동작과 상태로 조립선의 각 요소들을 모델링한 그림이 그림 3.2부터 그림 3.7에 나와 있고 그림 3.8은 전체 시스템을 팔레트의 흐름을 중심으로 모델링한 것이다.

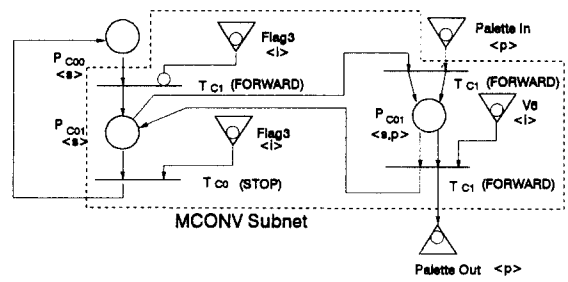


그림 3.3 조립 컨베이어 모델링

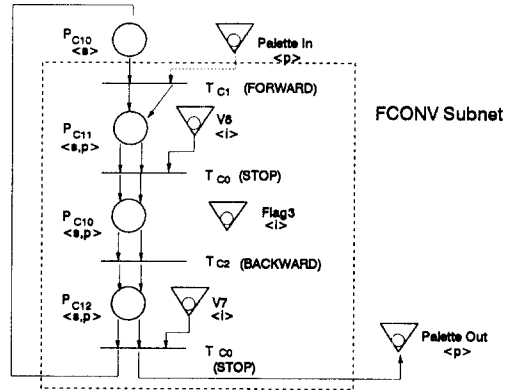


그림 3.4 부품 컨베이어 모델링

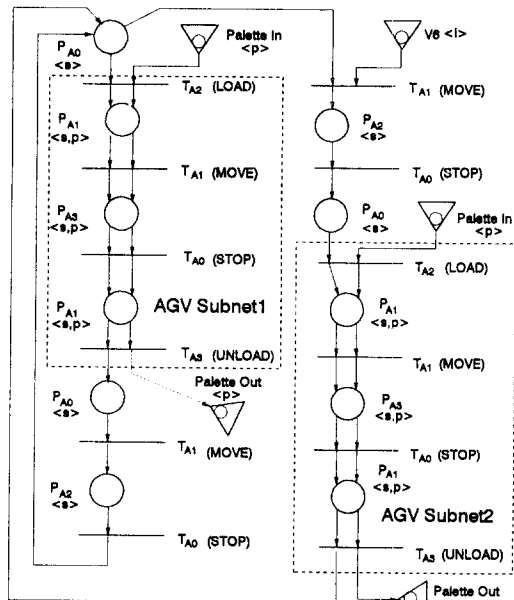


그림 3.5 무인반송차 모델링

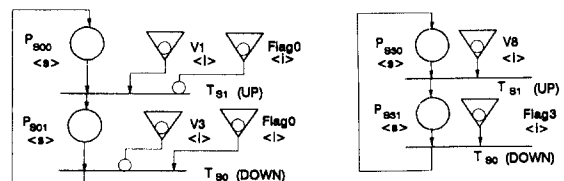


그림 3.6 조립 스테이션 모델링

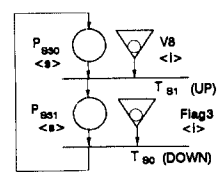


그림 3.7 부품 스테이션 모델링

그래픽 카드를 지원한다. 모든 화면은 크게 3부분으로 구분된다. 위에는 4가지 주메뉴 - PROPERTY, PETRI NET, SIMULATE, QUIT - 를 선택할 수 있도록 되어 있고, 왼쪽에는 그래픽 화면(graphic panel)으로 조립셀의 동작을 보여주고 있으며, 오른쪽에는 제어 화면(control panel)으로 여러가지 데이터를 입력받을 수 있도록 되어 있다. 조립셀은 앞에서 설명하였듯이 3대의 로봇트와 4대의 컨베이어, 1대의 AGV와 하나의 자동창고와 6가지의 팔레트, 광선서로 이루어진 14개의 비전 시스템으로 구성되어 있다.

4.2.1 특성 모드(property mode)

여기서는 조립셀 구성요소의 특성을 결정한다. 즉 3대의 로봇트, 1대의 조립 컨베이어와 3대의 부품 컨베이어, AGV의 작업 수행속도를 결정할 수 있다. 또한 3대의 로봇트가 조립작업을 하는 데 각각 소요되는 조립시간과 그리퍼를 바꾸는 데 소요되는 시간을 결정할 수 있다.

4.2.2 페트리 넷 모드(Petri net mode)

여기서는 페트리 넷을 이용하여 주어진 시스템을 모델링한 결과를 입력하게 된다. 페트리 넷 모드에서는 3개의 제어화면이 나타난다. 첫번째 제어화면에서는 작성할 페트리 넷을 저장할 파일 이름을 입력하게 된다. 두번째 제어화면에서는 페트리 넷을 작성할 구성요소를 선택하게 되고, 세번째 화면에서는 선택한 구성요소의 페트리 넷을 완성하게 된다. 그림 4.2은 세번째 화면으로서 로봇트 0의 트랜지션 1번의 완성된 페트리 넷을 보여준다.

4.2.3 시뮬레이트 모드(simulate mode)

앞에서 정의한 페트리 넷으로 실제 시뮬레이션하는 메뉴이다. 그림 4.3에서 볼 수 있듯이 제어 화면이 크게 세 부분으로 구분되는데, 왼쪽 위의 화면은 작업의 진행상황을 사용자가 쉽게 알아볼 수 있도록 하기 위한 것이고, 왼쪽 아래의 화면은 각 요소들의 상태를 나타내는 상태 플래그를 표시한다. 오른쪽 화면은 부메뉴 선택 화면이다.

오른쪽 화면의 부메뉴에서 [START]를 선택하면 시뮬레이션이 시작되며 메뉴가 [PAUSE]로 이동한다. 시뮬레이션 도중 왼쪽 화면의 ACTION 밑에 있는 구성요소들이 작업중이면 빨간색 불이 들어오고 아닌 경우에는 불이 꺼진다. 또한 작업 수행 시간도 표시된다. [PAUSE]를 선택하면 일단 메뉴가 [CONTINUE]로 바뀌면서 시뮬레이션 동작이 멈춰진다. 계속해서 시뮬레이션을 수행하려면 [CONTINUE]를 선택하면 된다. [STATUS]는 각 요소의 현재 상태를 알고 싶을 때 이용된다. [RESULT]는 시뮬레이션 결과를 보여주는데 조립 완료 시간과 각 구성요소들의 사용률이 나와 있다.

4.3 시뮬레이션 결과 비교

원래 ASRI FMS-CIM 공장에 있는 조립셀이 하는 역할은 서로 다른 세 종류의 모형모터(소형, 중형, 대형)를 조립하는 것이다. 모터를 조립하기 위한 부품이 담긴 팔레트를 무인반송차가 자동창고로부터 부품 컨베이어에 옮겨놓고 조립이 진행될 각기 다른 팔레트 세 개를 조립 컨베이어에 옮겨 놓는다. 조립준비가 끝나고 조립셀에 설치되어 있는 로봇트 세 대가 각기 맡은 작업을 수행하면 모터가 조립되어 나온다. 조립된 모터가 놓인 팔레트 세 개를 무인반송차가 다시 자동창고로 옮겨 놓으면 모든 작업이 끝난다. 그림 4.5는 무인반송차와 로봇트 수행속도에 따른 작업시간의 변화를 나타낸다.

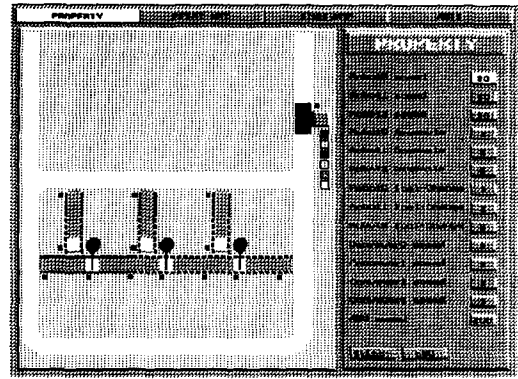


그림 4.1 특성 모드(property mode) 화면

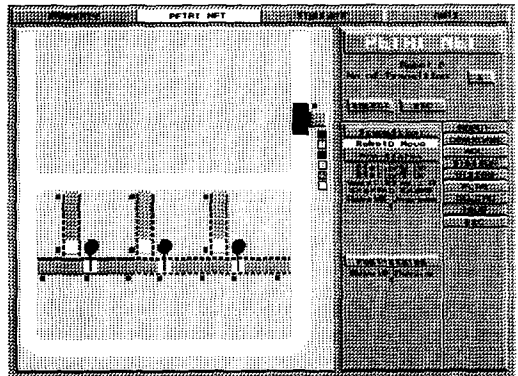


그림 4.2 페트리 넷 모드(Petri net mode) 화면

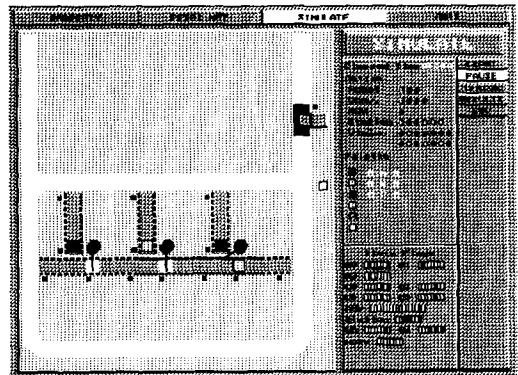


그림 4.3 시뮬레이트 모드(simulate mode) 화면 1

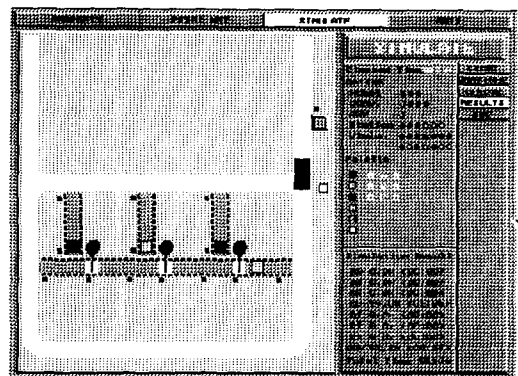


그림 4.4 시뮬레이트 모드(simulate mode) 화면 2

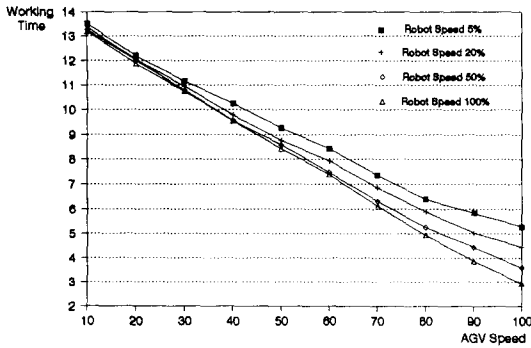


그림 4.5 무인반송차와 로봇의 수행속도에 따른 작업시간의 변화

작업시간은 로봇과 무인반송차의 속도에 가장 큰 영향을 받는데 특히 무인반송차에 대한 의존도가 너무 크기 때문에 로봇의 속도를 빠르게 한다하여도 전체 작업시간에는 큰 영향을 주지 못함을 그림 4.5를 통해 알 수 있다. 따라서 무인반송차에 대한 의존도가 현저히 높은 현재의 FMS 공장 조립선은 작업 분담면에서 효율적인 시스템이라 할 수 없다.

5. 결론

자신이 원하는 최적 상태를 얻기 위해 로봇의 속도나 조립 시간 등의 요소들의 특성을 변화해 본다든지, 작업시퀀스 등을 변경시켜본다든지 할 수 있다. 따라서 실제 작업 상태를 갖추기 전에 위와 같이 조립선의 최적 상태를 미리 계산, 예측할 수 있으므로 시간, 자원 낭비를 방지할 수 있으므로 시뮬레이터의 가장 큰 목적을 달성할 수 있다.

또한 페트리 네트를 이용하여 시스템을 모델링한 기법과 시뮬레이션을 위한 기법 등은 다른 시스템이나 시뮬레이션 기법에 계속 응용될 수 있다.

앞으로 연구해야 할 과제는 유연성을 측정할 수 있는 척도를 정의하여 시스템의 유연성 정도를 측정할 수 있도록 해야 한다는 점이다. FMS-CIM 방식이 기존의 방식에 비해 뛰어난 장점은 바로 이 유연성인데 아직까지 그것을 측정하는 척도는 정해져 있는 것이 없다. FMS-CIM에서 데이터베이스와 작업 시퀀스에 중점을 두어 유연성 척도를 만들어야 한다.

참고 문헌

[1] Andrew Kusiak, "Flexible Manufacturing Systems : a Structural Approach," Int. J.Prod.Res., Vol.23, No.6, pp.1057-1073, 1985.
 [2] Y.C.Ho, "Performance Evaluation and Perturbation Analysis of Discrete Event Dynamic Systems," IEEE Trans. Automatic control, Vol. AC-32, pp.563-572, 1987.
 [3] 홍지민, "로봇적 조립선의 모델링 및 시뮬레이션에 관한 연구," 서울대학교 제어계측공학과 석사학위논문, 1991.
 [4] 김대원, "지식베이스를 이용한 로봇적 조립선의 모델링 방법," 서울대학교 제어계측공학과 박사학위논문, 1990.

[5] R. Valette, M.Conrvoisier and D. Mayeux, "Control of Flexible Production systems and Petri Nets," 3rd European Workshop on Application and Theory of Petri Nets, Varenna, Italy, September 1982.
 [6] M.Kamath and N.Viswanadham, "Application of Petri Net based Models in The Modeling and Analysis of Flexible Manufacturing Systems," Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.312-317, 1986.
 [7] D. Dubois and K.E.Steche, "Using Petri nets to represent Production Processes," Proc. 22nd IEEE Conf. Decision and Control, pp.1062-1067, December 1983.
 [8] N.Viswanadham and Y.Narahari, "Colored Petri net Models for Automated Manufacturing Systems," Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1985-1990, 1987.
 [9] Carolyn L.Beck and Bruce H.Krogh, "Models for Simulation and Discrete Control of Manufacturing Systems," Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.395-310, 1986.
 [10] James L and Peterson, "Petri Net Theory and The Modeling of Systems," Prentic-Hall, INC., Englewood Cliffs, N.J. 076632, 1981.
 [11] Yaobin Chen and Chanat Wongladkown, "A Real-Time Control Simulator Design for Automated Manufacturing Systems using Petri nets," Proc. of the 1991 IEEE Conf. on Robotics and Automation, pp.2542-2547, 1991.
 [12] 안인석, 서기성, 우광방, "확장된 Petri-net을 이용한 FMS의 모델링 및 스케줄링," 1991 한국자동제어학회 의논문집, pp.488-492, 1991.
 [13] Javier Martinez, Pedro Muro & Manuel Silva, "Modeling, Validation and Software Implementation of Production Systems using High Level Petri Nets," Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp.1180-1185, 1987.
 [14] K.P.Valavanis, "On the Hierarchical Modeling Analysis and Simulation of Flexible Manufacturing Systems with Extended Petri Nets," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol.20, No.1, pp.94-110, 1990.