

(論 文)

무계중심 복합구간에 의한 정성 추론 기법에 관한 연구

박천경* · 김성근**

(1992년 3월 17일 접수)

A Study on the Methodology of Qualitative Reasoning Using Centroid-Oriented Composite Interval

Chun Kyung Park and Seong Keun Kim

Key Words : Qualitative Reasoning(정성 추론), Qualitative Simulation(정성 시뮬레이션), Model Based Expert System(모델 기반 전문가 시스템), Interval Arithmetics(구간 연산)

Abstract

Qualitative models in model-based expert system needs modeling paradigm which provides intelligent control of modeling assumptions and extracts robust inferences without quantitative information about the system to be modeled. Qualitative reasoning methodologies has proved the property of the completeness but not the soundness to the corresponding quantitative model. We propose new methodology of qualitative reasoning by introducing the concept of Centroid-Oriented Composite Interval to improve the soundness problem. Arithmetic operations and equivalence classes were defined to satisfy field axiom, order axiom and the appropriate state transition rules were composed using this definition. Qualitative simulation results were compared to Kuipers's results and the improvements in the soundness problem is verified.

1. 서 론

기존의 전문가 시스템은 지식을 표현하는데 있어서 직관적인 연결관계(heuristic mapping)를 주로 사용하여 왔다. 이러한 방식은 시스템 상태변수나 성질간의 관계에 대한 지식을 어떠한 구조나 인과관계를 근거로 해서 구성하는 방식이 아니라, 전문가의 직관에 의하여 블랙 박스 형식으로 연결시키는 것이다.

그러나 기존의 공학분야에서는 정량적 모델이 유

용하게 사용되고 있기 때문에, 이러한 연결관계를 이용한 기존의 방식만을 적용하는 것보다는 모델의 정확한 인과관계를 함께 사용하여 모델 기반 전문가 시스템을 구성하는 것이 효과적이다.

이러한 모델 기반 전문가 시스템에 사용될 수 있는 모델이기 위해서는, 모델의 내부에서 지능적인 추론과정이 가능해야 한다. 그러나 기존의 정량적인 모델은 수치적으로 매우 정확하나 이러한 내부 추론과정이 어렵게 되어 있기 때문에 다소의 모델링 정확도를 희생하더라도 지능적인 추론을 가능하게 하는 모델로 구성되어야 한다. 또한 정확한 수치정보가 없는 상황에서도 견실한 추론(robust inference)을 할 수 있어야 한다. 이러한 모델링

*정회원, 서울대학교 기계설계학과

**서울대학교 기계설계학과 대학원

방식의 연구분야를 지칭하는 것이 정성 추론, 상식 추론, 정성 물리학, 정성 시뮬레이션 등이다.⁽¹⁾

그러나 기존의 연구결과에서는 하나의 정성 시스템 모델링에 대하여 정성시뮬레이션을 행하였을 때 정량 시뮬레이션 결과와는 다른 여러개의 해가 존재하는 결과가 보여지고 있다. 본 연구에서는 이러한 결과가 구간연산에 포함되는 의존구간 문제와⁽²⁾ 상태변동이 구간간의 단순한 연속성 개념에 의해서만 정의되고, 그리고 미분관계를 정의하는 구속방정식이 단순히 +, -, 0의 부호에만 의존하고 있기 때문이라고 판단하고, 이 문제를 새로운 구간 개념과 상태변동 규칙을 정의함으로써 해결하고자 시도하였다.

본 논문의 출발점은 단순한 구간대신에 구간내에 제한된 형태의 가능성 분포를 갖는 복합구간으로 확장하는 것이다. 그리고 이러한 가능성 분포는 퍼지 집합이론에서 사용되는 것처럼 일반적인 분포형태⁽³⁾ 전체를 사용하는 것이 아니라, 가능성 분포의 무게중심만 정의하고 이 무게중심과 구간경계만을 사용하여 시스템 변수가 갖는 정성값을 나타낸다. 이를 바탕으로 새로운 상태변화와 그 규칙을 정의함으로써 정성 모델링과 시뮬레이션을 할 수 있는 정성 수학을 공식화하였다. 이와 같은 방식으로 구한 정성 모델과 추론방법으로 기존의 논문에 나와 있는 시뮬레이션 결과와 비교하여 본 논문에서 제시한 정성해의 논리적 건전성(soundness)을 보였다.

앞으로 시스템이 복잡해짐에 따라 기존의 정량 모델링만을 사용하는 대신에 정성 모델링과 정량 모델링을 결합한 방식이 유용하게 사용될 것이다. 본 논문에서 제시된 정성 모델링의 기법은 모델 기반 전문가 시스템 분야만 아니라 일반적으로 정성 정보를 사용하는 모든 시스템의 모델링과 해석에 적용될 수 있는 일반화된 기법으로 사용될 수 있다.

2. 정성 추론 이론

2.1 정성 추론 연구의 개요

정성변수값은 그변수의 수량공간(quantity space)에 의하여 결정된다. 수량공간은 순서가 정해진 기준점(landmark value)들의 집합으로 정의 된다. 기준점은 변수의 부호가 바뀌는 0값, 임계점, $+\infty$, $-\infty$ 등의 경계점등으로 구성된다.

이렇게 정의된 수량공간에서는 정성 변수값들은 이러한 기준점과의 상대적 순서 비교(ordered relation)에 의해서 그 값을 가지게 되는데, 예를 들어 기준점을 0(zero) 하나만을 갖는 수량공간에서는 모든 변수값은 0보다 크던지, 0와 같던지, 또는 0보다 작던지의 관계에 의하여, [+ , 0, -]의 세 가지중 하나의 값을 가지게 된다. 이러한 경우에 정량적 연산과는 특이한 점이 [+][+][+]의 산술연산이 부정값을 갖는다는 점이며, 이 때문에 정성적 산술연산에서는 하나의 해가 아닌 다수의 해가 존재할 수 있게 된다.

정성추론 연구에서 현재 주목을 받고 있는 중요한 기법으로서는

- 요소를 기반으로 하는 de Kleer등의 방법⁽⁴⁾
- 정성 과정(qualitative process)에 의한 Forbus의 방법⁽⁵⁾
- 관계를 기반으로 하는 방법
- 표준 수학 모델을 사용하는 Kuipers의 QSIM^(6,7,8,9)
- 비표준 수학 모델을 사용하는 Weld의 과장기법(exaggeration)⁽¹⁰⁾
- 결합을 기반으로 하는 방법(consolidation)등이 있다.⁽¹¹⁾

또한 Struss는 구간수학을 이용하여 기존의 정성 모델링을 수학적으로 분석하여 공식화 하였다.⁽¹²⁾ Kalagnanam등은 기존의 정성 추론 모델링을 분석하여 시스템 이론의 적용가능성을 검토하는 연구 결과를 발표하였다.⁽¹³⁾ Fishwick는 시스템 이론의 측면에서 정성 모델링을 분석하고 시스템 이론과의 연관성을 설명하였으며,⁽¹⁴⁾ Ishida는 정성 회로망을 통하여 정성 추론 시스템을 구성하는 방법을 제시하였다.⁽¹⁵⁾ Sykes등은 실제의 시스템요소의 회로망을 단위 전문가 시스템의 회로망으로 대처하는 구성을 제시하였다.⁽¹⁶⁾

2.2 정성 수학과 정량 수학의 관계

정량적 방정식과 그 해, 정성적 방정식과 그 해의 관계를 설정하기 위해 Fig. 1과 같이 정의하기로 한다.

- D_{quant} : n 개의 실수변수로 구성된 정량 방정식의 공간
- $sol_{quant} : D_{quant} \rightarrow P(R^n)$: 정량 방정식으로부터의 정량해로의 매핑
- D_{qual} : n 개의 정성 변수로 구성된 정성 방정식

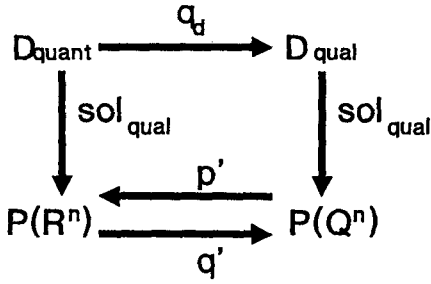


Fig. 1 Relations between quantitative and qualitative space

의 공간

- $sol_{qual} : D_{qual} \rightarrow P(Q^n)$: 정성 방정식으로부터의 정성해로의 매핑
- $q_d : D_{quant} \rightarrow D_{qual}$: 정량 방정식으로부터의 정성 방정식에서의 매핑
- $q' : P(R^n) \rightarrow P(Q^n)$: n 차원 실수 공간으로부터 n 차원 수량 공간으로의 매핑
- $p' : P(Q^n) \rightarrow P(R^n)$: n 차원 수량 공간으로부터 n 차원 실수 공간으로의 매핑

이상의 정의로부터 정량해와 관련되어 정성 모델과 그 해법의 옳음이 입증되기 위해서는 다음의 3가지의 성질을 만족하여야 하지만 기존의 기법에서는 완전성은 만족되지만 견실성과 안정성은 만족되지 못하고 있다.

① 완전성(completeness) : 정성해는 정량해를 모두 포함한다.

$$\forall d_{quant} \in D_{quant} \quad q'(sol_{quant}(d_{quant})) \subseteq sol_{qual}(q_d(d_{quant}))$$

② 견실성(soundness) : 정성해에 대응하는 정량해가 반드시 존재한다.

$$\forall d_{quant} \in D_{quant} \quad \forall s_{qual} \in sol_{quant}(q_d(d_{quant})) \quad p'(s_{qual}) \cap sol_{quant}(d_{quant}) \neq \emptyset$$

③ 안정성(stability) : 방정식의 변환에도 동일한 해를 갖는다.

두 정량 방정식 d, d' 사이에 변환이 존재하는 관계 \sim_r 에 대하여 $d_{quant} \sim_r d'_{quant} \Rightarrow sol_{qual}(q_d(d_{quant})) = sol_{qual}(q_d(d'_{quant}))$

2.3 정성 시뮬레이션

Kuipers의 이론을 기준으로 정성 시뮬레이션을 구성하면 다음과 같다.⁽⁷⁾

(1) 합리적 함수(reasonable function)의 정의

모든 $[a,b] \subseteq R^*$ 에 대하여 다음의 성질을 만족하면 함수 $f : [a,b] \rightarrow R^*$ 를 합리적 함수라 하고 각 정성변수를 시간에 대한 합리적 함수로 구성한다.

- f 는 $[a,b]$ 에서 연속이다.
- f 는 (a,b) 에서 연속으로 미분가능하다.
- f 는 유한구간에서 유한한 갯수의 임계점(critical point)을 갖는다.
- $\lim_{t \rightarrow a} f'(t)$ 와 $\lim_{t \rightarrow b} f'(t)$ 가 R^* 에서 존재한다.

(2) 기준점 및 구분시간의 정의

정성변수 $f : [a,b] \rightarrow R^*$ 에 대하여 기준점들의 유한집합이 존재하게 된다. 이 집합에는 $0, f(a), f(b), \infty, -\infty$ 이 포함되게 되며 각 변수의 임계점들이 포함된다. 또한 f 가 합리적 함수일 때, t 가 $\{t \in [a,b] | f(t) = x, x \text{는 } f \text{의 기준점}\}$ 집합의 경계점일때 t 를 구분시간(distinguished time)이라 정의한다.

(3) 정성값의 정의

합리적 함수 $f : [a,b] \rightarrow R^*$ 의 기준점들이 $1_1 < \dots < 1_k$ 으로 주어졌을 때, 시간 t 에서의 f 의 정성상태값 $Q(f, t)$ 는 일반적으로 $\langle qual, qdir \rangle$ 으로 나타낸다.

$$qual = \begin{cases} 1_j & \text{if } f(t) = 1_j, \text{ 즉 기준점,} \\ (1_j, 1_{j+1}) & \text{if } f(t) \in (1_j, 1_{j+1}); \end{cases}$$

$$qdir = \begin{cases} inc & \text{if } f'(t) > 0, \\ std & \text{if } f'(t) = 0, \\ dec & \text{if } f'(t) < 0. \end{cases}$$

$a = t_1 < \dots < t_n = b$ 가 f 의 구분시간이라 할 때, $s, t \in (a,b)$ 이고 어떤 i 에 대하여, $t_i < s < t < t_{i+1}$ 이면 $QS(f, t) = QS(f, s)$ 이다. 즉 구분시간의 단위구간 내에서는 f 의 정성상태값이 동일하다.

(4) 상태변환 규칙

상태변환으로는 시간진행이 점에서 구간으로 이동(P-transition)하는 것과 구간에서 점으로 이동(1-transition)하는 것으로 나누어질 수 있다. 각 상태변환 규칙은 연속성의 원칙과 중간값 정리에 의하여 얻어진다.

(5) 정성적 구속방정식

정성적 구속방정식은 함수의 형태보다 술부(predicate)의 형태로서 표현하게 된다. 구속방정식의 유형과 각기 대응되는 정량 방정식은 다음과 같다.

① 일반 관계 구속 방정식

$$\bullet \text{ ADD}(f.g.h) : f(t) + g(t) = h(t)$$

- MINUS(f,g) : f(t) = -g(t)
- MULT(f,g,h) : f(t) × g(t) = h(t)
- DIV(f,g,h) : f(t) ÷ g(t) = h(t)
- DERIV(f,g) : f'(t) = g(t)
- CONST(f) : ∀t f(t) = constant

② 정성관계 구축 방정식

- M⁺(f,g) : ∃H s.t. {f(t)=H(g(t)), ∀x H'(x) > 0}
- M⁻(f,g) : ∃H s.t. {f(t)=H(g(t)), ∀x H'(x) < 0}

3. 복합구간 개념에 의한 정성추론

3.1 복합구간의 개념정의

(1) 복합구간의 요소

기준점의 집합을

$$B = \{a | a \in R', \text{ 임계구간의 경계점}, R' = R \cup \{-\infty, \infty\}, \{-\infty, 0, \infty\} \subset B$$

으로 정의되는 유한집합 B로 한다. 또한 f가 합리적 함수일 때, t가 {t ∈ [a,b] | f(t) = x, x는 f의 기준점} 집합의 경계점일때 t를 구분시간으로 정의한다.

정성변수로 사용되는 합리적 함수 f : [a,b] → R*의 기준점들이 1₁ < ... < 1_k으로 주어졌을 때, 시간 t에서의 f의 정성상태값 Q(f, t)는 ⟨qval, qdir⟩으로 나타내며, qval과 qdir의 개념을 확장하여 다음과 같이 새롭게 정의하고자 한다.

qval = 무게중심 개념에 의한 복합구간

$$qdir = \begin{cases} P_LARGE & (f' \text{이 큰 양수 일때}) \\ P_NORMAL & (f' \text{이 보통 양수 일때}) \\ P_SMALL & (f' \text{이 작은 양수 일때}) \\ ZERO & (f' \text{이 } 0 \text{에 가까울 때}) \\ N_SMALL & (f' \text{이 작은 음수 일때}) \\ N_NORMAL & (f' \text{이 보통 음수 일때}) \\ N_LARGE & (f' \text{이 큰 음수 일때}) \end{cases}$$

무게중심 개념에 의한 복합구간의 집합은 다음과 같이 정의한다.

$$I_B = \{ \langle (a,b), \text{ctroid}, p_{a-b} \rangle | \text{ctroid} \in R, a \leq \text{ctroid} \leq b, a, b, c \in B, a < b, \exists c \ a < c < b, p_{a-b} \in P \}$$

$$\cup \{ \langle (a,a), \text{ctroid}, p_1 \rangle | \text{ctroid} \in R, a = \text{ctroid}, a \in B \setminus (-\infty, \infty), p_1 \in P \}$$

P는 가능성 분포의 집합으로서 p_{a-b} ∈ P는 p_{a-b}



Fig. 2 Types of composite interval

(x) : {x|x ∈ R, a < x < b} → {y : y ∈ R, 0 ≤ y ≤ 1}의 편 연속 함수이다.

P의 함수유형을 다양하게 구성할 수 있으나, 정성 모델링과 추론의 효율성을 위해서 p가 제한된 유형만을 갖게되는 유한집합으로 구성하고자 한다. 본 연구에서는 일차적으로 Fig. 2의 P_L, P_C, P_R, P₁, P₀ 다섯 가지 유형을 사용하며 각 유형의 소속함수는 구간경계내에서는 다음과 같이 정의된다.

$$p_{a-b,l}(a) = \frac{1}{a-b}(a-a) + 1$$

$$p_{a-b,c}(a) = \begin{cases} \frac{2}{a-b}(a - \frac{a+b}{2}) + 1 & a \geq \frac{a+b}{2} \\ \frac{2}{b-a}(a-a) & a < \frac{a+b}{2} \end{cases}$$

$$p_{a-b,r}(a) = \frac{1}{(b-a)}(a-a)$$

$$p_{a-b,1}(a) = 1 \text{ (정상 구간)}$$

$$p_{a-b,0}(a) = 0 \text{ (null interval)}$$

(2) 복합구간의 연산과 순서의정의

실수 해석학에서 사용되는 필드 공리는 다음과 같다.⁽¹⁷⁾

- A1 : x + y = y + x
- A2 : (x + y) + z = x + (y + z)
- A3 : ∃ 0 ∈ R s.t. ∀ x ∈ R x + 0 = x
- A4 : ∀ x ∈ R ∃ ! w ∈ R s.t. x + w = 0
- A5 : x × y = y × x
- A6 : (x × y) × z = x × (y × z)
- A7 : ∃ 1 ∈ R s.t. ∀ x ∈ R x × 1 = x
- A8 : ∀ x ∈ R / 0 ∃ ! w ∈ R s.t. x × w = 1
- A9 : x × (y + z) = x × y + x × z

순서공리는 양의 실수집합 P를 기준으로 다음과 같이 정의 된다.⁽¹⁷⁾

- B1 : (x, y ∈ P) ⇒ x + y ∈ P
- B2 : (x, y ∈ P) ⇒ x × y ∈ P
- B3 : (x ∈ P) ⇒ -x ∉ P
- B4 : (x ∈ P) ⇒ (x = 0) ∨ (x ∈ P) ∨ (-x ∈ P)

본 연구에서는 실수 해석학에서 사용되고 있는 모든 이론과 방법들을 정성 추론에서 사용하기 위

하여 필드 공리, 순서 공리, 완전성 공리 및 메트릭 정의를 만족시키도록 연산정의를 구상하여 다음의 4개의 연산정의를 대한 검토를 하였다.

① (CIO_1) : Composite Interval Operation_1
 구간경계는 구간의 일반연산으로 구한 것에 가장 가까운 기준점으로 하고, 가능성 분포는 삼각 퍼지 숫자를 이용하여 구한 규칙에 따른다.

② (CIO_2) : Composite Interval Operation_2
 무계중심에 의한 연산을 하여 연산 결과의 무계중심을 구한후, 구간경계는 구간의 일반연산으로 구하고, 가능성 분포는 무계중심과 구간경계와의 관계에 따라 구한다.

③ (CIO_3) : Composite Interval Operation_3

무계중심에 의한 연산을 하여 연산 결과의 무계중심을 구한후, 구간경계는 구간의 일반연산으로 구한 것에 가장 가까운 기준점으로 하고, 가능성 분포는 무계중심과 구간경계와의 관계에 따라 구한다.

④ (CIO_4) : Composite Interval Operation_4
 무계중심에 의한 연산을 하여 연산 결과의 무계중심을 구한후, 구간경계는 무계중심에서 가장 가까운 기준점으로 하고, 가능성 분포는 무계중심과 구간경계와의 관계에 따라 구한다.

동치관계(equivalence class)의 정의는 다음의 4가지 경우의 가능성에 대하여 검토하였다. $I_1 = \langle (a, b), \delta, p_1 \rangle \in I_B, I_2 = \langle (c, d), \zeta, p_2 \rangle \in I_B$ 에 대하여 다

Table 1 Test results of A1, A2, A3, A4 axiom

EQV_1		CIO_1	CIO_2	CIO_3	CIO_4
EQV_1	A1 axiom	True	True	True	True
	A2 axiom	False	True	True	True
	A3 axiom	True	True	True	True
	A4 axiom	not unique	True	True	True
EQV_2		CIO_1	CIO_2	CIO_3	CIO_4
EQV_2	A1 axiom	True	True	True	True
	A2 axiom	False	True	True	True
	A3 axiom	True	True	True	True
	A4 axiom	Not unique	False	False	True
EQV_3		CIO_1	CIO_2	CIO_3	CIO_4
EQV_3	A1 axiom	True	True	True	True
	A2 axiom	False	True	True	True
	A3 axiom	True	True	True	True
	A4 axiom	False	False	False	True
EQV_4		CIO_1	CIO_2	CIO_3	CIO_4
EQV_4	A1 axiom	True	True	True	True
	A2 axiom	False	True	True	True
	A3 axiom	True	True	True	True
	A4 axiom	False	False	False	True

음과 같은 정의로 시도하였다.

① 무게중심이 동일함 [EQV_1]

$$(I_1=I_2) \Leftrightarrow (\delta=\zeta).$$

② 무게중심이 같고 가능성 분포가 동일함 [EQV_2]

③ 구간의 경계가 동일함 [EQV_3]

$$(I_1=I_2) \Leftrightarrow (a=b \text{ and } c=d).$$

④ 구간의 경계가 같고 가능성 분포가 동일함 [EQV_4]

$$(I_1=I_2) \Leftrightarrow (a=b \text{ and } c=d \text{ and } p_1=p_2).$$

(3) 정성추론에 적합한 연산과 순서 정의의 선택
이러한 등치관계의 정의와 4가지의 연산정의에
대하여 필드공리 A1(교환법칙), A2(결합법칙),

A3(덧셈에 대한 항등원 존재), A4(덧셈에 대한 역
원 존재)에 대한 검토를 하면 Table 1과 같다. 여
기서 True 해당 공리가 성립함을, 그리고 False
해당 공리가 성립하지 않음을 나타낸다.

모든 공리가 만족되는 경우는 6가지를 얻을 수
있었으나, 적용의 편리성을 고려하여 앞으로 정성
추론모델링에서 연산에는 CIO_4, 등치 클래스에는
EQV_4의 정의를 적용하고자 한다. 이를 정리하면
다음과 같다.

연산정의 : =CIO_4

$$I_1 = \langle (a,b), \delta, p_1 \rangle \in I_B, I_2 = \langle (c,d), \zeta, p_2 \rangle \in I_B \text{ 일 때,}$$

$$\textcircled{1} I_1 + I_2 = \langle (\max\{x \in B : x \leq \delta + \zeta\}, \min\{x \in B : x \geq \delta + \zeta\}), \delta + \zeta, p' \rangle$$

Table 2 PI transition : from time-point to time-interval

PI tran- sition	QS(f, ((t _i , t _i), p _i))	QS(f, ((t _i , t _{i+1}), p))
PI_1	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , ZERO⟩	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , ZERO⟩
PI_2	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , ZERO⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_ANY⟩
PI_3	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , ZERO⟩	⟨(1 _{j-1} , 1 _j), P _R , N_ANY⟩
PI_4	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , P_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_ANY⟩
PI_5	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , P_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_ANY⟩
PI_6	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , P_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_ANY⟩
PI_7	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , N_SMALL⟩	⟨(1 _{j-1} , 1 _j), P _R , N_ANY⟩
PI_8	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , N_NORMAL⟩	⟨(1 _{j-1} , 1 _j), P _C , N_ANY⟩
PI_9	⟨(1 _j , 1 _j), P _i , N_LARGE⟩	⟨(1 _{j-1} , 1 _j), P _L , N_ANY⟩
PI_10	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_SMALL⟩
PI_11	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_NORMAL⟩
PI_12	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_LARGE⟩
PI_13	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_SMALL⟩
PI_14	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_NORMAL⟩
PI_15	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_LARGE⟩
PI_16	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_SMALL⟩
PI_17	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j-1}), P _R , P_NORMAL⟩
PI_18	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_LARGE⟩
PI_19	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_SMALL⟩
PI_20	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_NORMAL⟩
PI_21	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_LARGE⟩
PI_22	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_SMALL⟩
PI_23	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_NORMAL⟩
PI_24	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_LARGE⟩
PI_25	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_SMALL⟩
PI_26	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_NORMAL⟩
PI_27	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_LARGE⟩

Table 3 IP transition : from time-interval to time-point

IP tran- -sition	QS(f, ((t _i , t _{i+1}), p))	QS(f, ((t _{i+1} , t _{i+1}), p _i))
IP_1	⟨(1 _j , 1 _j), P ₁ , ZERO⟩	⟨(1 _j , 1 _j), P ₁ , ZERO⟩
IP_2	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_SMALL⟩	⟨(1 _* , 1 _*), P ₁ , ZERO⟩
IP_3	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_NORMAL⟩	⟨(1 _* , 1 _*), P ₁ , ZERO⟩
IP_4	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_SMALL⟩	⟨(1 _* , 1 _*), P ₁ , ZERO⟩
IP_5	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_SMALL⟩	⟨(1 _* , 1 _*), P ₁ , ZERO⟩
IP_6	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_SMALL⟩	⟨(1 _* , 1 _*), P ₁ , ZERO⟩
IP_7	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_NORMAL⟩	⟨(1 _* , 1 _*), P ₁ , ZERO⟩
IP_8	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_SMALL⟩
IP_9	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_NORMAL⟩
IP_10	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_LARGE⟩
IP_11	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_SMALL⟩
IP_12	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_NORMAL⟩
IP_13	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_LARGE⟩
IP_14	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_SMALL⟩
IP_15	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_NORMAL⟩
IP_16	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_LARGE⟩
IP_17	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_SMALL⟩
IP_18	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_NORMAL⟩
IP_19	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_LARGE⟩
IP_20	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_SMALL⟩
IP_21	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_NORMAL⟩
IP_22	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , N_LARGE⟩
IP_23	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_SMALL⟩
IP_24	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_NORMAL⟩
IP_25	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , N_LARGE⟩
IP_26	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_SMALL⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , ZERO⟩
IP_27	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_SMALL⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , P_ANY⟩
IP_28	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_NORMAL⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , ZERO⟩
IP_29	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_NORMAL⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , P_ANY⟩
IP_30	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_LARGE⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , ZERO⟩
IP_31	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _R , P_LARGE⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , P_ANY⟩
IP_32	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P ₁ , ZERO⟩
IP_33	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_NORMAL⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , P_ANY⟩
IP_34	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_LARGE⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , ZERO⟩
IP_35	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _C , P_LARGE⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , P_ANY⟩
IP_36	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P ₁ , ZERO⟩
IP_37	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , P_LARGE⟩	⟨(1 _{j+1} , 1 _{j+1}), P ₁ , P_ANY⟩
IP_38	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _j), P ₁ , ZERO⟩
IP_39	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_SMALL⟩	⟨(1 _j , 1 _j), P ₁ , N_ANY⟩
IP_40	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _j), P ₁ , ZERO⟩
IP_41	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_NORMAL⟩	⟨(1 _j , 1 _j), P ₁ , N_ANY⟩
IP_42	⟨(1 _j , 1 _{j+1}), P _L , N_LARGE⟩	⟨(1 _j , 1 _j), P ₁ , ZERO⟩

IP_43	$\langle (1_j, 1_{j+1}), P_L, N_LARGE \rangle$	$\langle (1_j, 1_j), P_1, N_ANY \rangle$
IP_44	$\langle (1_j, 1_{j+1}), P_C, N_NORMAL \rangle$	$\langle (1_j, 1_j), P_1, ZERO \rangle$
IP_45	$\langle (1_j, 1_{j+1}), P_C, N_NORMAL \rangle$	$\langle (1_j, 1_{j+1}), P_1, N_ANY \rangle$
IP_46	$\langle (1_j, 1_{j+1}), P_C, N_LARGE \rangle$	$\langle (1_j, 1_j), P_1, ZERO \rangle$
IP_47	$\langle (1_j, 1_{j+1}), P_C, N_LARGE \rangle$	$\langle (1_j, 1_j), P_1, N_ANY \rangle$
IP_48	$\langle (1_j, 1_{j+1}), P_R, N_LARGE \rangle$	$\langle (1_j, 1_j), P_1, ZERO \rangle$
IP_49	$\langle (1_j, 1_{j+1}), P_R, N_LARGE \rangle$	$\langle (1_j, 1_j), P_1, N_ANY \rangle$

② $I_1 - I_2 := \langle (\max\{x \in B : x \leq \delta - \zeta\}, \min\{x \in B : x \geq \delta - \zeta\}), \delta - \zeta, p' \rangle$

③ $I_1 \times I_2 := \langle (\max\{x \in B : x \leq \delta \times \zeta\}, \min\{x \in B : x \geq \delta \times \zeta\}), \delta \times \zeta, p' \rangle$

④ $I_1 / I_2 := \langle (\max\{x \in B : x \leq \delta / \zeta\}, \min\{x \in B : x \geq \delta / \zeta\}), \delta / \zeta, p' \rangle$

p' 는 $I = \langle (a, \beta), \gamma, p' \rangle$ 의 경우에 다음과 같이 구한다.

- $p' = p_0$ if $(\gamma > \beta$ or $\gamma < a)$
- $= p_l$ elseif $(a = \beta = \gamma)$
- $= p_L$ elseif $(0 \leq (\gamma - a) / (\beta - a) \leq 1/3)$
- $= p_C$ elseif $(1/3 < (\gamma - a) / (\beta - a) < 2/3)$
- $= p_R$ elseif $(2/3 \leq (\gamma - a) / (\beta - a) \leq 1)$

등치 클래스 정의 : $=EQV_4$

$(I_1 = I_2) \Leftrightarrow (a = b \text{ and } c = d \text{ and } p_1 = p_2)$.

3.2 복합구간에 의한 상태변환 규칙

앞절에서 정의한 연산 규칙과 등치관계를 바탕으로 연속성 원칙과 중간값의 정리를 사용하여 상태변환 규칙을 정의하면 다음과 같다.

① PI 변환 : 점에서 구간 사이의 시간으로의 변환으로 Table 2에 나타내었다.

② IP 변환 : 구간 사이에서 점의 시간으로의 변환으로 Table 3에 나타내었다.

3.3 구속방정식의 일관성 검사 규칙

(1) 정성 연산 구속 방정식

다음의 구속방정식을 만족하는 조건에서 미분값에 대해서는 qdir의 연산이 수학적으로 정확히 정의되기 어려우므로 $\{+, 0, -\}$ 의 시맨틱(semantic)을 사용한다. 어떠한 정성관계의 관계 기준값은 그 정성관계에 대하여 항상 만족되는 정량값이다. 예를 들어 $ADD(f, g, h)$ 의 정성관계가 있을 때, f 가 p 이고 g 가 q 일때, h 는 항상 r 의 값을 가지게 된다. $ADD(f, g, h)$ 의 관계 기준값은 (p, q, r) 인 것이

다.

① ADD 구속방정식 : $ADD(f, g, h)$

(f, g, h) 의 관계기준값(corresponding values) : (p, q, r)

$BOUNDARY\{[f-p] + [g-q]\} = BOUNDARY\{[h-r]\}$

$POSS_FUNC\{f-p\} + [g-q] = POSS_FUNC\{[h-r]\}$

② MULT 구속방정식 : $MULT(f, g, h) : (f, g, h)$ 의 관계기준값 : (p, q, r)

$BOUNDARY\{[f/p] * [g/q]\} = BOUNDARY\{[h/r]\}$

$POSS_FUNC\{[f/p] * [g/q]\} = POSS_FUNC\{[h/r]\}$

③ DIV 구속방정식 : $DIV(f, g, h) : (f, g, h)$ 의 관계기준값 : (p, q, r)

$BOUNDARY\{[f/p] / [g/q]\} = BOUNDARY\{[h/r]\}$

$POSS_FUNC\{[f/p] / [g/q]\} = POSS_FUNC\{[h/r]\}$

④ MINUS 구속방정식 : $MINUS(f, g)$

$BOUNDARY\{[f]\} = BOUNDARY\{[-g]\}$

$POSS_FUNC\{[f]\} = POSS_FUNC\{[-g]\}$

⑤ SQUARE 구속방정식 : $SQUARE(f, g)$

$BOUNDARY\{[f] * [f]\} = BOUNDARY\{[g]\}$

$POSS_FUNC\{[f] * [f]\} = POSS_FUNC\{[g]\}$

(2) 정성 함수관계 구속 방정식

① DERIV 구속방정식 : $DERIV(f, g)$

② g 의 기준점이 $\{-\infty, 0, \infty\}$ 외에 $1^* > 0, 1^{**} < 0$ 의 기준점만 갖는 경우에는 다음의 조건으로 한다.

$[qdir(f) = P_LARGE] \Leftrightarrow [g = \langle (0, 1^*), P_R \rangle]$

$[qdir(f) = P_NORMAL] \Leftrightarrow [g = \langle (0, 1^*), P_C \rangle]$

$[qdir(f) = P_SMALL] \Leftrightarrow [g = \langle (0, 1^*), P_L \rangle]$

- [qdir(f)=ZERO] $\Leftrightarrow [g = \langle (0, 0), P_i \rangle]$
- [qdir(f)=N_SMALL] $\Leftrightarrow [g = \langle (1^{**}, 0), P_R \rangle]$
- [qdir(f)=N_NORMAL] $\Leftrightarrow [g = \langle (1^{**}, 0), P_C \rangle]$
- [qdir(f)=N_LARGE] $\Leftrightarrow [g = \langle (1^{**}, 0), P_L \rangle]$

⑥ 기타의 경우는 ④와 같이 하되
 $1^* = \max\{x : x \in B / \{-\infty, 0, \infty\}\}$
 $1^{**} = \min\{x : x \in B / \{-\infty, 0, \infty\}\}$ 으로 한다.

- ② MONO⁺(f,g) : (f,g)의 관계기준값 : (p,q)
 BOUNDARY{[f-p]} = BOUNDARY{[g-q]}
 POSS_FUNC{[f-p]} = POSS_FUNC{[g-q]}
 DERIV{f} = DERIV{g}
- ③ MONO⁻(f,g) : (f,g)의 관계기준값 : (p,q)
 BOUNDARY{[f-p]} = -BOUNDARY{[g-q]}
 POSS_FUNC{[f-p]} = POSS_FUNC{-[g-q]}
 DERIV{f} = -DERIV{g}

4. 정성 추론 시스템

4.1 정성 추론의 기본 알고리즘

정성 시뮬레이션 시스템의 흐름에 대하여 개괄적으로 나타내면 Fig. 3과 같다.

정성 추론의 기본 알고리즘을 단계별로 설명하면 다음과 같다.

단계0 : 시스템 초기화 과정을 수행한다. 정성함수, 구속방정식과 수량공간을 설정하며, 시뮬레이션에 필요한 자원을 할당한다.

단계1 : active path로부터 적절한 하나의 노드를 선택한다. 노드는 경로 트리에서 깊이 우선 탐색으로 선택한다.

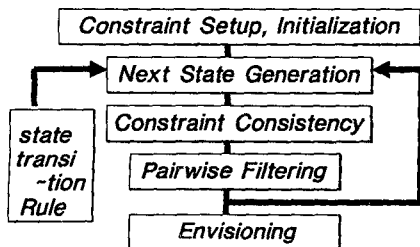


Fig. 3 System flow in qualitative reasoning

단계2 : 선택된 노드로부터 시스템 현재 상태를 설정한다.

단계3 : 각 함수별로 현재 정성적 상태에서부터 가능한 상태이동을 구한다. $f_i, i=1, \dots, k$ 의 함수에서 n_i 개수의 상태이동이 일어졌다면, 현재 상태에서 가능한 상태이동은

$X_1 \times X_2 \cdots X_{k-1} \times X_k, \text{cad}(X_i) = n_i$ 의 카아티전 곱 (cartesian product)의 한 원소로 설명되며, 이 카아티전 곱의 모든 원소에 대하여 논리 일관성을 검토하게 된다.

단계4 : 각기 구속방정식의 인자에 단계3에서 얻어진 정성함수 값의 카아티전 곱에서 하나씩 추출하여 대입하고 논리적 일관성 검사를 하여 모순이 되는 것은 카아티전 곱의 원소가 아닌것으로 표시한다.

단계5 : 구속방정식중에 공유된 함수를 갖고 있는 구속방정식들에 대하여 각기의 상태 이동된 값이 공통적으로 존재하지 않는 원소를 삭제한다.

단계6 : 남은 카아티전 곱의 원소를 새로운 후속 상태로 하여 시스템 전체적인 해석을 하여 타당한 이동이면 노드 데이터에 지정을 하고, 후속상태가 복수이면 새로운 노드를 구성하고 단계 1로 돌아간다.

단계7 : 전체 시스템 거동에 대한 해석을 한다.

CENTROID-복합구간의 연산정의를 기반으로 하는 정성 추론 시스템의 실제 프로그래밍은 프로그래밍 구조 및 관리가 용이하게 적용될 수 있는 객체 지향 프로그래밍(object oriented programming)의 원칙을 적용하여 C++언어로 작성되었다.

4.2 정성 추론 시스템의 적용

1자유도의 질량-스프링 시스템에 대해서, 기존의 연구결과중 가장 수학적으로 잘 구성된 Kuipers의 논문에서 제시된 정성 시뮬레이션 결과⁽⁷⁾와 본 논문에서 제시한 복합구간에 의한 정성 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

질량-스프링 시스템의 정성변수로는 변위 X , 속도 V , 가속도 A 가 있으며 정성 관계로는 $dX/dt = V$ 를 나타내는 DERIV(X, V), $dV/dt = A$ 를 나타내는 DERIV(V, A), 그리고 후크의 법칙 힘 $F = -KX = MA$ 를 나타내는 MONO⁻(X, A)가 주어지게 된다.

이러한 시스템에 대하여 질량의 초기속도 V^* 가

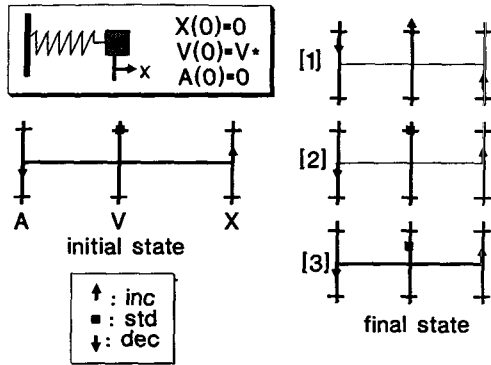


Fig. 4 Simulation result of mass-spring system (QSIM)

주어지고 변위와 가속도는 0 값의 초기조건을 가질 때, 질량이 한 바퀴 돌아와서 제자리로 올 때에 그 속도는 원래의 초기값과 동일한가 또는 큰가 아니면 작은가에 대한 결과를 추론하고자 하는 것이다. Kuipers의 QSIM에 의한 탐색 공간으로 구성하면⁽⁷⁾ 구분시간이 t_0, t_1, t_2, t_3, t_4 로 주어지는데, t_4 에서는 여러개의 상태변화가 존재하게 된다. 그 3가지의 경우는 Fig. 4와 같으며, $V = V^*$ 일때 V^* 가 기준점이므로 V 의 기울기는 0라는 가정을 하면 Fig. 4의 (2), (3)의 두가지 경우가 생기게 된다.

이중에 Fig. 4의 (2)는 실제 시스템의 거동과 일치하는 시뮬레이션 결과이다. 본 연구에서 정의하고 있는 무게중심 복합구간의 개념과 상태변환 규칙을 사용하여, $V = V^*$ 일때 V^* 가 기준점이므로 V 의 기울기는 0라고 가정하고 시뮬레이션하는 과정의 탐색공간은 Table 4와 같이 하였다. 각 정성변수의 기준점의 집합은 $A = \{-\infty, -A_1, 0, A_2, \infty\}$, $V = \{-\infty, -V_1, 0, V^*, \infty\}$ 과 같이 구성하고 정성추론을 하였다. 균일화하기 위하여 A, V, X의 각 기준점의 정량값은 1로하여 정성추론을 수행하였다.

이 결과 출발점 t_0 의 시스템 상태와 t_4 의 상태가 일치함을 볼 수 있다. QSIM의 결과와 본 연구의 무게중심 복합구간을 이용한 정성 추론의 결과를 비교하면 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 QSIM의 결과에서는 $V = V^*$ 일때 V 의 기울기는 0라는 가정을 하면, t_4 의 상태에서의 V 와 t_0 에서의 V 의 관계가

$$\begin{aligned} A(t_0) &= A(t_4), \quad V(t_0) = V(t_4), \\ X(t_0) &= X(t_4) : t_4\text{②} \\ A(t_0) &= A(t_4), \quad V(t_0) > V(t_4), \\ X(t_0) &= X(t_4) : t_4\text{③} \end{aligned}$$

로 도출되어 이 정성 시뮬레이션의 해가 건전하지 못함을 나타내고 있다. 본 연구의 무게중심 복합구간을 이용하고 V^* 를 기준점으로 여기면, 정성해는

Table 4 Searched space of mass-spring system(Composite Interval)

time	t_0	$t_0 \rightarrow t_1$	t_1
A	$\langle\langle 0, 0 \rangle, P_1, N_LARGE \rangle$	$\langle\langle -A_1, 0 \rangle, P_L, N_LARGE \rangle$	$\langle\langle -A_1, -A_1 \rangle, P_1, ZERO \rangle$
V	$\langle\langle V^*, V^* \rangle, P_1, ZERO \rangle$	$\langle\langle 0, V^* \rangle, P_R, N_LARGE \rangle$	$\langle\langle 0, 0 \rangle, P_1, N_LARGE \rangle$
X	$\langle\langle 0, 0 \rangle, P_1, P_LARGE \rangle$	$\langle\langle 0, X_1 \rangle, P_R, P_LARGE \rangle$	$\langle\langle X_1, X_1 \rangle, P_1, ZERO \rangle$
time	$t_1 \rightarrow t_2$	t_2	$t_2 - t_3$
A	$\langle\langle -A_1, 0 \rangle, P_L, P_LARGE \rangle$	$\langle\langle 0, 0 \rangle, P_1, P_LARGE \rangle$	$\langle\langle 0, A_2, 0 \rangle, P_R, P_LARGE \rangle$
V	$\langle\langle -V_1, 0 \rangle, P_L, N_LARGE \rangle$	$\langle\langle -V_1, -V_1 \rangle, P_1, ZERO \rangle$	$\langle\langle -A_1, 0 \rangle, P_L, P_LARGE \rangle$
X	$\langle\langle 0, X_1 \rangle, P_R, N_LARGE \rangle$	$\langle\langle 0, 0 \rangle, P_1, N_LARGE \rangle$	$\langle\langle -X_2, 0 \rangle, P_L, N_LARGE \rangle$
time	t_3	$t_3 \rightarrow t_4$	t_4
A	$\langle\langle A_2, A_2 \rangle, P_1, ZERO \rangle$	$\langle\langle 0, A_2 \rangle, P_R, N_LARGE \rangle$	$\langle\langle 0^*, 0^* \rangle, P_1, N_LARGE \rangle$
V	$\langle\langle 0, 0 \rangle, P_1, P_LARGE \rangle$	$\langle\langle 0, V^* \rangle, P_R, P_LARGE \rangle$	$\langle\langle V^*, V^* \rangle, P_1, ZERO \rangle$
X	$\langle\langle -X_2, -X_2 \rangle, P_1, ZERO \rangle$	$\langle\langle -X_2, 0 \rangle, P_L, P_LARGE \rangle$	$\langle\langle 0, 0 \rangle, P_1, P_LARGE \rangle$

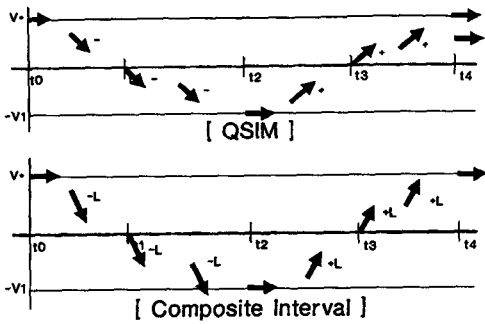


Fig. 5 Qualitative velocity behavior of mass-spring

t_4 만을 도출함으로써 정성해가 건전함을 보여주고 있다.

V^* 를 기준점으로 여길 때, 속도에 대하여 정성값의 변동을 QSIM과 본 논문의 결과를 비교하여 도시하면 Fig. 5와 같다.

QSIM에서 t_4 에서 에너지 보존의 구속방정식을 적용하여 유일해를 구할 수는 있지만, 이것은 모든 정성추론에 사용될 수 있는 일반적인 방법이라 할 수는 없다. QSIM에서는 선형적 거동을 나타내지만, 본 논문의 무계중심 복합구간을 사용하여 정성값을 확장하여 구성한 결과에서는 선형이 아닌 포물선 형태의 거동을 갖게 된다. 이것은 정성값의 확장을 통하여 이차 미분 정보가 반영되는 과정을 나타내는 것이라고 생각되며, 이를 통해 정성추론의 정확성이 향상된 결과라고 판단된다.

5. 결론

모델 기반 전문가 시스템과 정성 해석에 사용될 수 있는 모델링과 시뮬레이션을 위해서 복합구간을 이용한 정성추론 기법을 제시하였다.

복합구간내의 가능성 분포를 대처하는 개념의 무계중심을 정의하고 이 무계중심과 구간경계만을 사용하여 시스템 변수가 갖는 정성값을 나타내도록 구성하였다. 이를 바탕으로 펄드 공리를 만족시키는 연산정의와 등치관계를 정의하였으며, 이에 따라 새로운 상태변화와 그 규칙을 정의함으로써 정성 모델링과 추론을 할 수 있는 정성 수학을 공식화하였다. 이와 같은 방식으로 구한 정성 모델과 추론방법으로 기존의 논문에 나와있는 질량-스프링 시스템의 정성추론 결과와 비교하여 본 논문에서 제시한 정성추론의 방법을 통해 거짓해를 감소시킬

수 있음을 보였다.

참고문헌

- (1) Cohn, A.G., 1987, "Qualitative Reasoning," 2nd Advanced Course in Artificial Intelligence 87.
- (2) Hansen, E.R., 1975, "A Generalized Interval Arithmetic," Proceedings of the International Symposium on Interval Mathematics.
- (3) Dubois, D. and Prade, H., 1980, "Fuzzy Sets and Systems," Mathematics in Science and Engineering, Vol. 144.
- (4) de Kleer, J. and Brown, J.S., 1985, "A Qualitative Physics Based on Confluence," Formal Theories of the Commonsense World, Hobbs, J. R. and Moore, R.C. Eds., Norwood.
- (5) Forbus, K.D., 1985, "The Role of Qualitative Dynamics in Naive Physics," Formal Theories of the Commonsense World, Hobbs, J.R. and Moore, R.C. Eds., Norwood.
- (6) Kuipers, B., 1985, "Limits of Qualitative Simulation," Proceedings of International Joint Conference of AI-85.
- (7) Kuipers, B., 1986, "Qualitative Simulation," Artificial Intelligence, Vol. 29.
- (8) Kuipers, B., 1987, "Qualitative Simulation as Causal Explanation," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol 17, No.2.
- (9) kuipers, B., 1989, "Qualitative Reasoning : Modeling and Simulation with Incomplete Knowledge," Automatica, Vol.25, No.4.
- (10) Weld, D.S., 1990, "Exaggeration," Artificial Intelligence, Vol.43.
- (11) Bylander, T., 1988, "A Critique of Qualitative Simulation from a Consolidation Viewpoint," IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol 18, No.2.
- (12) Struss, P., 1988, "Mathematical Aspects of Qualitative Reasoning," Int. J. of Artificial Intelligence in Engineering, Vol.3, No.3.
- (13) Kalagnanam, J. and Simon, H.A. and Iwasaki Yumi, 1991, "The Mathematical Bases for Qualitative Reasoning," IEEE Expert, April.
- (14) Fishwick, P.A. and Zeigler, B.P., 1990, "Quali-

- tative Physics : Towards the automation of systems problem solving," Proceedings of AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems.
- (15) Ishida, Y., 1988, "An Application of Qualitative Reasoning to Process Diagnosis : Automatic Rule Generation by Qualitative Simulation," Proceedings of The Fourth Conference on A.I. Applications.
- (16) Sykes, D.J. and Cochran, I.K., 1988, "Development of diagnostic expert systems using qualitative simulation," AI and Simulation.
- (17) Apostol, T.M., 1974, "Mathematical Analysis," 2nd ed., Addison-Wesley.