

대규모 인지 시스템을 위한 정성적 지식 모델의 개발

A Qualitative Knowledge Model for Large Scale Cognitive System

김 현 경*
(Hyeon Kyeong Kim)

요약 유연성과 광범위성을 갖는 대규모 인지 시스템의 구축을 위해서는 전문적인 지식 뿐 아니라 상식 수준의 지식을 포함한 대용량 지식베이스의 구축이 필수 불가결하다. 이를 위해서는 효율적인 지식 표현 및 추론 기법이 핵심적 역할을 하게 될 것이다. 본 논문에서는 정성적 지식 표현 및 추론 기법을 이미 구축된 범용의 대용량 Cyc 지식베이스와 접목하여, 일상의 상식적인 추론을 제공할 수 있는 인지 시스템을 소개한다. 본 시스템은 구현되어 여러 예제에 적용되어 그 실효성을 입증할 수 있었다.

주제어 인지 시스템, 정성적 추론, 정성적 공간 추론

Abstract To develop a cognitive system with the flexibility and breadth of human, it's very important to construct a large scale knowledge base which include commonsense knowledge as well as expert knowledge. Efficient knowledge representation and reasoning techniques will play a key role for this. This paper introduce a cognitive system which is based on Cyc knowledge base and augmented with our work on qualitative and spatial representation and reasoning. Our system has been implemented and tested on various examples.

Keywords cognitive system, qualitative reasoning, qualitative spatial reasoning

1. 서론

인간과 비슷한 수준의 깊이와 광범위성을 갖는 인지 시스템의 개발은 인지과학의 최종 목표의 하나이다. 이러한 시스템은 단순히 주어진 임무만을 수행하는 도구가 아닌 교육, 공학, 사회과학 등 광범위한 분야에서 사용자에게 전문적인 지식을 제공하는 보조자로서의 역할을 하게 될 것이다. 이를 위해서는 끊임없이 변화하는 환경에 적응하며 학습할 수 있는 능력이 핵심적인 역할을 하리라 사료된다. 이와 함께 학습과 추론을 위한 효율적인 지식 표현 및 대용량의 지식 베이스의 구축이 필수 불가결하다. 또한 클러스터 컴퓨터에 기초한 병렬 처리를 위한 하드웨어 지원도 필요하리라 예상된다.

1.1 정성적 추론

광범위한 분야에서 유연성을 갖춘 시스템을 구축하기 위해서는 지식 베이스 구축에 있어서 전문적인 지식 뿐 아니라, 물 컵을 쏟으면 물이 흘러나오는 것과 같은 상식적인 수준의 지식도 포함되어야 할 것이다. 사람들은 정량

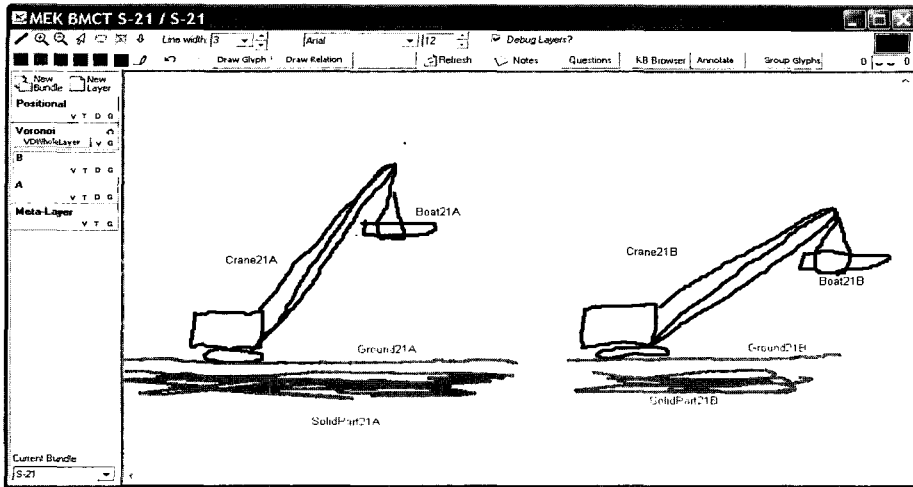
적인 지식의 사용 없이 정성적, 상식적인 지식을 사용하여 물을 끓이는 것과 같은 일상의 물리적 현상을 예측하고, 설명한다. 사람들이 자연 세계(physical world)를 추론하는데 사용하는 모델을 멘탈 모델이라 한다[1]. 전산학에서 시작된 정성적 추론(qualitative reasoning)은 멘탈 모델을 컴퓨터 시스템으로 구현하기 위한 시도에서 출발하였다고 볼 수 있다 [2,3,4]. 정성적 지식 표현 및 이에 근거한 추론 기법은 인간의 멘탈 모델을 표현하는데 기초를 제공할 수 있으리라 사료된다.

정성적 추론의 기초가 되는 정성적 물리학(qualitative physics)은 자연 세계에 대한 정성적, 직관적인 지식을 밝혀내어 프로그래밍하고자 하는 목표를 갖고 연구되어 왔다. 정성적 물리학의 핵심은 파라미터의 정성적 표현, 부분적이거나 완벽하지 않은 데이터의 표현 및 추론이라 할 수 있다. 다양한 추론 기법 및 정성적 모델의 개발을 통해, 공학, 생태, 교육, 금융 등 다양한 응용 분야에서 효율적 컴퓨터 시스템을 개발하는데 사용되어 졌다 [5].

1.2 대용량 지식 베이스

대규모의 지식 베이스를 구축하는 데 있어, 개인이나 실험실 단위로 구축하는 것은 한계가 있을 수밖에 없다. 이미 구축된 범용의 대규모 지식베이스를 토대로 새로운 지

* 한신대학교 정보통신학과
경기도 오산시 양산동 411번지
hkim@hs.ac.kr



(그림 1) 어떤 크레인이 더 쉽게 뒤집어 질까?

식을 추가하여 확장하여 사용할 수 있다면, 광범위한 규모의 인지 시스템 개발에 최선이 될 것이다. 현재까지 대규모의 포괄적인 지식 베이스를 구축하고자 하는 다양한 시도가 있었으며, Cyc가 이러한 노력을 선도하고 있다 [6,7,8].

Cyc corp.는 1984년 이후로 광범위한 영역의 인간 지식을 최적으로 코드화 한다는 목표 하에 몇 세기의 맨파워를 요구하는 방대한 분량의 지식베이스를 구축해 왔다. Cyc 지식베이스는 기본적인 상식 수준의 인간 지식을 포함하고 있는 초용량의 지식베이스로서 일상생활의 현상, 사건 등의 추론을 위한 토대를 제공하고 있다. 지식베이스는 수 천 개의 *microtheories*로 나누어져 있으며, 각각의 *microtheory*는 특정분야의 지식을 포함하고 있다. 상식은 모든 사람이 갖고 있는 지식이나, 반드시 기록될 필요는 없는 지식이라 할 수 있다. 예를 들어 그릇이 뒤집히면 그 안에 담겨있던 내용물이 나오게 된다는 사실은 책이나, 사전에서 찾아보기 힘들다. 그러나 사람과 유사한 인지 능력을 갖는 시스템을 구축하기 위해서는 모든 사람이 알고 있다고 가정하고 있는 이러한 상식적인 지식을 밝혀내어 코드화 하여 지식베이스에 저장하는 것이 필수불가결하다.

1.3 연구의 목표

본 연구의 최종 목표는 유사 학습, 정성적 추론, 대용량 지식베이스에 기초하여 예측, 설명, 진단 등 다양한 문제 해결 방식을 제공할 수 있는 대규모 인지 시스템을 개발하는 것이다. 본 논문에서는 학습 능력을 갖춘 대규모 인지 시스템의 구축의 기초가 되는 부트스트랩 시스템을 소개하고자 한다. 부트스트랩 시스템은 최소한의 기본적인 지

식을 갖고 있는 시스템이라 할 수 있다. 이러한 기본적인 지식은 학습되어지지 않으며, 이러한 기초 지식에 근거하여 새로운 지식이 학습되어 시스템에 추가된다. 본 논문에서는 (그림 1)에서와 같은 일상의 물리적 추론(*everyday physical reasoning*)을 위한 정성적 모델의 대규모 지식베이스 개발에 초점을 두고 설명하고자 한다. 2장에서는 본 시스템에 대한 개요를 소개하였다. 3장에서는 Cyc 지식베이스에 기초한 시스템의 정성적 지식 베이스 구축에 대하여 설명하였으며, 4장에서는 예제를 소개하였다. 마지막으로 결론 및 향후 과제를 제시하였다

2. 시스템 개요

Companion[9]은 전문가 수준의 도움을 줄 수 있는 인지 시스템 개발이라는 목표 하에 개발되고 있는 시스템이다. 사람이 갖고 있는 워킹 메모리의 한계, 편견 등의 제약점을 극복하고, 유사 학습을 통해 유연성과 넓이를 갖는 시스템을 지향하고 있다. 현재 병렬 처리를 지원하기 위해 10개의 CPU로 구성된 클러스터 컴퓨터에 기초한 분산 에이전트 구조를 구축하고 있으며, EPR(*Everyday Physical Reasoning*)과 TDG(*Tactical Decision Game*) 도메인에서 부트스트랩 시스템을 개발되고 있다.

본 장에서는 EPR(*Everyday Physical Reasoning*)의 부트스트랩 시스템에 대하여 소개하고자 한다. EPR은 우리가 일상에서 만나는 상황에 대한 정성적 추론을 제공하는 시스템이다. EPR은 기본적으로 사용자 인터페이스, 정성적 미캐닉스 추론기관(QM: *qualitative mechanics reasoner*)으로 구성되어 있다. 사용자 인터페이스로는 현재 *Northwestern*

대학의 Qualitative Reasoning Group(QRG)에서 개발 중인 sKEA[10]가 사용되어 지고 있으며, 사용자는 주어진 상황을 스케치를 통해 입력할 수 있게 하고자 한다 (그림 1). 또한 텍스트를 통해서도 상황을 묘사할 수 있다. QM은 지식베이스와 추론 엔진으로 구성되어 있다. 지식베이스에는 분야 모델 및 추론을 위한 지식이 저장되어 있으며, Cyc 지식베이스에 기초하여 구축하였다. 분야 모델에는 자연 세계에 대한 일상적인, 상식 수준의 추론을 위해 정성적 지식이 코드화 되어있다. 추론 엔진으로는 대용량의 지식베이스에 적합하도록 QRG에서 개발하고 있는 FIRE를 사용하고 있다. 대용량의 지식베이스를 사용할 때의 가장 중요한 문제는 추론 과정을 효율적이고, 제어가 가능하게 유지하는 것이다. 가장 일반적인 문제점은 추론 과정에서 쉽게 길을 잃어버리고 마는 것이다. FIRE는 이를 극복하기 위하여 분할 후향 추론 방식을 채택하여 워킹 메모리의 폭발적 증가를 줄이고자 하였다. EPR에서는 FIRE에 비교 분석(DQ Analysis: Differential Qualitative Analysis) [11] 기능을 추가하였다. DQ 분석은 주어진 두 개의 시나리오의 차이점에 기초하여 주어진 시나리오를 비교 분석하는 기법이다. DQ분석 이외에도 본 연구를 통해 sKEA, FIRE에 새로운 표현 및 추론 기능이 계속 추가, 확장되고 있다.

EPR은 다음과 같은 임무를 수행하게 된다.

1. 사용자는 사용자 인터페이스를 통해 주어진 상황에 대한 스케치와 텍스트를 입력하게 된다 (그림 1).
2. 사용자는 주어진 상황에 대한 질문을 한다. 질문은 서로 다른 두 상황에서의 속성이나 사건의 비교 또는 같은 상황에서 서로 다른 두 부분 사이의 속성이나 사건의 비교로 구성된다. (예: 어떤 크레인이 더 쉽게 뒤집어 질 가능성이 큰가?)
3. EPR은 주어진 질문에 답이 제공한다.

사용자로부터 상황에 대한 스케치 및 텍스트가 주어지면 시나리오 모델이 형성된다. 시나리오 모델은 주어진 상황에 대한 사실(assertion)들로 구성된다. 질문이 주어지면 QM은 지식베이스에 구축되어있는 분야 모델(domain model)로부터 시나리오에 대한 정성적 모델(qualitative model)을 형성하게 된다. 정성적 모델은 주어진 시나리오에서 성립되는 사실들과, 파라미터 사이의 인과 관계를 나타내는 인과 구조에 대한 모델(causal model)을 포함하고 있다. 전향 추론과는 달리 후향 추론을 통해 질문과 관련된 정성적 모델만이 형성된다. 정성적 모델로부터 질문에 대한 답을 이끌어내게 된다. 두 시나리오 사이의 비교에

대한 질문은 DQ 분석을 통해 답을 주어진다. sKEA는 바퀴, 기어 등과 같이 실제 세계의 엔터티(real world entities)를 사용하여 입력을 받게 되므로, QM의 분야 모델이 사용하고 있는 추상적인 엔터티(abstract entities)에 근거한 시나리오 모델을 제공하지 못하고 있다. 따라서 현재는 추상적인 엔터티를 사용한 텍스트 형태의 시나리오 모델이 사용되고 있다. 실제 세계 엔터티로부터 추상적인 엔터티로의 매핑은 현재 EPR에서 진행되고 있는 주요한 과제 중 하나이다.

3. 정성적 지식베이스

본 연구에서는 Cyc 지식베이스를 출발점으로 하여 EPR의 지식베이스를 구축하였다. 정성적 추론, 정성적 공간 추론을 위해 기존의 정성적 표현 방식[3,2]을 Cyc의 온톨로지[12]를 사용, 전환하여 Cyc 지식베이스에 추가, 확장하였다. Cyc 지식베이스는 계층 구조로 구성되어있으며, Cyc 지식베이스에서 제공하는 개념 중 사용가능한 것들을 최대한 사용하였다. 이미 구축된 지식베이스를 사용함으로써, 본 연구에서 개발한 지식보다 방대한 양의 지식을 사용할 수 있는 이점이 있다.

대표적인 정성적 추론 연구 중 하나인 QP 이론[3]은 프로세스를 중심으로 모델을 표현하는 데, 다양한 분야에서 적용되어 정성적 추론의 토대를 제공하였다. QP 이론의 핵심은 변화는 프로세스에 의해 발생하며, 프로세스는 인과 관계를 표현할 수 있는 메카니즘을 제공한다는 것이다. 본 지식베이스에는 QP 이론의 기본 표현 방식을 Cyc 온톨로지를 사용하여 Cyc 지식베이스에 추가하였다. 다음은 QP 이론을 Cyc 표현 방식으로 전환하여 개발한 지식 베이스의 일부를 보여주고 있다.

```
(microtheory BaseKB)
::: Quantities
(isa ContinuousQuantity Collection)
(genis ContinuousQuantity Thing)
(comment ContinuousQuantity
"Continuous parameters represent properties such as temperature, hear, price, etc.")
...
::: Qualitative Mathematics
(isa qGreaterThan AntiSymmetricBinaryPredicate)
(arg1isa qGreaterThan ContinuousQuantity)
(arg2isa qGreaterThan ContinuousQuantity)
(comment ContinuousQuantity
"(qGreaterThan ?q1 ?q2) means that the value of ?q1 is greater than the value of ?q2.")
```

3.1 정성적 공간 추론

본 연구는 정성적 미캐닉스 모델 개발에 중점을 두고 행하여졌다. 공간에서의 물체의 힘, 운동의 변화를 계산하는 공간 추론은 2차원, 3차원에서 발생하게 되므로, 1차원 파라미터와는 다른 접근 방식이 필요하다. 공간 추론을 위해서는 힘, 운동, 위치 등의 방향 등의 표현이 기본이 되는데, 본 시스템은 정성적 벡터 표현[12]을 Cyc 표현 방식으로 코드화 하여 지식 베이스를 확장하였다. <표 2>는 정성적 벡터의 Cyc 표현 중 일부를 보여주고 있다.

```
(microtheory QualitativeMechanicsMt)
```

```
;;; Qualitative Value
```

```
(isa Sense Collection)
```

```
(comment Sense "Sense is the collection of symbols used to denote qualitative values, like Plus, Minus, Zero, and Ambig.")
```

```
(isa Plus Sense)
```

```
(isa Minus Sense)
```

```
(isa Zero Sense)
```

```
(isa Ambig Sense)
```

```
(isa inverseSense BinaryPredicate)
```

```
(arg1isa inverseSense Sense)
```

```
(arg2isa inverseSense Sense)
```

```
;;; Qualitative Vector
```

```
(isa QualitativeVector Collection)
```

```
(genis QualitativeVector VectorInterval)
```

```
(genis 2DQVector QualitativeVector)
```

```
(genis 3DQVector QualitativeVector)
```

```
(comment QualitativeVector "QualitativeVector is the collection of vectors whose components are qualitative values.")
```

```
(comment 2DQVector
```

```
"2DQVector is the collection of two dimensional qualitative vectors.")
```

```
(comment 3DQVector
```

```
"3DQVector is the collection of three dimensional qualitative vectors.")
```

분야 모델은 기본적으로 predicate와 후향 추론 규칙(backward chaining axioms)으로 구성되어 있다. 공간 추론을 위한 분야 모델은 수학 모델과 미캐닉스 모델로 구성되어 있다. 수학 모델은 정성적 숫자의 표현 및 연산(정성적 덧셈, 곱셈, 크기 비교 등)과 정성적 벡터 및 각도의 표현 및 연산(덧셈, 곱셈, 회전, 반공간 등)으로 구성되어 있다. 미캐닉스 모델은 객체(objects)의 표현 및 힘과 운동에 관한 물리학의 기본 원리를 포함하고 있으며, 유체, 전기, 물

질 등 다양한 영역으로 계속 확장해 나가고 있다. 기계적인 힘과 운동은 표면 접촉을 통해 전달되므로 객체는 정성적 표면으로 표현하였다. 다음은 객체의 표현 중 일부를 보여준다.

```
;;; Object Representation
```

```
(isa RigidOb Collection)
```

```
(comment RigidOb "RigidOb is the collection of rigid objects")
```

```
(genis RigidOb Thing)
```

```
(isa Surface Collection)
```

```
(comment Surface "Surface is the collection of surfaces")
```

```
(isa surfaceNormal BinaryPredicate)
```

```
(arg1isa surfaceNormal Surface)
```

```
(arg2isa surfaceNormal QualitativeVector)
```

```
(comment surfaceNormal "(surfaceNormal ?s ?d) is true iff ?d is the direction of surface normal of ?s")
```

3.2 인과 모델

분야에 대한 지식은 분야 모델(domain model)이라 한다. 각각의 상황이 주어지면, 이로부터 시나리오 모델이 형성된다. 사용자가 특정 상황에 대해 query를 통해 질문을 하면, 시나리오 모델에 적용되는 분야 모델의 프로세스와 뷰를 활성화 하여 인과 모델이 형성된다. 형성된 인과 모델로부터 주어진 query에 대한 답이 주어진다. 인과 모델은 QP 이론의 정성적 비례(qualitative proportionality: qprop, qpro-) 와 영향(influence: i+, i-)으로 구성된다.

지식 베이스는 공간 표현 방식에 기초하여 후향 추론 규칙(backward chaining axioms)으로 구성되는데, 프로세스와 뷰는 규칙(axioms) 대신 model fragment로 선언하는 방식을 채택하였다. 이는 후향의 시스템의 학습 능력이 추가되었을 때, 프로세스와 뷰가 자체적으로 학습을 통해 용이하게 추가되게 하기 위함이다. model fragment는 매크로 확장을 통해 규칙으로 전환하도록 하였다. 다음은 $F = m * a$ 의 모델 fragment를 보여준다.

```
(qmMF XPlusAcceleration)
```

```
(qmMFPParticipant XPlusAcceleration TheObject)
```

```
(qmMFPParticipantType XPlusAcceleration TheObject RigidOb)
```

```
(qmMFPParticipantConstraint XPlusAcceleration (xTransFreedom TheObject Plus))
```

```
(qmMFPParticipantCondition XPlusAcceleration
```

```
(positive ((QpQuantityFn XVelocity) TheObject)))
```

```
(qmMFPParticipantConsequence XPlusAcceleration
```

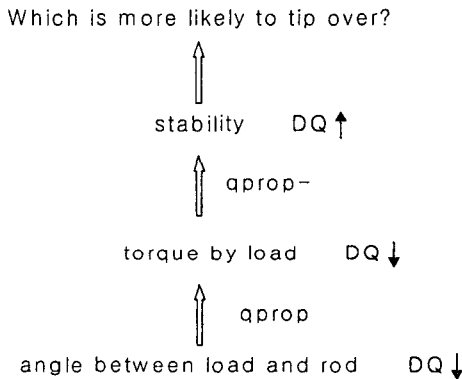
```
(i+ ((QpQuantityFn XVelocity) TheObject) ((QpQuantityFn XNetFOrce) TheObject)))
```

```
(qmMFPParticipantConsequence XPlusAcceleration
```

```
(i- ((QpQuantityFn XVelocity) TheObject) ((QpQuantityFn Mass) TheObject)))
```

4. 예제

EPR은 구현되어 여러 가지 예제에 적용되어 그 실효성을 입증할 수 있었다. 특히 EPR은 Bennett Mechanical Aptitude Test를 주요한 시험대로 삼고 개발을 계속하고 있다. 이 테스트는 심리학자들에게 사람의 공간적 능력을 측정하는 좋은 척도로 평가받고 있으며 실제로 진급시험에 이용되고 있기도 하다. 이 테스트는 그림을 사용하여 문제를 묘사하고 있으며, 기본적으로 정성적 비교 분석을 요구하는 문제들이다 (그림 1).



(그림 2) 크레인의 인과 모델과 비교 분석

(그림 2)는 (그림 1)에서 주어진 문제가 EPR에서 어떻게 해결되고 있는가를 기본적으로 보여주고 있다. DQ는 파라미터의 비교 값을 표시한다. 먼저 (그림 1)의 상황을 묘사하는 시나리오 모델이 주어진다. 이 시나리오 모델은 크레인의 구조에 대한 공간적 묘사와 함께 오른쪽의 크레인(B)의 팔과 짐(load) 사이의 각도가 왼쪽 크레인(A)에 비해 줄어들었음을 나타내는 DQ 값도 포함하고 있다. 어떤 크레인이 더 쉽게 뒤집어 질까라는 query가 주어지면 QM은 후향 추론을 통해 분야 모델로부터 주어진 시나리오 모델에서 성립하는 정성적 모델을 형성한다. (그림 2)는 파라미터 사이의 인과 모델을 보여주고 있다. 각도와 토크 사이의 인과 구조, 토크와 안전도에 대한 인과 구조는 주어진 시나리오를 정성적 공간 추론을 통해 분석하여 형성된다. 인과 모델이 형성되면 비교 분석 기법이 적용되어 주어진 문제를 해결하게 된다. A에 비해 B의 각도가 줄어들었으므로, 짐에 의해 가해지는 시계 방향의 토크도 감소함을 추론할 수 있다. 이와 같이 감소된 토크는 B의 안전도를 A에 비해 상대적으로 증가 시키게 된다. 따라서 A가 쉽게 뒤집

어 질 수 있음을 알 수 있다. (그림 2)에는 포함되어 있지 않으나, 이 과정의 추론에서 기중기 자체에 무게의 의해 반시계 방향의 토크가 가해짐과 이 토크가 짐에 의한 토크와 균형을 이루고 있음을 분석하는 등 정성적 공간 추론이 핵심적 역할을 하고 있다.

Bennett 테스트는 힘, 운동, 장력, 유체, 광학, 음향, 물질, 기하 등 다양한 분야의 68개의 문제로 구성되어 있다. 현재 EPR은 힘, 운동, 장력, 유체, 기하에 관한 지식 베이스 구축 되어 이와 관련된 문제들에 적용되어 올바른 답을 얻을 수 있다. 적용된 문제들의 예를 들면 다음과 같다.

문제 1: 바퀴가 하나인 손수레(wheelbarrow)에 돌을 운반하는데, 그림 A에는 돌이 바퀴에 가깝게 놓여있고, B에는 바퀴에서 멀리 떨어져 손잡이 근처에 돌이 놓여있다. 어떤 경우가 들기가 더 수월 한가?

문제 49: 비행기의 오른쪽 날개에 있는 엔진이 고장이 났다. 비행기가 똑바로 가기 위해 방향타(rudder)를 어느 방향으로 바꿔야 하는가?

현재 구축된 지식 베이스는 Bennett 테스트의 반 정도의 문제를 해결할 수 있으며, 계속 보완, 확장되고 있다. 아직 지식 베이스가 구축되지 않은 부피에 관련된 기하 문제, 물질, 음향, 광학 등은 힘, 운동에 비해 상대적으로 용이하리라 판단된다.

5. 결론

본 논문에서는 대규모 인지 시스템을 개발하는데 있어 필수적인 대용량 지식 베이스의 개발에 대해 소개하였다. 이러한 지식 베이스 개발에 있어서, 인간의 상식을 표현하여 포함하는 것이 핵심적 역할을 하리라 판단된다. 본 연구에서는 상식은 경험을 통한 유사 추론과 기본 원리에 기초한 추론(first-principle reasoning)을 통해 축적된다는 전제 하에 진행되고 있다. 또한 상식의 지식 모델 개발에 정성적 표현 및 추론 방식이 기본적인 토대를 제공할 수 있다고 판단하고 있다. EPR에서는 기존의 초용량 Cyc 지식 베이스에 정성적 미캐닉스의 기본 원리에 기초한 추론 및 모델의 접목을 시도하였다. 지식 베이스 구축 시 향후의 학습 능력 추가에 따른 도메인 모델의 확장을 용이하기 위해 선언적 표현 방식을 최대한 사용하였다. EPR은 기술자들을 위한 표준 시험으로 널리 사용되어 지고 있는 Bennett 테스트를 평가 척도로 사용하고 있다. 현재까지 힘, 운동, 장력, 유체 관련 문제들에 적용되어, 올바른 답을 구할 수 있었다.

향후 과제로는 현재의 부트스트랩 시스템에 기초하여, 유사 추론, 유사 학습 기능을 추가시키는 것이다. 이를 통

해 주어진 분야, 사용자의 지식수준, 취향, 선호도, 학습의 효율성 등을 이해하고 적용할 수 있는 시스템으로 확장하여, 사용자에게 소프트웨어 도구 이상의 도움을 줄 수 있는 인지 시스템을 개발하고자 한다.

Illinois at Urbana-Champaign, Illinois.

감사의 글

본 연구를 위해 제반 사항을 지원해 주신 Northwestern 대학의 Kenneth D. Forbus 교수님께 감사를 표합니다.

참고문헌

- [1] Gentner, D. and Stevens, A. (1983), *Mental Models* (eds.), IEA Associates.
- [2] De Kleer, J. and Brown, J.S. (1984), A Qualitative Physics based on Confluences, *Artificial Intelligence*, 24.
- [3] Forbus, K. (1984), Qualitative Process Theory, *Artificial Intelligence*, 24.
- [4] White, B. and Frederiksen, J. (1990), Causal Model Progressions as a Foundation for Intelligent Learning Environments, *Artificial Intelligence*, 42.
- [5] Forbus, K. (1996), *Qualitative Reasoning*, CRC Hand-book of Computer Science and Engineering, CRC Press
- [6] Lenat, D. (1995), Cyc: A Large-Scale Investment in Knowledge Infrastructure, *The Communications of the ACM*, 38.
- [7] Fellbaum, C. (1998), *WordNet An Electronic Lexical Database* (Eds.). The MIT Press.
- [8] Fillmore, C., *FrameNet*, <http://www.icsi.berkeley.edu/~framenet/>
- [9] Forbus, K. and Hinrichs, T. (2004), *Companion Cognitive Systems: A step-towards human-level AI*, AAAI Fall Symposium on Achieving Human-level Intelligence through Integrated systems and Research, Washinton, DC.
- [10] Forbus, K. and Usher, J. (2002), *Sketching for Knowledge Capture: A Progress Report*, Proceedings of IUI'02, California.
- [11] Weld, D. (1990), *Theories of Comparative Analysis*, The MIT Press.
- [12] OpenCyc site : <http://www.opencyc.org>
- [13] Kim, H. (1993), *A Qualitative Reasoning about Mechanics and Fluids*, Ph.D. thesis, University of

접 수	2004년 09월 14일
게재승인	2004년 11월 24일