

로봇틱 조립셀의 모델링 및 시뮬레이션에 관한 연구

홍지민 김대원 이범희 고명삼
서울대학교 공과대학 제어계측공학과

A Study on the Modelling and Simulation of Robotic Assembly Cells

Jee-Min Hong Dae-Won Kim Bum-Hee Lee Myoung-Sam Ko
Dept. of Control & Instrumentation Eng.
Seoul National University

ABSTRACT

A modelling process of a robotic assembly cell and a method for analysis of the assembly cell operation through simulation are presented. An assembly cell including industrial robots is the subject of the model. The states of the assembly cell elements are taken as the state variables and the relationships between the states are described mathematically using the operators. An algorithm for the cell operation is developed from the relationships between the states and the information on the assembly task, and efficient analyses are performed by the simulation results.

1. 서론

오늘날의 생산시스템 분야는 상품제조의 경비절감과 고객의 다양한 요구만족을 위하여 다품종 소량생산 체제로의 전환 및 생산설비의 자동화, 고속화, 유연화를 추구하고 있다. 따라서 FMS(Flexible Manufacturing System)의 확산이 활발히 진행되고 있는데, 이것은 컴퓨터기술 및 로봇트 응용기술, 센서 응용기술, 인공지능기술의 발전과 더불어 더욱 가속화 되고 있다. FMS에서 가장 핵심적인 역할을 하고 있는 것이 로봇트인데 반송작업, 조립작업, 기구작업 등 다양한 동작기능을 수행한다. 한편 최근에는 여러대의 로봇트에 의한 공동작업의 실현에 많은 관심이 집중되고 있는데, 유연성 및 신뢰성의 향상으로 작업시간의 단축, 생산성의 증가를 가져올 수 있기 때문이다.

FMS, 컴퓨터 망, 통신망, 교통 시스템 등과 같이 인간이 만든 동적 시스템을 DEDS(Discrete Event Dynamic System)라 한다. CVDS(Continuous Variable Dynamic System)와는 달리 DEDS는 이산사건(discrete event)에 의해 이산순간(discrete instant)에 시스템이 동작된다. 이산사건들은 시스템의 구성요소에서 발생하는 불연속적인 변화를 나타내는 것으로, 그 발생이 이산적이고 비동기적(asynchronous)이라는 것이 특징이다. CVDS의 경우에는 적용할 수 있는 많은

제어 이론들이 발전되어 있는데 반해, DEDS의 경우에는 모델링과 해석에 대한 여러가지 방법들이 제안되어 있으나 아직 일반화되지 못한 상황이다.

따라서 본 논문에서의 연구대상은 산업용 로봇트를 포함하는 조립셀로 한다. 이 로봇틱 조립셀은 FMS의 기본적 구성 단위가 되며, 이에 대한 모델링 및 분석은 FMS 전체를 분석하는 도구로도 이용될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 로봇틱 조립셀을 모델링하고, 시뮬레이션을 통해 동작결과를 분석해 내는 방법을 찾아내고자 한다. 특히 본 논문에서는 주어지는 작업의 변화에 유연하게 동작하는 셀 모델의 유연성과, 잘 알려져 있는 상태변수의 개념에 입각한 모델링 과정의 제시, 시뮬레이션에 의한 모델링의 분석 및 평가에 중점을 둔다. 또한 셀 동작의 결과 분석에 의해 셀의 재설계(redesign)를 위한 자료 도출도 고려해 볼 만한 사항의 하나이다.

2. 문제 설정

2.1 정의

이산사건을 외부원인에 의한 사건과 내부원인에 의한 사건으로 나눈다. 외부원인에 의한 사건은 부품도착과 같이 외부입력에 의해 발생하는 사건이고, 내부원인에 의한 사건은 사전조건들이 만족될 때 발생하는 사건이다. 잡(job)이란 어떤 일련의 공정(process)으로 정의되며, AJT(assembly job tree)는 조립순서의 전후관계(precedence relation), 조립 제약조건, 그리고 조립속도등을 포함하는 미리 결정된 조립순서도로서 정의된다. 이상에서 정의된 것에 부가적으로, 모델링할 목표 시스템은 결정론적(deterministic)이며, 시스템의 상태는 유한하고, 모든 로봇트는 무충돌 모드(collision-free mode)에서 동작된다고 가정한다.

2.2 로봇틱 조립셀의 모델링

하나의 로봇틱 조립셀을 다음과 같이 표현한다.

$$\Sigma : [E, X, \Phi] \quad (1)$$

이때,

E : 사건 집합

X : 상태변수 벡터

Φ : 상태전이 사상 벡터

여기서, 상태변수 벡터 X 와 상태전이 사상 벡터 Φ 는 다음과 같이 표현된다.

$$X = [X_1, X_2, \dots, X_N]^T \quad (2)$$

이때,

X : 상태변수 벡터

$X_i (i=1, 2, \dots, N)$: 정의된 상태변수

N : 정의된 상태변수의 갯수

또한,

$$\Phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]^T \quad (3)$$

이때,

Φ : 상태전이 사상 벡터

$$\phi_i = [h_i, l_i, u_i] \quad (4)$$

이때,

$h_i (i=1, 2, \dots, N)$: X_i 에 대응되는 상태전이 사상

$l_i (i=1, 2, \dots, N)$: 상태전이 시간의 하한값

$u_i (i=1, 2, \dots, N)$: 상태전이 시간의 상한값

상태전이 사상 $h_i (i=1, 2, \dots, N)$ 는 사건이 발생하는 매 순간마다 상태변수 X_i 의 상태전이를 지배하는 사상으로 정의되므로 다음과 같이 표현한다.

$$h_i : [(X \times E) \rightarrow X_i] \quad (5)$$

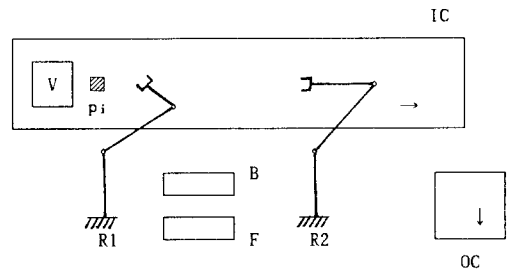
만일 부품의 이름과 도착시간 간격(interarrival time)들을 포함하고 있는 사건 리스트(event list)와 하나의 AJT가 주어진다고 하면, 지정된 셀의 동작을 지배하는 상태전이 사상을 이용하여 로봇트 매니플레이터의 제어입력을 구해낼 수 있어야 한다. 본 논문에서는 상태전이 사상을 일단 도식적으로, 즉 상태 전이도(STD:State Transition Diagram)로 구성하고, 연산자들을 정의하여 도식적 정보를 수식적으로 표현하고자 한다. 이것으로부터 셀의 상태변수 전이에 관련된 모든 정보를 얻어낼 수 있다.

3. 시스템 모델링

3.1 시스템 설정

대상으로 하는 시스템은 하나의 로봇틱 조립셀로서, 두대의 로봇트 매니플레이터(manipulator)와 로봇트 비전(robot vision)시스템, 입력과 출력 컨베이어(conveyor)시스템, 조립순서의 대기장소인 버퍼(buffer), 조립대로서의 픽스처(fixture)로 구성되며, 전체적 구성은 그림 1과 같다.

다음은 셀의 각 구성요소들의 기능을 정의한다. 만일 입의의 부품이 입력 컨베이어에 도착되면, 그 부품에 대한 정보는 로봇트 비전시스템을 통해서 얻어지게 된다. 두대의 로봇트 매니플레이터(R1과 R2)의 역할을 서로 다르게 가정하여 R1은 분류작업(classification job)을, R2는 조립작업(assembly job)을 하도록 한다. 즉 R1은 입력 컨베이어에 입력된 부품을 버퍼로 옮기고 그 부품을 로봇트 비전시스템으로부터의 정보에 따라 분류하여 부품별로 저장시키는 일을 담당하고, R2는 조립순서에 맞는 부품을 버퍼로부터 골



V : 로봇트 비전시스템

P_i : 조립될 부품

R_1, R_2 : 두대의 로봇트

B : 버퍼

F : 픽스처

IC : 입력 컨베이어

OC : 출력 컨베이어

그림 1 하나의 로봇틱 조립셀에 관한 전체 구성도

Fig.1 Overall Configuration of a Robotic Assembly Cell

라서 픽스처로 이동시키며 그 부품을 조립하고, 만일 픽스처에서 하나의 조립품이 완성되면 그 완성품을 출력 컨베이어로 이동시키는 일을 담당한다.

3.2 상태변수의 표현

일반적으로 DEDS에서의 상태변수는 시간과 공간상의 입의의 점에서 시스템 상태에 대응하는 값들을 갖는다. 반면에 본 논문에서는 셀 구성요소들의 상태로 상태변수를 정의한다. 그러므로 그림 1의 대상시스템에서는 주요 역할을 행하는 두개의 로봇트 상태, 즉 R_1 과 R_2 의 상태만을 상태변수로 정의한다. 다른 구성요소인 부품, 버퍼, 입력 컨베이어, 픽스처, 출력 컨베이어도 상태변수로 정의할 수 있으나 문제를 간단히 하기위해 이산사건으로 간주한다. 이산사건중에서도 외부인인에 의한 사건은 사건 리스트로 주어지고, 내부인인에 의한 사건은 상태변수들의 상태전이를 위한 환경 조건 프래그(flag)를 정의하여 이것들의 변화로 주어진다.

상태변수로 정의된 로봇트의 상태도 조직된 셀 구조와 셀 내에서의 로봇트의 기능에 따라서 다양하게 정의될 수 있다. 여기서는 로봇트 상태를 로봇트가 셀 내에서 부품을 처리하기 위해 머무는 장소와, 부품을 파지하거나 조립하는 것과 같은 동작에 따라 구분한다. 로봇트 상태의 전이는 로봇트 이전상태(previous state)의 함수로서 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$X_{i+1} = F_i (X_{in}) \quad (6)$$

이때,

X_{i+1} : 로봇트 i 의 다음상태

X_{in} : 로봇트 i 의 현재상태

한편, 전체 상태변수 벡터는 로봇트의 상태변수만으로 정의하였으므로 다음과 같이 나타낸다.

$$X = [X_1, X_2]^T \quad (7)$$

이때,

X_1 : R1의 상태변수 벡터

X_2 : R2의 상태변수 벡터

여기서, X_1 과 X_2 는 다음과 같이 나타낸다.

$$X_1 = [X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}]^T \quad (8)$$

이때,

X_{11} : 준비 상태(ready state)

X_{12} : 파지 준비 상태(gripping- ready state)

X_{13} : 파지 상태(gripping state)

X_{14} : 버퍼내 상태(in-buffer state)

또한,

$$X_2 = [X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}]^T \quad (9)$$

이때,

X_{21} : 준비 상태(ready state)

X_{22} : 버퍼내 상태(in-buffer state)

X_{23} : 픽스쳐내 상태(in-fixture state)

X_{24} : 조립 상태(assembly state)

X_{25} : 출력 컨베이어 상태(output conveyor state)

위에서 정의한 상태변수들 사이의 상태전이를 다음의 식 (10)과 같이 보다 구체적으로 표현할 수 있다.

$$X_{i+1} = M \cdot X_i \quad (10)$$

이때, M 은 $n \times n$ 행렬로 다음과 같이 표현된다.

$$M = [m_{ij}] \quad (11)$$

$$m_{ij} = \begin{cases} 0 & : i \text{에서 } j \text{로의 전이가 없는 경우} \\ 1 & : i \text{에서 } j \text{로의 자동상태전이가 있는 경우} \\ & \text{또는 사고가 발생하지 않은 전이의 경우} \\ -1 & : \text{사고가 발생한 전이의 경우} \end{cases}$$

3.3 상태전이도

정의된 상태들이 STD에서는 노드로 표현되고, 두 상태사이의 경로는 상태전이를 나타내 주는 링크로 표현된다. 여기서, 상태전이는 정해진 조건이 만족될 때 발생하는 사건에 의해 유발된다. R1의 경우 로봇트 상태들 사이의 관계를 고려하면 그림 2의 STD를 얻어낼 수 있다. L_{1i} ($i=1, \dots, 6$)는 R1의 상태전이를 위한 링크조건으로 다음과 같이 자세하게 설명될 수 있다

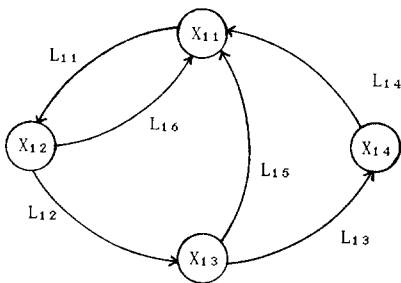


그림 2 로봇트 R1에 관한 STD
Fig.2 The STD for Robot1

L_{11} : 만일 하나의 부품이 입력 컨베이어에 도착하였으나, 아직 비전 프로세싱이 끝나지 않았다면.

L_{12} : 만일 로봇트 비전 시스템에 의하여 인식이 실패하지 않는다면.

L_{13} : 만일 파악이 실패하지 않는다면.

L_{14} : 자동 상태전이.

L_{15} : 만일 파지사고가 발생한다면.

L_{16} : 만일 인식사고가 발생한다면.

R2의 경우에도 R1에서와 같은 방법으로 STD를 구성할 수 있다.

3.4 연산자(operators)의 정의

상태전이 사상 h_i 를 하나의 프로세스(process)로 다음과 같이 표현한다.

$$P := X_i \xrightarrow{\sigma} X_i' \quad (12)$$

즉, 프로세스 P 는 E 의 한 원소인 σ 라는 사건에 의해 X_i 에서 X_i' 로의 전이가 발생하는 것을 나타낸다. 이것을 이용하여, 상태변수들의 상태전이를 보다 수식적으로 표현하기 위한 몇가지의 연산자를 정의한다. 우선 접두 연산자(prefix operator)는 다음과 같이 정의한다.

$$Q := \sigma \rightarrow P \quad (13)$$

즉 Q 는 초기상태에서부터 시작하여 사건 σ 에 의해 P 라는 프로세스를 수행하는 것을 나타낸다. 다음에는 선택 연산자(alternative operator)를 나누어 정의한다.

$$Q := Q_1 + Q_2 = (\sigma_1 \rightarrow P_1) + (\sigma_2 \rightarrow P_2) \quad (14)$$

위의 식 (14)는 제어가 가능한 선택 연산자를 나타내는데 초기사건(initial event)은 환경에 의해 결정된다.

$$Q := Q_1 \cdot Q_2 = (\sigma \rightarrow P_1) \cdot (\sigma \rightarrow P_2) \quad (15)$$

식 (15)는 제어가 불가능한 선택 연산자를 나타내는데 초기 사건은 비결정적(nondeterministic)이다. 여기서, 대상시스템이 결정론적이기 때문에 제어가능한 선택 연산자만으로도 표현할 수 있다. 이렇게 정의된 연산자를 이용하여 R1의 STD를 수식적으로 나타낼 수 있다. 예를 들어 X_{12} 에서의 프로세스를 X_{12} 라고 하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$X_{12} = (\sigma_1 \rightarrow X_{13}) + (\sigma_2 \rightarrow X_{11}) \quad (16)$$

이때, σ_1 은 L_{12} 를 만족하는 사건, 즉 로봇트 비전시스템에 의하여 인식이 실패하지 않는 경우를 의미하고, σ_2 는 L_{16} 를 만족하는 사건, 즉 인식사고가 발생한 경우를 의미한다.

4. 시뮬레이션

4.1 알고리즘

다음은 셀의 동작을 시뮬레이션해 주며, 셀의 성능을 평가하기 위한 통계자료들을 수집해 주는 알고리즘이다.

입력 : AJT, 사건 리스트

출력 : 로봇트에 대한 동작 전략(operating strategy)의 결정

- [1단계] 초기화(initialization):
단위시간 계수기, 상태변수, 분석변수, 환경조건 플래그 등을 초기화함. 사건 리스트와 AJT를 입력 시킴.
- [2단계] 외부원인에 의한 사건과 관련된 상태 플래그의 값을 설정함.:
단위시간 계수기 값을 1 만큼 증가시킴. 사건 리스트와 AJT를 고려하여 환경조건 플래그 값을 설정함.
- [3단계] 내부원인에 의한 사건과 관련된 상태 플래그의 값을 최신화함.:
환경조건 정보에 따라서 매 단위시간마다 현재의 환경조건 플래그를 최신화함.
- [4단계] 셀내에 있는 로봇 매니플레이터에 대한 결정변수의 값을 설정함.:
셀의 현재 상태와 조립 진도를 고려하여, 로봇에 대한 동작전략을 위한 결정을 내림.
- [5단계] 상태변수를 최신화함.:
상태변수간의 관계식을 이용하여 새로운 상태변수를 구성함.
- [6단계] 부여된 작업의 완료 여부를 점검함.:
만일 완성된 조립품의 개수가 필요한 생산품의 개수와 일치한다면, 다음 단계로 계속; 그렇지않다면, 제 2 단계로 돌아감.
- [7단계] 통계자료를 계산함.:
생산시간(production time), WIP(work-in-process) 정보, 부품 대기 시간, 로봇트 무위시간(robot idling time)등을 얻어냄.

알고리즘 종료

4.2 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션은 IBM-PC에서 GCLISP으로 수행되며, 무사고 모드(failure-free mode)에서 동작된다. 임의의 AJT가 부여되고, 부품 도착 정보로서 사건 리스트가 주어질때, 시뮬레이션을 통해서 시뮬레이션 진행상의 통계자료들을 얻어낼 수 있다. 시뮬레이션을 위한 입력변수는 크게 경영관리(policy) 입력변수와 비경영관리(non-policy) 입력변수로 구분될 수 있다. 경영관리 입력변수에는 버퍼 서비스 규칙(buffer service discipline), AJT, 필요한 완성품의 갯수 등이 있으며, 비경영관리 입력변수에는 부품의 도착시간 간격, 로봇트의 속도, 노드사이 진행시간등이 있다. 본 시뮬레이션에서는 버퍼 서비스 규칙을 FCFS(first come first service)로 하고, 여러가지 종류의 사건 리스트들이 시스템 분석을 위해 이용되며, 조립부품의 갯수나 조립시간의 비율도 변화시켜 분석한다.

셀 운영에 대한 성능척도로서는 총생산시간(TPT:Total Production Time), 평균생산시간(APT:Average Production Time), 평균대기시간(AWT:Average Waiting Time), 평균 WIP

(AWIP:Average Work-In-Process), 로봇트 무위비율(RIR: Robot Idling Ratio), 필요버퍼크기(RBS:Required Buffer Size), 생산율(Throughput)등이 고려된다. 여기서, TPT는 필요한 완성품을 생산하는데 소요되는 전체시간을 나타내고, APT는 단위 생산품을 완성하는데 소요되는 평균 생산시간을 나타내며, AWT는 버퍼내에서 단위부품이 대기하는 평균시간을 의미한다. 또한, AWIP는 단위부품이 프로세스 내에 존재하는 평균시간을 나타내고, RIR는 TPT에 대한 로봇트 무위시간의 백분율이며, RBS는 필요한 버퍼의 최소크기를 나타내고, Throughput은 단위시간당 완성된 생산품의 평균갯수를 나타낸다.

4.3 시뮬레이션 결과

우선 AJT1(A→B→C)이 목표 작업으로 부여되고 두 로봇트의 속도가 고정될 때, 다양한 부품의 도착시간 간격의 변화에 따른 성능척도의 변화를 비교하였다. R1과 R2의 속도비는 [1:3]으로, R1의 속도는 최고값으로 고정되어 있다고 가정한다. 세 부품의 조립시간 비율은 [1:2:2]로 가정하고, 부품의 도달 순서는 조립 순서에 맞는 순서라고 가정하며, 필요한 완성품의 갯수는 3개라고 놓는다. 표 1은 부품의 도착시간 간격의 변화에 따른 여러 성능척도의 변화를 보여준다. 결과적으로, 주어진 환경하에서 셀의 운영에 가장 효율적인 부품의 도착시간 간격과 필요한 버퍼 크기를 현명하게 선택할 수 있다.

표 1 부품 도착시간 간격의 변화에 따른 성능척도의 비교
Table 1 Comparison of Performance Measures according to the Variation of Interarrival Time

| Time | APT | AWT | AWIP | RIR1 | RIR2 | RBS | Throughput |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|------------|
| 9 | 39.67 | 22.00 | 33.11 | 62.18 | 5.88 | 3 | 0.0252 |
| 10 | 40.00 | 18.22 | 29.33 | 62.50 | 6.67 | 3 | 0.0250 |
| 11 | 39.33 | 13.33 | 24.44 | 61.86 | 5.08 | 2 | 0.0254 |
| 12 | 39.00 | 8.89 | 20.00 | 61.54 | 4.27 | 1 | 0.0256 |
| 13 | 39.33 | 5.22 | 16.33 | 61.86 | 5.08 | 1 | 0.0254 |
| 14 | 42.00 | 5.00 | 16.11 | 64.29 | 11.11 | 1 | 0.0238 |
| 15 | 44.67 | 5.00 | 16.11 | 66.42 | 16.42 | 1 | 0.0224 |

두번째로는 AJT1이 부여되고 로봇트 R1의 속도가 고정될 때, 여러가지 부품의 도착시간 간격과 로봇트 R2의 속도변화에 따른 성능척도의 변화를 비교하였다. 즉 R1의 속도는 최고값으로 고정되어 있다고 가정하며, R2의 속도는 최고속도의 100, 50, 33, 25, 20%의 5가지로 나누어, 부품의 도착시간 간격의 변화에 따른 Throughput의 변화를 그림 3에서 보여준다. R2의 속도가 최고속도의 33% 이하에서 운전될 경우에는 조립작업에 소요되는 시간이 길어지므로 부품의 도착시간 간격이 10미만일 때 보다 10이상일 때 더 좋은 Throughput을 나타냄을 볼 수 있다. 그러나 너무 긴 부품 도착시간 간격은 Throughput의 감소를 가져올 것이다.

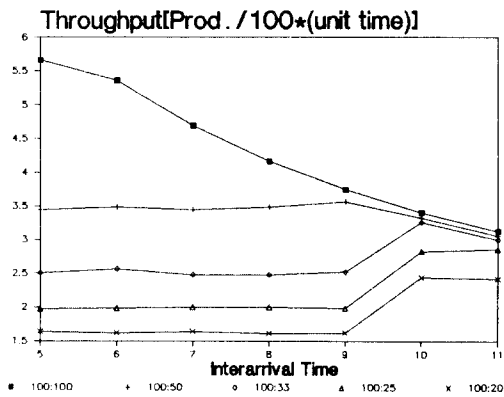


그림 3 R2 속도 및 부품 도착시간 간격의 변화에 따른 TPT
Fig.3 TPT with the Variation of Interarrival Time and Speed of Robot

마지막으로 완성품을 만드는데 필요한 부품의 갯수가 3개 일 때부터 6개일 때까지의 4가지 AJT에 대하여, 부품의 도착시간 간격의 변화에 따른 성능척도의 변화를 비교하였다. 4가지 AJT에서 조립시간 비율은 각 부품마다 동일한 것으로 가정하고, 사건 리스트의 부품도착 순서는 조립순서에 맞는 순서라고 가정하며, 두 로봇의 속도는 최고값으로 고정시킨다. 부품수의 갯수를 달리하여 부품의 도착시간 간격의 변화에 따른 Throughput의 변화를 그림 4에서 보여준다. 부품수가 증가할수록 부품의 도착시간 간격의 변화에 따른 Throughput의 변화가 감소함을 볼 수 있다. 즉, 하나의 완성품에 필요한 부품의 수가 증가할수록 입력변수의 변화가 Throughput에 미치는 영향이 감소함을 알 수 있다.

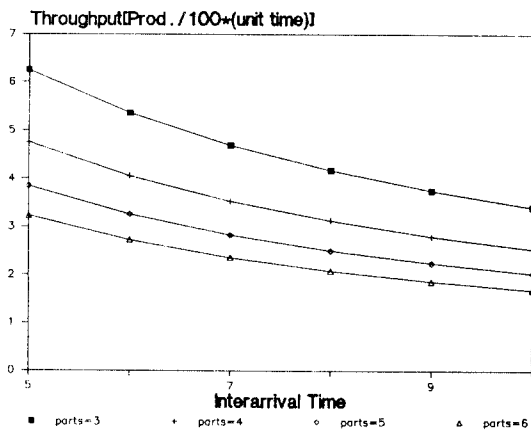


그림 4 다양한 AJT가 부여될 때의 Throughput
Fig.4 Throughput for the Various AJTs Assigned

셀의 하드웨어적 형상을 포함한 셀 환경이 주어지고, 조립작업이 부여될 때 실제로 셀을 동작시켜 보기 전에 동작 결과를 파악할 수 있다는 것은 셀 운영의 효율면에서 매우 바람직한 일일 것이다. 특히 여러가지 입력변수의 변화에 따른 성능척도의 변화를 분석한다는 것은 결국, 시뮬레이션

을 통하여 셀의 동작 결과를 귀환시켜 입력 조건을 바꾸어 줄 수 있음을 의미하며, 셀 설계 및 운영의 문제를 다룰 수 있는 하나의 도구 역할을 수행할 수 있음을 의미한다.

5. 결론

본 논문에서는 상태변수 개념에 기초를 둔 로보틱 조립셀을 모델링하는 방법, 셀의 동작을 관리하는 방법, 시뮬레이션으로 셀을 분석하는 방법을 제시하였다. 특히, 외부로부터 주어지는 작업의 변화에 유연하게 동작되는 모델을 설계하였고, 실제로 셀의 동작을 시뮬레이션해 보고 주어진 환경에 따른 동작결과를 분석하였다. 따라서 보다 일반적인 경우로 확장하여 시스템에의 적응성을 높임으로써 FMS의 장점을 최대화할 수 있다.

참 고 문 헌

- [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. Automat. Contr.*, Vol. AC-32, pp.563-572, 1987.
- [3] Y.C.Ho, "Scanning the Issue," *Proc. of the IEEE*, pp.3-6, Jan. 1989.
- [4] J.L.Peterson, *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Prentice-Hall, Inc., 1981.
- [5] R.Valette, M.Courvoisier, D.Mayeux, "Control of flexible production systems and Petri Nets," 3rd European Workshop on Appl. and Theory of Petri Nets, Varenna, Italy, September 1982.
- [6] M.Kamath, N.Viswanadham, "Application of Petri Net based models in the modelling and analysis of flexible manufacturing systems," *Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.312-317, 1986.
- [7] D.Dubois, K.E.Stecke, "Using Petri nets to represent production processes," *Proc. 22nd IEEE Conf. Decision and Control* pp. 1062-1067, December 1983.
- [8] N.Viswanadham, 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, Bruce H.Krogh, "Models for simulation and discrete control of manufacturing systems," *Proc. of the 1986 IEEE Int. Conf. on*

Robotics and Automation, pp.305-310, 1986.

- [10] J.E.Hopcroft and J.D.Ullman. Introduction to Automata Theory Languages and Computation. Addison-Wesley Pub. Com., 1979.
- [11] F.R.Preparata and R.T.Yeh. Introduction to Discrete Structures. Addison-Wesley Pub. Com., 1973.
- [12] Robert L. Aveyard, "A Boolean model for a class of discrete event system," IEEE Trans. on System, Man, Cybernetics, Vol. SMC-4, No. 3, May, 1974.
- [13] David D.Yao, J.A.Buzacott. "Modelling the performance of flexible manufacturing systems." Int. J. Prod. Res., Vol.23, No.5, pp.945-959, 1985.
- [14] Ricardo F.Garzia et al., "Discrete Event Simulation," IEEE Spectrum, pp.32-36, 1986.
- [15] X.R.Cao and Y.C.Ho, " Estimating the Sojourn Time Sensitivity in Queueing Networks Using Perturbation Analysis," J. Optimization Theory and Applications, Vol.53, No.3, Jun. 1987.
- [16] H.Matsuo, J.S.Shang, R.S.Sullivan. "A Knowledge-Based System for Stacker Crane Control in a Manufacturing Environment." IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Vol.SMC-19, pp.932-945, 1989.
- [17] David H.Ben-Arieh, Colin L.Moodie, Chi-Chung Chu. "Control Methodology for FMS," IEEE Journ. of Robotics and Automation, Vol.4, No.1, pp.53-59, Feb. 1988.
- [18] A.Kusiak, A.Villa. "Architectures of expert systems for scheduling flexible manufacturing systems," Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.113-117, 1987.
- [19] A.C.Kak, K.L.Boyer, C.H.Chen, R.J.Safranek, H.S.Yang. "A Knowledge-Based Robotic Assembly Cell," IEEE Expert, pp.63-83, Spring, 1986.
- [20] J.S.Hawker, R.N.Nagel, "World Models in Intelligent Control Systems," Proc. of the 1987 IEEE Conf. on Intelligent Control, pp.482-488, 1987.
- [21] Dae-Won Kim, Myoung-Sam Ko, Bum-Hee Lee. "An Approach to Modelling for Operation Management of Robotic Assembly Cells through Knowledge Base," Proc. of the 28th SICE Annual Conf., Vol.II, 961-964, Matsuyama, Japan, 1989.