

월드 엘리먼트와 오퍼레이터의 추상화에 기반한 효율적인 계층적 작업계획

Hierarchical Task Planning through Abstraction of World Elements and Operators

박 영 빈¹ · 서 일 홍² · 최 병 욱³

Park Young-Bin¹ · Suh Il Hong² · Choi Byung Uk³

Abstract Hierarchical Planning based on Abstraction of World Elements and Operators(HiPAWO) is proposed for mobile robots task planning, where abstraction of world elements is used for hierarchical planning and abstraction of operators is used for hierarchical decomposition of abstracted actions. Especially, a hierarchical domain theory based on JAH(Joint of Action Hierarchy)-graph is proposed to improve efficiency of planning, where a number of same actions are included in both adjacent hierarchical levels of domain theories to provide relationships between adjacent hierarchical levels. To show the validities of our proposed HiPAWO, experimental results are illustrated and will be compared with two other classical planning methods.

Keywords : Hierarchical task planning, mobile robotics, world modeling

1. 서 론

넓은 로봇 환경에서의 작업 계획 효율성을 향상시키기 위해 hierarchical task planning through world abstraction (HPWA) 이 제안되었다^[1]. 이 시스템에서는 계층적인 월드 엘리먼트의 추상화를 통해 작업 계획 생성을 위한 검색영역을 축소하였고 그로 인해 효율성을 향상하였다. 기본적으로 HPWA는 상위 레벨의 추상화된 월드모델을 기반으로 내장된 논리 기반 작업 계획기(embedded planner)를 사용하여 추상화된 작업 계획을 생성하고 그 다음 하위 레벨의 추상화된 월드모델에 기반하여 상위 레벨에서 이미 생성된 추상화된 작업계획을 세분화(refinement) 하였다. 이와 같은 과정이 로봇이 직접 실행할 수 있는 작업 계획이 생성될 때까지 재귀적으로 반복된다. HPWA 기존의 작업 계획기와 비교하여 상당한 효율성의 향상을 보여주었다

HPWA 는 월드 상태(world states)를 월드 엘리먼트의 추상화를 통해서 축소하고 이것은 분명히

작업 계획의 생성을 효율적으로 만든다. 하지만 복잡한 실제 로봇 환경하에서는 월드 엘리먼트의 추상화에도 불구하고 월드 상태의 규모는 작업 계획의 생성을 비효율적으로 만들 수 있을 정도로 크다. 일반적으로 작업 계획의 효율성은 정형화된 일련의 로봇 동작(operator)을 상위 레벨의 하나의 로봇동작으로 추상화 시킴으로써도 획득된다. 이런 방법을 사용함으로써 임의의 로봇 동작의 다음에 오는 로봇 동작을 선택함에 있어서 휴리스틱 정보를 이용할 수 있다. 구체적으로 말해서 추상화된 로봇 동작은 작업 계획 생성시에 상세한 부속 로봇 동작들(sub-actions)로 분해(decomposition) 되는데, 이 때 부속 동작들의 목록과 순서를 결정하는 데 있어서의 휴리스틱 정보들이 제공된다.

HPWA를 발전시키고 확장시키기 위해서 본 논문에서는 Hierarchical Planning based on Abstraction of World Elements and Operators(HiPAWO) 라는 새로운 작업 계획 방식을 제안한다. 본 시스템에서는 계층적 작업 계획을 위해서 월드 엘리먼트를 추상화하고 로봇 동작의 계층적 분해를 위해서 오퍼레이터를 추상화 했으며 두 가지 추상화의 상승 효과를

¹ 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과

² 한양대학교(E-mail : ihsuh@hanyang.ac.kr)

³ 한양대학교(E-mail : buchoi@hanyang.ac.kr)

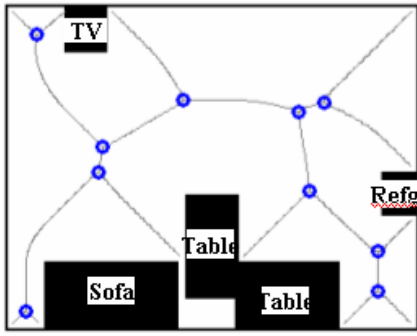


그림 1. The generalized Voronoi diagram (GVD)을 이용해 제작된 최하위 레벨의 월드 모델

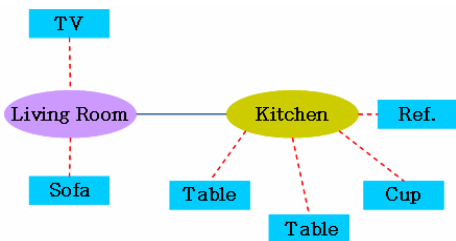


그림 2. 하나의 방으로 이루어진 실험 공간을 물체의 속성에 따라 두 개의 공간으로 분리

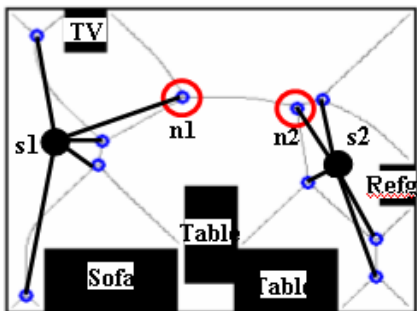


그림 3. 최하위 레벨의 각 노드들을 대응하는 공간으로 추상화. 붉은 원안의 노드는 출입노드

가져오는 통합을 위해서 계층적인 도메인 이론을 Joint of Action Hierarchies(JAH) 기반 하에 생성하였다. JAH는 의도적으로 중복되는 로봇 동작을 인접한 레벨의 도메인 이론에 포함시킴으로써 두 레벨간에 관계성을 제공한다. 이와 같은 관계성에 의해서 추상화된 로봇 동작의 세분화(refinement) 과정이 복합로봇 동작의 계층적인 분해과정에 의해서 이루어진다. 구체적으로 말해서, HiPAWO는 최상위 레벨의 월드 모델에 기반하여 작업 계획을 생성하고 그 추상화된 작업 계획을 더 상세한 부속 작업 계획으로 세분화 한다. 이 때 세분화 과정은 복합 로봇 동작(compound action)의 휴리스틱 정보에 의해서 그 동작의

부속 로봇 동작들로 효율적으로 분해된다. 이런 일련의 과정은 최하위의 월드 모델에 기반한 로봇이 직접 실행 가능한 로봇 동작으로 이루어진 작업계획이 생성될 때까지 반복된다.

HPWA가 Graphplan^[7]과 Metric-FF^[8]를 내장된 논리 기반 작업 계획기로 사용한 것에 비하여 제안하는 시스템은 Aductive Event Calculus Planner(AEC)^{[2][5]}를 사용하였다. AEC는 작업 계획 생성시에 복합 로봇 동작(compound action)이라고 불리는 추상화된 로봇 동작을 그 부속 로봇 동작들로 계층적으로 분해하는 특성을 가지고 있다. 이와 같은 특성은 본 연구가 월드 엘리먼트의 추상화뿐만 아니라 오퍼레이터의 추상화를 동시에 실행하려는 목적과 부합된다. AEC는 동적인 월드에 대한 표현을 위해서 event calculus^[6]라는 표현방법을 사용한다. 따라서 본 논문에서 이후에 사용하는 월드에 대한 표현방법도 eventcalculus 를 사용한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 제안하는 시스템에 사용된 월드 엘리먼트의 추상화와 오퍼레이터의 추상화를 소개하고 3장에서는 제안하는 시스템인 HiPAWO에 대해서 설명한다. 4장에서는 제안하는 시스템의 평가 결과를 보여주고 마지막 5장에서는 결론을 제시한다.

2. 월드 엘리먼트와 오퍼레이터의 추상화

2.1 월드 엘리먼트의 추상화

적절한 계층적 월드 모델의 생성은 효율적인 계층적 작업 계획의 중요한 요소 중 하나이기는 하지만 본 논문에서는 월드 모델 생성을 위한 새로운 방법을 제시하지는 않는다. 그 이유는 본 논문의 우선적인 목표가 효율적인 작업 계획의 생성에 있기 때문이다. 대신 본 절에서는 제안하는 시스템에서 사용한 월드 엘리먼트의 계층적인 추상화 방식을 간단하게 설명한다.

그림 1은 TV, 소파, 탁자들로 이루어진 하나의 방을 보여준다. 이 공간에 대한 최하위 레벨의 월드 모델은 Voronoi diagram(GVD)^[5]를 사용해 토폴로지와 지오메트리 요소를 동시에 포함한 하이브리드 형태로 구성된다. 이 레벨의 월드 모델은 그래프로 나타내어 질 수 있는데 그래프의 노드는 주행을 위한 노드를 나타내고 간선은 노드간의 상대적인 위치정보를 나타낸다. 최하위 레벨의 노드들을 추상화하기 위해서 그림 2에서와 같이 물체의 속성에 따라서 하나의 방을 부엌(kitchen)과 거실(living-room) 두 개의 공간으로 나누었다^[10]. 그림3은 최하위 레벨의 각 노드들을 해당하는 상위레벨의 공간으로 추상화시킨 결과를 보여준다. 노드들 중에 특별히 다른 공간의 노드와 직접 연결된 노드들을 출입노드(entry node)라고 정의한다.

2.2 오퍼레이터의 추상화

오퍼레이터의 추상화를 위해서는 복합 로봇 동작(compound action)이^[2] 채용되었다. 복합 로봇 동작은 특정 목표를 달성하기 위한 전형화된 일련의 로봇 동작들의 추상화를 통해서 생성된다.

Definition 1^[2]: 복합 로봇 동작은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{Happens}(\alpha 1, t_1, t_2) \leftarrow \psi_1 \wedge \dots \wedge \psi_n \quad (1)$$

여기서 $\text{Happens}(\alpha 1, t_1, t_2)$ 는 로봇 동작 $\alpha 1$ 이 t_1 시점에 시작되고 t_2 시점에 종료된다는 것을 의미한다. 각 ψ_i 은 또 다른 복합 로봇 동작이거나 다음과 같은 형태로 나타난다.

$$(\neg) \text{HoldsAt}(\beta, \tau) \quad (2)$$

는 상태(fluent) β 가 τ 시점에 참이라는 것을 의미한다.

$$\text{Happens}(\alpha 2, \tau) \quad (3)$$

는 로봇동작 $\alpha 2$ 가 τ 시점에 발생하는 것을 의미한다. (3)과 같이 시간을 나타내는 변수를 하나만 포함하고 있는 로봇동작을 기본 단위 로봇 동작(primitive action)이라고 한다. 정의 1 에 의해서 복합 로봇 동작은 기본 단위 로봇 동작이나 또 다른 복합 로봇 동작을 부속 로봇 동작(sub-action)으로 가질 수 있다.

복합 로봇 동작은 기간(interval)으로 나타내어 지고 기본 단위 로봇 동작은 순간(instant)으로 나타내어 진다. 사전에 각 복합 로봇 동작이 어떤 부속 로봇 동작들로 이루어져 있는지를 명세화를 한다면 복합로봇 동작들이 부속로봇 동작으로 분해될 때 부속 로봇 동작들의 목록과 순서를 용이하게 결정할 수 있다는 점을 주목해야 한다. 복합 로봇 동작의 분해는 기본 단위 로봇 동작이 나타날 때까지 계속된다. 복합 로봇 동작은 (4)~(6)의 예를 통해 쉽게 설명될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \text{Happens}(\text{GotoSpace}(S1, S2), T1, T4) \leftarrow \\ & \text{HoldsAt}(\text{NearestNode}(N1), T1) \wedge T1 < T2 \wedge \\ & \text{Happens}(\text{GoNearestNode}(N1), T1, T2) \wedge T2 < T3 \wedge \\ & \text{EntryNode}(S1, N2, S2) \wedge \text{NextSpace}(S1, S2) \wedge \\ & \text{Happens}(\text{GotoEntryNode}(S1, N2, S2), T3, T4). \quad (4) \end{aligned}$$

(4)에서 $\text{GotoSpace}(S1, S2)$ 는 공간 $S1$ 에서 공간 $S2$ 의 출입 노드까지 이동하는 복합 로봇 동작을 의미한다. 부속 로봇 동작으로는 GoNearestNode 와 GotoEntryNode 복합 로봇 동작을 가진다. GotoEntryNode 복합 로봇 동작은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & \text{Happens}(\text{GotoEntryNode}(S1, N3, S2), T1, T4) \leftarrow \\ & \text{HoldsAt}(\text{AtNode}(N1), T1) \wedge \text{NextNode}(N1, N2) \wedge \\ & \text{Happens}(\text{GoToNode}(N1, N2), T1, T2) \wedge T2 < T3 \wedge \\ & \text{Happens}(\text{GotoEntryNode}(S1, N3, S2), T3, T4). \quad (5) \end{aligned}$$

(5)에서 $\text{GotoEntryNode}(S1, N3, S2)$ 는 로봇이 공간 $S1$ 에 위치해 있던 초기 노드로부터 공간 $S2$ 의 출입노드인 $N3$ 로 이동하는 복합 로봇 동작을 의미한다. 부속 로봇 동작으로는 GoToNode 와 GotoEntryNode 복합 로봇 동작을 재귀적으로 가진다. GoToNode 복합 로봇 동작은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} & \text{Happens}(\text{GoToNode}(N1, N2), T1, T2) \leftarrow \\ & \text{HoldsAt}(\text{Rotation}(LR, R), T1) \wedge \\ & \text{Happens}(\text{Turn}(N2, LR, R), T1) \wedge T1 < T2 \wedge \\ & \text{HoldsAt}(\text{Dist}(D), T2) \wedge \\ & \text{Happens}(\text{Goto}(N2, D), T2). \quad (6) \end{aligned}$$

(6)에서 $\text{GoToNode}(N1, N2)$ 복합 로봇 동작은 노드 $N1$ 으로부터 노드 $N2$ 까지 이동하는 로봇 동작을 의미한다. 부속 로봇 동작으로는 Turn 과 Goto 기본 단위 로봇 동작을 가진다. $\text{Turn}(N2, LR, R)$ 는 노드 $N2$ 를 향하여 LR 방향으로 R 만큼 회전하는 기본 단위 로봇 동작을 의미하고 $\text{Goto}(N2, D)$ 는 노드 $N2$ 를 향하여 D 만큼 이동하는 기본 단위 로봇 동작을 의미한다.

3. 월드 엘리먼트와 오퍼레이터의 추상화에 기반한 계층적 작업 계획기(HiPAWO)

3.1 Joint of Action Hierarchies(JAH)

그림 5는 레벨 L^0 와 L^1 도메인 이론을 구성하고 있는 계층적인 로봇 동작을 보여주고 있다. 여기서 인접하고 있는 두 레벨의 도메인 이론에는 중복된 로봇동작이 포함되어 있다. 이것은 계층적 작업계획의 생성과정에서 세분화 과정이 복합 로봇 동작의 계층적 분해과정에 의해서 진행되기 위해 의도적으로 설계된 것이다. 세분화는 추상화된 로봇 동작을 더 상세한 부속 로봇 동작들로 대체하는 것이다. 이 과정을 복합 로봇 동작의 계층적 분해과정으로 대체함으로써 휴리스틱 정보를 사용하여 더 효과적으로 부속 로봇 동작들을 결정할 수 있다.

그림 5의 FindObjandReport 로봇 동작은 레벨 L^1 에서의 루트 노드의 로봇 동작이면서 동시에 복합 로봇 동작이다. GotoSpace , FindObject 와 Report 로봇 동작은 레벨 L^1 에서의 기본 단위 로봇 동작이면서 또한 리프 노드 로봇 동작이다. 반면에 레벨 L^0 에서 보면 GotoSpace , FindObject 와 Report 는 루트 노드 로봇 동작이면서 복합 로봇 동작이다.

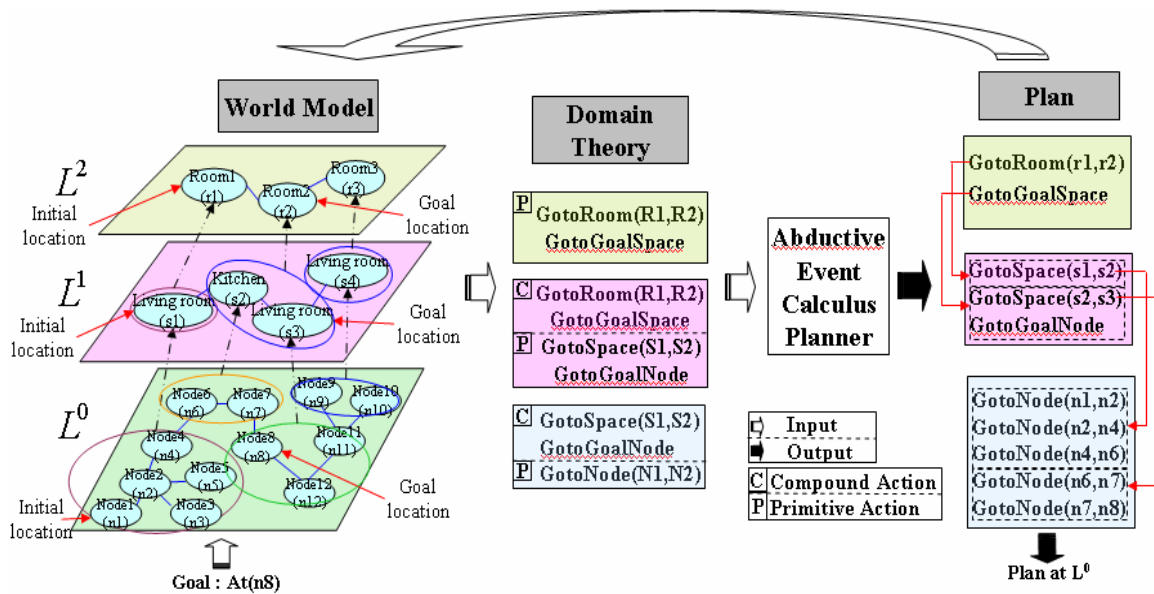


그림 4. HiPAWO에서의 작업 계획 생성과정의 예

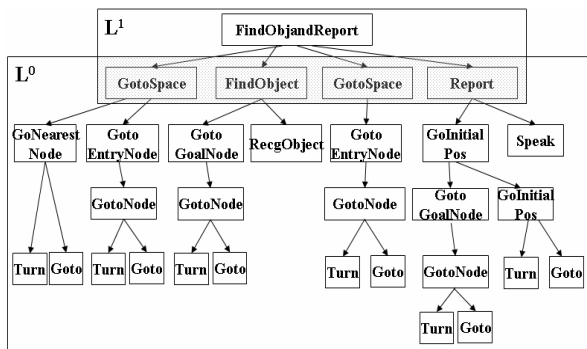


그림 5. JAH에 기반한 L0 과 L1 에서의 계층적 로봇 동작

Turn, Goto, RecgObject 와 Speak 로봇 동작은 L^0 에서의 리프 노드 로봇 동작이고 기본 단위 로봇 동작이다. GotoSpace, FindObject 와 Report 로봇 동작으로 인하여 하나의 레벨에서의 로봇 동작 간의 관계성(intra-relationship) 뿐만 아니라 인접하고 있는 두 개의 레벨간의 로봇 동작 사이에도 관계성이 주어지게 된다 (inter-relationship).

복합 로봇 동작의 세분화 과정이 복합 로봇 동작의 계층적 분해과정에 의해서 진행되기 위해서는 복합 로봇 동작의 전제상태(Pre-condition)를 세분화된 작업 계획을 생성하고자 하는 레벨의 도메인 이론의 초기 상태로 주고 복합 로봇 동작의 영향(post-condition or effect) 을 목표상태로 설정하여 작업 계획을 생성해야 한다.

Definition 2 로봇 동작의 전제상태와 영향: α 를 로봇 동작이라 하고 c_{pre} 를 α 의 전제 상태 c_{post} 를 α 의

영향이라고 놓으면 다음과 같은 event calculus 룰로 나타낼 수 있다;

$$\text{Initiates}(\alpha, c_{post}, \tau) \leftarrow \text{holdsAt}(c_{pre}, \tau) \quad (7)$$

이 룰은 만약 c_{pre} 이 τ 시점에 참이라면, 로봇 동작 α 를 실행한 τ 시점에 c_{post} 참이 된다 라는 것을 나타내고 있다. 이러한 룰이 도메인 이론에 있는 상태에서 c_{pre} 를 도메인 이론의 초기 상태로 주고 c_{post} 를 목표상태로 준 상태에서 작업계획을 생성시키면 로봇 동작 α 로 이루어진 작업 계획이 생성된다.

3.2 구성 요소

그림 4 는 제안하는 시스템의 프로세스를 예를 들어 나타내고 있다. 가장 왼편에는 계층적으로 추상화된 월드 모델을 나타내고 있고 가장 오른편에는 계층적으로 생성된 작업 계획을 보여주고 있다. 각 계층의 도메인 이론은 각 로봇 동작의 영향과 전제조건, 월드의 초기 상태(initial states)와 복합 로봇 동작과 그 부속 로봇 동작의 명세에 대해 기술한다. 각 레벨의 도메인 이론은 대응되는 레벨의 월드 모델에 기반하여 수정되고 Abductive Event Calculus Planner(AEC)는 각 레벨의 도메인 기술에 기반하여 작업 계획을 생성한다. 계층적인 도메인 이론의 로봇 동작들은 그림 5 와 같은 JAH 에 따라 계층적으로 설계되어 있다. 이로 인하여 최상의 레벨의 루트 노드의 복합 로봇 동작부터 최하위 레벨의 리프 노드의 기본 단위 로봇 동작까지 계층적인 분해가 가능하다. 각 계층 월드모델내의

원은 로봇의 주행시에 경유할 수 있는 장소를 나타내고 각 레벨의 도메인 이론에는 다음과 같은 주행을 위한 고유한 기본 단위 로봇 동작이 있다.

L^2 : GotoRoom(R1,R2)는 방 R1 으로부터 방 R2 까지 이동하는 로봇 동작이다.

L^1 : GotoSpace(S1,S2)는 공간 S1 으로부터 공간 S2 까지 이동하는 로봇 동작이다.

L^0 : Turn(N,RL,R)는 노드 N을 향하여 RL(right or left) 방향으로 R(degree) 만큼 회전하는 로봇 동작이다. 그리고 Goto(N,D)는 노드 N을 향하여 D(cm) 만큼 전진하는 로봇 동작이다.

3.3 작업 계획 생성 과정의 예

HiPAWO 의 작업 계획 과정에 대한 이해를 돕기 위한 간단한 예는 다음과 같다(그림 4 참조).

3.3.1 L^2 레벨에서의 작업 계획

- 1) *StateAbstractionChains* : 최상위 레벨인 L^2 에서 작업 계획을 생성 하기 위해 L^0 레벨의 초기 상태와 목표상태가 L^2 레벨로 순차적으로 추상화된다. 그림 4 에서와 같이 로봇의 L^0 에서의 초기 상태인 노드 n1 과 목표 상태인 노드 n8 이 L^1 레벨의 공간 s1 과 공간 s2 로 추상화되고 이어서 L^2 레벨의 방 r1 과 방 r2 로 추상화된다.
- 2) *UpdateDomainTheory* : L^2 레벨의 초기 상태인 At(r1) 는 L^2 레벨의 도메인 이론에 추가 된다.
- 3) *GenerateHighestAbsPlan* : AEC 는 L^2 레벨의 목표 상태인 At(r2)를 달성하기 위한 작업 계획을 L^2 레벨의 도메인 이론에 기반하여 생성한다. [GotoRoom(r1,r2), GotoGoalSpace] 은 L^2 레벨에서의 작업 계획이다. 여기서 GotoGoalSpace 로봇 동작은 더미(dummy) 로봇 동작으로써 로봇이 목표가 되는 방의 출입 공간으로부터 최종적인 목표 공간으로 이동하는 로봇 동작이다.

3.3.2 L^1 레벨에서의 작업 계획

- 1) *ActionRefinement* : HiPAWO 는 L^2 레벨의 작업 계획 중 첫 번째 로봇 동작인 GotoRoom(r1,r2)을 다음 레벨인 L^1 에서 세분화 한다. GotoRoom(r1,r2) 로봇 동작은 JAH 에 의하면 L^1 레벨에서 루트 노드 로봇 동작이면서 복합 로봇 동작이다. 세분화 과정이 복합 로봇 동작의 계층적 분해 과정을 통해 이루어지기 위해 L^1 레벨의 도메인 이론에 GotoRoom(r1,r2) 로봇 동작의 전제 조건인 At(s1)을 초기 상태로 추가 하고 영향인 At(s2)를 목표상태로 하여 세분화 과정을 실행한다. GotoRoom(r1,r2)의 세분화 결과는 GotoSpace(s1,s2)이다.
- 2) L^2 레벨의 작업 계획의 모든 로봇 동작에 2-1)의 과정을 반복한다. GotoGoalSpace 로봇 동작의 세분화 결과는 GotoSpace(s2,s3) 와 GotoGoalNode 로봇 동작이다. GotoGoalNode 로봇 동작은 더미 로봇 동작으로써 로봇이 목표가 되는 공간의 출입 노드로부터 최종적인 목표 노드로 이동하는 로봇 동작이다.

3.3.3 L^0 레벨에서의 작업 계획

- (2)의 과정과 같이 L^1 레벨에서의 작업 계획인 [GotoSpace(s1,s2), GotoSpace(s2,s3), GotoGoalNode]에 대한 세분화를 실행한다.
- GotoSpace(s1,s2)에 대한 세분화 결과는 GotoNode(n1,n2), GotoNode(n2,n4) 와 GotoNode(n4,n6)이고 GotoSpace(s2,s3)에 대한 세분화 결과는 GotoNode(n6,n7) 와 GotoNode(n7,n8)이다. 각 GotoNode 로봇 동작은 레벨 L^0 에서의 기본 단위 로봇 동작인 Turn과 Goto 로봇 동작으로 한번 더 세분화 된다. 마지막으로 GotoGoalNode 로봇동작에 대한 세분화된 작업 계획은 존재하지 않는다. 왜냐하면 GotoGoalNode 로봇 동작에 대한 초기 상태와 목표 상태는 모두 노드 n8이기 때문이다.

Plan at L^1			
GotoSpace(s1,s2)	FindObject(cup)	GotoSpace(s2,s1)	Report(cup)
Plan at L^0			
Happen(Turn(n4,left,164))	Happen(Turn(n7,right,76))	Happen(Turn(n5,right,174))	Happen(Turn(200,250,left,179))
Happen(Goto(n4,146))	Happen(Goto(n7,93))	Happen(Goto(n5,93))	Happen(Goto(200,250,146))
Happen(Turn(n5,right,79))	Happen(Turn(cup,right,6))	Happen(Turn(n4,left,76))	Happen(speak(cup))
Happen(Goto(n5,158))	Happen(RecgObject(cup))	Happen(Goto(n4,158))	

그림 6. Reported(cup)를 목표 상태로 레벨 L0 과 L1에서 생성된 작업 계획

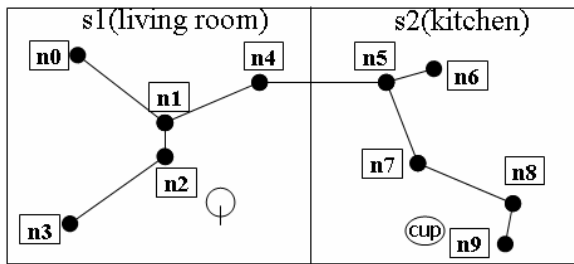


그림 7. 레벨 L0 과 L1 에서의 월드 모델. 로봇과 물체의 초기 상태



그림 8. 실험공간과 실험에 사용된 로봇

4. 실험

실험을 위해 세 가지 방식으로 계층적인 작업 계획기가 구현되었다. 월드 엘리먼트와 오퍼레이터의 추상화에 기반한 계층적인 작업 계획기(HiPAWO), 월드 엘리먼트의 추상화를 통한 계층적인 작업 계획기(HP) 그리고 오퍼레이터의 추상화를 통한 작업기(CA)가 구현되었고 논리 기반 작업계획 생성기로써는 모두 AEC 를 사용하였다.

공통적으로 요구되는 작업은 목표가 되는 물체를 찾고 원래의 위치로 다시 돌아와서 결과를 보고하는 것이다. 그림 7 은 레벨 L^0 과 L^1 의 월드 모델과 로봇과 물체의 초기 위치를 나타내고 있고 그림 8 은 실제 실험공간과 로봇에 대한 영상을 보여주고 있다. 단순화를 위해서 월드 모델은 레벨 L^0 와 L^1 두 개의 레벨만을 고려하였다. 그림 6 은 Reported(cup)를 목표 상태로 하여 레벨 L^1 에서의 추상화된 작업 계획과 레벨 L^0 에서의 상세화된 부속 작업 계획을 보여 주고 있다. 이 작업 계획에서 로봇은 목표 상태를 달성하기 위해 다섯 개의 노드(n4, n5, n7, n5 와 n4)를 향해하였다. 실험 시나리오를 고려할 때 작업 계획의 복잡성은 목표상태에 도달하기 위해 향한 노드의 개수에 비례한다. 왜냐하면 AEC 는 검색을 위한 전략으로 반복적 깊이 증가 탐색(iterative deepening) 알고리즘을 사용하기

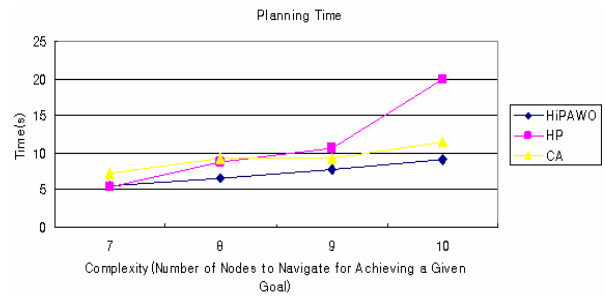


그림 9. 작업 계획 생성 시간의 비교

표 1. 트리의 깊이에 따른 계산 복잡도의 차이

Number of Trees	Branching Factor(b)	Depth(k)	Computational Complexity
1	2	12	16384
3	2	4	192

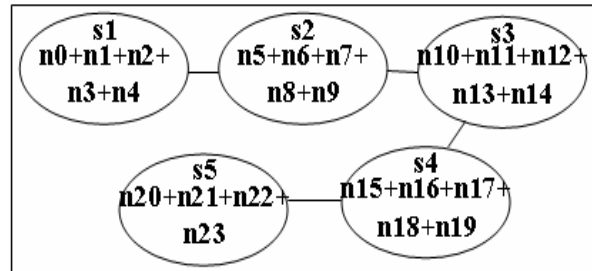


그림 10. 넓은 실험 환경

때문이다. 이 알고리즘의 계산 복잡도는 (8)과 같고 작업 계획에 포함된 로봇 동작의 개수에 비례하여 복잡성 (complexity)이 증가한다^[9].

$$b^k \left(\frac{b}{b-1}\right)^2$$

b : 가지수(branching factor), k : 깊이(depth) (8)

반복적 깊이 증가 탐색을 사용할 경우 표 1 에서 보여지는 것과 같이 한 트리의 깊이가 세 개의 트리 깊이의 합과 같은 경우 한 트리의 계산 복잡성은 세 트리의 계산 복잡도의 합보다 훨씬 크다. 따라서 세분화에 의해서 전체 작업 계획을 부분적으로 나누어서 생성하는 것은 전체 작업 계획을 한번에 생성하는 것보다 계산 복잡도가 줄어든다.

실험은 먼저 그림 7 과 같이 비교적 작은 환경에서 로봇이 향해해야 할 노드의 개수를 7 에서 10 까지 증가시키면서 이루어졌다. 그림 9 는 3 가지 작업 계획 방식의 작업 계획 시간을 비교하여 보여주고 있다. HP 의 경우 복잡성이 9 에서 10 으로 증가되는 구간에서 계산 복잡도가 지수적

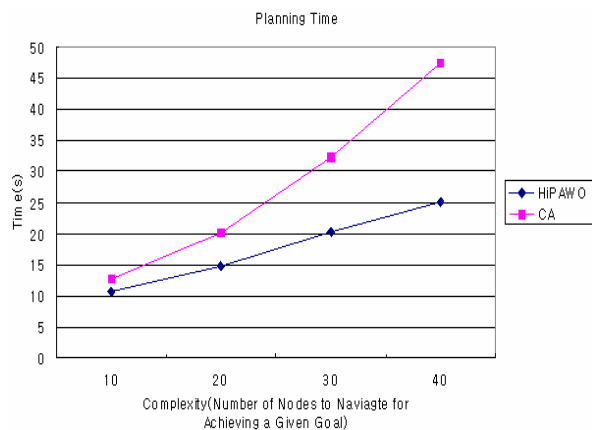


그림 11. 작업 계획 생성 시간의 비교

으로 증가하였고 HiPAWO 와 CA 의 경우에는 전구간에서 선형적으로 증가하였다. HP 는 추상화된 작업계획을 그 다음 하위 레벨의 작업 계획으로 세분화 한다. 하지만 복잡 로봇 동작의 계층적 분해 방법을 사용하지는 않는다. 이 경우에는 테이블 1 에서와 같이 하나의 추상화된 로봇 동작이 적은 수의 하위 로봇 동작으로 세분화 될 경우에만 효율성이 높고 세분화되는 로봇 동작의 개수가 늘어날수록 효율성은 지속적으로 낮아진다. 그림 9 에서 복잡성이 9 에서 10 으로 증가되는 구간에서는 사실 공간 s2 에서 로봇이 향해해야 하는 노드의 개수가 3 에서 4 로 증가하였다. 따라서 HP 의 경우에는 작업 계산에 소요되는 시간이 크게 증가되었다. 반면에 HiPAWO 와 CA 의 경우에는 복잡 로봇 동작의 계층적 분해과정을 통해서 부속 로봇 동작들을 효율적으로 결정하기 때문에 s2 에서 로봇이 향해해야 하는 노드의 개수가 늘어났지만 작업 계획에 소요되는 시간은 선형적으로만 증가했다.

다음으로는 HiPAWO 와 CA 만을 대상으로 그림 10 과 같이 비교적 넓은 환경에서 로봇이 향해해야 할 노드의 개수를 10 에서 40 까지 증가시키면서 이루어졌다. 환경은 다섯 개의 공간으로 이루어져 있고 각 공간은 다섯 개의 노드를 포함하고 있다. 그림 11 은 HiPAWO 와 CA 의 작업 계획 시간을 비교하여 보여주고 있다. 두 가지 방식 모두 전 구간에 걸쳐서 작업 계획 시간이 선형적으로 증가하고 있지만 복잡성이 증가할수록 HiPAWO 이 CA 에 비해 효율성이 뛰어난을 보여 주고 있다. 그 이유는 CA 가 전체 검색 공간에 기반하여 한번에 전체 작업 계획을 생성하는데 비하여 HiPAWO 는 HP 와 같은 방식으로 전체 검색 공간을 여러 개로 나누고 나뉘어진 각 검색 공간에서 복잡로봇 동작의 계층적 분해 과정을 통해서 세분화 과정을 진행하기 때문이다.

5. 결 론

본 논문에서 제안한 HiPAWO는 HWP의 확장된 모델이다. HiPAWO에서는 추상화된 작업 계획이 최상위 레벨의 월드 모델에 기반하여 생성되었다. 추상화된 작업 계획은 다음 하위 레벨의 월드 모델을 기반으로 하여 더 상세한 작업 계획으로 세분화된다. 이러한 과정은 최하위 레벨의 전체 작업계획을 한번에 생성하는 것 보다 효율적으로 작업 계획을 생성할 수 있다. 특별히 계층적인 도메인 이론이 본 논문에서 제안하는 JAH에 의해 설계되었다. 여기에는 의도적으로 중복된 로봇 동작들이 인접하고 있는 도메인 이론에 포함되어 두 도메인 물간의 관계성을 부여했다. 이와 같은 JAH에 의해서 세분화 과정이 복잡 로봇 동작의 계층적인 분해 과정을 통해서 이루어졌고 여러 개의 부속 로봇 동작으로 세분화 되어야 하는 경우에도 효율적으로 부속 로봇 동작을 결정할 수 있었다. 실험에서는 HiPAWO와 월드 엘리먼트의 추상화만을 통한 작업 계획기와 오퍼레이터의 추상화만을 사용한 작업 계획기의 작업 생성 시간을 비교하여 제안하는 방법의 효율성을 증명하였다

참 고 문 헌

- [1] C. Galindo, J.A. Fernández-Madriral, J. González, "Improving Efficiency in Mobile Robot Task Planning Through World Abstraction", IEEE Transactions on Robotics, vol. 20, 2004
- [2] M.P. Shanahan, An Abductive Event Calculus Planner, Journal of Logic Programming, 1999.
- [3] M. Ghallab, D. Nau, and P. Traverso. Automated Planning. Morgan Kaufmann Publishers, May, 2004.
- [4] A. Botea, M. Enzenberger, M. Muller, and J. Schaeffer. Macro-FF: Improving AI Planning with Automatically Learned Macro-Operators. J. Artif. Intell. Research 24, 2005.
- [5] J. O. Wallgrün, "Hierarchical Voronoi-based Route Graph Representations for Planning, Spatial Reasoning, and Communication", In Patrick Doherty (Ed.), Proceedings of the 4th International Cognitive Robotics Workshop, 2004
- [6] R Kowalski and M Sergot, A Logic-Based Calculus of Event, New generation Computing, vol 4 (1996).
- [7] A. L. Blum and M. L. Furst, "Fast planning through planning graph analysis," Artif. Intell., vol. 90, pp. 281-300, 1997.
- [8] J. Hoffmann and N. Bernhard, "The FF planning system: Fast plan generation through heuristic search," J. Artif. Intell. Res., vol. 14, pp. 253-302, 2001.

- [9] D.Poole, A. Mackworth and R. Goebel, Computational Intelligence: a Logical Approach, Oxford University Press (1998).
- [10] S. Vasudevan, S. Gachter, M. Berger, and R. Siegwart, Cognitive maps for mobile robots an object based approach, in In Proc. of the IEEE/RSJ IROS 2006 Workshop: From Sensors to Human Spatial Concepts, Beijing, China, 2006.



박 영 빈

- 2001 한양대학교 사회학과 (문학사)
- 2007 한양대학교 일반대학원 전자컴퓨터통신공학전공(공학석사)

2007~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 박사과정
 관심분야: 인공지능



서 일 홍

- 1977 서울대학교 전자공학과 (공학사)
- 1979 한국과학기술원 전기 및 전자공학(공학석사)
- 1982 한국과학기술원 전기 및 전자공학(공학박사)

1985~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수
 관심분야: 지능응용시스템, 인공지능, 로봇공학



최 병 옥

- 1969~1973 한양대학교 전자공학과(공학사)
- 1976~1978 일본 게이오대학교 전기공학(공학석사)
- 1978~1981 일본 게이오대학교 전기공학(공학박사)

1979~1979 (일본)KDD 위촉연구원
 1981~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수
 관심분야: 컴퓨터 비전, 인공지능