

작업의 하위 목표의 예상 효과를 반영한 유틸리티 기반의 작업 계획

김은지*^{****}, 유인식**^{*}, 김창수*^{*}, 박성기***^{*}

*고려대학교 전기전자공학과

**서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과

***한국과학기술연구원 치매 DTC 융합연구단

e-mail : pupuchh@kist.re.kr, youin10uosai@gmail.com, changsukim@korea.ac.kr, skee@kist.re.kr

Utility-based task planning reflecting the anticipated effects of sub-goals

Eun-Ji Kim*, In-sik Yu**, Chang-Su Kim***, Sung-Kee Park*

* School of Electrical Engineering, Korea University

**Electrical and Computer Engineering, University of Seoul

***Center for Robotics Research, Korea Institute of Science and Technology

요 약

지능형 서비스 로봇의 불확실한 작업 환경과 작업에 대한 요구사항의 증가는 작업 계획(task planning)의 어려움을 증가시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 PRS (Procedural Reasoning System)를 이용한 작업 계획이 제안되어 작업 환경의 동적 변화에는 효율적으로 대응할 수 있게 되었으나, 작업의 요구사항의 증가에 따른 하위 계획의 복잡성은 아직도 해결해야 할 문제로 남아 있다. 본 논문에서는 요구된 작업의 하위 목표(sub-goals)와 속성을 고려하여 계획 후보들의 예상 유용성을 계산할 수 있는 유틸리티 함수를 기반으로, 보다 간결한 방식의 작업 계획을 수립하는 방법을 제안한다. 또한 제안한 작업 계획의 적용 가능성을 확인하기 위하여 로봇 서비스 시나리오를 구성하고 실험을 통하여 그 유용성을 검증한다.

1. 서론

최근 지능형 서비스 로봇의 작업에 대한 요구 사항이 다양해지고 기대가 높아지면서 만족해야 할 작업 계획(task planning) 또한 그 복잡성이 증가해 왔다 [1, 2]. 고품질의 작업을 수행하기 위해서는 동적이고 불확실한 상황에서 미래의 사건과 상황을 예상하여 목표를 달성하기 위한 행동 계획을 형성할 수 있어야 한다. 이와 같은 요구사항을 해결하기 위한 방법으로 절차적 추론 시스템(PRS : Procedural Reasoning System)이 제안 되었으며[3, 4], 이는 동적 환경에서 복잡한 작업을 수행 할 수 있는 실시간 추론 시스템을 핵심으로 하고 있다. 목표가 주어지면 미리 완전한 계획을 생성하는 전통적인 계획자와는 달리, PRS는 현재의 내부 상태의 추론을 이용해 실시간으로 상황에 적절한 계획 및 행동을 선택한다. 이와 같은 PRS의 특징은 동적이고 복잡한 작업의 환경에서 작동하는 지능형 서비스 로봇에 유용하며, 지능형 로봇에서 PRS를 적용하기 위한 몇몇의 연구도 수행되었다[5-7].

절차적 추론 시스템을 응용한 작업 계획이라 하더라도 작업의 복잡도 문제는 해결되어야 할 과제이다. 일반적으로 로봇에게 요구되는 작업의 복잡도는 작업의 맥락적 조건들의 다양함에 따라 급증하고, 그에

따라 선택될 수 있는 하위 목표의 계획의 수도 증가하게 된다. 작업 계획은 이들 중 현재 상황에서 최적의 방법으로 하위 목표를 달성할 수 있는 계획을 선택해야 한다. 이를 위해 PRS 기반 지능형 에이전트 JAM[8]에서는 유틸리티[9]라는 기능을 도입 했다. JAM에서는 유틸리티를 별도의 계산적 컴포넌트를 이용하여 결정하지 않고 계획 라이브러리의 내부에 정적으로 명시하여 사용한다. 이러한 방법은 작업의 요구 사항이 증가하고 환경이 변화하게 되면, 그에 맞추어 계획 라이브러리를 수정 및 추가해야 되기 때문에 계획의 재사용 및 확장이 용이 하지 않다[10].

본 논문에서는 하위 계획 후보들의 예상 효과와 실시간으로 변화하는 월드 모델의 맥락적 정보를 융합한 유틸리티 결정 함수를 제안하고, 이를 이용해서 현재 상황에 적절한 하위 계획을 선택하게 함으로써 보다 간결하고 확장이 용이한 작업 계획 방법을 제안한다. 제안한 작업 계획의 적용 가능성을 확인하기 위하여 로봇 시나리오를 구성하였고, 실험 결과 인위적인 개입 없이 하위 목표의 유틸리티를 결정하여 최소한의 계획 라이브러리로 상황에 적절한 하위 목표를 선택할 수 있음을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 유틸리티 기반 작업 계획 구조, 계획 후보들의 유틸리티 결정 알고리즘과 작업 속성 모델에 대해 살펴본다. 3

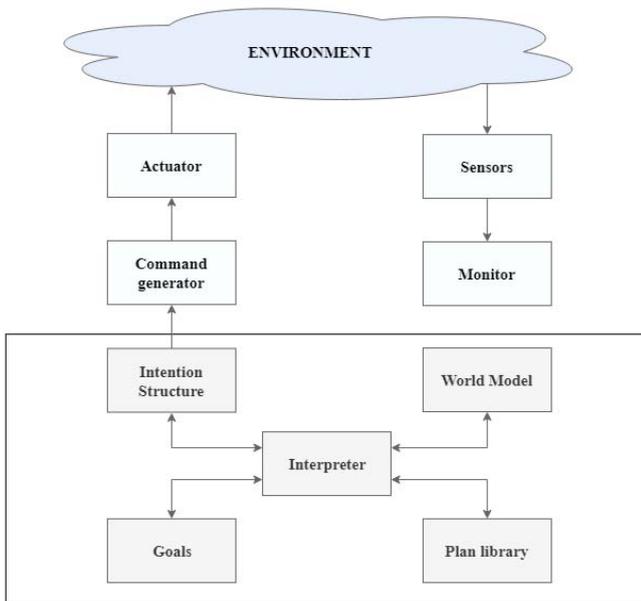
절에서는 작업 계획 유용성 검증을 위한 서비스 로봇 시나리오와 실험 결과에 대해 설명한다. 마지막 절에서는 본 논문의 결론과 향후 연구에 대해 기술한다.

2. 제안하는 방법

2.1 유틸리티 기반 작업 계획

본 논문에서 제안한 작업 계획은 절차적 추론 시스템(PRS)에 기반을 두고 있다. 그림 1은 절차적 추론 시스템의 전반적인 개요도이다. PRS는 기본 구성은 월드모델(World model), 목표(Goals), 계획 라이브러리(Plan library), 의도 구조(Intention Structure), 인터프리터(Interpreter)로 이루어져 있다. 각 기능의 설명은 아래와 같다.

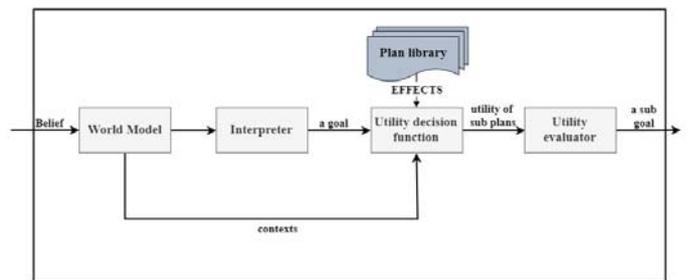
- 월드 모델 (World model): 세계에 대한 내부 믿음 상태를 나타내는 저장소
- 목표(Goals): 현재의 상황에서 작업 계획이 실현해야 할 목표
- 계획 라이브러리(Plan library): 특정 상황에서 주어진 목표를 달성하기 위한 일련의 하위 수준의 동작들이 명시된 계획 모음
- 의도 구조(Intention Structure): 현재 및 최종 실행을 위해 선택된 계획을 관리
- 인터프리터(Interpreter): 월드 모델의 상태를 유지하고, 작업 계획 추론 및 관리하는 매커니즘



(그림 1) 절차적 추론 시스템 (PRS) 개요도

본 논문에서는 PRS에 유틸리티 결정 함수(Utility decision function)와 유틸리티 평가기(Utility Evaluator)를 추가함으로써 보다 더 간결한 유틸리티 기반 작업 계획 방법을 제안한다. 유틸리티 기반 작업 계획에서 주어진 목표를 도달하기 위해 하위 목표를 선택하는 과정은 그림 2와 같다. 작업 계획의 믿음 상태의 변화로 월드 모델이 변경이 되면 인터프리터는 월드 모델의 변경사항을 감지하고 달성해야 하는 목표를 갱신한다. 그 후, 인터프리터는 계획 라이브러리에서 주

어진 목표 달성과 관련된 계획을 검색한다. 목표 달성과 관련된 계획이 존재하면, 유틸리티 결정 함수는 주어진 목표를 달성하기 위해 선택될 수 있는 하위 목표 계획들의 적절성을 비교한다. 이를 위하여 유틸리티 결정 함수는 계획 라이브러리에서 하위 계획 후보들의 예상 효과에 대한 정보를 획득하고 세계 모델에서 현재 상황에서 주어진 목표를 도달하기 위해 고려해야 하는 상황 정보(contexts)를 획득한다. 그 후, 계획 후보들의 예상 효과들과 상황정보를 이용하여 계획 후보들의 유틸리티를 결정한다. 각 하위 계획 후보들의 유틸리티 결정 후, 유틸리티 평가기는 하위 목표의 계획 후보들 중 가장 높은 유틸리티에 해당하는 계획이 현재 상황에서 가장 합리적이라고 판단하여 해당 계획 후보를 선택한다. 의도 구조는 선택된 계획에 명시되어 있는 일련의 동작들을 수행하여 하위 목표를 달성한다.



(그림 2) 하위 목표의 계획 선택 과정

2.2 작업 속성 모델 정의

<표 1> 세계 모델에 저장된 작업 속성 모델

Robot's beliefs about contexts of goal		
Guide_Exercise	(context_list	(cardiorespiratory_endurance "increase" 1) (body_balance "increase" 1) (arthrodynia "decrease" 1)
Propose_task	(context_list	(helplessness "decrease" 1) (concentration "increase" 1)
Relieves_stress	(context_list	(helplessness "decrease" 1) (stress "increase" 2)
Relieves_depress	(context_list	(depression "decrease" 2) (stress "decrease" 1) (concentration "decrease" 1)

주어진 작업을 합리적인 방법을 수행하기 위해서는 각 작업에서 요구되는 맥락적 정보(contexts)의 속성들을 고려해야 한다. 복잡한 작업 일수록 요구되는 속성들이 증가하며, 이들의 일부는 상호 배타적이기 때문에 어떤 속성을 추구할 것인지에 대한 결정이 요구된다[11]. 본 논문에서는 주어진 작업이 달성이 되었을 때 선택적으로 요구되는 월드 모델의 맥락적 정보의 상태 변화와, 각 맥락적 정보의 상태에 대한 선호도를 정의하였고, 이를 작업 속성 모델이라고 명칭한다.

표 1은 월드 모델에 저장된 작업 속성 모델의 예시이다. 작업 속성 모델은 최상위 목표(top-goal), 작업에서 요구하는 상황 정보(context), 각 상황에 대한 선호도(preference) 구성되어 있다. 최상위 목표는 작업 계획이 최종적으로 실현해야 하는 작업이다. 상황 정보는 작업이 달성 되었을 때 요구하는 속성들이고, 각

속성을 얼마만큼 원하는지에 대한 가중치는 선호도를 통해서 나타낸다. 작업 속성 모델은 월드 모델에 저장되고, 동적인 특성을 갖고 있기 때문에, 상황에 따라 변화 할 수 있다. 작업 속성 모델을 하위 목표의 계획 후보들의 유틸리티를 결정하기 위하여 사용된다.

2.3 하위 계획의 유틸리티 결정 방법

```

EFFECTS :

UPDATE ([context 1] ($before 1) [context 1] ($after 1))
UPDATE ([context 2] ($before 2) [context 2] ($after 2))
...
UPDATE ([context M] ($before M) [context N] ($after M))
    
```

(그림 3) 계획 모델의 EFFECTS 예시

현재 상황에서 가장 합리적인 방법으로 하위 목표를 달성하기 위해서는 하위 목표의 계획 후보들의 예상 효과들을 고려해야 한다. 계획 후보들의 예상 효과들은 계획 라이브러리 내부의 EFFECTS 에 명시한다. EFFECTS 의 예시는 그림 3 과 같다. EFFECTS 는 상황 정보, 상황 정보의 이전 상태, 계획이 완료 되었을 때 월드 모델에 갱신할 상태로 구성된다. EFFECTS 가 명시되어 있는 계획 후보가 선택되어 실행이 완료되면, 월드 모델의 상태가 EFFECTS 에 명시된 내용을 기반으로 변경된다.

현재상황에 가장 적합한 방법으로 하위 목표를 달성하기 위하여 다중 특성 유틸리티 이론[11, 12]을 바탕으로 작업 속성 모델과 계획의 예상 효과들을 바탕으로 계획 후보들의 예상 유틸리티를 결정한다. 요구되는 작업의 속성들은 $X = X_1, \dots, X_n$ 으로 표기하고, 속성들의 상태는 $x = \langle x_1, \dots, x_n \rangle$, 작업에서 각 속성을 선호하는 정도를 $w = \langle w_1, \dots, w_n \rangle$ 으로 표기한다. 하위 목표의 계획들의 예상 효과들을 기준으로 유틸리티를 결정하기 위하여 계획들의 EFFECTS 에 명시된 상황 정보들은 $C = C_1, \dots, C_k$ 으로 표기하고, 상황 정보들의 예상 상태 변화를 $x = \langle x_1, \dots, x_k \rangle$ 으로 표기한다. 상황 정보와 목표들의 상태는 의미론적인 표현을 사용하고, 작업의 속성에 대한 선호도는 이산적인 수치로 표현한다. 하위 계획의 후보가 선택될 확률은 $Pr(S_i)$ 로 표기하고, 본 논문에서 계획들이 선택될 확률은 모두 동일하다고 가정했다. $Pr(S_1) = Pr(S_2) = \dots = Pr(S_i)$ 하위 계획 후보의 유틸리티를 결정하기 위하여 요구되는 작업의 속성과 계획의 예상 효과와의 관계를 v_i 로 표현한다. 작업의 속성과 계획의 예상 효과 간의 관계가 없으면 0, 계획의 예상 효과와 작업의 속성이 같은 상태를 추구하면 1, 서로 상충 되는 상태를 추구하면 -1로 v_i 를 설정한다.

$$f_i(x_i) = \begin{cases} v_i, & X_i \in C \\ 0, & X_i \notin C \end{cases}$$

작업 후보의 유틸리티는 작업의 속성과 계획의 예상 효과 간의 관계를 나타내는 v_i 에다가 각 속성의 선호도를 곱한 후, 모두 더한 값이 하위 계획 후보의 유틸리티로 결정된다.

$$U(a_k) = \sum_i^n (f_i(x_i) \cdot w_i) * p_i$$

3. 실험

3.1 실험 시나리오

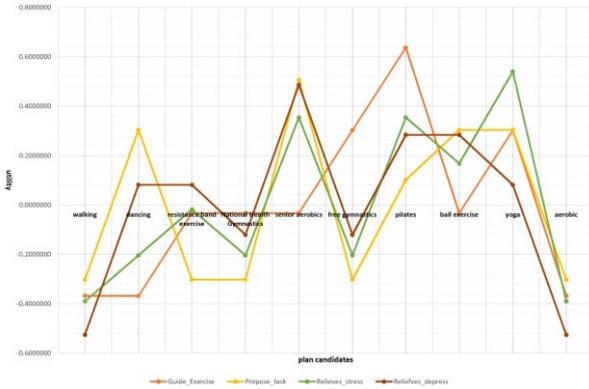
작업 계획을 생성할 때 인위적인 개입 없이 실시간으로 변화하는 작업의 특성들을 반영하여 합리적인 방법으로 요청한 작업을 수행할 수 있어야 한다. 이를 증명하기 위해 본 논문에서는 PRS 기반 지능형 에이전트 JAM 을 이용하여 실제 케어 로봇[13]의 작업 관리자에 유틸리티 기반 작업 계획 구현했다. 실험의 시나리오는 4 개의 서비스 시나리오로 구성된다. 각 시나리오에서 요구되는 작업의 속성은 모두 다르며, 시나리오들은 모두 신체적 활동 안내 라는 공통된 하위 목표를 포함하고 있다. 신체적 활동은 예상 효과가 모두 다른 10 개의 하위 계획 후보가 존재하며, 각 하위 계획 후보들의 계획 라이브러리에 설계 된 전제 조건은 모두 같으며, 최소한의 개수로 계획 라이브러리가 설계 되어 있다. 실험의 시나리오는 ‘노인 맞춤형 운동 서비스’를 참고하여 설계 했다 [14, 15].

표 1 은 4 개의 시나리오에 대한 작업 속성 모델이다. 각 시나리오의 최상위 목표(top-goal)는 Guide Exercise (사용자의 건강을 위한 운동 안내 서비스), Propose task (로봇이 선제적으로 제안하는 서비스), Relieve stress (사용자 스트레스 해소를 위해 제안하는 서비스), Relieve depress (사용자의 우울증 개선을 위해 제안하는 서비스)로 구성되어 있다. 각 시나리오에서 달성해야 하는 하위 목표인 신체적 운동 안내의 계획 후보들의 EFFECTS 는 표 2 와 같다.

<표 2> 신체적 운동 안내의 후보 계획들과 EFFECTS

Guide physical activity	EFFECTS
walking	UPDATE (cardiorespiratory_endurance(\$w_k) (cardiorespiratory_endurance("increase"))); UPDATE (low_body_endurance(\$w_k) (low_body_endurance("increase")));
dancing	UPDATE (cardiorespiratory_endurance(\$w_k) (cardiorespiratory_endurance("increase"))); UPDATE (low_body_endurance(\$w_k) (low_body_endurance("increase")));
resistance band exercise	UPDATE (cardiorespiratory_endurance(\$w_k) (cardiorespiratory_endurance("increase"))); UPDATE (low_body_endurance(\$w_k) (low_body_endurance("increase"))); UPDATE (upper_body_endurance(\$w_k) (upper_body_endurance("increase"))); UPDATE (body_flexibility(\$w_k) (body_flexibility("increase"))); UPDATE (arthrodynia(\$w_k) (arthrodynia("decrease")));
National Health Gymnastics	UPDATE (body_balance(\$w_k) (body_balance("increase"))); UPDATE (body_flexibility(\$w_k) (body_flexibility("increase")));
senior aerobics	UPDATE (low_body_endurance(\$w_k) (low_body_endurance("increase"))); UPDATE (upper_body_endurance(\$w_k) (upper_body_endurance("increase"))); UPDATE (body_balance(\$w_k) (body_balance("increase"))); UPDATE (helplessness(\$w_k) (helplessness("decrease"))); UPDATE (depression(\$w_k) (depression("decrease"))); UPDATE (stress(\$w_k) (stress("decrease")));
free gymnastics	UPDATE (cardiorespiratory_endurance(\$w_k) (cardiorespiratory_endurance("increase"))); UPDATE (low_body_endurance(\$w_k) (low_body_endurance("increase"))); UPDATE (upper_body_endurance(\$w_k) (upper_body_endurance("increase"))); UPDATE (body_balance(\$w_k) (body_balance("increase"))); UPDATE (body_flexibility(\$w_k) (body_flexibility("increase")));
pilates	UPDATE (cardiorespiratory_endurance(\$w_k) (cardiorespiratory_endurance("increase"))); UPDATE (low_body_endurance(\$w_k) (low_body_endurance("increase"))); UPDATE (upper_body_endurance(\$w_k) (upper_body_endurance("increase"))); UPDATE (body_balance(\$w_k) (body_balance("increase"))); UPDATE (body_flexibility(\$w_k) (body_flexibility("increase"))); UPDATE (concentration(\$w_k) (concentration("increase"))); UPDATE (arthrodynia(\$w_k) (arthrodynia("decrease"))); UPDATE (stress(\$w_k) (stress("decrease")));
ball exercise	UPDATE (cardiorespiratory_endurance(\$w_k) (cardiorespiratory_endurance("increase"))); UPDATE (body_flexibility(\$w_k) (body_flexibility("increase"))); UPDATE (body_flexibility(\$w_k) (body_flexibility("increase"))); UPDATE (stress(\$w_k) (stress("decrease")));
yoga	UPDATE (cardiorespiratory_endurance(\$w_k) (cardiorespiratory_endurance("increase"))); UPDATE (arthrodynia(\$w_k) (arthrodynia("decrease"))); UPDATE (helplessness(\$w_k) (helplessness("decrease"))); UPDATE (stress(\$w_k) (stress("decrease")));
aerobic	UPDATE (cardiorespiratory_endurance(\$w_k) (cardiorespiratory_endurance("increase"))); UPDATE (body_flexibility(\$w_k) (body_flexibility("increase")));

3.2 실험 결과 분석



(그림 4) 하위 계획 후보들의 유틸리티 그래프

4 가지 시나리오의 속성을 고려한 하위 목표의 계획 후보들의 유틸리티는 그림 4 와 같다. Guide Exercise 는 신체적 건강 증진과 연관된 속성들을 요구한다. 신체적 건강에 긍정적인 예상 효과의 계획 후보들이 상대적으로 높은 유틸리티가 결정됨을 확인할 수 있다. 그 외의 나머지 시나리오들은 정서와 관련된 속성을 선호 하는데 3 가지 시나리오 모두 우울, 스트레스 해소 등 정서적 속성에 긍정적인 계획 후보의 유틸리티가 높은 것을 확인할 수 있었다. 실험 결과 각 시나리오의 하위 목표를 달성하기 위해 선택된 계획 후보와 유틸리티는 표 3 과 같다. 본 실험을 통해 인위적인 개입 없이 최소한의 계획 라이브러리로 작업의 속성을 고려한 최적의 계획을 선택하는 것을 확인 하였다.

<표 3> 최종적으로 선택된 하위 계획과 결정된 유틸리티

Top-Goal	Selected plan	Utility
Guide_Exercise	pilates	0.6368814
Propose_task	senior aerobics	0.5050763
Relieves_stress	yoga	0.5394474
Relieves_depress	senior aerobics	0.4858658

4. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 간결하고 유연한 작업 계획 수립을 위하여 하위 목표 계획의 예상 효과들을 이용하여 유틸리티를 결정하여 작업 계획을 수립하는 방법을 제안하였다. 실제 지능형 케어 서비스의 시나리오를 구성하여 적용 가능성을 실험하였으며, 실험 결과 작업의 속성들과 예상 효과들을 실시간으로 반영하여 유틸리티를 계산하고 이를 기반하여 적합한 계획을 선택하여 하위 목표를 달성하는 것을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 유틸리티 기반 작업 계획 수립 방법은 지능형 서비스 로봇의 작업을 유연하고 효율적으로 수행하는데 긍정적인 영향을 미칠 것으로 예상된다.

향후 연구에서는 로봇의 작업에서 일반적으로 요구하는 작업의 속성과 사용자의 선호도, 질병 등의 개인적인 특성을 함께 고려하여 최적의 방법으로 사용자의 요구사항을 달성할 수 있는 작업 계획 수립 방

법을 연구할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 국가과학기술연구회의 융합 연구단 사업 (No. CRC-15-04-KIST)와 산업통상자원부의 연구 과제 (No.10060086)의 지원을 받아 수행한 내용임

참고문헌

- [1] K. Kawamura and M. Iskarous, "Trends in service robots for the disabled and the elderly," in *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)*, 1994, vol. 3: IEEE, pp. 1647-1654.
- [2] R. Reddy, "Robotics and intelligent systems in support of society," *IEEE Intelligent Systems*, vol. 21, no. 3, pp. 24-31, 2006.
- [3] M. P. Georgeff and A. L. Lansky, "Procedural knowledge," *Proceedings of the IEEE*, vol. 74, no. 10, pp. 1383-1398, 1986.
- [4] F. F. Ingrand, M. P. Georgeff, and A. S. Rao, "An architecture for real-time reasoning and system control," *IEEE expert*, vol. 7, no. 6, pp. 34-44, 1992.
- [5] M. P. Georgeff and A. L. Lansky, "Reactive reasoning and planning," in *AAAI*, 1987, vol. 87, pp. 677-682.
- [6] F. Ingrand and M. Georgee, "Managing deliberation and reasoning in real-time AI systems," 1990.
- [7] J. Lee, M. J. Huber, E. H. Durfee, and P. G. Kenny, "UM-PRS: An implementation of the procedural reasoning system for multirobot applications," 1994.
- [8] M. J. Huber, "JAM: A BDI-theoretic mobile agent architecture," in *Proceedings of the third annual conference on Autonomous Agents*, 1999: ACM, pp. 236-243.
- [9] G. Debreu, "Representation of a preference ordering by a numerical function," *Decision processes*, vol. 3, pp. 159-165, 1954.
- [10] 유인식, 최병기, 조한열, and 이재호, "지능형 로봇의 Task Management 지원을 위한 Task Reasoner 요구사항 분석," *한국정보과학회 학술발표논문집*, pp. 929-931, 2018.
- [11] R. L. Keeney and H. Raiffa, *Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs*. Cambridge university press, 1993.
- [12] J. S. Dyer and R. K. Sarin, "Measurable multiattribute value functions," *Operations research*, vol. 27, no. 4, pp. 810-822, 1979.
- [13] H. Jeon, K.-M. Yang, S. Park, J. Choi, and Y. Lim, "An Ontology-based Home Care Service Robot for Persons with Dementia," in *2018 27th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, 2018: IEEE, pp. 540-545.
- [14] 김창환, "노인 맞춤형 운동처방 서비스 매뉴얼," *보건복지부*, 2011.
- [15] 전병주, "노인 맞춤형 운동처방 서비스가 삶의 질에 미치는 효과," *한국노년학*, vol. 33, no. 2, pp. 239-255, 2013.