

불확실한 환경에서의 조립 작업을 위한 온라인 모델링 방법

On-line Modeling of Robot Assembly with Uncertainties

정성엽, 황면중, 이두용*
(Seong Youb Chung, Myun Joong Hwang, and Doo Yong Lee)

Abstract : Uncertainties are inevitable in robotic assembly in unstructured environment since it is difficult to construct fixtures to guide motions of robots. This paper proposes an augmented Petri net and an algorithm to adapt the assembly model on-line during actual assembly process. The augmented Petri net identifies events using force and position information simultaneously. Unmodeled contact states are identified and incorporated into the model on-line. The proposed method increases the level of intelligence of the robot system by enhancing the autonomy. The proposed method is evaluated by simulation and experiments with L-type peg-in-hole assembly using a two-arm robot system.

Keywords : multi-robot system, on-line modeling, augmented Petri net, uncertainty.

I. 서론

해저나 우주 환경과 같이 고정구를 설치할 수 없는 비구성 환경에서는 둘 이상의 로봇 팔을 이용하여 작업을 수행하는 것이 효과적이다. 최근에는 인간형 로봇의 두 팔을 이용한 작업에 대한 연구도 증가하고 있다. 고정구가 없는 작업에서는 센서 값의 오차, 작업 대상 물체의 기하학적인 오차, 로봇의 상대 위치 오차 등 많은 불확실성이 존재하기 때문에, 단순한 위치 제어 만으로는 작업을 완수하기 어렵다. 특히, 비구성 환경에서의 조립 작업은 물체의 이동과 물체 간의 접촉을 동시에 고려하고 제어 한다는 점에서 좀 더 높은 지능을 요구한다.

조립 작업의 불확실성을 극복하는 수동적 방법으로서 위치제어와 더불어 RCC(Remote Center Compliance) 장치를 이용하여 보정하는 방법이 개발되었다[1]. 그러나, 불확실성이 큰 경우에는 수동적 방법은 막힘(jamming)이나 썩기(wedging)와 같은 오류를 완전히 피할 수 없다. 따라서, 힘 및 위치 정보를 보다 적극적으로 이용하여 상황을 능동적으로 제어하는 방법들이 연구되고 있다[2,3]. 이러한 능동적인 방법은 전체 조립의 과정을 세부 조립 상태의 변화로 모델화하고, 각 세부 상태에 따라 적절한 제어 명령을 적용하여 점차적으로 목적 상태에 도달하도록 한다. 따라서, 불확실성이 큰 경우에도 현재 상태를 인지할 수 있을 경우에는 새로운 경로를 계획하여 능동적으로 오류에 대처할 수 있다[4,5].

보다 능동적인 로봇 작업을 위해서 지능제어 방법이 적용되었다. Skubic과 Volz[6]는 퍼지이론(Fuzzy theory)을 이용하여 조립 상태를 판별하는 방법을 제안하였다. 그러나, 이 접근 방법은 로봇이 같은 작업을 반복적으로 수행하는 경우에는 효과적이지만 새로운 환경과 작업을 만났을 경우에는 다시 많은 학습을 해야 한다. 로봇이 스스로 작업을 모델화하면서 새로운 작업을 수행할 수 있는 능력을 갖게 되면 이러한 어

려움을 극복할 수 있다. Huber[7]는 새로운 작업 대상과 환경에 적응할 수 있도록 강화학습(Rcinforcement learning)과 이산 이벤트시스템 관리자(Discrete event system supervisor)의 개념을 적용한 온라인 학습 방법을 제안하였다. 이 방법은 매우 적은 개수의 상태로 표현 가능한 작업에만 적용이 가능하고, 상태를 확장 시키는 것이 불가능하기 때문에 복잡한 작업에는 적용할 수 없다. 본 논문에서는 로봇이 스스로 새로운 상태를 판별을 하고 판별된 상태를 모델화 시킴으로써 작업 대상이 바뀌거나 사전에 고려하지 못한 상황에 도달했을 경우에도 작업을 완성시킬 수 있는 모델화 및 제어 방법을 제안한다.

조립 상태 및 관계 변화를 나타내는 이산이벤트(Discrete event) 모델은 부품의 기하학적인 정보를 이용하기 때문에, 오차가 큰 경우나 부품이 복잡한 경우에는 생각하지 못한 조립 상태 및 이벤트가 발생할 수 있다. 이런 경우에는 조립 상태 및 이벤트 모델을 수정하고 조립 작업을 다시 수행해야 한다. 이 문제를 해결하기 위해서, 작업 도중에 새롭게 나타난 조립 상태 및 이벤트 모델을 온라인에서 기존 모델에 통합시킬 수 있는 방법이 필요하다. 또한, 이 방법은 반복적인 조립 작업을 통해서 필요 없는 모델 부분은 제거하여 최적 모델을 만들 수 있어야 한다.

일반적으로 조립 상태를 알아내기 위해서 위치 센서 및 힘 센서가 이용된다. 비 접촉 센서인 위치 센서는 로봇의 기하 및 센서 분해능 오차로 인하여 접촉 상태가 변화할 때 정확한 위치 변화를 나타낼 수 없지만 오차의 범위가 정해져 있다는 특징을 가지고 있다. 반면에 접촉 센서인 힘 센서는 직접적인 접촉으로 인해 외란이 많은 반면, 접촉 상태가 발생하는 시점을 정확히 찾을 수 있다. 따라서, 두 가지 센서 정보를 동시에 이용할 경우 상태를 보다 정확하게 판별할 수 있다[8]. 지금까지는 이러한 센서 정보들을 모델화에 효과적으로 적용하는 방법에 관한 연구가 많지 않다.

McCarragher[5]는 불확실성이 존재하는 조립 작업에 대해 페트리넷(Petri net)을 이용한 모델화 및 제어 방법을 제안하였다. 여기서는 두 개의 위상 요소(Topological element), 즉 꼭지점과 모서리 사이의 관계로 조립 상태를 정의하였다. 그러나

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2004. 5. 31., 채택확정 : 2004. 8. 31.

정성엽, 황면중, 이두용 : 한국과학기술원 기계공학과

(csy@kaist.ac.kr/hwangmj@kaist.ac.kr/lee.dooyong@kaist.ac.kr)

이 연구에서는 페트리넷이 조립 상태 모델화 및 판별에 효과적으로 이용될 수 있다는 것을 고려하지 않았다.

조립 상태와 이벤트 관계를 나타내는 조립 상태도는 조립 작업의 계획, 제어 및 판별에 매우 중요하다. 일반적으로 조립 상태도를 구하기 위해서는 형태 공간(Configuration space) 상에서 형태 공간 장애물(Configuration space obstacle)을 조사해야만 한다. 형태 공간은 부품의 자세(Posture)를 결정하는 변수로 이루어진 공간을 의미하며, 형태 공간 장애물은 부품의 간섭에 의해서 부품의 자세가 제한되는 것을 형태 공간 상에서 나타낸 것이다[9]. 따라서, 부품의 접촉 상태는 형태 공간 장애물이 만드는 구역과 자유 공간의 경계선 상에서 결정된다. 즉 경계선 점들의 부분 집합을 B라고 하고, B에 속한 점들이 연속하면서 미분 가능할 때, B를 이루는 점들을 하나의 접촉 상태로 모델화 할 수 있다. 그러나, 이러한 형태 공간 장애물을 구하기 위한 계산이 매우 복잡하여, 일반적인 부품에 대해 분석적인(Analytic) 방법이 아직 보고되지 않았다. 따라서, 접촉 상태를 구하기 위해 일반적으로 사용되는 방법은, 하나의 접촉 상태에서 이웃한 접촉 상태를 구하는 방식으로서, 접촉 상태 그래프를 확장하는 방식이다. Xiao 등 [10]은 임의의 접촉 상태에 포함된 한 점으로부터 같은 접촉 상태를 유지하며 극소한(Infinitesimal) 운동을 부품에 적용하여 새로운 접촉 상태를 찾는 방법으로 접촉 상태도를 자동적으로 만드는 방법을 제안하였다. Hirai[11]는 기본적인 접촉을 나타내는 방정식을 에너지 형태로 표현하여 기본적인 접촉의 조합에 대해 에너지 최소화 방식을 통해서 접촉 상태를 구하는 방식을 제안하였다. 그러나, 이러한 방법들 역시 많은 계산을 필요로 한다는 문제점이 있으며, 기하학적 정보에서 정확하지 않은 부분으로 인해서 모델화 되지 않은 상황이 발생할 수 있다. 또한, 모든 가능한 상황을 고려하기 때문에 실제 조립 작업에는 불필요한 많은 정보가 포함되게 된다.

본 논문에서는 조립 상태를 효율적으로 제어하고, 위치와 힘 정보를 동시에 이용하여 상태를 판별하는데 적합한 확장된 페트리넷(Augmented Petri net)을 제안한다. 또한 확장된 페트리넷에 기초하여 불확실성이 큰 경우에 대해 온라인에서 조립 상태 및 이벤트 모델을 능동적으로 수정하고 확장하는 알고리즘을 제안한다.

제안된 방법은 L 모양의 픽업홀 조립 작업에 대한 시뮬레이션 및 실험을 통해서 검증되었다. 실험은 5자유도 로봇과 6자유도 로봇으로 이루어진 두 팔 로봇 시스템을 사용하여 수행했다.

II. 확장된 페트리넷

이산이벤트 모델은 로봇의 조립 작업을 조립 상태와 각 상태들 사이의 관계 변화인 이벤트로 모델화 한다. 따라서, 조립 상태를 적절하게 정의하고, 이벤트를 판별할 수 있는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 우선 2차원 평면 상에서 다각형(Polygon) 형태의 조립 작업을 대상으로 방법을 제안한다. 제안된 방법은 3차원 공간으로 일반화 할 수 있다.

기본 접촉(Primitive contact)을 꼭지점, 모서리, 면 등 두 개의 위상 요소들의 관계로 나타내면 조립 상태는 기본 접촉들의 조합으로 나타낼 수 있고 이것의 변화가 이벤트가 된다.

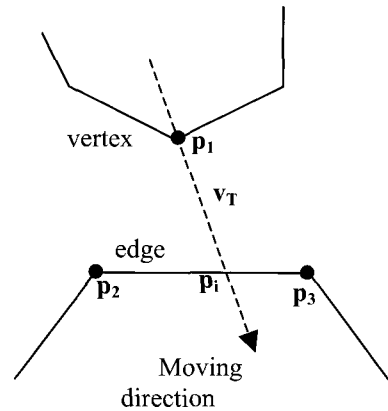


그림 1. 직선 변위. Fig. 1. Translational displacement.

부품의 접촉을 알아내는 간단한 방법은 두 부품 사이의 거리를 이용하는 것이다. 두 부품 간의 거리가 0이라는 것은 접촉이 발생했다는 것을 의미하기 때문에 쉽게 접촉을 판별할 수 있다. 본 논문에서는 기본적 변위(Primitive displacement)를 정의하여 사용한다.

기본적 변위는 기본 접촉을 이루는 두 요소들 사이의 거리로 정의한다. 이것은 Astuti와 McCarragher[12]가 제안한 거리 함수 개념을 확장한 것이다. 기본적 변위는 부품의 운동에 따라 크게 직선 변위와 회전 변위로 나눌 수 있다.

직선 변위는 이동 방향에 따른 꼭지점과 모서리 사이의 거리이다. 그림 1은 꼭지점 p1이 vT 방향으로 이동할 때 p2와 p3로 이루어진 모서리를 만나는 경우이다.

vT를 단위벡터라 하면 꼭지점과 모서리가 만나는 점, pi는 직선 변위 δT를 이용하여 (1)과 같이 나타낼 수 있다. pi는 p2와 p3사이의 직선상에 있기 때문에 (2)와 같이 (p3-p2)와 (pi-p2)의 벡터 곱은 0이 된다.

$$p_i = p_1 + \delta_T v_T \tag{1}$$

$$(p_3 - p_2) \times (p_i - p_2) = 0 \tag{2}$$

(1)에서 구한 pi를 (2)에 대입한 후 정리하면 δT는 (3)과 같다. 만약 꼭지점이 모서리와 만나지 않는 경우, 변위는 p1과 p2사이의 거리와 p1과 p3사이의 거리 중에서 더 작은 값으로 정한다.

$$\delta_T = \frac{\|(p_2 - p_1) \times (p_3 - p_2)\|}{\|v_T \times (p_3 - p_2)\|} \tag{3}$$

그림 2는 꼭지점 p1이 pc를 중심으로 회전하며 운동하는 경우이다. 회전 변위는 회전 방향 vR 방향으로 꼭지점이 모서리까지 도달할 때 이동한 거리로 정의한다. 회전 중심 pc에서부터 꼭지점 p1까지의 벡터를 rmov, pc에서부터 아크와 모서리의 교점 pi까지의 벡터를 rfix라 한다. 회전 변위 δR은 (4)와 같이 rmov와 rfix사이의 각도에 반지름 ||rmov||를 곱한 값이 된다. 만약 pi가 모서리와 만나지 않는 경우, 회전 변위는 앞의 직선 변위와 같은 방법으로 정의된다.

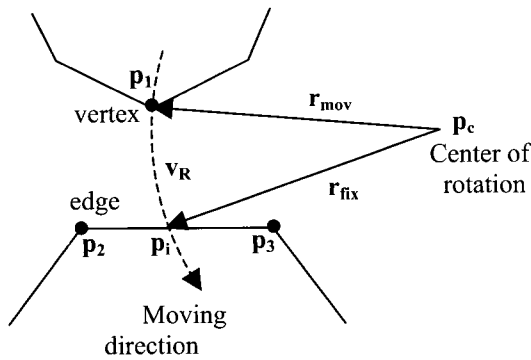


그림 2. 회전 변위.
Fig. 2. Rotational displacement.

$$\delta_R = \cos^{-1} \left(\frac{\mathbf{r}_{mov} \cdot \mathbf{r}_{fix}}{\|\mathbf{r}_{mov}\| \|\mathbf{r}_{fix}\|} \right) \|\mathbf{r}_{mov}\| \quad (4)$$

확장된 페트리넷(Augmented Petri net)은 (P, T, I, O, M₀, PD, δ)의 7개의 요소로 정의한다. 각 요소가 의미하는 바는 다음과 같다. P는 한정된 수의 플레이스(Place)의 집합으로, 페트리넷 모델에 사용된 기본적 접촉을 의미하며, T는 한정된 수의 트랜지션(Transition)의 집합으로, 접촉 상태의 변화를 나타낸다. I와 O는 입출력 함수로, 트랜지션의 입력 조건 및 출력 결과를 나타낸다. M₀는 페트리넷의 초기 마킹(Marking) 즉, 초기 접촉 상태를 의미한다. PD는 조립하는 부품 사이에서 정의 가능한 기본적 변위의 집합을 나타내며, δ는 트랜지션의 출력 함수에 기본적 변위를 할당하는 함수를 의미한다.

플레이스 p_i에 있는 토큰(Token)은 해당하는 접촉이 발생했다는 것을 의미한다. 따라서 플레이스 p_i의 토큰의 개수는 한 개를 넘지 않는다. 또한, 접촉 상태는 토큰을 가진 플레이스로 표현되고 이것을 마킹이라고 한다. 페트리넷에서 상태의 변화는 토큰의 이동으로 나타나게 된다. 트랜지션의 모든 입력 플레이스가 토큰을 가지고 있으면 해당하는 트랜지션이 발생 가능한 상황이다. (5), (6)은 각각 트랜지션 t_i의 발생 가능한 조건과 그것이 발생한 다음의 결과이다. 수식에서 μ(p_j)는 플레이스 p_j의 토큰의 개수이다. *t_i와 t_i*는 각각 트랜지션 t_i의 입력과 출력 플레이스의 집합이다. 이러한 원리에 따라 조립 작업을 페트리넷 모델의 진화과정을 이용하여 나타낼 수 있다[13].

$$\mu(p_j) = 1, \text{ for } \forall p_j \in \bullet t_i \quad (5)$$

$$\mu(p_j) = \begin{cases} 1, & \text{for } \forall p_j \in t_i^* \\ 0, & \text{for } \forall p_j \in (\bullet t_i - t_i^*) \end{cases} \quad (6)$$

기본적 변위는 기본 접촉을 이루는 요소들 사이의 직선거리로 정의한다. 따라서 거리가 0인 경우는 해당하는 기본 접촉이 발생한 것이다. 확장된 페트리넷에서 기본적 변위 δ는 출력 함수로 연결되고 조립 상태를 변화시키기 위한 비용은 출력 함수로부터 계산될 수 있다. 이러한 구조에서 (7)과 같이 출력 함수의 최대값이 주어진 위치 오차의 범위 ε보다 작

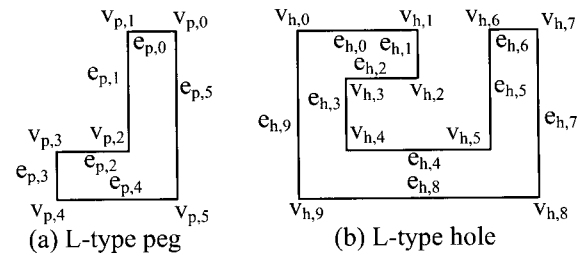


그림 3. L 펙인홀의 기호 표현.
Fig. 3. Symbolic representation of L-type peg and hole.

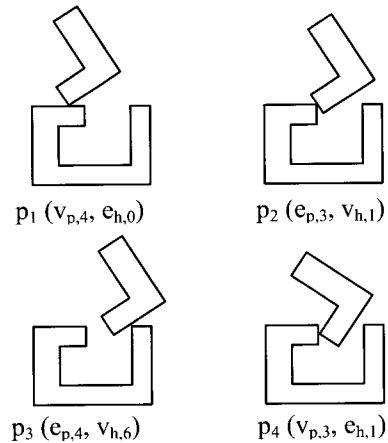


그림 4. 플레이스의 예.
Fig. 4. Example of places.

고 힘과 모멘트 템플릿(Template)이 센서의 신호와 일치 할 경우 발생 가능한 트랜지션이 실행된다. 출력 함수에 할당되어 있는 기본적 변위의 최소 값은 이벤트를 발생시키기 위한 이동 거리가 되기 때문에 해당 트랜지션을 발생시키기 위한 비용이 된다.

$$\max(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n) \leq \epsilon, \quad n = |\mathbf{O}(t)| \quad (7)$$

평면 L 펙인홀의 조립은 그림 3과 같이 기호로 표현 할 수 있다. 그림에서 e와 v는 각각 모서리와 꼭지점을 나타내고 p와 h는 각각 펙과 홀을 의미한다.

기본 접촉을 그림 4와 같이 네 개의 플레이스 p₁, p₂, p₃, p₄로 정의할 때, 기본 접촉의 변화 관계를 고려하여 그림 5와 같이 확장된 페트리넷 모델을 구할 수 있다. 여기서 δ_i는 트랜지션 i와 출력 플레이스 j에 해당하는 기본적 변위를 의미한다. 조립 상태와 이벤트를 나타내는 조립 상태도는 그림 6과 같이 페트리넷 모델의 진화 과정으로부터 얻을 수 있다. 상태도의 노드는 조립 상태이고 아크는 이벤트를 의미한다. 하나의 조립 상태는 {p₂, p₃}와 같이 기본 접촉의 집합으로 표현한다.

그림 7은 앞의 예제에 대한 간단한 실험 결과이다. 실험은 두 대의 매니플레이터를 이용하여 한 대는 펙을 이동하고 나머지 한 대는 홀을 쥐고 정지해 있는 상태에서 접촉을 발생시켜 접촉 상태 {p₁}을 생성한다. 그 후에, 트랜지션 t₁과 t₄를 생성하기 위한 모션을 적용한다. 실험 결과를 보기 위해, 실험

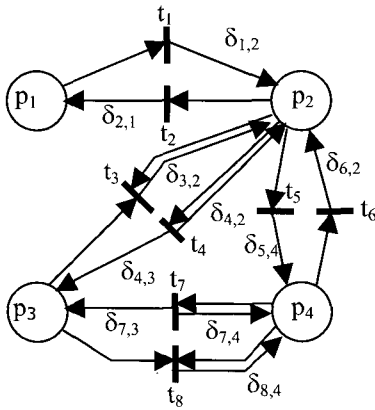


그림 5. 페트리넷 모델.
Fig. 5. Part of Petri net model of L-type peg and hole.

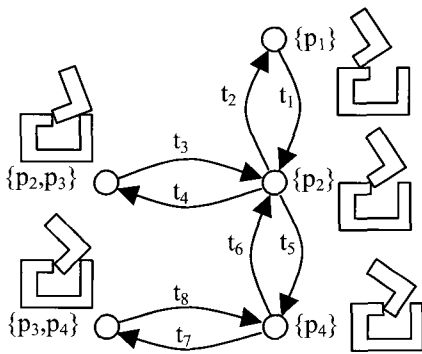


그림 6. 페트리넷 모델의 조립 상태도.
Fig. 6. Contact state diagram of the Petri net model.

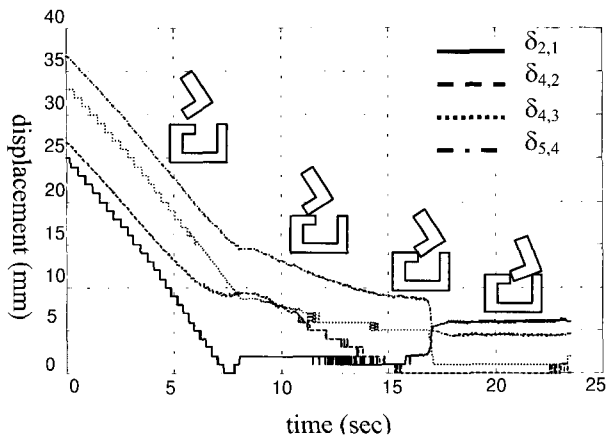


그림 7. 4개의 기본 접촉에 대한 변위.
Fig. 7. Displacement profiles of four primitive contacts.

도중 센서 정보를 이용해서 각 트랜지션의 출력 함수에 할당되어 있는 기본적 변위를 계산하여 저장하였다. 실험은 t_4 가 발생한 시점에서 종료한다. 트랜지션 t_1 과 t_4 를 만들기 위한 운동은 사전에 결정하였으며, 위치에 기반한 힘 제어 방식이 이용되었다. 즉, 접촉면에 수직인 방향을 힘 센서로 읽어 접촉 힘을 일정하게 유지하도록 수직 방향의 움직임을 결정하

표 1. 상태 $\{p_2\}$ 로부터 변화할 때의 기본적 변위.

Table 1. Displacements at change of the state $\{p_2\}$.

Enabled transitions	Displacements of output functions	Maximum
t_2	$\delta_{2,1}$	5.55
t_4	$\delta_{4,2}, \delta_{4,3}$	1.00
t_5	$\delta_{5,4}$	4.87

고, 수평 방향의 움직임을 각 트랜지션이 생성되는 방향으로 결정하여 매 순간 위치 명령을 만들어 내어 실험을 수행하였다. 그림 7에서 4개의 프로파일은 기본 접촉에 대한 변위를 시간에 따라 표시한 것이다. 이 실험에서 오차 범위는 2.5mm 이고, 그래프에서 큰 변화가 있는 부분이 상태가 변하는 시점을 나타낸다.

표 1은 상태 $\{p_2\}$ 에서 다른 상태로 변화하는 순간에 기본적 변위들의 값이다. 그림 5에서 보듯이 상태 $\{p_2\}$ 에서는 세 개의 트랜지션 t_2, t_4, t_5 가 발생할 수 있다. 이 경우에 기본적 변위를 살펴보면 (7)에 의해서 출력 함수의 거리의 최대값이 오차 범위보다 작기 때문에 세 개의 트랜지션 중에서 t_4 만 발생할 수 있다. 따라서 발생 가능한 이벤트의 개수가 3개에서 1개로 줄어든다. 즉, 이 실험은 이벤트 판별에 있어서 기본적 변위가 유용하게 사용될 수 있다는 것을 보여준다.

힘과 모멘트 정보를 이벤트 판별에 이용하기 위해 정성적인 템플릿을 사용한다. 확장된 페트리넷은 이벤트 템플릿을 모델화 하는데 유용하다.

템플릿 모델은 (8)과 같이 페트리넷 모델의 마킹을 이용해서 얻어진다. 여기서 N 은 모든 플레이스의 개수이다.

$$F = \begin{bmatrix} f \\ m \end{bmatrix}, \quad A_i = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} \quad (i = 1, \dots, 2), \quad (8)$$

$$E(p, q) = qv \left(\sum_{i=1}^N \mu(p_i) A_i \Big|_{s=q} - \sum_{i=1}^N \mu(p_i) A_i \Big|_{s=p} \right)$$

$E(p, q)$ 은 상태가 p 에서 q 로 변할 때의 이벤트 템플릿이고, $qv(s)$ 는 신호 s 의 정성적인 값을 구하는 함수이다. f 와 m 은 각각 힘과 모멘트 벡터이고, A_i 는 기본 접촉이 생겼을 경우 로봇 1과 2에서 발생하는 힘과 모멘트 벡터인 F_1 과 F_2 를 포함하는 기본 접촉 벡터이다. A_i 는 플레이스에서 정의한다. 만약 p_i 에 토큰이 있다면 $\mu(p_i)A_i$ 는 플레이스 p_i 에 해당하는 접촉에서 발생하는 힘과 같고, 토큰이 없는 경우는 이 값이 0이다. 따라서 모든 플레이스에 대한 $\mu(p_i)A_i$ 의 합은 해당하는 상태에서의 접촉 힘의 크기가 된다. 상태 p 에서의 크기의 합과 q 에서의 크기의 합의 차이 값은 힘과 모멘트의 변화 값이 된다. 이 차이 값의 정성적인 값이 이벤트 모델 $E(p, q)$ 에 해당한다. 부품의 기하학적인 정보와 힘 정보로부터 계산된 기본 접촉의 A_i 로부터 템플릿을 결정하기 때문에 이벤트의 힘과 모멘트 템플릿은 자동으로 모델화 될 수 있다.

새로운 이벤트가 발생되면 확장된 페트리넷으로부터 발생 가능한 이벤트의 목록을 구한다. 그 후, 출력 함수의 최대값이 위치 오차 범위보다 큰 이벤트는 제외하고, 목록에 남아

있는 이벤트들의 템플릿과 힘과 모멘트 센서의 값을 비교하여 가장 적합한 것을 현재 발생한 이벤트로 판별한다.

III. 온라인 상에서의 모델 확장

수작업으로 만들어진 모델에서 구체화 되지 않은 부분을 다루는 경우에는 확장된 페트리넷을 이용한다. 부품 사이에 접촉이 발생했다는 것은 현재 상태에서 발생 가능한 기본 접촉들 중에서 하나가 발생한 것을 의미한다. 만약, 판별된 기본 접촉이 미리 만들어진 모델에 존재하지 않을 경우, 기본 접촉에 해당하는 플레이스들과 트랜지션들을 새롭게 정의하여 기본 모델에 추가하면 새로운 경로 계획이 가능하다. 온라인 상에서 모델을 확장시키는 알고리즘은 그림 8에 나타나 있다. 우선, 수작업으로 만들어진 모델로부터 최적의 경로를 만들고 적절한 트랜지션을 결정 한다. 그 다음 트랜지션에 해당하는 로봇의 운동 명령을 만들고 조립 작업을 수행한다. 조립 작업 중에는 충돌 인식 알고리즘을 이용하여 부품이 접촉하는 것을 판별한다. 부품이 접촉했을 경우 발생한 이벤트는 II장에서 설명한 방법에 의해 판별한다. 이 때 판별된 이벤트가 모델에서 정의된 이벤트가 아닐 경우 확장된 페트리넷 모델에 새로운 트랜지션을 추가한다.

새롭게 만들어진 기본 접촉을 고려하여 목적하는 접촉 상태까지 도달할 수 있는 경로를 만들어야 한다. 크게 두 가지의 경로를 고려할 수 있다. 첫 번째는 원래의 조립 경로로 되돌아가 남은 경로를 따라가는 것이고, 두 번째는 추가된 기본 접촉으로부터 새로운 경로를 만들어 나가는 것이다. 접촉 상태를 예측하는 데에는 위상 정보를 이용하는 것이 유용하다.

평면 상의 조립작업에서 기본 접촉은 꼭지점-모서리와 모서리-꼭지점 조합 중에 하나이며, 모서리는 두 개의 꼭지점으로 이루어지며, 각 꼭지점은 블록 또는 오목이다. 따라서, 기본 접촉은 모서리의 형상에 따라 모두 8가지 종류로 구분된다. 그림 9는 꼭지점-모서리 기본 접촉을 모서리의 형상에 따라 구분한 것이며, 표 2는 분류된 각 기본 접촉으로부터 유추 가능한 기본 접촉을 구한 것이다. 모서리-꼭지점 기본 접촉은 꼭지점-모서리 접촉을 대칭하여 구할 수 있다.

새로운 조립 상태가 생겼을 경우에, 본 논문에서는 경로 계획을 위해 선택 가능한 두 가지 방법 중 하나를 선택하는 경험적 방법을 제안한다.

$PRMC_R$ 과 $PRMC_N$ 를 각각 계획된 경로 상에서 현재 상태부터 목적 상태까지 도달하기 위해 거쳐야 할 기본 접촉으로 구성된 집합과 새로운 기본 접촉으로부터 표 2에 의해 추정 가능한 기본 접촉들의 집합으로 정의하고, 두 집합의 교집합을 조사하여 경로 계획을 수립하도록 한다. 두 집합의 교집합이 공집합일 경우는 기존 경로 계획이 목적 상태까지 도달하는데 더 가능성이 높다는 것을 의미하기 때문에 원래의 경로로 되돌아가서 남아있는 경로 계획을 수행하도록 한다. 만일, 교집합이 공집합이 아닌 경우에는, 새로운 기본 접촉으로부터 원래의 경로에 도달하는 경로가 존재한다고 볼 수 있다. 따라서, 새로운 경로와 원래의 경로를 비교하여 더 적절한 것을 조립 경로로 결정한다.

그러나, 표 2로 유추 가능한 접촉 상태는 단지 위상 정보

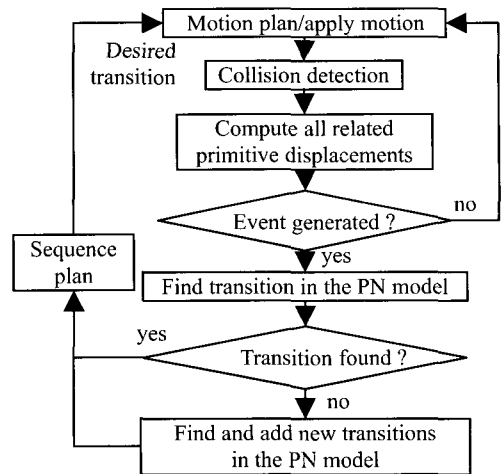


그림 8. 온라인 상에서의 모델 생성 방법.

Fig. 8. Flow chart of on-line model construction.

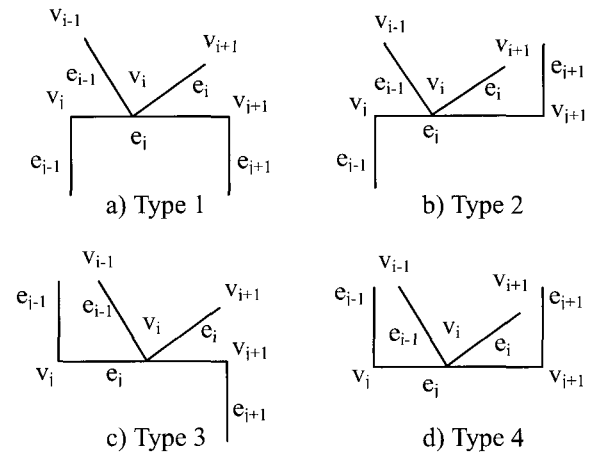


그림 9. 꼭지점-모서리 기본 접촉.

Fig. 9. Four types of primitive contact for vertex-edge.

표 2. (v_i, e_j) 로부터 가능한 기본 접촉들.

Table 2. Feasible primitive contacts from (v_i, e_j) .

Type no.	List of feasible primitive contacts
1	$(v_{i+1}, e_j), (v_{i+1}, e_{j+1}), (e_{i-1}, v_j), (e_{i-1}, v_{j+1}), (e_i, v_j), (e_i, v_{j+1})$
2	$(v_{i-1}, e_j), (v_{i+1}, e_j), (e_{i-1}, v_j), (e_i, v_j), (v_i, e_{j+1}), (v_{i+1}, e_{j+1})$
3	$(v_{i-1}, e_j), (v_{i+1}, e_j), (e_{i-1}, v_{j-1}), (e_i, v_{j+1}), (v_i, e_{j-1}), (v_{i-1}, e_{j-1})$
4	$(v_{i-1}, e_j), (v_{i+1}, e_j), (v_i, e_{j+1}), (v_{i+1}, e_{j+1}), (v_i, e_{j-1}), (v_{i-1}, e_{j-1})$

만을 이용한 것이기 때문에 실제로 발생 불가능한 접촉 상태가 포함될 수 있다. 일반적으로 조립 상태가 실제로 가능한지 알아보기 위해서는 형태 공간(Configuration space)에 대한 분석이 필요하다. 그러나, 실시간으로 형태 공간에 대한 분석을 하는 것은 어렵다. Hirai[11]는 조립 상태가 두 개의 기본 접촉으로 이루어진 경우에 대해서 조립 상태의 실행 가능성

을 조사할 수 있는 충분 조건을 제안하였다. 그는 하나의 부품에서 두 개의 요소 사이의 거리가 다른 부품의 두 개의 요소 사이의 거리와 같다는 사실을 이용하여 불가능한 조립 상태를 알아내었다. 이 방법을 이용하여, 위상 정보만을 사용하면서 생길 수 있는 문제점을 보완한다.

페트리넷 모델은 입출력 행렬(Incidence matrix)로 표현할 수 있다. 입출력 행렬은 플레이스로부터 트랜지션으로 가는 아크의 가중치를 나타내는 입력 행렬과 트랜지션에서 플레이스로 가는 아크의 가중치를 나타낸 출력 행렬로 나눌 수 있다. 새롭게 만들어진 플레이스와 트랜지션들은 페트리넷 모델의 입출력 행렬에 추가하는 방식으로 모델을 수정하며, 방법은 다음과 같다. 우선, 새로운 트랜지션에 대해서 입출력 행렬에 요소들이 0인 행 벡터를 추가한다. 그리고 나서 플레이스에 해당하는 열에 가중치 값을 대입한다. 새로운 플레이스의 경우에는 입출력 행렬의 플레이스에 해당하는 열 벡터를 추가하고 해당하는 행에 가중치 값을 대입한다. 페트리넷 모델로부터 트랜지션이나 플레이스를 제거하는 경우에는 입출력 행렬에서 행이나 열을 제거한다.

온라인 모델생성 방법을 검증하기 위해서 L 모양의 껍인 홀에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 10(a)에 나타난 조립 상태는 시뮬레이션 상에서 처음 모델에는 존재하지 않는 조립 상태이다. 새로운 조립 상태에 대해서 트랜지션이 정의 되고 그림 10(b)와 같이 입출력 행렬의 마지막 행에 순서대로 추가되었다. 트랜지션의 입력 함수와 출력 함수는 각각 (9)과 (10)에 의해서 정의된다.

$$I(t_{50}) = \{P_3\}, I(t_{51}) = \{P_3, P_{10}\} \quad (9)$$

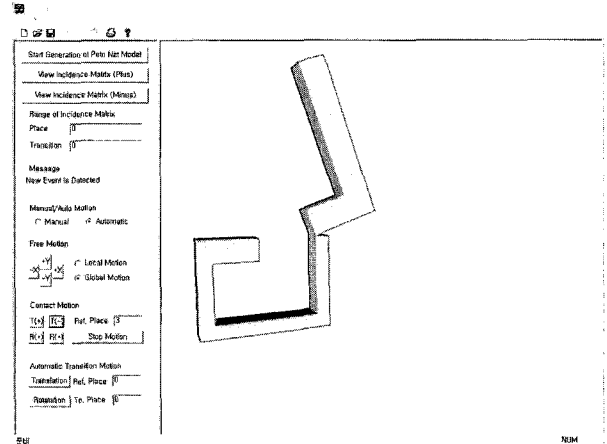
$$O(t_{50}) = \{P_3, P_{10}\}, O(t_{51}) = \{P_3\} \quad (10)$$

IV. 실험

제안된 방법을 검증하기 위하여 그림 11과 같은 두 팔 로봇 시스템을 구성하여 실험을 수행하였다. 이 시스템은 세대의 컴퓨터와 두 대의 로봇 제어기, 그리고 두 대의 로봇으로 구성된 계층적 구조를 가지고 있다. 호스트(Host) 컴퓨터는 주어진 조립 작업에 대한 조립 상태 모델, 이벤트 모델, 그리고 조립 경로 정보를 가지고 있다. 호스트 컴퓨터는 두 대의 클라이언트(Client) 컴퓨터로부터 전달된 센서 정보를 이용해서 두 대의 로봇에 대한 현재 상태를 판별하고 운동 명령을 클라이언트 컴퓨터로 전달한다. 각 클라이언트 컴퓨터는 로봇 운동을 제어하고 센서 정보를 모아서 호스트 컴퓨터로 전달하는 역할을 수행한다. 이 시스템은 분산적, 병렬 구조를 가지고 있기 때문에 두 대의 로봇을 제어하기 위한 프로그램의 수정, 추가 등이 수월하도록 구축하였다.

실험은 L 모양의 껍인홀 조립 작업을 2차원 평면에 대해서 수행하였다. L 껍인홀 부품은 알루미늄으로 제작되었고 껍의 바닥의 폭이 25mm로 20mm인 홀의 입구보다 넓다는 특징이 있다. 따라서, 이 L 껍인홀은 단순한 위치 제어만으로는 조립이 불가능하다. 표 3, 표 4, 표 5는 L 모양의 조립 작업에 대해서 정의된 플레이스, 트랜지션, 상태를 나타낸다.

그림 12는 실험 과정 중 발생한 힘과 모멘트의 그래프와 상태



(a) 시뮬레이션 도중 새롭게 모델화 된 이벤트

Part of Minus Incidence Matrix [52 × 14]														
040	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	Primitive Disp. —[2 ~ 13]— 02 : 0 0018.794 03 : 1 0000.000 04 : 0 0019.058 05 : 0 0024.032 06 : 0 0033.941 07 : 0 0025.000 08 : 0 0020.000 09 : 0 0020.000 10 : 1 0000.000 11 : 0 0028.000 12 : 0 0024.032 13 : 0 0025.000
041	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	
042	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
043	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
044	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
045	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
046	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
047	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
048	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
049	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
050	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
051	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	

Newly added transitions

Information of Incidence Matrix	
Transition : 40 - 51	Place : 2 - 11

(b) 트랜지션이 추가된 입출력 행렬

그림 10. 시뮬레이션 예제.

Fig. 10. Example of simulation.

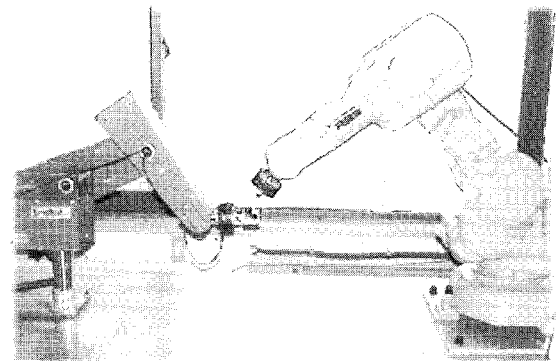


그림 11. 두 팔 로봇 시스템.

Fig. 11. Two-arm robot system.

변화도이다. 힘 모멘트 센서는 각 로봇의 끝 단에 하나씩 부착되어 있다. 센서 1은 껍이 부착되어 있는 로봇의 센서를 의미하고 센서 2는 홀이 부착된 로봇의 센서이다. 마지막 그래프는 초기 상태 0부터 최종 상태 13이 될 때까지 지나간

조립 상태를 나타낸다. 각 그래프의 x 축은 초로 표현한 시간 축이다. 그래프에서 큰 변화가 있는 부분이 이벤트가 발생한 부분이다.

표 6은 확장된 페트리넷 모델을 사용하여 이벤트를 판별하는 과정을 나타낸 것이다. 이 표는 4개의 열로 구성되어 있고 각 열은 조립 상태, 발생 가능한 트랜지션, 출력 함수의

표 3. 정의된 플레이스.

Table 3. Defined places for L-type peg-in-hole assembly.

Place	Primitive contact	Place	Primitive contact
p ₀	No contact	p ₄	(v _{p,3} , e _{n,1})
p ₁	(v _{p,4} , e _{n,0})	p ₅	(e _{p,2} , v _{h,2})
p ₂	(e _{p,3} , v _{h,1})	p ₆	(e _{p,1} , v _{h,1})
p ₃	(e _{p,4} , v _{h,6})	p ₇	(v _{p,5} , e _{n,5})

표 4. 정의된 트랜지션.

Table 4. Defined transitions for L-type peg-in-hole assembly.

Transition	Input Places	Output Places	Transition	Input Places	Output Places
t ₀	p ₀	p ₁	t ₂₁	p ₆	p ₅ , p ₆
t ₁	p ₁	p ₀	t ₂₂	p ₆	p ₆ , p ₇
t ₂	p ₁	p ₂	t ₂₃	p ₆ , p ₇	p ₆
t ₃	p ₂	p ₁	t ₂₄	p ₅	p ₅ , p ₃
t ₄	p ₀	p ₂	t ₂₅	p ₅ , p ₃	p ₅
t ₅	p ₂	p ₀	t ₂₆	p ₅	p ₅ , p ₇
t ₆	p ₀	p ₃	t ₂₇	p ₅ , p ₇	p ₅
t ₇	p ₃	p ₀	t ₂₈	p ₇	p ₅ , p ₇
t ₈	p ₂	p ₄	t ₂₉	p ₅ , p ₇	p ₇
t ₉	p ₄	p ₂	t ₃₀	p ₆	p ₃ , p ₆
t ₁₀	p ₂	p ₂ , p ₃	t ₃₁	p ₃ , p ₆	p ₆
t ₁₁	p ₂ , p ₃	p ₂	t ₃₂	p ₃	p ₃ , p ₄
t ₁₂	p ₃	p ₂ , p ₃	t ₃₃	p ₃ , p ₄	p ₃
t ₁₃	p ₂ , p ₃	p ₃	t ₃₄	p ₃	p ₅ , p ₃
t ₁₄	p ₄	p ₃ , p ₄	t ₃₅	p ₅ , p ₃	p ₃
t ₁₅	p ₃ , p ₄	p ₄	t ₃₆	p ₃	p ₇
t ₁₆	p ₄	p ₅	t ₃₇	p ₇	p ₃
t ₁₇	p ₅	p ₄	t ₃₈	p ₃	p ₃ , p ₆
t ₁₈	p ₅	p ₅ , p ₆	t ₃₉	p ₃ , p ₆	p ₃
t ₁₉	p ₅ , p ₆	p ₅	t ₄₀	p ₇	p ₆ , p ₇
t ₂₀	p ₅ , p ₆	p ₆	t ₄₁	p ₆ , p ₇	p ₇

표 5. 플레이스를 이용한 상태의 표현.

Table 5. Representation of states with the places.

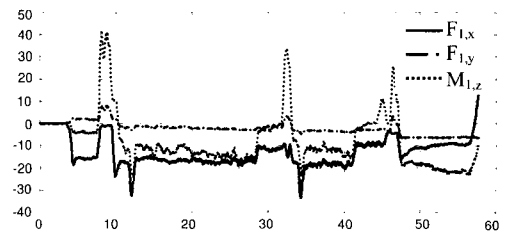
State	Places	State	Places
0	p ₀	8	p ₅ , p ₃
1	p ₁	9	p ₅ , p ₆
2	p ₂	10	p ₆
3	p ₃	11	p ₃ , p ₆
4	p ₂ , p ₃	12	p ₇
5	p ₄	13	p ₅ , p ₇
6	p ₄ , p ₃	14	p ₆ , p ₇
7	p ₅		

결과, 그리고 출력 함수의 변위 값들 중에서 최대값을 의미한다.

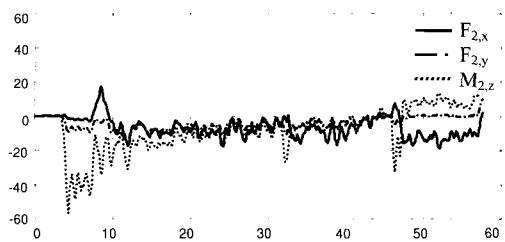
이벤트는 힘과 모멘트 신호에 큰 변화가 나타났을 때 표의 마지막 열의 값과 힘, 모멘트 템플릿을 이용하여 판별한다. 예를 들면, 상태 0에서 발생할 수 있는 세 개의 트랜지션들 중에서 트랜지션 t₀의 최대 변위가 오차 범위 보다 작다. 따라서, 발생한 이벤트는 트랜지션 t₀라고 할 수 있다.

트랜지션 t₁₁, t₁₃, t₁₅, t₃₃는 조립 상태를 구성 하는 기본 접촉이 없어지는 이벤트들이다. 이러한 트랜지션에서 출력함수의 최대 변위는 상태 변화가 일어날 때 항상 오차 범위보다 작게 된다. 따라서, 센서 신호와 힘, 모멘트 템플릿을 비교하여 이벤트를 판별해야 한다. 표에서 ●으로 나타낸 부분이 이러한 경우이다. 상태 4를 예로 들면, 두 개의 트랜지션 t₁₁과 t₁₃이 발생 가능하다. 상태 4에서의 모멘트 템플릿과 센서 정보는 표 7과 같다. 표에서 ΔF_{ij}와 ΔM_{ij}는 각각 로봇 i의 끝단에 부착된 센서의 j축에서의 힘과 모멘트의 변화량이고 [s]는 신호 s의 정상적인 값이다. 센서 신호의 정상적인 값을 결정하기 위한 임계 값을 실험적으로 결정한다. 표 7의 결과로부터 트랜지션 t₁₃이 발생한 트랜지션 이라는 것을 알 수 있다.

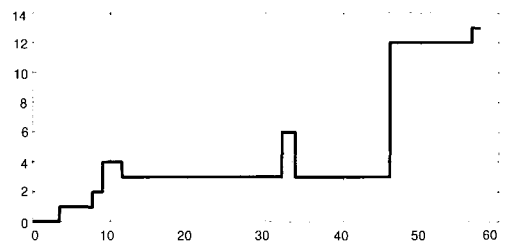
앞의 실험 결과에서 조립 상태 0, 2, 3, 12에서는 발생 가능한 이벤트 수는 3, 3, 5, 2와 같으나, 기본적인 변위에 의해서 모두 1로 줄어든 것을 확인할 수 있으며, 또한 위치 센서로 판별



(a) Force(N)/moment(N-cm) profiles at sensor 1



(b) Force(N)/moment(N-cm) profiles at sensor 2



(c) Change of states

그림 12. 결과 그래프.

Fig. 12. Force/moment profiles and state trajectory.

표 6. 이벤트 판별 과정.

Table 6. Process of event identification.

State	Enabled Transitions	Displacement of output functions	Maximum
0 {p0}	t ₀	δ _{0,1}	0.2
	t ₄	δ _{0,2}	7.0
	t ₆	δ _{0,3}	8.2
1 {p1}	t ₂	δ _{2,2}	0.61
2 {p2}	t ₃	δ _{3,1}	7.3
	t ₈	δ _{8,2} , δ _{8,4}	5.9
	t ₁₀	δ _{10,2} , δ _{10,3}	1.0
4 {p2, p3}	t ₁₁	δ _{11,2}	•
	t ₁₃	δ _{13,3}	•
3 {p3}	t ₁₂	δ _{12,2} , δ _{12,3}	5.1
	t ₃₂	δ _{32,3} , δ _{32,4}	1.4
	t ₃₄	δ _{34,3} , δ _{34,5}	4.0
	t ₃₆	δ _{36,7}	5.8
	t ₃₈	δ _{38,6}	7.6
6 {p3, p4}	t ₁₅	δ _{15,4}	•
	t ₃₃	δ _{33,3}	•
3 {p3}	t ₁₂	δ _{12,2} , δ _{12,3}	17
	t ₃₂	δ _{32,3} , δ _{32,4}	9.9
	t ₃₄	δ _{34,3} , δ _{34,5}	2.6
	t ₃₆	δ _{36,7}	2.0
	t ₃₈	δ _{38,6}	24
12 {p7}	t ₃₇	δ _{37,5} , δ _{37,7}	1.3
	t ₄₀	δ _{40,6} , δ _{40,7}	11

표 7. 상태 4에서의 힘과 모멘트 템플릿.

Table 7. Force and moment templates at state 4.

	[ΔF _{1,x}]	[ΔF _{1,y}]	[ΔM _{1,z}]	[ΔF _{2,x}]	[ΔF _{2,y}]	[ΔM _{2,z}]
t ₁₁	+	0	+	+	+	+
t ₁₃	0	-	-	-	0	+
sensor	-	-	-	-	-	-

불가능한 상태 4와 6과 같은 경우에는 정성적인 힘 정보로부터 정확히 이벤트를 판별하는 것을 알 수 있다. 따라서, L 펌프 인출에 관한 실험은 제안된 방법이 두 센서의 단점을 보완하여 정확한 이벤트 판별이 가능함을 보여준다.

V. 결론

본 논문에서는 비구성 환경에서 조립 작업을 수행하는 두 팔 로봇 시스템을 대상으로 하여 온라인 상에서 조립 작업을 모델화 하고, 조립 계획을 수립하고, 제어할 수 있는 방법을 제안했다. 조립 상태와 조립 경로를 모델화 하기 위하여 확장된 페트리넷을 제안하였고 기본적인 변위와 정성적인 템플릿을 정의하여 위치 정보와 힘, 모멘트 센서 신호를 이벤트 판별에 효과적으로 이용하였다. 확장된 페트리넷은 모델화 되지 않은 새로운 조립 상태가 생길 경우 이를 판별하여 이에 해당하는 새로운 플레이스와 트랜지션을 페트리넷 모델

에서 생성시킨다. 이러한 방법은 사전에 계획 되지 않은 상태들에 대해서도, 로봇이 자율적으로 작업 도중에 판별하고 계획할 수 있다는 점에서 로봇의 능력을 높여준다. L 펌프 인출 작업의 2차원 평면에 대한 시뮬레이션은 온라인 상에서 제안된 모델 생성 방법을 적용하여 사전에 모델화 되지 않은 조립 상태를 모델화 할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

또한, 위치 정보와 힘 정보를 동시에 적용한, 확장된 페트리넷이 이벤트 판별에 효과적이라는 것을 L 펌프 인출 작업에 대한 실험을 통해 검증하였다. 본 논문에서 제안된 방법은 2차원 평면에 대해서 검증이 되었으며, 현재 3차원 공간으로의 확장 작업이 수행되고 있다.

이것을 위해서는 다음과 같은 것을 고려해야만 한다. 2차원에서는 꼭지점-모서리의 기본적 접촉을 조합하면 모든 접촉 상태를 표현할 수 있었지만, 3차원에서 발생하는 접촉 상태를 표현하기 위해서는 두 가지 기본적 접촉 즉, 꼭지점-면 조합과 모서리-모서리 조합이 추가되어야 한다. 그리고, 추가된 기본적 접촉에 대해 기본적 변위의 계산식을 새롭게 고안해야 한다. 마지막으로 2차원에서 위상 정보로 접촉 상태를 만들어 내는 방법인 표 2가 3차원에 맞게 수정되어야 한다.

실제 상황에서 물체 두 개만 조립하고 끝나는 경우가 거의 없기 때문에, 조립된 물체들의 정보를 통합하여 한 물체로 변환하는 과정이 필요하다. 두 물체가 조립되는 경우에는 조립된 물체가 서로 고정되어 있다는 가정하에서 하나의 큰 물체로 모델화 할 수 있다. 조립된 두 물체를 하나로 모델화 할 때는 조립으로 인해 감춰지는 면, 모서리, 꼭지점과 같은 요소를 제거하고 밖으로 나타나는 요소만을 이용해서 하나의 부품으로 모델화 해야 한다. 이렇게 조립된 물체를 하나의 부품으로 치환하면, 새로운 두 물체를 조립하는 것과 같기 때문에, 본 연구에서 제안된 방법을 이용할 수 있다. 만일, 조립된 물체가 고정되지 않는 경우라면 로봇의 자세를 제어하여 물체가 분리되지 않도록 하는 방법을 적용해야 하기 때문에, 이것에 관한 연구가 추가로 수행되어야 한다.

참고문헌

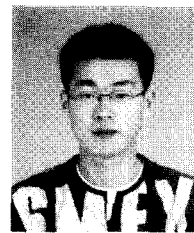
- [1] D. N. Trong, M. Betemps, and A. Jutard, "Analysis of dynamic assembly using passive compliance," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1997-2002, 1995.
- [2] I. W. Kim, D. J. Lim, and K. I. Kim, "Active peg-in-hole of chamferless parts using force/moment sensor," *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 948-953, 1999.
- [3] B. J. McCarragher, "Adaptive discrete event control for assembly: theory and industrial implementation," *International Journal of Robotics and Autonomous Systems*, vol. 21, pp. 323-339, 1997.
- [4] H. Asada and S. Hirai, "Towards a symbolic-level force feedback : recognition of assembly process states," *Proceedings of the International Symposium on Robotics Research*, pp. 290-295, August, 1989.
- [5] B. J. McCarragher, "Task primitives for the discrete event modeling and control of 6-dof assembly tasks," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 12, no. 2,

- pp. 280-289, 1996.
- [6] M. Skubic and R. A. Volz, "Identification contact formations from sensory patterns and its applicability to robot programming by demonstrations," *Proceedings of the IEEE Symposium on Intelligent Control*, pp. 458-464, November, 1996.
- [7] M. Huber, "A hybrid architecture for hierarchical reinforcement learning," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3290-3295, April, 2000.
- [8] R. S. Desai and R. A. Volz, "Identification and verification of termination condition in fine motion in presence of sensor errors and geometric uncertainties," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 800-809, May, 1989.
- [9] T. Lozano-Perez, J. L. Jones, E. Mazer, and P. A. O'Donnell, *HANDEY : A Robot Task Planner*, MIT Press, USA, pp. 41-56, 1992.
- [10] J. Xiao and X. Ji, "Automatic generation of high-level contact state space," *International Journal of Robotics Research*, vol. 20, no. 7, pp. 584-606, 2001.
- [11] S. Hirai, *Analysis and planning of manipulation using the theory of polyhedral convex cones*, PhD Dissertation Kyoto University, Kyoto University Press, Japan, pp. 53-56, 1991.
- [12] P. Astuti and B. J. McCarragher, "Sufficient conditions for the success of robotic assembly," *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1693-1699, May, 1994.
- [13] C. G. Cassandras, *Discrete Event Systems: Modeling and Performance Analysis*, IRWIN, pp. 89-111, 1993.



정성엽

1994년 연세대학교 기계공학과 졸업.
1996년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 석사. 현재 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 박사과정 재학 중. 관심 분야는 다중 로봇 제어.



황면중

2001년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 졸업. 2003년 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 석사. 현재 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 박사과정 재학 중. 관심 분야는 다중 로봇 제어.



이두용

1985년 서울대학교 제어계측공학과 공학사. 1987년 Rensselaer Polytechnic Institute, M.S. 1993년 동 대학교, Ph.D. 1993년~1994년 동 대학교. Postdoctoral Research Associate. 1994년~현재 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과 교수. 연구 분야는

로봇공학, 생산시스템 제어.