

# 공간에서의 물체의 운동에 대한 정성적 추론에 관한 연구

김현경\*

## A Study on Qualitative Reasoning about Motion in Space

Hyun-Kyung Kim\*

### 요 약

본 논문에서는 정성적 공간 표현 방식과 물체의 운동에 대한 추론 방식이 제시되었다. 기존의 정성적 벡터 표현 방식은 각도 개념을 추가하여 확장되었으며, 이에 따라 방향의 계산을 위해 필요한 정성적 벡터 연산도 확장되었다. 또한 회전운동에 의한 각도의 변화를 분석하는 추론 방식도 기술되었다. 운동에 대한 정성적 추론의 기본 아이디어는 공간에서의 위치와 운동을 상대적인 개념으로 표현하는 것이다. 이와 같이 제안된 이론은 연동 장치의 분석에 사용되어 주어진 연동 장치의 거동을 정확히 예측할 수 있었다.

키워드: 정성적 물리학, 정성적 운동학, 공간 추론

## 1. 서 론

### 1.1 정성적 물리학

정성적 물리학(qualitative physics)이란 정성적 정보에 근거하여 물리적 현상의 추론을 다루는

인공지능의 한 분야로 미국과 유럽을 중심으로 활발히 연구되고 있으며, 여러 분야에서 그 응용이 확대되고 있다 [1,2,3,9]. 정성적 물리학의 목표는 인간이 갖고 있는 자연 세계에 대한 정성적인 지식을 컴퓨터 프로그램으로 구현하는 것이다. 컴퓨터가 인간 수준의 추론을 하기 위해서는 궁극적으로 정량적·정성적인 지식을 상

\*한신대학교 정보통신학과

호 보완하여 통합된 프로그램으로 표현하는 것이 필요하다. 정성적 물리학은 정량적 정보에 근거한 고전 물리학을 다음과 같이 여러 점에서 보완하여 적용될 수 있다.

1) 고전 물리학은 많은 경우에 있어 자연 현상을 정량적으로 표현하여 충분히 설명할 수 있다. 그러나 예를 들어 기계 시스템을 설계하는 초기 단계에서는 정확한 수치 정보가 미흡하므로 기술자의 정성적인 판단에 근거할 수밖에 없다. 따라서 정성적 물리학의 적용이 불가피하다. 또한 기계 작동의 원리 및 사용법을 가르치기 위한 훈련용 프로그램과 같이 정확한 계산보다는 정성적 추론을 사용하는 것만으로도 충분한 경우도 많이 있다.

2) 공학 문제를 해결하는데 있어 정성적 물리학을 이용한 접근 방법만으로 불충분한 경우가 많다. 그러나 정성적 분석은 대수학적 분석이나 정량적 시뮬레이션과 같이 자세한 수치적 접근의 길잡이 역할을 할 수 있다. 예를 들어 설계의 초기 단계에서 정성적 시뮬레이션을 통해 가능성이 없는 디자인을 배제할 수 있으면 이러한 디자인에 대한 불필요한 정량적 시뮬레이션을 피할 수 있게 된다.

3) 정성적 물리학으로 구현된 시스템은 친근감이 가는 사용자 인터페이스를 제공한다. 이러한 시스템의 입력, 출력은 정성적 정보에 근거해서 처리되므로 숫자의 나열인 수치 모델보다 사용자가 이해하기 쉽다.

## 1.2 정성적 운동학

자연 세계에서 힘은 모든 변화의 근원이 된다. 따라서 물리적 현상을 이해하기 위해서는 힘의 작용을 밝혀 내는 것이 핵심이 된다. 또한 모든 물리적 현상은 공간에서 일어나고 있음으

로 힘이 공간에서 어떻게 작용하는지, 즉 힘과 공간이 어떻게 상호작용 하는 가를 밝혀 내는 것이 필수 불가결하다. 이와 같은 상호작용의 이해 없이 동력학만으로는 물리적 현상을 충분히 설명할 수 없다. 예를 들자면, 어떤 물체에 같은 크기의 힘을 가하더라도 가해지는 위치에 따라 아주 다른 결과가 나올 수 있다. 그 물체는 직선 방향으로 움직일 수도 있으며, 회전 할 수도 있을 것이다. 공간 정보 없이는 이와 같은 다른 결과를 예측할 수 없다. 정성적 운동학(qualitative kinematics)은 정성적 물리학의 공간 추론에 관한 문제를 다루고 있다. 그러나 공간에서의 추론은 1차원에 비해 공간이 갖는 복잡성으로 인하여 아직 연구가 미비한 상태이다. 일반적인 공간 추론의 문제는 제약(constraint)이 너무 없어서 탐색 공간이 너무 커지는 경향이 있어 분석하기가 어렵다. 따라서 이 분야의 연구는 간단한 공간에서의 운동과 기계 메카니즘 분야에서 중점적으로 행하여져 왔다. 특히 기계 메카니즘 분석에는 공간 추론이 핵심적 역할을 할 뿐 아니라 제약이 많이 있으므로 공간 추론 연구에는 최적의 분야라 할 수 있다. 대표적인 연구로는 Forbus의 FROB[3], 미국 일리노이 대학의 CLOCK 프로젝트[2,4,7], Joskowicz와 Sacks의 운동학적 시뮬레이션 [6], Randell과 Cohn의 공간 표현 방식 [8], Gelsey와 McDermott의 연구[5]등을 들 수 있다. 이와 같은 연구팀에 의해 개발된 시스템들은 공통적으로 강체(rigid object)사이에서 힘과 운동이 어떻게 전달되고 변화되는가를 정성적으로 분석하여 주어진 공간에서의 거동을 계산해 낸다. 예를 들어, 일리노이 대학의 Qualitative Reasoning 그룹이 수행한 CLOCK 프로젝트에서는 표면 접촉을 통한 충돌을 정성적으로 분석하여 12개의 기어로 구성된 시계의 작동을 정확히 예측하는 프로그램을 개

발하였다.

그러나 기존의 연구팀에 의해 개발된 정성적 공간 추론 이론은 공간에서의 물체의 형태, 배치, 힘, 운동에 대한 표현이 정교하지 않아 일반적인 메카니즘의 분석과 같이 광범위한 공간 추론 문제에 사용되기에는 부족하다. 예를 들어 기존의 방식으로는 자동차 내연 기관에서 피스톤의 수직 운동을 바퀴의 회전 운동으로 바꿔주는 slider-crank(그림 1)를 분석할 수 없었다.

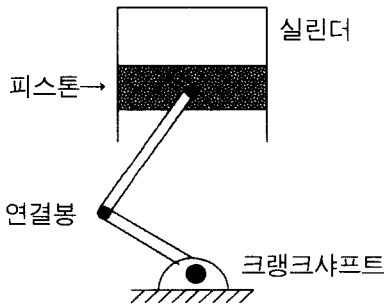


그림 1. 자동차 내연기관

본 논문에서는 기존의 공간 표현 방식을 확장한 새로운 표현 방식과 그에 따른 추론 방식을 제시하고자 한다. 이와 같이 제안된 이론은 연동 장치(linkage)의 분석에 사용되어 2차원에서 slider-crank와 같이 4개의 링크로 구성된 연동 장치의 거동을 정확히 예측할 수 있었다. 연동 장치는 기계의 한 부분에서 다른 부분으로 운동을 전달하는 역할을 하는데 주로 쓰이고 있다. 예를 들어 피스톤의 수직 운동을 크랭크샤프트의 회전 운동으로 바꿔주는 slider-crank 메카니즘은 자동차 엔진의 핵심적 부분이다. 그러나 이전의 연구가 고정축(fixed axis) 메카니즘에 제한되어 있었으므로, 연동 장치와 같은 동축(movable axis) 메카니즘을 분석할 수 없었다. 2장에서는 기존의 정성적 벡터(qualitative vector)를 확장한 표현법이 소개되었다. 공간에서의 물체의 위치 및 운동

은 이에 기초하여 표현되며, 특히 이들은 상대적인 개념으로 표현되었다. 3장에서는 회전운동에 의한 각도의 변화를 예측하는 추론 방식이 제시되었으며, 4장에서는 제안된 표현 방식과 추론 방식을 이용하여 공간에서의 물체의 운동을 정성적으로 시뮬레이트하는 과정을 연동 장치의 분석과 함께 소개하였다. 마지막으로 본 논문의 요약 및 앞으로의 연구 계획을 간략하게 설명한다.

## 2. 정성적 공간 표현

### 2.1 정성적 벡터 표현 방식의 확장

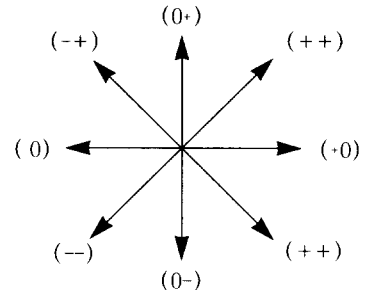


그림 2. 정성적 직선 방향

물체의 공간에서의 움직임을 다루는 공간 추론의 문제에 있어서, 벡터는 위치, 힘, 운동 등의 방향을 표시하는데 필수적이다. 본 논문에서는 Nielsen에 의해 개발된 정성적 벡터 표현[7] 방식에 각도의 개념을 도입하여 더욱 확장된 표현을 제시하고자 한다.

벡터는 순서가 있는 튜플(ordered tuple)로 기술된다. 본 논문에서는 하나의 전체적인 좌표계를 가정하고 있으며, 이 좌표계는 직선 방향으로 움직일 수는 있으나 회전은 할 수 없다. 2차원 공간에서 적용해보면, 정성적 벡터의 첫 번

제 요소는 x축 방향을 나타내며, 두 번째 요소는 y축 방향을 나타낸다. x축 방향을 표현하기 위해서 +, -, 0이 사용되었는데 +는 오른쪽, -는 왼쪽, 0은 가운데를 나타낸다. y축 방향을 표현하기 위해서도 +, -, 0이 사용되었는데 +는 위쪽, -는 아래쪽, 0은 가운데를 나타낸다. 예를 들어 (-,-)는 주어진 좌표계의 왼쪽 아래 방향을 나타낸다. 그림 2는 2차원 공간에서 가능한 모든 직선 방향들을 보여주고 있다. 이와 같은 2차원 벡터를 3차원으로 확장시키기 위해서는 z축 방향을 같은 방식으로 세 번째 요소로 포함시키면 간단히 해결된다.

그러나 튜플만으로 방향을 표시하는 기존의 벡터 표현 방식으로는 일반적인 공간 추론의 문제를 해결하기가 어렵다. 이는 기본적으로 각도의 개념이 충분히 고려되어있지 않기 때문이다. 30도와 60도와 같이 튜플의 값은 같으나 기울기가 다른 경우를 구별해야 할 경우가 있다. 본 논문에서는 튜플만으로는 불충분한 경우, 각도에 따른 두 벡터 사이의 상대적 위치를 표현하여 두 벡터 사이의 각도의 차이를 구분할 수 있게 하였다.

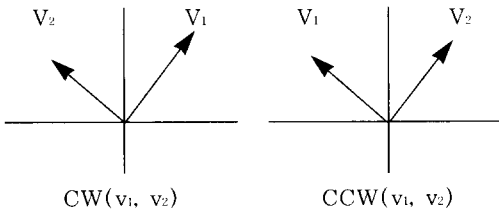


그림 3. CW와 CCW의 예

정의 1 (CW) 정성적 벡터 v2부터 v1까지 시계 방향으로 켜 각도가 0보다 크고 π보다 작은 경우 CW(v1,v2)이 성립한다.

정의 2 (CCW) 정성적 벡터 v2부터 v1까지 반시계 방향으로 켜 각도가 0보다 크고 π보다 큰 경우

CCW(v1,v2)이 참이 된다.

그림 3은 CW와 CCW의 예를 보여주고 있다.

벡터의 연산은 방향을 계산하는데 쓰인다. 표 1과 2는 숫자의 정확한 크기를 알지 못하여도 그 부호만으로 행해지는 정성적 연산을 보여주고 있다. 예를 들어 한 물체에 두 개의 양의 방향의 힘이 가해질 경우, 합력도 양의 방향으로 향할 것이다. 또한 한 물체에 양의 방향의 힘과 음의 방향의 힘이 가해진다면, 각개 힘의 상대적인 크기에 대한 정보가 있어야 합력의 방향을 알 수 있을 것이다.

표 1. 정성적 합: [x] + [y]

sign(x) \ sign(y)	-	0	+
-	-	-	N1
0	-	0	+
+	N1	+	+

N1:if x > y then sign(x)  
if x < y then sign(y)  
if x = y then 0

표 2. 정성적 곱: [x] × [y]

sign(x) \ sign(y)	-	0	+
-	+	0	-
0	0	0	0
+	-	0	+

이와 같은 연산은 간단하지만, 이를 이용하여 광범위한 공간 문제를 해결할 수 있다. 다음은 회전운동을 설명하는데 유용하게 쓰이는 정의이다.

정의 3 (Rotate-90) Rotate-90(v,d)은 벡터 v를 d의 회전 방향으로 90도 회전시켜 v에 수직이 되는 벡터를 나타낸다. 회전 방향은 +(CCW:반

시계 방향),  $-$ (CW:시계 방향),  $0$ (회전이 없음)으로 표현된다.

## 2.2 상대적 위치와 상대적 운동

시스템을 분석하기 위해서는 우선 그 시스템을 묘사하는 방법이 필요하다. 시스템은 그 시스템을 구성하는 각 부분(part)에 대한 표현과 각 부분이 어떻게 서로 연결되어 있는가를 표현함으로써 묘사된다. 이와 같은 묘사가 주어졌을 때, 각 부분사이에서 어떻게 힘과 운동이 전달되는가를 분석하여 주어진 시스템의 거동이 예측되는 것이다. 본 연구에서는 공간에서의 위치와 운동을 각 부분 사이의 상대적인 개념을 사용하여 표현하였다. 이러한 표현 방식은 4장에서 보여주듯이 연동 장치와 같은 동축 메카니즘의 분석을 가능케 하였다. 각 부분이 바닥(ground)에 고정되어 있지 않는 동축 메카니즘은 정확한 정보가 없는 상태에서 절대적 위치, 운동으로 정확하게 표현하는 것이 불가능하다. 일반적으로 상대적인 위치와 운동은 어느 두 점 사이에서도 정의될 수 있다.

정의 4(Relative-Position)  $Relative-Position(p_1, p_2)$ 은 점  $p_1$ 에서 점  $p_2$ 를 가리키는 방향을 표시하는 정성적 벡터이다. 상대 위치에 대한 정보는 이행성을 이용하여 전파 될 수 있다.

정의 5 (Transitivity of Relative-Position)  $Relative-Position(p_1, p_3)$ 은  $Relative-Position(p_1, p_2)$ 과  $Relative-Position(p_2, p_3)$ 을 더하여 계산된다. 운동을 표시하기 위해서도 역시 정성적 벡터가 사용되어진다. 위치가 두 점 사이의 상대적 위치로 표현되듯이 운동도 두 점 사이의 상대적인 운동으로 표현된다.

정의 6 (Relative-Motion)  $Relative-Motion(p_1, p_2)$ 은 점  $p_1$ 이 점  $p_2$ 에 상대적으로 움직이는 운동

의 방향을 표시하는 정성적 벡터이다. 상대적 운동에 대한 정보도 이행성을 이용하여 전파 될 수 있다.

정의 7(Transitivity of Relative-Motion)  $Relative-Motion(p_1, p_3)$ 은  $Relative-Motion(p_1, p_2)$ 과  $Relative-Motion(p_2, p_3)$ 을 더하여 계산된다.

## 3. 회전 운동

추론 시스템에서 모든 변화는 관련된 파라미터의 변화로 표현된다. 음의 값을 갖고 있는 파라미터의 값이 증가하고 있다면 그 값은  $0$ 으로, 계속해서 양의 값으로 증가 될 수 있을 것이다. 추론 시스템은 이와 같은 변화에 따른 파라미터의 변화를 분석함으로써 주어진 시스템의 거동을 예측하게 된다.

물체의 운동은 직선 운동과 회전 운동으로 구별할 수 있으며, 운동은 그 물체의 위치를 변화시킨다. 직선 운동과는 달리 회전 운동은 각도의 변화를 수반하는데, 각도는 그가 갖는 특수성으로 인해 기존의 파라미터에 대한 추론이 적용되기에는 어려움이 있다. 즉, 각도는 그 값이 증가함에 있어 계속 증가하다가  $0$ 의 위치로 감소한 후 다시 그 값이 증가하는 반복성을 갖고 있다. 본 장에서는 회전 운동으로 인한 위치 및 각도의 변화에 따른 분석 방법을 제시하고자 한다.

### 3.1 회전 운동으로 인한 위치의 변화

물체의 운동은 그 물체의 위치를 변화시킨다. 어떤 물체가  $(+)$  방향, 즉 오른쪽 아래 방향으로 직선 운동을 하고 있다면 그 물체의  $x$ 방향 위치는 증가할 것이며  $y$ 방향 위치는 감소하게

될 것이다. 그러나 물체가 회전 운동을 하고 있다면 그 물체의 위치 변화는 직선 운동과는 다른 양상을 띠게 될 것이다. 운동의 방향이 벡터로 표시되는 직선 운동과는 달리 회전운동의 방향 CW, CCW, 0만으로는 2차원 좌표계에서의 변화되는 방향을 표시할 수 없다. 어떤 물체가 시계 방향의 회전을 한다고 가정하자. 일률적으로 x방향 위치, y방향 위치가 어떻게 변하는가를 예측할 수 없다. 그 물체가 기준 점의 (++) 방향, 즉 오른쪽 위 방향에 위치한 상태에서 시계 방향으로 움직일 때, 그 물체의 x방향 위치는 증가할 것이며 y방향 위치는 감소하게 되어 (+0)로 그 위치가 변하게 될 것이다. 계속해서 시계 방향으로 회전한다면 x방향 위치는 감소할 것이며 이어지는 변화를 y방향 위치는 감소하게 되어 (+-)로 위치가 변하게 될 것이다. 그러나 (-)위치한 상태에서 시계 방향으로 움직일 경우는 x방향 위치는 감소할 것이며 y방향 위치는 증가하게 되어 (-0)로 그 위치가 변하게 될 것이다. 다음은 회전에 따른 운동 방향을 보여준다. 법칙 1 (회전 운동) 벡터  $v$ 가  $d$ 의 회전 방향으로 회전할 때  $Rotate-90(v,d)$ 은 공간에서의 운동 방향을 가리킨다.

정성적 벡터  $v$ 가 Relative-Position( $p2,p1$ )을 나타내고 있다고 가정하자.  $p2$ 가  $p1$ 에 대해 시계 방향으로 회전하고 있다면, Relative-Motion( $p2,p1$ )은  $Rotate-90(v,-)$ 의 값을 갖게 된다. 반시계방향으로 회전하고 있다면, Relative-Motion( $p2,p1$ )은  $Rotate-90(v,+)$ 의 값을 갖게 된다. 그림 4는 slider-crank를 단순화하여 그린 그림인데, L2의 시계, 반시계 방향 회전의 운동 방향을 보여주고 있다. Relative-Position(B,A)이 (++)이므로 시계 방향 회전일 경우는 (+-), 반시계 방향 회전일 경우는 (-+)의 운동방향을 갖는다. 이 경우 핀 조인트 A가 바닥에 고정되어 있으므로, 이 운동 방향은 절대적 방향을 가리킨다.

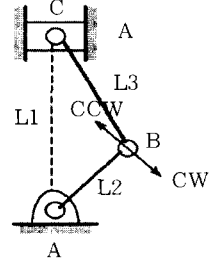


그림 4. Slider-crank 메카니즘

### 3.2 각도의 경계 분석(limit analysis)

본 논문에서 제시된 표현 방식에서는 각도를 표현하기 위해 정확한 수치를 사용하지 않고 다른 각도와와의 상대적 관계로 묘사하고 있다. 두 개의 벡터가 주어졌을 때, 회전 운동으로 인해 벡터의 위치가 변하게 되면 그 상대적인 각위치도 변하게 된다. 일반적으로 변화를 분석하는 과정을 경계 분석이라 한다. 변화는 파라미터의 변화로 이어지며 이는 다른 파라미터 사이의 상대적 값의 변화로 이어질 수 있는데 이를 찾아내는 과정을 경계 분석이라 한다. 예를 들어 파라미터 A의 값이 B보다 작은 상태에서 A의 값은 증가, B의 값은 감소하고 있다고 가정하자. 그 결과 파라미터 A와 B의 값은 같게 될 수 있을 것이다. 경계 분석은 두 파라미터 사이의 상대적인 관계와 파라미터의 변화가 주어 졌을 때, 상대적 관계가 어떻게 변하는 가를 분석하는 작업이다. 그러나 기존의 경계 분석 역시 각도가 갖는 특수성으로 인하여 각도에는 적용 될 수가 없다. 일반적인 파라미터 A의 값이 B보다 큰 상태에서 A의 값은 증가, B의 값은 변하지 않는 경우 그 결과는 파라미터 A와 B의 값은 계속해서 크게 될 것이다. 그러나 파라미터 A와 B가 각도를 그 값으로 갖는 경우는 파라미터 A가 증가하다 0으로 될 경우에는 파라미터 A의 값이 B보다 작아질 것이다.

For  $A > B$

		Ds[B]		
		-1(CW)	0(No Motion)	1(CCW)
Ds[A]	-1(CW)	N1	=s	=s
	0	=o	>	=s
	1(CCW)	=o	=o	N2

N1:  $Dm[A] > Dm[B]$  then =s, otherwise =o

N2:  $Dm[A] < Dm[B]$  then =o, otherwise =s

For  $A =s B$ :

		Ds[B]		
		-1(CW)	0(No Motion)	1(CCW)
Ds[A]	-1(CW)	N3	<	<
	0	>	=s	<
	1(CCW)	>	>	N4

N3:  $Dm[A] > Dm[B]$  then <

$Dm[A] < Dm[B]$  then >

$Dm[A] = Dm[B]$  then =s

N4:  $Dm[A] > Dm[B]$  then >

$Dm[A] < Dm[B]$  then <

$Dm[A] = Dm[B]$  then =s

For  $A =o B$ :

		Ds[B]		
		-1(CW)	0(No Motion)	1(CCW)
Ds[A]	-1(CW)	N5	<	<
	0	>	=o	<
	1(CCW)	>	>	N6

N5:  $Dm[A] > Dm[B]$  then >

$Dm[A] < Dm[B]$  then <

$Dm[A] = Dm[B]$  then =o

N4:  $Dm[A] > Dm[B]$  then <

$Dm[A] < Dm[B]$  then >

$Dm[A] = Dm[B]$  then =o

표 3. 주어진 운동에 대한 각도의 관계성 변화

표 3은 각도를 값으로 갖는 두 파라미터 사이의 크기에 대한 관계와 각 파라미터의 변화에 대한 정보가 주어졌을 때 그 둘 사이의 관계가 어떻게 변하는 가를 도표로 보여주고 있다. 도표에서 편의상  $CW(A,B)$ 는  $A < B$ 로,  $CCW(A,B)$ 는  $A > B$ 로 표시하였다.  $A =o B$ 는 A와 B가 180도 서로 다른 방향을 가리키는 것을 나타내며,  $A =s B$ 는 A와 B가 똑같은 방향을 나타냄을 표시한다. 또한  $Ds[A]$ 와  $Dm[A]$ 는 A의 각속도의 부호와 절대치를 각각 나타낸다.

## 4. 운동의 추론

물체의 운동을 추론하기 위해서는 공간에서의 물체의 위치와 운동을 기술하기 위한 표현 방식의 개발, 운동으로 인한 공간에서의 위치 변화 분석 방식의 개발이 핵심적 역할을 한다. 특히 회전 운동은 직선 운동에 비해 갖는 특수성으로 인해 기존의 분석과는 다른 방법을 필요로 한다. 본 장에서는 앞장에서 제시된 정성적 벡터, 상대적 위치, 상대적 운동에 기초한 표현 방식과 회전 운동으로 인한 각위치의 분석에 근거한 추론 방식을 제시하고자 한다.

### 4.1 인비저닝

표현 방식을 개발하여 분야 모델을 구축하는 궁극적인 목적은 추론을 위함이다. 정성적 물리학에서는 다양한 추론 방식이 개발되었는데, 그 중에서 가장 대표적인 것은 정성적 시뮬레이션이라 할 수 있다. 정성적 시뮬레이션은 어떤 시스템의 구조 묘사가 주어졌을 때 그 시스템의 거동을 예측하는데, 기존의 정량적인 시뮬레이

선과는 기본적으로 여러 가지 면에서 다르다. 첫째, 기존의 방법이 일정한 시간 간격마다 시스템의 상태를 계산하는 반면, 정성적 시뮬레이션은 흥미 있는 사건이 발생하였을 때에만 새로운 상태를 계산한다. 예를 들어 물이 든 주전자를 불 위에 올려놓았다 가정하자. 정량적 시뮬레이션 기법을 사용하였을 경우 일정한 시간마다 계속해서 새로운 상태가 계산될 것이다. 그러나, 정성적 시뮬레이션은 (주어진 문제에 따라 다를 수 있지만) 물이 끓기 전까지의 상태, 물이 끓는 상태, 또한 물이 모두 증발해 버린 상태의 세 가지 상태만 계산할 것이다. 둘째, 정성적 시뮬레이션은 완벽하지 못한 정보에 근거함으로써 단 한가지의 정확한 예측보다는 여러 가지의 가능한 모든 거동을 예측하는 경향이 있다. 또한 정성적 시뮬레이션에는 인비저닝(envisoning)과 히스토리 생성(history generation)의 두 가지 형태가 있다. 인비저닝이 주어진 시스템의 가능한 모든 상태와 그사이의 변천(transition)을 계산해 내는 반면 히스토리 생성은 초기 상태가 주어진 상태에서 시스템의 후속적인 행동을 예측한다. 히스토리 생성은 기존의 시뮬레이션과 같은 방식으로 이해할 수 있다. 인비저닝은 히스토리 생성에 비해 복잡하며 많은 양의 계산을 필요로 하나 새로운 정성적 모델을 개발한다던가 디자인과 같은 많은 응용 분야에서 자칫하면 눈에 띄지 않는 경우까지 찾아내므로 매우 중요한 역할을 한다.

공간 추론은 공간에서의 기하학적 배치와 힘의 상호작용을 분석하는 것이 핵심을 이루고 있으므로, 정성적 상태는 동역학적 상태(dynamic state)와 운동학적 상태(kinematic state)로 구성되어야 하며, 상태 사이의 전이도 이 두 상태를 고려하여 결정되어야 한다.

## 4.2 예제 : 연동 장치의 인비저닝

이와 같이 제안된 이론은 크랭크와 같은 연동 장치(linkage)의 분석에 사용되어 2차원에서 slider-crank와 같이 4개의 링크로 구성된 연동 장치의 거동을 정확히 예측할 수 있었다. 연동 장치는 많은 기계에서 한 부분에서 다른 부분으로 운동을 전달하는 역할을 하는데 주로 쓰이고 있다. 예를 들어 피스톤의 수직 운동을 크랭크샤프트의 회전 운동으로 바꿔주는 slider-crank 메카니즘은 자동차 엔진의 핵심적 부분이다. 그러나 이전의 연구가 고정축 메카니즘에 제한되어 있었으므로, 연동 장치와 같은 동축메카니즘을 분석할 수 없었다.

연동 장치는 핀 연결(pin connection)이나 sliding block에 의해 연결된 링크의 집합이라 정의한다. 특히 4개의 링크로 구성된 연동 장치는 가장 많이 사용되는 연동 장치이면서 복잡한 연동 장치를 구성하는 기본 요소이기 때문에 그 분석은 중요하다.

연동 장치의 구조적 묘사가 주어졌을 때, 가능한 모든 정성적 상태와 그들 사이의 전이를 계산하여 주어진 연동 장치의 운동을 분석하였다. 연동 장치의 거동은 링크 사이의 연결과 상대적 길이에 의해 결정되므로 이 두 가지에 대한 정보가 구조적 묘사로 주어진다. 링크 사이의 연결과 상대적 길이에 대한 정보로 주어진다. 정성적 상태는 운동학적 상태와 동역학적 상태로 구성된다. 운동학적 상태는 각 링크의 공간에서의 배치를 나타내며 동역학적 상태는 각 링크의 운동을 나타낸다.

각 링크의 공간에서의 배치는 링크의 두 끝점의 상대적 위치로 표현한다. 한 끝점이 바닥에 고정되어 있다면, 상대적 위치는 절대적 위치



와 같게 된다. 앞 절에서 정의한대로 Relative-Position( $p_1, p_2$ )은 점  $p_2$ 로부터 점  $p_1$ 로 향하는 방향을 나타내는 정성적 벡터이다. 상대적 위치에 대한 정보는 이행성을 이용하여 전파될 수 있다. 링크의 두 끝점을  $p_1, p_2$ 라 할 때, 링크의 배치는 Relative-Position( $p_1, p_2$ )으로 표현된다. 각 링크는 핀 조인트 또는 핀 조인트를 장착한 sliding block에 연결되어 있으므로, 모든 링크는 각 끝점에 대해 상대적으로 회전 운동만이 가능하다. 링크의 운동도 두 끝점의 상대적 운동 개념으로 표현된다. 다음은 주어진 연동 장치의 운동을 계산하는 인비저닝 알고리즘이다.

#### 1. 운동학적 상태의 계산

- 1.1 각 링크에 대해 가능한 모든 위치를 계산한다.
- 1.2 상대적 위치의 이행성과 벡터 연산을 이용하여 전체적으로 볼 때 기하학적으로 불가능한 조합을 걸러낸다.

#### 2. 각 운동학적 상태에 대해 동역학적 상태를 계산

- 2.1 각 링크의 위치에 대해 가능한 모든 운동을 산출한다.
- 2.2 상대적 운동의 이행성과 벡터 연산을 이용하여 전체적으로 볼 때 불가능한 운동의 조합을 걸러낸다.

#### 3. 상태 사이의 가능한 모든 전이를 계산

- 3.1 운동의 방향과 각도의 변화에 대한 정보를 이용하여 각 상태에서의 운동학적 전이를 찾는다.
- 3.2 각 상태에 대해 동역학적 전이를 계산한다.
- 3.3 운동학적으로 동역학적으로 일치된 전이를 찾는다.

## 5. 결 론

본 연구의 최종 목표는 공간에서의 물체의 운동을 정성적으로 분석할 수 있는 범용성의 지능형 시스템의 개발이다. 일반적으로 지능형 시스템은 분야 모델(domain model)과 추론 기관(inference engine)으로 구성되어 있는데, 분야 모델에는 주어진 분야에 대한 지식이 표현되어 있으며, 추론 기관은 분야 모델이 주어졌을 때 그로부터 주어진 문제를 해결해 나가는 다양한 추론 과정을 제공한다. 본 논문에서 기술한 정성적 표현 및 추론 이론은 그러한 최종 목표를 향한 첫 걸음이며, 특히 연동 장치와 같이 동축을 갖는 메카니즘의 분석에 기초가 되리라 기대된다. 본 논문에서는 운동학에 중점을 두고 있으므로, 힘에 의한 변화는 다루어지지 않았다. 따라서 다음 단계로 운동학과 동역학 이론의 결합에 대한 연구 및 구현에 목표를 두고 있다.

## 참고문헌

- [1] Everett, J., "A theory of mapping from structure to function applied to engineering thermodynamics," In proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1837-1843, 1995
- [2] Faltings, B., "Qualitative kinematics in mechanisms," Artificial Intelligence 44, 1990
- [3] Forbus K., "Spatial and qualitative aspects of reasoning about motion," In proceedings of the First National Conference on Artificial Intelligence, August, 1980
- [4] Forbus, K., Nielsen, P., and Faltings, B., "Qualitative mechanics: A framework,"

Artificial Intelligence, 51, 1991

- [5] A. Gelsey and D. Medermott. Spatial reasoning about mechanisms. Technical report, Yale University, 1988
- [6] Joskowicz, L. and Sacks, E.. "Unifying kinematics and dynamics for the automatic analysis of machines." 1991
- [7] Nielsen, P.. "A qualitative approach to mechanical devices." In proceedings of the Seventh National Conference on Artificial Intelligence, 1988
- [8] Randell, D. and Cohn, C.. "Exploring naive topology: Modelling force pump," In Proceedings of the Third International Qualitative Physics Workshop, 1989
- [9] Stahovich, T., Davis, R., and Shrobe, H.. "Generating Multiple New designs from a sketch," In proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence, 1022-1029, 1996